

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONTACTO BASAMENTO/COBERTERA
ENTRE EL ANTICLINAL DE FARALLONES Y EL SINCLINAL DE MEDINA
(BLOQUE EXPLORATORIO CÓNDROR)**

**HEBER JULIAN BUENO PLATA
RICARDO DANIEL VARGAS ARÉVALO
AUTORES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2010**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONTACTO BASAMENTO/COBERTERA
ENTRE EL ANTICLINAL DE FARALLONES Y EL SINCLINAL DE MEDINA
(BLOQUE EXPLORATORIO CÓNDOR)**

Trabajo de investigación para optar al título de
Geólogo

**HEBER JULIAN BUENO PLATA
RICARDO DANIEL VARGAS ARÉVALO**
AUTORES

ANDRÉS ROBERTO MORA BOHÓRQUEZ
Geólogo, PhD. ICP-ECOPETROL S.A.
Director

ELISEO TESÓN DEL HOYO
Geólogo, PhD. ICP-ECOPETROL S.A.
Co-DIRECTOR

NELSON SÁNCHEZ RUEDA
Geólogo.UIS
Co-DIRECTOR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2010

AGRADECIMIENTOS RICARDO

Primero que todo agradecer a mi mami Elvira Arévalo por motivarme cada día y darme entusiasmo en los momentos difíciles y siempre enseñarme a soñar, mi papi Víctor Vargas por siempre motivarme a estudiar y a superarlo, que estando a miles de kilómetros de distancia siempre sentí su apoyo incondicional, a mi hermano Andrés Vargas que día a día me acompañó en el proceso de aprendizaje en la universidad, a mi prima Daniela Cañón por sacarme una sonrisa y darme felicidad, a mi familia y en especial a mi tía Alcira por ayudarme en este difícil camino, a mi abuelita Juanita por sus anécdotas y refranes que me han servido para la vida, a Carlos Fuentes que más que un profesor fue un tío adoptivo a todos ellos gracias por ayudarme y desearme siempre lo mejor en mis proyectos.

También agradecer el esfuerzo y dedicación a mis directores Andrés Mora, Eliseo Tesón, Nelson Sánchez que más que directores han sido profesores y guías en este proceso de enseñanza.

A Andrés por darme la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo y divertirme cada día con sus imitaciones de mexicanos, bumangués y rolos, y apodos como Bucaramanga (Yo) y Eastwood (Heber).

A Eliseo por ser un amigo y todos los días ayudarme a avanzar en mi conocimiento sacando unos segundos del tiempo que no tiene para enseñarme.

A Nelson Sánchez por darme un día la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo, conocer gente y vivir experiencias que durante estos últimos dos años serán inolvidables.

Recordar a muchas personas que aportaron su granito de arena que fue muy valioso y trascendental Alejandro Silva, Jay Namson, Darío Barrero, Mario Patiño, Jaime Castellanos, Wilson Casallas, Andrés Valencia, Juan Carlos Ramírez, Yasmin Pelayo, Lidy Osorio, Miguel Jiménez, Ana Rangel y José Saavedra, a mis compañeros de estudio y amigos Jael Pacheco que me motivo a pertenecer al grupo y siento gran afecto por ella, Paola Enciso, Leydy Valencia, Diego Gómez, Claudia Cárdenas, Gina Rincón, Alicia Caicedo, Gina Rodríguez, Adriana Ortiz, Paola Duarte, Paola Figueroa y con un gran cariño a dos personas que me ayudaron mucho en la culminación de mis materias Erika Esparza y Tania Palmera, a mis amigos incondicionales de infancia Julián Torres, Silvia Tarazona y una persona que a través de su cariño a estado en todo momento para alegrarme cada día gracias Mayra Vargas.

Y indudablemente a mi compañero de proyecto de grado Heber Bueno que en las buenas y en las malas estuvimos juntos para sacar nuestro sueño adelante, que juntos logramos que el frente no desapareciera y así fuera el mejor frente del grupo de investigación.

Agradecer también a las personas que estuvieron con nosotros en campo Mauricio Parra, Miguel Corcioni y a Don Hernán que estando asustado por el conflicto armado que se vivió en la zona me tranquilizaba y guiaba por los ríos y caminos.

A mi tierra “Bucaramanga- La Ciudad Bonita”, a su equipo de futbol, porque en esta ciudad y en su estadio viví, soñé, reí, anhele, compartí, lllore, disfrute maravillosas etapas de mi vida.

A la Universidad Industrial de Santander y principalmente a mis profesores Jorge Rubiano, Luis Carlos Mantilla, Carlos García que siempre sentí que enseñaban y transmitían su conocimiento con toda la energía.

Dar agradecimiento al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y al grupo de investigación (GIE) dirigido por Nelson Sánchez y el profesor Juan Diego Colegial, a mi Neo-profesional más querida Clara Torres (Clarita) y al grupo en general, que como un día lo dije y lo siento han sido y serán mi familia.

AGRADECIMIENTOS HEBER

A Dios por ayudarme a culminar esta etapa tan importante de mi vida, por darme sabiduría y claridad en mis pensamientos, por mostrarme el camino del éxito y así llegar a encontrar la felicidad para mí y mi familia.

A mi Mamá Gloria Elsa Plata quien me dio la vida y me enseñó con su buen ejemplo el resultado del esfuerzo para conseguir lo que deseamos, con su amor incondicional y sacrificio me ayudo a convertir este sueño en realidad. A mi padre José R. Bueno quien con su amor y consejos me ayudaron en momentos difíciles, a mi hermano mi “Negrito” Rogers Bueno que siempre está ahí cuando lo necesito, a mi hermanita Angie Bueno que nunca me ha dejado solo y siempre está pendiente de todo lo que sucede a mi alrededor. A todos mis tíos y tías especialmente Milton, Mercedes y Nelson. A Hermionne mi sobrina y mi cuñada Ingrith Fuentes.

A mi Director Andrés Roberto Mora por darnos la oportunidad de desarrollar este trabajo y aprender tantas técnicas que se aplican en la Geología y mostrarnos que apenas se inicia un largo camino de aprendizaje, por darnos alegrías en momentos difíciles durante el desarrollo de este trabajo (Con sus imitaciones y apodos).

A mi Codirector Eliseo Tesón que nunca nos dejó solos en este trabajo, siempre pendiente de todo, nos ayudó a sacar este proyecto de la mejor forma y nunca nos dejó a un lado, que hay que aplicar “The Occam’s Razor” en algunas ocasiones y llegar a dar solución a los problemas de una forma óptima y competente. A mi Codirector Nelson Sánchez que creyó en nosotros desde el inicio del proceso de formación como Geólogos, siempre pendiente y corrigiendo de la mejor forma y aconsejando para hacer las cosas bien hechas.

Al Grupo de Investigación en Estratigrafía que me dio la oportunidad de realizar este trabajo, por medio del GIE pude conocer los profesionales de Ecopetrol quienes finalmente me guiaron en todo el proceso, a Alberto Ortiz, Hernán Madero, Clara Torres, Erika Calderón, Efraín, Gina Mar, Wendy, Yudys y a todos los integrantes del grupo.

A mi compañero de proyecto Ricardo Vargas “Fish”, que es un excelente Geólogo y amigo, muy trabajador e inteligente, muy paciente, innovador y generando siempre buenas ideas.

A mis amigos de geología que siempre ahí ayudándome en momentos difíciles y con los que compartí alegrías y tristezas, Gabo un amigazo, Llamosa, Erich, Leydy, Camilo, Aura U, Diego G, Ender, Gio Perea, Hugo, Ferchin, Jailo Q, Paola F, Cata Niño, Xavier, Cejas, Carlos H, Jael, Pao E y a todos los que me acompañaron en toda la carrera. A Silvia Duran que llego en el momento que más lo necesitaba, con su amor, buenas intenciones y me brindo el apoyo en esta etapa final del proyecto. A todos mi amigos especialmente Lipa, Nico Rey, Fernando Serrano que han estado ahí pendientes de todo y acompañándome en las buenas y malas, A mis amigos de futbol UIS, Pato, Diego Merchán, Varela, Peñate, Peñita, Danuil, Martin, Fercho Mantilla, Selección UIS futbol 2006-2009. A Lorena Fiallo quien fue la persona que me ayudo en mi formación como persona y me mostro el camino adecuado para llegar a lograr este objetivo, gracias por todos los consejos.

A todas aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron en esto proceso, Juan Diego Colegial, Jaime Castellanos, Alejandro Silva, Anitita, Mario Patiño, Juan Carlos Ramírez, Miguel Jiménez, Profesor Fernando Muñoz, Julieta Pineda, Doctor Darío Barrero que me ayudo en el proceso de forma incondicional, Mauricio Parra, Jay Namson, Jorge Rubiano con sus consejos importantes, Javier Tamara, Andrés Valencia, Víctor Caballero, Wilson Casallas.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
3. OBJETIVOS.....	23
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	24
5. ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO	28
6. METODOLOGÍA.....	39
6.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	39
6.2 FASE DE TOMA DE DATOS EN CAMPO	40
6.3 INTERPRETACION SISMICA	43
6.4 CONVERSION A PROFUNDIDAD Y BALANCEO DE SECCIONES	46
6.5 INTERPRETACIÓN Y DISCUSION DE RESULTADOS PARA ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....	47
7. . RESULTADOS	48
7.1 ESTILO ESTRUCTURAL	50
7.1.1 Secciones Estructurales.....	50

7.2	RESTITUCION GEOMETRICA	53
7.3	ACORTAMIENTO.....	56
8.	PROSPECTIVIDAD DE LAS POTENCIALES TRAMPAS EN EL AREA	62
9.	. CONCLUSIONES	64
10.	BIBLIOGRAFIA.....	66
11.	ANEXOS 1.....	71

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa Geológico. Piedemonte Oriental-Cordillera Oriental. (Modificado Mora et al., 2006). 18
- Figura 2.** Localización de área de trabajo (Modificado de Mora, 2007). 19
- Figura 3.** Zona de relevo estructural donde se muestra que el acortamiento es distribuido diferentes fallas (Tomado de Dahlstrom, 1969). 20
- Figura 4.** Ubicación de los bloques exploratorios en el mapa geológico del Piedemonte Oriental de la Cordillera Oriental (Tomado ICP, 2009). 21
- Figura 5.** Mapa de las principales provincias tectónicas de Colombia. Historia tectónica y desarrollo de las cuencas de Llanos, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena, Colombia. (Tomado de Cooper et al., 1995). 25
- Figura 6.** Columna estratigráfica generalizada del flanco oriental de la Cordillera Oriental. (Tomado de Mora et al., 2006). 27
- Figura 7.** Ubicación de las secciones estructurales de Rowan & Linares, 2000 (Figura 8) y Branquet et al., 2002 (Figura 9) (Tomado de ICP, 2009) 28
- Figura 8.** Geometría propuesta para el área del Macizo de Quetame y anticlinal de Medina (Tomado de Rowan & Linares., 2000). 29
- Figura 9.** Sección regional Las Juntas-Llanos. (Modificado de Branquet, *et al.*, 2002). 31
- Figura 10.** Corte geológico I-I' entre la Falla San Juanito y la Falla Guaicaramo mostrando el estilo estructural de Medina. (Tomado de Mora., 2007). 32
- Figura 11.** Retrodeformación de las Fallas Tesalia-Lengupa y acortamiento general. (Modificado de Mora. et al, 2009). Ubicación de los cortes I-I' y K-K' Figura 10 34
- Figura 12.** Modelo estructural definido para el Anticlinal de Buenavista. Ubicación del corte A-A' en la Figura 13. (Tomado de Tamara., 2009). 35
- Figura 13.** Mapa Geológico de Villavicencio. FS. Falla Servita, FM. Falla Mirador, FV. Falla de Villavicencio, FSJ. Falla de San Juan, AB. Anticlinal de Buenavista, SA. Sinclinal de la Argentina. SO. Sinclinal de Ocoa, SU. Sinclinal de la Unión, AG. Anticlinal de Guayuriba. (Modificado de Tamara, 2009). 36
- Figura 14.** Esquema en el que se ilustra la formación de un pliegue de flanco invertido que involucra basamento. A. Sistema de fallas normales. En café se

presenta la secuencia pre-rift, en verde la secuencia syn-rift, y en amarillo la secuencia post-rift. B. Plegamiento que involucra basamento asociado a la contracción del sistema y a la reactivación de fallas normales. C. Rompimiento del flanco frontal con el aumento en el acortamiento (Tomado de Tamara, 2009). 37

Figura 15. Sección balanceada, siguiendo la línea sísmica AS-2010-G, la ubicación de la sección se observa en la línea resaltada. (Tomado de Silva, 2010) 38

Figura 16. Mapa geológico de la zona de trabajo y ubicación de las líneas sísmicas 42

Figura 17. Calculo para el espesor aparente basado en el espesor y buzamiento reales. $\text{Espesor aparente} = \text{Espesor real} / \cos(\text{Buzamiento real})$ 44

Figura 18. Metodología para definir la tabla de velocidades y conversión a profundidad. 45

Figura 19. Mapa geológico y ubicación de las secciones a restituir. Convenciones según Figura 16. 47

Figura 20. Fotografía de los deslizamientos alineados sobre el trazo de la falla Servita en color rojo el trazo de la falla y en color verde el contacto fallado entre el Cretácico y cuaternario (Falla Mirador). 48

Figura 21. Línea sísmica HR-2010-A en tiempo doble, con su respectiva interpretación. Ubicación línea sísmica Figura 19 51

Figura 22. Línea sísmica HR-2010-B en tiempo doble, con su respectiva interpretación. Ubicación línea sísmica Figura 19 52

Figura 23. Sección estructural basada en la línea HR-2010-A 54

Figura 24. Sección estructural basada en la línea sísmica. HR-2010-B 55

Figura 25. Secuencia de restitución de la sección A-A' 59

Figura 26. Secuencia de restitución de la sección B-B' 61

Figura 27. Modelo de acortamiento (Tomado de Martínez, J, 2006) 63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de rumbo azimut de rumbo y magnitud de buzamiento	41
Tabla 2. Muestran las velocidades que se utilizaron en la conversión a profundidad, tomados de los archivos de velocidades de los pozos.	49
Tabla 3 Desplazamiento de las diferentes fallas en las dos secciones restituidas	53
Tabla 4 Porcentajes de desplazamiento para los dos sistemas de fallas principales.	56
Tabla 5 Balances de acortamiento para las dos secciones restituidas	56
Tabla 6 Porcentaje de acortamiento para los dos sistemas de fallas principales .	57

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1

Figura 28. Línea sísmica HR-2010-B con su respectiva interpretación en tiempo.	72
Figura 29 Secuencia de restitución de la sección B1	72
Figura 30 Secuencia de restitución de la sección B1	72

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONTACTO BASAMENTO/COBERTERA ENTRE EL ANTICLINAL DE FARALLONES Y EL SINCLINAL DE MEDINA (BLOQUE EXPLORATORIO CÓNDOR)*

AUTORES: RICARDO DANIEL VARGAS ARÉVALO
HEBER JULIAN BUENO PLATA**

PALABRAS CLAVES: Cordillera oriental, Sinclinal, Anticlinal, Acortamiento, subthrusts

CONTENIDO:

El piedemonte oriental de la Cordillera Oriental en Colombia describe una geometría de cabalgamientos que muestran un patrón sistemático de Anticlinales y Sinclinales a lo largo del frente de deformación, dichas estructuras se relacionan o son generadas a partir de la inversión de una cuenca de rift proponiendo para el piedemonte un ambiente tectónico compresivo. En dicho ambiente tectónico compresivo se presentan estilos estructurales los cuales están ampliamente relacionados con el desarrollo de trampas estructurales en donde se podrían encontrar acumulaciones comerciales de hidrocarburos tal como se evidencia en estructuras como Pauto, Floreña, Volcanera, Homero etc. Dentro del sistema de Anticlinales y Sinclinales, se presentan zonas en donde el acortamiento y el desplazamiento de un frente o sistema de fallas es transferido o relevado a otro sistema más frontal; en tal punto de acuerdo a lo que se pueda evidenciar en los balances de acortamiento se pueden presentar estructuras *Subthrust* o apilamientos múltiples como las estructuras mencionadas anteriormente. Se toman 50 km² en los alrededores del municipio de Cumaral (Meta) en la parte Sur del Sinclinal de Medina, en donde se evidencia en mapas geológicos refinados del área que en ese punto existe una zona de relevo estructural; por tanto se caracteriza el estilo estructural de dicha zona y así mismo se analizan los balances de acortamiento a partir de dos perfiles o secciones balanceadas y se determina como el acortamiento es distribuido en cada uno de los sistemas de fallas (Tesalia/Servita-Aguaclara/Guaicaramo) y finalmente determinan que oportunidades de prospectividad existen para la zona Sur de Medina y que similitud existe con respecto al Sinclinal de Nunchia en donde existen campos productores asociados a apilamientos múltiples

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencias Fisicoquímicas, Escuela de Geología, Director, Andrés Roberto Mora Bohórquez, Geólogo, Phd. ICP-Ecopetrol S.A.; Co-Director, Eliseo Tesón Del Hoyo, Geólogo, Phd. ICP-Ecopetrol S.A; Co-Director, Nelson Sánchez Rueda, Geólogo. UIS.

ABSTRACT

TITLE: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONTACTO BASAMENTO/COBERTERA ENTRE EL ANTICLINAL DE FARALLONES Y EL SINCLINAL DE MEDINA (BLOQUE EXPLORATORIO CÓNDROR)*

AUTHORS: RICARDO DANIEL VARGAS ARÉVALO
HEBER JULIAN BUENO PLATA**

KEY WORK: Eastern Cordillera, Anticlines, Synclines, subthrusts, Shortening

CONTENT

The foothills of the Eastern Cordillera in the north of the Colombian Andes show thrusts geometry with both Anticlines and Synclines in the deformation front. These structures are generated for the inversion of the rift basin in a compressive setting. In the regional compressive setting become associated structural styles with structural traps for the Oil like we see in Pauto, Floreña, Volcanera, and Homero. In the both Anticlines and Synclines systems some areas exhibit relays zones in the Southern part of the synclines. Both shortening and displacement are distributed on subsidiary faults that are parallel to strike of the main faults in the deformations front. The shortening in those zones could be associated to subthrusts. We work in 50 Km² around Cumaral (Meta) in the southern part of the Medina syncline. In the geological map of the Medina syncline we can see a relay zone. In that place are proposed a structural style with a shortening balance of the faults systems (Tesalia/Servita-Aguaclara/Guaicaramo). At the end we can see the opportunities to presents prospects in the Medina area and match those characteristics with Nunchia syncline that shows the principal structures with commercial accumulations of oil in the foothills of Eastern cordillera (Colombia).

* Bachelor Degree.

** Faculty of Physical-Chemistry, School of Geology, Director, Andrés Roberto Mora Bohórquez, Geólogo, Phd. ICP-Ecopetrol S.A.; Co-Director, Eliseo Tesón Del Hoyo, Geólogo, Phd. ICP-Ecopetrol S.A; Co-Director, Nelson Sánchez Rueda, Geólogo. UIS.

1. INTRODUCCIÓN

En el Piedemonte de la Cordillera Oriental se cuenta con un buen número de los principales yacimientos comerciales de petróleo como Floreña, Pauto, Volcanera, Huron y Homero, etc. (ICP, 2009). Contando también con las mayores expectativas de hallazgo de otros gigantes. Por lo tanto se realizó un análisis de la naturaleza de la deformación entre el anticlinal de Farallones y el sinclinal de Medina haciendo un enfoque en la geometría de la trampa y en la prospectividad del área.

El Piedemonte Oriental muestra un patrón sistemático de sinclinales y anticlinales los cuales están limitados por sistemas de fallas como Tesalia-Servita, Guaicaramo y Yopal, en los que el acortamiento puede concentrarse en una o varias fallas de cabalgamiento. Estas zonas poseen estructuras prospectivas y han sido las más prolíficas en cuanto a descubrimientos de petróleo (Figura 1).

Hacia el norte se observa el sinclinal de Nunchia el cual está limitado por las fallas de Guaicaramo al oeste y la falla de Yopal al este. En cercanías del sector de Tauramena se observa que el flanco occidental del sinclinal de Nunchia (Figura 1) va desapareciendo formando un monoclinal buzando al Occidente (ICP, 2009). Lo anterior y el traslape entre el frente de deformación de las fallas de Tesalia, Lengupa, Chameza y Guaicaramo con el frente de deformación que incluye las fallas de Cusiana y Yopal (con el Sinclinal de Nunchia en el bloque colgante) evidencian que a esta altura se está ante una zona de relevo estructural. Hacia el sur oeste de este relevo, cerca al municipio de San Luis de Gaceno, se encuentra un segundo sinclinal conocido como el sinclinal de Nazareth que al sur se denomina sinclinal de Medina, limitado al occidente por el sistema de fallas de Tesalia-Servita. Este sistema pone en contacto unidades del cretácico/basamento contra el terciario. Finalmente el sinclinal de Medina define lo que al sur es una nueva zona de relevo estructural, entre la Falla de Guaicaramo y el sistema de fallas de Tesalia-Servita (Figura1).

En el área de estudio donde se encuentra el sinclinal de Medina se observa que el frente de deformación se concentra a la largo de dos sistemas de fallas (Sistema de fallas Tesalia-Servita al occidente y falla Guaicaramo al oriente), mientras que en la zona sur se observa que tanto el frente de deformación como el acortamiento se enfoca en el sistema de fallas de Tesalia-Servita, una evidencia directa de esto podría ser el basamento aflorando.

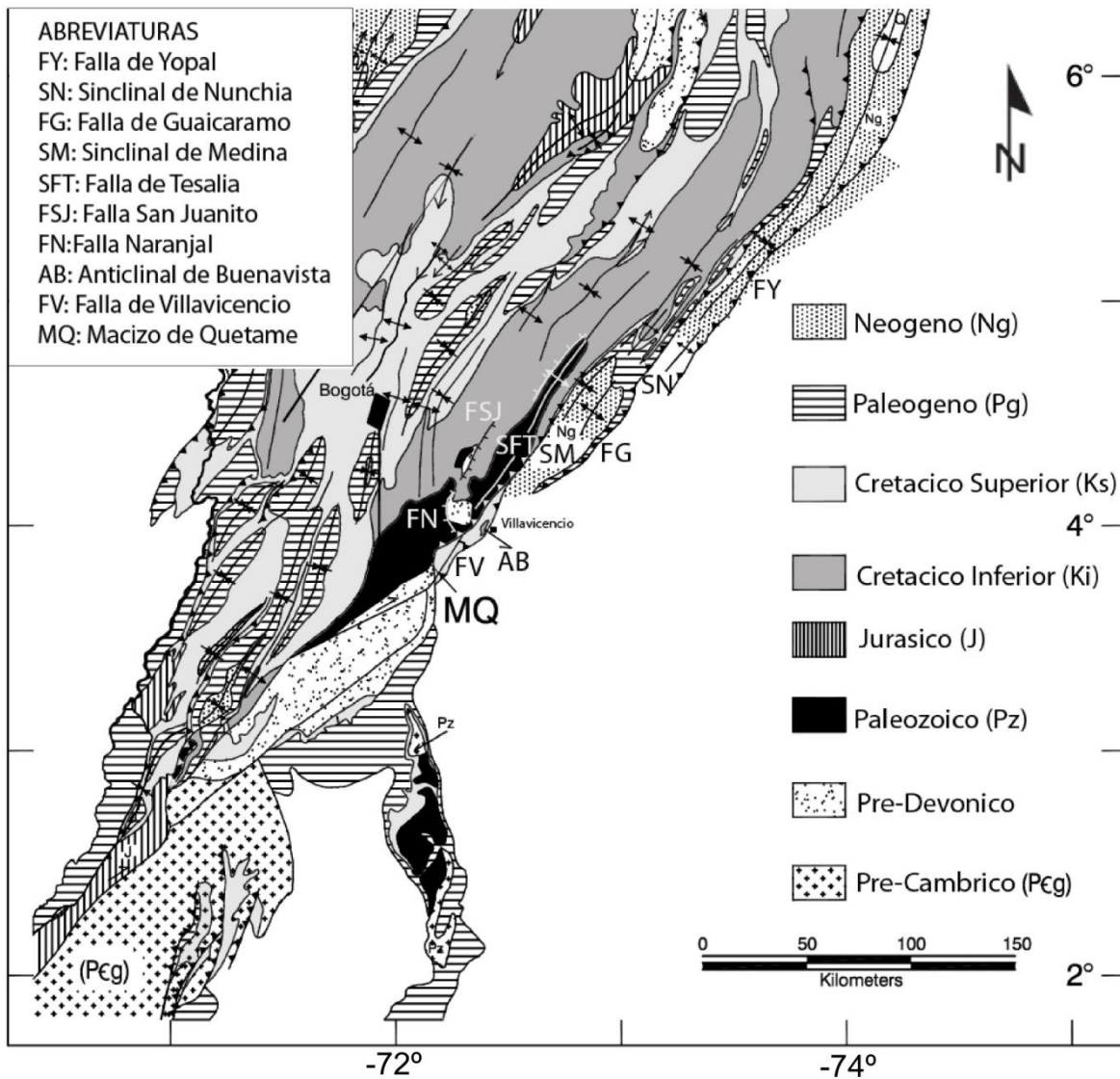


Figura 1. Mapa Geológico. Piedemonte Oriental-Cordillera Oriental. (Modificado Mora et al., 2006).

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Un relevo estructural ocurre cuando un frente de deformación de un sistema de fallas transfiere su desplazamiento a otro sistema de fallas más frontal. La zona de relevo es aquella donde se produce la transición de un sistema de fallas o de una falla a otro y por tanto hay un traslape de ambos sistemas de fallas o de dos fallas que muy probablemente se conectan en profundidad (Trudgill & Cartwright, 1994).

El área de estudio se localiza en el en el flanco Oriental de la Cordillera Oriental y comprende un área aproximadamente 50 km² entre el municipio de Cumaral (Meta) y la vereda de los Alpes (Cundinamarca) (Figura 2). Sobre el área de estudio existe información geológica generada por actividades de cartografía geológica (Mora, 2007 y Parra, 2008), líneas sísmicas, datos de pozo y estudios estructurales (ITEP, 2010), que insinúa la presencia de una zona de relevo estructural.

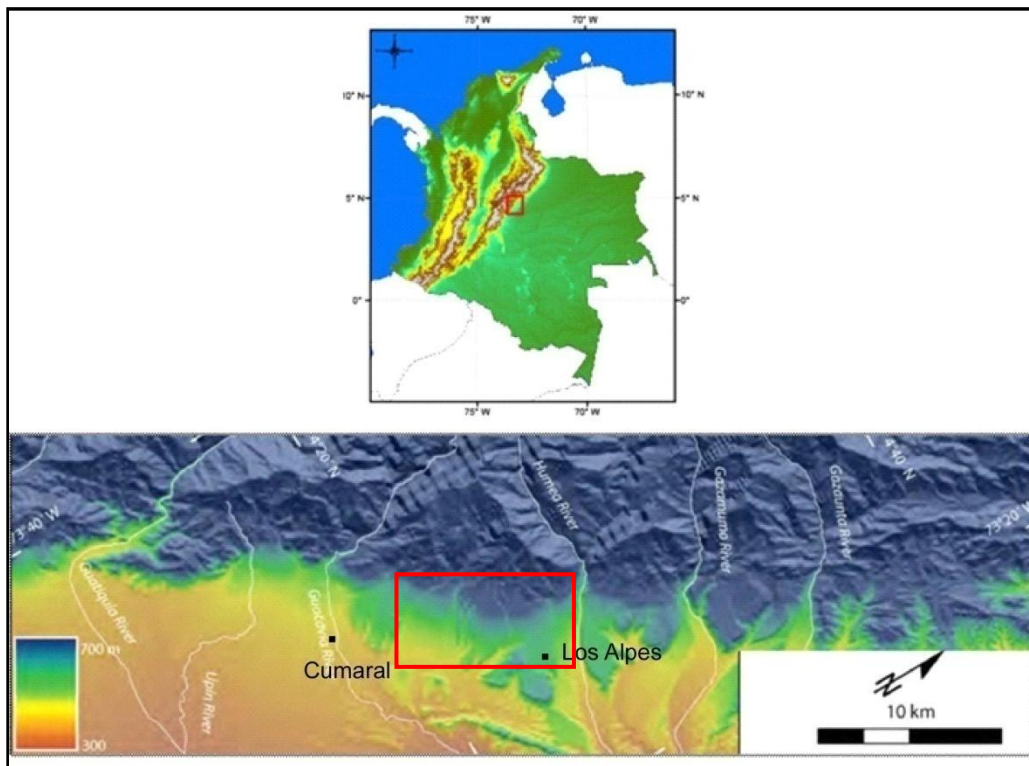


Figura 2. Localización de área de trabajo (Modificado de Mora, 2007).

Con lo anterior expuesto y la ausencia de estudios en el área de Medina que caractericen con detalle la zona de relevo estructural de las fallas de Tesalia-Servita y Guaicaramo, se hace necesaria la elaboración de este proyecto. En el Piedemonte Oriental de la Cordillera Oriental las zonas de relevo son un riesgo exploratorio, pues cuanto más cerca a estas zonas el acortamiento es distribuido en una o varias fallas lo que condiciona un aumento o desmejora en la prospectividad. (Figura 3). El principal problema que se quiere resolver es cuál es el estilo estructural de estas zonas de relevo y por tanto como el acortamiento está distribuido en cada una de las fallas del sistema ya que cuando este acortamiento es distribuido en una o dos fallas es más probable encontrar estructuras prospectivas como lo visto en el Sinclinal de Nunchia con estructuras como Pauto, Floreña, Volcanera. Una evidencia en superficie de la existencia de la zona de relevo es como un sinclinal bien desarrollado va cambiando a monoclinal a medida que el acortamiento es distribuido en las diferentes fallas del sistema. Es muy importante resaltar de acuerdo a la definición anterior, en el bloque Cóndor hay un relevo estructural, desde el punto donde termina la Falla de Guaicaramo al sur que podría ser un análogo al relevo que hay en el bloque Tauramena donde termina la Falla de Yopal al sur (Figura 4).

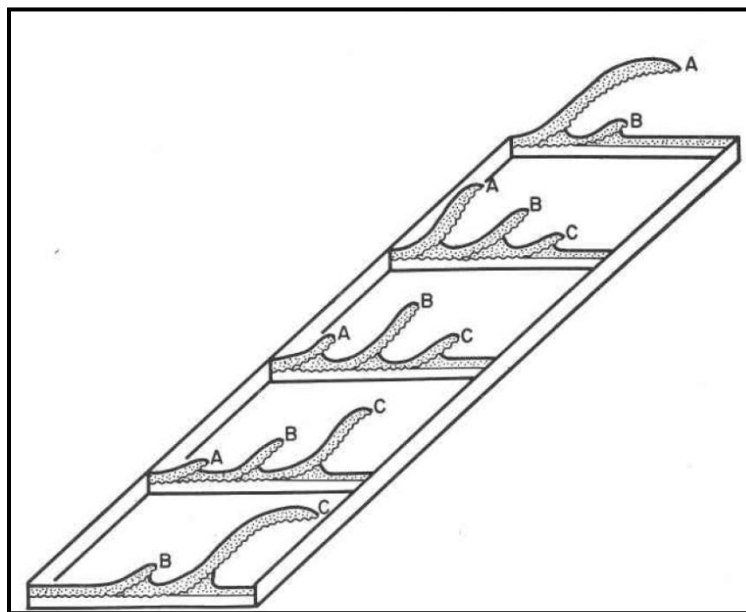


Figura 3. Zona de relevo estructural donde se muestra que el acortamiento es distribuido diferentes fallas (Tomado de Dahlstrom, 1969).

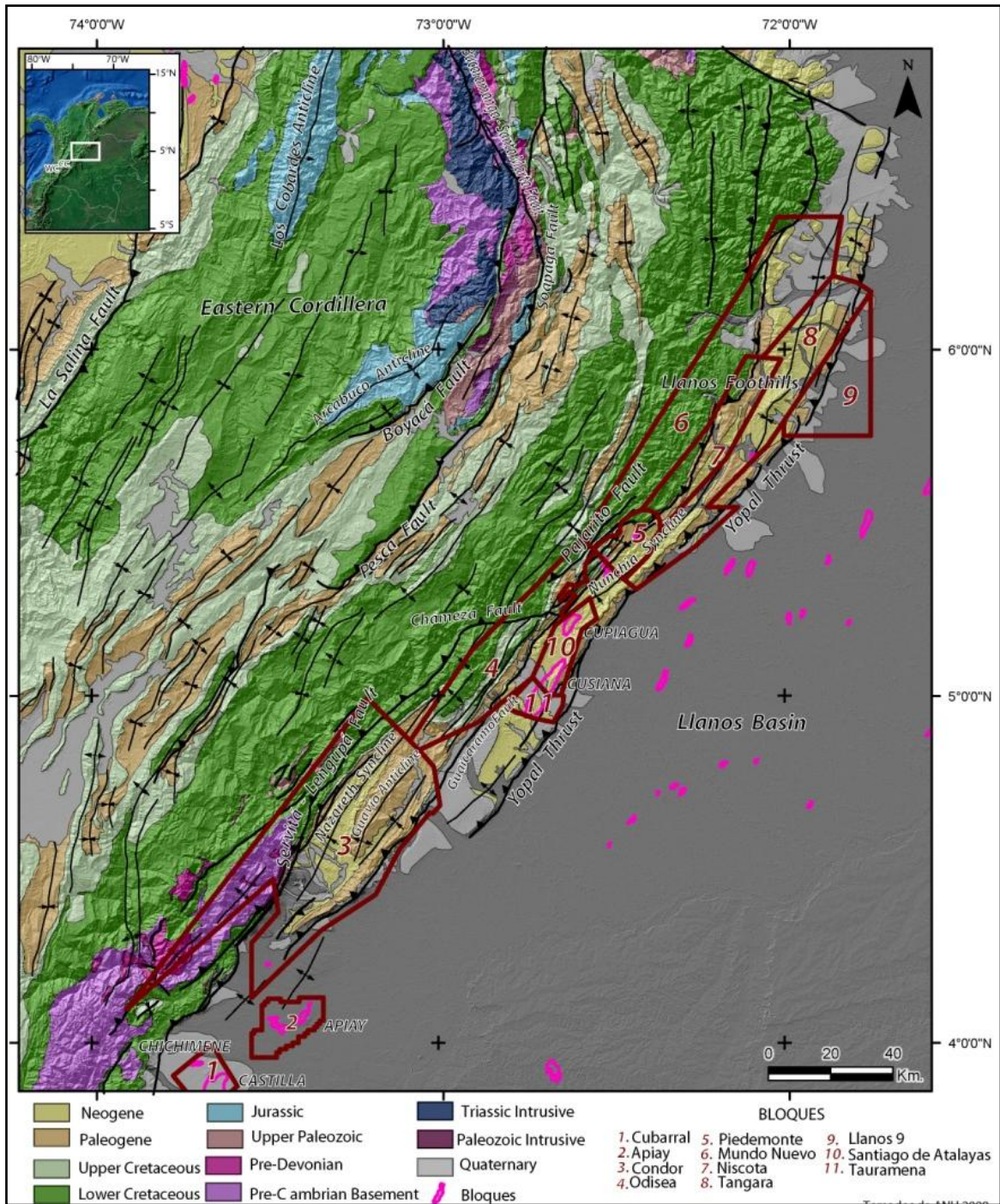


Figura 4. Ubicación de los bloques exploratorios en el mapa geológico del Piedemonte Oriental de la Cordillera Oriental (Tomado ICP, 2009).

De acuerdo con lo expresado, en este proyecto se quieren estudiar los siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el estilo estructural de la zona de relevo cercana a la porción Sur del Sinclinal de Medina?
- ¿Cómo se distribuye el acortamiento entre las fallas en esta zona de relevo estructural?
- ¿La expresión en superficie del flanco occidental del sinclinal de Medina es un reflejo de estructuras prospectivas en el subsuelo?

Es por lo tanto probable que, con base en evidencias directas, interpretación estructural de las líneas sísmicas y balances de acortamiento se caracterice la zona de relevo estructural y se evidencie una geometría similar a la observada en el sinclinal de Nunchia. Por lo tanto, el Sinclinal de Medina pueda ser un análogo del estilo estructural. Este nuevo conocimiento adquirido en este trabajo ayudara a descifrar la presencia/ausencia de estructuras prospectivas asociadas al patrón sistemático de sinclinales presentes en el piedemonte llanero y así mismo definir con exactitud las posibles zonas de relevo que disminuyen o mejoran la prospectividad.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Búsqueda de evidencias directas en superficie de la presencia/ausencia de estructuras prospectivas en el *subthrust* de la falla de Tesalia y su expresión en mapas geológicos del área de estudio, secciones estructurales balanceadas y balances de acortamiento. Todo con el fin de caracterizar y llevar a cabo el análisis estructural de esta zona de relevo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Refinar el mapa geológico de la zona de trabajo a partir de los datos obtenidos en el campo.
- Reconocer la geometría de la deformación del flanco frontal del anticlinal de Farallones.
- Interpretación de líneas sísmicas y construcción de 2 secciones estructurales entre el anticlinal de Farallones y la estructura frontal del piedemonte en el área de estudio (Falla Guaicaramo).
- Restituir y compensar 2 secciones estructurales.

4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Los principales eventos tectónicos que influenciaron el desarrollo de las cuencas Colombianas están ampliamente relacionados con la evolución del margen occidental activo de la Cordillera de los Andes. (Cooper et al., 1995). El basamento Colombiano es dividido en tres zonas, separadas por estructuras principales (Suárez., 1990):

- El Escudo de la Guyana Oriental.
- La Provincia central con rocas del Precámbrico-Paleozoico temprano.
- Fragmentos de corteza oceánica acrecionada por subducción.

Durante el Triásico-Jurásico y Cretácico temprano, el Norte de Sur América fue periféricamente afectada por un *rift* asociado a la separación de Norte y Sur América en el proto-caribe (Jaillard et al., 1990). Maze (1984) propuso un mecanismo alternativo para la extensión en un ambiente de *back-arc*; el cual daba la naturaleza oblicua de la zona de subducción con una componente trans-tensional.

Para el norte de los Andes y el piedemonte llanero la deformación se desarrolló debido a la interacción entre las placas Nazca-Caribe. La indentación hacia el oriente producida por el bloque Baudó-Panamá durante el Mioceno Tardío es considerada como la fuerza responsable para la inversión de las cuencas del *rift* del Mesozoico en la presente Cordillera Oriental (Taboada et al., 2000). La Cordillera Oriental comprende la zona externa de los Andes Colombianos y está separada de la Cordillera Central por el VMM (Valle Medio del Magdalena). Esta cuenca intramontana es limitada al este por el sistema de fallas de borde llanero, y al oeste por unas fallas de cabalgamientos con vergencia al oeste que la separa del Valle del río Magdalena. (Butler and Schamel, 1988; Namson, et al., 1994; Gómez., et al., 2003).

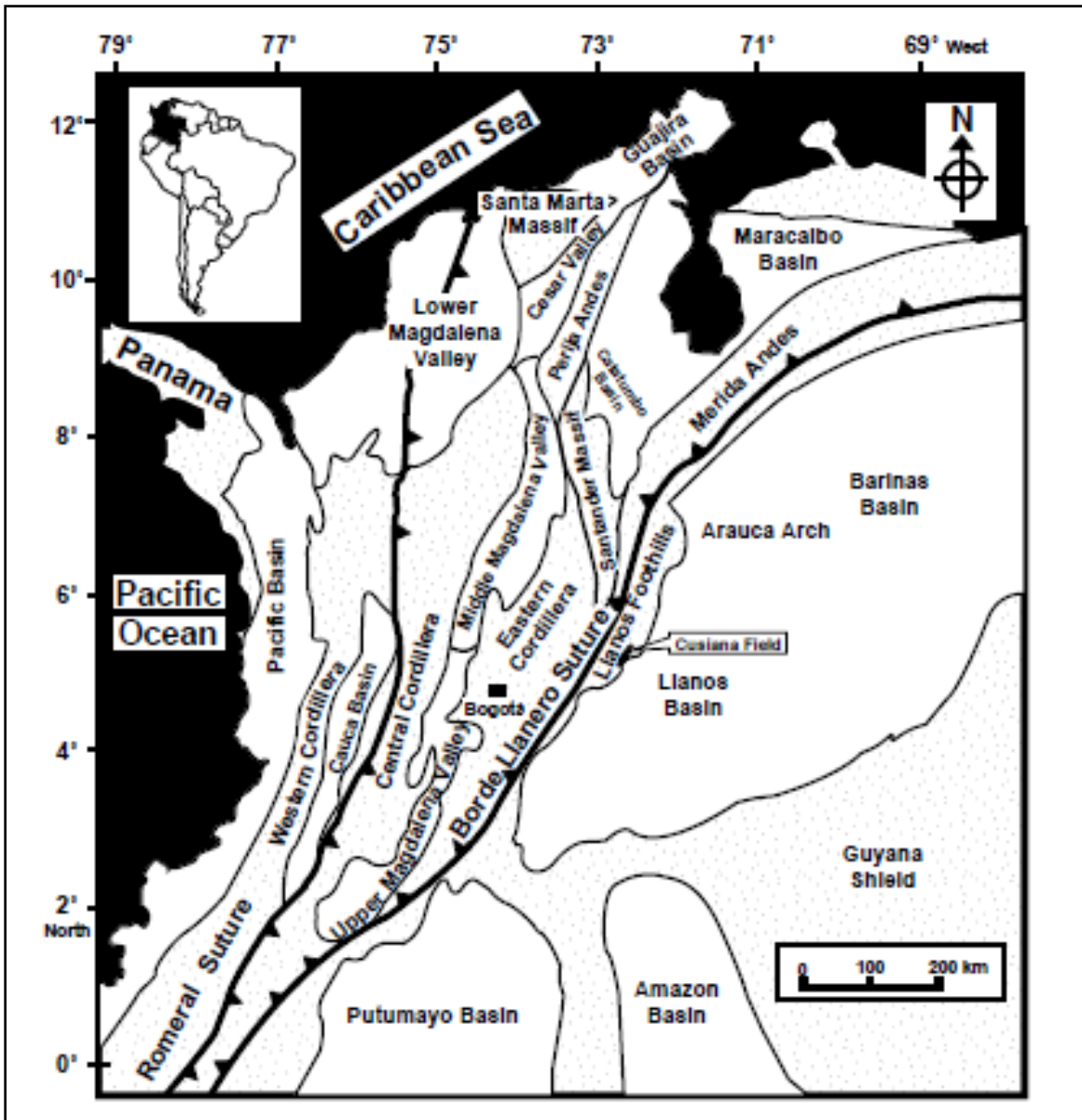


Figura 5. Mapa de las principales provincias tectónicas de Colombia. Historia tectónica y desarrollo de las cuencas de Llanos, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena, Colombia. (Tomado de Cooper et al., 1995).

La tectónicamente activa Cordillera Oriental tiene más de 10 Km. de espesor de cubierta sedimentaria Cretácico-Terciaria en la parte central. La estratigrafía para el área de Medina inicialmente en cuarcitas y filitas del grupo Quetame, las cuales infrayacen en discordancia con shales y areniscas del Devónico? pertenecientes a la Formación Puente la Balsa. La Formación Puente la Balsa suprayace a una secuencia de areniscas continentales a marinas del Devónico de la Formación

Gutiérrez las cuales no son constantes en espesor. La Formación Capas rojas del Valle del Guatiquia, suprayacen las unidades mencionadas anteriormente. (Cortes y De la Espriella., 1992).

Estudios paleogeográficos y sedimentológicos en la Cordillera Oriental (Fabre, 1985; Hebrard, 1985; Colleta et al., 1990; Dengo and Covey, 1993; Cooper et al., 1995; Sarmiento, 2001) sugieren que el *rifting* regional del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano genero la megasecuencia de sedimentos *sin-rift* (Marinos y Continentales) como la Fm. Guavio, Fm Buenavista, Fm Macanal, Fm Las Juntas y la Fm Fomeque que suprayacen al basamento o las unidades del Paleozoico.

Los sedimentos que cubren el Paleozoico son marinos y presentan espesores variables, indicando diferencias de subsidencia tectónica; las areniscas del Albiano al Cenomaniano son clasificadas como la Formación Une, esta formación esta suprayacida por shales pertenecientes a la Formación Chipaque y cuarzoarenitas del Grupo Guadalupe. Las rocas Cretácicas dentro de la Cordillera Oriental tienen ~7 km de espesor, un espesor máximo de 2 km en el *foreland* de los Llanos y progresivamente se acuñan hacia el este. Los estratos depositados durante el Paleoceno al Pleistoceno conforman una secuencia de *foreland* constituida principalmente por material erosionado de los principales macizos de basamento del Piedemonte Oriental, que reflejan la historia del levantamiento de los altos de basamento adyacentes en la Cordillera Oriental. Esta secuencia es caracterizada por cambios pronunciados de facies en su parte inferior. Por otra parte, la sección superior de la secuencia (Mioceno) está compuesta por estratos continentales cuyo ambiente deposicional registra la transición de condiciones marinas a continentales, que se caracterizan por ríos meandriformes y sistemas de abanicos aluviales (Parra., 2008).

En el piedemonte, la secuencia Paleoceno-Eoceno constituye hasta 600m de arenisca continental y lodolita físil que conforma las formaciones Barco, los Cuervos y Mirador. Estas unidades son suprayacidas por ~3km de secuencia

Oligoceno-Mioceno Inferior de lodolita fisil y arenisca marina marginal a deltaicas de la Formación Carbonera (Parra, 2008). Sobre esta unidad la Formación León de lodolitas del Mioceno Medio constituye 500m de espesor de horizonte continuo interpretado como la última incursión marina en el área. Esta formación está cubierta por una sucesión continua de arenisca continental y conglomerados de la formación. Guayabo del Mioceno Superior-Plioceno. La Formación Guayabo Superior es lateralmente equivalente con la formación Corneta la cual se compone de conglomerados de gravas gruesa (Parra, 2008). (Figura 6).

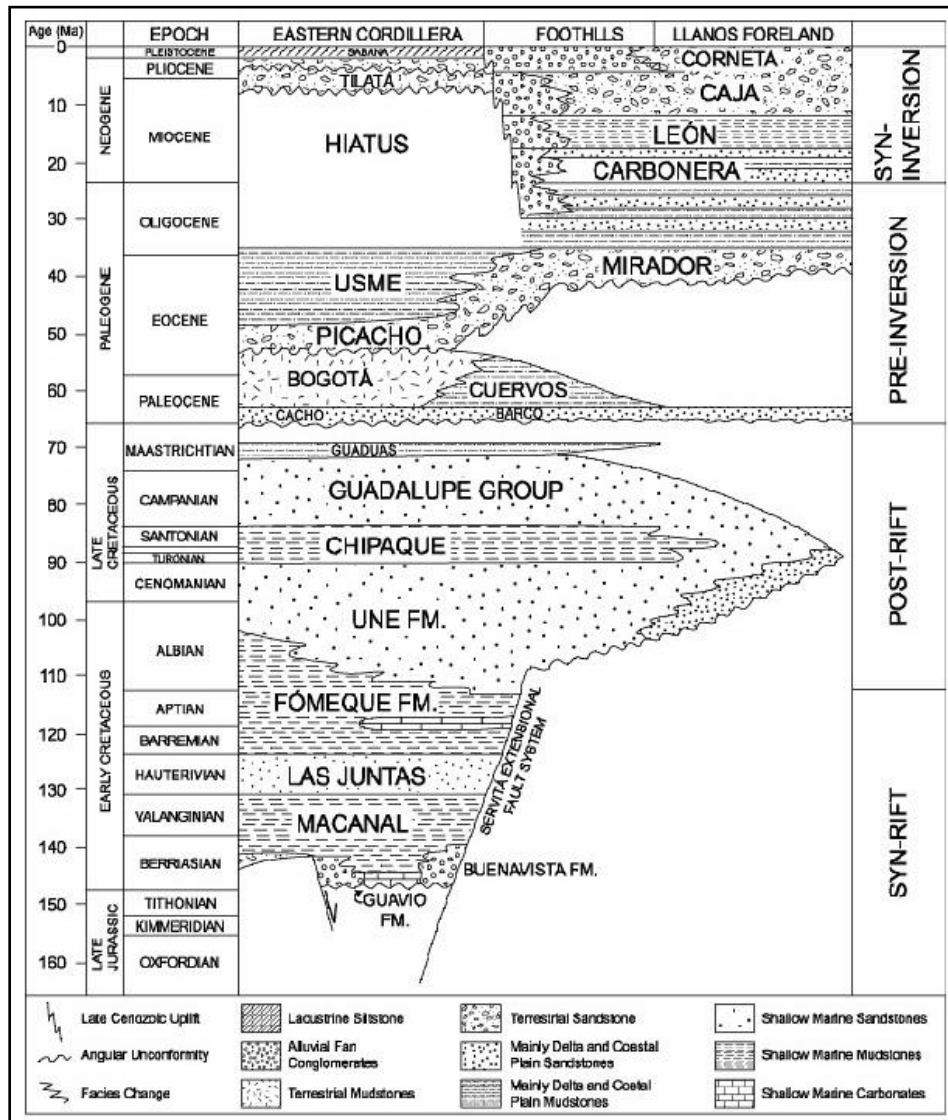


Figura 6. Columna estratigráfica generalizada del flanco oriental de la Cordillera Oriental. (Tomado de Mora et al., 2006).

5. ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Varios estudios regionales se han llevado a cabo en el Piedemonte Oriental de la Cordillera Oriental, que han demostrado que actualmente se encuentra bajo un régimen tectónico compresivo que involucra principalmente la reactivación de fallas normales generadas en una etapa de *rift* durante el Triásico-Jurásico y Cretácico Temprano (Jaillard et al., 1990). La carga tectónica producida por la inversión de la Cordillera Oriental durante el Cenozoico, generó condiciones de acomodación en los frentes orogénicos de cabalgamiento en ambos flancos de la cordillera para que se depositaran gruesas secuencias de estratos sin-orogénicos que hoy están aflorando en cuencas paralelas al sistema montañoso, como es el caso de la cuenca de Llanos Orientales (Gómez et al., 2003; Gómez et al., 2005; Parra et al., 2009).

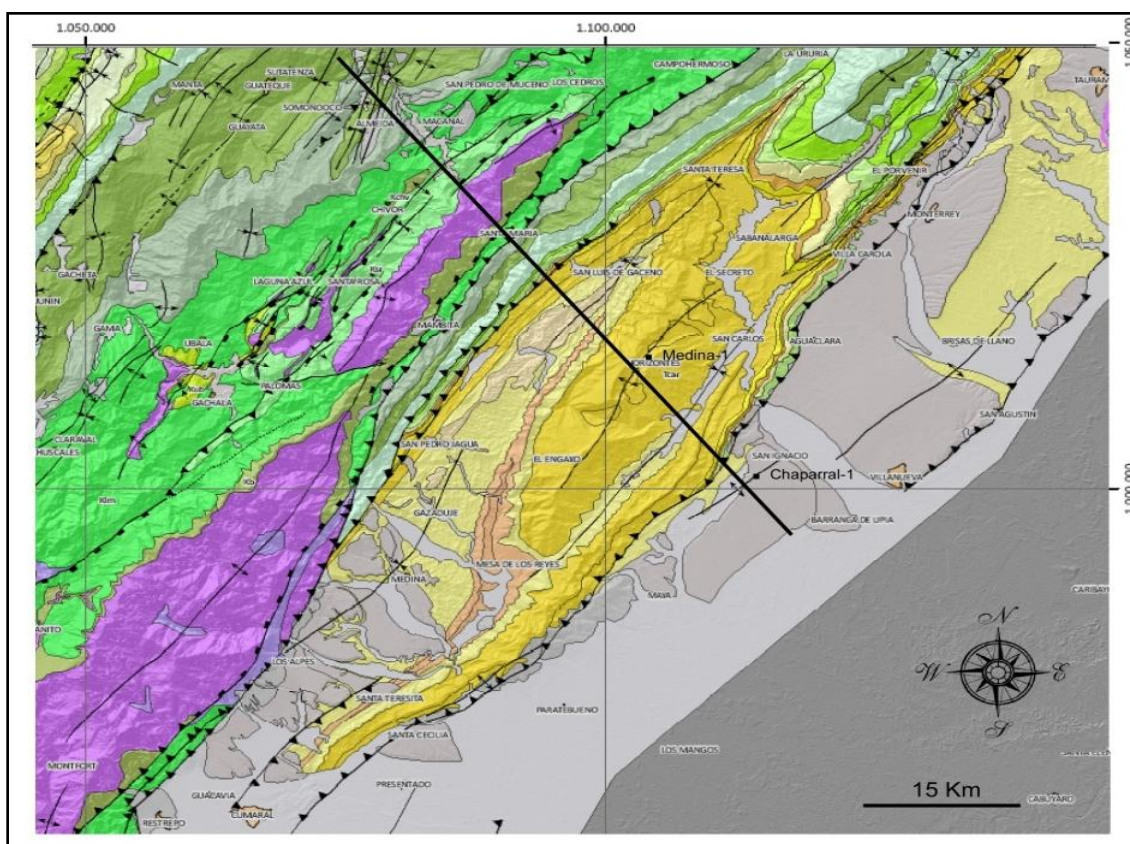


Figura 7. Ubicación de las secciones estructurales de Rowan & Linares, 2000 (Figura 8) y Branquet et al., 2002 (Figura 9) (Tomado de ICP, 2009)

Estudios anteriores a este trabajo realizados en el área de Medina usando sísmica y estratigrafía presentan modelos muy diferentes y contradicciones entre ellos (Rowan & Linares., 2000, Branquet et al., 2002), en un lugar similar (Figura 7)

Para Rowan y Linares (2000), el anticlinal de Medina es un pliegue por flexión de falla del bloque colgante del cabalgamiento de la falla Aguaclara, el cual tiene una rampa condicionada sobre una serie de fallas normales que no han sido reactivadas. El despegue de la falla de cabalgamiento Aguaclara se produce a través de los shales del Cretácico Inferior. Esta falla se origina posiblemente bajo el Macizo de Quetame. La geometría interpretada de la falla de Aguaclara puede ser el resultado de la estratigrafía mecánica del área de acuerdo a la reología de las capas, e intercalaciones intra-formacionales de areniscas y shales. Así mismo de acuerdo a el análisis estructural, se interpreta que el bloque colgante de la falla Aguaclara era parte de un *half-graben* rotado formado durante el *rift* del Jurásico (Rowan y Linares., 2000) (Figura 8). Modelos basados en sísmica, datos de pozo y geología de campo sugieren la presencia de dos estilos tectónicos: un estilo frontal con basamento implicado en algunos segmentos más hacia el E y otro por láminas de piel delgada "*thin-skinned*" (Martínez, J., 2006).

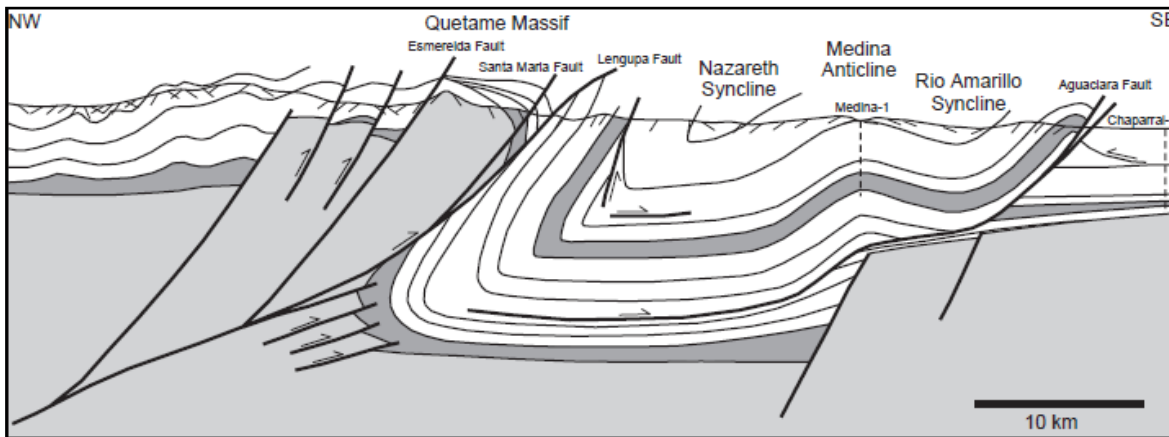


Figura 8. Geometría propuesta para el área del Macizo de Quetame y anticlinal de Medina (Tomado de Rowan & Linares., 2000).

Branquet, et al. (2002) presenta la cartografía de una transecta regional con el fin de realizar una sección a restituir y se comparan datos de estratigrafía existentes con nuevos datos obtenidos de la Cordillera, Piedemonte y de la cuenca de

antepaís. Durante la deformación Andina, la falla Tesalia-Servita fue reactivada por la transpresión levantando el frente oriental de la Cordillera Oriental; El macizo de Quetame y las secuencias estratigráficas adyacentes fueron invertidas durante el proceso de inversión tectónica (Branquet et al., 2002) (Figura 9). Para el área Branquet, et al., (2002) interpretan tres despegues que son compatibles con la estratigrafía mecánica: (1) Entre las cuarcitas del basamento y la cubierta sedimentaria del cretácico temprano (Shales Negros), (2) entre las brechas evaporíticas de la Formación Guavio (3) A la base los Shales Negros de la Formación Chipaque. Al este del Macizo de Quetame, se interpreta la Falla Lengupa como un cabalgamiento secundario del bloque colgante de la falla principal. De acuerdo a las interpretaciones anteriores, se dice que el basamento fue levantado como resultado de movimientos inversos durante la reactivación de la falla Tesalia y el desarrollo de *back-thrusts*. El anticlinal de Guavio es interpretado como un *pop-up* de basamento (Figura 9). Este anticlinal se atenúa fuertemente a medida que se hunde hacia el sur-occidente. La falla Aguaclara parece tener componentes de piel gruesa, es decir que en algunos sectores involucra el basamento en la deformación. Se interpreta un despegue y una rampa que suprayacen las fallas de alto buzamiento las cuales probablemente envuelven basamento y fueron reactivadas aproximadamente en el Terciario. El bloque colgante del cabalgamiento ha sido exhumado por el movimiento de dicha falla y Branquet, et al., (2002) el espesor uniforme de las capas plegadas indica que la mayoría de la deformación del piedemonte se ha acumulado desde finales del Mioceno.

El área de Guateque-Medina está cerca de los 5° Latitud norte, para esta zona, Branquet, et al., (2002) proponen que los esfuerzos son de tipo transpresivo *right-lateral*. Entonces para dichos autores la interpretación del Macizo de Quetame como una estructura de flor positiva resultante de la transpresión y la tectónica de placas del norte de los Andes (Branquet et al., 2002).

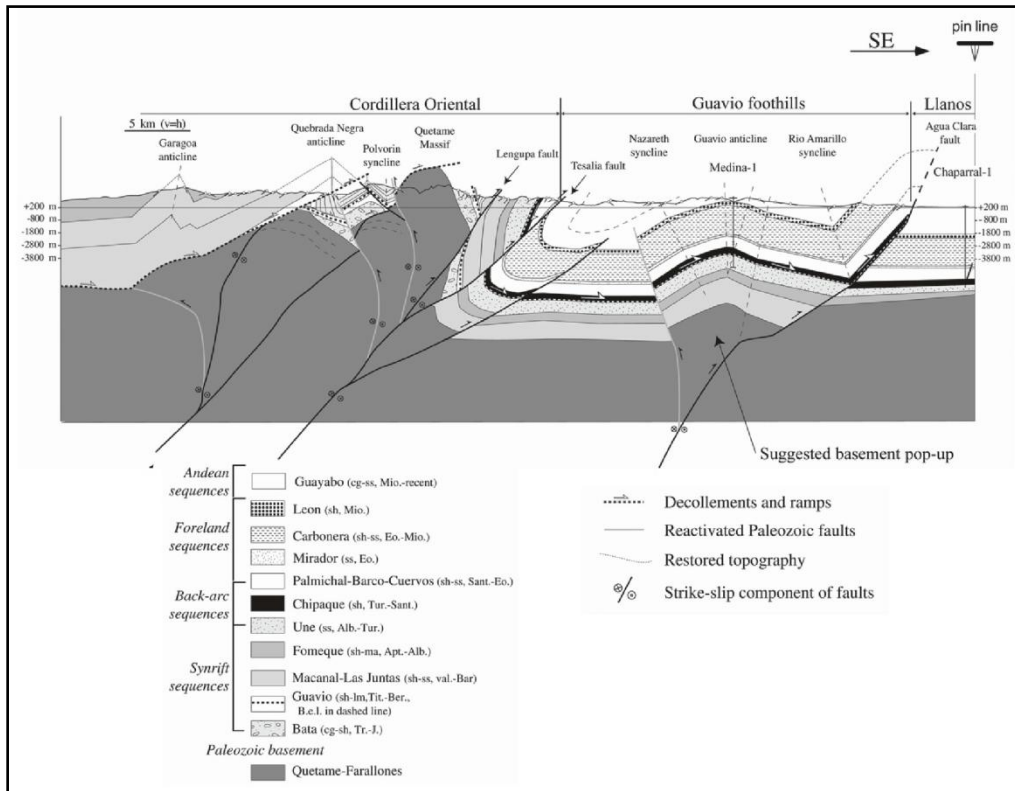


Figura 9. Sección regional Las Juntas-Llanos. (Modificado de Branquet, *et al.*, 2002).

Mora et al., (2006) reporta que el Anticlinal de Farallones parece ser controlado por el antiguo Graben de Guatiquia y particularmente por la inversión de la Falla Servitá. La orientación del eje del pliegue del anticlinal de Farallones es paralela a la rectilínea falla Servitá. Entonces su origen podría tratarse ya sea totalmente a la inversión o a un *rollover* extensional que después fue amplificado en contracción (Mora et al., 2006). Según estos autores este evolucionó de un Anticlinal simétrico que al norte coincidía con el área superpuesta con el graben de Guatiquia, hacia una estructura altamente asimétrica con un flanco frontal de buzamiento alto, coincidiendo con la mitad del graben de la región sur. Consecuentemente el grado de simetría en la estructura extensional del Cretácico inferior fundamentalmente condiciona la geometría de la estructura de inversión. Para estos autores la falla de cabalgamiento de Guaicáramo, es un relevo de la falla Servitá que evoluciona como el cabalgamiento oriental más frontal hacia el N. Los diferentes estilos de deformación y plegamiento en el bloque colgante de la falla Guaicaramo, comprenden un segmento al sur con pliegues abiertos y flancos suaves, pero al

norte el estilo cambia a pliegues apretados con flancos parados o erguidos. (Figura 11).

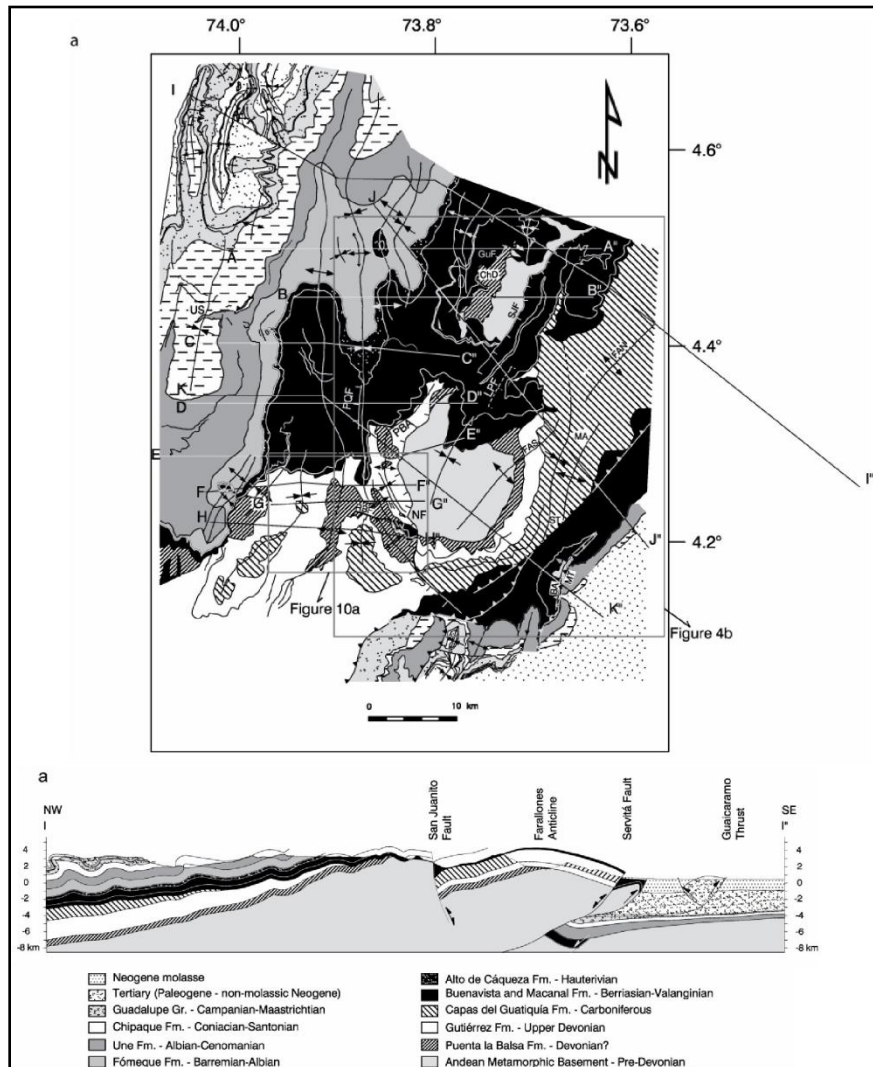


Figura 10. Corte geológico I-I' entre la Falla San Juanito y la Falla Guacacaramo mostrando el estilo estructural de Medina. (Tomado de Mora., 2007).

Mora et al, (2006) determina la evolución espacial y temporal de los estilos estructurales encontrados en la Cordillera Oriental y del mismo modo, analiza los diferentes factores que influyen la deformación de las rocas en la zona, para así discriminar entre factores controlados desde la formación de la cuenca, anisotropías mecánicas pre-existentes y patrones de exhumación determinados por el clima. Este análisis proporciona un entendimiento profundo del

comportamiento del frente de deformación orogénico y de los factores que lo controlan como la mecánica de cuñas, herencia estructural y patrones de exhumación. De acuerdo a lo anterior se concluye que el relieve estructural más importante en el segmento central de la Cordillera Oriental está relacionado con la inversión de la falla normal Servita, mientras que la creación de relieve es menos evidente en fallas como Naranjal y San Juanito. En estos estudios se asumió un basamento con *Buttressing* el cual marca un contraste reológico entre el basamento rígido y las capas estratificadas. (Mora et al., 2006, Figura 11-a).

Mora & Parra, (2008), basan su investigación en cartografía de campo detallada y recopilación de información en superficie y subsuelo y proponen que la zona al Sur del Macizo de Quetame es donde mejor se puede descifrar el patrón de deformación y la cronología de las estructuras de inversión. Parra et al., (2009) concluyen que la Cuenca de Medina experimenta 3 fases de subsidencia relacionada con la exhumación del Macizo de Quetame. La primera fase o etapa de subsidencia es moderada en el Paleoceno tardío, se menciona allí también una subsidencia limitada para el Oligoceno temprano y finalmente un etapa de subsidencia rápida en el Oligoceno tardío-Mioceno temprano. Los datos de AFT datan una exhumación rápida del Macizo de Quetame para Plioceno y se concluye que la deformación se desarrolló a lo largo de anisotropías heredadas de la corteza (Mora et al., 2008).

Mora et al., (2009) propone nuevamente que la localización del anticlinal de Farallones coincide con la zona de máxima subsidencia extensional durante el Cretácico. A pesar de esto varios paleoaltos en extensión han mantenido su característica como altos topográficos en la contracción. La reactivación contraccional (desplazamiento) en el segmento del anticlinal de Farallones parece que se concentró sobre las fallas reactivadas que limitan la cuenca y sobre las fallas de atajo (*shortcuts*). Sin embargo la mayoría del desplazamiento y acortamiento de las fallas contraccionales del flanco este de la Cordillera Oriental se deben al desplazamiento de la falla de atajo de Mirador. Las fallas de atajo son

estructuras compresivas que durante eventos de inversión tectónica positiva se ramifican de una falla normal que se reactiva en contracción en su parte más inferior y se propaga hacia el frente mediante una falla nueva (Hayward & Graham, 1989). Esta falla de atajo se ramifica de la falla Servitá. Mora et al., (2009) hace notar que en el mapa esta estructura esta siempre paralela a la falla Servitá, excepto cerca de donde converge con el trazo de la falla misma. La falla Servitá y la falla de atajo de Mirador acumulan cerca de 20 Km de acortamiento en la Cordillera Oriental como se puede deducir de la sección balanceada (Mora et al., 2009, Figura 11).

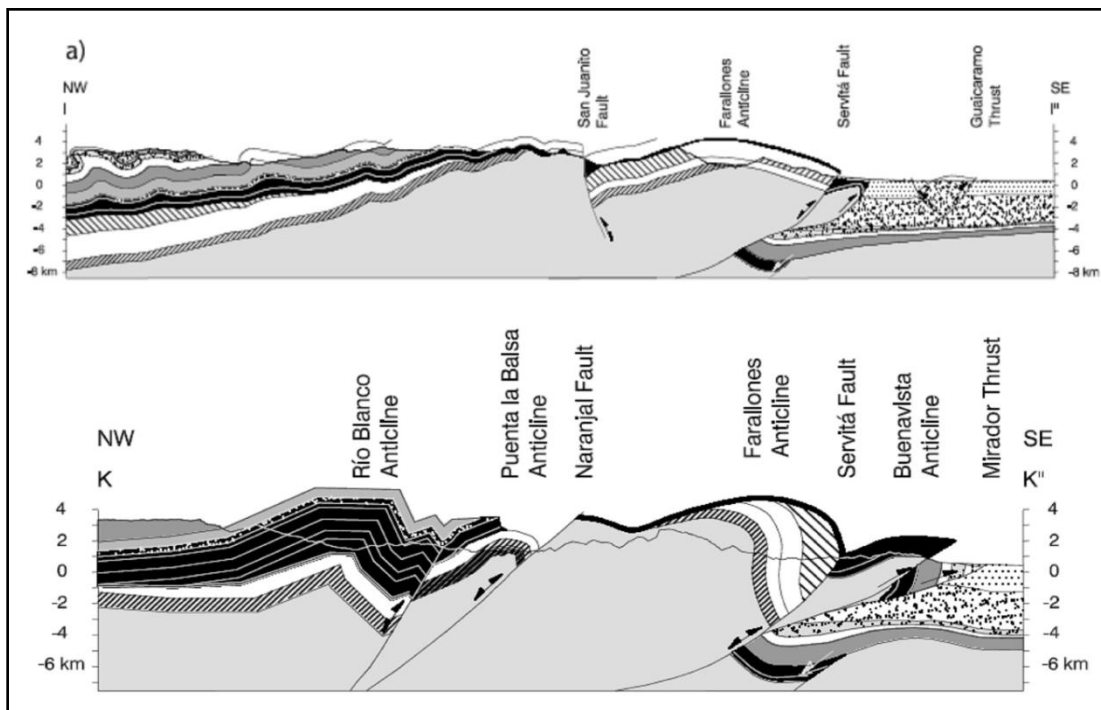


Figura 11. Retrodeformación de las Fallas Tesalia-Lengupa y acortamiento general. (Modificado de Mora et al, 2009). Ubicación de los cortes I-I' y K-K' Figura 10

Tamara (2009) propone que el anticlinal de Buenavista constituye un alto de basamento con un desnivel de al menos 5000 m. entre el bloque de basamento observado en superficie y el nivel regional estimado con base en el pozo Anaconda-1. Este desnivel parece ser generado tanto por plegamiento como por fallamiento según su interpretación.

La falla de Villavicencio genera un movimiento entre bloques de 2500 m. pero dada la inclinación de la falla su componente vertical es inferior a los 800 m. contribuyendo principalmente a la propagación hacia el oriente del frente de deformación. Las relaciones de la falla de Mirador sugieren un desplazamiento estimado de 900 m., sin embargo este desplazamiento debe ser mayor ya que su desplazamiento como falla normal ha sido nivelado y superado durante la compresión. Estas observaciones sugieren que la falla de Mirador actuó como falla normal durante el Cretácico y fue invertida durante la compresión terciaria, en la que gran parte de su desplazamiento fue absorbido en mayor grado por plegamiento. (Tamara, 2009, Figuras 12-13).

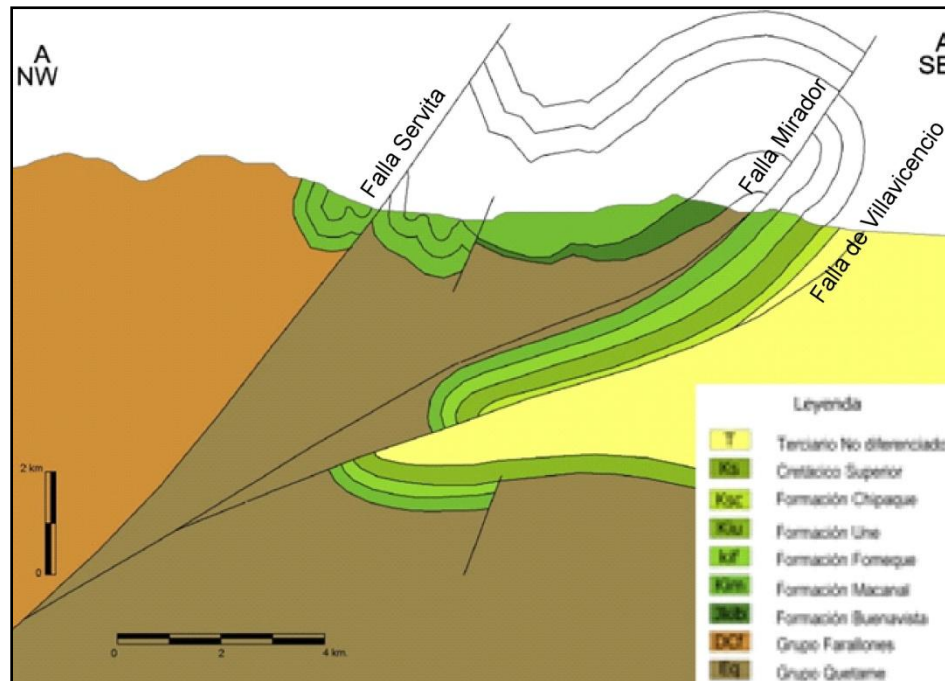


Figura 12. Modelo estructural definido para el Anticlinal de Buenavista. Ubicación del corte A-A' en la Figura 13. (Tomado de Tamara., 2009).

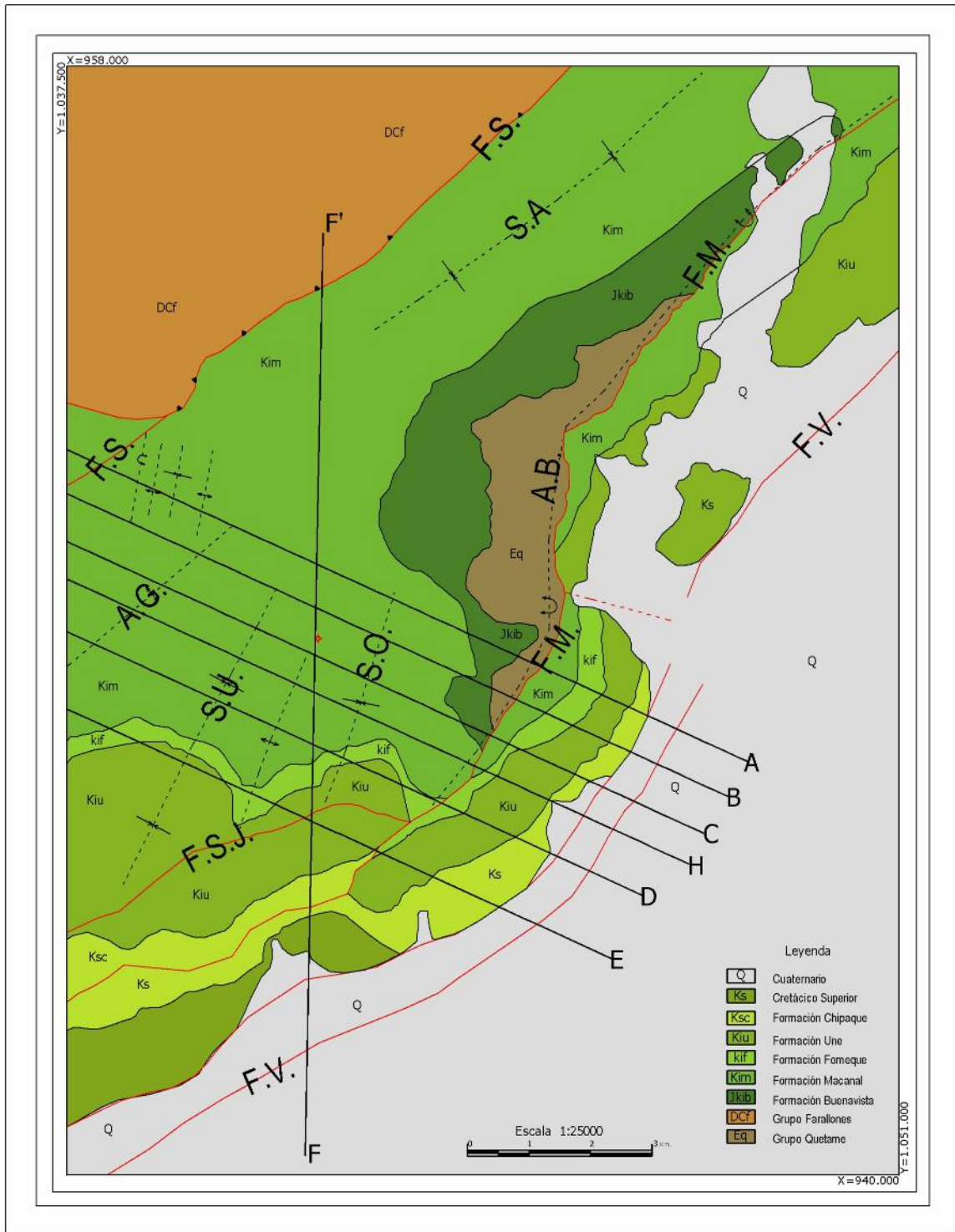


Figura 13. Mapa Geológico de Villavencio. FS. Falla Servita, FM. Falla Mirador, FV. Falla de Villavencio, FSJ. Falla de San Juan, AB. Anticlinical de Buenavista, SA. Sinclinal de la Argentina. SO. Sinclinal de Ocoa, SU. Sinclinal de la Unión, AG. Anticlinical de Guayuriba. (Modificado de Tamara, 2009).

Tamara, (2009) Propone un modelo del plegamiento en el anticlinal de Buenavista con el objetivo de obtener una geometría similar a la observada. El esquema desarrollado inicio con la construcción de un modelo de falla normales con diferentes espesores para la secuencia *syn-rift* y un espesor constante para la secuencia *post-rift*. Posteriormente se simulo la inversión de las fallas. El algoritmo utilizado fue *trishear* con una inclinación de la zona triangular de 50° hacia el occidente y un ángulo interno de 35°. El modelo se inicia con una relación de propagación-desplazamiento de 1 para la generación del pliegue. Al alcanzar la inversión del flanco, el bloque oriental de la falla se individualiza comportándose como un bloque rígido de basamento, que al ser transportado hacia el oriente produce un cizallamiento adicional del flanco invertido. En el esquema, el fallamiento supera al plegamiento, lo que se traduce en el fallamiento del flanco frontal. (Figura 14).

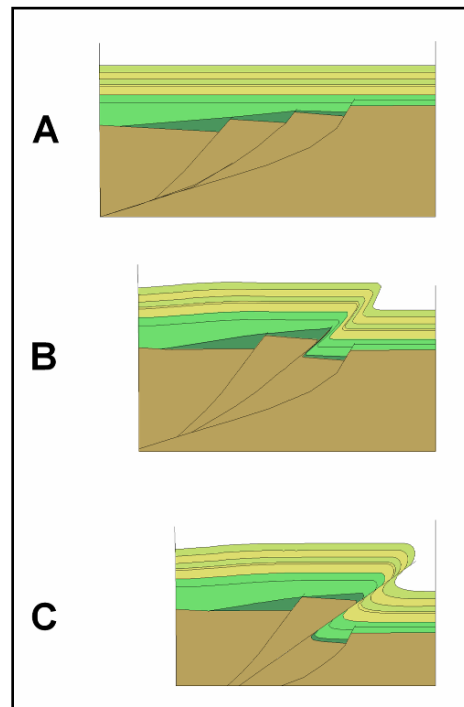


Figura 14. Esquema en el que se ilustra la formación de un pliegue de flanco invertido que involucra basamento. A. Sistema de fallas normales. En café se presenta la secuencia pre-rift, en verde la secuencia *syn-rift*, y en amarillo la secuencia *post-rift*. B. Plegamiento que involucra basamento asociado a la contracción del sistema y a la reactivación de fallas normales. C. Rompimiento del flanco frontal con el aumento en el acortamiento (Tomado de Tamara, 2009).

Silva, A. (2010), interpreta a la falla de Aguaclara como una falla de geometría rampa-despegue-rampa en el bloque yacente, que nace desde el basamento y presenta un despegue al tope del Carbonera miembro C8. Esta falla finalmente hace rampa hacia la superficie, probablemente debido a una zona de debilidad pre-existente generada por fallas normales en su bloque yacente. La falla de Guaicaramo presenta una geometría variable que inicia hacia el SW y variando al NE como una estructura en rampa a rampa-despegue-rampa con un despegue intermedio al tope de la Fm. Fômeque. (Figura 15).

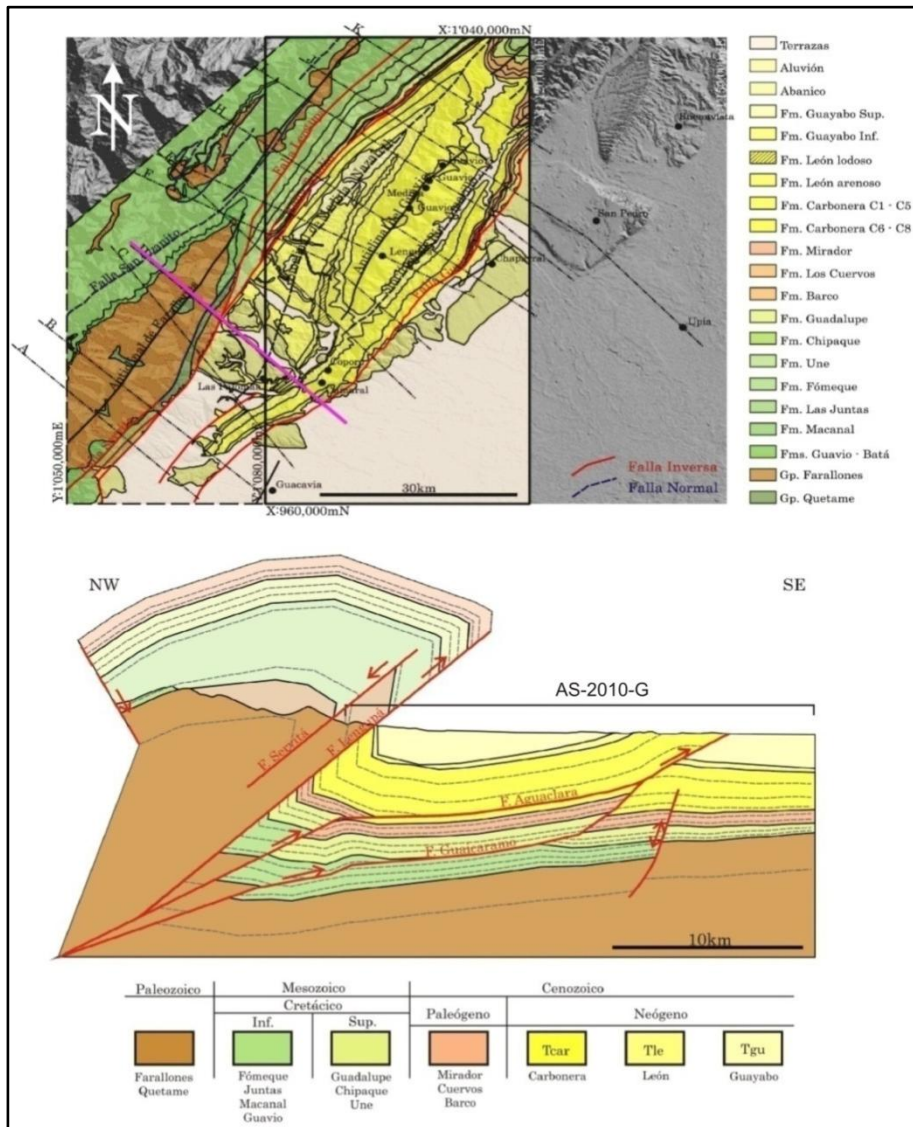


Figura 15. Sección balanceada, siguiendo la línea sísmica AS-2010-G, la ubicación de la sección se observa en la línea resaltada. (Tomado de Silva, 2010)

6. METODOLOGÍA

La metodología seguida para la realización de este trabajo se divide en cuatro fases, las cuales están encadenadas y ayudaron a alcanzar, de forma efectiva, el objetivo de este trabajo. Estas fases son:

6.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Revisión bibliográfica: Correspondiente a los estudios geológicos realizados en el área y métodos utilizados, entre los que se destacan: artículos científicos, tesis, publicaciones y libros afines al análisis estructural que tratan sobre la zona de estudio. Esta recopilación se llevó a cabo en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP-ECOPETROL S.A.) por medio del CIT (Centro de Información Técnica) y en la Universidad Industrial de Santander (UIS) a través de los recursos electrónicos y bases de datos como *AAPG JOURNALS Datapages*.

Recopilación geológica: Selección del material geológico necesario para dar comienzo a las actividades del proyecto de grado, este material consiste en el mapa geológico para el área de estudio (Mapa geológico de la Cordillera Oriental, Piedemonte Oriental y Valle Medio del Magdalena realizado por Grupo de Geología Estructural- Proyecto Cuencas Subandinas del ICP, 2010), archivo de elevación digital del terreno (*DEM-Digital Elevation Model*), líneas sísmicas de rumbo y buzamiento para el área en formato digital *.SGY propiedad de (ITEP, 2010.), información de pozos (*survey*, topes de formación, *checkshots*) (ITEP, 2010.)

Se seleccionaron 6 líneas sísmicas a interpretar (Figura 16), de estas 6 líneas sísmicas se eligieron 2 líneas en donde propuso el modelo estructural a restituir (Figura 19). Estas 2 líneas son:

- HR-2010-A
- HR-2010-B

Los pozos ubicados en el área de estudio son:

- OMEGA-1.
- ALFA-1.

(Ver Figura16)

6.2 FASE DE TOMA DE DATOS EN CAMPO

Antes de realizar la labor de campo en esta fase se obtuvieron 9 fotografías aéreas en las cuales se pudo identificar las posibles áreas de acceso a la zona, los puntos de interés, rasgos estructurales y geomorfológicos para encontrar las evidencias en superficie de la falla Servita, estas fotografías aéreas son:

- IGAC C-2524 Fotografías: 000015, 000017, 000016.
- IGAC C-2324 Fotografías: 000024, 000025, 000026, 000027, 000028, 000029.

La cartografía del trazo de la falla Servita se realizó mediante recorridos de campo a lo largo de los ríos Humea, Caño Negro, Caño Blanco, río Borrachero, Río Guajaray y río Piri, que se encuentran en el municipio de Medina y vereda los Alpes correspondientes a el departamento de Cundinamarca, planeando estaciones de control sobre el trazo de la falla Servita dentro del área delimitada. Se llevó un control de las unidades geológicas aflorantes del bloque colgante y yacente de la Falla Servita en un área de 50 Km² correspondientes al sinclinal de Medina. Este trabajo de campo produjo información de 49 estaciones, de las cuales en 18 estaciones fue posible obtener datos estructurales (Tabla 1), en cada estación se realizaba una ubicación geográfica, un esquema geológico, descripción litológica, toma de fotografías y datos estructurales.

El mapa de campo fue digitalizado y georeferenciado en el *software GlobalMapper*, para refinar la cartografía del mapa geológico utilizado como base el mapa propiedad de ICP-ECOPETROL S.A en el *software ArcGis*. (Figura 16)

Punto	X	Y	Z	AzRumbo	MgBuzamiento
1	1067832	984540	632	100	30
2	1068010	984491	623	320	45
3	1068302	984354	639	335	90
4	1068596	984355	573	275	45
5	1068804	984302	588	340	65
6	1068125	984412	691	320	45
7	1068252	982344	869	250	45
8	1068157	982296	936	230	40
9	1068081	982298	958	230	80
10	1068815	980759	690	230	55
11	1068331	980914	785	65	35
12	1065856	978787	934	325	65
13	1063886	975016	845	285	35
14	1063886	975016	845	300	28
15	1063886	975016	845	285	90
16	1068826	976696	740	290	70
17	1065620	978068	887	175	45
18	1067392	983894	1020	205	50

Tabla 1. Datos de rumbo azimut de rumbo y magnitud de buzamiento

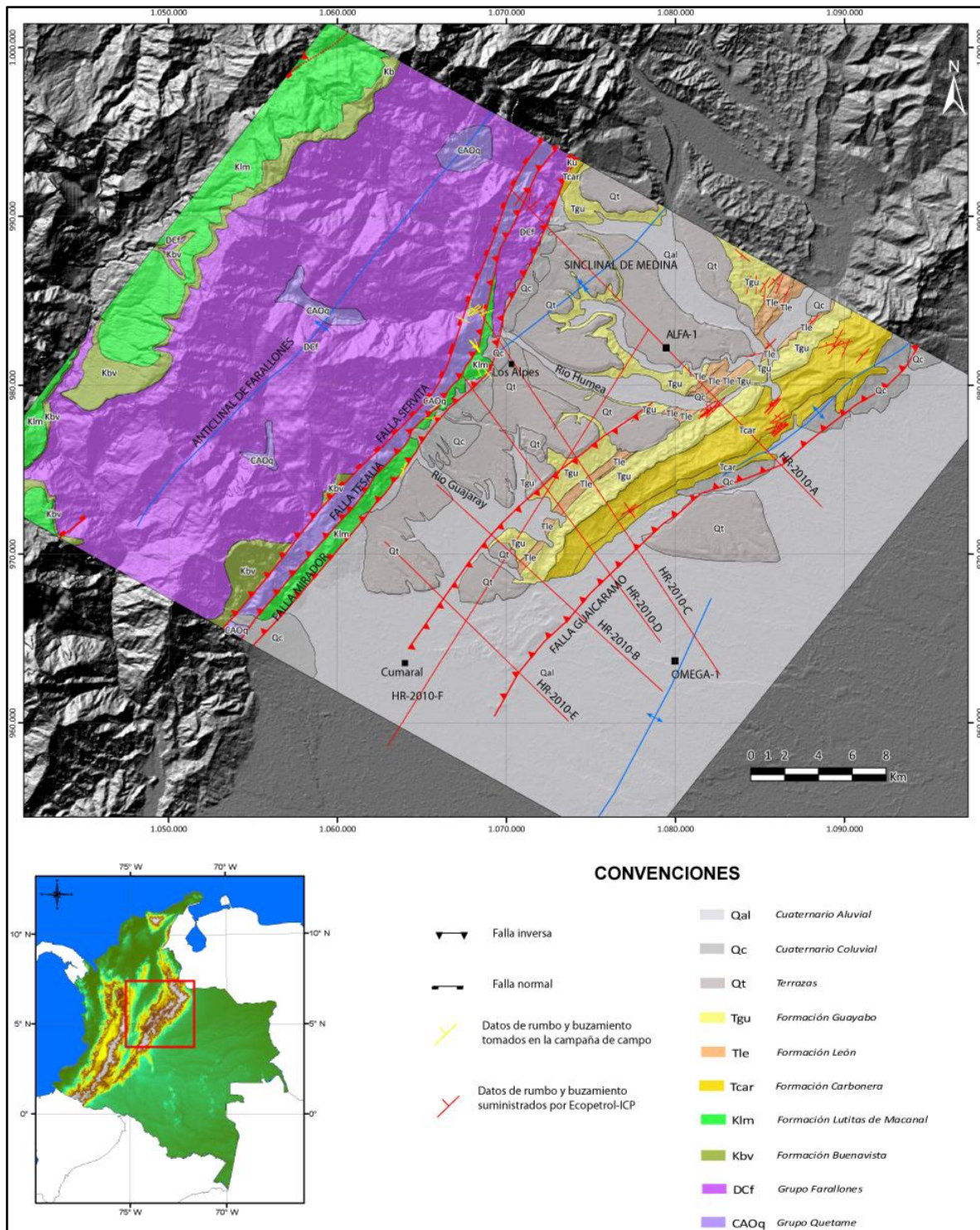


Figura 16. Mapa geológico de la zona de trabajo y ubicación de las líneas sísmicas

6.3 INTERPRETACION SISMICA

La fase de interpretación sísmica comienza con la carga de información como el mapa geológico en archivo .dxf en el software *2DMove*, modelos digitales de elevación (DEM), datos de los 2 pozos (*Surveys*, topes y *checkshots*), 18 datos de buzamiento tomados en campo y 47 datos de buzamiento tomados en proyectos internos del ICP, 6 líneas de buzamiento y 1 línea de rumbo (Figura 16).

Para la interpretación sísmica se generaron los perfiles topográficos de las líneas sísmicas en el *software* GlobalMapper a partir del DEM. Posteriormente se hizo la conversión a tiempo de la topografía utilizando el *software* *2DMove*, teniendo en cuenta la velocidad de corrección para graficado tomado de los archivos .tiff de cada línea sísmica. Adicionalmente se desplaza (*shift*) cada línea sísmica cargada a un datum común de los diferentes programas sísmicos, donde se interpretan los topes de la Formación León, Carbonera y Mirador con ayuda de los contactos obtenidos del mapa geológico y los topes de los pozos ALFA-1 y OMEGA-1, que fueron convertidos a tiempo mediante los *checkshots* de los mismos.

La metodología de amarre de los pozos en tiempo que se uso está basada en los datos de espesores reales medidos en el campo (Mora & Parra, 2004) y buzamientos reales tomados en comisiones de campo del ICP y reportes del pozo ALFA-1, por lo tanto se construyo un pseudo-pozo en la ubicación del pozo ALFA-1 para con ellos calcular el espesor aparente mediante la fórmula: $\text{Espesor aparente} = \text{Espesor real} / \cos(\text{Buzamiento real})$ (Figura 17), en el pozo ALFA-1. Posteriormente y de acuerdo a la velocidad de intervalo de cada formación en el pozo se descartaron los intervalos de velocidad menores 7000 m/seg y mayores a 17000 m/seg ya que estos intervalos se consideraron anómalos, pues estaban presentes en intervalos muy cortos. Con base en esto se convirtieron los datos de espesor real a intervalos de tiempo doble que correspondían con las diferentes unidades cortadas en el pozo ALFA- 1.

T (tiempo (ms)) = (S espesor conocido (m)/ V velocidad Conocida (m/s).

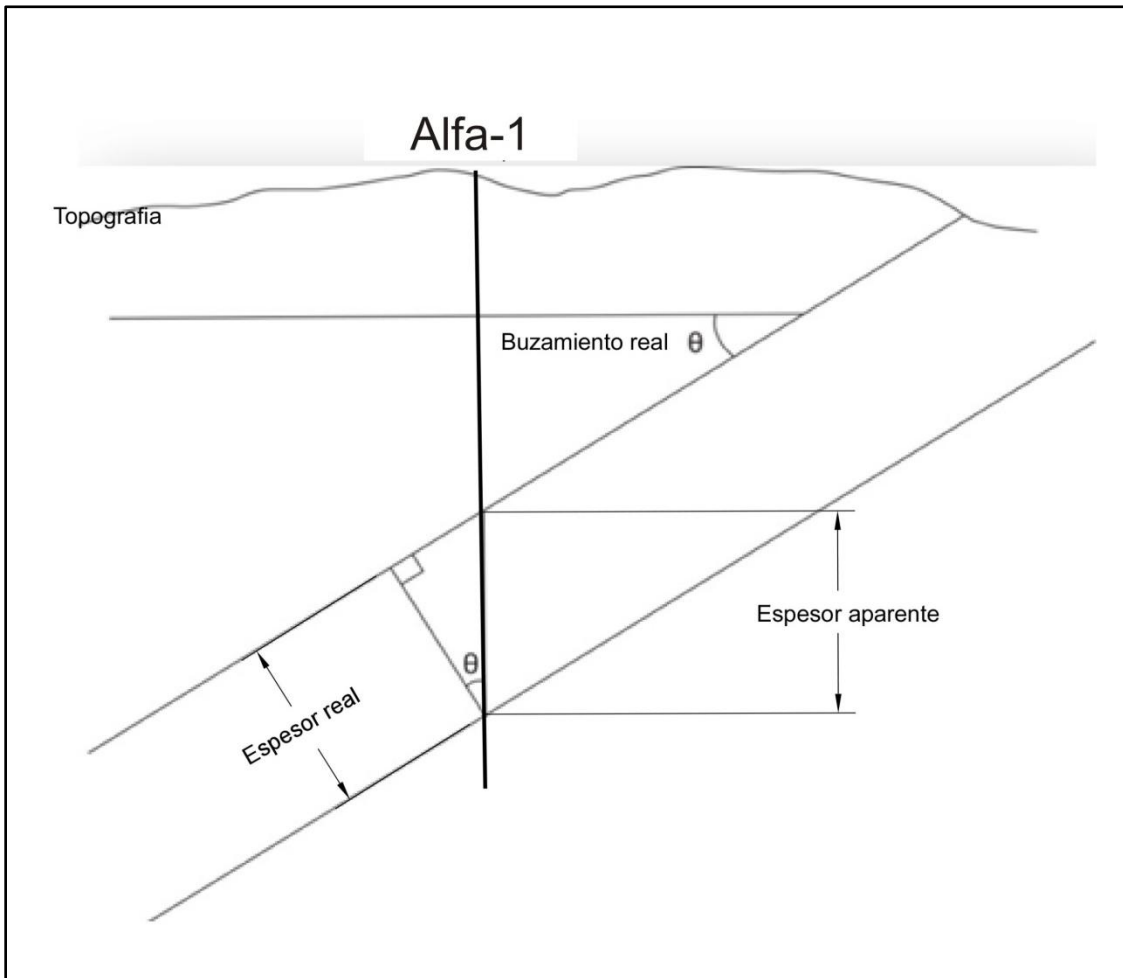


Figura 17. Calculo para el espesor aparente basado en el espesor y buzamiento reales. $\text{Espesor aparente} = \text{Espesor real} / \cos(\text{Buzamiento real})$

Con estos datos en tiempo y asesorados por la experiencia en interpretación sísmica en esta zona del director se estimaron esos topes de las formaciones correctos, para con ello poder iniciar la interpretación de las líneas sísmicas en tiempo.

En el procedimiento anterior fue posible estimar velocidades de intervalo para diversos horizontes estratigráficos. Con base en estas velocidades, se pudo llegar a convertir a profundidad los archivos que contenían los diversos horizontes y fallas en tiempo.

Estos procesos se plasmaron en un flujograma mostrado en la figura 18.

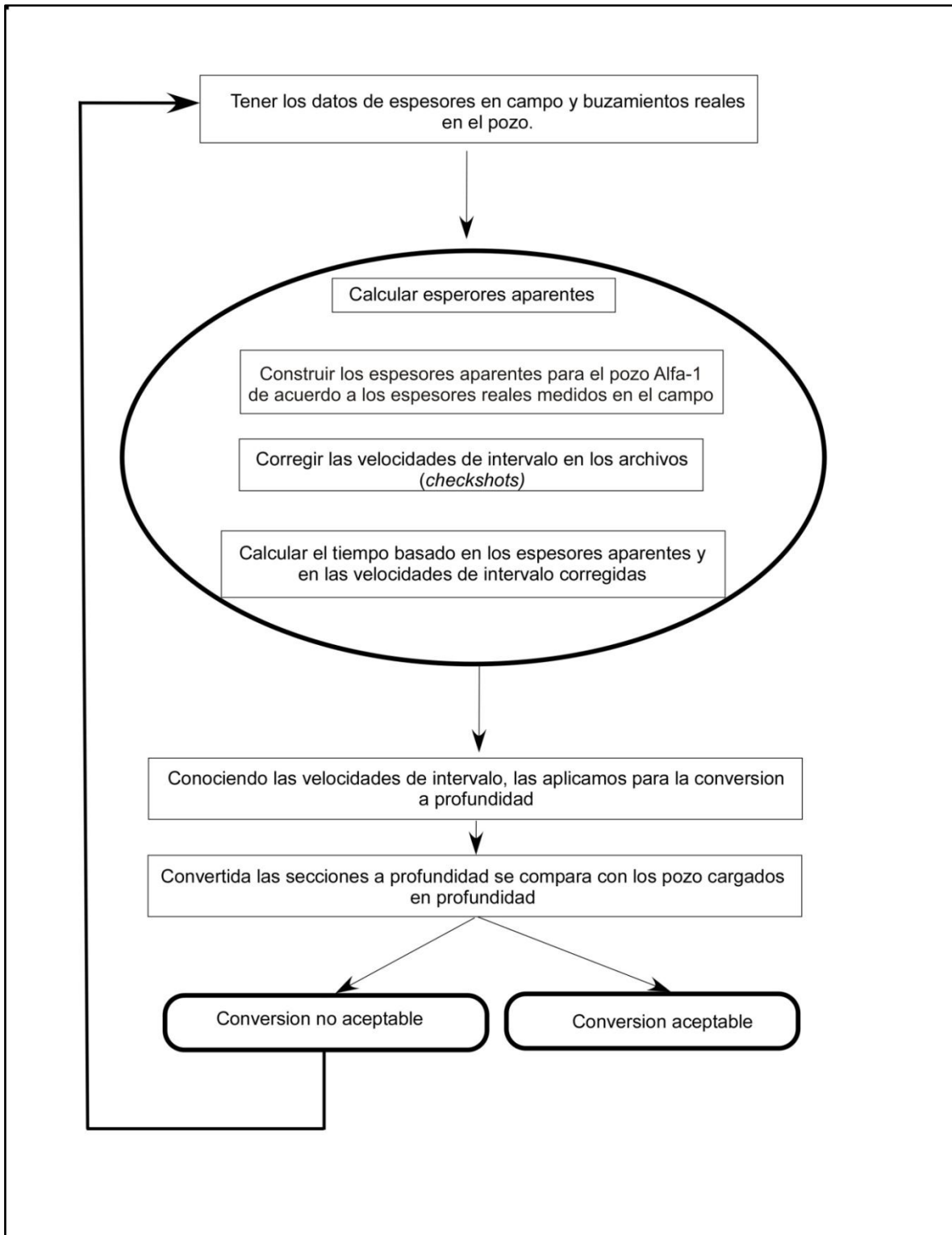


Figura 18. Metodología para definir la tabla de velocidades y conversión a profundidad.

6.4 CONVERSION A PROFUNDIDAD Y BALANCEO DE SECCIONES

Durante la conversión a profundidad, se inicio con la construcción de los archivos ASCII (.txt), que están basados en los registros de velocidad corregidos (*checkshots*), para los cuales se generaron tablas con los intervalos de velocidades y los polígonos respectivos para cada formación. Las interpretaciones de las líneas sísmicas que se convirtieron a profundidad fueron hechas sobre las líneas: HR-2010-A, HR-2010-B, y son la base para la generación de las secciones a restituir (Sección A-A' y B-B' Figura 19). La conversión a profundidad fue realizada con la operación *Depth Conversion* que utiliza el método de rayo vertical en el *software 2DMove*. Tras este proceso se pudo realizar una conversión a profundidad aceptable para nuestros propósitos, esta conversión a profundidad fue verificada con el mapa geológico, buzamientos, espesores tomados del trabajo de Mora & Parra, (2004) y los topes de las formaciones en los pozos cargados en profundidad. Posteriormente se generaron 2 cortes estructurales siguiendo la dirección de las líneas sísmicas las cuales cortan perpendicularmente las estructuras principales y son paralelas a la dirección del transporte (NW-SE). (Figura 19).

Una vez construidas las secciones se realizó la restitución por medio del algoritmo de *Restoration Fault-Parallel Flow* de *2DMove*, (que conserva longitudes de las líneas y espesores de las capas). Pero para el anticlinal de Farallones se interpreto como un pliegue por trishear, por lo que el algoritmo de restitución utilizado fue *Restoration- Trishear* de *2DMove* (que conserva área de las capas). La restitución comenzó con el sistema de fallas de Guaicaramo-Aguaclara y finalizo en el sistema de fallas de Tesalia-Mirador y dicha restitución fue aplicada hasta la horizontalización de la Formación Mirador, por el vital interés que se tiene sobre esta formación, por ser pre-inversion y ser una de las principales productoras de hidrocarburos en el Piedemonte Oriental de la Cordillera Oriental.

6.5 INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS PARA ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Comprende el análisis y discusión con los directores de los resultados obtenidos durante el proyecto. Finalmente se hace la elaboración y edición del informe final.

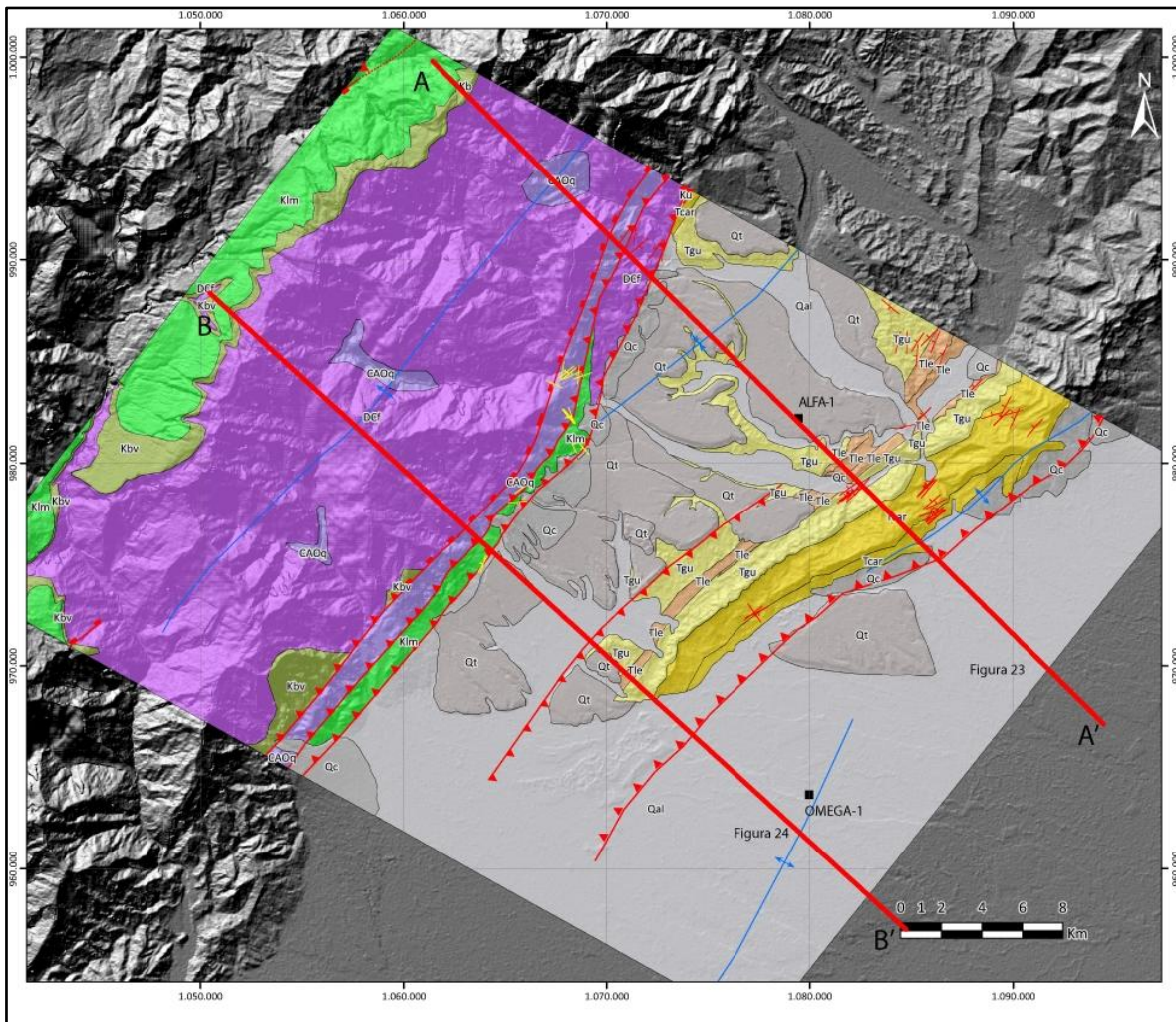


Figura 19. Mapa geológico y ubicación de las secciones a restituir. Convenciones según Figura 16.

7. . RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la interpretación de las fotografías aéreas evidencian el trazo tentativo de la falla Tesalia, esto fue posible gracias a los deslizamientos o derrumbes alineados y cambios geomorfológicos que se observaron en las fotografías aéreas y en el campo. Partiendo de esto y de los puntos de interés anteriormente establecidos se realizó la campaña de campo y se evidencio lo observado en las fotos (Figura 20)

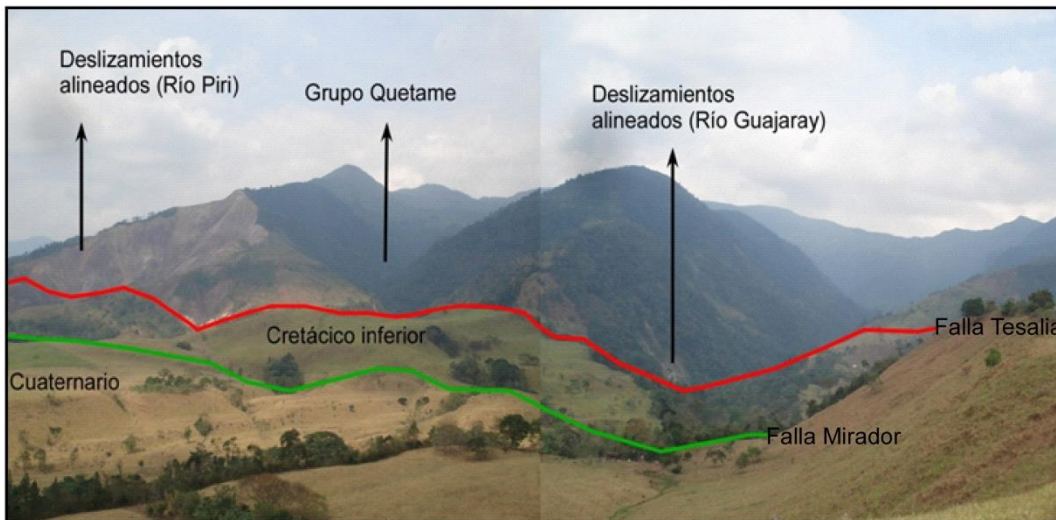


Figura 20. Fotografía de los deslizamientos alineados sobre el trazo de la falla Servita en color rojo el trazo de la falla y en color verde el contacto fallado entre el Cretácico y cuaternario (Falla Mirador).

La fase de campo estaba encaminada a la búsqueda de datos estructurales en las formaciones aflorantes en el bloque colgante y yacente de la falla Tesalia, para con ello cartografiar el trazo de la falla de Tesalia, todo con el fin de describir la naturaleza de la deformación en el flanco frontal del anticlinal de Farallones y la posible geometría del sinclinal de Medina, para la construcción de dos secciones estructurales y la caracterización de la zona de relevo estructural.

En el proceso de interpretación sísmica se identificaron los topes de las formaciones más representativas (Formación León, Intervalo C-1 Formación Carbonera, y la Formación Mirador), los cuales fueron lo más continuos y sencillamente reconocibles en las líneas sísmicas, esto claramente amarrado a los

datos de tiempo de cada pozo, todo con el fin, de identificar estos topes en toda el área de estudio con la ayuda de la línea sísmica de rumbo. Los topes interpretados fueron la Formación León, Carbonera y en algunos casos los intervalos C5-C8 (Formación Carbonera) y la Formación Mirador.

Posteriormente, se realizó la conversión a profundidad, basada en la interpretación de las líneas sísmicas en tiempo, con este fin se construyó una tabla de velocidades para cada unidad en las líneas sísmicas, tanto para el bloque colgante como para el yacente apoyada en los archivos de velocidades corregidos (*checkshots*) de los pozos ALFA-1 y OMEGA-1 (Tabla 2).

Área de Medina		Velocidad Bloque Colgante Falla Guaicaramo (m/s)	Velocidad Bloque Yacente Falla Guaicaramo (m/s)
Símbolo	Formación		
Tgu	Guayabo	2800	2840
Tle	León	4000	3800
Tcar	C1	3800	3579
	C2		
	C3		
	C4		
	C5		
	C6		
	C7		
Tmi	Mirador	3931	
Aire		2800	

Tabla 2. Muestran las velocidades que se utilizaron en la conversión a profundidad, tomados de los archivos de velocidades de los pozos.

Los parámetros utilizados para la conversión fueron una velocidad inicial de 2.800 m/seg, un valor de la tasa de incremento de la velocidad con el aumento de la profundidad (k) de 0.50 y un número de muestreo para la conversión en la sección A-A' de 100 y para la sección B-B' de 30.

7.1 ESTILO ESTRUCTURAL

Para la caracterización y análisis geométrico de la zona de relevo estructural se realizaron un total de 2 secciones representativas del estilo estructural que se presenta en el área de Medina. Los cortes están situados entre al Anticlinal de Farallones y la estructura frontal del Piedemonte en el área de estudio (Falla Guaicaramo). Con el fin de analizar el acortamiento y desplazamiento que se presente en cada una de ellas, para ver la viabilidad geométrica, pues el proyecto está encaminado es a caracterizar y analizar la geometría, no la cinemática.

7.1.1 Secciones Estructurales

Las secciones estructurales fueron construidas a partir del mapa geológico, datos estructurales, espesores (Mora, 2007 y Parra, 2008), líneas sísmicas en tiempo y la conversión a profundidad de dicha interpretación.

La sección A-A' que se presenta al norte del área de estudio y está basado en la línea sísmica HR-2010-A (Figura 21). La seccion B-B' se presenta al sur del área de estudio y fue construida siguiendo la línea sísmica HR-2010-B (Figura 22). La interpretación del estilo estructural se empezo en la zona norte, ya que es donde se presenta la mayor cantidad y confiabilidad de los datos de pozo y superficie. En la seccion A-A' se interpreto un pliegue por flexion de falla que implica basamento asociado a la falla de Aguaclara pero influenciado tambien por una segunda falla llamada Guaicaramo. El despegue de la falla de Aguaclara se interpreta en el intervalo C8 de la Formacion Carbonera; la formacion de estas fallas esta condicionada por la zona de debilidad que se genera debido a la geometria preexistente de la falla normal reactivada. La evolucion del pliegue por flexion de falla que se observa en las dos secciones es evidente ya que su amplitud va aumentado hacia el norte, pues al norte, en el pliegue se observa que afloran unidades mas antiguas (miembros de la Formacion Carbonera) que al sur, donde

solo aflora la formacion Leon. Es muy probable que, como se espera en los modelos de plegamiento por flexion de falla (Suppe, 1983), la mayor amplitud del anticlinal en el colgante de la falla se relacione con un mayor desplazamiento de la misma. El anticlinal de Farallones se interpreto como un pliegue generado por el mecanismo de deformación trishear (Erslev, 1991), debido a que los datos de buzamiento evidencian el flanco frontal invertido del anticlinal de Farallones. Debido en parte a la dificultad que existe para reactivar las fallas normales en compresión, todo ello genero la geometría presente en este anticlinal, para posteriormente crearse los *shortcuts* y formar las fallas de Tesalia y Mirador.

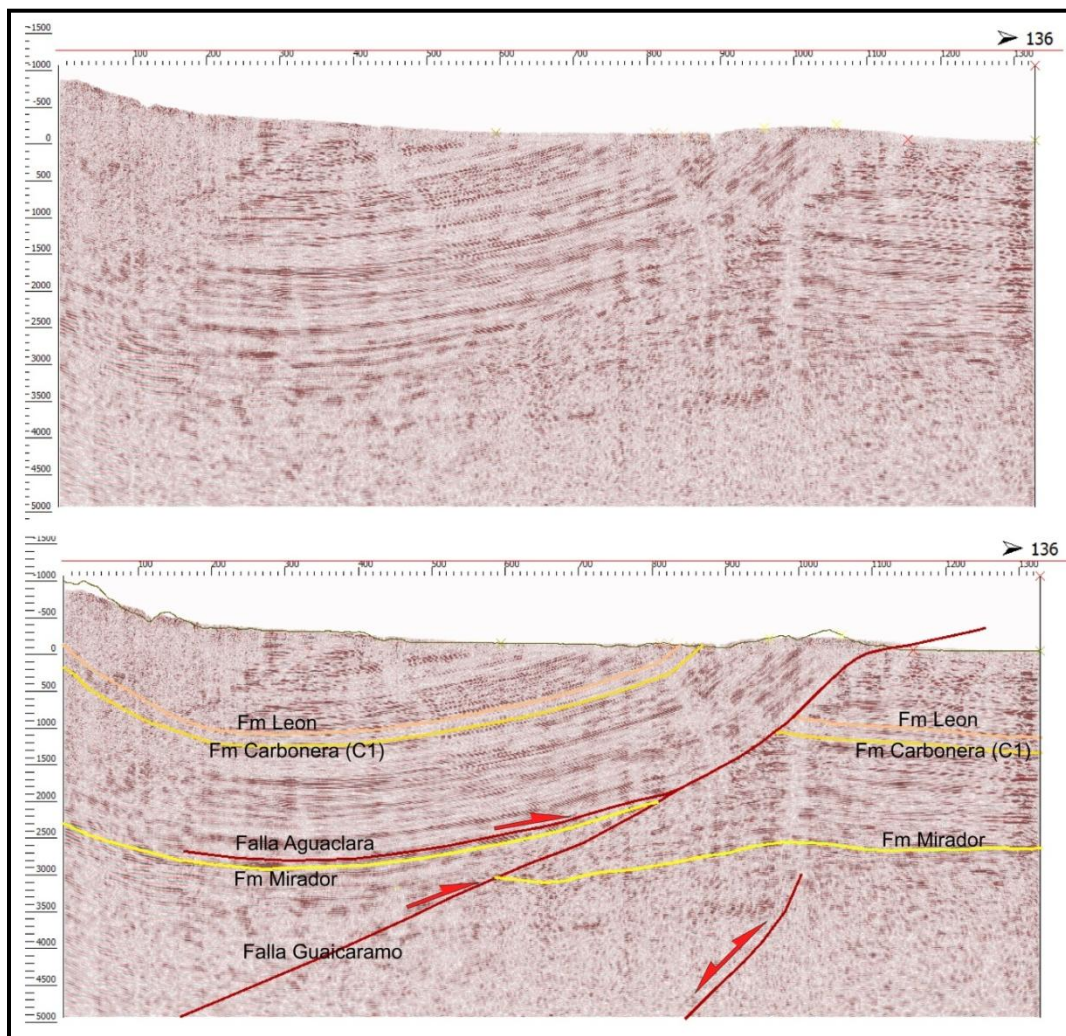


Figura 21. Línea sísmica HR-2010-A en tiempo doble, con su respectiva interpretación. Ubicación línea sísmica Figura 19

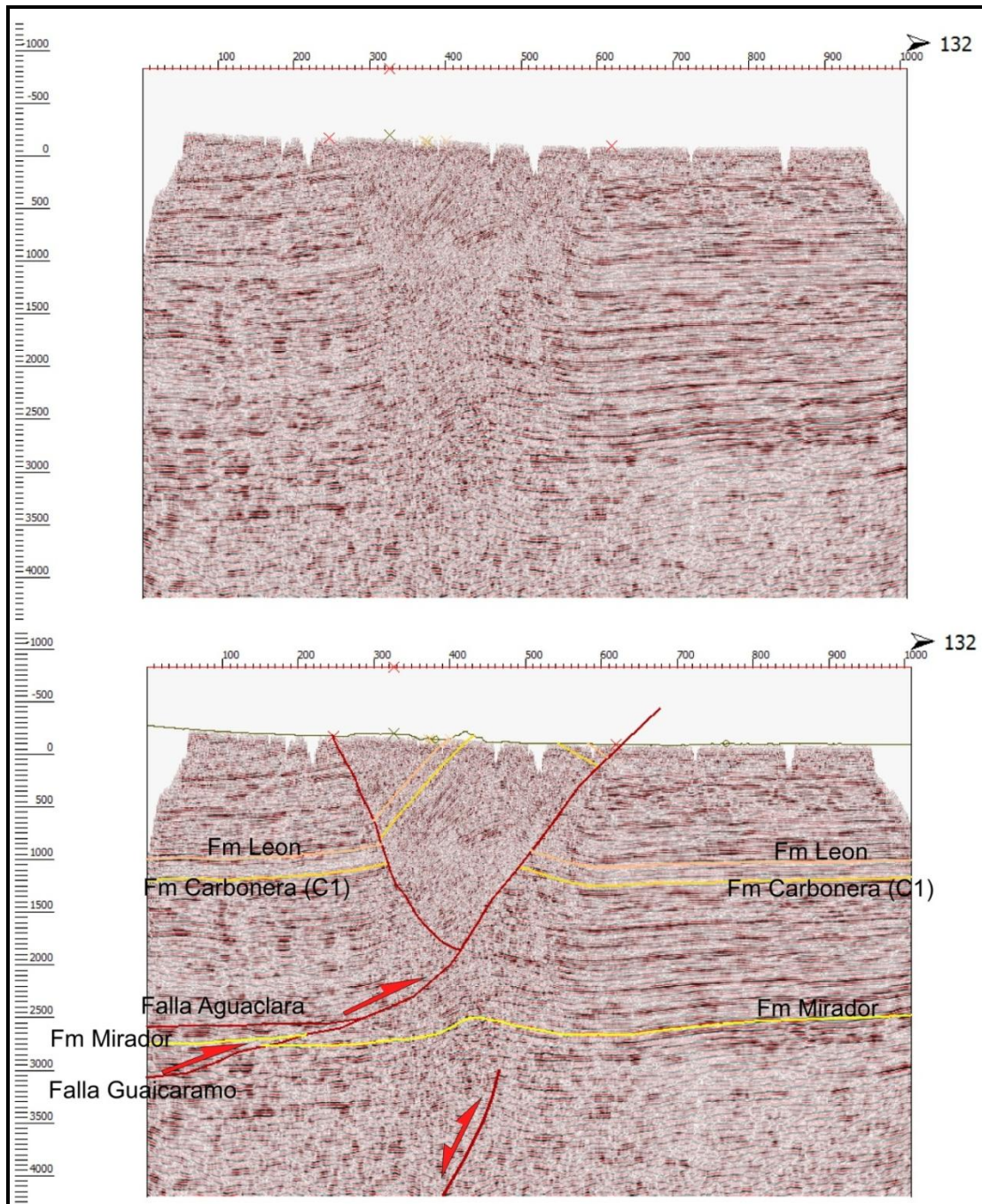


Figura 22. Línea sísmica HR-2010-B en tiempo doble, con su respectiva interpretación. Ubicación línea sísmica Figura 19

7.2 RESTITUCION GEOMETRICA

Las 2 secciones geológicas mostradas sección A-A' (Figura 23), sección B-B' (Figura 24), han sido construidas teniendo en cuenta las reglas básicas de restitución de secciones estructurales (Wilkerson & Dicken, 2001), por lo tanto la geometría presente es aceptable, mostrando una secuencia desde la geometría inicial de deformación (Figura 25 (Sección A-A')- Figura 26 (Sección B-B')),

Los parámetros utilizados para la restitución o datum al cual se realizó la restitución fueron aplicados principalmente a la Formación Mirador en el bloque colgante de las fallas de Aguaclara, Guaicaramo y Mirador mediante la opción de *Join Beds* presente dentro del algoritmo *Fault-Parallel Flow*, por lo que se pudo calcular un desplazamiento exacto para cada falla y se ven en la Tabla 3, en segunda medida se utilizó el algoritmo *Trishear*, para las secciones A-A' y B-B' en el anticlinal de Farallones, usando una inclinación de la zona triangular de 50° hacia el NW y un ángulo interno de 47.10° y 35.10° respectivamente.

DESPLAZAMIENTOS TOPE FORMACION MIRADOR (m)						Total del desplazamiento (km)
SECCION	Sistema de Fallas Tesalia-Mirador	Falla Aguaclara	Falla Guaicaramo	BackThrust Guaicaramo (Fm León)	Total del desplazamiento	
A-A'	14264.7	4943.1	1602.1		20809.9	20.8
B-B'	9865.4	673.2	833.0	71.9	11443.4	11.4

Tabla 3 Desplazamiento de las diferentes fallas en las dos secciones restituidas

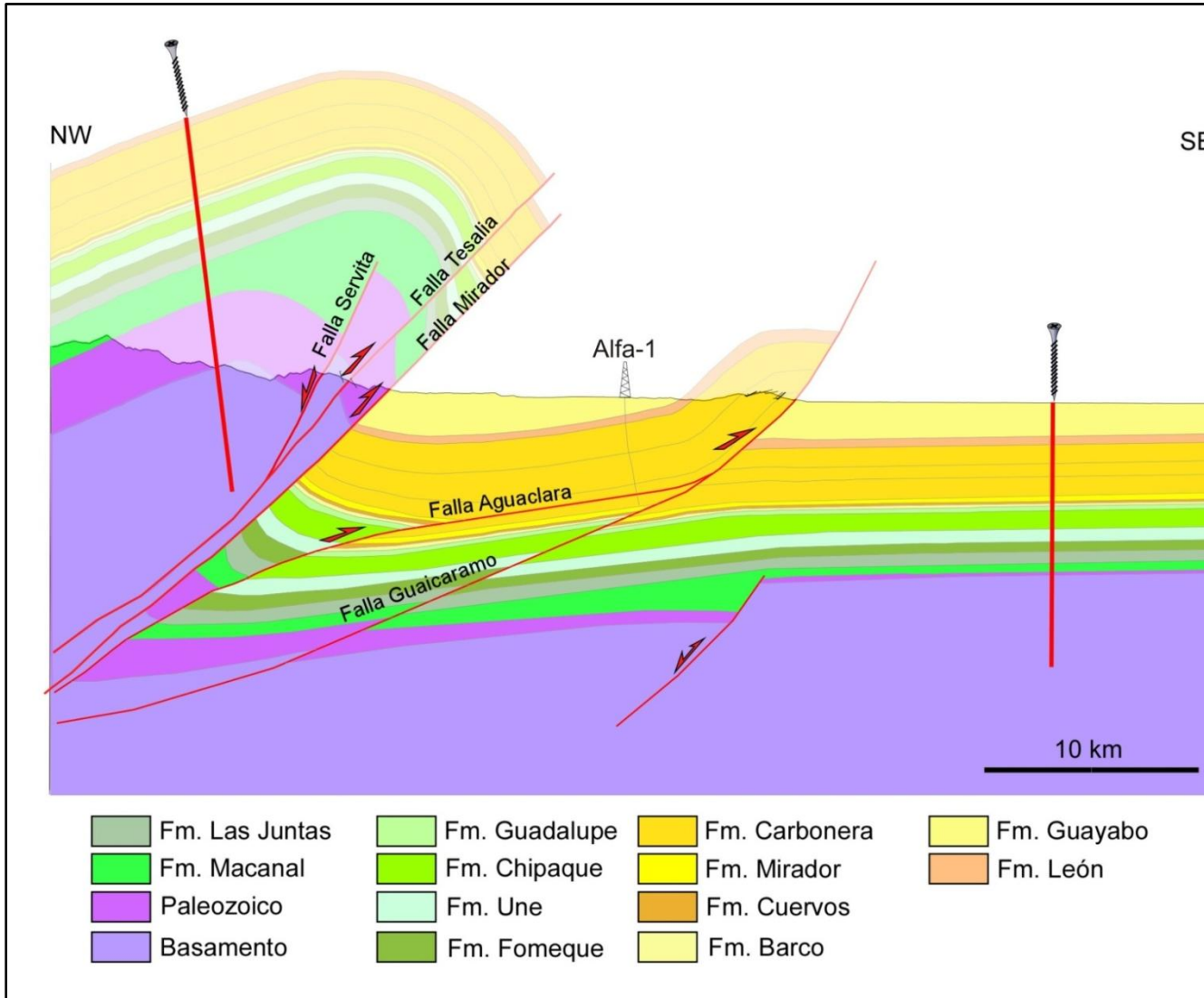


Figura 23. Sección estructural basada en la línea HR-2010-A

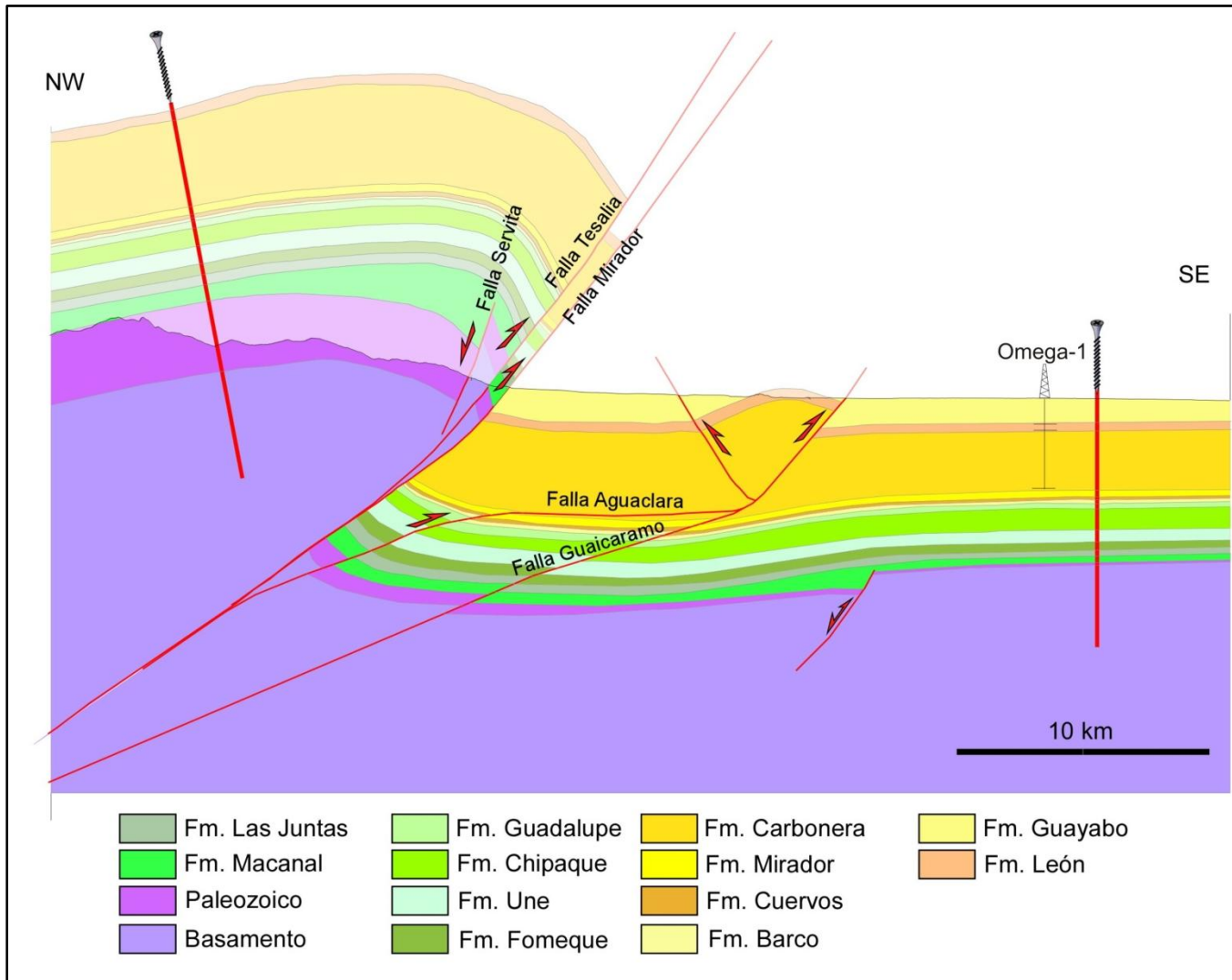


Figura 24. Sección estructural basada en la línea sísmica. HR-2010-B

Basados en estos datos de desplazamiento se procedió a analizar el porcentaje de desplazamiento para cada uno de los sistemas de fallas de Tesalia-Mirador y Aguaclara-Guaicaramo (Tabla 4)

SECCION	Desplazamiento sistema de fallas Tesalia-Mirador (%)	Desplazamiento fallas Aguaclara-Guaicaramo (%)
A-A'	68.55	31.44
B-B'	85.96	13.15

Tabla 4 Porcentajes de desplazamiento para los dos sistemas de fallas principales.

7.3 ACORTAMIENTO

Para el cálculo de los balances de acortamiento es indispensable conocer la longitud de la sección en el estado actual y restaurada, para esto es indispensable construir un *pin* estático y otro móvil, el cual fue situado perpendicular a las capas y se fue añadido a cada proceso de restitución para con ello conocer la longitud de la sección en cada etapa y así poder calcular el acortamiento. (Tabla 5).

BALANCES DE ACORTAMIENTO		
SECCION	Acortamiento (Km)	Acortamiento (%)
A-A'	25.8	66.0
B-B'	19.6	55.6

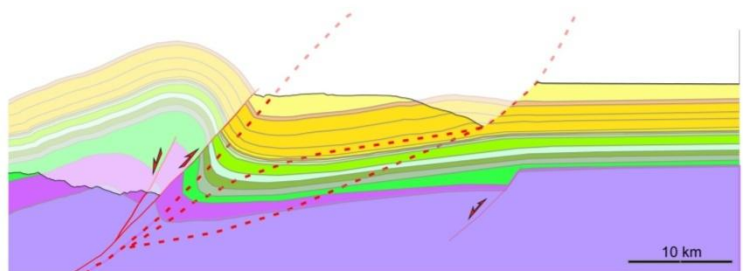
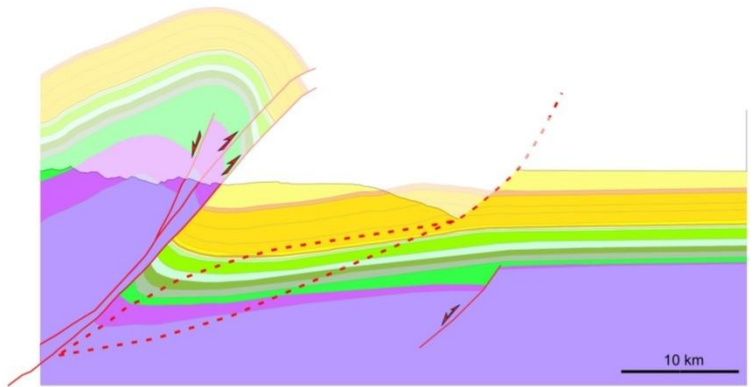
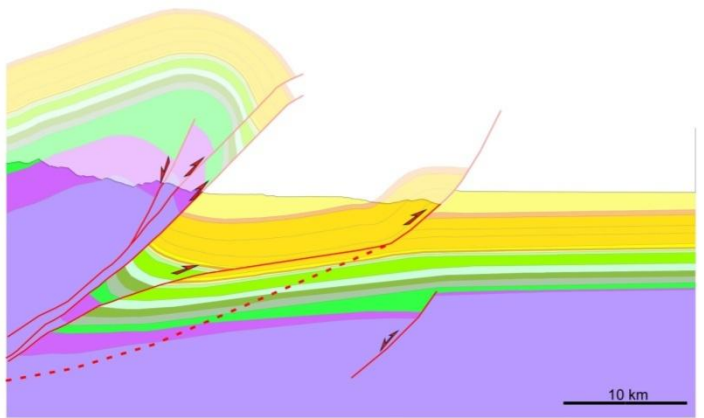
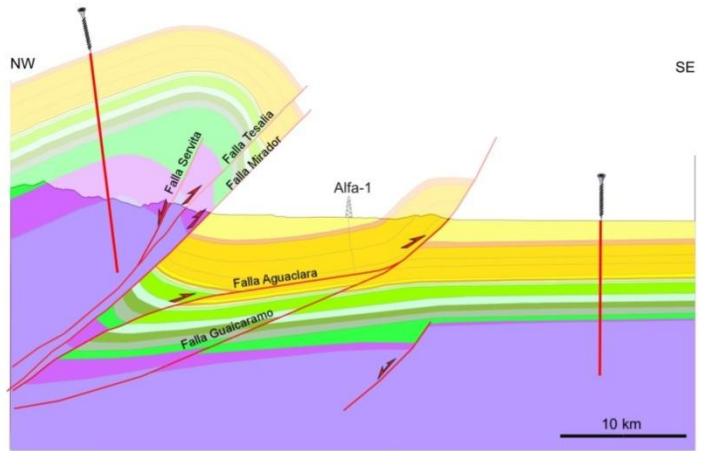
Tabla 5 Balances de acortamiento para las dos secciones restituidas

Con esto se pudo realizar el mismo análisis que se llevo a cabo con el desplazamiento, es decir, calcular el porcentaje de acortamiento para cada sistema de fallas, los resultados obtenidos se ven en la tabla 6

SECCION	Acortamiento sistema de fallas Tesalia-Mirador(%)	Acortamiento fallas Aguaclara-Guaicaramo (%)
A-A'	77.9	22.12
B-B'	95.76	4.23

Tabla 6 Porcentaje de acortamiento para los dos sistemas de fallas principales

Al analizar los porcentajes de acortamiento y desplazamiento para cada sistema de fallas, se evidencia que son directamente relacionados, por lo que se puede observar que en los cálculos de acortamiento y desplazamiento existe similitud. Es decir, cuando el sistema de fallas de Tesalia-Mirador alcanza un desplazamiento máximo al sur (sección B-B') la falla de Aguaclara-Guaicaramo posee un desplazamiento mínimo y viceversa. Es decir, hacia el norte (sección A-A') el desplazamiento de la falla de Aguaclara-Guaicaramo aumenta y el desplazamiento del sistema de Fallas de Tesalia-Mirador disminuye. Demostrando así la zona de relevo estructural y la distribución tanto en desplazamiento como en el acortamiento. En este escenario es bastante probable una interacción mecánica de las fallas de Guaicaramo/Aguaclara y la falla de Tesalia, robusteciendo la hipótesis de que sus planos deben converger en profundidad (Dahlstrom, 1969)



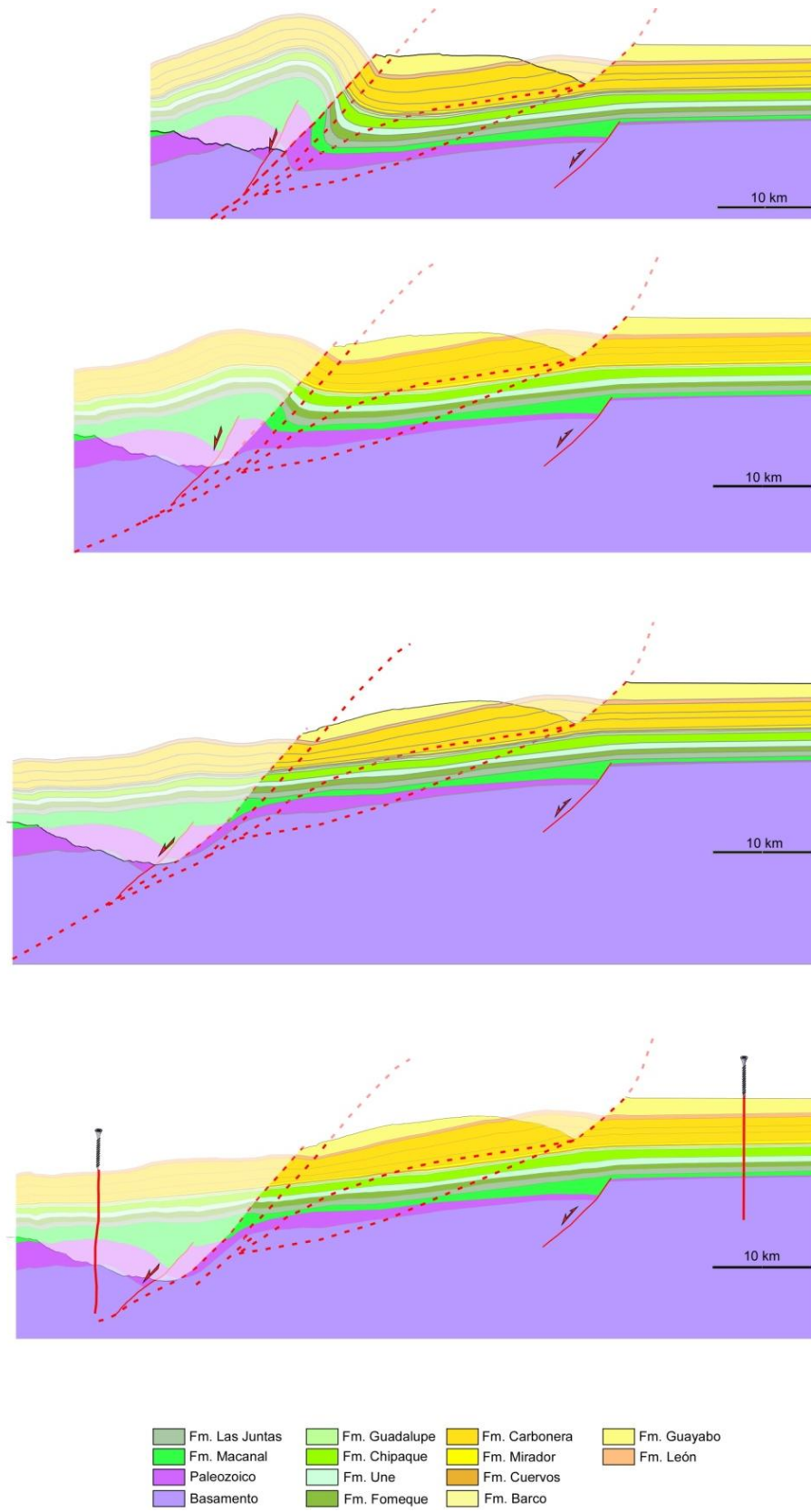
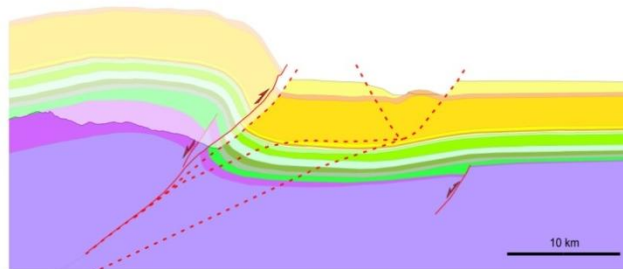
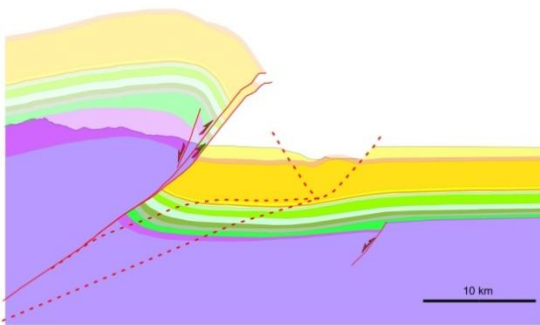
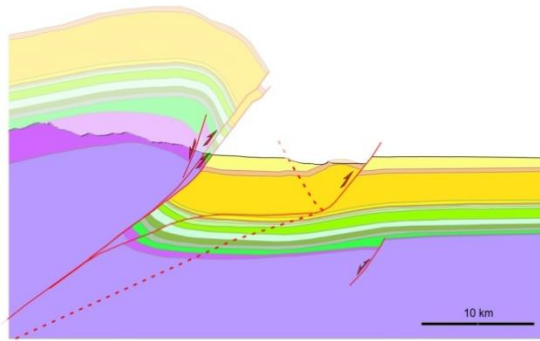
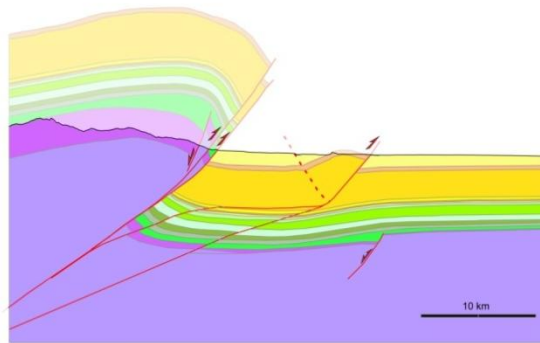
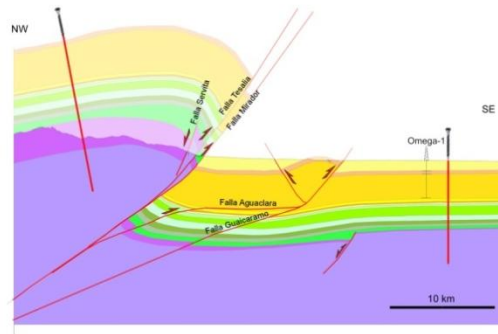


Figura 25. Secuencia de restitución de la sección A-A'



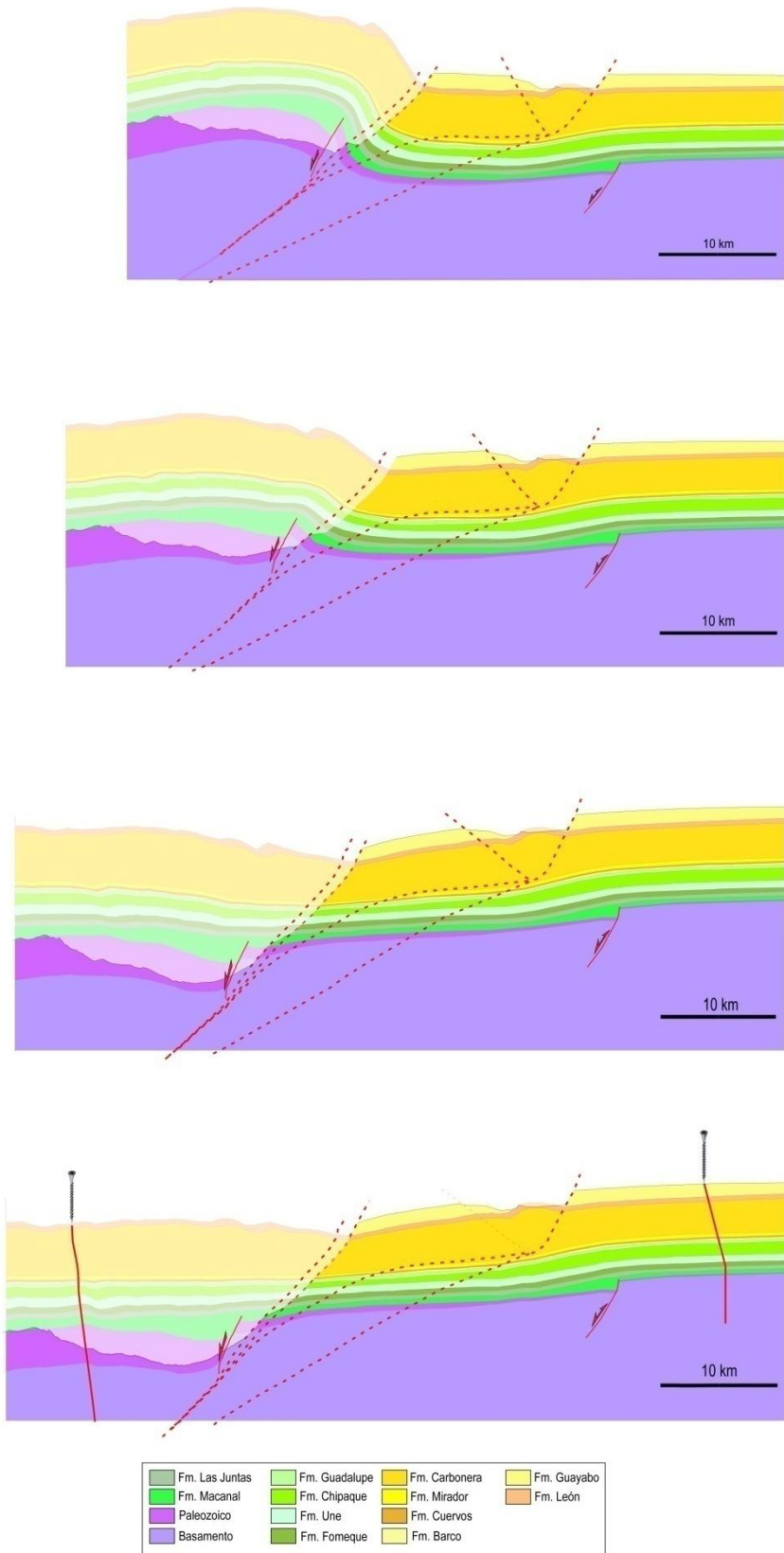


Figura 26. Secuencia de restitución de la sección B-B'

8. PROSPECTIVIDAD DE LAS POTENCIALES TRAMPAS EN EL AREA

En la construcción de las dos secciones estructurales y los balances de acortamiento podría incluso evidenciarse la ausencia de apilamientos de escamas tipo Floreña en el *subthrust* de la falla de Tesalia, por lo tanto se interpreta la presencia de una estructura más simple asociada a la falla de Tesalia (Anticlinal de Farallones) y al Sinclinal de Medina con base en los siguientes razonamientos.

El balance de acortamientos muestra una transferencia progresiva del acortamiento desde la falla de Tesalia a las de Guaicaramo y Aguaclara de S a N. Sin embargo, el mismo balance de acortamientos muestra como el Anticlinal de Farallones persiste como un rasgo tan dominante en lo cual permite especular que no hubo un crecimiento sustancial de estructuras en el *subthrust* de la falla Tesalia-Mirador, pero si la formación de estructuras simples.

Más aun, si los acortamientos presentes en las fallas de Guaicaramo y Aguaclara se tomasen como escape de los acortamientos presentes en estructuras en el subcabalgamiento de la falla de Tesalia, estos son muy pequeños comparados con los observados en áreas a lo largo del rumbo como Floreña y Pauto (Martínez, 2006, Ver Figura 27, donde estructuras como la falla de Yopal absorben un acortamiento mucho mayor y representan el escape hacia el frente del sistema de duplexes en el subcabalgamiento de la falla de basamento al W. Se calcula el acortamiento aproximado de 5 a 5.5 kilómetros como consecuencia de la Falla de Yopal a partir de la distancia entre el afloramiento de la unidad morada en el colgante y el punto de corte de la misma en el yacente. Con base en esto se puede deducir que este valor es mucho mayor que el acumulado por las fallas de Guaicaramo y Aguaclara al S

Es por lo tanto evidente que existen diferencias entre los bloques exploratorios y que al hacer el análisis de prospectividad de estructuras se debe tener en cuenta

que la formación de estructuras *subthrust* va disminuyendo hacia el sur debido a que el acortamiento se concentra solo en el sistema de fallas de Tesalia.

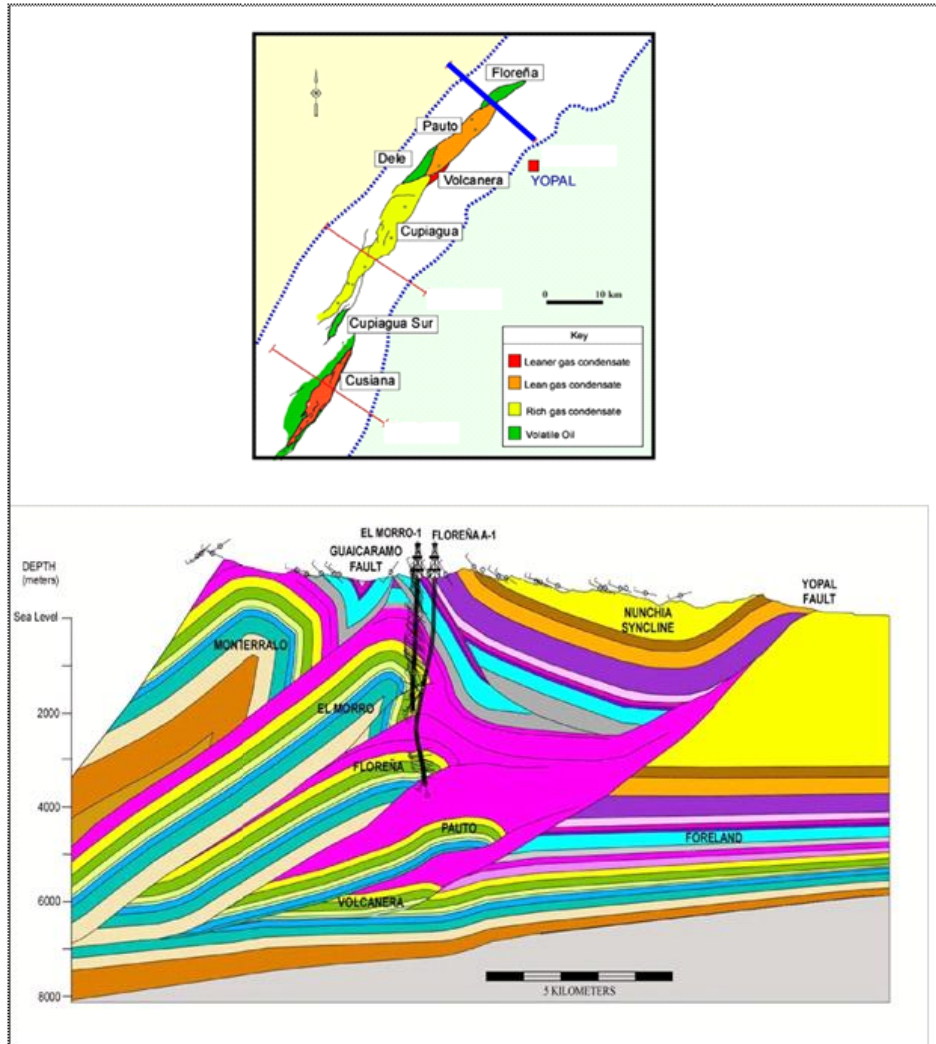


Figura 27. Modelo de acortamiento (Tomado de Martínez, J, 2006)

Debe anotarse finalmente que en el bloque Cóndor sin dejar de ser un área con prospectividad, es definitivamente la de más baja probabilidad en el Piedemonte de encontrar *subthrust*, esto al parecer está condicionado por estar en zonas de relevo estructural, además no hay una expresión directa de las estructuras *subthrust* del subsuelo.

9. . CONCLUSIONES

- Se definió el trazo de la falla Servita a partir de los derrumbes o deslizamientos alineados observados en fotografías aéreas y campo.
- Se desarrollo un modelo estructural para el área del piedemonte oriental de la cordillera oriental entre los municipios de Cumaral (Meta) y la vereda los Alpes (Cundinamarca), donde se caracterizo la zona de relevo estructural.
- Las secciones fueron restituidas aplicando los algoritmos de *Trishear* y *Fault-Parallel Flow* lo cual ayudan a describir y a dar un aproximación de la naturaleza de la deformación en el área de estudio. Definiendo así el anticlinal de Farallones como un pliegue formado por *Trishear*.
- La geometría de las fallas Aguaclara y Guaicaramo están condicionadas por la zona de debilidad que genera la falla normal reactivada.
- El Anticlinal de Farallones presenta un rasgo tan dominante en el balance de acortamientos que no permitió que crecieran múltiples estructuras en el *subthrust* de la falla de Tesalia.
- La construcción de las dos secciones estructurales permite interpretar la ausencia de múltiples estructuras apiladas en el *subthrust* de la falla de Tesalia, y en cambio sugiere la presencia de una estructura más simple asociada a la falla de Tesalia y al Sinclinal de Medina.
- Se concluye que el desarrollo de estructuras al E de la falla de Tesalia va disminuyendo hacia el sur debido a que el acortamiento se concentra solo en el sistema de fallas de Tesalia.
- El modelo geométrico generado proporciona un excelente control sobre la validez de la sección estructural, demostrando que la estructura interpretada explica de manera satisfactoria la naturaleza de la deformación.
- En esta zona de relevo estructural es poco probable encontrar estructuras de apilamientos múltiples de escamas en los subcabalgamientos debido a que el acortamiento se concentra solo en un sistema de fallas y esto impide la formación sistemas apilados en el *subthrust*. de la falla principal de basamento (falla de Tesalia)

- Los balances de acortamiento y desplazamiento demuestran la inequívoca presencia de una zona de relevo estructural en el sinclinal de Medina donde las fallas de Guaicaramo/Aguaclara interactúan mecánicamente con la falla de Tesalia y deben por tanto converger en profundidad.
- El estilo estructural para el área de Medina implica deformación de piel delgada y gruesa.
- Asumiendo el acortamiento de la Falla Yopal como escape frontal de los apilamientos de Floreña y Pauto puede interpretarse que es menos probable la presencia de este tipo de apilamientos en la zona de relevo estructural para la porción Sur del Sinclinal de Medina.

10. BIBLIOGRAFIA

- Branquet, Y., Cheilletz, A., Cobbold, P. R., Baby, P., Laumonier, B., and Giuliani, G., 2002, Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guateque-Medina area), Colombia: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, no. 4, p. 391-407.
- Butler, K., and Schamel, S., 1988, Structure along the eastern margin of the Central Cordillera, upper Magdalena Valley, Colombia: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 1, no. 1, p. 109-120.
- Colleta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., and Rudkiweicz, J. L., 1990, Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera, Colombia from a balanced cross section, *in* Letouzey, J., ed., *Petroleum and Tectonics in Mobile Belts*: Paris, Editions Technip, p. 81-100.
- Cooper, M. A., et al., 1995, Basin development and tectonic history of the llanos Basin, Eastern cordillera, and MMV, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 79, no. 10, p. 1421-1443.
- Cortés, R., and de la Espriella, R., 1992, Apuntes sobre la tectónica del Valle del Río Negro al oriente de Cundinamarca: *Geología Colombiana*, v. 17, p. 133-142.
- Cortés, M., Bayona, G., Aristizabal, J., Ojeda, G., Reyes-Harker, A., and Gamba, N., 2006, Structure and kinematics of the Eastern Foothills of the Eastern Cordillera of Colombia from balanced cross-sections and forward modeling, *in* *Extended Abstracts, IX Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*, Cartagena de Indias, Colombia.
- Dahlstrom, C. 1969, Balanced cross section. *Canadian Journal of Earth Sciences. Revue Canadienne des Sciences de la Terre*, 6, p. 743-757.
- Dengo, C. A., and Covey, M. C., 1993, Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implication for trap styles and regional tectonics: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 77, p. 1315-1337.
- Erslev, E., 1991, Trishear fault-propagation folding: *Geology*, v. 19, p. 617–620

- Fabre, A., 1985, Estratigrafía de la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá y Arauca. Cordillera Oriental (Colombia): Geología Norandina, v. 4, p. 3-12.
- Gómez, E., T.E., J., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., Kelley, S., and Heizler, M., 2003, Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia: Geological Society of America Bulletin, v. 115, p. 131-147.
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., and Cardozo, N., 2005, Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of the diachronous exhumation of the northern Andes: Geological Society of America Bulletin, v. 117, no. 9-10, p. 1272-1292.
- Hayward, A and Graham, R. 1989. Some geometrical characteristics of inversion. In: Cooper M, and Williams G, (Eds), Inversion Tectonics. Geol Soc London Spec Pub 44: 17-39.
- Hebrard, F., 1985, Les foothills de la Cordillière Orientale de Colombie entre les rios Casanare et Cusiana. Evolution geodynamique depuis l'Éo Crétacé [Ph.D thesis]: Paris, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 162 p.
- Jaillard, E., P. Solar, G. Carlier, and T. Mourier, 1990, Geodynamic evolution of the northern and central Andes during early to middle Mesozoic times: a Tethyan model: Journal of the Geological Society of London, v. 147, p. 1009–1022.
- Martínez, J., 2006, Structural evolution of the Llanos foothills, Eastern Cordillera, Colombia: Journal of South American Earth Sciences, v. 21, no. 4, p. 510-520.
- Maze, W. B., 1984, Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perija, northwestern Venezuela: geology and tectonic environment of red beds and volcanic rocks, *in* W. E. Bonini, R. B. Hargraves, and R. Shagam, eds., The Caribbean–South American plate boundary and regional tectonics: Geological Society of America Memoir 162, p. 263–282.
- Mora, A., M. Parra, M. R. Strecker, A. Kammer, C. Dimaté, and F. Rodriguez, 2006, Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic

extensional structures in the eastern Cordillera of Colombia: *Tectonics*, v. 25, p. TC2010, doi:10.1029/2005TC001854

- Mora, A. 2007, Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia. *Ph. D. Thesis, Universität Potsdam, Alemania*, 133 pp.
- Mora, A., and M. Parra, 2008, The structural style of footwall shortcuts along the eastern foothills of the Colombian eastern Cordillera: Differences with other inversion-related structures: *Revista Ciencia Tecnología & Futuro*, 1407 v. 3, p. 7–21.
- Mora, A., Gaona, T., Kley, J., Montoya, D., Parra, M., Quiroz, L.I., Reyes, G., & Streckern, M.R., 2009. The role of inherited extensional fault segmentation and linkage in contractional orogenesis: a reconstruction of Lower Cretaceous inverted rift basins in the Eastern Cordillera of Colombia. *Basin Research*. Vol. 21, pp. 111-137.
- Namson, J., Cunningham, R., and Woodcock, G., 1994, Structural geology and hydrocarbon potential of the northern part of the Upper Magdalena Basin, Colombia, *in V Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en la Cuencas Subandinas*, Puerto La Cruz, Venezuela, p. 356-364.
- Parra, M., 2008. Cenozoic foreland-basin evolution in the northern Andes: insights from thermochronology and basin analysis in the Eastern Cordillera, Colombia. Tesis doctoral, Universität Potsdam, Alemania, 146p.
- Parra, M., Mora, A., Jaramillo, C., Strecker, M. R., Sobel, E. R., Quiroz, L. I., Rueda, M., and Torres, V., 2008, Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia: *Geological Society of America Bulletin*, v. in press.
- Parra, M., Mora, A., E.R. Sobel, M.R. Strecker, and R. González, 2009, Episodic orogenic-front migration in the northern Andes: Constraints from low-temperature thermochronology in the eastern Cordillera, Colombia: *Tectonics*, 1428 v. 28, p. TC4004, doi: 10.1029/2008TC002423.

- Rowan, M., and Linares, R., 2000, Fold evolution matrices and axial-surface analysis of fault-bend folds: Application to the Medina Anticline, Eastern Cordillera, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 84, no. 6, p. 741-764.
- Sarmiento-Rojas, L. F., 2001, Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes [Ph.D thesis]: Amsterdam, Vrije University, 295 p.
- Silva, A., 2010, Cinemática De La Deformación Frágil En El Área De Medina (Cordillera Oriental, Colombia); Relación De Temporalidad Entre La Deformación Frágil y Los Sistemas Petrolíferos. Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander. 122 p.
- Suarez, A. F., 1990, The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: an allochthonous terrane in northwestern South America: Journal of South American Earth Sciences. v. 3, p. 141–151.
- Suppe, J., 1983, Geometry and kinematics of fault-bend folding: American Journal of Science, v. 283, p. 684–721.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., and Rivera, C., 2000, Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia): Tectonics, v. 19, no. 5, p. 787-813.
- Tamara, J., 2009, Influencia de la Posición Estructural y Estratigráfica en el Desarrollo de los Sistemas de Fracturas en el Anticlinal de Buenavista, Villavicencio, Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. 67 p
- Trudgill, B., Cartwright, J, 1994. Relay-ramp forms and normal-faults linkages, Canyonlands National Park, Utah. Department of Geology, Royal School of Mines, Imperial College, London, SW7 2BP, United Kingdom. v 106, no. 9 p. 1143-1157
- Wilkerson, M., & Dicken, C, (2001). Quick-look techniques for evaluating two-dimensional cross sections in contractional settings. AAPG Bulletin, Vol. 85, N°10, pp. 1759-1770.

CONFIDENCIAL

- ICP-Reportes internos, (2009). . Reporte final Proyecto Cronología de la Deformación en las Cuencas Subandinas. 14 Capitulo. Piedecuesta.
- ITEP, 2010. Instituto Colombiano del Petroleo-ICP
- Mora, A & Parra, M. Secciones estratigráficas de las formaciones Guadalupe, Barco y Carbonera, Anticlinal del Guavio. Soporte Outsourcing – Ingeominas Ltda – ICP – Septiembre 2004.

11. ANEXOS 1

11.1 RESULTADOS SECCIÓN B1-B1'

Anexo interpretación alternativa para la línea HR-2010-B, en donde se pretendía definir el estilo estructural de la Cuenca de Medina mediante la interpretación en tiempo y en profundidad, balanceo de secciones estructurales. Esta interpretación solo es válida para el Sur de área debido a los condicionantes físicos del balanceo estructural.

11.2 ESTILO ESTRUCTURAL

Para definir el estilo estructural fue necesario llevar a cabo la interpretación en tiempo y la conversión a profundidad de esta interpretación, para obtener esta conversión se definió una tabla de velocidades mostrada en el modelo principal del proyecto. (Tabla 1). También se desarrollo una tabla de espesores de las unidades geológicas presentes en la zona de estudio a nivel general partiendo de los datos de campo tomados por Mora y Parra (2004) e informes internos de Ecopetrol del pozo ALFA-1. (Tabla 1).

Para el proceso de interpretación sísmica se identificaron 3 horizontes importantes, los cuales se les comprobó la continuidad lateral mediante secciones de rumbo. Los horizontes interpretados son tope de la Formación León, tope de la Formación Carbonera (Miembro C1) y el tope de la Formación Mirador. Cabe aclarar que el horizonte de la Formación León presenta reflectores sísmicos característicos que permiten la rápida identificación del mismo. Se tomo información de campo (Rumbos/Buzamientos) e información disponible de la tabla de espesores de profundidad que ayudan a validar esta interpretación y balanceo estructural para la línea HR-2010-B.

Inicialmente se pretendía definir 2 estilos estructurales para el área de Medina. Al interpretarse este modelo en la línea sísmica HR-2010-B y posteriormente ajustar la interpretación en la línea HR-2010-A se identifico que este modelo o interpretación alternativa no era competente para la línea HR-2010-A ubicada al

norte del área de Medina debido a los condicionantes físicos del Balanceo Estructural; así que para que esta interpretación restituyera era necesario plantear un modelo geométrico exactamente igual al propuesto para esta línea HR-2010-A visto en el modelo principal del proyecto. Por lo tanto este modelo geométrico únicamente restituye en la línea HR-2010-B. Se plantea como un anexo de interpretación alternativa únicamente para dicha línea.

11.2.1 SECCION B1-B1' HR-2010-B

La línea HR-2010-B está ubicada al Sur del área de Medina como se ve en la figura 10, a diferencia de lo observado en las líneas sísmicas que se encuentran al Norte, esta línea muestra un *Backthrust* que es relacionado a un Anticlinal. Este Anticlinal es asumido como un Pliegue por Flexión de Falla asociado a la Falla Guaicaramo (Figura 28)

Para el modelo alternativo (Sección B1), se interpreta la Falla de Guaicaramo con una geometría de tipo *Ramp-Flat-Ramp*, que nace desde el basamento y se interpreta un despegue hacia la base de la Formación Carbonera miembro C8. La falla evidencia una rampa fuertemente pronunciada de alto ángulo de buzamiento la cual es asociada a una falla normal que fue levemente invertida generando una zona de debilidad por donde se genero dicha rampa. Para el balanceo de la sección se asume que la Falla Guaicaramo presenta una geometría de Pliegue por Flexión de Falla y se uso el algoritmo *Fault-Parallel Flow*. En cuanto a la Falla Servita se asume que presenta una geometría de Pliegue por Trishear (Figura 29)

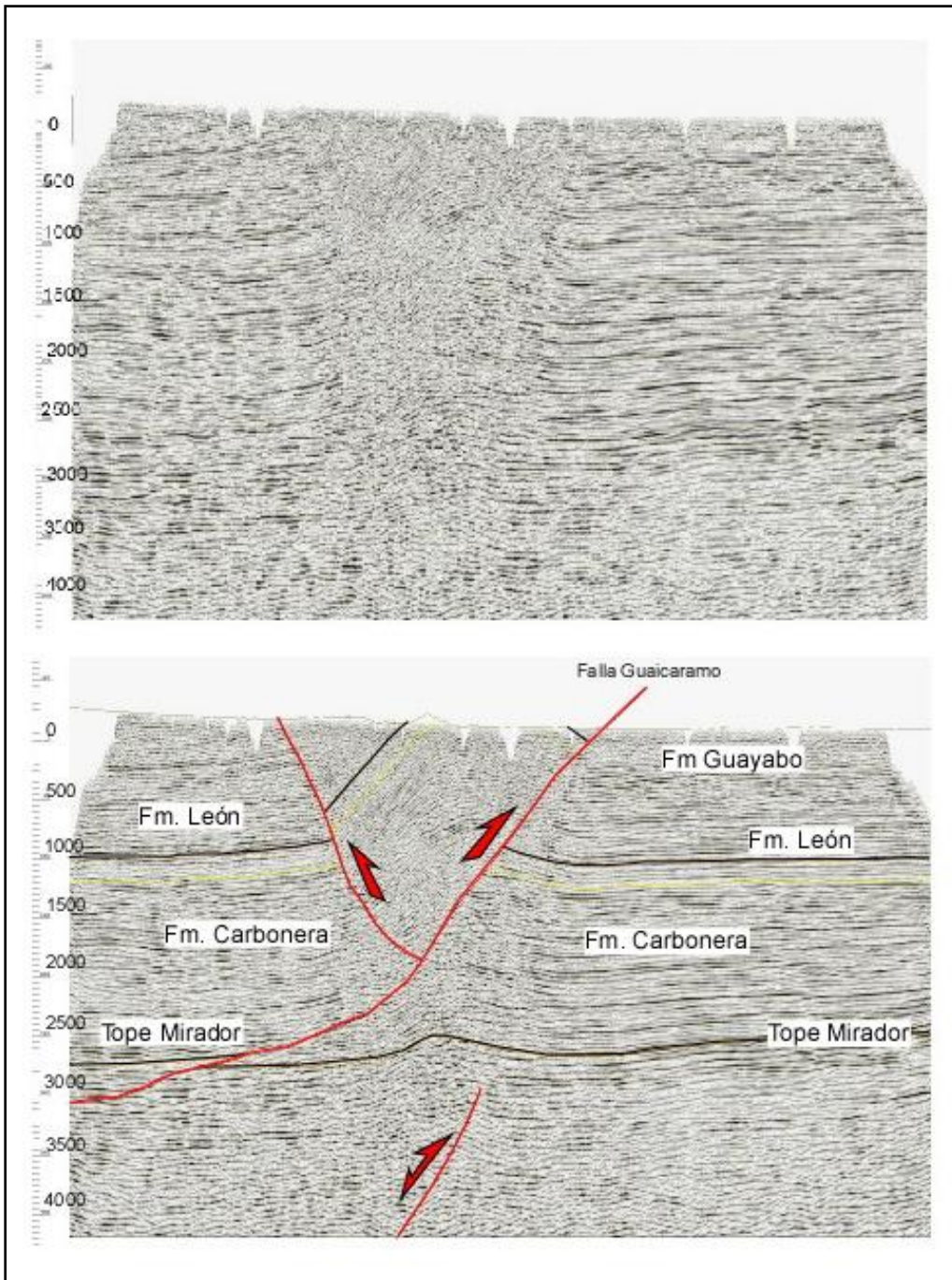


Figura 28. Línea sísmica HR-2010-B con su respectiva interpretación en tiempo.

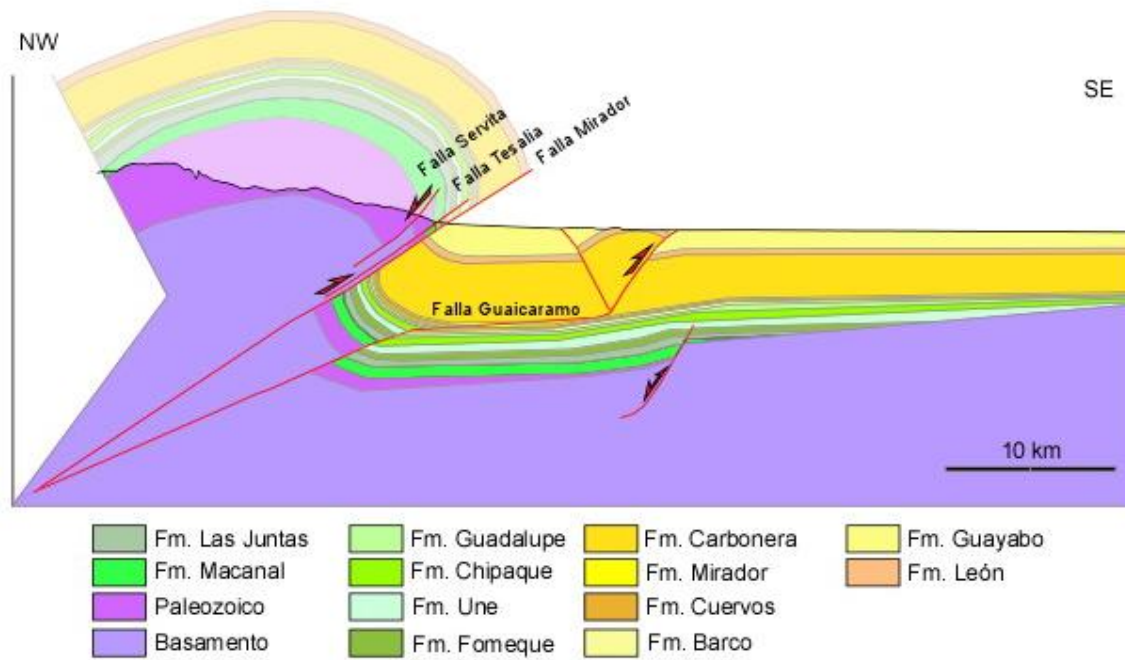
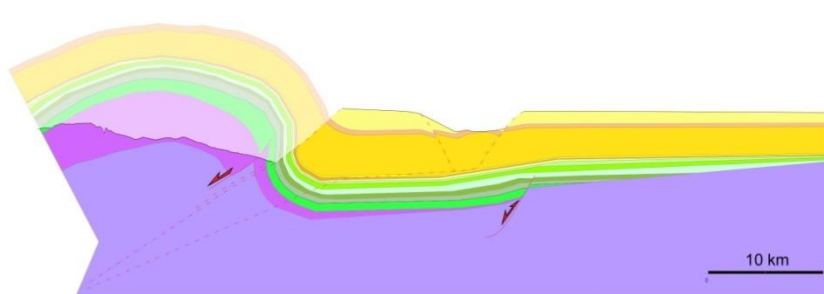
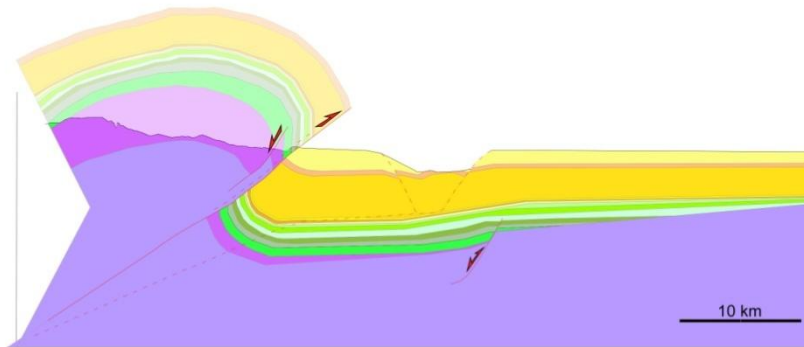
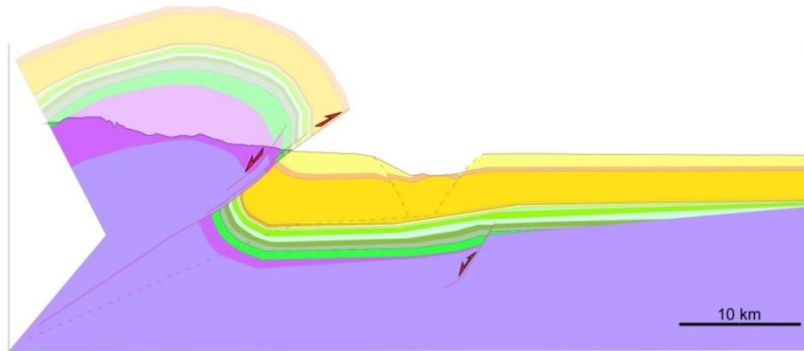
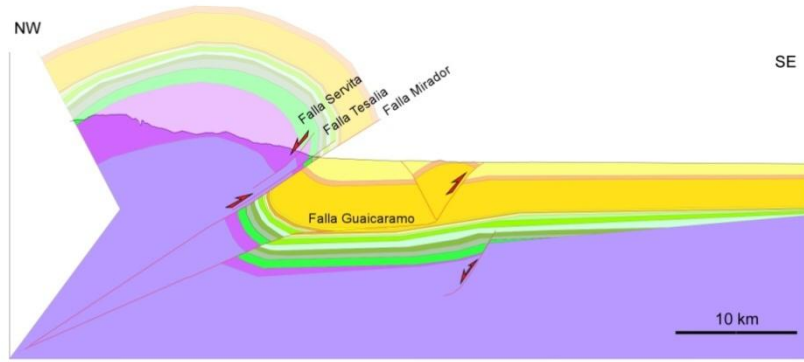


Figura 29 Secuencia de restitución de la sección B1



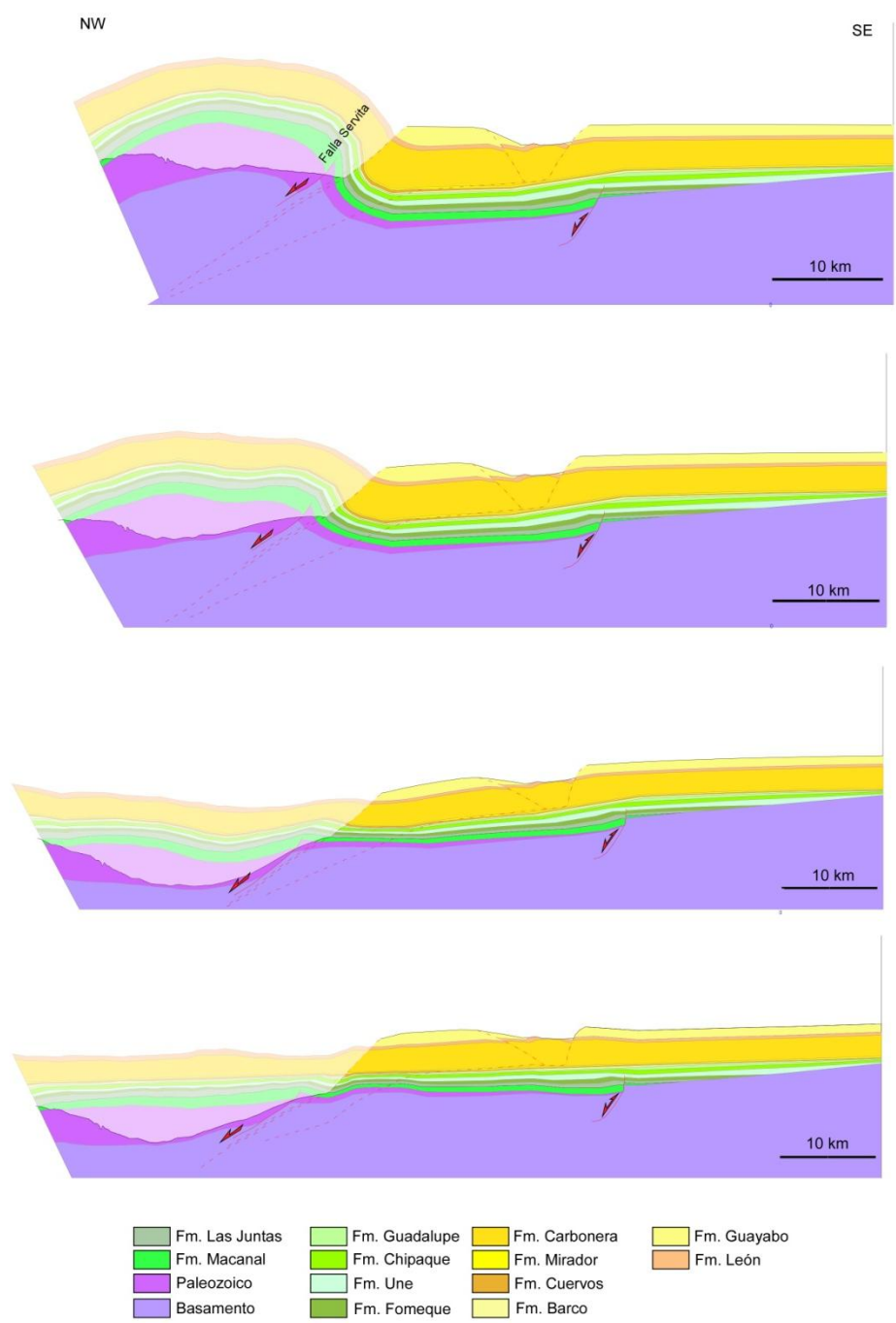


Figura 30 Secuencia de restitución de la sección B1