

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TECTONOESTRATIGRÁFICO DE LA LÍNEA  
SÍSMICA SPAN-3800 ENTRE LAS CUENCAS COLOMBIA Y GUAJIRA  
OFFSHORE EN LA REGIÓN DEL CARIBE COLOMBIANO**

**Autores**

**JUAN PABLO CEPEDA POSADA**

**LAURA REDONDO TORO**

**Director:**

**Prof. Dr. ALEJANDRO BELTRÁN TRIVIÑO**

**Codirector:**

**Dr. ALEJANDRO PIRAQUIVE BERMÚDEZ**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**Escuela de Ciencias**

**Departamento de Ciencias de la Tierra**

**MEDELLÍN**

**2021**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TECTONOESTRATIGRÁFICO DE LA LÍNEA  
SÍSMICA SPAN-3800 ENTRE LAS CUENCAS COLOMBIA Y GUAJIRA  
OFFSHORE EN LA REGIÓN DEL CARIBE COLOMBIANO**

**JUAN PABLO CEPEDA POSADA**

jcepeda@eafit.edu.co

**LAURA REDONDO TORO**

lredondo@eafit.edu.co

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de *geólogo*

**Director:**

**Prof. Dr. ALEJANDRO BELTRÁN TRIVIÑO**

aibeltrant@eafit.edu.co

**Codirector:**

**Dr. ALEJANDRO PIRAQUIVE BERMÚDEZ**

apiraquiveb@unal.edu.co

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**Escuela de Ciencias**

**Departamento de Ciencias de la Tierra**

**MEDELLÍN**

**2021**

*“Todos los triunfos nacen*

*Cuando nos atrevemos*

*A comenzar”*

**Eugene Ware.**

## AGRADECIMIENTOS

**Juan Pablo Cepeda Posada**

Dedicó con todo mi corazón mi trabajo de grado a mi madre, pues sin ella no lo habría logrado. Tu bendición y esfuerzo a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien. Por eso te doy mi trabajo en ofrenda por tu paciencia y amor, ¡TE AMO!

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos:

A mi hermana, abuelo, tío y demás familiares por el apoyo, esfuerzo y sacrificio incondicional haciendo lo imposible para que cumpla mis metas.

A Karen, Karoline, Barra, Daniel y Mary por su amistad y buenas aventuras.

A mi novia Yesenia, por su apoyo incondicional y no dejarme nunca rendir.

A Laura Redondo por su gran dedicación y apoyo en la realización del proyecto.

A Alejandro Beltrán por darme la oportunidad y su guía para realizar este proyecto, sus enseñanzas, buenos consejos, asesoría y disposición.

A todos los profesores del pregrado por sus enseñanzas.

A Alejandro Piraquive por su acompañamiento en la realización de este proyecto.

A todas aquellas personas, las cuales tuve oportunidad de conocer y compartir momentos gracias

... A todos ¡GRACIAS!

**Laura Redondo Toro**

En primer lugar, quiero agradecer a mi Padre, a mi familia y a Luis por el amor, la motivación y el apoyo incondicional durante mi tiempo en la universidad y especialmente en la ejecución de este proyecto, ya que sin ellos esto no sería posible.

A todos mis amigos de geología en especial a Cami, Dia y Jose, por siempre estar conmigo, por su apoyo y por todas las aventuras vividas.

A Juan por su paciencia, dedicación y compromiso con el proyecto.

También quiero agradecer al Fondo Social ANDI y a la Universidad EAFIT por abrirme las puertas de la universidad y darme la oportunidad de formarme en esta institución como Geóloga, así como también a los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos para seguir adelante con mi formación profesional.

Por último y no menos importante, quiero agradecer a Alejandro Beltrán por haber creído en mí, por haberme brindado la oportunidad de realizar este proyecto, por compartirme sus conocimientos y su disposición. También muchas gracias a Alejandro Piraquive por su acompañamiento durante este proyecto y sus buenos aportes.

¡Muchas gracias a todos!

## RESUMEN

Las cuencas Guajira *Offshore* y Colombia están ubicadas en el límite entre el sur de la placa Caribe y la esquina noroccidental de la placa Suramericana. La historia tectónica del área ha sido dominada por una convergencia oblicua entre estas dos placas. Las interacciones entre las placas desde el Paleoceno al Reciente han impulsado las principales características tectonoestratigráficas y estructurales del área, generando prismas de acreción (Cinturón deformado del Sur del Caribe), junto con los principales elementos de transtensión y transpresión. Teniendo esto en cuenta, el objetivo de este trabajo es realizar el análisis tectonoestratigráfico y estructural de las secuencias sedimentarias deformadas en el noroeste de la Península de la Guajira registradas en la línea sísmica SPAN-3800.

Se reconocieron cuatro eventos tectónicos a partir de la interpretación de las facies sísmicas y las terminaciones de reflectores, que evidencian las tendencias de acumulación de las secuencias y los estilos estructurales en la zona de estudio: 1) Evento extensional del Eoceno al Oligoceno, 2) Transpresión desde el Mioceno temprano hasta el Holceno(?), 3) Transtensión e inversión tectónica desde el periodo Mioceno tardío al Plioceno y 4) Evento de diapirismo posterior al Plioceno temprano.

## ABSTRACT

The Guajira Offshore and Colombia basins are located at the boundary between the south of the Caribbean plate and the northwestern corner of the South America plate. The tectonic history of the area has been dominated by an oblique convergence between these two plates. The interactions between the plates from the Paleocene to the Recent have driving the major tectono-stratigraphic and structural features of the area, generating accretion prisms and compression belts (Deformed Belt of the South Caribbean) along with major strike-slip elements of transtension and transpression. Taking this into account, the goal of this work was to perform a tectono-stratigraphic and structural analysis of the deformed sedimentary sequences in the northwestern of the Guajira Peninsula recorded in the SPAN 3800 seismic line.

Four tectonic events were recognized from the interpretation of the seismic facies and reflector terminations, which show the accumulation trends of the sequences and the structures styles in the study area: 1) Extensional event from the Eocene to the Oligocene, 2) Transpression from the early Miocene to the Pliocene, 3) Transtension from the late Miocene period to the Pliocene and 4) Event of diapirism after the early Pliocene.

## TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	6
Abstract.....	7
Introducción.....	17
1.1 Preguntas de investigación.....	20
1.2 Hipótesis.....	20
2 Objetivos.....	20
2.1 Objetivo general.....	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3 Marco geológico regional.....	21
3.1 Tectónica.....	21
3.2 Fases tectónicas de la Cuenca Guajira Offshore.....	26
3.3 Provincias geológicas presentes en el área de estudio.....	28
3.3.1 <i>Cinturón Deformado del Sur del Caribe (CDSC)</i> .....	29
3.3.2 <i>Beata Ridge</i> .....	30
3.3.3 <i>Península de la Guajira</i> .....	30
3.3.4 <i>Depresión Chimare</i> .....	31
3.3.5 <i>Cuenca Colombia</i> .....	32
3.4 Geología estructural.....	32
3.4.1 <i>Falla Cuisa</i> .....	33
3.4.2 <i>Falla Oca-Ancón</i> .....	34
3.4.3 <i>Falla Santa Marta-Bucaramanga</i> .....	34
3.5 Estratigrafía.....	34
3.5.1 <i>Formación Macarao</i> .....	35
3.5.2 <i>Formación Siamana</i> .....	36
3.5.3 <i>Formación Uitpa</i> .....	36
3.5.4 <i>Formación Jimol</i> .....	37
3.5.5 <i>Formación Castilletes</i> .....	37
3.5.6 <i>Formación Gallinas - Depósitos Cuaternarios</i> .....	37
3.6 Sistemas de petrolífero del <i>offshore</i> de la Península de Guajira.....	38
3.6.1 <i>Rocas generadoras</i> .....	39
3.6.2 <i>Rocas reservorios</i> .....	39
3.6.3 <i>Rocas sellos</i> .....	40

4	Marco conceptual .....	42
4.1	Convergencia oblicua.....	42
4.2	Cinturones de pliegues y cabalgamientos (CPC) .....	45
4.2.1	<i>Pliegues por flexión de falla (Fold Bend Fault):</i> .....	46
4.2.2	<i>Pliegues por propagación de falla (Fold Propagation Fault):</i> .....	47
4.2.3	<i>Pliegues de despegue (Detachment folds):</i> .....	47
4.3	Fallas poligonales.....	48
4.4	Hidratos de gas y <i>bottom simulating reflector</i> (BSR).....	49
5	Metodología .....	50
5.1	Fase 1. Recopilación bibliográfica:.....	51
5.2	Fase 2. Interpretación: .....	51
5.3	Fase 3. Análisis: .....	52
5.3.1	<i>Facies sísmicas</i> .....	52
5.4	Fase 4. Correlación y evolución.....	56
6	Resultados.....	56
6.1	Estratigrafía sísmica .....	56
6.1.1	<i>Interpretación de horizontes</i> .....	57
6.1.2	<i>Secuencias tectonoestratigráficas</i> .....	60
6.2	Análisis estructural.....	73
6.2.1	<i>Familia de fallas F1</i> .....	74
6.2.2	<i>Familia de fallas F2</i> .....	75
6.2.3	<i>Familia de fallas F3</i> .....	76
6.2.4	<i>Familia de fallas F4</i> .....	77
6.2.5	<i>Familia de fallas F5</i> .....	78
6.2.6	<i>Familia de fallas F6</i> .....	79
7	Discusión .....	80
7.1	Correlación cronoestratigráfica para la cuenca Guajira <i>Offshore</i> .....	80
7.2	Correlación cronoestratigráfica para cuenca Colombia .....	83
7.3	Evolución tectonoestratigráfica del <i>offshore</i> de la Península de la Guajira a partir de la línea sísmica SPAN-3800.....	85
	Conclusiones.....	91
	Recomendaciones .....	94
	Bibliografía .....	95

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Dimensiones del survey de la línea sísmica que se interpretará en el presente trabajo.	51
<b>Tabla 2.</b> Significado geológico de las terminaciones sísmicas. Tomado de Mojica (2019).	52
<b>Tabla 3.</b> Interpretación geológica de las características de una reflexión sísmica. Modificado de Miller et al. (1990).	54
<b>Tabla 4.</b> Facies sísmicas con sus respectivas interpretaciones geológicas y representación sísmica. Modificado de Mojica (2019), previamente modificado de (Sangree & Widmier, 1977) e imágenes sísmicas tomadas de (Al-Masgari et al., 2021).	55
<b>Tabla 5</b> Descripción de criterios de selección mediante los cuales fueron elegidos los horizontes de la cuenca Guajira Offshore (Fig. 21a).	58
<b>Tabla 6.</b> Descripción de criterios de selección mediante los cuales fueron elegidos los horizontes de la cuenca Colombia (Fig. 21b).	59
<b>Tabla 7.</b> Carta de eventos geológicos interpretados para la línea SPAN- 3800, a partir de las terminaciones de los reflectores y los estratos de crecimiento observados.	90

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localización general de la línea sísmica SPAN-3800 en la región offshore del Caribe colombiano. La delimitación de las cuencas offshore se obtuvo del geovisor del Banco de Información de Petrolera..... 19
- Figura 2 .** Tipos y distribución de la corteza que explican el modelo in situ de la placa Caribe. 23
- Figura 3.** Historia del movimiento de las placas Norteamericana (NA) y Suramericana (SA) con relación al marco de referencia del punto caliente Indoatlántico (IAHS) (Müller et al., 1993). Línea gris clara, representa el movimiento de puntos calientes en relación con NA. La línea negra, muestra el movimiento del Caribe en relación con NA. Líneas negras claras, antiguas posiciones relativas de la trinchera del Caribe. El polígono gris claro muestra la ubicación del Cayman Trough. El recuadro muestra la convergencia cenozoica de las Américas de Pindell et al. (1988) = P88; y Müller et al. (1999) = M99. STP = ubicación del perfil tomográfico sísmico de Van der Hilst (1990). Tomado de Galindo (2016) previamente modificado de Pindell y Kennan (2009)..... 24
- Figura 4.** Sección transversal esquemática del Eoceno tardío que muestra la relación entre la subducción en el proto-Cinturón Deformado del Caribe del Sur (Proto-SCDB), la aproximación del GAC a Suramérica y la formación de la cuenca Chimare. Tomado de Vence (2008) ..... 27
- Figura 5.** Sección transversal esquemática del Mioceno temprano que muestra el engrosamiento de la sedimentación del margen continental en la cuenca de Ranchería. Tomado de Vence (2008)..... 27
- Figura 6.** Mapa de topografía/batimetría donde se presentan los principales elementos estructurales en la esquina noroccidental de Suramérica. La línea roja indica la ubicación de la línea sísmica SPAN-3800. SNSM= Macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta, SP= Serranía de

Perijá, CG= Cuenca Guajira Offshore, PG= Península de la Guajira, CDSC= Cinturón Deformado del Sur del Caribe. Modificado de Londono et al. (2015). .....	28
<b>Figura 7.</b> Principales provincias geológicas de la región Caribe colombiana identificadas sobre la línea SPAN-3800. Localización de la línea sísmica SPAN-3800 en la Fig. 6. Exageración vertical 1:25. CDSC= Cinturón Deformado del Sur del Caribe. ....	29
<b>Figura 8.</b> Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Guajira Offshore. Tomada y modificada de (Barrero et al.,2007). .....	35
<b>Figura 9.</b> Carta de eventos de sistemas petrolíferos de la Cuenca Guajira, que muestra la relación entre los elementos y procesos interpretados para la cuenca. Tomado de Ramirez et al. (2015).	38
<b>Figura 10.</b> Distribución geográfica de los sistemas petrolíferos propuestos para la Cuenca de La Guajira. La línea negra indica la localización de la línea sísmica SPAN 3800. Modificado de (Ramirez et al., 2015), previamente modificado de (Ramirez, 2007).....	41
<b>Figura 11.</b> Bloque diagrama que muestra la posición tectónica de una escama de antearco (“fore-arc sliver plate”) su geometría y el movimiento en condiciones de subducción oblicua. El ángulo de la margen normal de la convergencia al frente del antearco(a), aunque diferente a cero, es típicamente menor a la oblicuidad del movimiento relativo de la placa ( $\theta$ ). Tomado de Haq & Davis (2010) modificado previamente de Platt (1993; 2000).....	43
<b>Figura 12.</b> Estilos estructurales teóricos presentados en una cuña que converge oblicuamente (Platt, 2000).....	44
<b>Figura 13.</b> Ejemplo de estructuras formadas a lo largo de una zona de deformación por deslizamiento de rumbo. A) Vista en planta de estructuras asociadas a una zona idealizada de deformación lateral derecha. B) Zona de deformación lateral derecha con predominio de	

estructuras divergentes. Tomado de (Galindo, 2016) y modificado de Christie-Blick & Biddle (1985) en (Allen & Allen, 2013).....	45
<b>Figura 14.</b> Evolución cinemática de un pliegue de flexión de falla teórico con longitud, espesor y área de las capas constante desarrollado sobre un cabalgamiento. Tomado de (Poblet, 2004).	46
<b>Figura 15.</b> Evolución cinemática de un pliegue de propagación de falla teórico con longitud, espesor y área de las capas constante desarrollado sobre un cabalgamiento. Tomado de Poblet (2004).....	47
<b>Figura 16.</b> Evolución cinemática de pliegues de despegue teóricos formados por tres mecanismos de amplificación: migración de charnelas, rotación de flancos, y combinación de rotación de flancos. Tomado de (Poblet, 2004).....	48
<b>Figura 17.</b> A) Bosquejo conceptual de fallas poligonales en una cuenca sedimentaria. B) Fallas poligonales vistas desde una línea sísmica. Tomado de (Morgan et al., 2015).....	49
<b>Figura 18.</b> Segmento de una línea sísmica donde se observa un BSR. Tomado de López & Ojeda (2006).....	50
<b>Figura 19.</b> Terminaciones de reflexiones sísmicas al tope y la base de una secuencia. Tomado de Mojica (2019), modificado previamente de Sangree & Windmier (1979).....	51
<b>Figura 20.</b> Configuración de las características de las reflexiones sísmicas. Modificado de Al-Masgari et al. (2021).....	54
<b>Figura 21</b> A) Sección Cuenca Guajira Offshore y B) Sección cuenca Colombia. Las secciones sísmicas se encuentran en profundidad (m) y con una exageración vertical de 3.5. En estas secciones se muestran los horizontes de forma ascendente del más profundo HC-1 para A y HO-1 para B, hasta el perfil batimétrico (color cian); a partir de estos horizontes se definieron las	

secuencias tectonoestratigráficas 1, 2, 3, 4, 6 y 6 para cuenca Guajira Offshore y 7, 8, 9 y 10 para la cuenca Colombia..... 60

**Figura 22** Representación de las facies sísmicas de la secuencia S1 ubicadas en la depresión Chimare y la terminación en onlap de la secuencia S2. Exageración vertical de 3.5..... 63

**Figura 23.** Representación de la facie sísmicas de la secuencia S2 localizada desde la zona de diapirismo hasta el prisma de acreción y la truncación de la secuencia S3. Exageración vertical de 3.5..... 64

**Figura 24.** Representación de la facie sísmicas de la secuencia S3 localizada desde la zona de diapirismo hasta la parte más sureste de la línea sísmica. Exageración vertical de 3.5..... 65

**Figura 25.** Truncación de la secuencia S4 hacia las fallas de cabalgamiento del prisma de acreción. Exageración vertical de 3.5. .... 67

**Figura 26.** Representación de la facie sísmicas de la secuencia S5 localizada desde la zona de diapirismo hasta la parte más sureste de la línea sísmica. Exageración vertical de 3.5..... 68

**Figura 27.** Representación de las facies sísmicas de la secuencia S5 ubicadas en el prisma de acreción. Exageración vertical de 3.5. .... 69

**Figura 28.** Representación de la facie sísmicas de la secuencia S6 localizada desde la zona de diapirismo hasta la parte más sureste de la línea sísmica. Exageración vertical de 3.5..... 70

**Figura 29.** Representación de las facies sísmicas de la secuencia S6 ubicadas en el prisma de acreción. Exageración vertical de 3.5. .... 71

**Figura 30.** Representación de las facies sísmicas de las secuencias 7, 8, 9 y 10 ubicadas desde el prisma de acreción hasta la parte más noroeste de la línea sísmica. Exageración vertical de 4.5.72

**Figura 31** A) Línea sísmica SPAN-3800 sin interpretación. B) División de las familias de fallas F1, F2, F3, F4, F5 y F6 reconocidas. Exageración vertical de 3.5. .... 74

<b>Figura 32.</b> Ubicación de las familias de fallas F1, F4 Y F5, localizadas entre la zona de diapirismo y el sureste de la cuenca de la Guajira Offshore. Exageración vertical de 4.5. ....	75
<b>Figura 33.</b> Localización de la familia de fallas F2, ubicada en el CDSC. Exageración vertical de 3.5.....	76
<b>Figura 34.</b> Localización de la familia de fallas F3, ubicada en la cuenca Colombia. Exageración vertical de 3.5.....	77
<b>Figura 35.</b> Comparación entre el modelo teórico de la evolución de fallas normales generadas por una falla lístrica de despegue, con lo interpretado para la familia de fallas F4 presentes al sureste de la zona de estudio. También se observan los reflectores guías utilizados para medir el desplazamiento de las secuencias S3, S4, S5 y S5 en color naranja. Exageración vertical 3.5. Modelo teórico tomado de Friedmann & Burbank (1995). ....	78
<b>Figura 36.</b> Segunda interpretación para la formación de la familia de fallas F5 a partir de un cabalgamiento proveniente del despegue de la familia de fallas F2. Se resalta el cabalgamiento con una delimitación de color azul. Exageración vertical 1:4.5. ....	79
<b>Figura 37.</b> Correlación de los horizontes que limitan las secuencias interpretadas en el presente estudio para la cuenca Guajira Offshore con las formaciones litológicas definidas para esta cuenca (Mantilla et al., 2013). Las discordancias D1, D2, D3, D4 y D5 representadas por líneas irregulares rojas se tomaron de Mantilla et al. (2013). Exageración de la línea sísmica 3.5.....	80
<b>Figura 38.</b> Interpretación sísmica realizada por (Vence, 2008) para la cuenca Guajira Offshore. Modificado de (Vence, 2008). ....	82
<b>Figura 39.</b> Interpretación sísmica realizada por Ramirez (2007) cerca de la zona de estudio. Modificado de Ramirez (2007).....	84

**Figura 40.** Correlación de los horizontes que limitan las secuencias interpretadas en el presente estudio para la cuenca Colombia con la carta estratigráfica. Exageración vertical de la línea sísmica 4.5..... 85

**Figura 41.** Interpretaciones de la línea sísmica SPAN-3800, con posibles edades geológicas de las secuencias. A) La familia de fallas F4 es generada por la familia de fallas F4. B) La familia de fallas F4 es generada por cabalgamiento de la familia de fallas F2. Exageración vertical: 4. 89

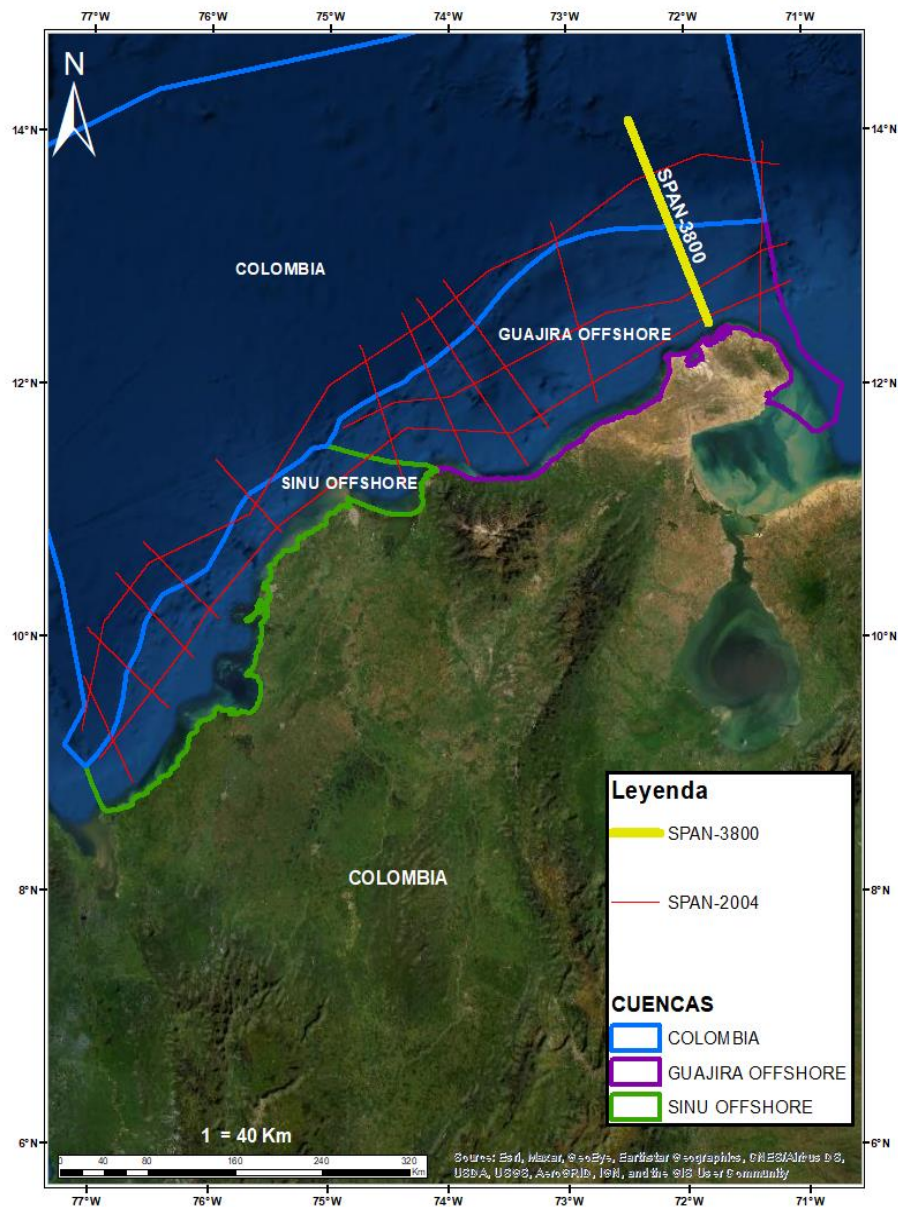
## INTRODUCCIÓN

La historia geológica Meso-Cenozoica del norte de Suramérica es controlada por la interacción entre las placas Caribe, Suramericana y Cocos (e.g. Pindell, 1993; Montes et al. 2005). Diferentes modelos tectónicos que intentan explicar la formación de la placa oceánica del Caribe y la evolución tectónica de la región (e.g. Pindell & Kennan, 2009; James, 2009; Mann y Burke, 1984). James (2005) propone un modelo autóctono donde la placa del Caribe se desarrolló principalmente entre 130-80 Ma, a medida que América del Sur se alejaba del sureste de América del Norte. Pindell & Kennan (2009) proponen un modelo alóctono, donde la placa del Caribe se deriva de la región del Pacífico requiriendo una gran rotación de los elementos del arco de la isla y los bloques continentales junto con cambios importantes en la dirección de la migración de la placa.

La zona de estudio se localiza entre las cuencas Colombia y Guajira *offshore* en el Caribe colombiano (Fig. 1), las cuales se encuentran divididas por el Cinturón Deformado del Sur del Caribe (CDSC) como resultado de la convergencia oblicua de la placa del Caribe y el norte de la placa Suramericana, afectando así la secuencia sedimentaria de las cuencas (Aguilera, 2011). La línea sísmica SPAN-3800 realizada por la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos de Colombia) en el 2004, está limitada al norte por el alto estructural de basamento del *Beata Ridge* y hacia el sur por la costa continental de la Guajira (Fig. 1). Los estudios previos que se han realizado en la cuenca de Guajira *offshore* registran un conjunto litologías de diversas edades que incluyen rocas ígneas y metamórficas del Cretácico y secuencias de rocas sedimentarias del Eoceno al Reciente que varían desde conglomerados, areniscas, arcillolitas y calizas (Vence, 2008). Con respecto a la cuenca Colombia, autores han descrito variaciones en el espesor de la corteza, y la presencia de un *plateau* oceánico en la placa Caribe (e.g. Donnelly, 1973;

Diebold et al., 1981); sin embargo, la información acerca del basamento y de las principales secuencias estratigráficas en la parte central de la cuenca Colombia todavía es limitada (Basabe, 2018)

La necesidad de aumentar las reservas de crudo y gas en el país en los últimos años ha motivado la búsqueda de yacimientos de hidrocarburos en el *Offshore* colombiano por parte del gobierno y diversas empresas petroleras. Para tener una idea del potencial de reservas del área es necesario realizar la evaluación de una serie de parámetros dentro de los cuales se destaca conocer la historia geológica, la deformación de las unidades litológicas y su cinemática de deformación en el área. Es por esto que el objetivo principal de esta investigación es analizar la evolución tectonoestratigráfica y estructural de las secuencias sedimentarias deformadas en las cuencas Colombia y Guajira *offshore* a partir de la interpretación de las facies sísmicas y las estructuras en la línea sísmica SPAN-3800.



*Figura 1. Localización general de la línea sísmica SPAN-3800 en la región offshore del Caribe colombiano. La delimitación de las cuencas offshore se obtuvo del geovisor del Banco de Información de Petrolera.*

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Preguntas de investigación

- ¿Qué estilos estructurales predominan en el este de las cuencas Guajira *offshore* y Colombia desde el Paleoceno al Reciente?
- ¿Cuál es la historia de evolución tectonoestratigráfica del este de cuenca Guajira *Offshore* que registra la línea sísmica SPAN-3800?

### 1.2 Hipótesis

Estilos estructurales asociados a un régimen transpresivo predominan en la deformación de las cuencas Guajira *offshore* y Colombia debido a la convergencia oblicua entre las placas Caribe y suramericana.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Realizar el análisis tectonoestratigráfico y estructural de las secuencias sedimentarias deformadas en el Caribe Colombiano, a partir de las facies sísmicas y las estructuras interpretadas en la línea sísmica SPAN-3800.

### 2.2 Objetivos específicos

- Realizar la interpretación sísmica 2D de la línea SPAN-3800, identificando los reflectores principales y sus atributos sísmicos para interpretar discordancias y facies sísmicas, y así definir las secuencias tectonoestratigráficas presentes en el área de estudio.

- Definir los estilos estructurales que dominan en el área de estudio a través de la interpretación de fallas y pliegues identificados por la geometría de los reflectores y sus terminaciones.
- Elaborar una posible correlación de las secuencias tectonoestratigráficas interpretadas con la estratigrafía definida en trabajos previos para las Cuencas Guajira *Offshore* y Colombia.
- Plantear la evolución tectonoestratigráfica y estructural de las cuencas al noroeste de la Península de la Guajira durante el Cenozoico a partir de la interpretación estratigráfica y estructural.

### 3 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

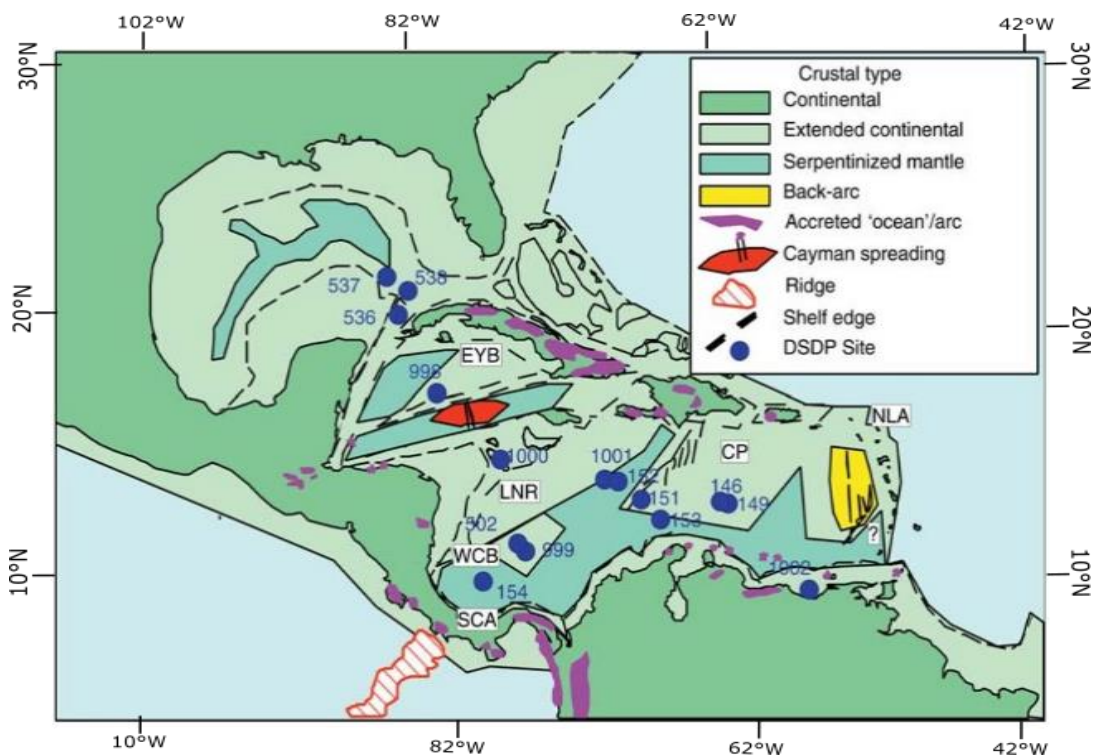
#### 3.1 Tectónica

La zona de estudio se encuentra ubicada en la esquina noroccidental Colombiana, cerca de la zona de contacto de las placas Cocos, Caribe y Suramericana, por lo que su configuración actual es el resultado del efecto de la convergencia y desplazamientos relativos de estas placas. Los modelos que explican la evolución tectónica de esta área de interacción compleja de placas, van desde un origen *in situ* de la placa del Caribe ( e.g. Frisch, 1992; Meschede & Frisch, 1998; James, 2005; James, et al. 2009) a una variedad de modelos que apoyan la migración de la placa del Caribe desde el Pacífico los cuales son los más documentados y aceptados en la actualidad (e.g. Wilson, 1966; Malfait & Dinkelman, 1972; Pindell, 1998; Pindell, 2005; Pindell & Kennan, et al. 2009); ambos modelos coinciden en que la placa caribeña se formó durante la ruptura Triásico-Jurásico de Pangea impulsando la separación de Laurasia (incluida América del Norte) y Gondwana (incluida América del Sur) (Basabe, 2018). Estos modelos se describen a continuación:

El modelo de evolución *In situ* (Fig. 2), propone que en el Triásico-Jurásico, ocurrió una extensión a lo largo de lineamientos que se convertirían en los márgenes continentales del noroeste de África, el sur de América del Norte y el norte de América del Sur. El desplazamiento de América del Norte con respecto a Gondwana entre el Jurásico y el Cretácico temprano a lo largo de fallas normales con tendencia NE, dejó a América del Sur unida a África (James, 2005).

El Cretácico temprano está definido por la separación del piso oceánico entre el Atlántico y el Pacífico, esto se puede evidenciar por la separación del norte de América del Sur de África y el comienzo de la unión del Atlántico centro y sur en los periodos Aptiano/Albiano. La extensión de corteza provocó fusión por descompresión y el engrosamiento de la placa Caribe en áreas de la actual cuenca de Yucatán, la cuenca occidental de Venezuela/Beata Ridge, la cuenca occidental de Colombia y la costa de Ecuador y Colombia. La expansión del piso oceánico entre el Atlántico y el Pacífico ocasionó la subducción de la corteza oceánica por debajo de la placa Caribe engrosada (James, 2005).

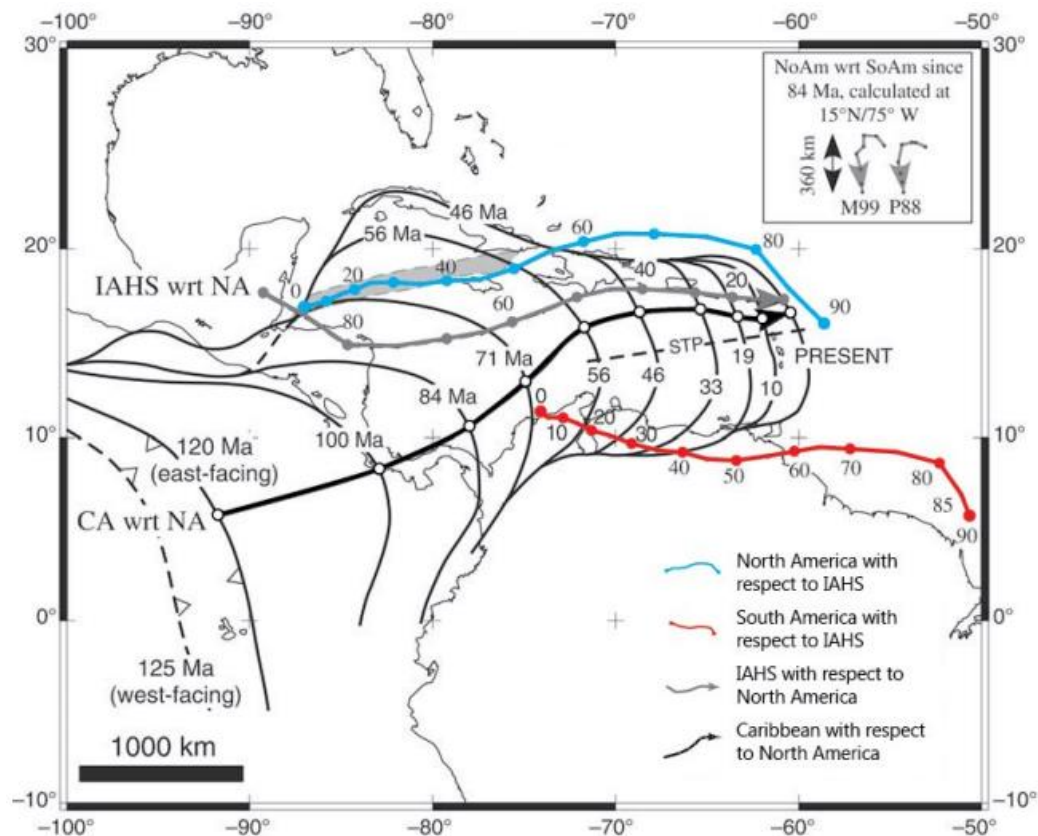
Entre el Paleoceno y el Eoceno medio, ocurrió una convergencia entre la placa oceánica del Caribe y elementos que se encontraban alrededor, provocando levantamientos en la margen del Caribe. Desde Oligoceno al reciente, ocurrieron movimientos de rumbo a lo largo de los límites sur y norte de la placa del Caribe, mientras que la subducción y el vulcanismo ocurría a lo largo de los límites occidental y oriental. Los límites norte y sur de la placa Caribe experimentaron una extensión de pull-apart (e.g., la cuenca Falcón en el occidente de Venezuela) seguido por, una inversión en algunas áreas. La placa del Caribe se movió unos 300 km hacia el este en relación con las Américas en este intervalo de tiempo (James, 2005).



**Figura 2 .** Tipos y distribución de la corteza que explican el modelo in situ de la placa Caribe.

Tipos / distribución de la corteza de América Central. SCA= Sur de Centroamérica, NLA= Antillas Mayores – Antillas Menores del Norte, LNR= Nicaragua Rise, EYB= cuenca del Este de Yucatán, CP= Plateau del Caribe, WCB=Cuenca del oeste de Colombia. Tomado de James (2009).

El modelo de Pindell & Kennan (2009) (Fig. 3), considera que la placa Caribe se formó desde la apertura del Atlántico en el Jurásico, como consecuencia del movimiento de las placas Norteamericana y Sudamérica hacia el occidente, esto causó la extensión del fondo marino y la formación de la corteza oceánica Atlántica/Proto-caribe. En el Cretácico temprano (125 - 120 Ma), el Proto-Caribe comenzó a subducir la placa del Caribe que se estaba moviendo desde el Pacífico, como resultado de esta subducción se formó el Arco del Caribe. Los procesos de subducción continuaron hasta 100 Ma mientras que la placa del Caribe continuó moviéndose hacia el noreste, creando un *Slap gap* como resultado de la subducción en el lado este de la placa del Caribe del terreno proto-caribeño (Pindell & Kennan, 2009).



**Figura 3.** Historia del movimiento de las placas Norteamericana (NA) y Suramericana (SA) con relación al marco de referencia del punto caliente Indoatlántico (IAHS) (Müller et al., 1993). Línea gris clara, representa el movimiento de puntos calientes en relación con NA. La línea negra, muestra el movimiento del Caribe en relación con NA. Líneas negras claras, antiguas posiciones relativas de la trinchera del Caribe. El polígono gris claro muestra la ubicación del Cayman Trough. El recuadro muestra la convergencia cenozoica de las Américas de Pindell et al. (1988) = P88; y Müller et al. (1999) = M99. STP = ubicación del perfil tomográfico sísmico de Van der Hilst (1990). Tomado de Galindo (2016) previamente modificado de Pindell y Kennan (2009).

Para el Cretácico tardío (84 Ma), se formó un *plateau* oceánico como resultado del paso de la placa Caribe sobre la pluma caliente de Galápagos. Simultáneamente, la Placa de Farallón se trasladó a la ESE y se subdujo por debajo del margen occidental de la Placa del Caribe. Hacia fines

del Cretácico (71 Ma), cesó la divergencia entre las Américas y la posterior reorganización de las placas provocó más subducción en los Andes del Norte, colisión de Panamá con Perú y Ecuador y colisión del Arco Caribe con la Placa de América del Norte (Pindell & Kennan, 2009).

Al comienzo del Eoceno (56 Ma), el Arco de Panamá continuó moviéndose a lo largo del margen occidental de América del Sur, y con subducción oblicua a lo largo del norte de Colombia. Esto va acompañado de movimientos de terrenos alóctonos a lo largo de las principales fallas dextrales en el norte de Colombia (Pindell & Kennan, 2009). Durante el Eoceno medio (46 Ma) el movimiento hacia el norte de la placa del Caribe se detuvo y la placa comenzó a moverse hacia el Este, y el Sur del Caribe se movió hacia el SE aumentando su tasa de subducción debajo de América del Sur a medida que avanzaba la convergencia hacia los Andes colombianos. El movimiento hacia el SE de la placa del Caribe continuó durante el Oligoceno (33 Ma) resultando en la formación del prisma de acreción de San Jacinto en la parte noroeste de América del Sur (Pindell & Kennan, 2009).

Durante el Mioceno temprano (19 Ma), el CDSC se desarrolló como resultado de la continua subducción hacia el SE de la placa del Caribe, también condujo a la acreción del prisma de acreción del Sinú, y una fase importante de levantamiento en los Andes colombianos. Sincrónicamente, el Arco de Panamá colisionó con la Cordillera Occidental y el CDSC. Para el Mioceno tardío (10 Ma), la transpresión en el Caribe norte y la cizalladura dextral en el sur fueron causadas por el cambio en el movimiento del Caribe de SE a E; a finales del Mioceno, el Arco de Panamá se unió a la placa de Nazca que chocó con el oeste de Colombia provocando un acortamiento y elevación en los Andes del Norte (Pindell & Kennan, 2009).

### 3.2 Fases tectónicas de la Cuenca Guajira Offshore

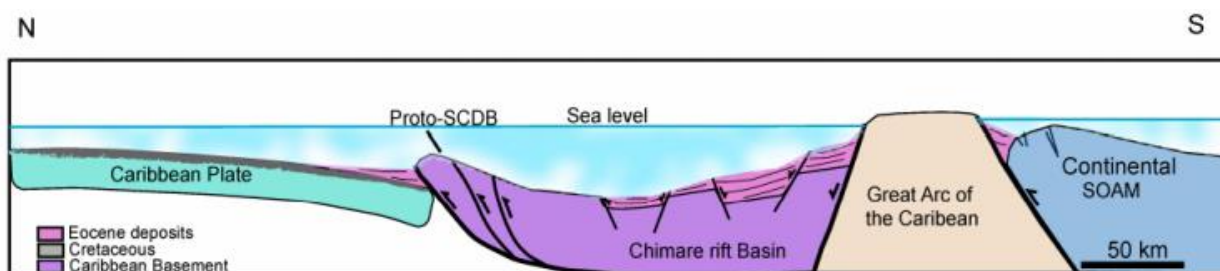
Vence (2008) propone la ocurrencia de cuatro fases tectónicas en el offshore de la Península de la Guajira: 1), extensión en el Eoceno tardío; 2), transpresión en el Oligoceno; 3), transtensión del Mioceno temprano y sedimentación marina somera; y 4), levantamiento andino en el Mioceno tardío y sedimentación de cuencas offshore. De acuerdo con Vence (2008), durante las dos primeras fases, los procesos tectónicos dominaron sobre la sedimentación, mientras que en la cuarta fase dominaron los procesos de sedimentación.

El área se ha visto afectada por grandes fallas de rumbo con diferentes períodos de actividad que pueden superponerse en el tiempo a lo largo del *offshore* de la Guajira. El principal período de actividad de la falla de Cuisa fue en el Oligoceno y disminuyó hacia el Neógeno (Vence, 2008). La falla de Oca-Ancón inició su actividad durante el Mioceno temprano, registró fuertes picos de actividad en el Mioceno medio y menor actividad en el Mioceno tardío. La falla Oca-Ancón ha controlado la posición del abanico del Magdalena a través del tiempo, evidenciado por la presencia de cañones desplazados y la presencia de un paleo abanico en la cuenca de la Ranchería desde el Mioceno medio (Vence, 2008).

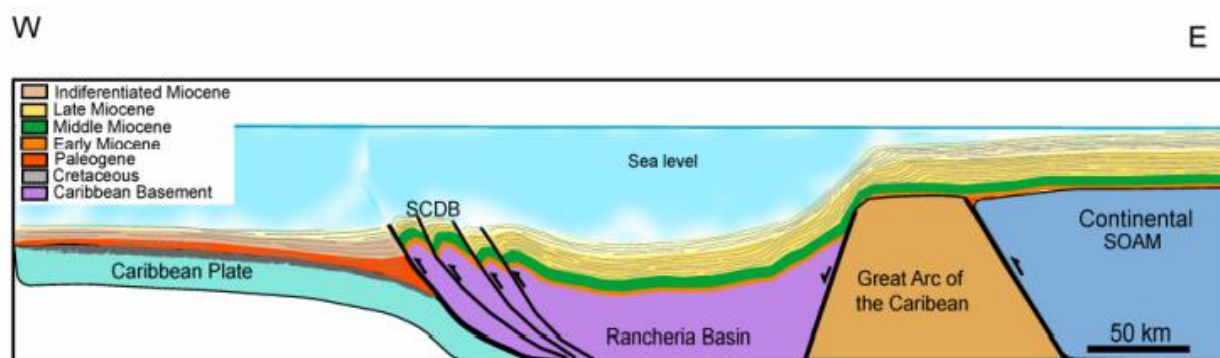
Las cuencas *offshore* de la península de la Guajira se formaron durante las dos primeras fases tectónicas: la cuenca de Chimare se formó durante la extensión del Eoceno tardío después de la colisión del Gran Arco de Caribe (GAC) en el margen norte de la Guajira (Fig. 4). La cuenca del Cabo de la Vela se formó durante la extensión del Oligoceno asociado con la apertura de la cuenca *pull-apart* de Cuisa, creado por la actividad de fallas de rumbo de la falla de Cuisa. Según Vence (2008), la cuenca Ranchería fue formada por el acortamiento generado por el CDSC (Fig. 5).

Las fuentes de sedimentación en el área cambiaron a través del tiempo. Durante el Eoceno y el Oligoceno, el GAC se erosiona al estar expuesto y podría haber sido la principal fuente de

sedimentos. Durante el Mioceno temprano, comenzó la subsidencia del GAC y su papel como fuente disminuyó, mientras que la Sierra de Santa Marta pudo haber sido el área positiva más cercana. Para el Mioceno tardío - Plioceno, la Sierra de Santa Marta y la Sierra de Perijá pueden haber proporcionado la gran afluencia de sedimentos necesaria para crear los cañones formados en el Mioceno temprano a tardío. Este aumento en las tasas de sedimentación durante la última fase tectónica enterró los sedimentos del Paleógeno lo suficientemente como para producir hidrocarburos termogénicos (Vence, 2008).



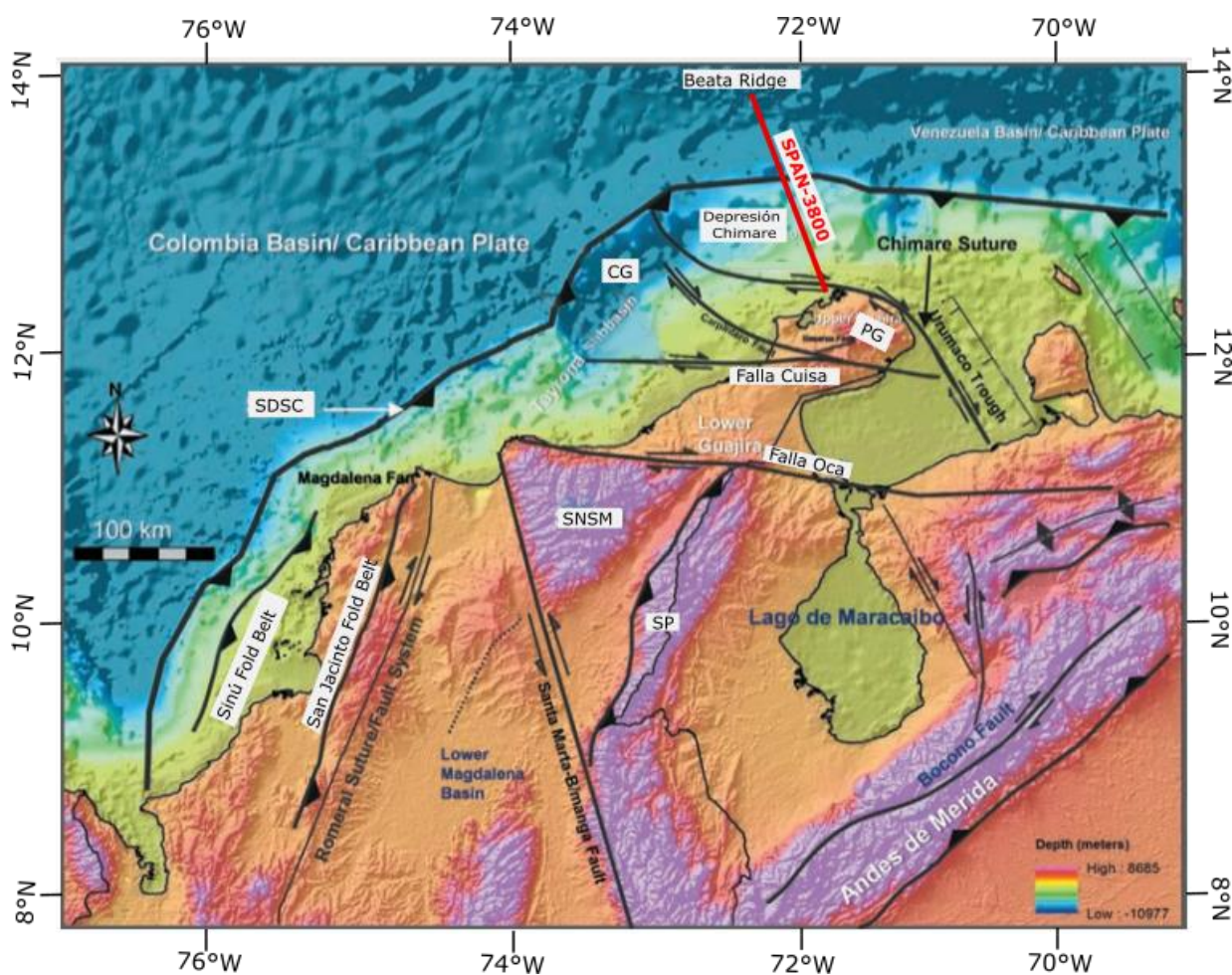
**Figura 4.** Sección transversal esquemática del Eoceno tardío que muestra la relación entre la subducción en el proto-Cinturón Deformado del Caribe del Sur (Proto-SCDB), la aproximación del GAC a Suramérica y la formación de la cuenca Chimare. Tomado de Vence (2008)



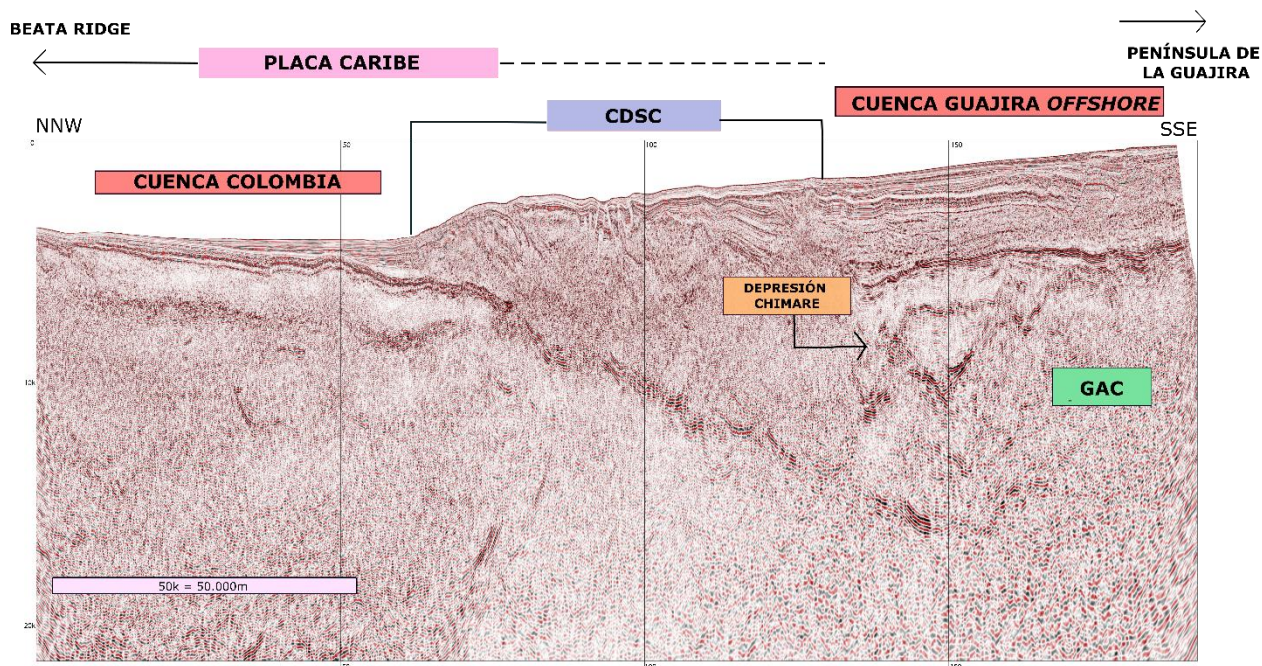
**Figura 5.** Sección transversal esquemática del Mioceno temprano que muestra el engrosamiento de la sedimentación del margen continental en la cuenca de Ranchería. Tomado de Vence (2008).

### 3.3 Provincias geológicas presentes en el área de estudio

Las principales provincias geológicas ubicadas en la región del Caribe que tienen influencia en la zona de estudio se describen a continuación y se ilustran de manera regional en vista de mapa en la Figura 6. Estos elementos son ilustrados en la línea sísmica SPAN-3800 en la Figura 7.



**Figura 6.** Mapa de topografía/batimetría donde se presentan los principales elementos estructurales en la esquina noroccidental de Suramérica. La línea roja indica la ubicación de la línea sísmica SPAN-3800. SNSM= Macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta, SP= Serranía de Perijá, CG= Cuenca Guajira Offshore, PG= Península de la Guajira, CDSC= Cinturón Deformado del Sur del Caribe. Modificado de Londono et al. (2015).



**Figura 7.** Principales provincias geológicas de la región Caribe colombiana identificadas sobre la línea SPAN-3800. Localización de la línea sísmica SPAN-3800 en la Fig. 6. Exageración vertical 1:25. CDSC= Cinturón Deformado del Sur del Caribe.

### 3.3.1 Cinturón Deformado del Sur del Caribe (CDSC)

El CDSC es un prisma de acreción formado en la parte Offshore de Colombia y Venezuela, a lo largo del margen convergente entre las placas Caribe y Suramericana (e.g. Ladd & Truchan, 1983; Ladd et al., 1984) (Figs. 6-7). El prisma de acreción se encuentra en continuo crecimiento en respuesta a la subducción ESE de la placa del Caribe con una velocidad de ca. 20 mm/año (e.g. Pérez et al., 2001; Weber et al., 2001; Trenkamp et al., 2002; Veloza et al., 2012; Symithe et al., 2015). Los sedimentos del prisma de acreción son interpretados como sedimentos erosionados de la corteza subducida, y los sedimentos depositados en el tope del prisma son depositados por un sistema deltaico progradante que provienen del continente (e.g. Los ríos Magdalena, Sinú y

Atrato). Para explicar su génesis, se han propuesto varios modelos entre ellos la deformación generada por la convergencia oblicua con desplazamiento lateral derecho de la placa de Suramericana y placa del Caribe (e.g. Pindell y Barrett, 1990; Mann, 1999) o relacionado con un proceso de deslizamiento inducido por la gravedad (Moreno et al., 2009) (Fig. 7).

Generalmente, el CDSC ha sido considerado como un pliegue continuo y un pliegue cabalgado desde el Arco de Panamá hasta el norte de Venezuela (Van der Hilst and Mann, 1994). Sin embargo, existe una brecha, al menos en su continuidad cercana a la superficie, en el área del abanico de Magdalena, que es utilizada por (Escalona & Mann, 2011) para separar los cinturones de Sinú y San Jacinto al SW del CDSC y las Antillas de sotavento hasta el NE.

### 3.3.2 *Beata Ridge*

El Beata Ridge es un alto estructural que se extiende hacia el sur desde Cape Beata, Hispaniola, por alrededor de 400 km y un relieve de aproximadamente 2000 m (Fig. 6). Driscoll & Diebold (1999) interpretan el levantamiento principalmente como un bloque formado por fallas extensionales relacionado con la formación de *plateau* oceánico en el Cretácico.

Mauffret & Leroy (1997), proponen que la deformación del Beata Ridge es debido a una compresión y fallas con componente de rumbo desde el Mioceno temprano (23 Ma), donde el levantamiento de la corteza incrementa progresivamente desde el sur al norte y la compresión del ridge está probablemente conectada a la zona de subducción del noroccidente de Colombia.

### 3.3.3 *Península de la Guajira*

Los límites morfológicos de la Península de la Guajira incluyen la traza E-W de la falla de rumbo Oca-Ancón en el sur, el Mar Caribe en el occidente y norte, y el Golfo de Venezuela al este (Vence, 2008) (Fig. 6). Se caracteriza por varios macizos aislados con geología correlacionable,

rodeados por planicies y cuencas cenozoicas (e.g. MacDonald 1964; Lockwood 1965; Alvarez 1967). Dentro de estos macizos se pueden identificar al menos tres cinturones litotectónicos principales (Weber et al., 2009). El primero y más antiguo se compone de un dominio metamórfico, Mesoproterozoico tardío y Paleozoico, que incluye unidades de medio y alto grado. El segundo se trata de un cinturón débilmente deformado de rocas sedimentarias Mesozoicas con las mismas características de depositación y edades del margen Sudamericano autóctono (Villamil, 1999). Y el último, se compone de una secuencia de dos unidades metamórficas metavolcano-sedimentarias diferentes de bajo grado de metamorfismo, pertenecientes al Cretácico (e.g. MacDonald 1964; Lockwood 1965; Alvarez 1967; Pindell, 1993).

El área de la Península de la Guajira ha sido dividida geográficamente en dos distintas provincias geológicas y fisiográficas, la Baja Guajira y la Alta Guajira (Macdonald, 1964). La Alta Guajira, está limitada en el sur por la traza lineal de la falla Cuisa, es caracterizada por la presencia de pequeñas serranías y cuencas sedimentarias Cenozoicas. En contraste, alrededor de 4.000m de depósitos clásticos marinos y continentales del Eoceno (?) - Plioceno son presentados en la Baja Guajira (Case et al., 1984). Este espesor de rocas sedimentarias de la Baja Guajira fue cubierto por depósitos cuaternarios. La Baja Guajira densamente sedimentada es caracterizada por su anomalía de gravedad baja (Case & MacDonald, 1973).

### 3.3.4 *Depresión Chimare*

La depresión está localizada en el norte de la Península de la Guajira. Esta depresión muestra el desarrollo de fallas extensionales en una configuración de *horst* y *graben*, la cual fue interpretada por (Fajardo & Rubiano, 1998) como un margen pasivo, que se profundiza hacia el N y NE (Fig. 7). Sin embargo, la secuencia sedimentaria se encuentra buzando en dirección opuesta, y cerca a la costa se observa el mejor desarrollo del depocentro. Adicionalmente, la elongación NW-SE que

es evidenciada en los datos gravimétricos sugiere que esta depresión es un *graben* entre altos de basamento asociados a las Serranías de Macuira y Jarara en el sur y la Plataforma Los Monjes en el norte (Aguilera, 2011). La depresión cubre un área de ca7,150 km<sup>2</sup> y en ella se depositaron sedimentos del Paleógeno al Neógeno (Ramirez, 2007).

### **3.3.5 Cuenca Colombia**

Es la acumulación de sedimentos que se encuentran sobre la placa del Caribe en el norte del offshore del Caribe colombiano; limita al norte con el escarpe de Hess, al este con *Beata Ridge* y al sur con el CDSC (Ladd, Holcombe, Westbrook, & N.Edgar, 1990) (Fig. 6). La cuenca se extiende a profundidades de 4000 a 4400 m, es la llanura abisal más grande de la región del Caribe. La llanura abisal se extiende al norte hasta Hispaniola y al este hasta la parte sur del *Beata Ridge*, y está siendo llenado por importantes cantidades de sedimentos del sistema fluvial del Magdalena (Basabe, 2018) (Fig. 6). Los cinturones deformados del norte de Panamá y del sur del Caribe son márgenes de acreción de esta cuenca (Draper, 1994).

## **3.4 Geología estructural**

Desde el Cretácico tardío la esquina noroccidental de Suramérica ha sido afectada por diversos eventos tectónicos como extensión, colisión y convergencia oblicua que han convertido esta área en una región geológicamente compleja, caracterizada por diversos estilos estructurales como cinturones cabalgados y bloques rotados (e.g. Pindell y Barrett, 1990; Mann, 1999; Pindell y Kennan, 2009; Leslie et al., 2015).

Teniendo en cuenta el estilo estructural, el Caribe colombiano se ha dividido en dos estilos predominantes (López, 2005). El primer estilo estructural se localiza entre el Arco de Panamá y Santa Marta, el cual corresponde a un sistema transpresivo de cuñas sedimentarias acrecionadas

de manera oblicua al margen norte de la Placa Sudamericana, que transportan cuencas sedimentarias *piggy back* (López, 2005) acompañado de una intensa actividad diapírica (Galindo, 2016). El segundo estilo comprende desde Santa Marta hasta la Alta Guajira, y corresponde a un estilo estructural dominado por fallas rumbo dextrales que conforman un gran sistema transtensivo. (García et al., 2008).

Estudios geológicos y sísmicos indican que la placa del Caribe se está moviendo hacia el este en relación con las Américas, y este movimiento es acomodado por fallas de rumbo lateral derecho a lo largo de su límite con la placa de América del Sur (Mann, 1999). Las principales fallas de rumbo que contribuyen a la compleja y amplia zona de deformación incluyen la falla Cuisa que se extiende desde el *offshore* al oeste de la Península de la Guajira, hasta el oeste del Golfo de Venezuela (Cediel et al., 2012), la falla Oca-Ancón con movimiento lateral derecho (Audemard et al., 2005). la falla de rumbo lateral derecho Boconó (Schubert, 1980) y la falla Santa Marta-Bucaramanga con desplazamiento lateral izquierdo (Gomez, 2001). Estas tres últimas fallas definen el bloque de Maracaibo (Figura 4.4), un área triangular de corteza continental el cual se extruye hacia el norte y noreste como resultado del acortamiento regional este-oeste producido por la colisión del arco de Panamá en el Mioceno tardío (e.g. Silver et al., 1975; Mann et al., 1990; Coates et al., 2004; Mann et al., 2006).

### **3.4.1 Falla Cuisa**

Es una falla de rumbo lateral derecho geomorfológicamente prominente que se extiende hacia el este por unos 80 km desde el *offshore* de la Alta Guajira hasta la península de la Guajira donde cambia ligeramente su rumbo a una orientación este-sureste (Vence, 2008) (Fig. 6). La importancia de la falla de Cuisa es que pertenece a una serie de fallas de rumbo orientadas principalmente de

este a oeste a lo largo del borde noroeste de la placa Suramericana que acomodan el desplazamiento hacia el este de los terrenos alóctonos con la placa del Caribe (Gomez, 2001).

### **3.4.2 Falla Oca-Ancón**

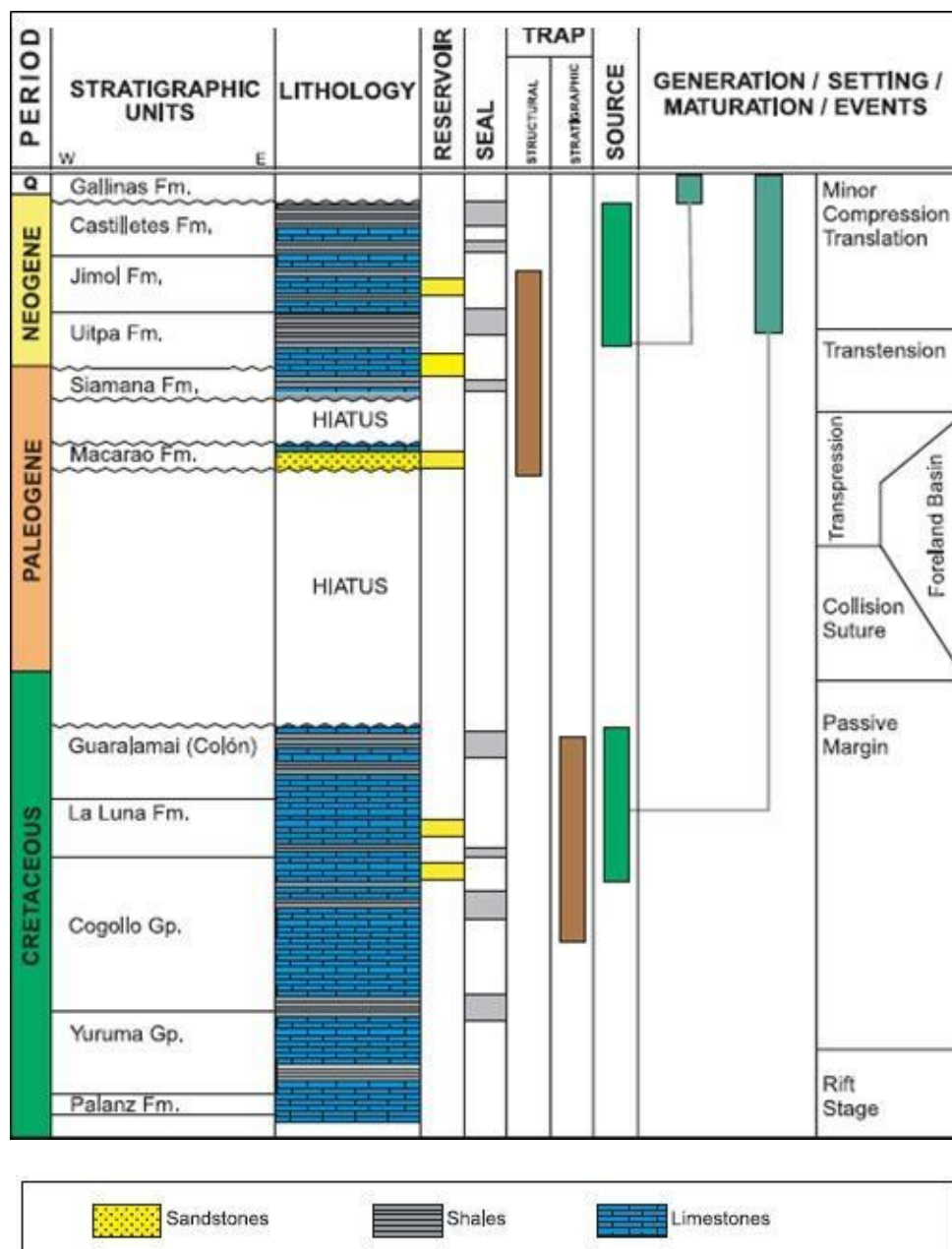
Separa la Sierra Nevada de Santa Marta hacia el sur de la Baja Guajira en el norte de Colombia. Esta falla de rumbo presenta un movimiento lateral derecho y es parte del sistema de fallas Oca-Ancón que se extiende hacia el este desde el norte de Colombia hasta el oeste de Venezuela por unos 650 km (Audemard, 1995) (Fig. 6). La falla de Oca-Ancón jugó un papel importante en la acomodación del movimiento relativo este-oeste de las placas Caribe y Suramericana (e.g. Burke et al., 1984; Pindell et al., 1988; Gómez, 2001).

### **3.4.3 Falla Santa Marta-Bucaramanga**

Falla de rumbo lateral izquierdo que se extiende con un rumbo 15°E durante más de 550 km desde la Cordillera Oriental hasta la costa del Caribe cerca de la ciudad de Santa Marta (Fig. 6). Es el límite occidental del bloque Maracaibo según la definición de (Mann & Burke, 1984). Juntamente con la falla de rumbo Boconó acomodan el escape hacia el norte del bloque de Maracaibo hacia el sur del Caribe (e.g. Mann & Burke, 1984; Van der Hilst & Mann, 1994).

## **3.5 Estratigrafía**

Se describen a continuación de base a techo las unidades estratigráficas de la Cuenca Guajira *offshore* presentes en el área de estudio desde el período Paleógeno al Cuaternario (Fig. 8). La descripción de estas unidades se realiza con base a los estudios realizados por Renz (1960), Rollins (1965), Lockwood (1965), Pulido et al., (1991) y Rubio et al., (1998) para las formaciones presentes en la Península de la Guajira.



**Figura 8.** Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Guajira Offshore. Tomada y modificada de (Barrero et al.,2007).

### 3.5.1 Formación Macarao

Litológicamente, (Rollins, 1965) define la base de la Formación Macarao de arcillas ligeramente calcáreas, y seleníticas. Se reportan a la base capas muy gruesas y gruesas de areniscas

con intercalaciones de capas medianas a delgadas de limolitas. La litología de esta Formación se relaciona a condiciones marinas someras a medias, ubicándose en *shoreface* medio a distal. (Rollins, 1965), ubica la unidad a la base del Cenozoico (Fig. 8), asignando por el registro fósil una edad Eoceno tardío.

### **3.5.2      *Formación Siamaná***

En general, la unidad está constituida por rocas terrígenas y calcáreas (Rollins, 1965). Las primeras están representadas por arenitas calcáreas de grano fino a muy fino, fosilíferas y esporádicamente conglomeráticas. La segunda litología corresponde a rocas calcáreas tipo bioesparitas. También se reportan niveles de limolitas calcáreas cuya ocurrencia está supeditada a la presencia de las capas arenosas. La unidad ha sido datada por varios autores, ubicándola a lo largo del Oligoceno. Renz (1960) le asigna por edad el Oligoceno medio y propone que la parte inferior de la formación pertenece al Oligoceno inferior. Lockwood (1965) data la parte superior de la unidad, proponiendo para esta una edad de Oligoceno superior (Fig. 8). Rollins (1960) propone que esta unidad se depositó en un ambiente marino profundo y condiciones neríticas.

### **3.5.3      *Formación Uitpa***

Esta unidad está compuesta principalmente por calizas, intercaladas en menor proporción con arcillolitas. Por su litología y fauna reportada se propone para la Formación Uitpa un ambiente somero que, aunque estable, rápidamente alcanzó grandes profundidades (Zuluaga et al., 2009). De acuerdo con Rollins (1960) esta unidad es del Oligoceno, mientras que Renz (1960) y Rubio & Ramírez (2000) basados en interpretación bioestratigráfica de pozos la consideran de edad Mioceno inferior (Fig. 8).

#### **3.5.4      *Formación Jimol***

Según Rollins (1960), esta unidad consiste en calizas arenosas muy fosilíferas intercaladas con areniscas calcáreas, de grano medio a grueso. En menor proporción se presentan arcillolitas limosas intercaladas con calizas. Pulido et al. (1991) señalan que esta secuencia se depositó durante el Mioceno tardío, mientras que Rubio et al. (1998) determinan que esta unidad se depositó principalmente en la parte superior del Mioceno medio a Mioceno superior en un ambiente que varía desde continental hasta batial superior (Fig.8).

#### **3.5.5      *Formación Castilletes***

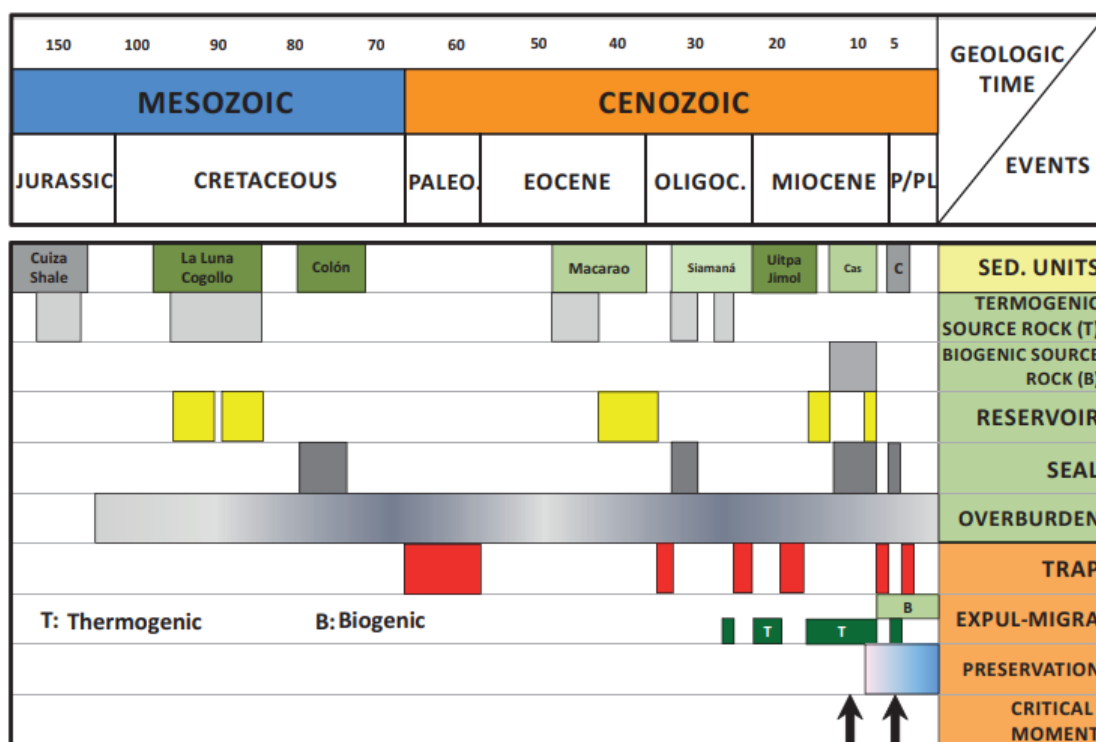
Rollins (1960), indica que la Formación Castilletes descansa conforme sobre la Formación Jimol, y está constituida hacia la base por intercalaciones de areniscas calcáreas fosilíferas, lutitas y calizas margosas fosilíferas y estratificación gruesa dominante, mientras que hacia el tope de la sucesión estratigráfica la constituyen arcillolitas limosas intercaladas con capas delgadas de areniscas. Esta unidad fue depositada durante el Mioceno medio-Plioceno inferior en un ambiente marino somero (Fig. 8). Según Rubio et al. (1998) con base en análisis bioestratigráficos esta unidad se depositó en un ambiente de plataforma externa a plataforma interna.

#### **3.5.6      *Formación Gallinas - Depósitos Cuaternarios***

Para el intervalo Pleistoceno - Holoceno se han descrito depósitos de arcillolitas arenosas intercaladas con bancos de areniscas de grano medio a grueso y conglomerados con cantos de tamaño decimétrico de origen ígneo, encerrados en una matriz areno-arcillosa (Rollins, 1960) (Fig.8).

### 3.6 Sistemas de petrolífero del *offshore* de la Península de Guajira

Los prospectos de acumulación de hidrocarburos poco profundos en la Península de la Guajira están restringidos a la plataforma y se han explorado desde la década de 1970. El 72% del gas nacional de Colombia se produce en el offshore de la península de la Guajira, y la mayoría de los campos productores se encuentran en la plataforma Chuchupa (Vence, 2008). Los elementos del sistema petrolífero se describen a continuación y se presentan en la carta de eventos propuesta por Ramirez et al. (2015) en la Figura 9.



**Figura 9.** Carta de eventos de sistemas petrolíferos de la Cuenca Guajira, que muestra la relación entre los elementos y procesos interpretados para la cuenca. Tomado de Ramirez et al. (2015).

### **3.6.1 Rocas generadoras**

A partir del registro sedimentario de la cuenca, se han evaluado rocas generadoras potenciales para los estratos del Jurásico (*shale* de Cuisa), Cretácico y Cenozoico (Formaciones Macarao, Siamana y Castilletes). Para el *shale* de Cuisa se determinaron valores de TOC de 0,3-1,2% de un kerógeno tipo II. Las Formaciones Cretácico La Luna y Colón se encuentran en la parte oriental de la Baja Guajira, la calidad geoquímica y las características de los estratos del Cretácico no se conocen localmente (Ramirez et al., 2015), pero se informan valores de TOC de hasta 4,3% en el área del Catatumbo (Yurewicz et al., 1998) y los valores TOC promedio se calculan en 5,6% en la Cuenca de Maracaibo (Talukdar & Marcano, 1994) para la Formación La Luna y contiene kerógeno tipo II. El potencial de roca fuente de la Formación Macarao es de un TOC de 1 a 1,5%, kerógeno tipo III y un valor de reflectancia de vitrinita de 0,7% (información tomada del pozo UG-4 (ICP- Ecopetrol, 2000).

### **3.6.2 Rocas reservorios**

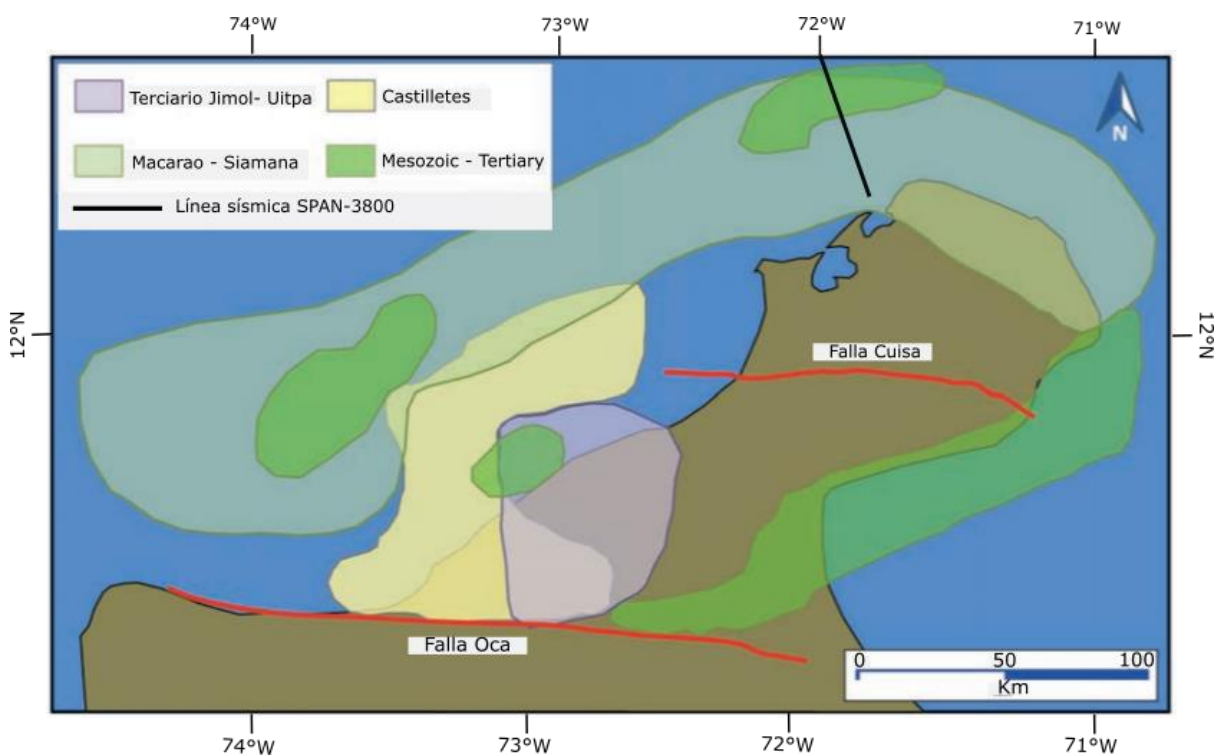
Se han reconocido rocas reservorios potenciales en el Cretácico (Formación La Luna) y Cenozoico (Formaciones Siamana, Uitpa, Jimol y Castilletes). La roca reservorio de la formación La Luna es una caliza petrolífera fracturada en Punta Espada a lo largo del límite oriental de la Cordillera de Macuira en la Alta Guajira. El pozo PGG-1 perforado en 1958, mostró saturación de petróleo en los núcleos de esta Formación (Ramirez et al., 2015). La Formación Siamana es reconocida como un reservorio en la Alta Guajira según ICP-Texaco (2002), Leal et al. (2002) y Olaya & Ramirez (2003) la caracterizan por contener areniscas y areniscas calcáreas con una porosidad promedio del 15% y un espesor de 20 m (información tomada del pozo UG-3 (Ramirez et al., 2015). La Formación Uitpa está constituida principalmente de arenisca y es el reservorio más bajo en algunos de los pozos del campo Chuchupa (Ramirez, 2007). La Formación Castilletes

es principalmente una unidad arcillosa de hasta 1.200 m con capas finas de arenisca depositados en un ambiente de aguas profundas (e.g. Ramirez, 2007; Mantilla et al., 2013).

### 3.6.3 *Rocas sellos*

La roca sello para los reservorios del Mioceno inferior es la Formación Castilletes del Mioceno medio al tardío con espesores de hasta 1200 m en la Baja Guajira y 1800 m en la Alta Guajira. Para los reservorios del Oligoceno y más antiguos, el sello consiste en los estratos del Mioceno inferior (Formaciones Uitpa y Jimol) (Ramirez et al., 2015).

El origen de los hidrocarburos en la cuenca de la Guajira se ha descrito como el producto de un único sistema de petróleo biogénico (Rice & Claypool, 1981; Katz & Williams, 2002). Sin embargo, Ramirez et al. (2002; 2003) y Ramirez (2006) propusieron la presencia de al menos cuatro sistemas petroleros y algunos de estos involucran procesos termogénicos. La distribución geográfica de los sistemas petroleros en la Cuenca de La Guajira se muestra en la Figura 10.



*Figura 10. Distribución geográfica de los sistemas petrolíferos propuestos para la Cuenca de La Guajira. La línea negra indica la localización de la línea sísmica SPAN 3800. Modificado de (Ramirez et al., 2015), previamente modificado de (Ramirez, 2007).*

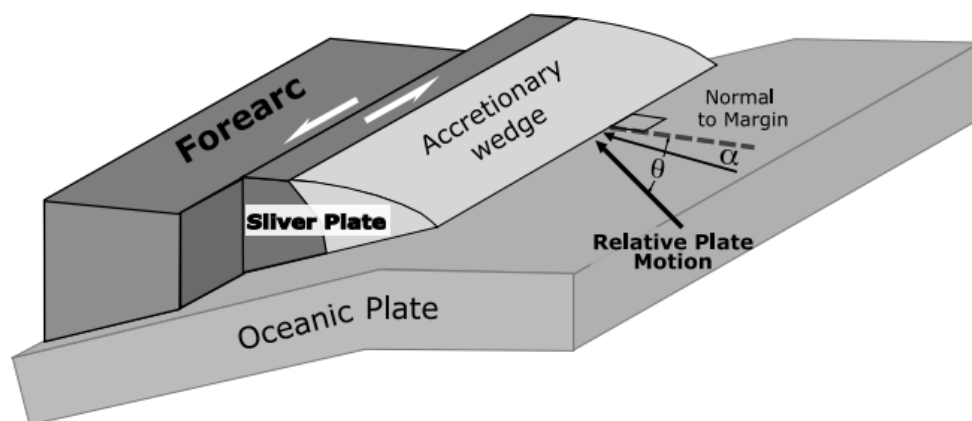
- **Sistema petrolífero Mesozoico-Terciario:** La roca fuente es potencialmente la Formación La Luna en las partes oriental y noreste de la cuenca. Información de la parte este de la Alta Guajira, del pozo PGG-1 y de los afloramientos de Punta Espada, indica capacidad de fuente potencial de los estratos del Cretácico. Este sistema podría ser propenso al aceite.
- **Sistema petrolífero Macarao-Siamana:** la roca fuente es la Formación Macarao y los reservorios son rocas clásticas de la Formación Siamana. Este sistema petrolero se considera propenso a los gases y es especulativo.
- **Sistema petrolífero del Terciario – Jimol/Uitpa:** la roca fuente es la Formación Castilletes del Mioceno medio a superior. Esta unidad ha sido reportada como térmicamente inmaduro, con un valor de  $R_o$  inferior a 0,5%. Las rocas reservorio son las Formaciones Uitpa y Jimol. Este sistema de petróleo es propenso a gas y es completamente especulativo.
- **Sistema petrolífero Castilletes:** la roca fuente de este sistema se interpreta como la Formación Castilletes, que localmente tiene potencial de reservorio en depósitos de turbiditas siliciclásticas. Este sistema petrolero se considera propenso a los gases y es totalmente especulativo.

## 4 MARCO CONCEPTUAL

### 4.1 Convergencia oblicua

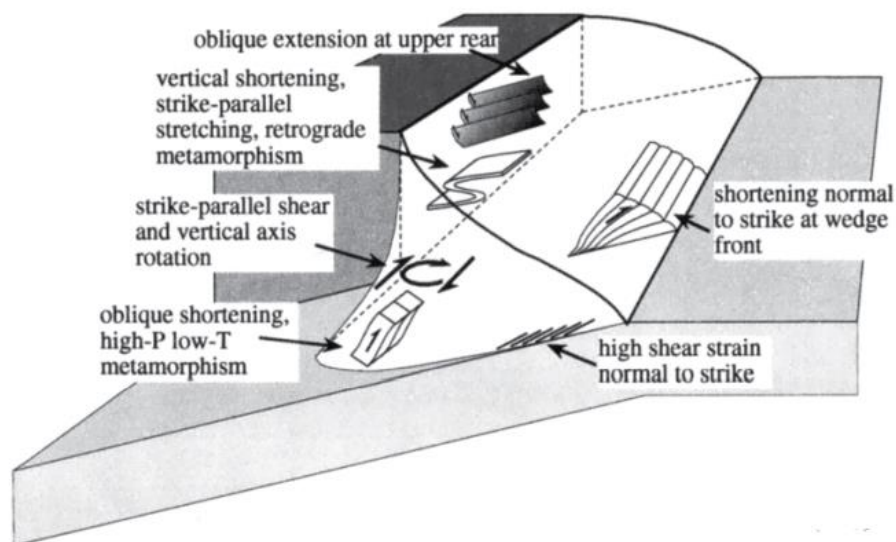
La partición de la deformación entre fallas de rumbo paralelas a la margen, cabalgamientos y pliegues en respuesta a un componente ortogonal de deformación es una característica común de los márgenes convergentes oblicuos (e.g. Fitch, 1972; McCaffrey, 1992; Beck et al., 1993; Teyssier et al., 1995 en Galindo, 2016). Fitch (1972) fue el primero en hablar sobre las zonas de deformación de rumbo en escenarios de subducción oblicua. Estas fallas de rumbo son típicamente paralelas a la trinchera y están localizadas en la parte posterior del prisma de acreción como resultado de la convergencia. Desde entonces, se ha identificado un componente de movimiento de rumbo en aproximadamente el 50% de las zonas de subducción activas en todo el mundo (Jarrard, 1986); algunos de los ejemplos más documentados son: la trinchera de Sumatra (McCaffrey, 1991; McCaffrey, 2009); el margen de Hikurangi en Nueva Zelanda (Collot & Davy, 1998; Upton et al., 2003); la fosa de Ryukyu, al este de Taiwán (Lallemand et al., 1999); las Aleutianas (Ryan & Scholl, 1989; Yu et al., 1993); norte de la trinchera chilena (Cembrano et al., 2005) y el margen sur del Caribe a lo largo del norte de Venezuela (Avé Lallemant, 1997; Beardsley & Avé Lallemant, 2007; Escalona & Mann, 2011).

La región entre la trinchera y la falla de rumbo se ha denominado en general escama de antearco (“*sliver*”). Esta escama es arrastrada a lo largo del rumbo en relación con la placa superior como resultado del movimiento oblicuo de la placa que subduce debajo de ella (e.g., Fitch, 1972; Jarrard, 1986; en Galindo (2016)) (Fig. 11).



**Figura 11.** Bloque diagrama que muestra la posición tectónica de una escama de antearco (“fore-arc sliver plate”) su geometría y el movimiento en condiciones de subducción oblicua con componente de rumbo sinistral, contrario al que se presenta en la convergencia de la placa Caribe. Tomado de Haq & Davis (2010) modificado previamente de Platt (1993; 2000).

La deformación dentro de la escama de antearco en forma de cuña y el grado de la partición por deformación ha sido el foco de múltiples investigaciones, y generalmente se ha explicado en términos del ángulo de oblicuidad de la subducción, las tasas de deslizamiento, la reología y el acoplamiento de las placas. A partir de observaciones, se acepta generalmente que cuanto mayor es el ángulo de oblicuidad, mayor es la velocidad de movimiento de la escama de antearco (Galindo, 2016). Por lo tanto, en los márgenes arqueados, el cambio en la oblicuidad a lo largo del margen se ha correlacionado con variaciones de los estilos estructurales dentro de la escama e implica la aparición de extensión a lo largo del desplazamiento de rumbo (e.g. McCaffrey, 1991; McCaffrey et al., 2000 en Galindo, 2016). Múltiples estudios se han centrado en la localización de la partición por deformación, por ejemplo, los estudios analíticos que utilizan Mohr-Coulomb (Platt, 1993; Enlow & Koons, 1998; Platt, 2000) y enfoques geométricos (McCaffrey, 1992; Yu et al., 1993; Haq & Davis, 2010) han predicho una zona de deformación con desplazamientos de rumbo en la parte posterior de la cuña del antearco (Figura 12).



**Figura 12.** Estilos estructurales teóricos presentados en una cuña que converge oblicuamente (Platt, 2000).

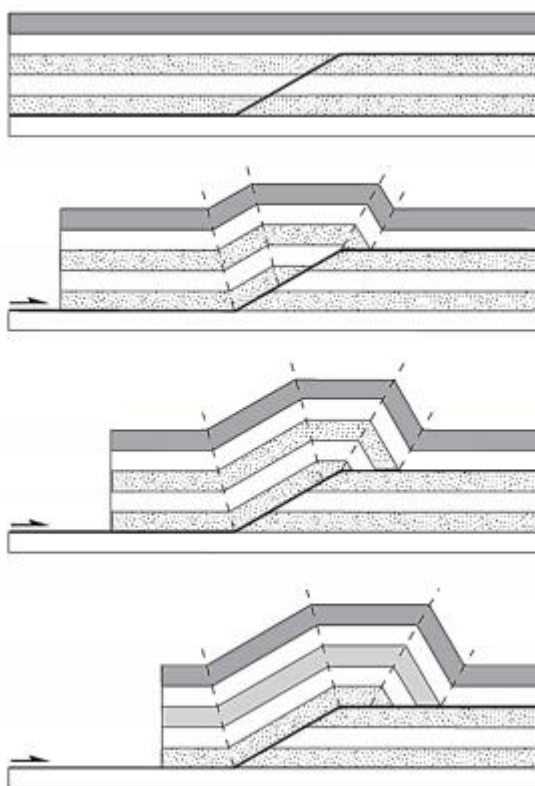
La ocurrencia de la partición por deformación es importante debido a su implicación en la localización de zonas de deformación por deslizamiento de rumbo hacia la parte posterior de la cuña, el cual es un mecanismo importante en la formación de cuencas (Ballance & Reading, 1980; Christie-Blick & Biddle, 1985; Nilsen & Sylvester, 1995; Allen & Allen, 2013). Las zonas de deformación por deslizamiento de rumbo pueden presentar una variedad de estilos estructurales diferentes, como estructuras de flor positivas y negativas, estructuras de fallas y pliegues “*en - echelon*”, fallas sintéticas y antitéticas y curvas de restricción y liberación (Figura 13). La formación de estas estructuras en términos de subducción oblicua se puede controlar mediante cuatro factores principales: 1) el grado de convergencia o divergencia entre la escama de antearco y la placa superior, 2) la magnitud del desplazamiento de la escama, 3) las propiedades del material de las rocas, y 4) la configuración de estructuras preexistentes (Blick & Biddle, 1985).



dejan de ser una combinación de los estilos y mecanismos de deformación de los tres tipos principales mencionados a continuación:

#### 4.2.1 *Pliegues por flexión de falla (Fold Bend Fault):*

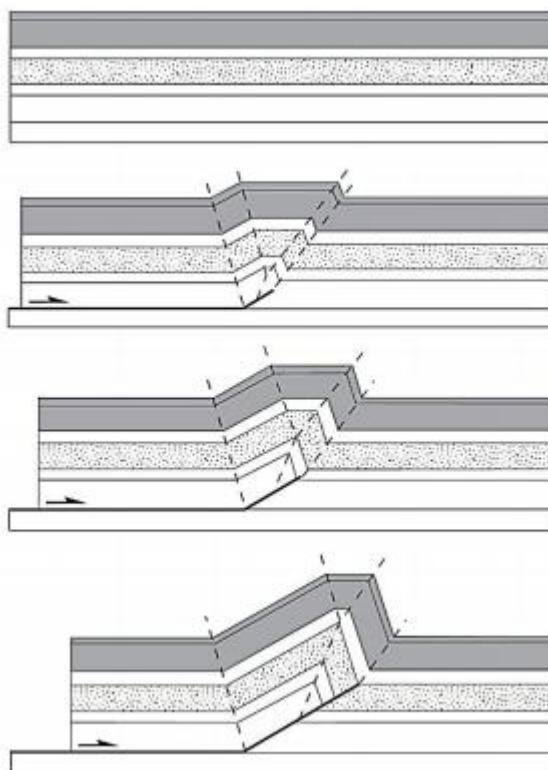
Según Rich (1934), son aquellos que se forman como resultado del movimiento de un bloque de falla a lo largo de una superficie de falla no planar, lo cual causa la flexión del bloque de falla y por lo tanto la formación del pliegue (Fig. 14). Aunque por lo general se forman en el bloque superior de la falla, pueden desarrollarse también en el bloque inferior o en ambos bloques.



**Figura 14.** Evolución cinemática de un pliegue de flexión de falla teórico con longitud, espesor y área de las capas constante desarrollado sobre un cabalgamiento. Tomado de (Poblet, 2004).

#### 4.2.2 *Pliegues por propagación de falla (Fold Propagation Fault)*

Según (Dahlstrom, 1970), se forman contemporáneamente a la propagación de una falla en situación de rampa a través de una serie de estratos, de forma que el acortamiento da lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación (Fig. 15).

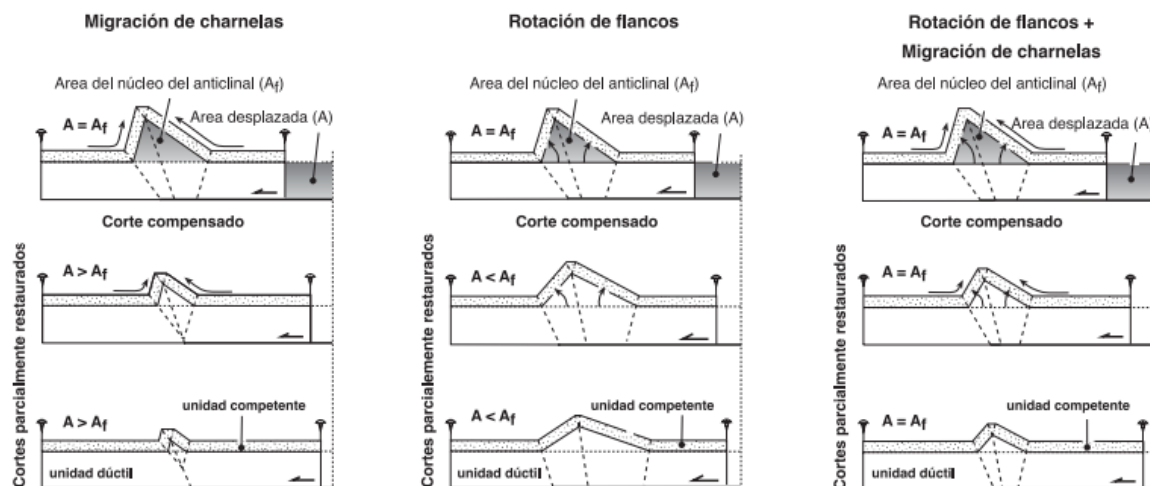


**Figura 15.** Evolución cinemática de un pliegue de propagación de falla teórico con longitud, espesor y área de las capas constante desarrollado sobre un cabalgamiento. Tomado de Poblet (2004).

#### 4.2.3 *Pliegues de despegue (Detachment folds):*

Según Chamberlin (1910), a diferencia de los pliegues de flexión o de propagación de falla, no están asociados con una rampa en la falla, sino que se forman en relación con un cabalgamiento paralelo a las capas (despegue) (Figura 16). Pueden generarse en la zona próxima a la terminación

de un cabalgamiento o bien en cualquier otra zona a lo largo del cabalgamiento si se produce una disminución brusca en la cantidad de desplazamiento a lo largo de este. Los pliegues despegados pueden estar limitados por un despegue inferior, por uno superior o por ambos. El mecanismo de formación ha sido desarrollado a partir de modelos teóricos dentro de los cuales se conocen migración de charnelas, rotación de flancos y la combinación de los dos (Poblet, 2004).

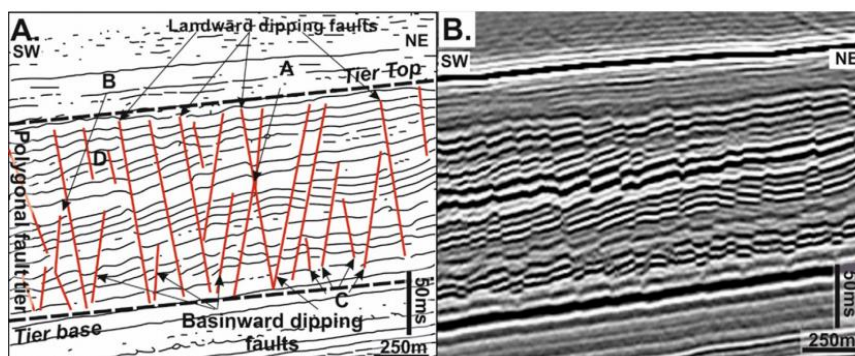


**Figura 16.** Evolución cinemática de pliegues de despegue teóricos formados por tres mecanismos de amplificación: migración de charnelas, rotación de flancos, y combinación de rotación de flancos. Tomado de (Poblet, 2004).

### 4.3 Fallas poligonales

Los sistemas de fallas poligonales se han documentado en más de 100 cuencas en todo el mundo y comprenden un gran número de fallas normales limitadas por capas, de bajo desplazamiento (<100 m de proyección) (Cartwright et al., 2007) (Figura 17). Estos sistemas de fallas poligonales ocurren dentro de sucesiones sedimentarias de grano fino, que comúnmente forman sellos para los reservorios de hidrocarburos (Cartwright et al., 2003) y sitios de almacenamiento de CO<sub>2</sub> (Arts et al., 2004). Estos sistemas de fallas tienen el potencial de reducir o mejorar la capacidad de sellado

de sucesiones sedimentarias de grano fino (Gay & Berndt, 2007). En general, las fallas poligonales parecen estar relacionadas con la deshidratación y la compactación de sedimentos de grano fino (Cartwright et al., 2007).



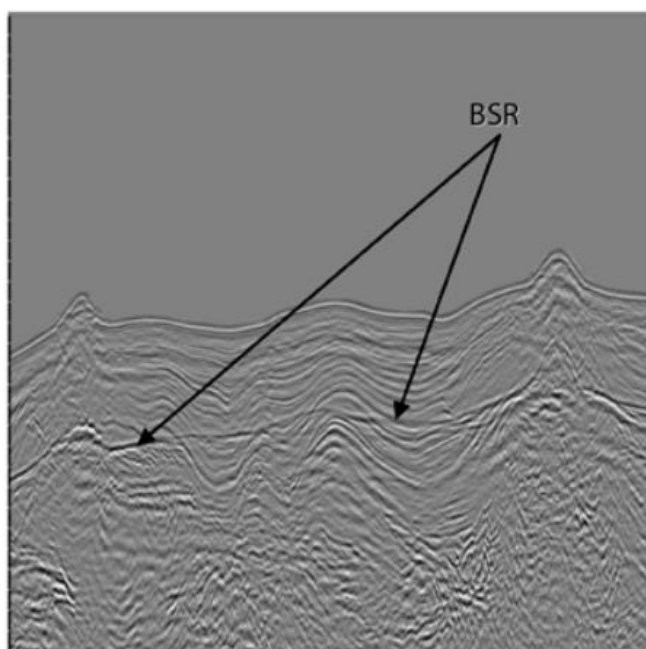
**Figura 17.** A) Bosquejo conceptual de fallas poligonales en una cuenca sedimentaria. B) Fallas poligonales vistas desde una línea sísmica. Tomado de (Morgan et al., 2015).

#### 4.4 Hidratos de gas y *bottom simulating reflector* (BSR)

Los hidratos de gas son sustancias sólidas compuestas por moléculas de agua rígidas que encierran el gas natural. Cuando el gas natural es principalmente metano (>99%), estas sustancias se denominan hidratos de metano (Kennett et al., 2003). La ocurrencia, el mapeo y las estimaciones del volumen de las acumulaciones de hidratos de gas marino se infieren principalmente de la presencia del BSR en las secciones sísmicas. Los BSR son reflectores sísmicos anómalos que resultan de un cambio en la impedancia acústica producido por una caída en la velocidad del sonido, que es causada principalmente por la presencia de gas atrapado debajo de la zona de estabilidad de hidratos, es decir, el BSR marca una transición entre la zona de hidratos de gas y la zona de gas libre (Kvenvolden, 1998). Este reflector se puede identificar por tres características particulares: emula la forma del fondo del océano, puede cortar transversalmente a través de

reflectores estratigráficos y tiene polaridad opuesta al fondo oceánico (Fig.18) (Kvenvolden, 1998).

Ladd et al. (1984) interpretaron el BSR a lo largo del CDSC, entre profundidades de 2,3 a 4,2 kilómetros y calcularon el gradiente geotérmico a partir del BSR observado, obteniendo un valor de 313,15 K/km. (Gómez & León, 2000), evaluaron la existencia de hidratos de metano en la Cuenca de Colombia, concluyendo que los depósitos de hidratos podrían almacenar gas metano del orden de 22 TCM.



*Figura 18. Segmento de una línea sísmica donde se observa un BSR. Tomado de López & Ojeda (2006).*

## 5 Metodología

El presente proyecto se desarrolló en cinco fases descritas a continuación:

### 5.1 Fase 1. Recopilación bibliográfica:

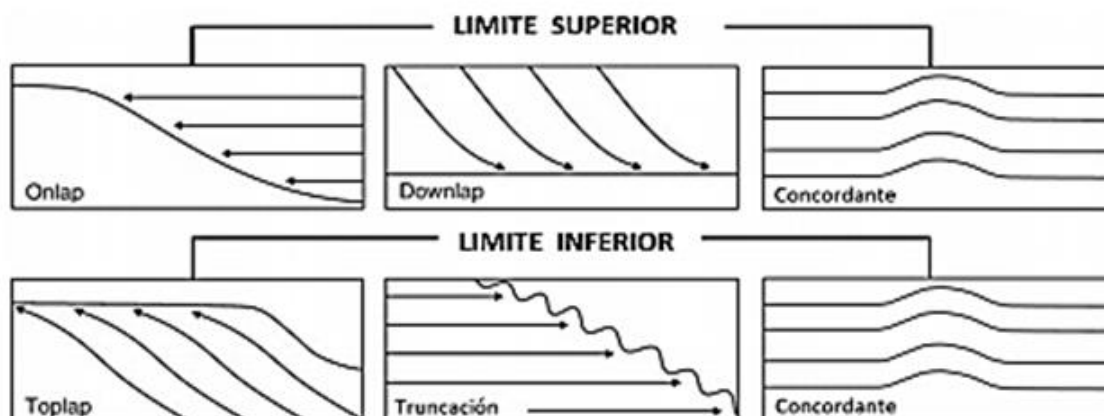
Comprende la compilación y el análisis de información bibliográfica previa referente a trabajos de secciones balanceadas, estratigrafía sísmica y análisis estructurales y tectónicos de la margen noroccidental de Suramérica y el Caribe.

### 5.2 Fase 2. Interpretación:

Interpretación de los horizontes y de las estructuras geológicas que se encuentran en la línea sísmica 2D SPAN-3800 (Tabla 1), tales como fallas, discontinuidades, *onlaps*, *downlaps*, *toplaps* y truncaciones erosivas (Fig. 19). Esta interpretación se realizó en el software de uso libre OpendTect V. 6.4.5 y Move.

**Tabla 1.** Dimensiones del survey de la línea sísmica que se interpretará en el presente trabajo.

	Distancia (m)	Profundidad (m)
SPAN-3800	191.366,7	21.463,3



**Figura 19.** Terminaciones de reflexiones sísmicas al tope y la base de una secuencia. Tomado de Mojica (2019), modificado previamente de Sangree & Windmier (1979).

### 5.3 Fase 3. Análisis:

A partir de la interpretación de la sección sísmica se procede a establecer las principales secuencias sísmicas presentes en el área de estudio por medio del análisis de sus atributos sísmicos como amplitud, frecuencia y continuidad. Finalmente, se identifican e interpretan los estilos estructurales en línea sísmica.

#### 5.3.1 *Facies sísmicas*

El análisis de facies sísmicas examina las reflexiones dentro de las secuencias identificadas, dado que pueden ayudar en la interpretación regional de la litología, el ambiente de sedimentación y la paleobatimetría (Mitchum, 1977).

Los parámetros sísmicos más útiles para distinguir una secuencia de otra son:

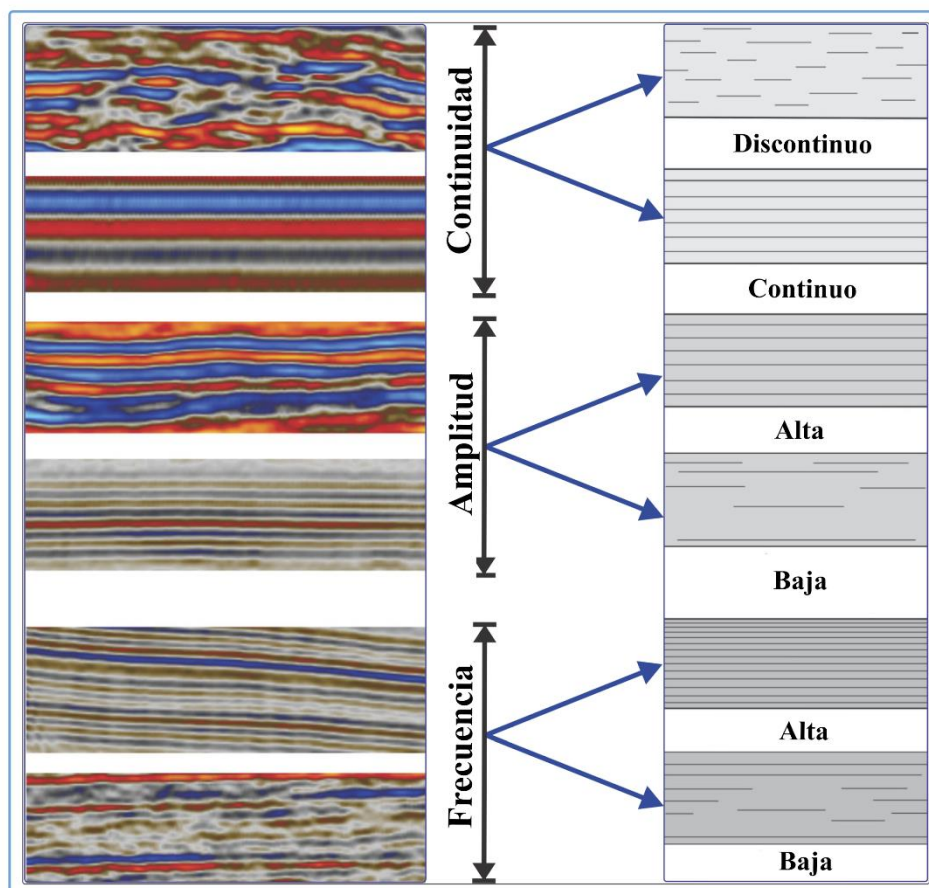
1. Las terminaciones de la reflexión con respecto a las superficies discordantes que limitan las secuencias (e.g. *onlap*, *downlap*, truncación erosional, *toplap*, entre otros), las cuales pueden ser asociadas a eventos geológicos (Mitchum, 1977) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Significado geológico de las terminaciones sísmicas. Tomado de Mojica (2019).

Terminación	Significado geológico
<i>Onlap</i>	Agradación
	Transgresión
<i>Downlap</i>	Progradación
<i>Toplap</i>	Erosión
	Tectónica

<b>Truncación</b>	Hiato sedimentario
	Progradación deltaica

2. Forma interna de las reflexiones sísmicas definida a partir de las características de los reflectores: continuidad, amplitud y frecuencia; las cuales pueden ser asociadas con determinados rasgos geológicos que permiten diferenciar una unidad de las unidades adyacentes y la historia de depositación (Fig. 20) (Tabla 3) (Miller et al., 1990).



**Figura 20.** Configuración de las características de las reflexiones sísmicas. Modificado de Al-Masgari et al. (2021).

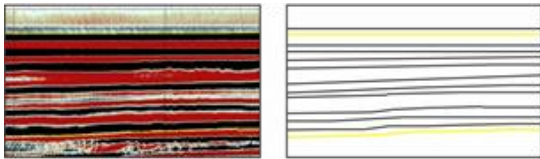
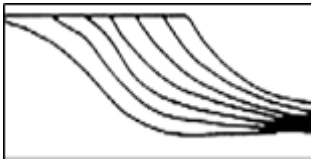
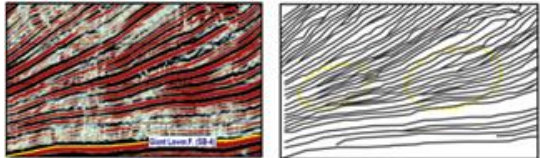

**Tabla 3.** Interpretación geológica de las características de una reflexión sísmica. Modificado de Miller et al. (1990).

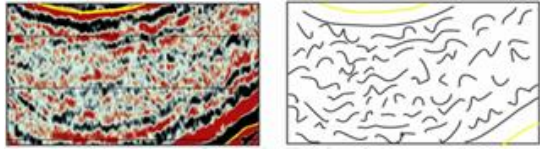
<b>Parámetros</b>	<b>Descripción</b>
Amplitud	Ilumina el contraste en densidad y la velocidad de transmisión de ondas acústicas a través de diferentes litologías y ayuda a explicar las variaciones horizontales dentro de las secuencias
Frecuencia	Es la distancia entre reflectores, dependiendo de las variaciones de distancia entre estratos (espesor de la capa), así como de las alteraciones laterales en la velocidad de las ondas acústicas por diferencias en la litología
Continuidad	Está típicamente relacionada con la expansión lateral de estratos uniformes

3. La configuración interna de la reflexión, la cual implica seleccionar y determinar la naturaleza y orientación de las reflexiones dentro de cada secuencia y los patrones de estratos internos. Este análisis es fundamental para determinar la secuencia de sedimentos por la diversidad en los patrones sísmicos que generalmente se pueden mostrar en las secciones sísmicas (Al-Masgari et al., 2021).

Se reconocen las siguientes configuraciones internas de una reflexión. Cada una de ellas se interpreta en términos del ambiente deposicional y distribución de litofacies (Tabla 4).

**Tabla 4.** Facies sísmicas con sus respectivas interpretaciones geológicas y representación sísmica. Modificado de Mojica (2019), previamente modificado de (Sangree & Widmier, 1977) e imágenes sísmicas tomadas de (Al-Masgari et al., 2021).

Configuración de la reflexión	Interpretación geológica	Representación
<b>Paralelo</b>	Deposición en un ambiente amplio y uniforme	
	Sedimentación constante, acomodación constante	
<b>Oblicuo</b>	Progradación desde los márgenes de la cuenca	
	Acreción lateral hasta formar pendientes suaves.	
<b>Divergente</b>	Engrosamiento hacia la cuenca	
	Variación lateral de las tasas de sedimentación	
	Basculamiento sin-depositacional de la cuenca	
<b>Sigmoidal (clinoformas)</b>	Propagación desde los márgenes de la cuenca	
	Acreción lateral hasta formar pendientes suaves	

	Tasa de aporte importante	
<b>Caótico</b>	Sin estructura	
	Deformación sin-sedimentaria	
	Deposición en ambientes de alta energía	

#### 5.4 Fase 4. Correlación y evolución

A partir de evidencias encontradas en la bibliografía recopilada se realizará una correlación cronoestratigráfica de las secuencias tectonoestratigráficas interpretadas con las formaciones definidas para las cuencas Guajira *Offshore* y Colombia, con el fin de darle una temporalidad a la depositación de las secuencias y a los eventos estructurales, y así proponer una evolución tectónica de la línea sísmica SPAN-3800.

## 6 Resultados

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de la interpretación de la estratigrafía sísmica y el análisis estructural de la línea sísmica SPAN-3800.

### 6.1 Estratigrafía sísmica

La metodología adoptada de este estudio llevó a cabo la interpretación de la reflexión sísmica interna y externa utilizando los conceptos estratigráficos sísmicos. Los procedimientos involucraron análisis de facies sísmicas basadas en las características internas, las configuraciones y las terminaciones de la reflexión, con el fin de identificar secuencias sísmicas o paquetes de

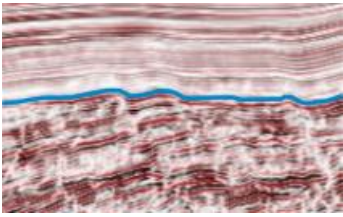
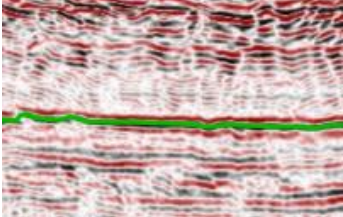
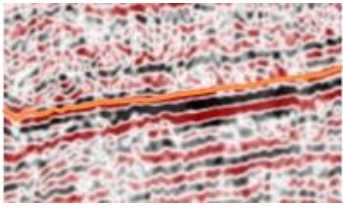
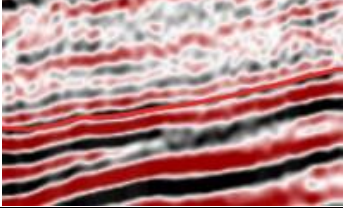
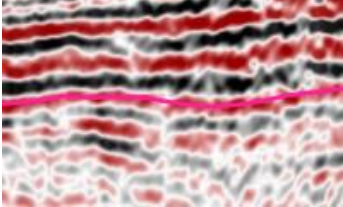
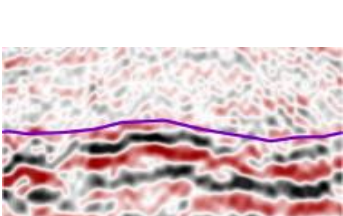
reflectores consistentes delimitados por discordancias. Se denominan informalmente "secuencias" en los siguientes resultados, pero no cumplen los requisitos de una secuencia formal definida por Mitchum (1977) como "una sucesión relativamente conforme de estratos genéticamente relacionados delimitados por discordancias o sus conformidades correlativas" y posiblemente tampoco corresponden a ciclos estratigráficos completos de cambio en las tendencias deposicionales (Catuneanu, 2002) debido a la falta de información de pozo.

### **6.1.1 Interpretación de horizontes**

La interpretación de reflectores y facies sísmicas se realizó de manera independiente en ambas cuencas, Guajira *Offshore* y Colombia, debido al carácter lateral del ambiente tectónico. Los reflectores fueron seleccionados debido a que permiten separar una secuencia sísmica de otra, es decir, paquetes sísmicos con atributos similares (continuidad, amplitud, frecuencia) y diferenciables de los paquetes adyacentes.

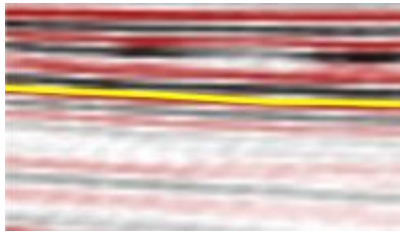
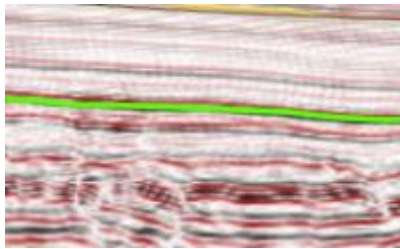
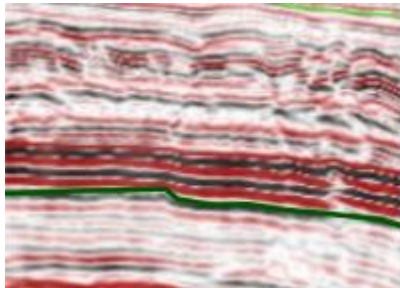
En la cuenca Guajira *Offshore* se interpretaron seis reflectores de alta amplitud, que siguiendo el principio de superposición de estratos se nombraron del más antiguo al más reciente como HC-1, HC-2, HC-3, HC-4, HC-5 y HC-6 (Tabla 5; Fig. 21a).

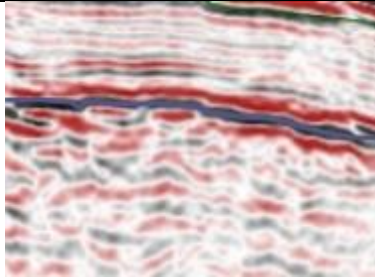
*Tabla 5 Descripción de criterios de selección mediante los cuales fueron elegidos los horizontes de la cuenca Guajira Offshore (Fig. 21a).*

Horizonte	Criterio de selección	Imagen
<b>HC-6</b>	Reflector continuo considerado como una discordancia regional, que separa reflectores continuos, paralelos con baja amplitud y alta frecuencia, de reflectores discontinuos, paralelos con alta amplitud y con algunas zonas de baja frecuencia	
<b>HC-5</b>	Reflector considerado como una discordancia regional, que divide reflectores continuos, paralelos con alta amplitud y frecuencia, de reflectores discontinuos, caóticos con amplitud baja y baja frecuencia	
<b>HC-4</b>	Reflector discontinuo, amplitud alta; separa reflectores de alta amplitud de reflectores caoticos.	
<b>HC-3</b>	Reflector discontinuo de alta amplitud que corresponde a una discordancia regional, que separa reflectores caóticos de reflectores continuos de alta amplitud	
<b>HC-2</b>	Reflector continuo de alta amplitud que corresponde a una discordancia; separa reflectores de alta amplitud y frecuencia de reflectores caóticos y de amplitud y frecuencia baja.	
<b>HC-1</b>	Reflector discontinuo en el cual se reconocen zonas de alta y baja amplitud a lo largo de la sísmica, que separa reflectores de alta amplitud, de reflectores de baja amplitud	

Para la cuenca Colombia se interpretaron cuatro reflectores de alta amplitud, los cuales se nombran del más antiguo al reciente como HO-1, HO-2, HO-3 y HO-4. En la Tabla 6 se compila los atributos sísmicos de los reflectores y en la Figura 21b se ilustra su interpretación.

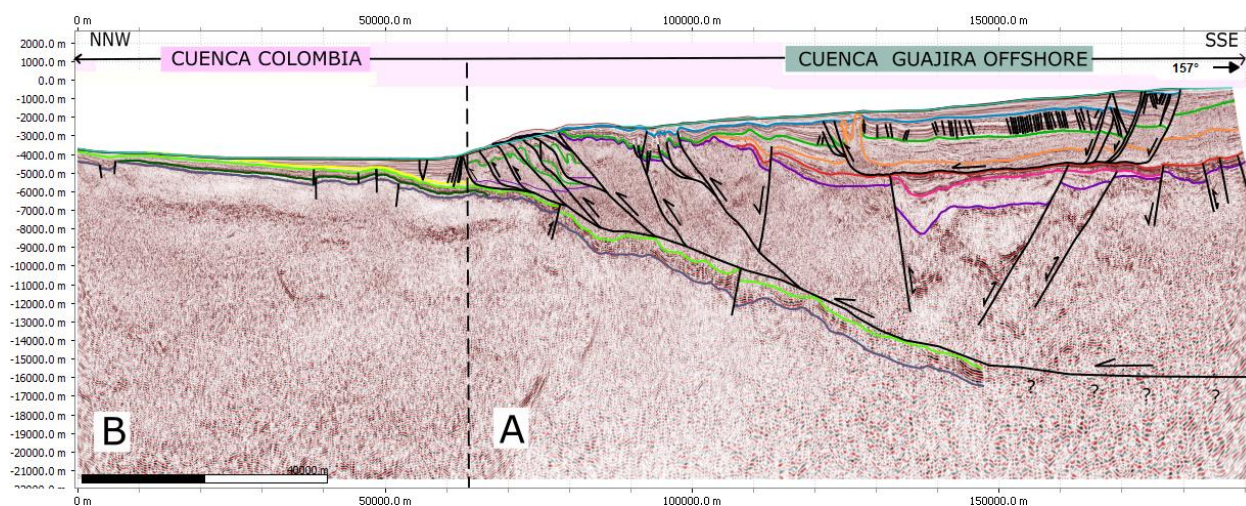
**Tabla 6.** Descripción de criterios de selección mediante los cuales fueron elegidos los horizontes de la cuenca Colombia (Fig. 21b).

<b>Horizonte</b>	<b>Criterio de selección</b>	<b>Imagen</b>
<p style="text-align: center;"><b>HO-4</b> (Amarillo)</p>	<p>Reflector continuo considerado como una discordancia local, que separa reflectores continuos, paralelos con alta amplitud y frecuencia, de reflectores con baja amplitud y alta frecuencia</p>	
<p style="text-align: center;"><b>HO-3</b> (Verde)</p>	<p>Reflector discontinuo considerado como una discordancia regional, que divide reflectores continuos, paralelos con baja amplitud y alta frecuencia, de reflectores discontinuos, paralelos con alta amplitud y baja frecuencia</p>	
<p style="text-align: center;"><b>HO-2</b> (Verde Oscuro)</p>	<p>Reflector continuo de alta amplitud que corresponde a una discordancia regional, que separa reflectores paralelos de alta amplitud de reflectores de baja amplitud</p>	

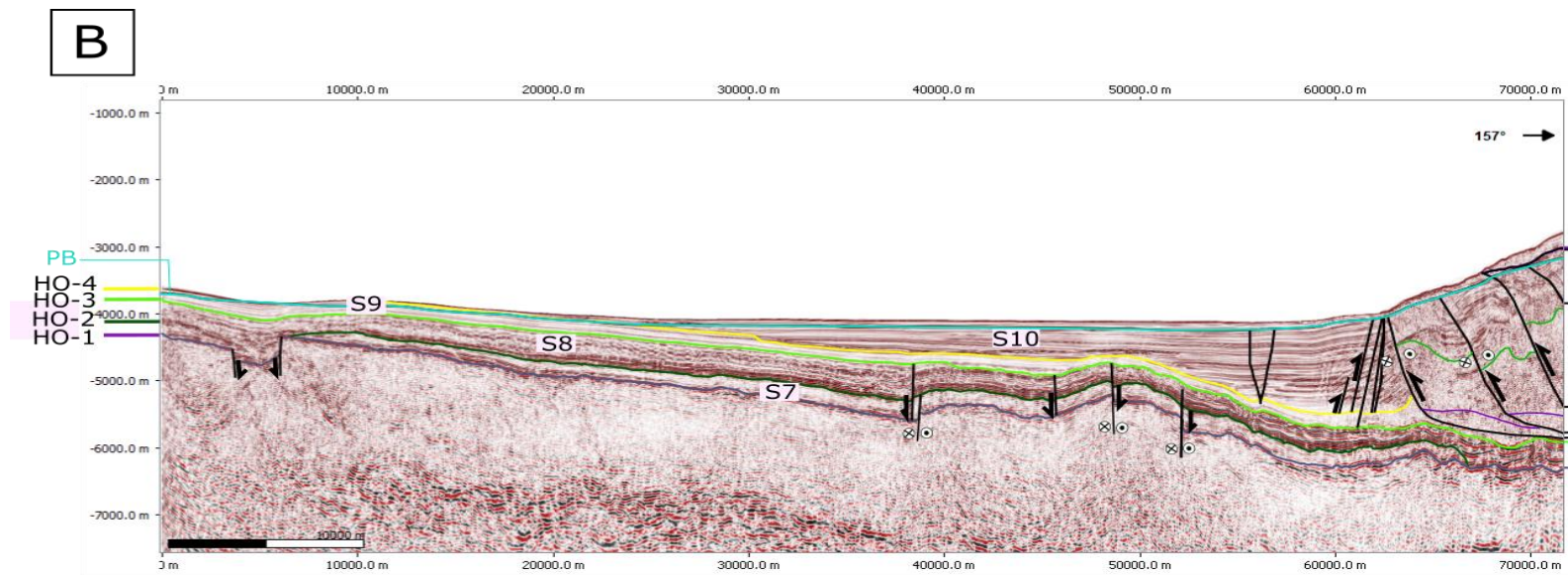
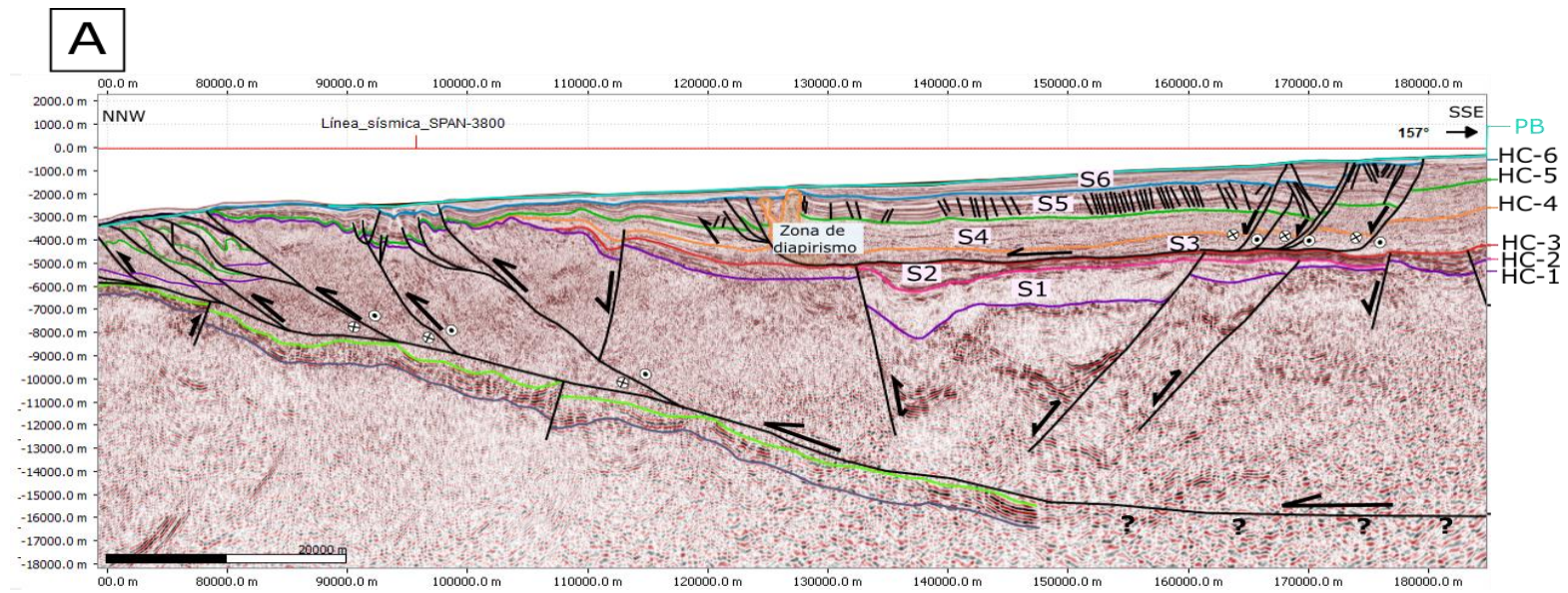
<p><b>HO-1</b> <b>(Gris)</b></p>	<p>Reflector continuo de alta amplitud a lo largo de la sísmica, que separa reflectores paralelos que presentan baja a alta amplitud, de reflectores caóticos de baja amplitud</p>	
--------------------------------------	--	---

### 6.1.2 *Secuencias tectonoestratigráficas*

La interpretación de los horizontes en los perfiles sísmicos permitió definir las unidades tectonoestratigráficas S1, S2, S3, S4, S5 y S6 para la cuenca Guajira *Offshore* (Fig. 21a) y S7, S8, S9, S10 para la cuenca Colombia (Fig. 21b).



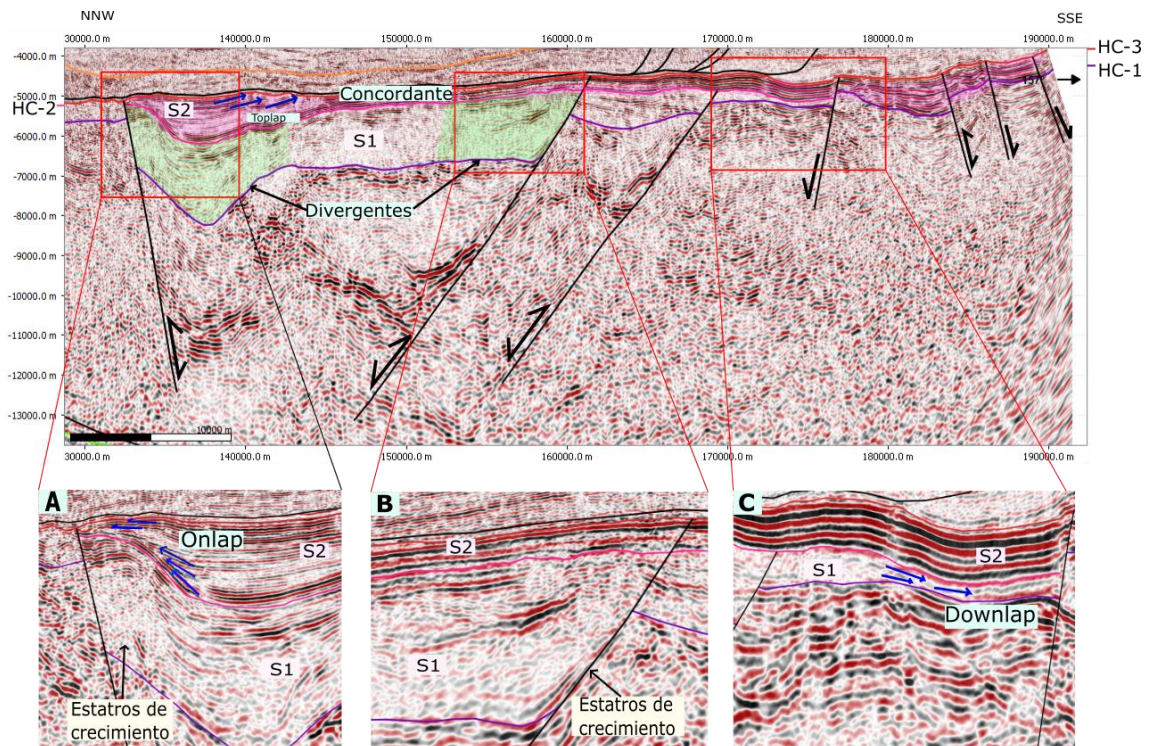
**Figura 21** A) Sección Cuenca Guajira Offshore y B) Sección cuenca Colombia. Las secciones sísmicas se encuentran en profundidad (m) y con una exageración vertical de 3.5. En estas secciones se muestran los horizontes de forma ascendente del más profundo HC-1 para A y HO-1 para B, hasta el perfil batimétrico (color cian); a partir de estos horizontes se definieron las secuencias tectonoestratigráficas 1, 2, 3, 4, 6 y 6 para cuenca Guajira Offshore y 7, 8, 9 y 10 para la cuenca Colombia.



**6.1.2.1 Basamento Acústico.** El tope del basamento acústico en la parte de la Cuenca Guajira está representado por el HC-1 y para la cuenca Colombia está delimitado por el HO-1. La configuración sísmica del basamento se caracteriza por presentar reflectores caóticos, discontinuos, de amplitud y frecuencia baja.

**6.1.2.2 Secuencias tectonoestratigráficas de la cuenca Guajira Offshore.**

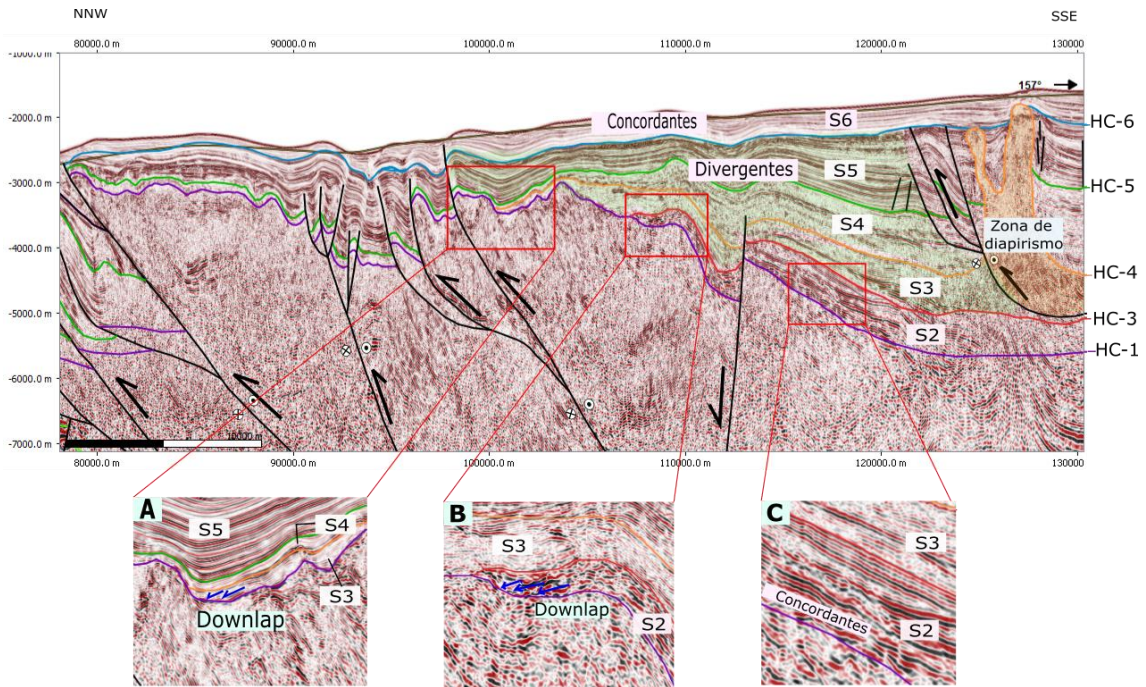
**6.1.2.3 Secuencia 1.** Corresponde a la secuencia más antigua interpretada en este proyecto; esta secuencia fue acumulada sobre el basamento. Está limitada en la base por el horizonte HC-1 y en el tope por el horizonte HC-2. Presenta un espesor muy variable, desde 260 m en dirección a la península de la Guajira donde se pincha la secuencia (Fig. 22c), hasta 2000 m en la depresión de Chimare.



**Figura 22** Representación de la facies sísmica de la secuencia S1 ubicadas en la depresión Chimare y la terminación en *onlap* de la secuencia S2. Exageración vertical de 3.5.

Teniendo en cuenta la clasificación e interpretación de facies sísmicas se identificó una facies con reflectores principalmente caóticos, discontinuos de baja amplitud y frecuencia, que presentan una configuración divergente, interpretados como estratos de crecimiento en la secuencia, disminuyendo el espesor de los reflectores hacia las fallas normales del basamento acústico como se observa en la Figura 22b.

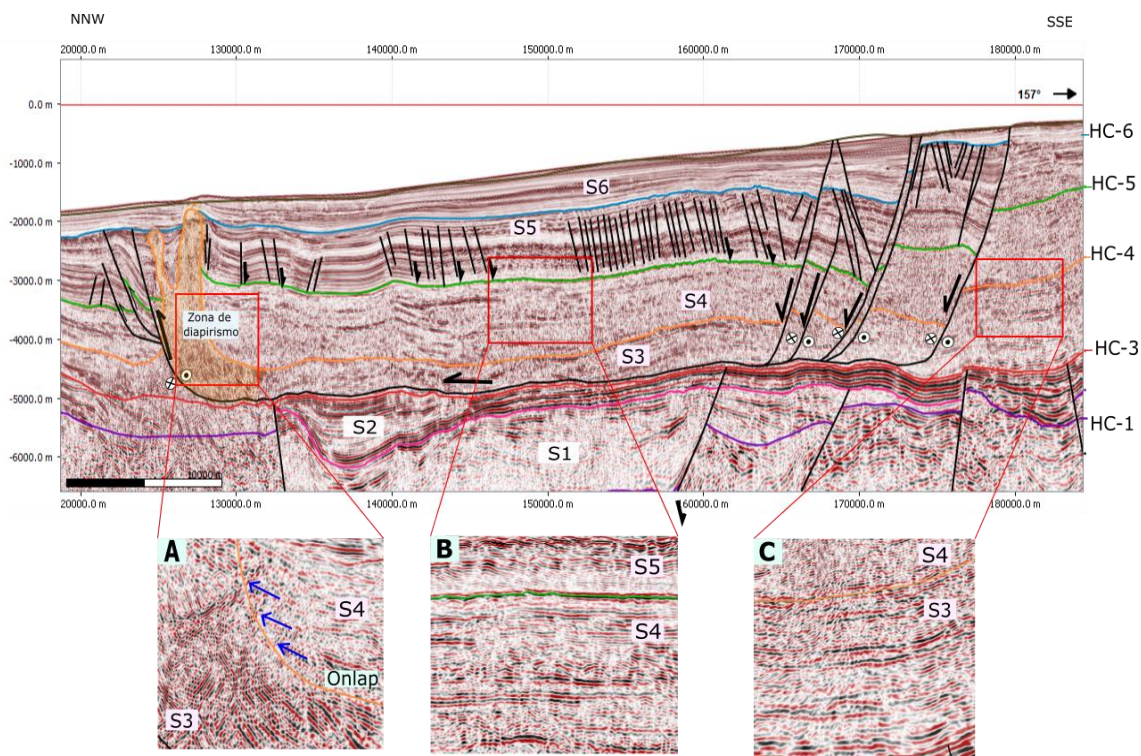
**6.1.2.3.1 Secuencia 2.** Esta secuencia se localiza en la depresión Chimare, presentando su mayor espesor de 1200 m a lo largo de esta depresión y su menor espesor de 240 m hacia el sector del prisma de acreción, donde esta se pincha con un alto de basamento formando estructuras en *onlap* y *downlap* (Fig. 23b). Esta secuencia en la mayor parte de la línea se encuentra suprayaciendo la secuencia S1, pero debido a que esta se pincha en dirección sureste (Fig. 22c), se sigue acumulando la secuencia S2 discordantemente sobre el basamento. En esta secuencia se identificó una facies que se caracteriza por tener reflectores paralelos, continuos, de amplitud y frecuencia alta (Fig. 23c), presenta terminación de los reflectores en *onlap* hacia el noroeste debido a una falla normal del basamento acústico, donde también se observa terminaciones en *toplap* hacia el horizonte HC-3 que representa una discordancia regional en la línea (Fig. 22b).



**Figura 23.** Representación de la facies sísmica de la secuencia S2 localizada desde la zona de diapirismo hasta el prisma de acreción y la truncación de la secuencia S3. Exageración vertical de 3.5.

### Secuencia 3.

Esta secuencia suprayace la secuencia S2 y está limitada por los horizontes HC-3 y HC-4 a la base y tope respectivamente. A partir de la interpretación en la línea, se puede decir que esta secuencia presenta un espesor que varía desde 108 m donde se pincha con un alto de basamento en dirección al prisma de acreción, formando estructuras en downlap (Fig. 23a), hasta 1550 m en el sector más suroeste de la línea sísmica hacia la península de la Guajira (Fig. 24).



**Figura 24.** Representación de la facies sísmica de la secuencia S3 localizada desde la zona de diapirismo hasta la parte más sureste de la línea sísmica. Exageración vertical de 3.5.

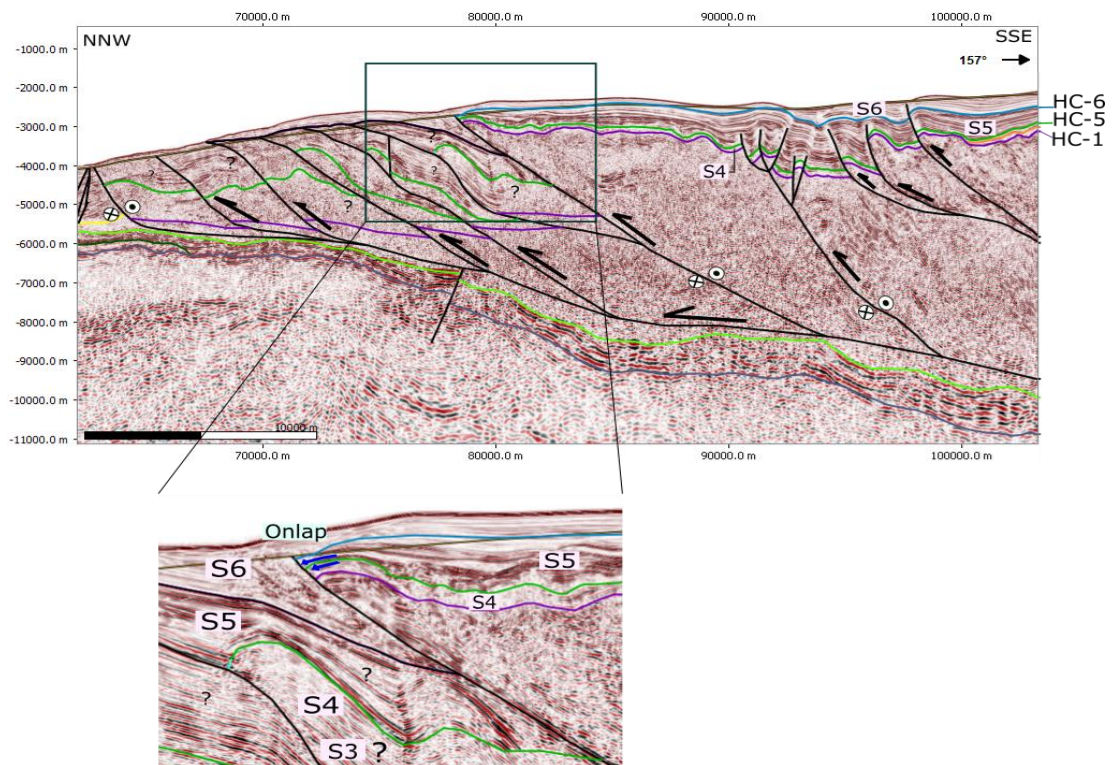
A lo largo del perfil sísmico se reconoció principalmente una facies sísmica en esta secuencia en la que se observa reflectores paralelos discontinuos, de amplitud y frecuencia baja, y algunos reflectores de alta amplitud muy discontinuos (Fig. 24b). En dirección al prisma de acreción se aprecia una configuración divergente de la secuencia, lo que representa que son estratos de crecimiento (Fig. 23) y en la zona de diapirismo los reflectores tienden a ser más caóticos y discontinuos (Fig. 24a). Según la interpretación realizada, se puede decir que posiblemente esta secuencia sea la fuente de la zona de diapirismo localizada en la parte posterior del prisma de acreción. A partir de la Figura 24 se observó que la formación del diapirismo se dio posterior a la acumulación de las secuencias S4, S5 y S6, interpretado por las terminaciones de los reflectores en onlap contra los diapiros, y la deformación de la

secuencia S6. El ascenso de estos diapiros se pudo haber favorecido debido a las fallas de cabalgamiento preexistentes en esta zona.

#### 6.1.2.3.2 Secuencia 4.

Esta secuencia se encuentra delimitada por los reflectores HC-4 y HC-5 hacia la base y tope respectivamente, presentando un mayor de espesor de 1350 m en dirección a la península de Guajira y un menor espesor de 126 m en dirección noroeste, donde se trunca con una falla de cabalgamiento del prisma de acreción (Fig. 25). En esta secuencia se observó una facies sísmica con reflectores caóticos, discontinuos, de amplitud y frecuencia baja y en algunos sectores se presentan reflectores con alta amplitud discontinuos (Fig. 24b); también se observaron terminaciones de los reflectores en *onlap* hacia la zona de diapirismo.

Esta secuencia posiblemente esta deformada en los pliegues generados por las fallas de cabalgamiento en el prisma de acreción, debido a la similitud en los atributos sísmicos de los reflectores (Fig. 25).



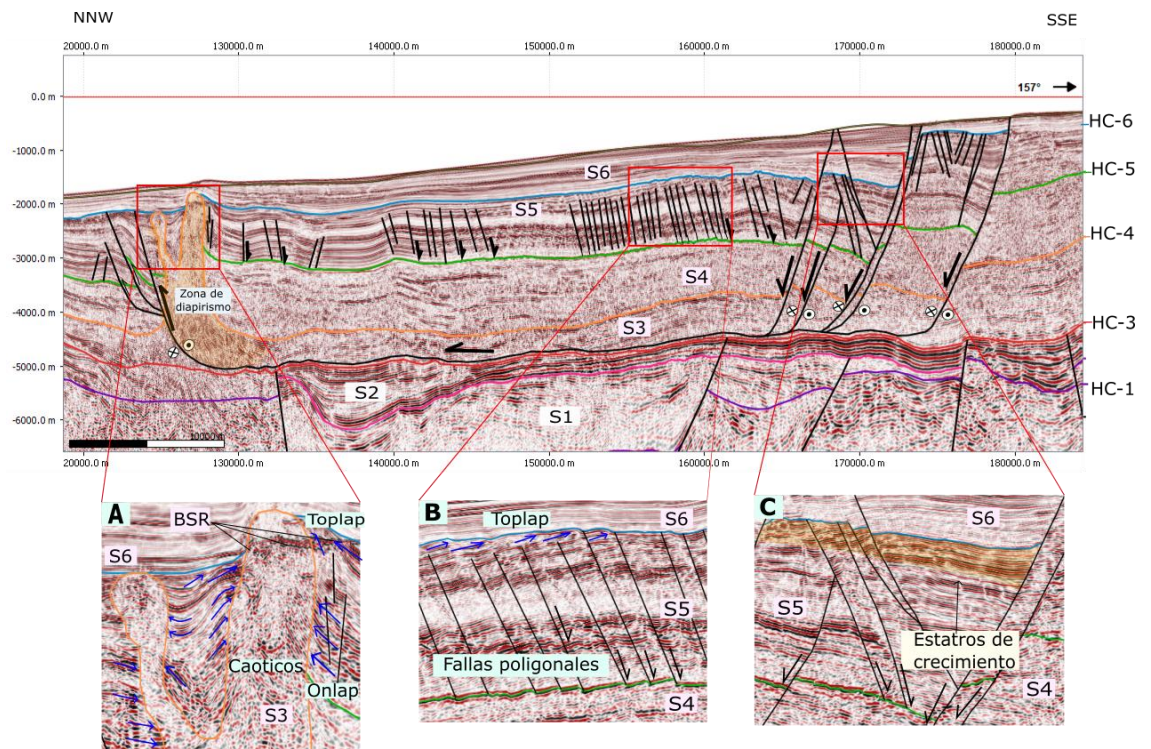
**Figura 25.** Truncación de la secuencia S4 hacia las fallas de cabalgamiento del prisma de acreción. Exageración vertical de 3.5.

#### 6.1.2.3.3 Secuencia 5.

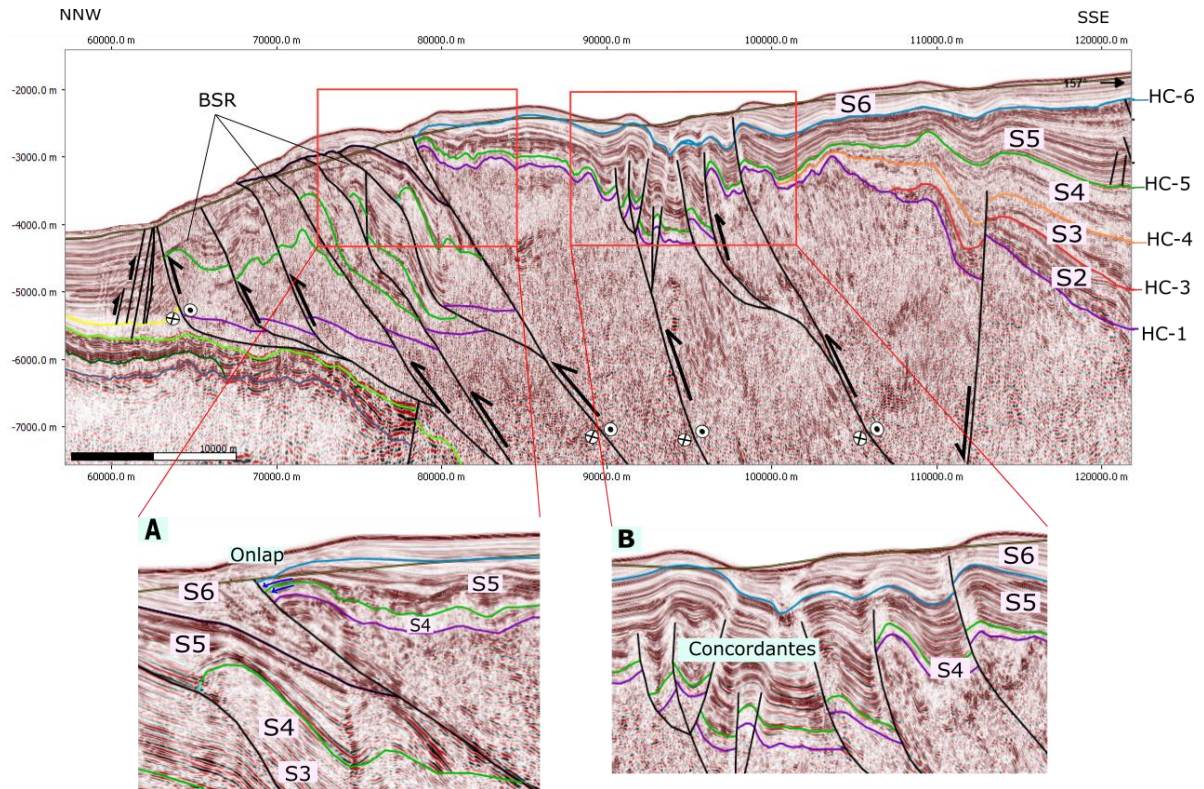
La secuencia S5 se encuentra delimitada por los horizontes HC-5 en la base y HC-6 en el tope. En esta secuencia el espesor varía entre 300 m y 2500 m. Similar a las secuencias anteriores, el mayor espesor se presenta hacia el sureste cerca de la península de la Guajira (Fig. 26), mientras que el menor espesor se encuentra en la parte superior del prisma de acreción, en donde los reflectores terminan truncados contra las fallas de cabalgamiento como se observa en la Figura 27a. Al igual que la S4, esta secuencia posiblemente se encuentra deformada por los pliegues generados por fallas de cabalgamiento en el prisma de acreción (Fig. 27a).

Las facies sísmicas de esta secuencia se caracterizan principalmente por reflectores concordantes, discontinuos, paralelos, con alta frecuencia y presenta “intercalaciones” en la amplitud que van de alta a baja, que permite diferenciar la secuencia de las unidades infrayacentes (Fig. 26b, 27b). En la zona de diapirismo se observa que los reflectores presentan terminaciones en *onlap* hacia los diapiros (Fig. 26a) y en *toplap* hacia el horizonte HC-6 (Fig. 26b); en las fallas extensionales con componente de rumbo dextral que se encuentran hacia el sureste de la línea sísmica, se observa en la parte superior de la secuencia una configuración divergente, (Fig. 26c) lo que se interpreta como estratos de crecimiento, al igual que en dirección al prisma de acreción (Fig. 23). En los pliegues generados por las fallas de cabalgamientos en esta secuencia se observó un reflector continuo que no era afectado por la deformación y se interpretó como

un BSR (Fig. 27). Finalmente, esta secuencia se caracteriza por la presencia de fallas poligonales como se observa en la Figura 26b.



**Figura 26.** Representación de la facies sísmica de la secuencia S5 localizada desde la zona de diapirismo hasta la parte más sureste de la línea sísmica. Exageración vertical de 3.5.



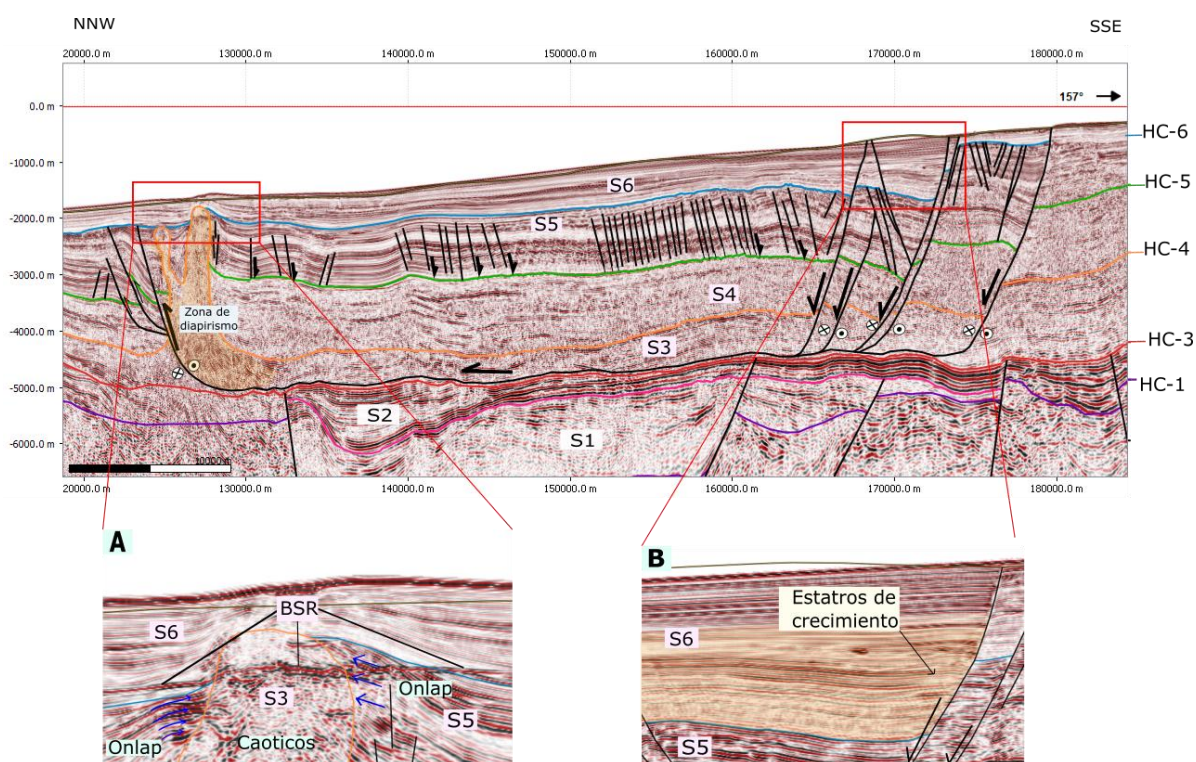
**Figura 27.** Representación de las facies sísmicas de la secuencia S5 ubicadas en el prisma de acreción. Exageración vertical de 3.5.

#### 6.1.2.3.4 Secuencia 6.

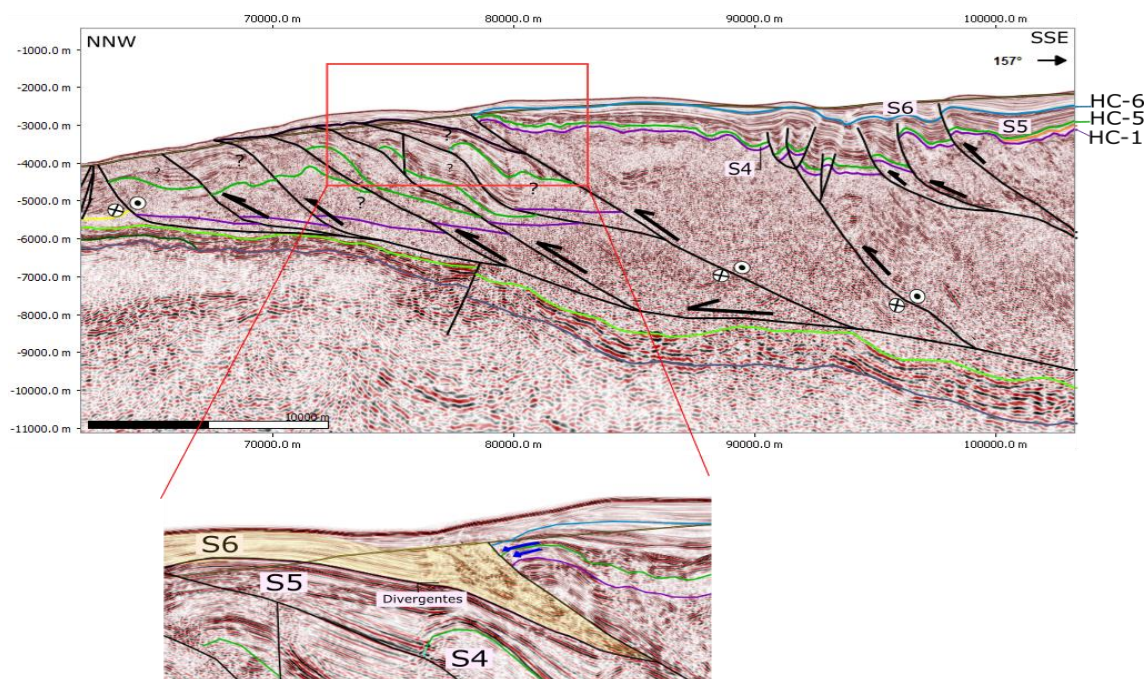
Esta corresponde a la secuencia más somera de la cuenca Guajira *Offshore*, limitada en la base por el horizonte HC-6 asociado a una discordancia erosional regional, y al tope por el perfil batimétrico. El espesor de esta secuencia varía desde 150 m hasta 1200 m.

La facie sísmica interpretada de esta unidad presenta una configuración de los reflectores concordantes, continuos, paralelos que lo diferencia de la secuencia S5 y se caracterizan por tener alta frecuencia y una amplitud que varía desde alta en la zona de diapirismo hasta el sureste del perfil sísmico (Fig. 28), y baja en el prisma de acreción (Figura 29). Al igual que en la secuencia S5, se observó en la

zona del diapirismo un reflector continuo de alta amplitud que no era tan afectado por la deformación y se interpretó como un BSR (Fig. 28a), también se evidenciaron estratos de crecimiento hacia las fallas extensionales con componente de rumbo lateral derecho que se ubican al sureste de cuenca Guajira Offshore (Fig. 28b); y hacia el prisma el prisma de acreción presenta una configuración divergente (Fig. 29).



**Figura 28.** Representación de la facies sísmica de la secuencia S6 localizada desde la zona de diapirismo hasta la parte más sureste de la línea sísmica. Exageración vertical de 3.5.

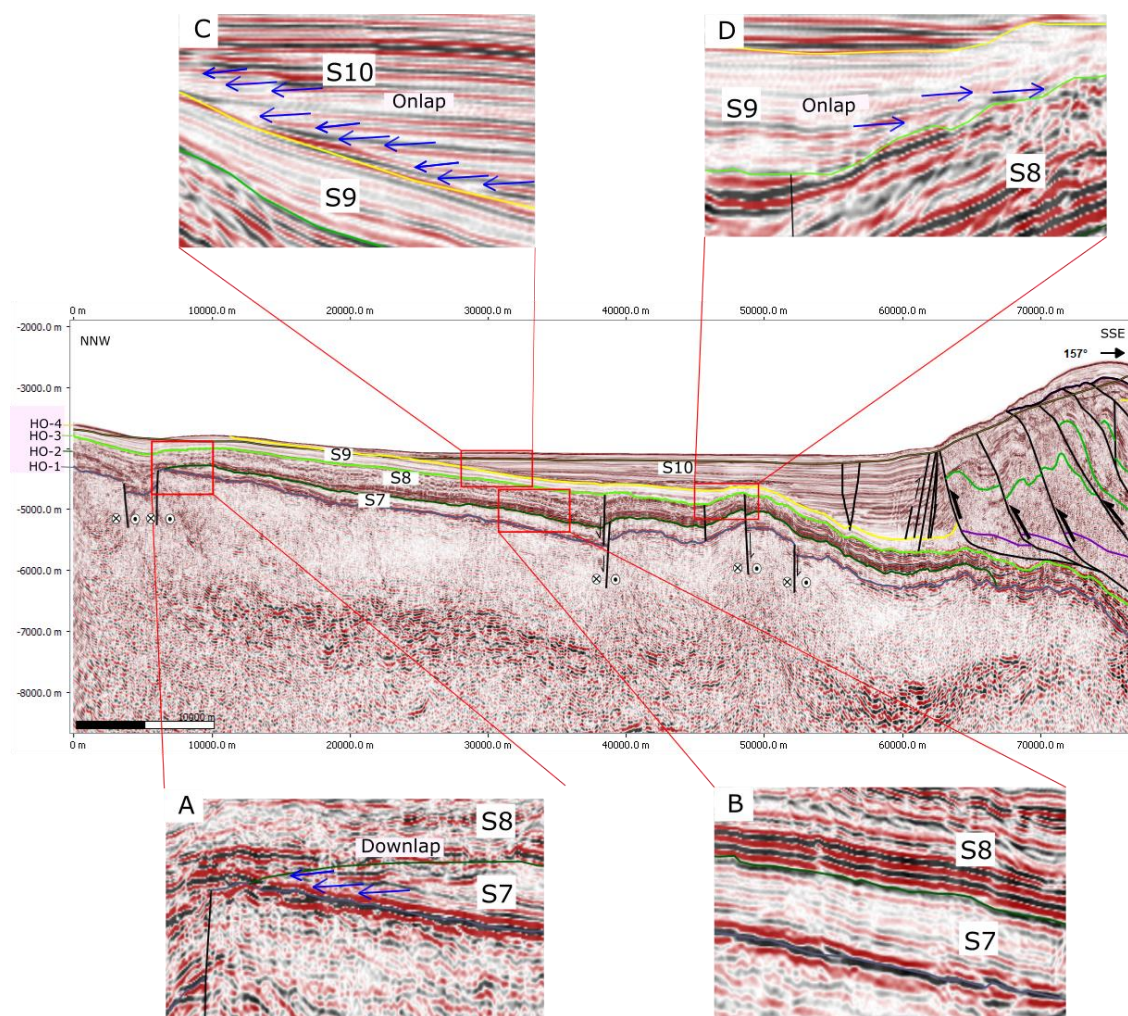


**Figura 29.** Representación de las facies sísmicas de la secuencia S6 ubicadas en el prisma de acreción. Exageración vertical de 3.5.

#### 6.1.2.4 Secuencias tectonoestratigráficas de la cuenca Colombia.

**6.1.2.4.1 Secuencia 7.** Esta secuencia suprayace el basamento acústico oceánico, está limitado por los horizontes HO-1 y HO-2, a la base y techo respectivamente. El espesor de esta unidad varía desde 170 m hacia el noroeste de la línea sísmica donde presenta una terminación de los reflectores en *downlap* contra el basamento (Fig. 30a), hasta un espesor de 380 m hacia el frente del prisma de acreción.

En esta unidad se observa una secuencia sísmica con reflectores discontinuos, en algunos sectores caóticos y en otros paralelos, de amplitud y frecuencia baja (Figura 30b).



**Figura 30.** Representación de las facies sísmicas de las secuencias 7, 8, 9 y 10 ubicadas desde el prisma de acreción hasta la parte más noroeste de la línea sísmica. Exageración vertical de 4.5.

**6.1.2.4.2 Secuencia 8.** Esta secuencia se encuentra delimitada por los horizontes HO-2 a la base y HO-3 al tope. Tiene un espesor variable, el menor (260 m) se presenta en los altos de basamento generados por fallas normales con componentes de rumbo (Fig. 34b); y el mayor espesor (770 m) de esta unidad se encuentra en graben localizado al noroeste del perfil sísmico (34a).

Los reflectores de esta unidad son discontinuos, paralelos, de baja frecuencia y alta amplitud (Fig. 30b, d).

**6.1.2.4.3 Secuencia 9.** Está delimitada por los horizontes HO-3 en la base y HO-4 en el tope. El espesor de esta unidad varía entre 220 m en los altos del basamento, donde se observan terminaciones de los reflectores en *onlap* contra la secuencia 8 (Fig. 30d) y 340 m en el espacio de acomodación generado por el graben al noroeste del perfil sísmico (Fig. 34a).

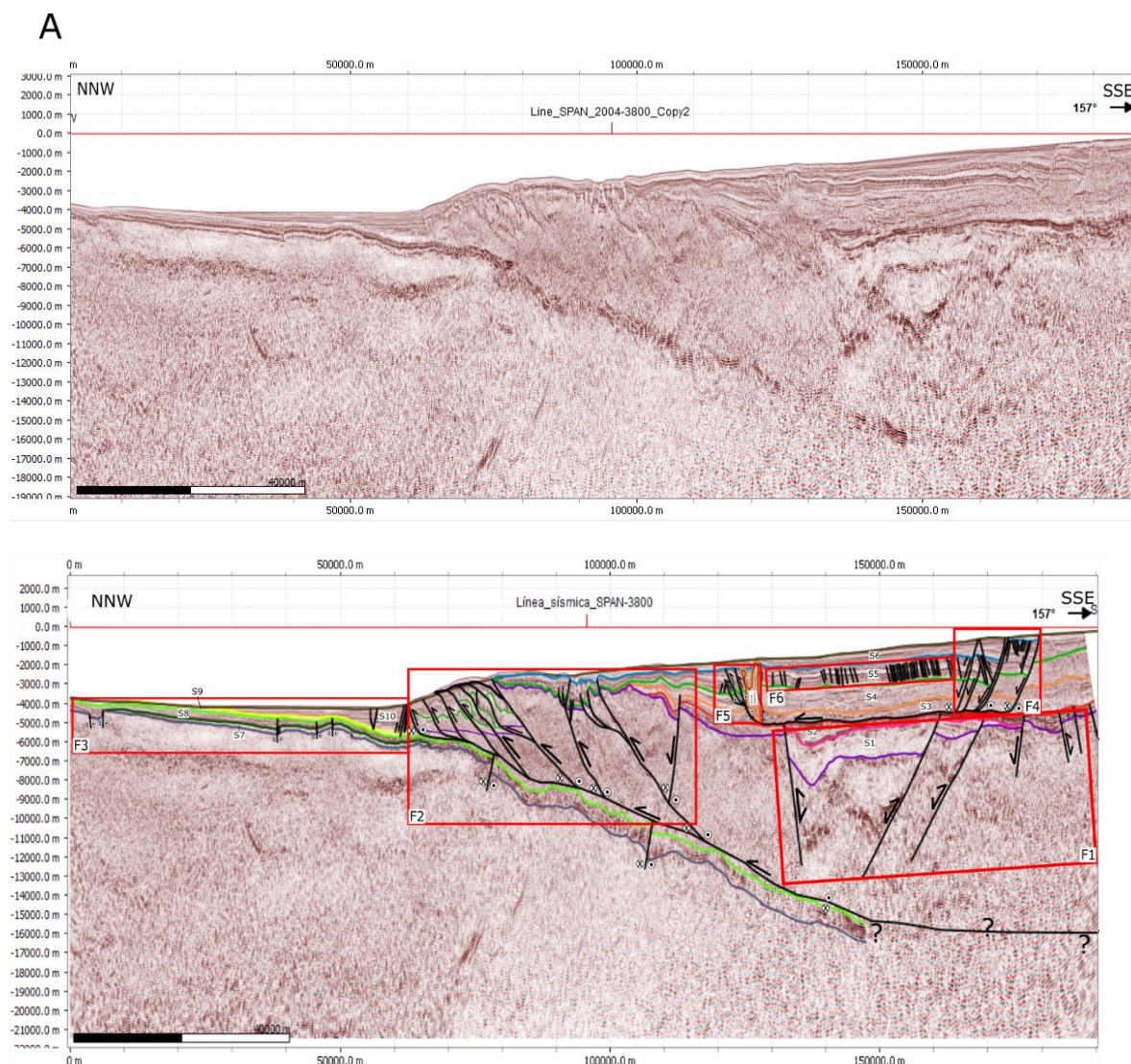
Se identificó una facies sísmica con reflectores concordantes, continuos, paralelos de amplitud baja y alta frecuencia (Fig. 30c, 30d).

**6.1.2.4.4 Secuencia 10.** Esta secuencia corresponde a la unidad más somera de la cuenca Colombia, se encuentra delimitada por el horizonte HO-4 y el perfil batimétrico, en la base y tope respectivamente. El menor espesor de la unidad (80 m) se localiza al noroeste de la línea sísmica debido a que la secuencia se trunca contra la secuencia 9 identificado por las terminaciones en *onlap* de los reflectores (Fig. 30c); y el mayor espesor (1450 m) se da en el espacio de acomodación generado por la convergencia de las placas, en el frente del prisma de acreción.

Los reflectores presentan una configuración concordante, paralelos, continuos, con alta frecuencia y amplitud variable (Fig. 30c, 30d).

## **6.2 Análisis estructural**

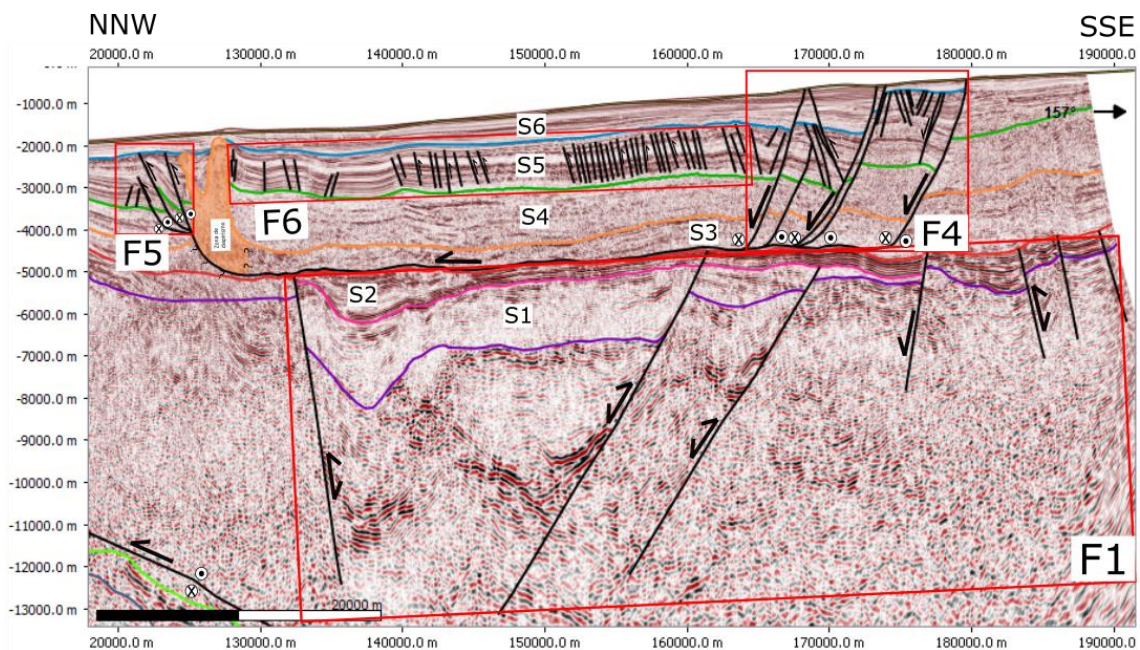
Este análisis se realizó a partir de la discontinuidad de los reflectores sísmicos y el desplazamiento observado de las secuencias previamente descritas. Se reconocieron seis familias de fallas principales (Fig. 31); las cuales según la interpretación realizada y estudios anteriores (Vence, 2008), el orden cronológico de las familias de fallas es F1, F2, F3, F4, F5 y F6.



**Figura 31** A) Línea sísmica SPAN-3800 sin interpretación. B) División de las familias de fallas F1, F2, F3, F4, F5 y F6 reconocidas. Exageración vertical de 3.5.

### 6.2.1 Familia de fallas F1

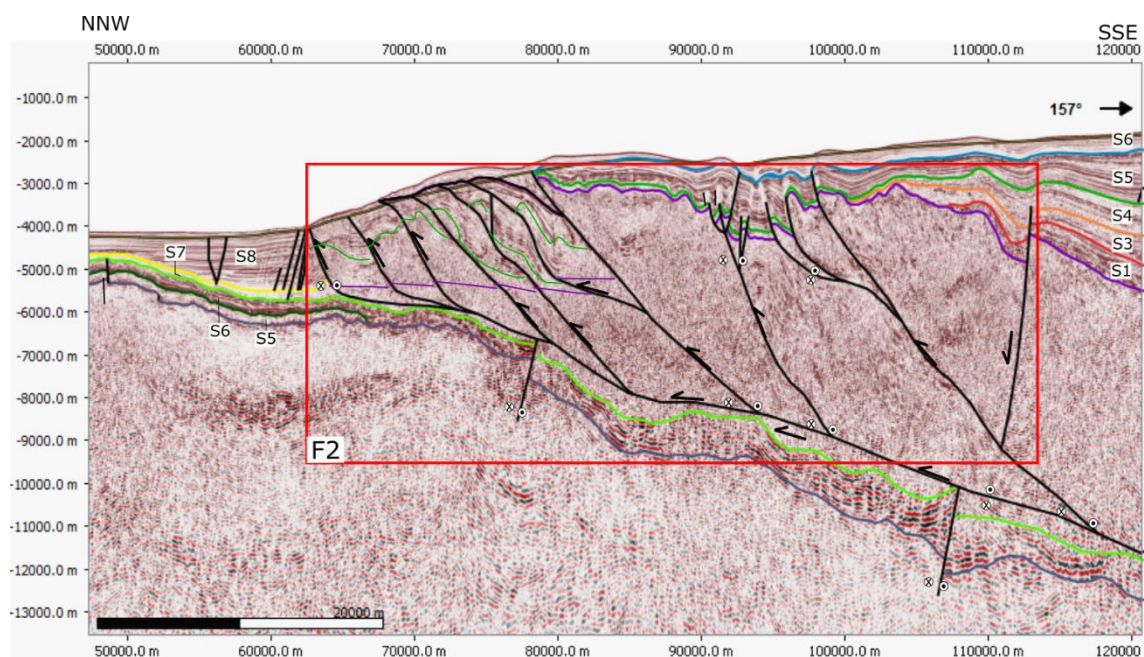
Este grupo de fallas normales se localizan en la depresión Chimare (Fig. 32), su actividad afectó el basamento acústico creando un espacio de acomodación en la línea sísmica para la acumulación de las secuencias S1 y S2. La mayoría de las fallas presentan un buzamiento aparente de  $47^\circ$  NW y otras presentan un buzamiento aparente de  $66^\circ$  SE. El mayor desplazamiento del basamento medido es de 2200 m. Se evidencian que algunas de estas fallas normales sufrieron de una inversión tectónica posteriormente.



**Figura 32.** Ubicación de las familias de fallas F1, F4 Y F5, localizadas entre la zona de diapirismo y el sureste de la cuenca de la Guajira Offshore. Exageración vertical de 4.5.

### 6.2.2 Familia de fallas F2

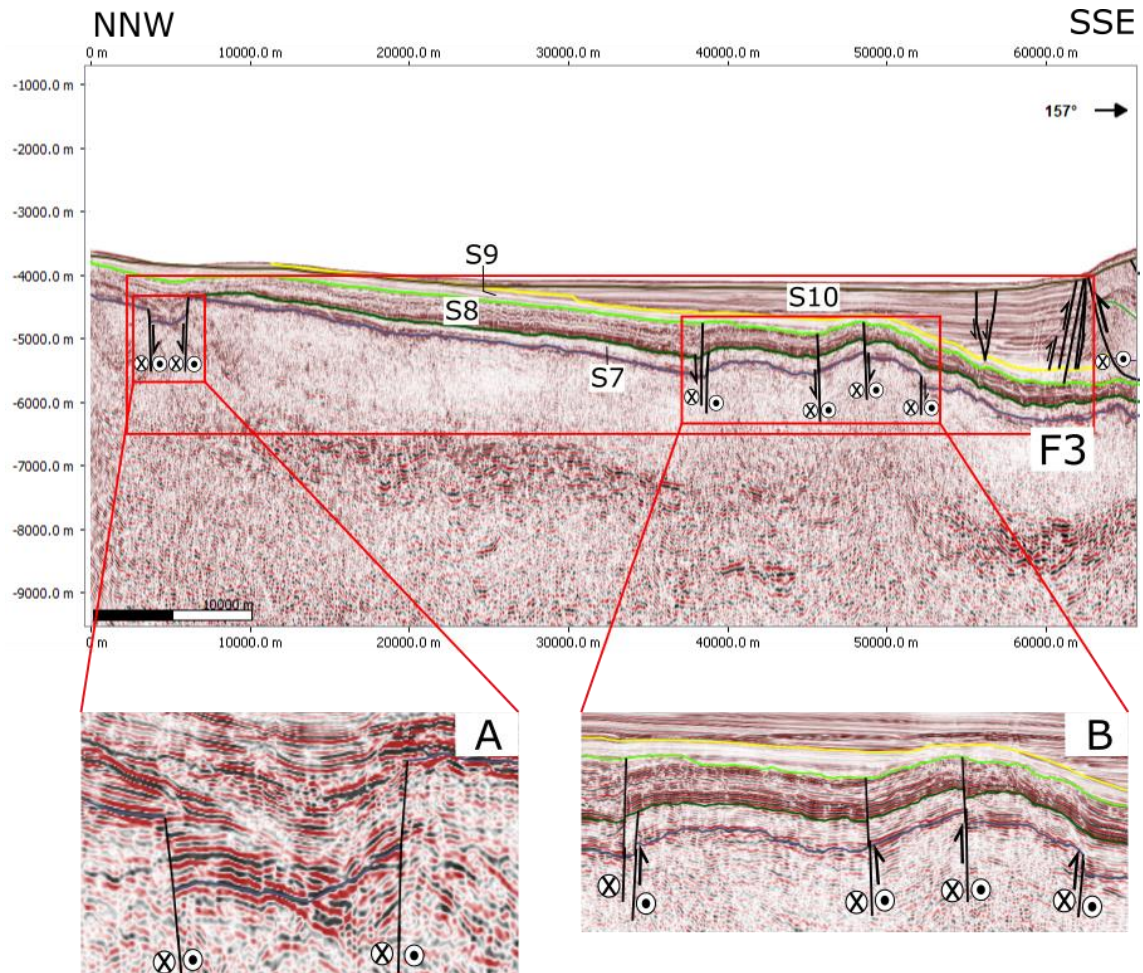
Esta familia se compone por un sistema de fallas de cabalgamiento (*Duplex*) con un posible componente de rumbo lateral derecho (interpretado por la convergencia oblicua entre las placas Suramericana y Caribe) que forman el prisma de acreción del Cinturón Deformado del Sur del Caribe (Fig. 33). Estas fallas afectan el basamento y a las secuencias S3, S4 y S5, generando pliegues asimétricos con vergencia al noroeste en el frente del prisma; estos pliegues se encuentran cubiertos por la secuencia S6. Se interpreta que esta familia de fallas se desprende de una falla de despegue que sigue la geometría de la placa que converge a un ángulo aproximado de  $9^\circ$ , y que a la profundidad de  $-1.500$  m disminuye. La mayoría de las fallas presentan un buzamiento aparente hacia el SE, pero también se observan algunas fallas antitéticas (*Back-thrust*) con buzamiento aparente hacia el NW.



**Figura 33.** Localización de la familia de fallas F2, ubicada en el CDSC. Exageración vertical de 3.5.

### 6.2.3 Familia de fallas F3

Está compuesta por un sistema de fallas normales con un posible componente de rumbo lateral derecho. Se ubican en la cuenca Colombia al noroeste de la zona de estudio y deforman el basamento acústico de la placa Caribe, y a las secuencias S7, S8 y S9, generando estructuras en *horst* (Fig. 34a) y *graben* (Fig. 34b). El desplazamiento máximo generado fue de 255 m en el *graben*. Posiblemente esta familia de fallas sea contemporánea con la familia F2, debido a la convergencia de la placa Caribe.



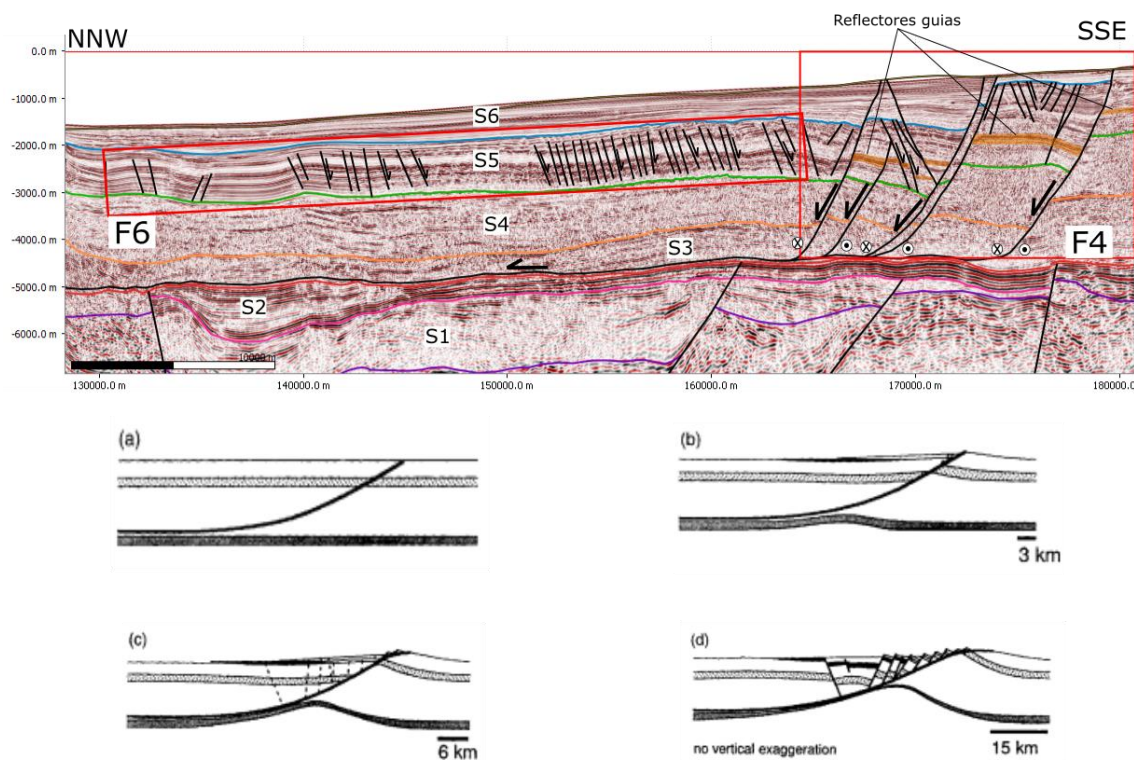
**Figura 34.** Localización de la familia de fallas F3, ubicada en la cuenca Colombia.

Exageración vertical de 3.5.

#### 6.2.4 Familia de fallas F4

Esta familia se compone de fallas normales con una falla lítrica de despegue en la secuencia S3; estas fallas fueron generadas a partir de una compensación gravitacional que desencadenó un efecto dominó en el *hanging wall* (Fig. 35), como se observa en el modelo de evolución esquemático realizado por Friedmann & Burbank (1995) para las fallas extensionales con falla de despegue. Este sistema de fallas se localiza en el sector más sureste del perfil sísmico hacia la península de la Guajira por lo que se interpreta un componente de rumbo lateral derecho por su cercanía a las fallas regionales Cuisa y Oca. Las fallas principales de este sistema deforman las secuencias S3, S4, S5 y S6, generando

un desplazamiento aproximado de 1200 m para las secuencias S5 (se utilizó los reflectores guías presentados en la Figura 35 para medir este desplazamiento).

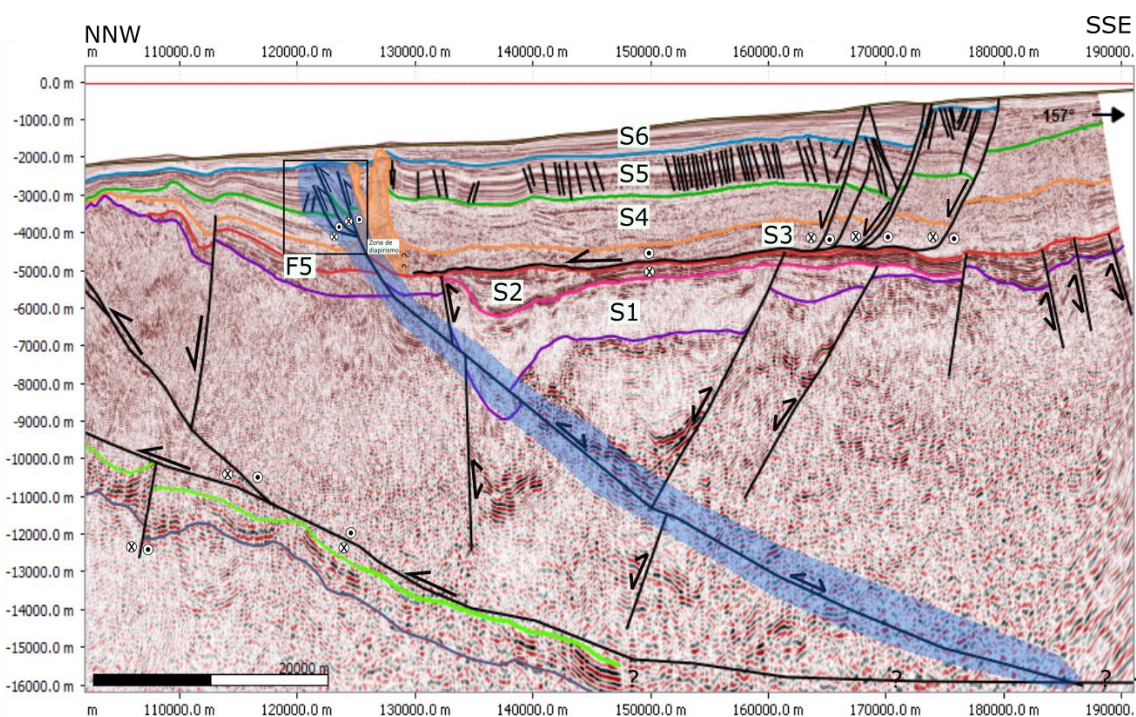


**Figura 35.** Comparación entre el modelo teórico de la evolución de fallas normales generadas por una falla lístrica de despegue, con lo interpretado para la familia de fallas F4 presentes al sureste de la zona de estudio. También se observan los reflectores guías utilizados para medir el desplazamiento de las secuencias S3, S4, S5 y S5 en color naranja. Exageración vertical 3.5. Modelo teórico tomado de Friedmann & Burbank (1995).

### 6.2.5 Familia de fallas F5

Fallas de cabalgamiento con posible componente de rumbo lateral derecho, localizadas en la zona de diapirismo. Estas fallas afectan a las secuencias S3, S4 y S5, generando pliegues por propagación de falla, con vergencia al NW y un desplazamiento máximo aproximado de 1020 m. Las fallas presentan un buzamiento aparente hacia el SE.

Una de las interpretaciones que se le da al origen de estos cabalgamientos es que son derivados a partir del nivel de despegue de la familia de fallas F4 debido a la compensación gravitacional que se dio al SE (Fig. 32). La otra posible interpretación es que se generaron por una falla de cabalgamiento proveniente del nivel de despegue de familia de fallas F2, la cual deforma también las fallas de la familia F1 (Fig. 36).



**Figura 36.** Segunda interpretación para la formación de la familia de fallas F5 a partir de un cabalgamiento proveniente del despegue de la familia de fallas F2. Se resalta el cabalgamiento con una delimitación de color azul. Exageración vertical 1:4.5.

### 6.2.6 Familia de fallas F6

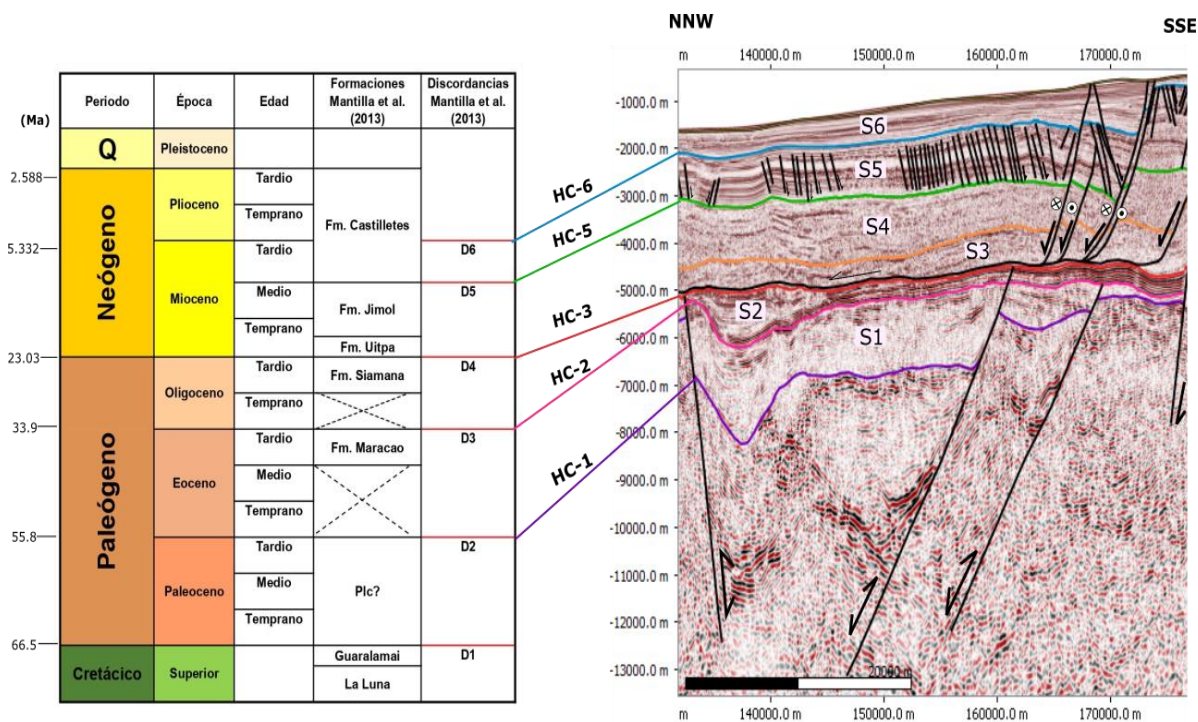
Fallas normales localizadas únicamente a lo largo del sector SE de la secuencia S3. Presentan un buzamiento aparente general de ca. 80° SE, son las fallas que generan menor desplazamiento (ca 70 m - 130 m) en toda la línea sísmica (Fig. 35). Se puede interpretar,

que el origen de estas fallas sea debido a la reología de las unidades litológicas de esta secuencia.

## 7 DISCUSIÓN

### 7.1 Correlación cronoestratigráfica para la cuenca Guajira *Offshore*

Para correlacionar las secuencias tectonoestratigráficas interpretadas en este trabajo con las formaciones definidas para la cuenca Guajira *offshore* (Renz, 1960; Rollins, 1965; Barrero et al. 2007, Mantilla et al., 2013), se compararon los resultados obtenidos con estudios previamente realizados por autores como Ramírez (2007), Vence (2008) y Mantilla et al. (2013), con el fin de encontrar evidencias que soporten la correlación de las unidades; debido a la ausencia de información de pozo, estas correlaciones presentan gran incertidumbre. Las evidencias se enumeran a continuación y se presentará la correlación en la Figura 37.



**Figura 37.** Correlación de los horizontes que limitan las secuencias interpretadas en el presente estudio para la cuenca Guajira *Offshore* con las formaciones litológicas

definidas para esta cuenca (Mantilla et al., 2013). Las discordancias D1, D2, D3, D4 y D5 representadas por líneas irregulares rojas se tomaron de Mantilla et al. (2013). Exageración de la línea sísmica 3.5.

1. El basamento acústico de la cuenca está compuesto por rocas ígneas y metamórficas del Cretácico relacionadas con el GAC (Vence, 2008).

2. Según (Vence, 2008) en la base de la depresión Chimare se encuentra el registro de las unidades desde Eoceno (Fig. 38), por lo que se correlacionó el horizonte HC-1 con la discordancia D2 entre el Paleoceno y el Eoceno descrita por (Mantilla et al., 2013).

3. Vence (2008) describe que el tope de la secuencia del Oligoceno está marcado por reflectores continuos de alta amplitud; y que esta secuencia se superpone de manera discordante al basamento cristalino o a los depósitos sedimentarios del Eoceno, lo cual se puede correlacionar con lo descrito en la secuencia S2; es por esto que se asocia el horizonte HC-2 con la discordancia D3 descrita por Mantilla et al. (2013).

4. Para el límite de la secuencia S2, según las líneas sísmicas interpretadas por Vence (2008) la deformación de las fallas normales en la cuenca Chimare solo afecta a las unidades del Eoceno y Oligoceno; y la falla lítrica de despegue para las fallas normales con componente de rumbo lateral derecho se encuentra sobre el tope del Oligoceno (Fig. 38), cómo se observa en la base de la secuencia S3 (Figura 24). Además, Galindo (2016) define la inconformidad entre el Oligoceno tardío y Mioceno temprano cómo las rocas fuentes para la formación del diapirismo (*Shales tectonics*). Por consiguiente,

se correlaciona el horizonte HC-3 con la discordancia D4 (Oligoceno tardío-Mioceno temprano) (Mantilla et al. (2013).

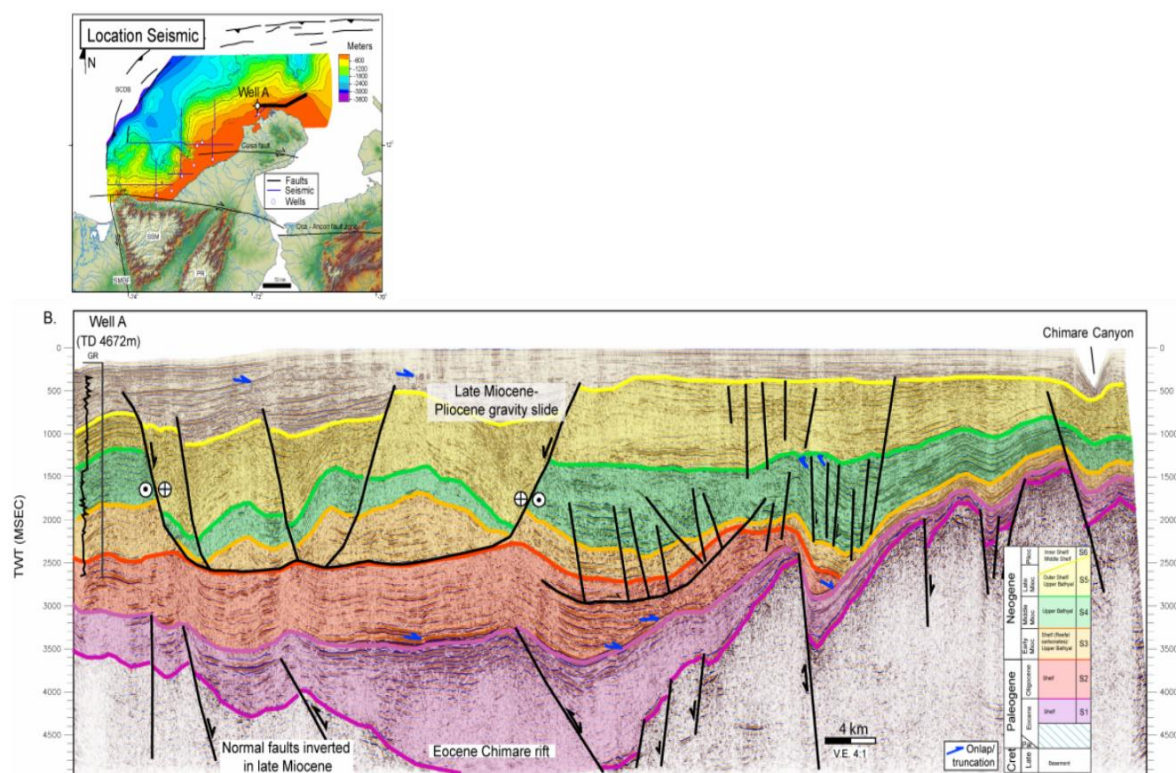


Figura 38. Interpretación sísmica realizada por (Vence, 2008) para la cuenca Guajira Offshore. Modificado de (Vence, 2008).

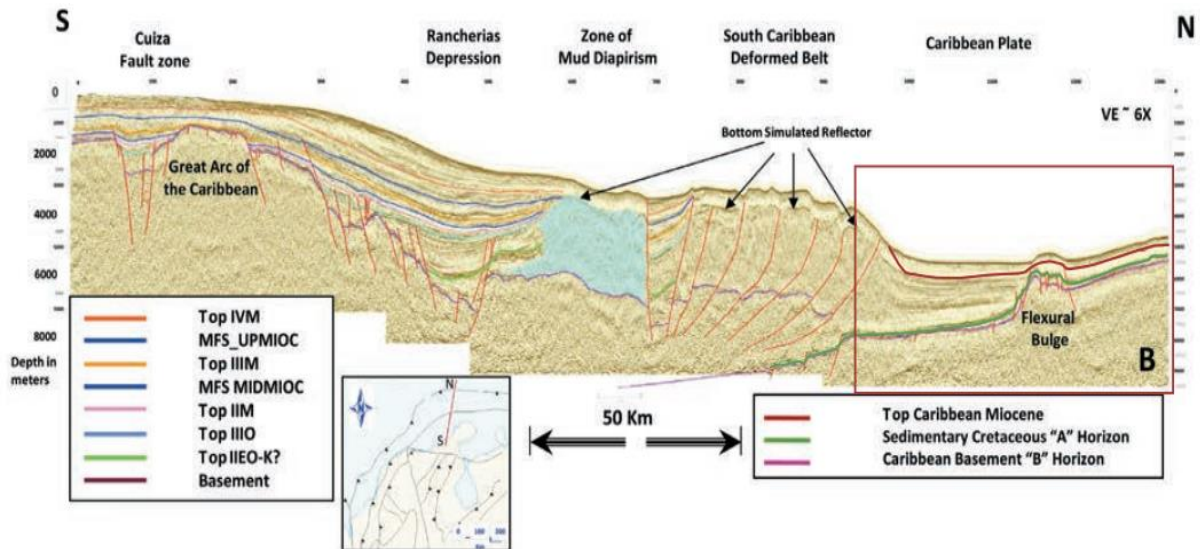
5. El horizonte HC-5 se correlacionó con la discordancia D5 (Mioceno medio- Mioceno tardío), observada por Mantilla et al. (2013) a través de registros de pozos de Punta Gallinas-5 y Chimare 2.1. En la secuencia S5 se evidenciaron fallas poligonales pertenecientes a la familia de fallas F6 (Fig. 26b), las cuales se generan en rocas de grano fino, que corresponden con la composición descrita por Rollins (1965) para la Formación Castilletes en el Mioceno tardío y según Vence (2008) las configuraciones de los reflectores en este periodo de tiempo presentan altas frecuencia, amplitudes variables y terminaciones en *onlap* y *downlap*; estas características son similares a las observadas para la secuencia S5 (Fig. 27b).

6. La base de la secuencia S6 se correlacionó con la discordancia D6 que corresponde al hiato entre Mioceno tardío-Plioceno temprano (Mantilla et al., 2013, Duque-Caro, 1990b). Según Vance (2008) y Galindo (2016) esta inconformidad se puede identificar debido a la presencia de geometrías de los reflectores en *onlaps*, *downlaps* y *toplaps*, cuyas terminaciones se utilizaron para delimitar el horizonte HC-6 (Fig. 26a, b).

7. Según Galindo (2016) los pliegues del CDSC están conformados por estratos del Oligoceno superior y Mioceno, y están parcialmente cubiertos por sedimentos sin-tectónicos del Plioceno al Holoceno que se espesan hacia los sinclinales y se vuelven más delgados hacia la cresta de los anticlinales; es por esto que se decide asociar los pliegues observados en el prisma de acreción con las secuencias S3, S4 y S5, que según la interpretación realizada se correlacionan por la similitud en las facies sísmicas (Fig. 25).

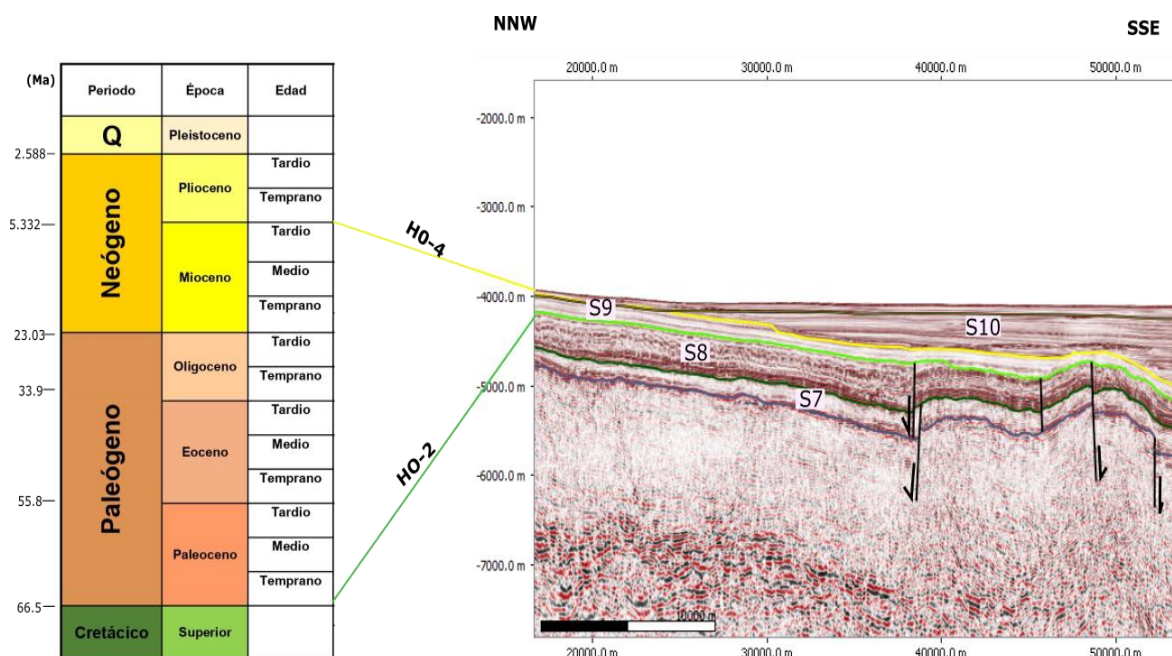
## **7.2 Correlación cronoestratigráfica para cuenca Colombia**

Para la cuenca Colombia no se encontraron estudios previos con los cuales tener las evidencias para poder realizar una correlación más soportada por datos, por lo que la correlación realizada para esta cuenca tiene una incertidumbre mayor. Los estudios previos que presentan interpretación sísmica de la cuenca Colombia son Vance (2008) y Ramírez (2007). En el presente trabajo se mostrará la interpretación realizada por Ramírez (2007) (Fig. 39), que se utilizó para la correlación cronoestratigráfica de la cuenca Colombia.



*Figura 39. Interpretación sísmica realizada por Ramirez (2007) cerca de la zona de estudio. Modificado de Ramirez (2007).*

El horizonte HO-2 se correlaciona con el tope del Cretácico superior (Fig. 40) debido a que es la secuencia que suprayace al basamento cómo se observa en la interpretación realizada por Ramirez (2007) (horizonte verde, Fig. 39) basado en que Erlich et al. (2003), en el pozo 153 del *Deep Sea Drilling Project* (DSDP), mencionan la presencia de calizas ricas en materia orgánica del Cretácico tardío que superponen a los basaltos del basamento. El horizonte HO-4 se correlacionó con el Mioceno tardío (Fig. 40), al igual que Ramirez (2007) para el reflector rojo (Fig. 39).



**Figura 40.** Correlación de los horizontes que limitan las secuencias interpretadas en el presente estudio para la cuenca Colombia con la carta estratigráfica. Exageración vertical de la línea sísmica 4.5.

### 7.3 Evolución tectonoestratigráfica del *offshore* de la Península de la Guajira a partir de la línea sísmica SPAN-3800

El primer evento tectónico que registra la línea sísmica SPAN-3800 en el noroeste de la península de la Guajira, fue un régimen extensional que afectó el GAC a través de fallas normales de la familia F1 (Fig. 32) generando *grabens* y *half-grabens* con buzamiento principal al NW, creando el espacio de acomodación para la depositación sin-tectónica de las secuencias S1 y S2 evidenciada por los estratos de crecimiento observados en la Figura 22b. Esta secuencia fue correlacionada con las Formaciones Maracao del Eoceno y Siamana del Oligoceno (Fig. 37), depositadas en ambientes marinos someros (Rollins, 1965). La discordancia entre el Eoceno y Oligoceno definida por Mantilla et al (2013) puede estar asociada a fuertes eventos orogénicos que originaron el levantamiento de la

Sierra Nevada de Santa Marta y de la Serranía de Perijá interrumpiendo la sedimentación (Arias y Morales, 1999).

Posterior a este evento, se registra un régimen transpresional marcado por el sistema de fallas de cabalgamiento con componente de rumbo dextral de la familia fallas F2 (Fig. 33), que se generan debido a la convergencia oblicua de las placas Caribe y Suramericana, datando el inicio de la formación del CDSC en el Mioceno temprano (Pindell & Kennan, 2009). A su vez en el frente del prisma de acreción se generaron las fallas extensionales con posible componente de rumbo dextral (familia de fallas F3, Fig. 34) debido a la deformación flexural de la placa Caribe causado por la carga del prisma de acreción, deformando las rocas acumuladas previamente en la cuenca Colombia (posiblemente el *slab* oceánico del Caribe). Contemporáneo al levantamiento del CDSC, se depositaron las secuencias sin-tectónicas S3, S4 y S5, esto se puede demostrar por los de estratos de crecimiento observados en la Figura 23; estas secuencias se correlacionaron con las Formaciones Uitpa, Jimol, y Castilletes (Fig. 35), desde el Mioceno temprano al tardío formando una cuenca *retrowedge*.

Para el Oligoceno tardío-Mioceno temprano se dan cambios eustáticos que generan una trasgresión y con ello una discordancia erosional en este periodo de tiempo (Mantilla et al., 2013; Escalante, 2005). En esta trasgresión se depositó la secuencia S3 en un ambiente marino nerítico a marino profundo y la secuencia S4 que posiblemente corresponde a la Formación Jimol se acumuló en un ambiente marino poco profundo en el Mioceno medio (Rollins, 1965). La discordancia observada en límite Mioceno medio-Mioceno tardío (Horizonte HC-5, discordancia D5 (Mantilla et al., 2013)) también fue descrita por Gorney et al. (2007) en el norte de la cuenca Bonaire como un evento tectónico relacionado con la inversión del este de la cuenca Falcón.

Contemporáneo a la formación del CDSC, se generaron las fallas normales con componente de rumbo dextral pertenecientes a la familia de fallas F4 al sureste de la zona de estudio cercano a la Península de la Guajira, como resultado de los esfuerzos transtensivos en la zona y a la cercanía de la línea sísmica a la Sutura Chimare (Figura 6) descrita por Londono et al. (2015) como falla de rumbo dextral. El inicio de esta falla lo datan los estratos de crecimiento observados en la parte superior de la secuencia S5 (Fig. 26c) correlacionada con el Mioceno tardío. Estas fallas normales lítricas con despegue en de la secuencia S3 en Mioceno temprano, desencadenan un deslizamiento gravitacional y por efectos de compensación generan las fallas de cabalgamiento de la familia de fallas F5 al noroeste (Figura 32). Estos sistemas gravitacionales también fueron descritos en la zona de estudio por Vence (2008) (Fig. 38) y Reistroffer et al. (2006). Según lo presentado en los resultados también se tiene una segunda interpretación de la formación de las fallas de la familia F5 (Fig. 36), la cual consiste en que estas fallas se generan por un cabalgamiento que proviene desde el despegue del sistema de fallas de la familia F2, debido al continuo empuje de la zona de convergencia. Esta falla también deformaría las fallas de la familia F1 y las secuencias S1, S2, S3 y S4.

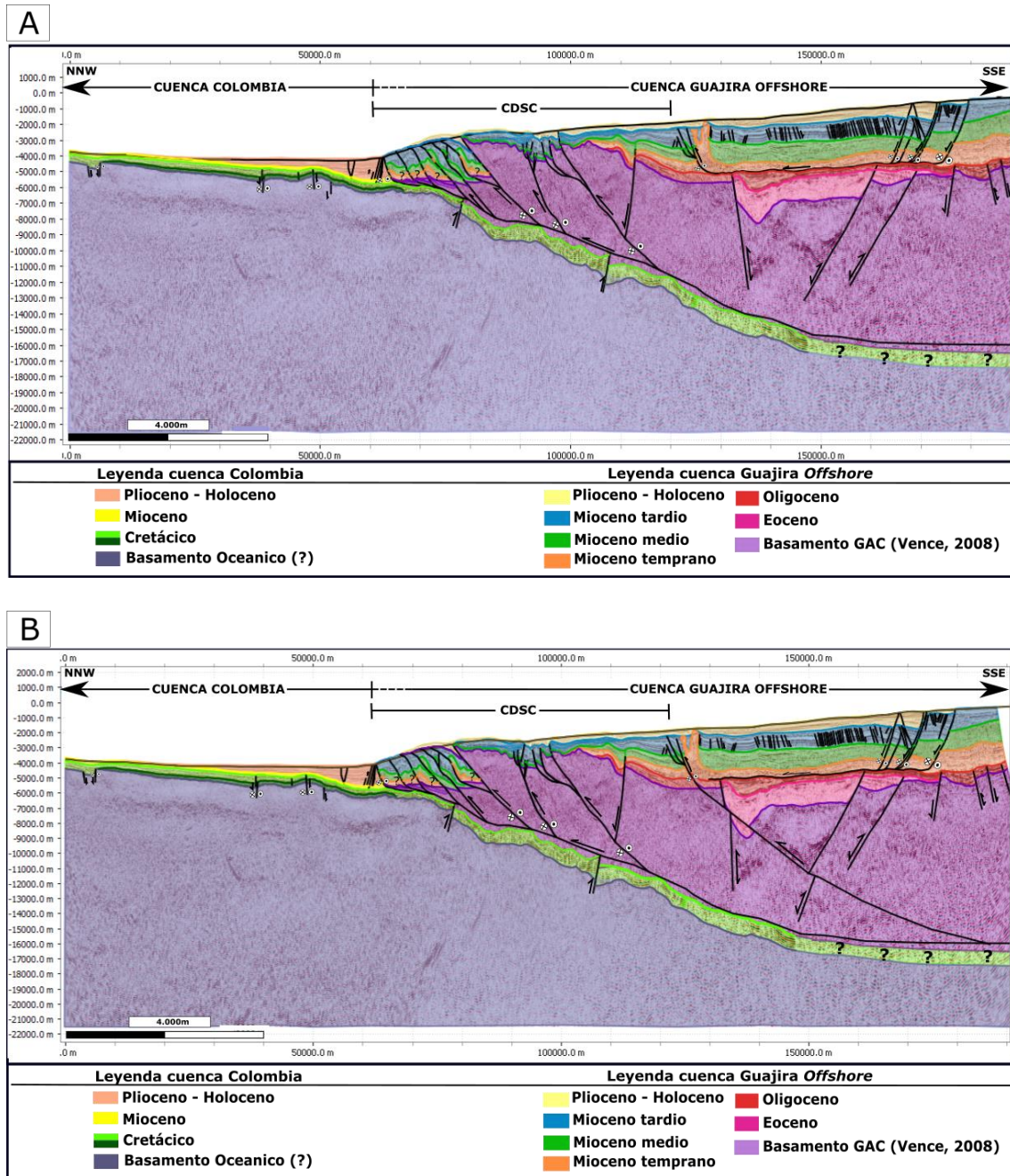
La discordancia observada entre el Mioceno tardío-Plioceno temprano (Horizonte HC-6), diversos autores asocian su formación con la colisión entre el Arco de Panamá y la continua subducción somera entre la Placa del Caribe y la Placa suramericana (Duque-Caro, 1990 b; Montes et al., 2012; Montes et al., 2015). También que se cree que refleja el inicio de la última etapa de levantamiento y deformación a lo largo del CDSC (e.g. Taboada et al., 2000; Gómez et al., 2005a; Escalona y Mann, 2011 en Galindo, 2016). La inversión de las fallas extensionales de la familia F1, se genera en este periodo tiempo según Vence (2008), debido a un acortamiento NW-SE.

Posterior a esta discordancia, continuó la acumulación de la secuencia 6, correlacionada con la Formación Castilletes depositada en un ambiente marino somero (Rollins, 1965), cuya secuencia también es sin-tectónica a las familias de fallas F4 y F2 (Fig. 28b, 29).

Finalmente, el último evento registrado en la línea sísmica es el ascenso de los diapiros a través de la familia de fallas F5. Este ascenso deforma a su paso las secuencias S4, S5 y S6. La fuente del diapirismo con ayuda de las correlaciones realizadas se le atribuyó a la secuencia S3 del Mioceno temprano correspondientes a la Formación Uitpa, compuestas principalmente por lodolitas Rollins (1965).

Con relación a los sistemas petrolíferos definidos por (Ramirez et al., 2015) los sistemas presentes en la línea SPAN-3800 son el sistema petrolífero de Maracao- Siamana para la cuenca Guajira *Offshore* y el sistema petrolífero Mesozoico-Terciario para el prisma de acreción del CDSC y la cuenca Colombia (Fig. 10). También la presencia del *BSR* observados en el prisma de acreción (Fig. 29) y en la zona de diapirismo (Fig. 28a) en la secuencia S5, evidencia indirectamente la presencia de gas metano en la zona de estudio.

A continuación, se presentará las interpretaciones finales, ajustadas con las posibles correlaciones definidas:



**Figura 41.** Interpretaciones de la línea sísmica SPAN-3800, con posibles edades geológicas de las secuencias. A) La familia de fallas F4 es generada por la familia de fallas F4. B) La familia de fallas F4 es generada por cabalgamiento de la familia de fallas F2. Exageración vertical: 4.

**Tabla 7.** Carta de eventos geológicos interpretados para la línea SPAN- 3800, a partir de las terminaciones de los reflectores y los estratos de crecimiento observados.

<b>TIEMPO GEOLÓGICO</b>	<b>EVENTO GEOLÓGICO</b>	<b>PRETECTÓNICO</b>	<b>SINTECTÓNICO</b>	<b>POSTECTÓNICO</b>
<b>Posterior al Plioceno temprano</b>	Diapirismo			S3, S4, S5 y S6
<b>Plioceno temprano -Reciente</b>	S6			F5
<b>Mioceno temprano - Reciente</b>	S5 y S6		F4	
<b>Mioceno temprano – Reciente</b>	S3, S4, S5 Y S6		F2	F1
<b>Eoceno tardío- Oligoceno tardío</b>	S1 y S2		F1	

## CONCLUSIONES

- A partir de la interpretación de las facies sísmicas y las terminaciones de reflectores, se identificaron seis secuencias tectonoestratigráficas que se nombraron del más antiguo al más reciente como S1, S2, S3, S4, S5 y S6 siguiendo el principio de superposición de estratos para la cuenca Guajira *Offshore* y cuatro secuencias tectonoestratigráficas S7, S8, S9 y S10 para la cuenca Colombia, delimitadas por reflectores de alta amplitud que constituyen discordancias regionales.
- En general el mayor espesor de las secuencias de la cuenca Guajira *Offshore* se presenta desde la zona de diarismo hasta el sureste de línea sísmica, principalmente en la depresión Chimare; y el menor espesor de las unidades se encuentra en el prisma de acreción del CDSC. Para la cuenca Colombia el mayor espesor se presenta hacia el frente del prisma de acreción, debido al espacio de acomodación generado por la convergencia oblicua entre las placas Caribe y Suramericana; y el menor espesor se encuentra en sector más noroeste de la línea.
- Con base en el análisis estructural realizado para la línea SPAN-3800, se interpretaron seis familias de fallas que fueron nombradas en orden cronológico como F1, F2, F3, F4, F5 Y F6 fundamentado por estudios anteriores. La cuenca Guajira *Offshore* se encuentra afectada por fallas normales de basamento de la familia F1 en la depresión Chimare que posteriormente fueron invertidas; en dirección sureste la cuenca está deformada por fallas normales con componente de rumbo dextral pertenecientes a la familia F4, las cuales presentan una falla lítrica de despegue en la secuencias S2 y por la familia de fallas F6 que únicamente afecta la secuencia 3; por último, se encuentra plegada y cortada por

las fallas de cabalgamiento con componente de rumbo dextral de las familias F2 que generan la formación del CDSC y la F5, localizadas en la zona de diapirismo. Por su parte la cuenca Colombia está deformada principalmente por fallas normales con posible componente de rumbo lateral derecho pertenecientes a la familia F3.

- Los estratos de crecimiento observados en las secuencias tectonoestratigráficas ayudaron a darle una temporalidad a los eventos estructurales:
  - Las secuencias S1 y S2 son sin-tectónica a la formación de la familia de fallas F1.
  - Las secuencias S3, S4 y S5 son post-tectónicas a la familia F1 y sin-tectónicas a las fallas de cabalgamiento de la familia F2.
  - La parte superior de la secuencia S5 y la secuencia S6 se depositaron sin-tectónicamente a la familia F4.
  - La secuencia S6 es post-tectónica a las fallas de la familia F5 y sin tectónicas a las fallas de cabalgamiento activas de la familia F2.
  - La familia de fallas F6 se formaron posterior a la acumulación de la secuencia S3, por ende, a la familia de fallas F4.
  - El diapirismo es post-tectónico a las secuencias S3, S4, S5 y S6.
- Los BSR observados en el prisma de acreción y en la zona de diapirismo pueden indicar la presencia de gas metano en las secuencias inferiores a la S5.
- Cinco de los horizontes delimitados en la cuenca Guajira se correlacionaron con discordancias regionales descritas por diferentes autores en estudios previos. El horizonte HC-1 se correlacionó con la discordancia del Paleoceno-Eoceno, el horizonte HC-2 con la discordancia del Eoceno tardío-Oligoceno temprano, el horizonte HC-3 con la discordancia del Oligoceno tardío-Mioceno temprano, el

horizonte HC-5 con la discordancia del Mioceno medio-Mioceno tardío y el horizonte HC-6 con la discordancia del Mioceno tardío-Plioceno temprano.

- Se reconocieron cuatro eventos tectónicos para el noroeste de la Península de la Guajira en la línea SPAN-3800. Un evento extensional del Eoceno al Oligoceno donde se acumuló las secuencias S1 y S2, correlacionadas con las formaciones Maracao y Siamana; seguido por una transpresión desde el Mioceno inferior hasta el Holoceno(?), donde se depositaron las secuencias S3, S4, S5 y S6 correspondientes a las formaciones Uitpa, Jimol y Castilletes, formando una cuenca *retro wedge*. Este evento fue contemporáneo a una transtensión desde el periodo del Mioceno tardío al Plioceno, generando un deslizamiento gravitacional de la cuenca y al mismo tiempo ocurría inversión tectónica de las fallas F1. Por último, un evento de diapirismo posterior a Plioceno inferior, es cual ascienden a través de la familia de fallas F5, que corta a su paso las secuencias S4, S5 y pliega la secuencia S6.

## RECOMENDACIONES

Realizar una correlación tectonoestratigráfica utilizando los pozos cercanos al área de estudio con el fin de establecer de manera más precisa el carácter sedimentológico, petrofísico y geoquímico de las secuencias interpretadas y su temporalidad exacta.

Calcular atributos sísmicos para la línea sísmica como descomposición espectral, sweetness, RMS amplitude y dip, con el fin de evidenciar otros rasgos geológicos que no sean claros a simple vista.

Construir una restitución de la línea sísmica 2D SPAN-3800 basada en métodos geométricos, para comprobar que la sección este balanceada.

Reconocer la continuidad lateral de las secuencias tectonoestratigráficas y las familias de fallas identificadas en las otras líneas SPAN-2004, para realizar una evolución regional del Caribe Colombiano.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, R. (2011). Guajira and Cayos Basins. *ANH-University EAFIT*.
- Allen, P., & Allen, J. (2013). Basin Analysis: Principles and applications to petroleum play assessment. *Wiley-Blackwell*.
- Al-Masgari, AAS, Elsaadany, M., Latiff, A., Hamzah, M, H., . . . Bared, A. (2021). Subdivision estratigrafica de secuencia sismica usando registros de pozos y datos sismicos de la cuenca de Taranaki, Nueva Zelanda. *Ciencias Aplicadas*.
- Alvarez, W. (1967). *Geology of the Simurua and Carpintero areas, Guajira Peninsula, Colombia: PhD thesis*. . New jersey: Princeton.
- Arias, A., & Morales, C. (1999).
- Arts, R., Eiken, O., Chandwick, A., Zweigel, Van der Meer, B., & Kirby, G. (2004). Monitoreo sismico en el sitio de almacenamiento subterraneo de CO2 de Sleiper. *Geol. Soc.Lond*, 181-191.
- Audemard, F. (1995). La cuenca Terciaria de Falcon, Venezuela noroccidental: sintesis estratigrafica, genesis e inversion tectonica: IX Congreso Latinoamericano geologico.
- Audemard, F., Romero, H., & Cano. (2005). Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from microtectonic data and focal mechanism solutions: Earth-Science reviews. *Earth-Science reviews*, 181-223.
- Avé Lallemand, H. (1997). Transpression, displacement partitioning, and exhumation in the eastern Caribbean. *South American plate boundary zone Hans: Tectonics*, 272-289.
- Ballance, P., & Reading, H. (1980). Sedimentation in Oblique-Slip Mobile Zones: International Association of Sedimentologists, Special Publication, 4, Blackwell Scientific Publications, Oxford. *Scientific Publications, Oxford*.

- Bally, A., Gordy, P., & Stewart, G. (1966). Structure, seismic data, and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains. Canada.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martinez, J. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal*.
- Barrero, Pardo, Vargas, & Martinez. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature boundaries and petroleum geology, a new proposal*. Bogotá: ANH and BYM Exploration Ltda.
- Basabe, Y. (2018). Sedimentary Megasequences of Colombian Basin, offshore Colombia. *MSc thesis, The University of Arizona*.
- Beardsley, & Lallemand. (2007). Oblique collision and accretion of the Netherlands Leeward Antilles to South America: Tectonics. 1-16.
- Beardsley, A., & Lallemand, A. (2007). Oblique collision and accretion of the Netherlands Leeward Antilles to South America: Tectonics. 1-16.
- Beck, J., Rojas, C., & Cembrano, J. (1993). On the nature of buttressing in margin-parallel strike-slip fault systems: *Geology*. 755.
- Bellon, O. (2004). Reconstruction of Geological Structures in 3D An Example from the southern Pyrenees .
- Bernal, R., Sanchez, J., Mann, P., & Murphy, M. (2004). Along-Strike crustal thickness variations of the subducting Caribbean plate produces two distinctive styles of thrusting in the offshore south Caribbean deformed belt, Colombia.
- Blick, C., & Biddle, K. (1985). Deformation and basin formation along strike-slip faults, in Biddle, K.T. and Christie-Blick, N. eds., *Strike-slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation*,. *Society of Economic Paleontologists and mineralogists*, 1-34.

- Burke, K., Cooper, C., Dewey, J., Mann, P., & Pindell, J. (1984). Caribbean tectonics and relative plate motions, in Bonini, W.E; Hargraves, R.B; and Shagan, Reds. *The Caribbean-South America Plate Boundary and Regional Tectonics, Geological Society of America Memoirs*, 31-63.
- Burke, K., Fox, P., & Şengör, A. (1978). Buoyant ocean floor and the evolution of the Caribbean. *Journal of Geophysical Resesearch: Solid Earth*, 3949-3954.
- Cartwright, J., Huuse, M., & Aplin, A. (2007). Seal bypass systems. *AAPG Bull 91*, 1141- 1166.
- Case, J., & MacDonald, W. (1973). Regional gravity anomalies and crustal structure in northern Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 2905-2916.
- Case, J., Holcombe, T., & Martin, R. (1984). Map of geologic provinces in the Caribbean region, in W. Bonini, R. Hargraves, and R. Shagan, eds., *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics. Geological Society of America* , 1-30.
- Catwright, J., James, D., & Bolton, A. (2003). The Genesis of Polygonal Fault Systems: a Review. *Geological Society, London, Special Publications* , 223- 243.
- Cembrano, J., Gonzalez, G., Arancibia, G., Ahumada, L., Olivares, V., & Herrera, V. (2005). Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: A case study from the Mesozoic Atacama fault system, Northern Chile: *Tectonophysics*. 105-125.
- Chamberlin, R. (1910). The Appalachian folds of central Pennsylvania. 228-251.
- Coates, A., Collins, M., & Berggren, W. (2004). The Geology of the Darien, Panama and the late miocene-pliocene collision of the Panama arc with northwestern South America. *Geological Society of America*, 1327-1344.

- Collot, J., & Davy, B. (1998). Forearc structures and tectonic regimes at the oblique subduction zone between the Hikurangi plateau and the southern kermadec margin . *Journal of Geophysical*, 623.
- Contreras, J. (2010). Un borde euleriano al problema del balanceo de secciones geológicas estructurale. . *Reviste Mexicana de ciencias geologicas* .
- Dahlstrom, C. (1969). Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*.
- Dahlstrom, C. (1970). Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. 312-406.
- Diebold, J., Stoffa, P., Buhl, P., & Truchan, M. (1981). Venezuela basin crustal structure . *Joournal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Donnelly, T. (1973). Magnetic anomaly observations in the eastern Caribbean Sea. . *Department of Geology, State University of New York, Binghamton* .
- Driscoll, N., & Diebold, J. (1999). Tectonic and stratigraphic development of the eastern Caribbean: new constraints from multichannel seismic data. *Sedimentary Basins of the world*, 591-626.
- Duque, H. (1990). The Choco block in the northwestern corner of South America: structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 71- 84.
- Egan, S., Buddin, T., Kane, S., & Williams, G. (1997). Three- dimensional modelling and visualization in structural geology: New techniques forthe restoration and balancing of volumes. *Proceedings of the 1996 Geoscience Information Group Conference on Geological visualisation, Electronic Geology*, 67-82.
- Enlow, R., & Koons, P. (s.f.). Critical wedges inurbation analysis three dimensions: Analytical expressions from Mohr- Coulomb constrained pert. *Journal of Geophysical Research*, 4897.

- Erlich, R., Villamil, T., & J.Keens. (2003). Controls on the deposition of upper cretaceous organic carbonrich rocks from Costa Rica to Suriname. *AAPG Memoir* , 1-45.
- Erslev, E., & Rogers, J. (1993). Basement- cover geometry of Laramide fault-propagation folds. . *Geological Society of America: Special Paper*, 125- 146.
- Escalante, C. (2005). *Integrated seismic stratigraphic and 1\_D basin analysis of the Tayrona depression - offshore Baja Guajira basin, Colombia*. Norman: University of Oklahoma.
- Escalona, A., & Mann, P. (2011). Tectonics, basin subsidence mechanisms, and paleogeography of the Caribbean-South American plate boundary zone: Marine and Petroleum Geology. 8- 39.
- Especifico, A. (2009). Proyecto de investigación: cartografía e historia geologica de la alta Guajira . *Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá*.
- Fajardo, A., & Rubiano, J. (1998). Evaluación regional Cuenca alta Guajira. . 115.
- Fitch, T. (1972). Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to southeast Asia and the western pacific. *Journal of Geophysical Research*, 4432-4460.
- Fossen, H. (2010). Structural geology. *Cambridge University Press*, 463.
- Frisch, W., M, M., & Sick, M. (1992). Origin of the Central American ophiolites: Evidence from paleomagnetic results. *Geological Society of America Bulletin*, 1301-1314.
- Galindo, P. (2016). Transtension and transpression in an oblique subduction setting: evolution of the Bahia Basin. *Colombian Caribbean margin. Doctoral dissertation, Imperial College London*.

- García, M., Cruz, L., Mier, R., Vasquez, M., Jimenez, M., & Moreno, M. (2008). Evolucion termica de la subcuenca de la baja Guajira. . *Grupo de investigación en geologia de hidrocarburos y carbonos*.
- Gay, A., & Berndt, C. (2007). Cese/reactivación de fallas poligonales y efectos sobre el flujo de fluidos en la cuenca de Voring, margen noruego. *Geol. Soc. Lond*, 129-141.
- Giunta, G., & Orioli, S. (2011). The Caribbean plate evolution: trying to resolve a very complicated tectonic puzzle. . *New Frontiers in Tectonic Research- General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs. Rijeka, Croatia: In Tech*, 221-248.
- Gómez, C., & León, J. (2000). Recuperación de gas metano en yacimientos de hidartos de gas en la cuenca Colombia como futura fuente de energía. *Universidad Industrial de Santander*.
- Gomez, I. (2001). Structural Style and Evolution of the Cuisa Fault System, Guajira, Colombia. *University of Houston*, 147.
- Gorney, D., Escalona, A., Magnani, P. M., & Group, B. S. (2007). Chronology of cenozoic tectonic events in western Venezuela and the Leeward Antilles based on integration of offshore seismic reflection data on-land geology. *AAPG Bulletin* , 653-684.
- Haq, S., & Davis, D. (2010). Mechanics of fore-arc slivers: Insights from simple analog models: Tectonics.
- Hoernle, K., Hauff, F., & Bogaard, P. v. (2004). 70 my history (139-69 Ma) for the caribbean large igneous province. . 697-700.
- Hossack, J. (1979). The use of balanced cross- sections in the calculation of orogenic contraction: A review. *Journal of the Geological Society*.

- ICP- Ecopetrol. (2000). Geochemical evaluation of Mero-1, Epehin-1 and San Jose-1 Wells Guajira Basin: Bucaramanga, Instituto Colombiano del Petroleo. *Ecopetrol Report*, 32.
- ICP- Texaco. (2002). Evaluacion del bloque Macuira, Guajira, Costa Afuera: Bucaramanga, Instituto Colombiano de Petroleo. *Ecopetrol Report*, 80.
- James, K. (2009). In situ origin of the Caribbean: discussion of data. *Geological Society, London, Special Publications*, 77- 125.
- James., K. (2005). A simple synthesis of Caribbean geology. *Caribbean Journal of Earth Sciencie*.
- Jarrard, R. (1986). Terrane motion by strike-slip faulting of forearc slivers. *Geology*, 780-783.
- Katz, B., & Williams, K. (2003). Biogenic gas potential offshore Guajira Peninsula, Colombia. *Houston, Texas, AAPG, Annual Convention abstract*, 216.
- Kennett, J., Cannariato, K., Hendy, I., & Behl, R. (2003). Methane hydrates in quaternary climate change. *The clathrate gun hypothesis*. , 216.
- Ladd, J., & Truchan, M. (1983). Compressional features across the Caribbean Margin of Columbia. . *Seismic expression of structural style, American Association of Petroleum Geologists-Studies in Geology*, 163-166.
- Ladd, J., Holcombe, T., Westbrook, G., & N.Edgar. (1990). Caribbean marine geology: active margins of the plate bound- ary. *The Geology of North America*, 261-290.
- Ladd, J., Truchan, M., Talwani, M., Stoffa, P., Buhl, P., Houtz, R., & Westbook, A. (1984). Seismic reflection profiles across the southern margin of the Caribbean . *The Caribbean- South American Plate Boundary and Regional tectonics*, 153-159.

- Lallemand, S., Liu, C., Dominguez, S., Schnurle, P., & Malavieille, a. J. (1999). Trench-parallel stretching and folding of forearc basins and lateral migration of the accretionary wedge in the southern Ryukyus: a case of strain partition caused by oblique. *Tectonics*, 231-247.
- Leal, J., Olaya, I., Reyes, J., Munar, F., & Ramirez, V. (2002). Nuevos conceptos sobre la evolucion tectonoestratigrafica de la alta Guajira. *Asociacion Colombiana de geologos y geofisicos del petroleo*.
- Lockwood, J. (1965). Geology of the serrania de Macuida area, Guajira, Peninsula Colombia. *Princeton University*, 237.
- Londono, J., & Schiek, C. (2015). Basement architecture of the southern Caribbean basin Guajira offshore .
- López, C., & Ojeda, G. (2006). Heat flow in the Colombian Caribbean from the botton simulating reflector (BSR) . *CT&F-Ciencia, Tecnologia y futuro*, 29-39.
- López., E. (2005). Evolución tectónica de la región Caribe de Colombia Bogotá: INGEOMINAS.
- Lutgens, F., & Tarbuck, E. (1999). Ciencias de la tierra: Una introducción a la geologia fisica.
- M.Cediel, Almanza, O., & L.Montes. (2012). Análisis AVO en el yacimiento de alta impedancia del campo Chuchupa. *Boletin de geologia* , 139-148.
- Macdonald, W. (1964). Geology of the serrania de Macuira area Guajira Peninsula, unpubl PHD. *Colombia, Princeton University*, 167.
- Malfait, B., & Dinkelman, M. (1972). Circum- Caribbean Tectonic and ingneous activity and the evolution of the Caribbean Plate. *Geological Society of America Bulletin*, 251.

- Mann, P. (1999). Caribbean sedimentary basins: classification and tectonic setting from Jurassic to present. *Caribbean basins. Sedimentary basins of the world*, 3-31.
- Mann, P., & Burke, K. (1984). Neotectonics of the Caribbean. *Reviews of Geophysics*, 309-362.
- Mann, P., & Taira, A. (2004). Global tectonic significance of the Solomon Islands and Ontong Java Plateau convergent zone. *Tectonophysics*, 137-190.
- Mann, P., Escalona, A., & Castillo, M. (2006). Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 445-478.
- Mann, P., Schubert, C., & Burke, K. (1990). Review of Caribbean neotectonics. *The Geology of North America*, 307-338.
- Mantilla, O., Castellanos, J., Ramirez, V., & C.Rubio. (2013). Tectono-stratigraphic events of the northern Caribbean offshore. *International Conference and exhibition*.
- Mauffret, A., & Leroy, S. (1997). Seismic stratigraphy and structure of the Caribbean igneous province. *Tectonophysics*, 61-104.
- McCaffrey. (2009). The Tectonic framework of the sumatran subduction Zone. *Annual review of Earth and Planetary sciences*, 345-366.
- McCaffrey, R. (1991). Slip vectors and stretching of the sumatran fore arc. *Geology*, 881-884.
- McCaffrey, R. (1992). Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. *Journal of Geophysical Research*, 8905-8915.
- McCaffrey, R. (2009). The Tectonic Framework of the Sumatran Subduction Zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 345-366.

- McCraffty, R., Zwick, P., Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J., Stevens, C., . . . Subarya, C. (2000). Strain partitioning during oblique plate convergence in northern Sumatra: Geodetic and seismologic constraints and numerical modeling. *Journal of Geophysical Research*, 28363.
- Meschede, M., & Frisch, W. (1998). A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate. *Tectonophysics*, 269-291.
- Miller, R., Steeples, D., Hill, R., & Gaddis, B. (1990). Identifying intra-alluvial and bedrock structures shallower than 30 meters using seismic reflection techniques. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 89-98.
- Montes, C., Bayona, G., Cardona, A., Buchs, D., Silva, C., Moron, S., . . . Valencia, V. (2012). Arc-continent collision and orocline formation: Closing of the Central American seaway. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1-25.
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, C., Silva, J., Valencia, V., . . . Niño, H. (2015). Middle Miocene closure of the Central American Seaway: Science. 226-229.
- Moreno, O., Guerrero, C., Rey, A., Gómez, P., Audemard, F., & Fiume, G. (2009). Modelo Alternativo para el desarrollo del Frente Deformado Costafuera del Caribe Colombiano. Extended Abstract X Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas. Cartagena – Colombia. *Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America: Geological Society of America*.
- Morgan, D., Cartwright, J., & Imbert, P. (2015). Perturbation of polygonal fault propagation by buried pockmarks and the implications for the development of polygonal fault systems. *Marine and Petroleum Geology*, 157-171.

- Nerlich, R., Clark, S., & Bunge, H. (2014). Reconstructing the link between the Galapagos hotspot and the Caribbean Plateau. . *GeoResJ*, 1-7.
- Nilsen, T., & Sylvester, A. (1995). Strike-slip basins, in Busby, C.J. and Ingersoll, R. V. eds., *Tectonics of sedimentary basins*, Blackwell Science, Cambridge, MA. 245-457.
- Olaya, I., & Ramirez, V. (2003). , Exploracion en la Cuenca frontera Guajira costafuera: Nuevos conceptos y plays. . in *VIII Symposium of Petroleum Exploration in the Subandean Basins: Cartagena, Colombia, Asociacion Colombiana de Geologos y Geofísicos del Petroleo*.
- Ortiz, C. (2015). Sección Balanceada del flanco occidental de la cordillera oriental en la inmediaciones de los municipios Villarrica y Cunday en la sub-cuenca de Girardot valle superior del Magdalena . *Bachelor's thesis, Universidad EAFIT*.
- Perez, O., Bilham, R., Velandia, R., Hernandez, J., Moncayo, N., Hoyer, C., & Kozuch, M. (2001). Velocity field across the Southern Caribbean plate boundary and estimates of Caribbean/South-American plate motion using GPS geodesy 1994-2000. *Geophysical Research Letters*, 2987-2990.
- Pindell, J. (1991). Geologic rationale for hydrocarbon exploration. . *The Caribbean and adjacent regions: Journal of Petroleum Geology*, 237-257.
- Pindell, J., & Barret, S. (1990). Geological evolution of the Caribbean region; A plate-tectonic perspective. . *The Geology of North America - The Caribbean Region, Geological Society of America. The Geology of North America.*, 405-432.
- Pindell, J., & Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America. . *The mantle reference frame: an update. Geological Society, London, Special Publications*.

- Pindell, J., Cande, S., Pitman, W., Rowley, D., Dewey, J., Labreque, J., & Haxby, W. (1988). A plate-kinematics framework for models of Caribbean evolution. *Tectonophysics*, 121-138.
- Pindell, J., Cande, S., Rowley, W., Dewey, D., Labreque, J., & Haxby, W. (1998). ). A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution. . *Tectonophysics*.
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W., Stanek, K., Draper, G., & Higgs, R. (2005). ). Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions. . *Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins. Special Papers-Geological Society of America* .
- Platt, J. (1993). Mechanics of Oblique Convergence. *Journal of Geophysical Research*, 16239-16256.
- Platt, J. (2000). Calibrating the bulk rheology of active obliquely convergent thrust belts and fore-arc wedges from surface profiles and velocity distributions, *Tectonics*. .
- Poblet, J. (2004). Geometría y Cinemática De Pliegues Relacionados Con Cabalgamientos. . *Trabajos De Geología. Universidad de Oviedo*.
- Pulido, O., Castro, E., López, G., & Cristancho, J. (1991). Compilación y análisis de la información de la Subcuenca de la Baja Guajira. . *Informe interno ECOPETROL*.
- Ramirez, V. (2006). Geological setting and hydrocarbon occurrences, Guajira Basin, offshore northern Colombia. *Extended abstract, Houston, Texas, AAPG annual convention*.
- Ramirez, V. (2007). Stratigraphic Framework and Petroleum Systems Modeling, Guajira Basin Northern Colombia. *Unpublished Master of Science thesis, University of Alabama, Tuscaloosa.*, 185.

- Ramirez, V., Rangel, A., & Hernandez, R. (2002). Petroleum systems of the Guajira Basin, northern Colombia. *VIII Congress, Latin American Association of Organic Geochemistry: Cartagena, Colombia.*
- Ramirez, V., Rangel, A., & Hernandez, R. (2003). Thermogenic hydrocarbon processes in the Guajira Basin—A petroleum systems approach, in VIII Symposium of petroleum exploration. . *The subandean basins: Cartagena, Colombia, Asociacion Colombiana de Geologos y Geofisicos del Petroleo.*
- Ramirez, V., Vargas, L., Rubio, S., Nino, C., & Mantilla, O. (2015). Petroleum systems of the Guajira Basin, northern Colombia.
- Reistroffer, J., Buitrago, J., Avella, J., Polania, E., Esteves, E., Toledo, M., & Guerrero, C. (2006). Tectonic Interactions at the Northwest Margin of the South American Plate. *9th Simposio Bolivariano-Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas.*
- Renz, O. (1960). Geología de la parte sureste de la Península de La Guajira (República de Colombia). . *Memorias del III Congreso Geológico Venezolano: Boletín Geológico*, 317-346.
- Rice, D., & Claypool, G. (1981). Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas. *AAPG Bulletin*, 5-25.
- Rich, J. (1934). Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by the Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky, and Tennessee. *A.A.P.G. Bull*, 1584-1596.
- Roksandic, M. (1978). Seismic facies analysis concepts. . *Geophysical Prospecting*, 383-398.

- Rollins, J. (1960). Stratigraphy and Structure of the Guajira Peninsula, Northwestern Venezuela and Northeastern Colombia. . *University of Nebraska., Lincoln, Nebraska.*
- Rollins, J. (1965). Stratigraphy and structure of the Guajira Península, northwestern Venezuela and northeastern Colombia. . *Univ. Nebraska Studies, New Ser.*, 1-1102.
- Rubio, R., Rubiano, V., Garnica, J., Moreno, M., & Mantilla, M. (1998). Evaluación regional, Cuenca de la Baja Guajira. Interno ECOPETROL.
- Ryan, H., & Scholl, D. (1989). The evolution of forearc structures along an oblique convergent margin, central Aleutian Arc. . *Tectonics.*, 497-516.
- Sangree, J., & Widmier, J. (1977). Seismic Interpretation of Clastic Depositional Facies. (P. C, Ed.) *Seismic Stratigraphy. Applications to Hydrocarbon Exploration*, 165-184.
- Sangree, J., & Widmier, J. (1979). Interpretation of depositional facies from seismic data. *Geophysics*, 131-160.
- Schubert, C. (1980). Late Cenozoic pull-apart basins, Boconó fault zone, Venezuelan Andes. *Journal of Structural Geology*, 463-468.
- Serrano, L., Ferrari, L., Martinez, M., Petrone, C., & Jaramillo, C. (2011). An integrative geologic, geochronologic and geochemical study of Gorgona Island, Colombia. Implications for the formation of the Caribbean Large Igneous Province. *Earth and Planetary Science Letters.*, 324-336.
- Silver, E., Case, E., & MacGillavry, H. (1975). Geophysical study of the Venezuelan Borderland. *Geological Society of America Bulletin*, 213-266.
- Supe, J. (1983). Geometry and kinematics of fault-bend folding. . *American Journal of science.*

- Symithe, S., Calais, E., Chabalier, J., Robertson, R., & Higgins, M. (2015). Current Block Motions and Strain Accumulation on Active Faults in the Caribbean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Talukdar, S., & Marcano, F. (1994). Petroleum systems in the Maracaibo Basin, Venezuela. . *The petroleum system—From source to trap: AAPG Memoir 60*, 463-482.
- Teyssier, C., Tikoff, B., & Markley, M. (1995). Oblique plate motion and continental tectonics. *Geology*, 447.
- Trenkamp, R., Kellog, J., Freymueller, J., & Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 157-171.
- Upton, P., Koons, P., & Eberhart, D. (2003). Extension and partitioning in an oblique subduction zone, New Zealand: Constraints from three-dimensional numerical modeling. *Tectonics*, 14.
- Veloza, G., Styron, R., & Taylor, M. (2012). Open-source archive of active faults for northwest South America. *GSA Today*, 4-10.
- Vence, E. (2008). Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the Guajira margin of northern Colombia. *Doctoral dissertation, University of Texas at Austin*.
- Villamil, T. (1999). Campanian–Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 239-275.
- Weber, J., Dixon, T., DeMets, C., W.B, Jansma, P., Mattioli, G., . . . Perez, O. (2001). GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela. *Geology*, 75-78.

- Weber, M., Cardona, A., Paniagua, F., Cordani, U., Sepulveda, L., & Wilson, R. (2009). The Cabo de la Vela Mafic-Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: A record of multistage evolution of a Late Cretaceous intra-oceanic arc. *Geological Society, London, Special Publications*, 549-568.
- Wilson, J. (1966). Are the structures of the Caribbean and Scotia Arc regions analogous to ice rafting. . *Earth and Planetary Science Letters*, 335-338.
- Woodward, N., Boyer, S., & Suppe, J. (1985). Balanced Geological Cross-Sections: An Essential Technique in Geological Research and Exploration . . *University of Tennessee, Dept. of Geological Sciences*.
- Yu, G., Wesnousky, S., & Ekstrom, G. (1993). Slip Partitioning along Major Convergent Plate Boundaries. *Pure and Applied Geophysics*, 183-210.
- Yurewicz, D., Advocate, D., Lo, H., & Hernandez, E. (1998). Source rocks and oil families, southwest Maracaibo Basin (Catatumbo Subbasin), Colombia. *AAPG Bulletin*, 1329-1352.