



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**SISMOESTRATIGRAFÍA DEL OLIGOCENO PARA EL
SECTOR CENTRO-OESTE DE LA CUENCA
DE LOS LLANOS ORIENTALES
(MUNICIPIO DE PUERTO GAITÁN- META) COLOMBIA**

FANNY JOHANNA VILLAMIZAR MEZA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia

2014

**SISMOESTRATIGRAFÍA DEL OLIGOCENO PARA EL
SECTOR CENTRO-OESTE DE LA CUENCA
DE LOS LLANOS ORIENTALES
(MUNICIPIO DE PUERTO GAITÁN-META) COLOMBIA**

FANNY JOHANNA VILLAMIZAR MEZA

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Geología

Director:

Profesor Ph.D., en Geociencias y Geofísica Luis Antonio Castillo López

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia

2014

**SISMOESTRATIGRAFÍA DEL OLIGOCENO PARA EL
SECTOR CENTRO-OESTE DE LA CUENCA
DE LOS LLANOS ORIENTALES
(MUNICIPIO DE PUERTO GAITÁN-META) COLOMBIA**

Aprobado por:

M.Sc, Ph.D. Luis Antonio Castillo López (Director): _____

Bogotá, Diciembre de 2014.

A mi amado esposo y a mis hijas bellas: Mariana y Juanita, por todo su apoyo y paciencia en esta etapa de mi vida... fue un proyecto familiar.

Agradecimientos

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a mi director de tesis M.Sc, Ph.D Luis Antonio Castillo López, docente de la Universidad Nacional de Colombia, por su tiempo, asesoría, colaboración y conocimientos, cuyos aportes valiosos permitieron llevar a cabo éste proyecto.

A mi mentora la Geóloga Julieta Quijada de Daal, quien con su paciencia, tiempo, compromiso, dedicación y conocimiento, enriquecieron éste trabajo, además de ser un apoyo para mi crecimiento profesional y personal.

Al Geólogo Crispín Aurelio Fonseca por sus conocimientos y confianza, a José Araujo por sus aportes en los aplicativos, a los geólogos María Auxiliadora Martínez, Héctor Mauricio Vivas, Liliana Plazas Zea y Jazmín Sánchez, por colaborarme con los licenciamientos de software, manejo de datos y aportes técnicos, además a todos, por su apoyo para continuar con la elaboración de éste trabajo.

A Ecopetrol S.A., familiares, amigos y compañeros, que creyeron en mí y que de una u otra forma hicieron posible éste estudio.

Resumen

Debido al conocido potencial en la exploración de hidrocarburos del sector del Municipio de Puerto Gaitán, ubicado en el Departamento Meta, Cuenca de los Llanos Orientales, es importante realizar la sismoestratigrafía del intervalo Oligoceno, con la finalidad de conocer y predecir la disposición y relación de los cuerpos arenosos con los sedimentos finos, como un aporte detallado al conocimiento geológico. En este estudio, se identificaron dos secuencias deposicionales de tercer orden, las cuales están relacionadas con ambientes continentales fluviales y de llanuras de inundación. A partir de la integración de análisis de registros de pozos, estratigrafía sísmica y extracción de atributos sísmicos, se identificaron elementos arquitecturales, tales como: Canales distributarios primarios, secundarios, terciarios y depósitos de desbordamiento en llanuras de inundación. En cada secuencia los cuerpos arenosos se disponen en dirección Noroeste a Noreste y progradando principalmente hacia el Norte o Noroeste del área. La disposición general de los canales primarios, así como de complejos de canales primarios y secundarios, tiende a ser aislada y poco frecuente, contrariamente, la interdigitación de canales secundarios, terciarios y depósitos de desbordamiento en llanura de inundación, es moderadamente alta, lo que sugiere un alto contenido de material arcillo-arenoso en las secuencias del Oligoceno.

Palabras clave: Estratigrafía de secuencias, Estratigrafía sísmica, Atributos sísmicos, Cuenca Llanos Orientales, Oligoceno.

Abstract

Due to the known hydrocarbon exploration potential of the Puerto Gaitán area, located in the Meta Department, Llanos Orientates Basin, it is important to perform the Oligocene interval sismoestratigraphy, in order to understand and predict the arrangement and relationship of sand bodies with fine sediments, as a detailed contribution to the geological knowledge of this area. Two third-order depositional sequences, which are related to river and floodplain continental environments, were identified in this study. From the integration of well log analysis, seismic stratigraphy and seismic attribute extraction, architectural elements, such as: primary, secondary, and tertiary distributary channels, and crevasse splays deposits were identified. In each sequence the sand bodies are arranged in a Northwest to Northeast direction, prograding mainly towards the North or Northwest part of the area. The general arrangement of primary channels and complexes of primary and secondary channels tends to be isolated. Conversely, the interconnecting of secondary and tertiary channels and crevasse splays deposits is moderately high. This suggests a high content of clay-sandy material in the Oligocene sequences.

Keywords: Sequence Stratigraphy, Seismic Stratigraphy, Seismic Attributes, Llanos Orientales Basin, Oligocene.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIV
Lista de abreviaturas	XV
1. Introducción	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Objetivo general.....	1
1.2.3 Objetivos específicos	1
1.3 Área de estudio.....	2
1.4 Datos	2
1.5 Metodología.....	5
1.6 Estado del arte	7
2. Marco geológico regional	9
3. Marco teórico	15
3.1 Estratigrafía de secuencias.....	15
3.2 Atributos sísmicos.....	21
4. Resultados	23
4.1 Análisis estratigráfico de pozos.....	23
4.1.1 Análisis secuencial	29
4.2 Estratigrafía sísmica	37
4.2.1 Secuencia A	40
4.2.2 Secuencia B	42
4.2.3 Carta Cronoestratigráfica.....	45
4.3 Mapas Estructurales	47
4.4 Análisis de atributos sísmicos.....	50
4.5 Integración y análisis de resultados	56
5. Conclusiones	64
A. Anexo: Información de Secuencia de procesamiento de la sísmica 3D	67

B. Anexo: Resultados de Atributos Sísmicos.....	75
Bibliografía	81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1:	Mapa de localización del área de estudio (Departamento del Meta), Cuenca de los Llanos Orientales..... 3
Figura 1-2:	Mapa de localización de los pozos..... 4
Figura 1-3:	Secuencia metodológica propuesta para el proyecto de investigación. 6
Figura 2-1:	Mapa geológico y localización del área de estudio 11
Figura 2-2:	Evolución tectónica de la Cuenca de los Llanos. 12
Figura 2-3:	Columna estratigráfica generalizada del área de trabajo, en la Cuenca de los Llanos Orientales..... 13
Figura 3-1:	Esquema representativo del concepto de estratigrafía de secuencias, la figura superior presenta el concepto de nivel base. 16
Figura 3-2:	Diagrama de las diferentes terminaciones de los reflectores sísmicos y sus respectivos nombres. 18
Figura 3-3:	Determinación de continuidad, amplitud, y frecuencia de las reflexiones sísmicas..... 18
Figura 3-4:	Sistema de códigos para la elaboración de mapas A-B/C y tipos de configuraciones internas para definir la variable C en los mapas AB/C. 19
Figura 3-5:	Características faciales para ambientes de deposición clásticos en un escenario depositacional de plataforma..... 20
Figura 3-6:	Clasificación de los atributos sísmicos. 22
Figura 4-1:	Columnas estratigráficas reconstruidas a partir de rípos, muestras de zanja y registros eléctricos..... 24
Figura 4-2:	Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de las llanuras de inundación indiferenciada en el área de estudio 25
Figura 4-3:	Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de las llanuras de inundación distal en el área de estudio. 25
Figura 4-4:	Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de depósitos de canales distributarios primarios en el área de estudio. 26
Figura 4-5:	Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de depósitos de canales distributarios primarios en el área de estudio. 27
Figura 4-6:	Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de depósitos de canales distributarios primarios en el área de estudio. 27
Figura 4-7:	Análisis estratigráfico basado en cambios de nivel base aplicado al pozo-1 del área de estudio..... 30
Figura 4-8:	Localización de las Correlaciones estratigráficas en el área de estudio. 33

Figura 4-9:	Correlación estratigráfica general Suroeste-Noreste basada en estratigrafía de secuencias.....	34
Figura 4-10:	Correlación estratigráfica detallada Suroeste-Noreste basada en estratigrafía de secuencias para el intervalo Oligoceno.....	35
Figura 4-11:	Correlación estratigráfica detallada Oeste-Este basada en estratigrafía de secuencias para el intervalo Oligoceno.....	36
Figura 4-12:	Secuencias sísmicas identificadas en el área de estudio, sección sísmica en dirección Noreste.....	38
Figura 4-13:	Datos bioestratigráficos de pozos que fueron extrapolados a la sísmica y representados en zonas sombreadas.....	39
Figura 4-14:	Calibración de los pozos a la sísmica, a partir de la generación de sismogramas sintéticos y tablas tiempo profundidad.....	40
Figura 4-15:	Resultados del análisis de facies sísmicas en la Secuencia A.....	41
Figura 4-16:	Sismofacies T-C/Ond identificada para la Secuencia A, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.....	42
Figura 4-17:	Sismofacies C-C/Ond identificada para la Secuencia A, correlacionada con los pozos y su posibles asociaciones electrofaciales.....	42
Figura 4-18:	Mapa de las distintas facies sísmicas (A/B-C) para la Secuencia A mostrando su distribución en el área de estudio.....	43
Figura 4-19:	Resultados del análisis de facies sísmicas en la Secuencia B.....	44
Figura 4-20:	Sismofacies C-C/P a Subp identificada para la Secuencia B, correlacionada con los pozos y su posibles asociaciones electrofaciales.....	45
Figura 4-21:	Sismofacies T-C/P a Subp identificada para la Secuencia B, correlacionada con los pozos y su posibles asociaciones electrofaciales.....	45
Figura 4-22:	Mapa de las distintas facies sísmicas (A/B-C) para la Secuencia B mostrando su distribución en el área de estudio.....	46
Figura 4-23:	Diagrama de Wheeler para el área de estudio, con la ubicación temporal de las dos secuencias sísmicas reconocidas.....	47
Figura 4-24:	Mapa estructural al tope de la Secuencia A (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia cercano a los 28? Ma.).....	48
Figura 4-25:	Mapa estructural al tope de la Secuencia B (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia, cercano a los 23.03 Ma.).....	49
Figura 4-26:	Horizontes sísmicos con los atributos Sweetness y Amplitud RMS en la ventana de tiempo de -1360 Mseg, intervalo con altas respuesta de amplitudes en la Secuencia A.....	52
Figura 4-27:	Horizontes sísmicos con los atributos de Impedancia acústica Relativas y Varianza en la ventana de tiempo 1360 Mseg, intervalo de tiempo en la Secuencia A.....	53
Figura 4-28:	Horizontes sísmicos con los atributos Sweetness y Amplitud RMS en la ventana de tiempo de -1210 Mseg, intervalo de tiempo en la Secuencia B.....	54
Figura 4-29:	Horizontes sísmicos con los atributos de Impedancia acústica Relativas y Varianza en la ventana de tiempo -1210 Mseg, intervalo de tiempo en la Secuencia B.....	55
Figura 4-30:	Mapa de distribución de arenas para la secuencia A (intervalo más arenoso a -1360Mseg).....	57
Figura 4-31:	Mapa de distribución de arenas al tope de la Secuencia A (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia cercano a los 28? Ma.).....	58
Figura 4-32:	Mapa de distribución de arenas para la secuencia B (intervalo más arenoso a -1210Mseg).....	60
Figura 4-33:	Mapa de distribución de arenas al tope de la Secuencia B (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia cercano a los 23.03 Ma.).....	60

Figura 4-34:	Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de complejos de canal con depósitos de llanura de inundación en el área de estudio.....	62
Figura 4-35:	Imagen satelital que muestra un análogo moderno con los distintos elementos arquitecturales encontrados en el área de estudio.	63

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Datos básicos disponibles de los pozos.....	5
Tabla 4-1: Resumen del Análisis Palinológico realizados al Pozo-1.....	29

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

Km	Kilómetros
Km ²	Kilómetros cuadrados
SW	Suroeste
NE	Noreste
Mseg	Milisegundos
AAPG	The American Association of Petroleum Geologists
GSA	The Geological Society of America
A/S	Espacio de Acomodación y aporte sedimentos
LST	Trato de nivel bajo
TST	Trato de nivel transgresivo
HST	Trato de nivel alto
RST	Trato de nivel regresivo
TWT	Tiempo doble
3D	Tridimensional
Ma.	Millones de años

1.Introducción

1.1 Definición del problema

La Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, resulta ser una de las cuencas más prolíficas de Colombia en cuanto a exploración y explotación de Hidrocarburos. Uno de los objetivos importantes a seguir en este trabajo, es mirar la continuidad de los depósitos del Oligoceno, el cual hace parte de un sistema petrolífero comprobado: Gachetá –Carbonera? (j). Sin embargo, debido a las características faciales, no se tiene un seguimiento apropiado de la misma, esto sumado al carácter descriptivo y no interpretativo que ha llevado al poco entendimiento estratigráfico del área. Así, se establecen las siguientes formulaciones: ¿Cómo es la distribución de los cuerpos arenosos del Oligoceno en el área de estudio? ¿La litoestratigrafía permite definir la distribución de cuerpos arenosos o es mejor usar la cronoestratigrafía?

Este proyecto propone realizar un marco estratigráfico secuencial en el área de estudio, utilizando sísmica y pozos, para llegar a conocer la distribución de los cuerpos arenosos, constituyéndose en una oportunidad para ampliar el conocimiento geocientífico de la Cuenca de los Llanos Orientales.

1.2 Objetivo general

Efectuar un análisis sismoestratigráfico, con el fin de precisar la distribución espacio temporal de los cuerpos arenosos del Oligoceno en el sector centro-oeste de la Cuenca de los Llanos Orientales (Municipio de Puerto Gaitán, Meta).

1.2.3 Objetivos específicos

Realizar correlaciones estratigráficas de pozos, identificando las posibles secuencias.

Definir las sismofacies del paquete sedimentario correspondiente al Oligoceno y su relación con la Geología.

Elaborar mapas de distribución de los cuerpos arenosos a partir extracción de atributos.

Generar un mapa con la distribución de los cuerpos arenosos del Oligoceno, que integre toda la información analizada.

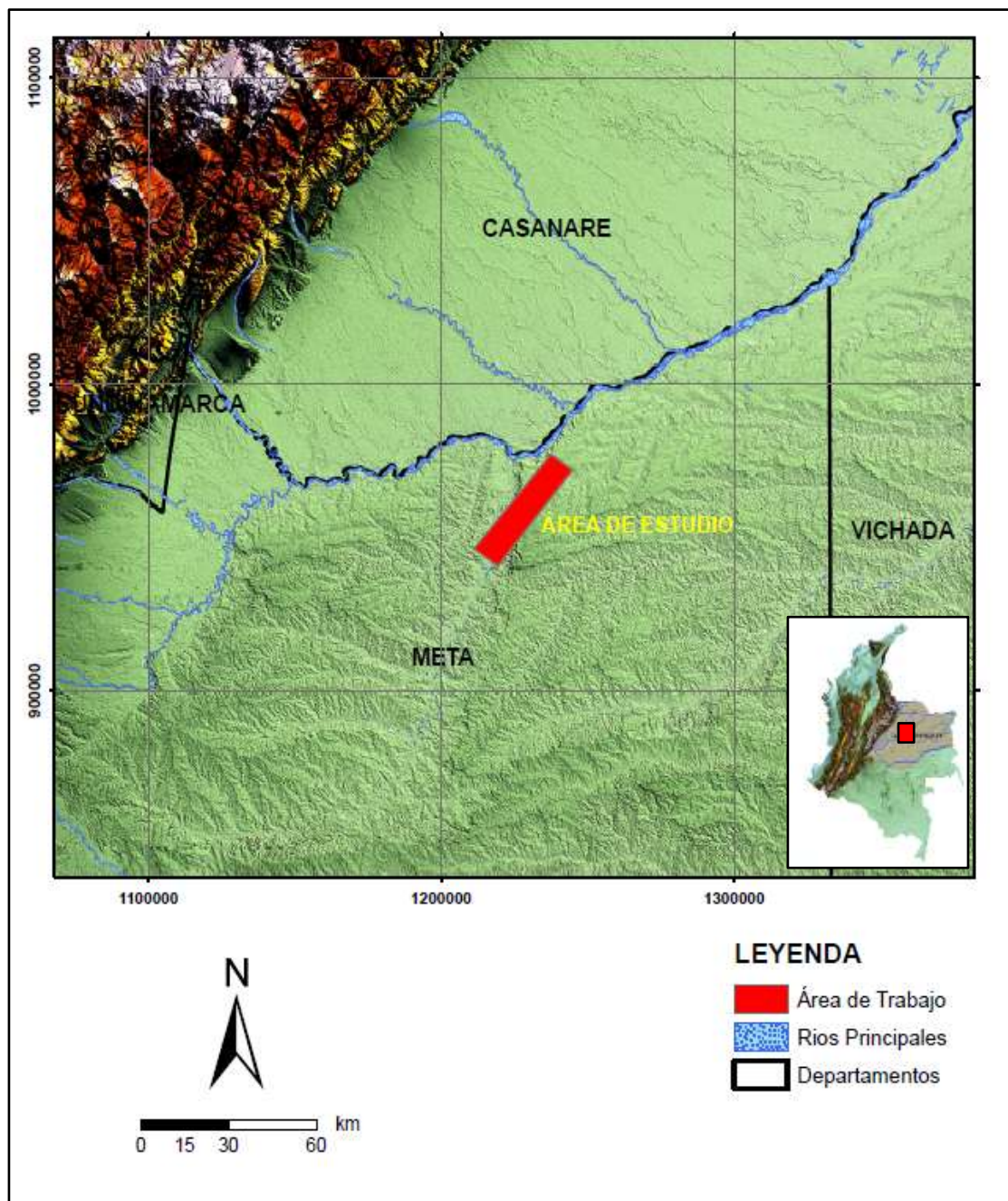
1.3 Área de estudio

El área de estudio está localizada en la Cuenca de los Llanos Orientales, al Centro-Este de Colombia, en el municipio de Puerto Gaitán (Departamento del Meta), aproximadamente a 300 Km de la ciudad de Bogotá, delimitada geográficamente al Oeste, con el Río Manacacías y el Municipio de Puerto Gaitán-Meta, al Norte con el Río Meta y al Este con el departamento del Vichada, ubicación dada en el sistema geográfico de referenciación Magna Sirgas Bogotá (Figura 1-1). El área comprende una extensión de aproximadamente 800 Km².

1.4 Datos

Los datos utilizados comprenden información sísmica, registros de pozo, datos bioestratigráficos e información bibliográfica de estudios anteriores. La información sísmica 3D, tiene una alineación SW a NE con un área aproximada de 800 Km², siendo una migración en tiempo pre-apilado con celdas de 25x25 metros, intervalo de muestreo de 2ms y longitud de registro de 4000ms (Anexo A). Se trabajaron 10 pozos (Figura 1-2), los cuales contaron con un set de registros básicos (Gamma Ray, Sónico, Resistivo profundo, Factor fotoeléctrico y Densidad), además de información histórica como reportes de perforación, imágenes de gráficos compuestos y reportes bioestratigráficos (Tabla 1-1).

Figura 1-1: Mapa de localización del área de estudio (Departamento del Meta), Cuenca de los Llanos Orientales.



Además de la información ya descrita se contó con reportes geológicos, publicaciones de diferentes revistas (AAPG, SEPM y GSA), proyectos de investigación regional como documentación adicional.

Figura 1-2: Mapa de localización de los pozos.

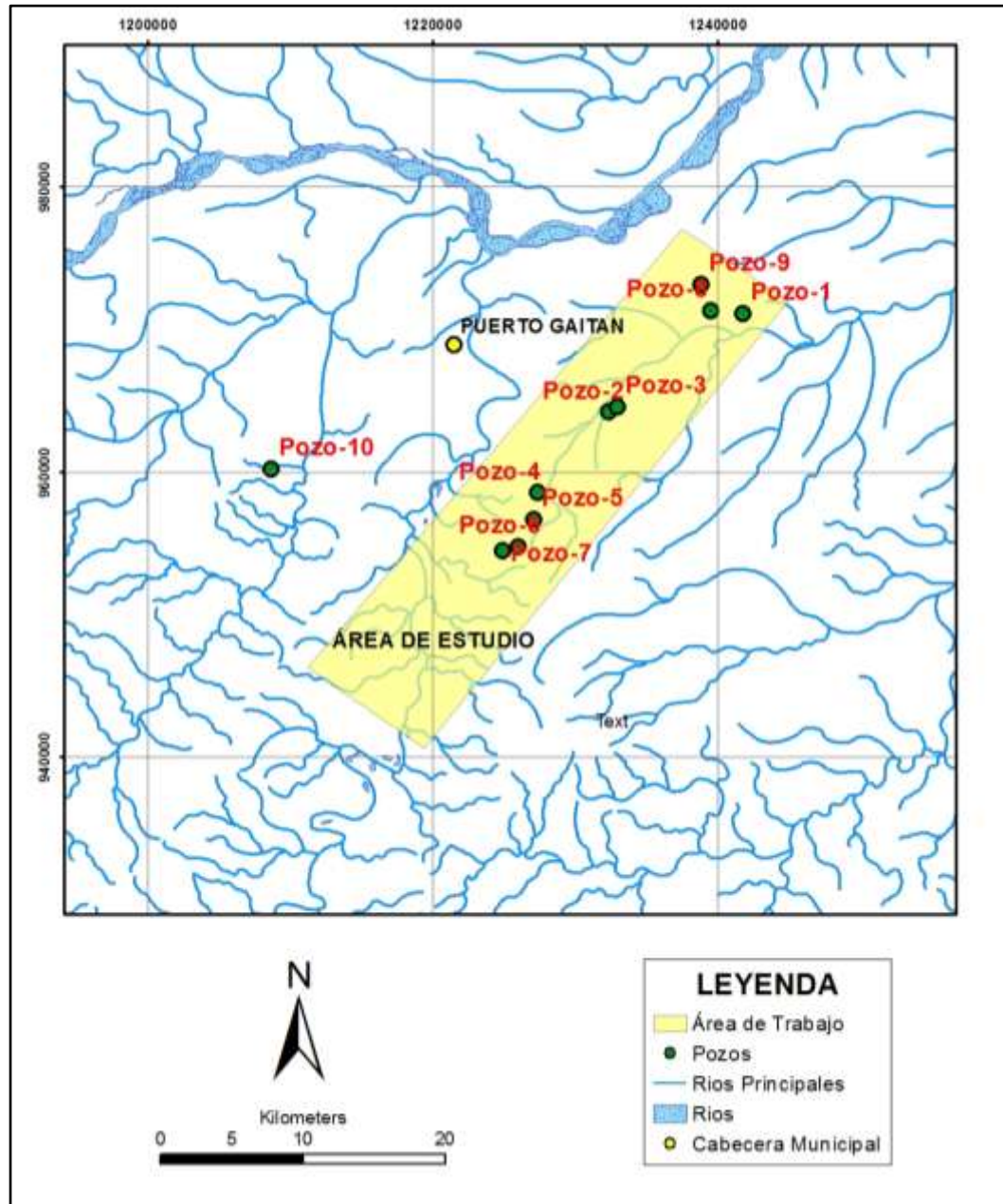


Tabla 1-1: Datos básicos disponibles de los pozos.

Pozo	Coordenada X (metros)	Coordenada Y (metros)	Md (pies)	Calidad Información	Año	EMR (pies)	Bioestratigrafía	Set Registros	registro T/P	Desviado
Pozo-1	1241778.18	971108.79	5639.00	ALTA	1986	597.51	X	X		
Pozo-2	1232315.34	964182.20	5700.00	ALTA	2009	628.41		X		
Pozo-3	1232920.53	964563.28	5550.00	ALTA	2009	634.65		X	X	X
Pozo-4	1227363.39	958512.05	5400.00	ALTA	2002	681.10		X		
Pozo-5	1227084.00	956626.00	6255.00	ALTA	2008	689.00		X	X	X
Pozo-6	1225967.12	954754.90	5447.00	ALTA	2005	710.80		X		
Pozo-7	1224867.67	954460.50	5486.00	ALTA	2003	716.00		X		
Pozo-8	1239516.33	971306.74	5872.00	ALTA	1992	589.24		X		
Pozo-9	1238826.47	973153.69	5919.00	BAJA	2006	645.60		X		
Pozo-10	1208693.40	960206.12	6169.00	ALTA	1989	543.00	X	X	X	

1.5 Metodología

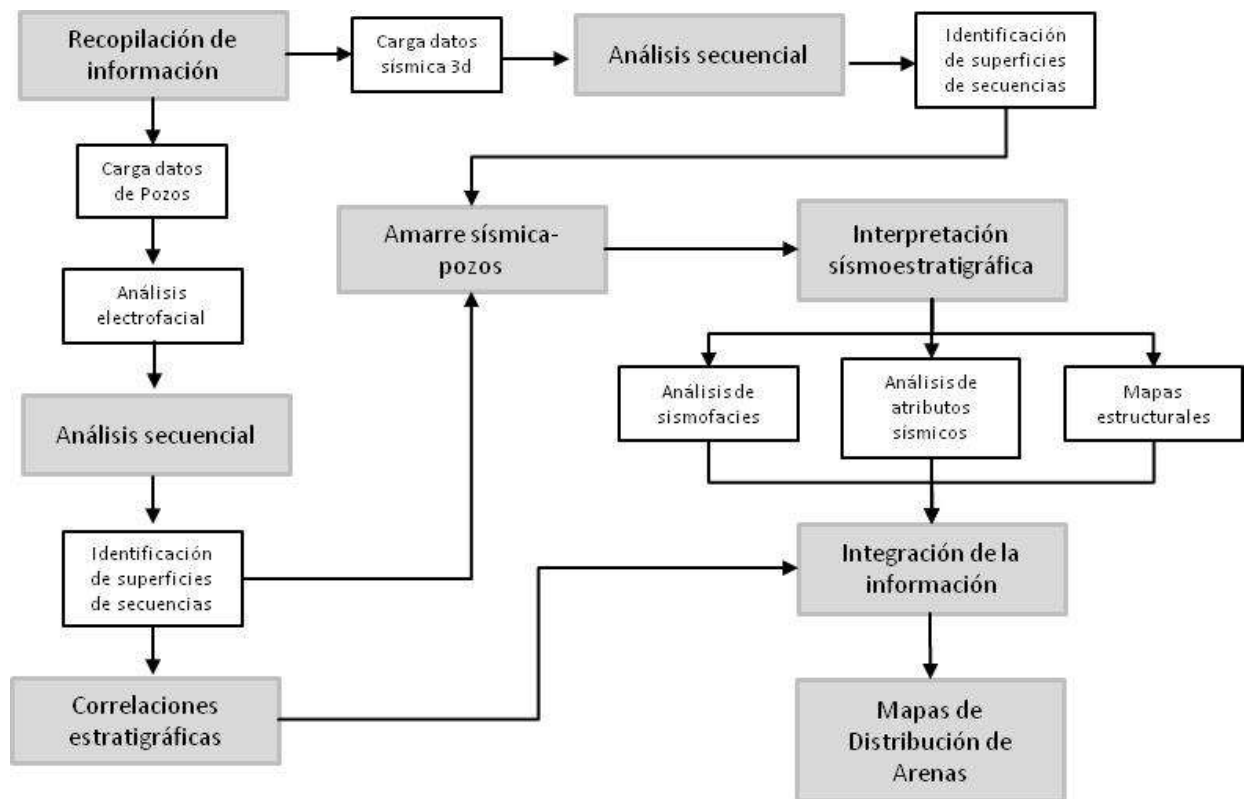
Para lograr los objetivos propuestos, se aplicaron diferentes herramientas que integradas de manera coherente, permitieron un análisis de la información que cumple con los alcances del proyecto.

Inicialmente se realizó la recopilación de la información disponible, análisis de reportes de pozos e información publicada a nivel nacional e internacional. El análisis de la información se centró en estudios anteriores realizados en el área de estudio, enfocados hacia la estratigrafía y la evolución estructural. Además, se buscó información sobre el estado del arte en la aplicación de la estratigrafía secuencial en ambientes continentales y fluviales.

La información sísmica y de pozos fue dispuesta en un software de integración geológica y geofísica. Seguidamente, se reconstruyeron las columnas litológicas de tres pozos siguiendo la metodología de Rider (2002) y Jurado (1989), a partir de datos de registros de pozo y descripción de muestras de zanja y rípios. Con la anterior información se realizó un análisis electrofacial siguiendo la metodología de Stuart *et al.*, (2014). A continuación se definieron las superficies de las secuencias de tercer orden, tomando como base los patrones de apilado, los ciclos de caída y subida del nivel base y la bioestratigrafía; estas superficies de secuencias fueron extrapoladas a la sísmica mediante la realización de sismogramas sintéticos y tablas tiempo profundidad.

Con la anterior información se realizó la estratigrafía sísmica, identificando límites de secuencias sísmicas a través de determinación de inconformidades y sus conformidades correlativas, siguiendo la metodología de *Vail et al.*, (1977). Posteriormente, se realizó un análisis de sismofacies según metodología de *Sangree & Widmier* (1977), que permitió generar mapas A-B/C de facies sísmicas, además de mapas estructurales al tope de las secuencias. A partir de los límites de secuencias sísmicos, se generaron ventanas de tiempo en donde se utilizaron atributos sísmicos los cuales fueron integrados a toda la información ya analizada, para obtener los mapas correspondientes a los cuerpos arenosos del Oligoceno en ésta área de estudio. La secuencia de actividades en términos generales se observa en la Figura 1-3.

Figura 1-3: Secuencia metodológica propuesta para el proyecto de investigación.



1.6 Estado del arte

Sobre esta cuenca se han realizado estudios con componente estratigráfico (Bayona *et al.*, 2007; Bayona, *et al.*, 2008; Fajardo *et al.*, 2000; Cepcolsa, 2013; Santos *et al.*, 2007; Sarmiento, 2011), sin embargo, sobresalen en su mayoría estudios de carácter estructural y tectónico con el objetivo de conocer la evolución geológica de la región (Bayona *et al.*, 2007; Bayona *et al.*, 2008; Cooper *et al.*, 1995; Cortés *et al.*, 2006; Gómez *et al.*, 2005; Mora *et al.*, 2006; Ojeda *et al.*, 2006; Sarmiento, 2001). A su vez, existen trabajos estratigráficos confidenciales llevados a cabo por la industria del petróleo que han sido orientados a la identificación de los elementos del sistema petrolífero, lo que deja entrever una falta de conocimiento geológico en algunas áreas geográficas de la cuenca.

En la Cuenca de los Llanos Orientales se han realizado estudios regionales basados en estratigrafía de secuencias, a continuación se describen los más destacados:

Fajardo *et al.*, (2000) realizaron un modelo estratigráfico para los Llanos y Piedemonte, en donde identificaron y correlacionaron once ciclos estratigráficos de baja frecuencia entre el Cretáceo Tardío al Mioceno medio. En cuanto al intervalo Oligoceno, concluye que se depositaron intercalaciones de arcillolitas, limolitas y arenisca de la Formación Carbonera, reconociendo depósitos de canales fluviales y canales estuarinos, depósitos de areniscas progradantes en llanuras de inundación o en bahías/estuarios y lodolitas de llanura de inundación, lagos, bahías o estuarios. Dentro de la Formación Carbonera se identificaron cinco ciclos estratigráficos, en donde los hem Ciclos de disminución en A/S o eventos progradacionales y que corresponden a las unidades pares (C2, C4, C6, C8 y C10) y los hem Ciclos de aumento en A/S o eventos agradacionales y retrogradacionales que corresponden a las unidades impares (C1, C3, C5, C7 y C9). Haciendo un paralelo con la terminología de Van Wagoner y otros (1988), en donde determinan que las unidades pares corresponden a un “Highstand System Tract” (HST), mientras que las impares hacen parte de un “Transgressive System Tract” (TST).

Reyes (1989) realizó un estudio enfocado geográficamente al Este de la Cuenca de los Llanos Orientales, donde identifica 3 megasecuencias, detallando la megasecuencia Terciaria y haciendo énfasis en la roca reservorio de hidrocarburos.

La megasecuencia Terciaria la subdivide en 8 secuencias de menor orden, identificando para el Oligoceno las secuencias 4, 5, 6, 7 y 8, concluyendo que cada secuencia está constituida por las mayores subidas y caídas del nivel del mar, compuestas por un “Transgressive System Tract” (TST) y un “Highstand System Tract” (HST), que constituyen las rocas reservorios y sellos respectivamente.

Reyes *et al.*, (1998) realizaron una evaluación regional del Meta, siendo un trabajo que integró: Análisis ambiental y estratigráfico de pozos, interpretación sísmica, análisis bioestratigráficos y análisis petrofísicos, desde el Cretáceo tardío a Mioceno medio. Además, desarrollaron una estandarización de la nomenclatura de formaciones en la cuenca. Para el Oligoceno, definieron cinco ciclos estratigráficos de baja frecuencia en donde determinan las superficies de los topes y bases de cada ciclo, que corresponden consecutivamente del C1 al C10, las superficies de las unidades pares se interpretan como eventos de disminución A/S sugiriendo “Highstand System Tract” (HST), mientras que las unidades impares sugieren un “Transgressive System Tract” (TST).

Los estudios anteriores responden a trabajos de estratigrafía de secuencias a nivel regional, sin embargo, el presente estudio aborda un trabajo con mayor detalle, logrando establecer una interpretación más refinada de los distintos eventos interpretados en el área de estudio.

2. Marco geológico regional

La Cuenca de Los Llanos Orientales es de tipo pericratónica, está localizada en la región oriental de Colombia y tiene una extensión de aproximadamente 190.000Km². Geológicamente, está limitada al sur por el Arco de Guaviare o saliente del Vaupés, al occidente por la Cordillera Oriental, al oriente por el Escudo de Guayana y al norte está separada de la Cuenca Barinas-Apure por un alto gravimétrico, situado entre los ríos Apure y Arauca (Gonzalez de Juana *et al.*, 1980).

Se caracteriza por ser una cuenca tipo Antepaís, similar geológicamente a la mayoría de las cuencas subandinas de Sur América, es decir con presencia de sedimentos Cretáceos y Terciarios sobre antiguas rocas Paleozoicas (Cepcolsa, 2013). Según Bayona *et al.*, (2008), la geometría de la cuenca y la sobreposición del traslape de los estratos del Cenozoico sobre rocas más antiguas, indican que la Cuenca de los Llanos constituye un sistema de Antepaís adyacente a un Orógeno, que corresponde a la Cordillera Oriental. Las fases de deformación y la configuración de las cargas tectónicas a lo largo de la Cordillera Oriental han cambiado durante el Maastrichtiano al Cenozoico. Bayona *et al.*, (2007) clarifican el hecho que los estratos del Maastrichtiano al Eoceno, son registrados en la parte más occidental de la Cuenca de los Llanos y en el Piedemonte Llanero, hecho que se observa en la geología de superficie (Figura 2-1).

La cuenca se desarrolla sobre un basamento cristalino perteneciente al Escudo de la Guyana del Precámbrico. Durante el Paleozoico, se depositaron sedimentos clásticos de mar epicontinental en la fosas tectónicas extensionales previamente desarrolladas durante un proceso de “rifting”, que fueron finalizados durante las orogenias Caledoniana y posteriormente la Herciniana. En el Mesozoico, durante el Triásico al Cretácico inferior, la cuenca es sujeta a un “rifting”, probablemente relacionado con la ruptura de Pangea (Jurásico) y más tarde a la extensión Transarco (Cretácico) detrás de un arco magmático

de subducción, evidenciado en cuerpos plutónicos en la cordillera Central, reflejando restos de un arco de subducción Cretácico-Jurásico y que a su vez durante el Cretácico superior evolucionó a una cuenca pasiva de antearco. A finales, del Cretáceo, se inicia un régimen compresional al oeste de la cuenca debido a la acreción de la cordillera Occidental con la cordillera Central, desplazándola y levantándola, afectando la cuenca generando espacio de alojamiento para sedimentación marina profunda (Sarmiento, 2011).

Durante el Paleoceno, en la edad Eoceno medio continúa la deformación y levantamiento de la Cordillera Central, hasta el Eoceno tardío a Oligoceno temprano, en donde este frente orogénico registra una inversión local del Mesozoico, manifestado en fosas tectónicas extensivas fragmentadas. Durante el Eoceno tardío al Mioceno temprano se evidencia una subsidencia térmica y deflexión regional, que da paso a la deposición de sedimentos continentales a marinos marginales. Durante el Oligoceno al Neógeno el aumento de las tasas de acortamiento generan inversión total del Mesozoico, levantando de ésta forma la Cordillera Oriental, cuya carga tectónica genera hundimientos de flexión en la cuenca, esta orogenia andina disecta la cuenca en dos: La Cuenca de los Llanos Orientales y La Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Finalmente desde el Mioceno al Plioceno, sedimentos marinos a continentales son depositados en la cuenca como producto de la erosión principalmente de la Cordillera Oriental aprovechando el constante hundimiento/flexión de la cuenca (Figura 2.2).

Según Beicip Franlab & Ecopetrol (1995) se diferencian cinco provincias estructurales en la Cuenca de los Llanos Orientales: Arauca, Casanare, Vichada, Meta y Piedemonte Llanero. El área de estudio se encuentra ubicada en la Provincia del Casanare (al centro de la cuenca), la que se haya caracterizada por una extensa zona de plataforma con fallas normales, ésta provincia corresponde a un gran monoclinal inclinado hacia el Oeste, con sistemas de fallas normales antitéticas y en menor proporción sintéticas que afectan toda la secuencia sedimentaria.

Figura 2-1: Mapa geológico y localización del área de estudio (Tomado de Gómez et al., 2007).

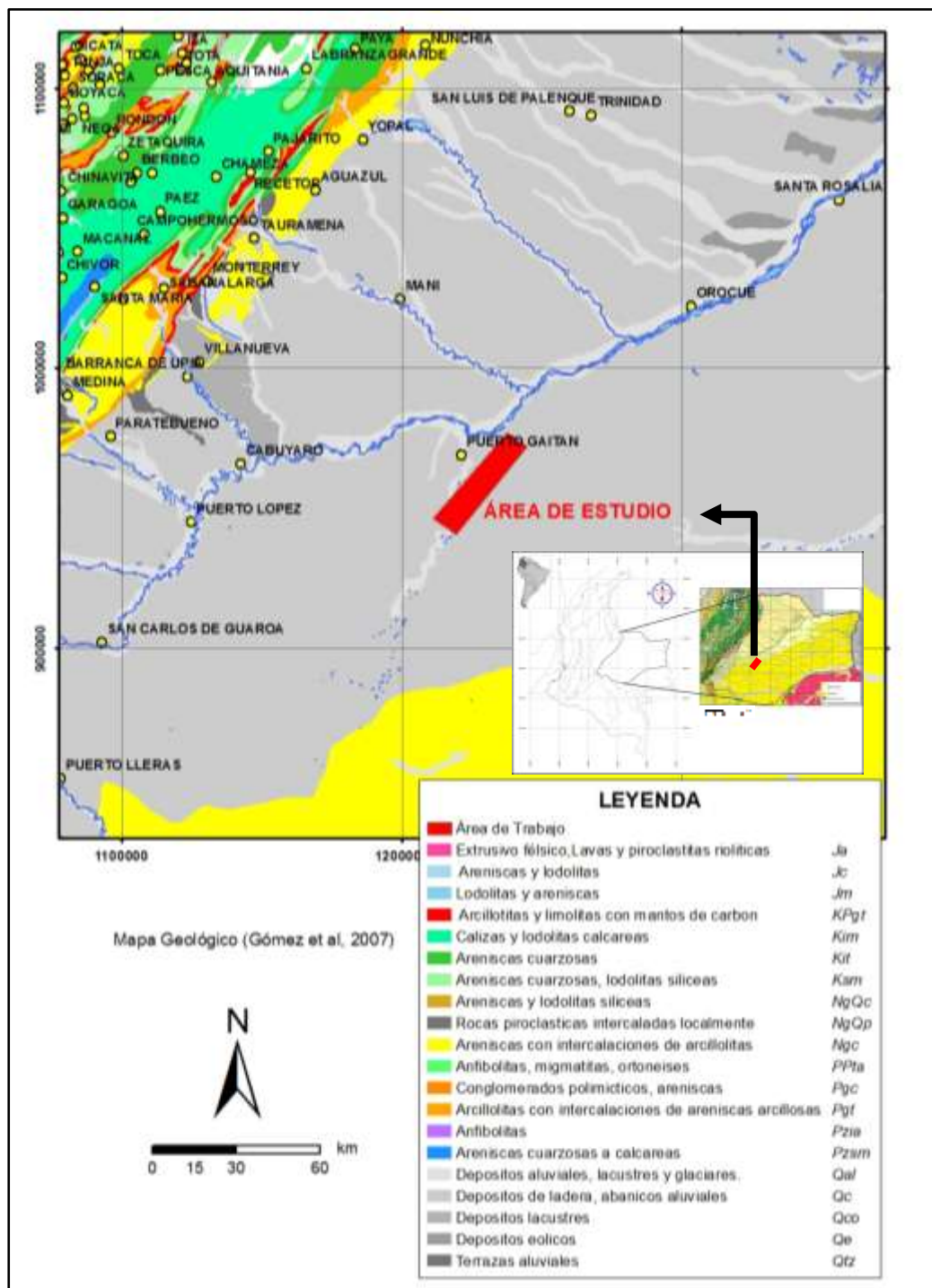
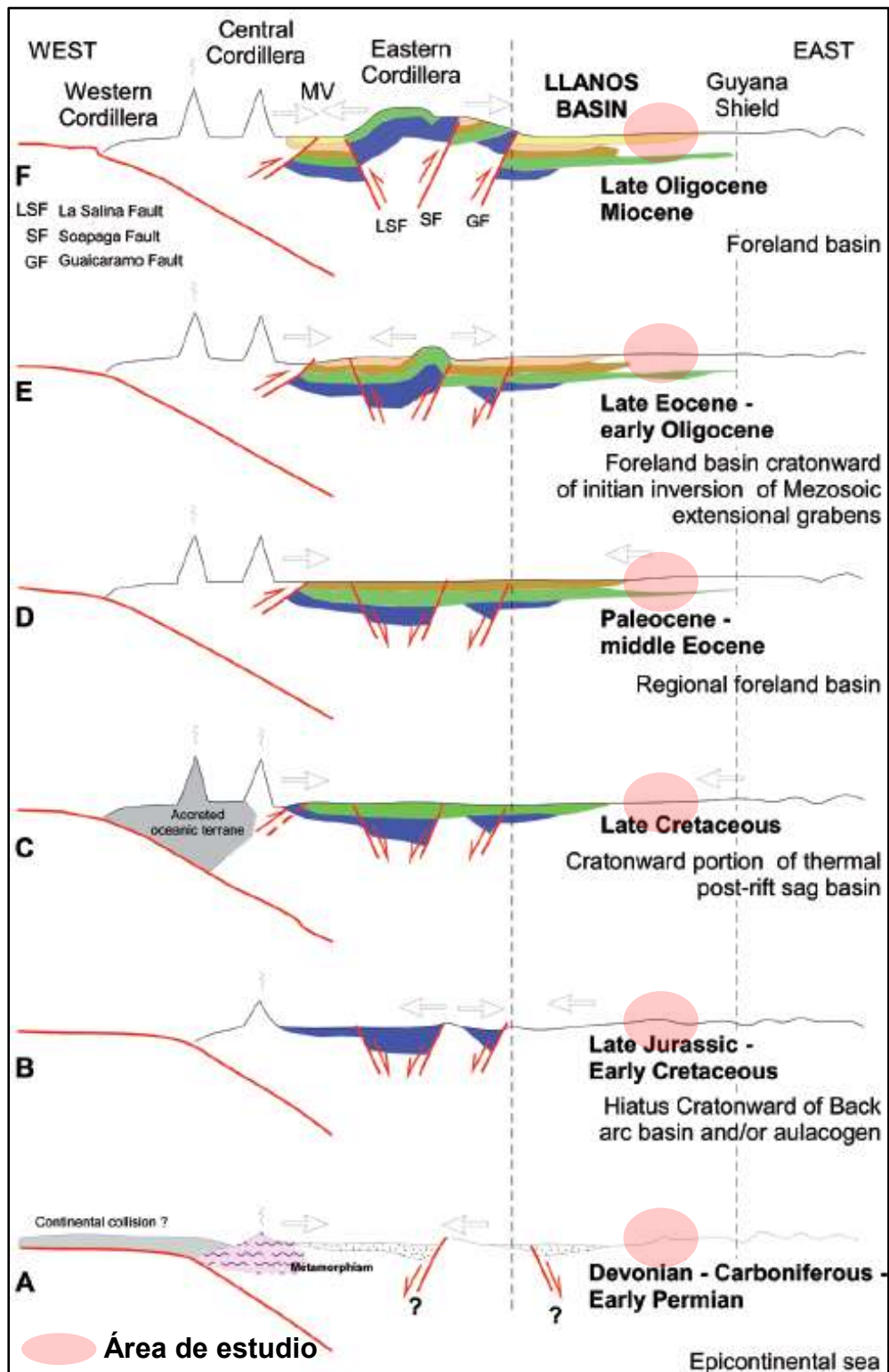
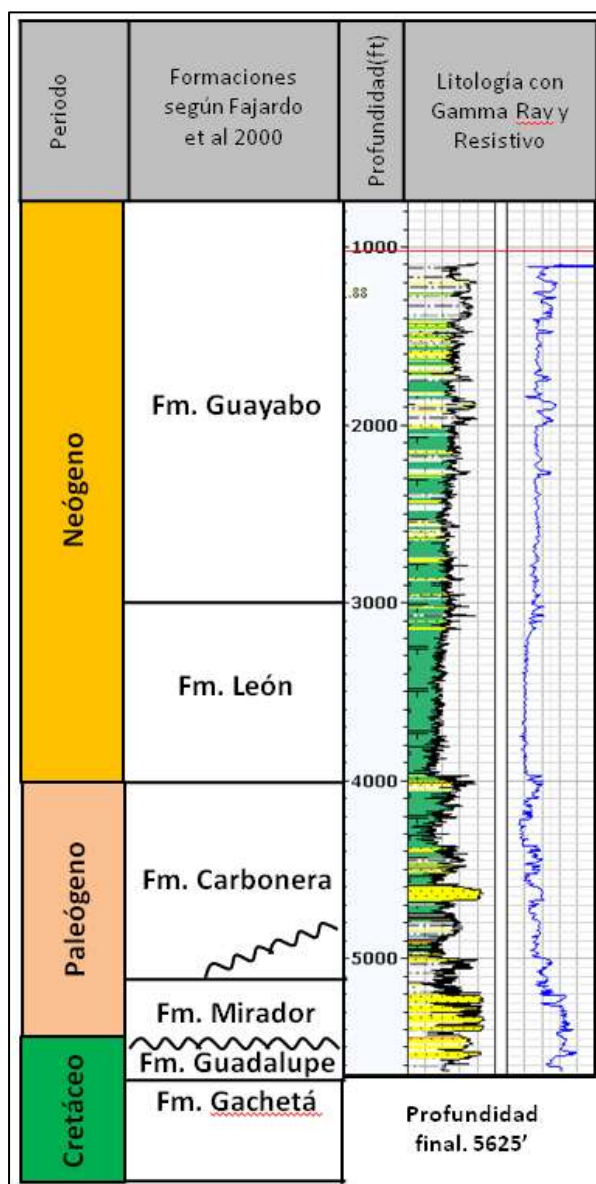


Figura 2-2: Evolución tectónica de la Cuenca de los Llanos Orientales (Tomado de Sarmiento, 2011).



Según Cepcolsa (2013) la estratigrafía local del área de estudio está restringida a un Paleozoico, sobre el cual reposan discordantemente secuencias sedimentarias del Cretáceo superior y del Terciario. En los pozos analizados, se observaron rocas del Cretáceo, Paleógeno y Neógeno, tal y como se muestra en la columna generalizada del área de estudio (Figura 2-3).

Figura 2-3: Columna estratigráfica generalizada del área de trabajo, en la Cuenca de los Llanos Orientales.



En Cepcolsa (2013) indican que todo el registro litológico desde la Formación Barco (Paleoceno) hasta las arenitas de la Formación Mirador (Eoceno medio) al igual que la secuencia inferior del Cretácico, no se presentan en el sector de estudio, debido a pinchamientos y/o no depósito de las mismas.

Para el intervalo de tiempo Oligoceno a Mioceno Temprano, Fajardo *et al.*, (2000) encuentran en la mayor parte de la cuenca, la Formación Carbonera, limitada a la base y al tope por superficies de máxima inundación o de mayor relación A/S, los contactos con la infrayacente Formación Mirador y la suprayacente Formación León son transicionales; sin embargo, hacia el este de la cuenca no aparece el Miembro C8 de esta formación y el contacto con la Formación Mirador es una superficie de inconformidad. Con base en la información de afloramientos y corazones se concluye que la Formación Carbonera se depositó en ambientes continentales y transicionales (Lagunas costeras, bahías o estuarios). A escala regional, Fajardo *et al.*, (2000) consideran que la Formación Carbonera muestra una transición de ambientes más continentales al sureste y al este de la cuenca, y ambientes más transicionales al noroeste y oeste de la cuenca.

3. Marco teórico

3.1 Estratigrafía de secuencias

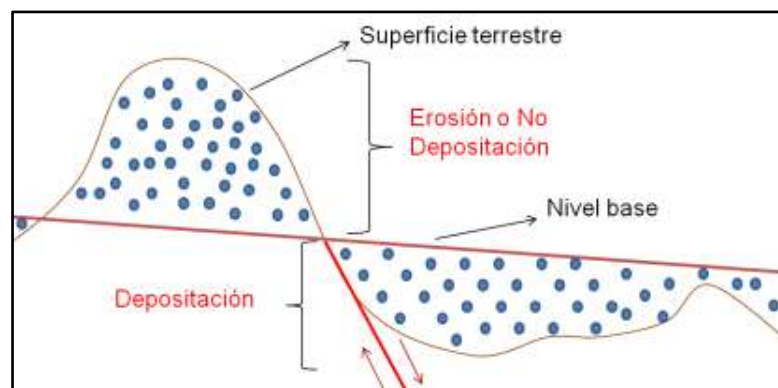
La estratigrafía de secuencias es una herramienta interpretativa más que descriptiva de la información, que permite estudiar la respuesta sedimentaria de una cuenca, la cual se origina por las variaciones del nivel base, es decir, relación espacio de acomodación y suministro de sedimento (A/S) a lo largo del tiempo geológico (Barrell, 1917; Karogodin, 1975) (Figura 3-1). Mediante la identificación y análisis de patrones sedimentarios, que son el reflejo de la interacción entre el espacio de acomodación y el sedimento disponible, se pueden representar los ciclos estratigráficos.

Según Van Wagoner *et al.*, (1988) el ciclo estratigráfico se define entre dos superficies que expresen la máxima relación entre el espacio de acomodación y el suministro de sedimentos (A/S). La definición de éste tipo de ciclo estratigráfico obedece a que los límites cronoestratigráficos se localizan casi siempre en o cerca de las máximas relaciones de A/S, éstos máximos pueden coincidir con superficies de máxima inundación. Por otra parte las mínimas relaciones de A/S coinciden con las superficies de inconformidad o pueden marcar también el punto de mayor progradación o somerización en una cuenca.

Por otra parte, la sismoestratigrafía como herramienta metodológica, es básicamente una aproximación geológica a partir de la interpretación estratigráfica de datos sísmicos, en donde las reflexiones sísmicas son generadas por la impedancia acústica (contraste de velocidades y densidades) de las superficies físicas de las rocas, consistiendo básicamente en estratos e inconformidades, que como resultado de su interpretación, conlleva a un registro cronoestratigráfico de patrones deposicionales y estructurales (Mitchum *et al.*, 1977). La unidad básica de análisis en la estratigrafía sísmica, es la

secuencia sísmica, la cual corresponde a una secuencia deposicional identificada sobre la sísmica. Esta es una sucesión de reflexiones las cuales están genéticamente relacionadas y limitadas por inconformidades o conformidades relativas. En Mitchum *et al.*, (1977) aclaran que las secuencias sísmicas tienen todas las propiedades de las secuencias deposicionales, sujetas sólo a que esas propiedades, pueden ser reconocidas e interpretadas a partir de las reflexiones sísmicas.

Figura 3-1: Esquema representativo del concepto de estratigrafía de secuencias, la figura superior presenta el concepto de nivel base (Barrell, 1917 y Karogodin, 1975).



Las secuencias sísmicas son cronoestratigráficamente significativas y ellas proveen un excelente marco para realizar un análisis estratigráfico. Vail *et al.*, (1977) consideran la curva eustática como una herramienta de correlación global. Esta presunción asume que la curva global del nivel del mar es el único agente que genera límites de secuencias. Sin embargo, Escalante (2005) considera que los procesos que generan los límites de secuencias son más complejos, otros factores como la tectónica, el flujo de sedimentos, la compensación isostática y la compactación afectan directamente el nivel relativo del mar y el nivel base en las cuencas. Posamentier & Allen (1993) ratifican el hecho, que las secuencias deposicionales en cuencas antepaís, están controladas por una subsidencia producto de una tectónica activa, que generan dos tectonosecuencias una en la zona proximal y la otra en la zona distal, con respecto al margen de la cuenca.

Según Posamentier *et al.*, (1988) indican que en una secuencia sísmica se presentan una sucesión de sistemas deposicionales genéticamente relacionados, cuya interpretación puede indicar durante cuál o cuáles cambios eustáticos dieron origen a su depósito. A continuación se describen los tres tipos de sistemas:

El trato de nivel bajo (LST), el cual incluye depósitos que son acumulados durante la caída de nivel relativo de nivel del mar. Este trato de sistema es depositado directamente sobre la superficie que indica la mayor caída del nivel del mar.

El trato de nivel transgresivo (TST), comprende depósitos acumulados al iniciar la transgresión marina, caracterizado por una mayor relación de A/S debido al incremento del espacio de acomodación.

El trato de nivel alto (HST), es el evento resultante durante la etapa final de la máxima inundación, cambiando el régimen de deposición y disposición de los sedimentos.

Mediante la disposición de los reflectores sísmicos es posible determinar las diferentes geometrías, las cuales pueden ser asociadas a rasgos geológicos. Sin embargo, se hace necesario determinar cuáles son las terminaciones que se presentan en ellos (Figura 3-2). Así se tienen terminaciones en “downlap” visibles en la base de la progradación de las clinofomas, terminaciones en “onlap” que son de bajo ángulo y en contra de una superficie sísmica de mayor pendiente, terminaciones en “toplap” inclinadas en contra de una superficie sísmica suprayacente de bajo ángulo y las truncaciones que son terminaciones inclinadas contra una superficie erosional suprayacente.

Complementariamente y según metodología propuesta por Sangree & Widmier (1977), con el fin de crear mapas A-B/C para el reconocimiento de facies sísmicas, se analizaron propiedades de las reflexiones sísmicas, tomando en cuenta criterios como: Amplitud, continuidad, frecuencia (Figura 3-3), el patrón interno de las reflexiones (Figura 3-4) y la forma externa dominante en la secuencia (Figura 3-5).

Figura 3-2: Diagrama de las diferentes terminaciones de los reflectores sísmicos y sus respectivos nombres (Tomado de Vail *et al.*, 1977).

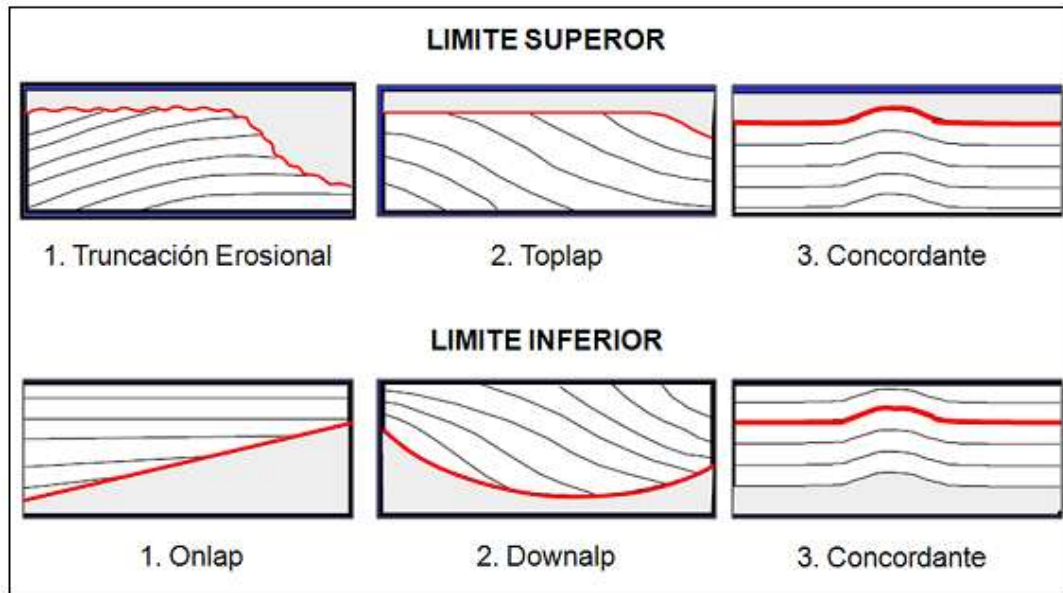


Figura 3-3: Determinación de continuidad, amplitud, y frecuencia de las reflexiones sísmicas (Tomado de Sangree & Widmier, 1977).

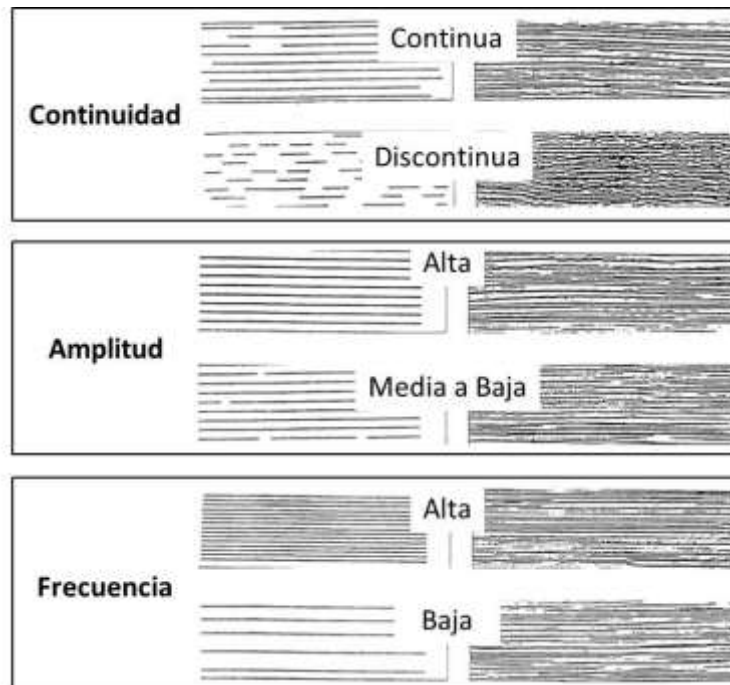





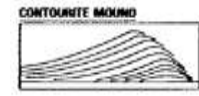




Figura 3-4: Sistema de códigos para la elaboración de mapas A-B/C y tipos de configuraciones internas para definir la variable C en los mapas AB/C (Tomado de Mitchum *et al.*, 1977).

CODIGOS DEL SISTEMA A-B/C	
TERMINACIONES LIMITE SUPERIOR (A)	
TRUNCACIÓN EROSIONAL (Te)	(Te)
(TOPLAP)	(Top)
CONCORDANTE	(C)
TERMINACIONES LIMITE INFERIOR (B)	
(ONLAP)	(On)
(DOWNLAP)	(Dwn)
CONCORDANTE	(C)
CONFIGURACIÓN INTERNA (C)	
PARALELA	(P)
DIVERGENTE	(D)
CAOTICO	(C)
ONDULADA	(W)
DIVERGENTE (MOUNDED)	(DM)
(MOUNDEN)	(M)
PROGRADACIÓN OBLICUA	(Ob)
PROGRADACIÓN SIGMOIDAL	(SIG)
REFLEXIONES LIBRES	(Rf)
(SHINGLED)	(Sh)

CONFIGURACIÓN DE REFLECTORES (DENTRO DE LAS SECUENCIAS)	
CONFIGURACIONES PRINCIPALES	
PARALELA	
SUBPARALELA	
DIVERGENTE	
CLINIFORMAS PROGRADACIONALES	
SIGMOIDE	
OBLICUA	
(COMPLEX) SIGMOIDE-OBLICUA	
(SHINGLED)	
CLINIFORMAS (HUMMOKY)	
CAÓTICA	
REFLEXIONES LIBRES	
POR AGRUPACIÓN	
LISAS	(HUMMOKY)
ONDULADAS	LENTICULAR
REGULARES	INTERRUMPIDAS
IRREGULARES	(CONTORTED)
UNIFORMES	
VARIABLES	

Figura 3-5: Características faciales para ambientes de deposición clásticos en un escenario depositacional de plataforma (Modificado de Sangree & Widmier, 1977).

UNIDAD DE FACIES SISMICAS	AMBIENTE	FORMA EXTERNA	REFLEXIONES EN LOS LIMITES	CONFIGURACION INTERNA	AMPLITUD	UNIDAD DE FACIES SISMICAS
1. Alta continuidad / alta amplitud	Las olas transportan clastos marinos someros y depósitos parálícos.	Láminas	Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap"	Paralelo a divergente	Rel. Alto pero variable	
2. Discontinuo a continuo	(a) Clastos marinos depositados por baja energía con corrientes turbidíticas o por olas. (b) Clastos con transporte fluvial cerca a la costa.	Láminas Láminas	Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap" Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap"	Paralelo a divergente Paralelo a divergente	Muy bajo a bajo Bajo	
3. Amplitud variable discontinua	Depósitos de clastos no marinos por ríos y procesos marinos marginales.	Láminas	Tope concordante base concordante o moderado "onlap" o "downlap"	Paralelo a divergente	Bajo a alto, variable con frecuentes discontinuidades de altas amplitudes	
4. Continua a ondulosa variable	Complejos deltas de plataforma.	Ondula que pueden ser elongada	Tope concordante y suaves "downlap" a la base	Ondulosa, sigmoidal y divergente	Variable. Frecuentemente bajo con discontinuidades locales de altas amplitudes	
5. Cobertura de láminas	Depósitos marinos profundos hemipelágicos.	Cobertura de láminas	Tope concordante. Base concordante o suave "onlap"	Paralelo	Relativamente bajo a moderado	
6. Talud del frente de llenado	Complejos sedimentos de aguas profundas frecuentemente relacionados con abanicos submarinos.	Grandes abanicos	Tope concordante con "Onlaps" buzando hacia arriba, and "downlaps" buzando hacia abajo	Paralelo a subparalelo	Bajo a moderado	
7. Llenado de "Onlap"	Depósitos de Corrientes turbidíticas a velocidad Relativamente baja.	Llenado de cuenca, fosa, canal, and frente de talud	Usualmente tope concordante y base "onlap"	Varía entre divergente, pequeñas Colinas a caótico	Variable	 
8. Pequeñas colinas (abanicos complejos)	Complejos de aguas profundas frecuentemente en desembocaduras de abanicos submarinos. Incluye masas turbidíticas y depósitos hemipelágicos. Relacionado a grandes sistemas de drenaje subaéreos.	Abanico 	"Onlap" de unidades suprayacente, con base "downlap" 		Variable, tiende a ser bajo. Frecuentemente decrece con el incremento de la profundidad. Absorción de alta energía	
9. Colinas	Complejos sedimentos de aguas profundas Depósitos Corrientes marinas profundas probablemente compuestas por granos finos.	Colinas elongadas	Tope truncado /concordante. Base "downlap"	Colinas asimétricas	Variable	
10. Colinada	Depósitos de Corrientes turbidíticas con relativa alta velocidad.	Llenado de Cuenca, fosa, canal, and frente de talud	Tope concordante o truncado por erosión. Base "onlap"	Colinas irregulares a paralelas	Variable. Disminución continua	
Relleno caótico	Sedimentos por gravedad, transporte de masas y corrientes turbidíticas.	Relleno de cuenca, fosa, canal y frente de talud. Patrón de Colinas.	Terminaciones "onlap" unidas en la base pero algunas individuales	Caótico	Rangos altos	

3.2 Atributos sísmicos

Según Taner (2001) los atributos sísmicos son medidas específicas de geometría, cinemática o características estadísticas derivadas de la traza sísmica, en donde los parámetros manejados, pueden ser la velocidad, amplitud, frecuencia y su tasa de cambio con respecto al tiempo y al espacio. Los principales objetivos de estos atributos son proveer información detallada al intérprete de los parámetros estructurales, estratigráficos y litológicos del prospecto sísmico. Estos atributos pueden ser medidos en un instante de tiempo o sobre una ventana; y además, pueden ser medidos tanto en una sola traza como en un conjunto de ellas.

Como una extensa generalización, los atributos de tiempo permiten extraer información estructural, mientras los derivados de la amplitud, proveen información estratigráfica y de reservorio. Los atributos derivados de la frecuencia, aún no son bien entendidos pero existe una amplia tendencia de que ellos proveen alguna información estratigráfica o de reservorio adicional. El atributo más simple y más usado es la amplitud sísmica, usualmente haciendo referencia al máximo valor de amplitud (positivo o negativo a lo largo del horizonte interpretado).

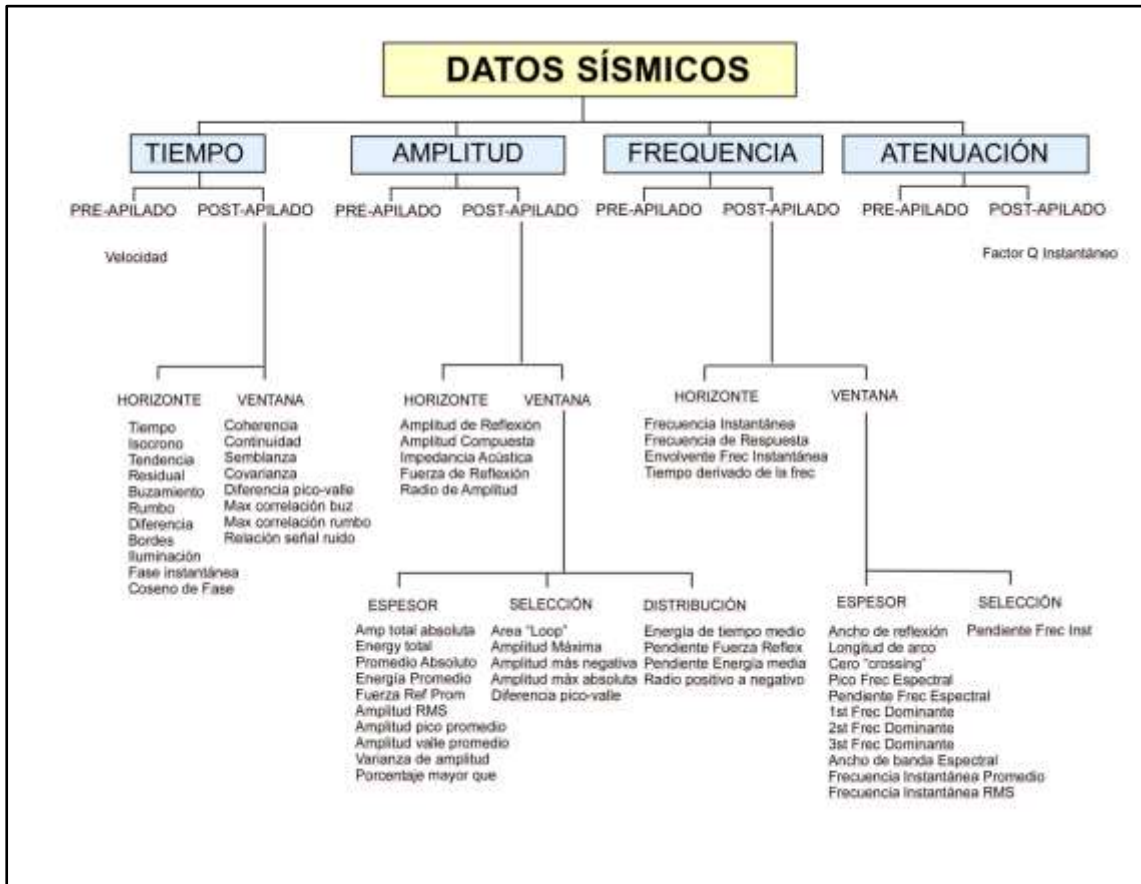
La clasificación de los atributos es muy variada y depende del autor, sin embargo, todos coinciden al clasificarlos según el dominio, ya sean atributos preapilados o postapilado.

Los atributos preapilados: Se calculan antes de apilar las trazas de un registro. Uno de los más conocidos es la técnica de AVO, la cual consiste en estudiar y caracterizar las variaciones de amplitudes sísmicas con respecto al offset o ángulo de incidencia para una familia CDP.

Los atributos postapilado: Son todos esos atributos que se realizan después de la migración, por lo que existe una gran variedad de atributos que constantemente se van creando. Los atributos postapilado pueden ser divididos en “atributos de tipo instantáneo” y “atributos de intervalo” o como “de horizonte” y “de ventana” (Taner *et al.*, 1994). Los atributos instantáneos, producen un valor del atributo para cada muestra de la traza y los

atributos de intervalo como su nombre lo indica, dan un valor de atributo para una ventana de trazas seleccionadas (Brown, 1996) (Figura 3-6).

Figura 3-6: Clasificación de los atributos sísmicos (Tomado de Brown, 1996).



4. Resultados

4.1 Análisis estratigráfico de pozos

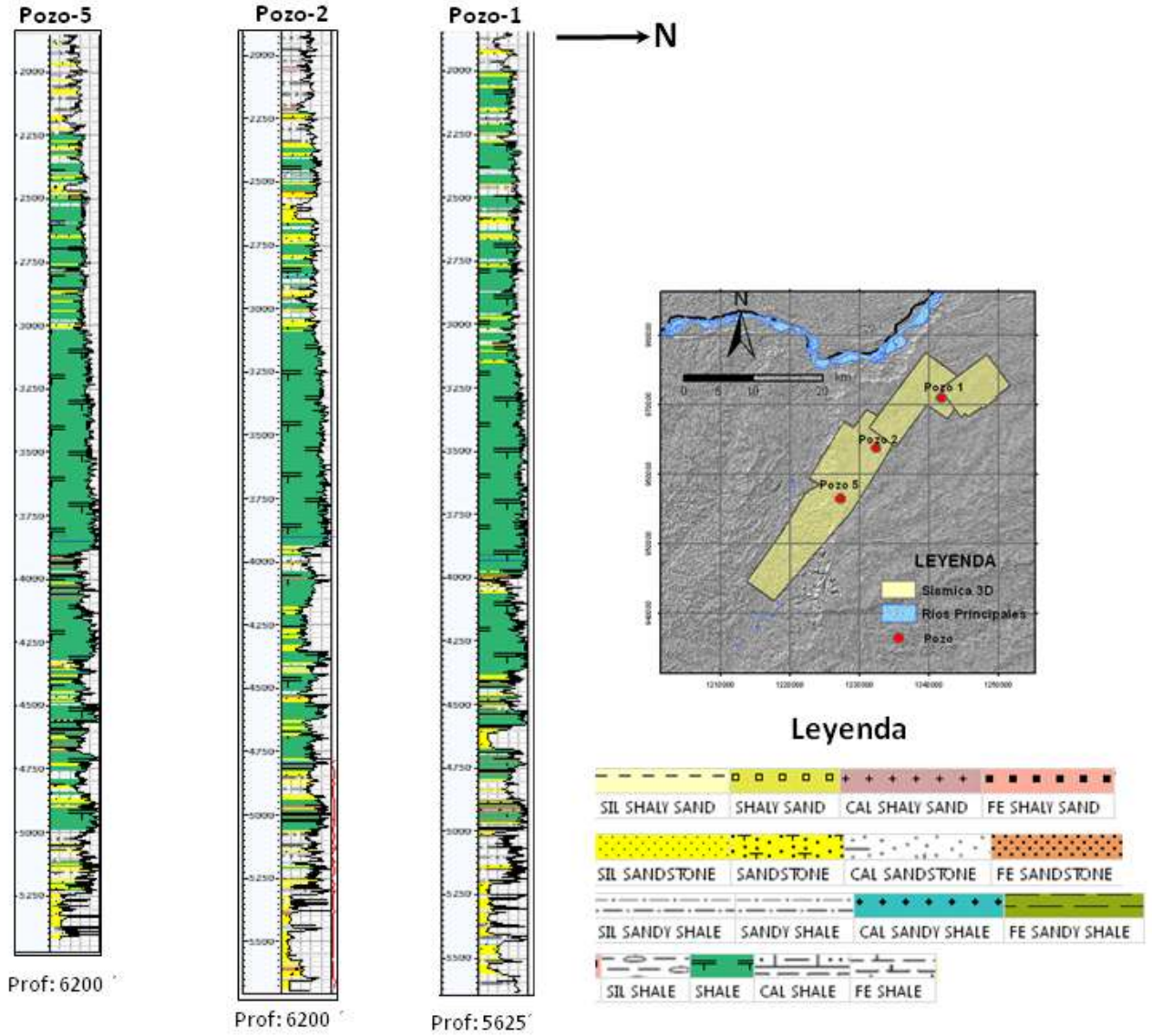
El análisis de los pozos se inició, con la reconstrucción de las columnas estratigráficas a partir de información de ripios, muestras de zanja y registros eléctricos, siguiendo los conceptos y metodología de Rider (2002) y Jurado (1989). Inicialmente se discretizó la descripción de los ripios y/o muestras de zanja, para posteriormente ser correlacionada con los registros del set básico de los pozos: Gamma Ray, Resistivo profundo, Factor Fotoeléctrico, Densidad, Neutrón y Sónico (Figura 4-1).

Al reconstruir las columnas litológicas de los pozos se evidencia la presencia de material carbonoso, este material se discriminó según la descripción de los ripios en: Inclusiones, trazas y porcentaje de material sobre la muestra; estos datos se analizaron junto con los registros de Gamma Ray, Densidad y Sónico, para establecer si son capas de carbón de espesor considerable. Ya establecida la representatividad del material carbonoso en los pozos, se procedió con la metodología de Stuart *et al.*, (2014) quienes utilizan el registro Gamma Ray para definir la litología, de la siguiente manera: Arcillolitas y lodolitas que corresponden a valores mayores a 110 API; Limolitas y limolitas arenosas que corresponden a valores entre 90 y 110 API y las arenas que se identifican con valores de hasta 90 API.

Con la anterior información y clasificando las electrofacies a partir de las formas de los patrones de los registros eléctricos (Gamma Ray y Densidad) y sus asociaciones según Serra (1984), tomando los análogos de Stuart *et al.*, (2014) y Galloway & Hobday (1983), se puede dilucidar preliminarmente los siguientes elementos arquitecturales: Llanura de

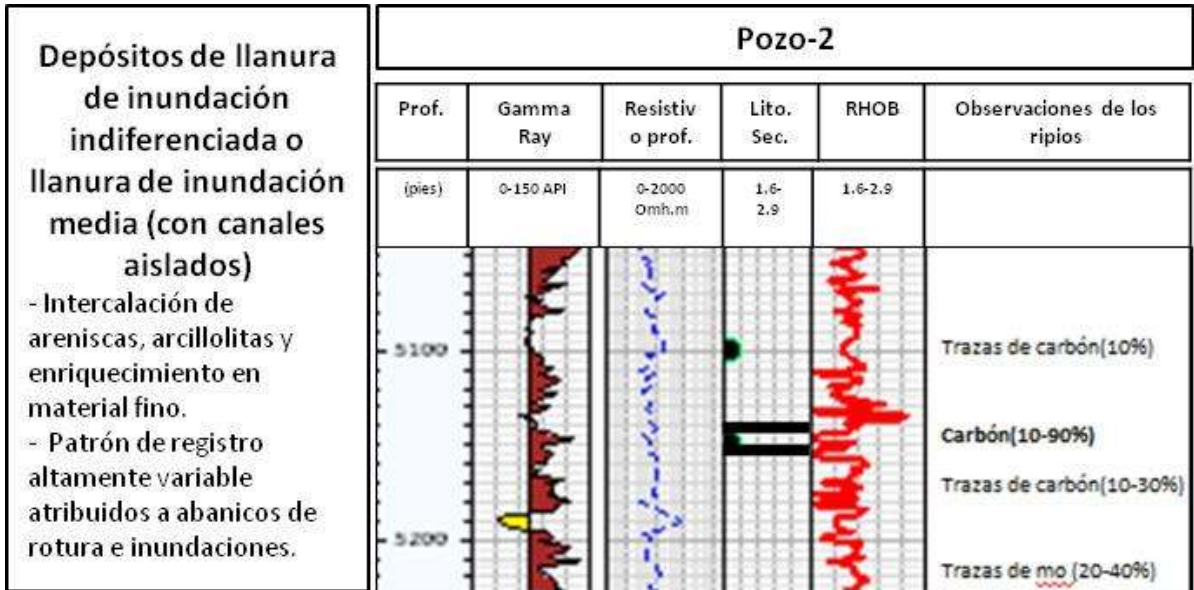
inundación indiferenciada o de llanura de inundación media y distal, canales primarios, secundarios y terciarios.

Figura 4-1. Columnas estratigráficas reconstruidas a partir de ripios, muestras de zanja y registros eléctricos.



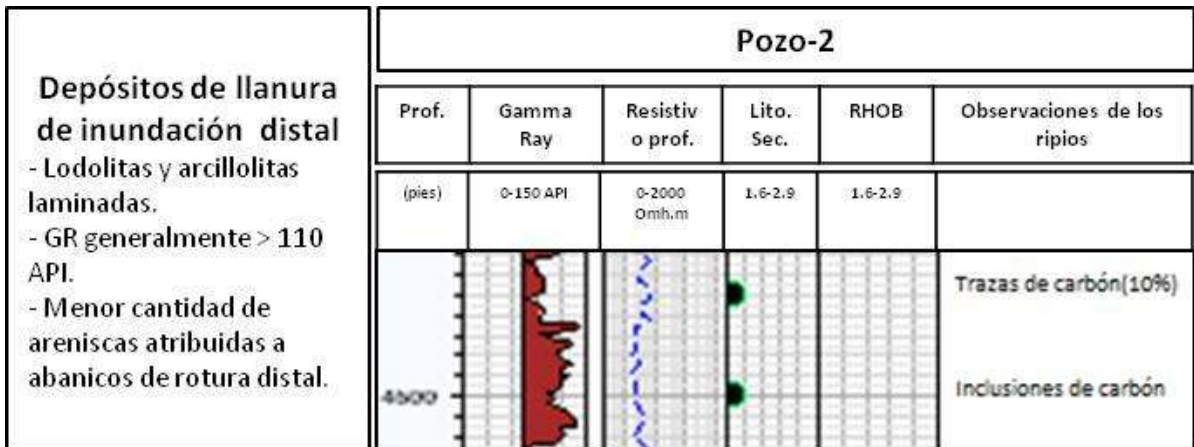
Los depósitos de llanura de inundación indiferenciada o de llanura de inundación media, en los registros se interpretan con valores de Gamma Ray mayores de 110 API, con patrón de registro muy variable y con poca cantidad de arenas, pero alto contenido de limolitas enriquecidas en arcillolitas, que presentan buen contenido de material carbonoso (Figura 4-2).

Figura 4-2: Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de las llanuras de inundación indiferenciada en el área de estudio (Modificado de Stuart *et al.*, 2014).



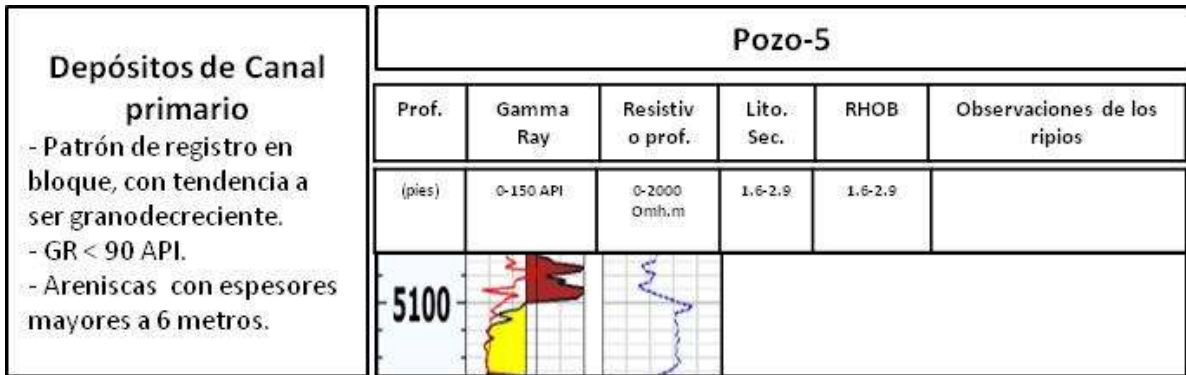
Los depósitos de llanura de inundación distal, en los registros se interpretan con valores de Gamma Ray mayores de 110 API, con patrón variable y alto contenido de limolitas y arcillolitas, ocasionalmente se presentan niveles de arenas que corresponderían a depósitos de desbordamiento, con presencia de material carbonoso (Figura 4-3).

Figura 4-3: Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de las llanuras de inundación distal en el área de estudio (Modificado de Stuart *et al.*, 2014).



Los depósitos de canales distributarios primarios, en los registros se interpretan con valores de Gamma Ray menores de 90 API, con patrón cilíndrico o en bloque, granodecreciente, presenta superficie erodada hacia la base y con espesores de arenas mayores a 6 metros (Figura 4-4).

Figura 4-4: Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de depósitos de canales distributarios primarios en el área de estudio (Modificado de Stuart *et al.*, 2014).



Los depósitos de canales distributarios secundarios, en los registros se interpretan con valores de Gamma Ray menores de 90 API, con patrón cilíndrico o en campana, granodecreciente y con espesores de arenas no muy gruesos que gradan a materiales finos de llanuras de inundación (Figura 4-5).

Los depósitos de canales distributarios terciarios, en los registros se interpretan con valores de Gamma Ray menores de 110 API, con patrón aserrado y en campana, granodecreciente y con delgados niveles arenosos que gradan a areniscas limoarcillosas, si son de gran extensión corresponden a canales maduros con desbordamientos, pero si son cuerpos pequeños estos corresponden a canales inmaduros o abanicos de desbordamiento abruptamente abandonados (Figura 4-6).

Figura 4-5: Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de depósitos de canales distributarios primarios en el área de estudio (Modificado de Stuart *et al.*, 2014).

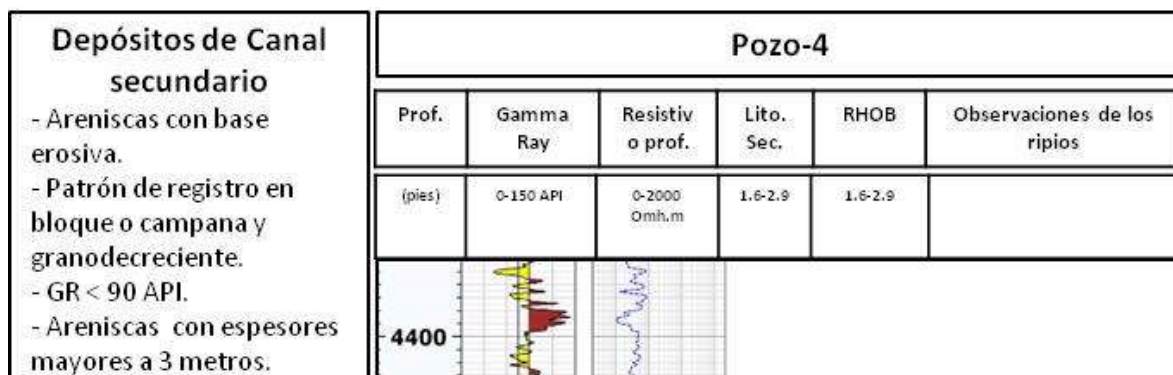
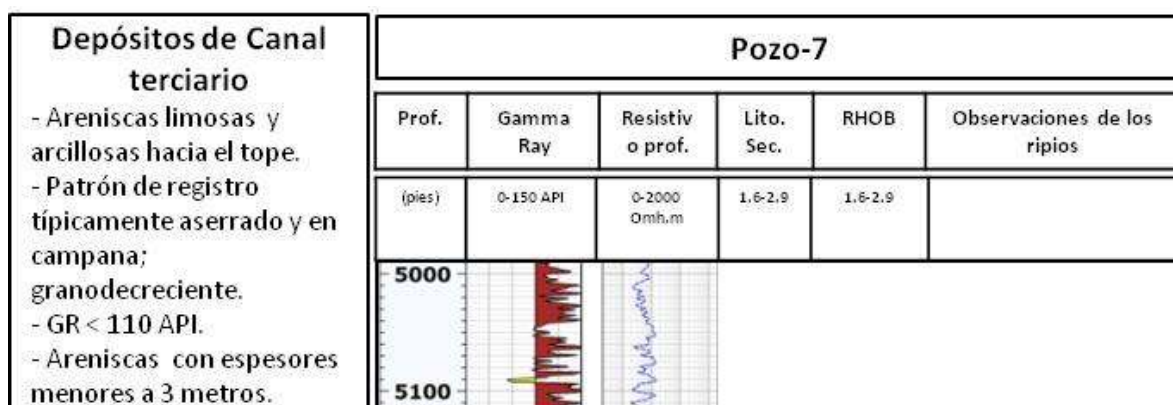


Figura 4-6: Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de depósitos de canales distributarios primarios en el área de estudio (Modificado de Stuart *et al.*, 2014).



En cuanto a los datos bioestratigráficos, se tuvo en cuenta el informe final de perforación del Pozo-1 (Pérez, 1986), que distingue las siguientes edades geológicas a partir de análisis palinológicos:

Profundidad: 2750' a 2863' asociación *Alsophyla* (Mioceno? – Plioceno?), de ambiente Continental. Este intervalo muestra raramente partículas de Kerogeno físicamente degradadas, indicando una posible alta energía de transporte durante la deposición se sugiere una posible llanura de inundación con canales.

Profundidad: 3200' a 3935' asociación *Grimsdalea magnaclavata* y *Crassoretitriletes vanraadshooveni* (Mioceno Temprano (tardío?)) de ambiente marino somero, las

muestras contienen cantidades moderadas de palinomorfos y son ricos en material amorfo y plantas biodegradadas. Indicadores salinos tales como fitoplacton y microforaminíferos presentes, indican ambientes marinos someros.

Profundidad: 4338' a 5092' asociación *Cicatricosisporites dorogensis* y otros (Oligoceno), se puede subdividir en dos intervalos:

Intervalo 4338' a 4989', muestra raramente partículas de Kerogeno físicamente degradadas, indicando una posible alta energía de transporte durante la deposición, se sugiere una posible llanura de inundación con canales.

Intervalo 4989' a 5092', contiene de pobres a moderadas cantidades de materia orgánica, más el Kerogeno físicamente degradado, así como también los palinomorfos. La degradación física del Kerogeno indica transporte anterior a la deposición y se soporta por el relativo pobre contenido de materia orgánica, por lo que se sugiere una llanura de inundación con canales arenosos.

Profundidad: 5143' a 5430' asociación *Echitriporites trianguliformis* y otros (Eoceno tardío) que sugiere una llanura de inundación con canales arenosos. Existen abruptos cambios en el contenido de materia orgánica, los tipos de Kerogeno son muy similares a los anteriores con degradación de partículas de vitrinita e inertita y en menor proporción material de plantas biodegradado.

Profundidad: 5475' a 5515' asociación *Palaeohystrichophora infusorioides* y otros (Campaniano temprano a Santoniano), el contenido orgánico es bueno a moderado y consiste en Kerogeno amorfo con material de plantas biodegradadas. Indicadores salinos son comunes y palinomorfos están presentes en menores cantidades, la presencia de indicadores salinos y pequeños materiales terrestres sugieren un ambiente marino somero.

Profundidad: 5603' asociación *Veryhachium trispinosumotros* (Ordovícico), se obtuvo un buen recobro de material orgánico. La mayoría de Kerogeno consiste de materia sapropélica incluye *acritarcos* y *chitinozarius*. La edad de las muestras se basan en la abundancia de indicadores salinos que sugieren un ambiente marino.

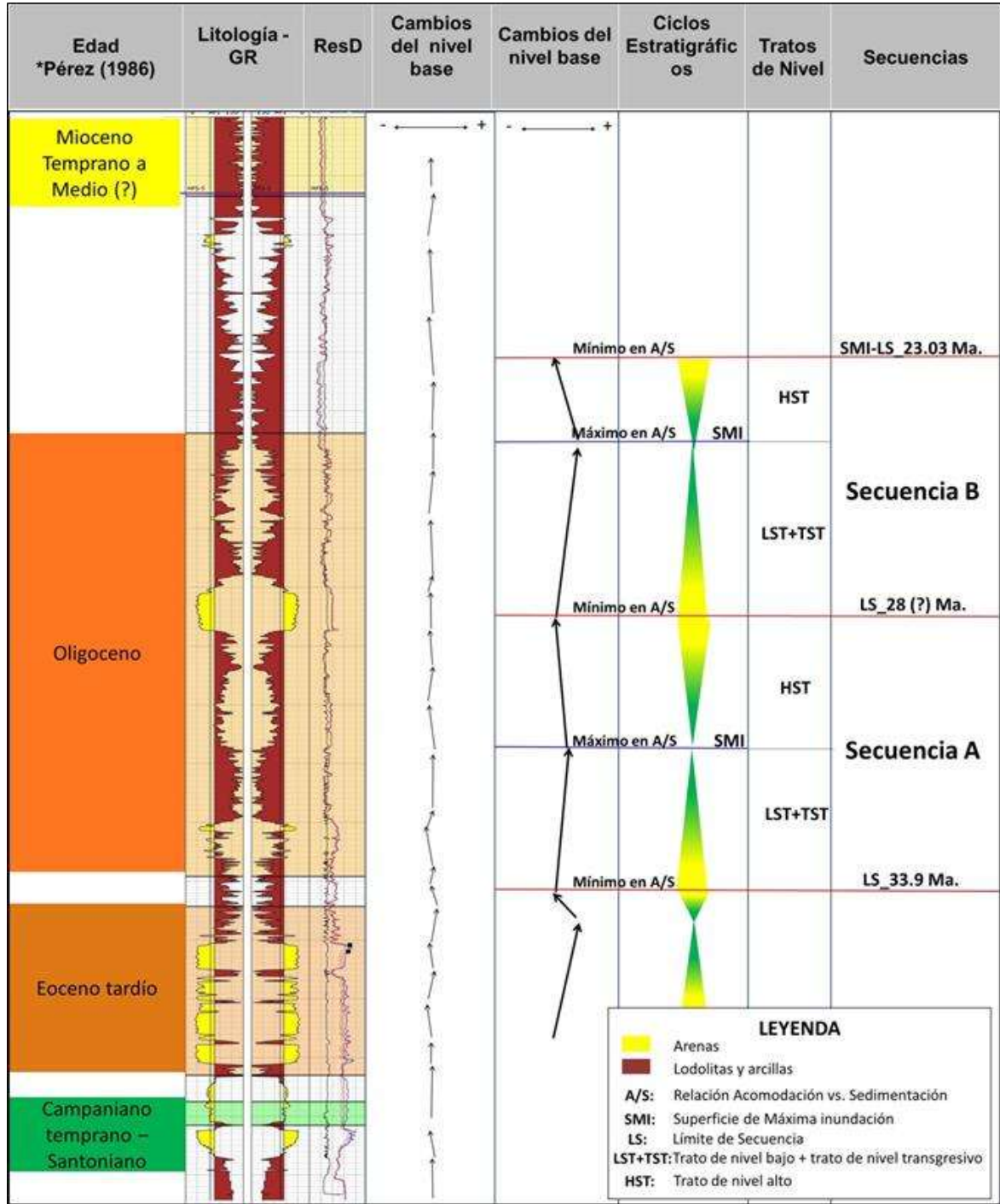
Tabla 4-1: Resumen del Análisis Palinológico realizados al Pozo-1 (Compilado de Pérez, 1986).

Edad	Profundidad en pies	Ambiente Continental	Ambiente Transicional	Ambiente Marino			
				Nerítico Interno (0-75m)	Nerítico Medio (75-130m)	Nerítico Externo (130-200m)	Batial Superior (200-350m)
Mioceno-Plioceno(?)	2750 a 2863	Capas continentales rojizas					
Mioceno Temprano a Medio	3200 a 3935			Marino somero			
Oligoceno	4338 a 4989	Posible llanura de inundación con canales de arenas					
	4338 a 5092	Llanura de inundación con canales de arenas					
Eoceno Tardío	5143 a 5430	Llanura de inundación con canales de arenas					
Campaniano Temprano-Santoniano	5475 a 5515			Marino somero			

4.1.1 Análisis secuencial

A partir de los datos de registros Gamma Ray y columnas litológicas de los pozos en el área, se realizó el análisis estratigráfico basado en los cambios del nivel base o relación espacio de acomodación y suministro de sedimento (A/S). El análisis de los ciclos estratigráficos a partir de los datos de pozo se realizó identificando patrones de apilado del registro litológico, definiendo estos ciclos y confrontándolo al mismo tiempo con el comportamiento del registro de pozo. Al caracterizar el comportamiento de los ciclos estratigráficos, fue posible determinar condiciones de aumentos del nivel base y que en los pozos claramente se identifican como superficies de inundación y máxima inundación, de la misma forma se evidenciaron condiciones de disminución del nivel base y que se pueden observar como superficies erosivas o discordantes. Finalmente, ya con las superficies o marcadores establecidos, se determinaron los ciclos estratigráficos y por ende la secuencias estratigráficas tomando como base los conceptos de Posamentier & Allen (1993) (Figura 4-7).

Figura 4-7: Análisis estratigráfico basado en cambios de nivel base aplicado al pozo-1 del área de estudio.



El marcador ubicado entre la base del Oligoceno y el límite datado bioestratigráficamente como Eoceno tardío, y haciendo un paralelo con la terminología de Vail *et al.*, (1977), éste representaría el límite de secuencia cercano a los 33.9 Ma., por otra parte y teniendo presentes los conceptos de Posamentier & Allen (1993), sobre esta superficie se desarrolla un evento correspondiente a un trato de nivel bajo "LST", en donde los patrones de los registros se muestran progradantes, existiendo una disminución de la relación A/S. El análisis electrofacial sugiere depósitos de canales primarios intercalados con canales secundarios, que hacen transición hacia depósitos de canales terciarios interdigitados con depósitos de desbordamiento y llanuras de inundación. Esta transición de facies permitió la definición de un posterior evento de aumento de la relación A/S e incremento del espacio de acomodación, y que se dispone de manera retrogradante hacia el tope representado y limitado por una superficie de máxima inundación reconocida en toda el área de estudio y que corresponde a un trato de nivel transgresivo "TST", según el análisis electrofacial, representan materiales finos de llanura de inundación con esporádicos canales terciarios.

Posteriormente, se presenta un evento que evidencia una disminución en la relación A/S limitado hacia la base con una superficie de máxima inundación y hacia el tope con una superficie de inconformidad, la cual presenta patrones progradantes, correspondientes a un trato de nivel alto "HST", el análisis de electrofacies sugiere interdigitación de algunos canales secundarios con abundantes canales terciarios, que varía lateralmente a depósitos de desbordamiento con llanuras de inundación y de manera aislada canales primarios hacia el norte del área de estudio.

A continuación, se identifica un marcador que representa un límite de secuencia cercano a los 28 (?) Ma, siendo una superficie que se encuentra en medio del intervalo Oligoceno, claramente identificada en todos los pozos estudiados; sobre ésta superficie discordante se establece una unidad caracterizada por patrones de registros progradantes y que obedecen a una disminución en la relación A/S y que corresponde a un trato de nivel bajo "LST", el análisis de electrofacies presente sugieren una transición de depósitos de canales secundario y terciarios a complejos de depósitos de desbordamientos y llanuras de inundación. Los canales primarios están presentes hacia el norte del área de estudio.

Seguidamente, se encuentra un evento indicador de una mayor relación de A/S debido al incremento del espacio de acomodación, ésta unidad hacia el tope presenta una superficie de máxima inundación reconocida en toda el área de estudio y el límite hacia su base es indiferenciado, los registros presentan patrones retrogradantes, que corresponden a un trato de nivel transgresivo "TST", y que según el análisis electrofacial corresponden principalmente a llanuras de inundación.

Finalmente, se evidencia una nueva disminución en la relación A/S, en donde a la base se encuentra una superficie de máxima inundación y hacia el tope una superficie de inconformidad, ésta última es el marcador que representa el límite de secuencia cercano a los 23.03 Ma, que se definió por el cambio de ciclo estratigráfico y a la cercanía del límite Oligoceno con el intervalo datado como Mioceno temprano a medio (?). Este evento presenta patrones progradantes, que correspondería a un trato de nivel alto "HST", el análisis de electrofacies sugiere una transición de llanuras de inundación a depósitos de desbordamiento interdigitados con esporádicos canales terciarios y de manera aislada canales primarios intercalados con secundarios hacia el centro del área de estudio (Figura 4-7).

Con la información anterior, se realizaron correlaciones estratigráficas en dirección SW a NE y en dirección W a E (Figura 4-8).

Se tomó como datum estratigráfico para estas correlaciones, la superficie de inundación del Mioceno inferior ya que es el evento que se identifica con mayor facilidad y confiabilidad en el área estudiada. En la Figura 4-9, se observa una correlación estratigráfica general, punto de partida para hacer las correlaciones estratigráficas detalladas correspondientes al Oligoceno (Figura 4-10 y 4-11).

Para extrapolar éste análisis estratigráfico a los datos sísmicos, se emplearon los ciclos estratigráficos de tercer orden, ya que son los ciclos con la resolución más apropiada para los datos sísmicos y sus correspondientes marcadores estratigráficos.

Figura 4-8: Localización de las Correlaciones estratigráficas en el área de estudio.

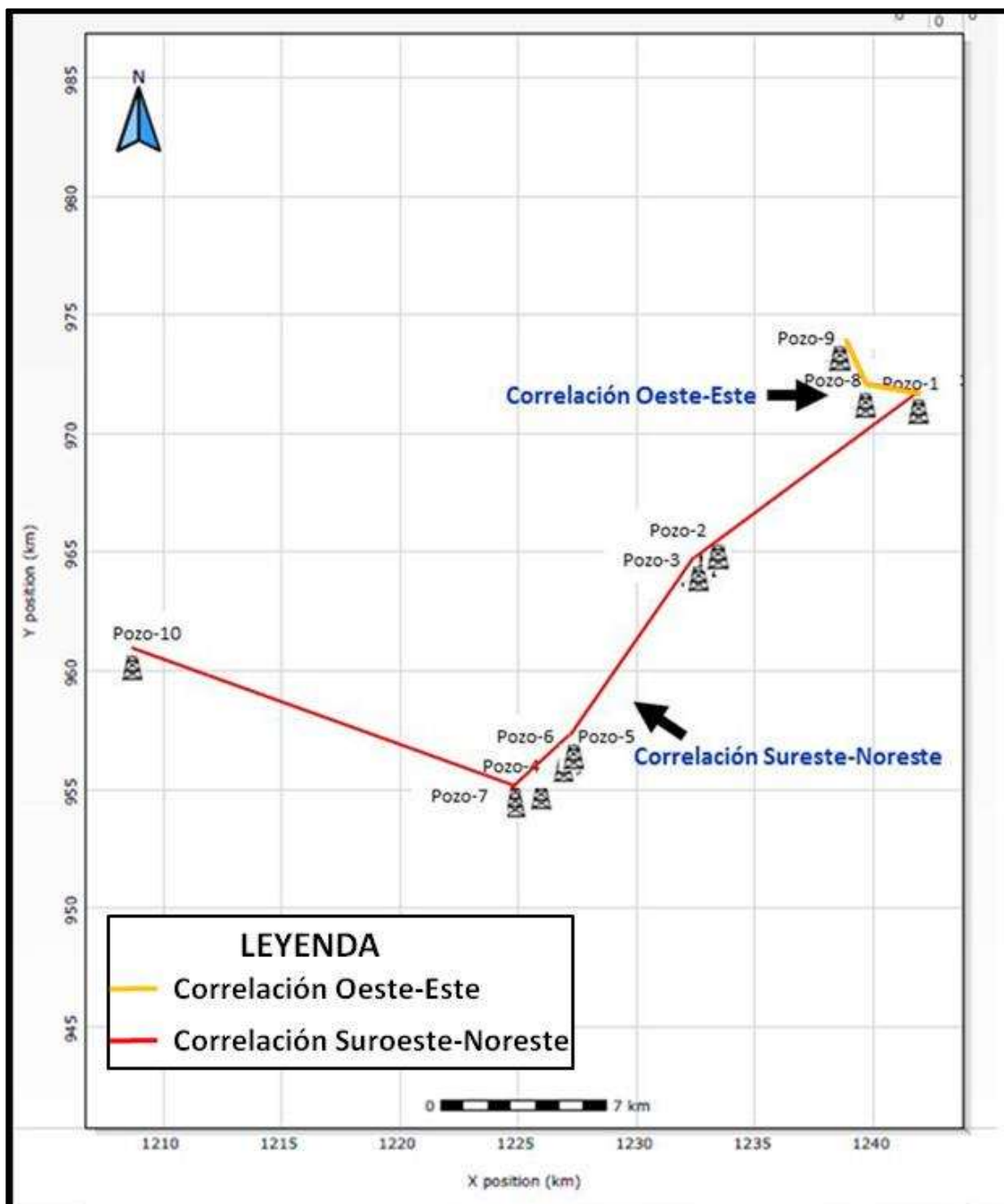


Figura 4-9: Correlación estratigráfica general Suroeste-Noreste basada en estratigrafía de secuencias.

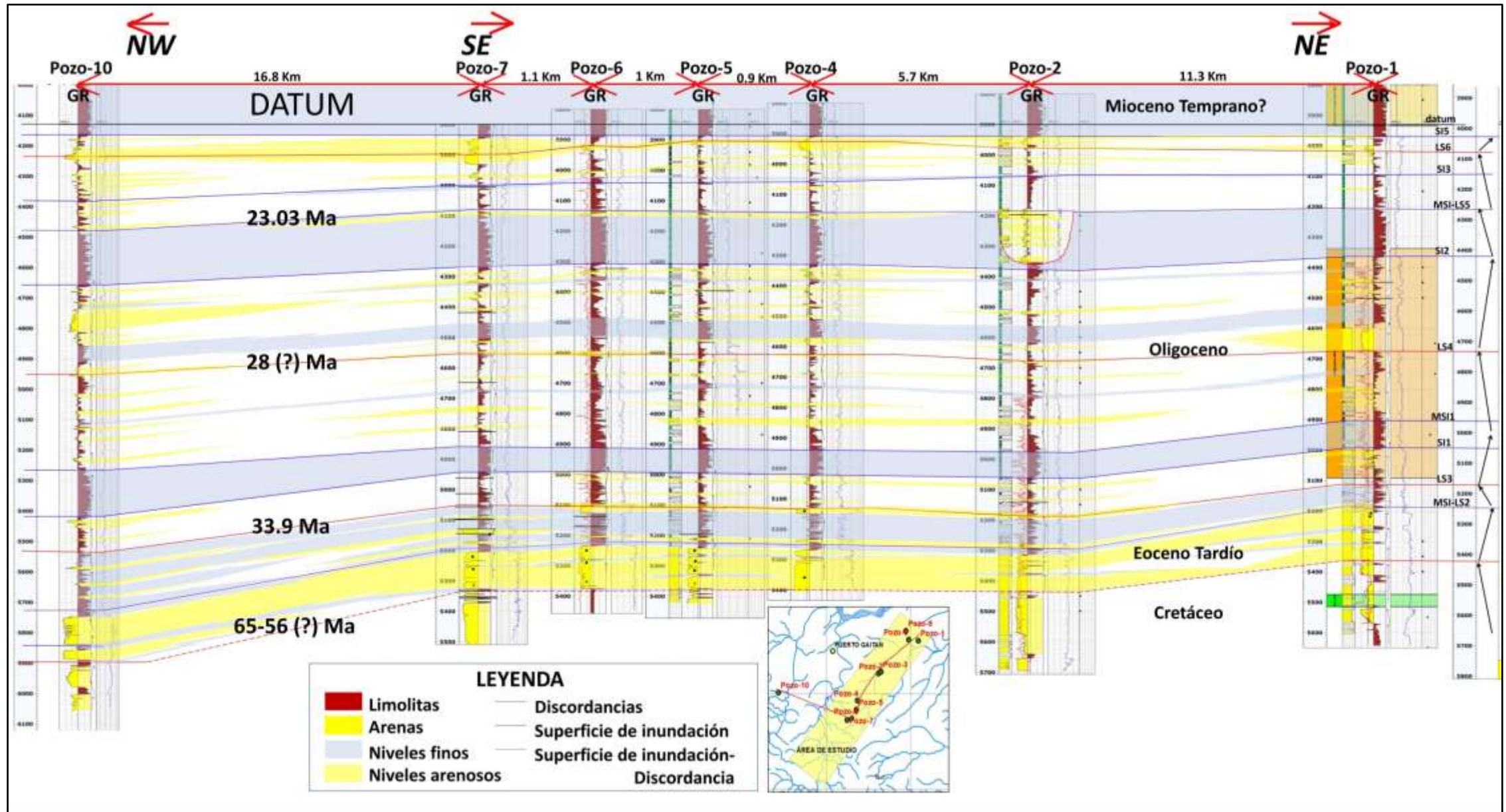


Figura 4-10: Correlación estratigráfica detallada Suroeste-Noreste basada en estratigrafía de secuencias para el intervalo Oligoceno.

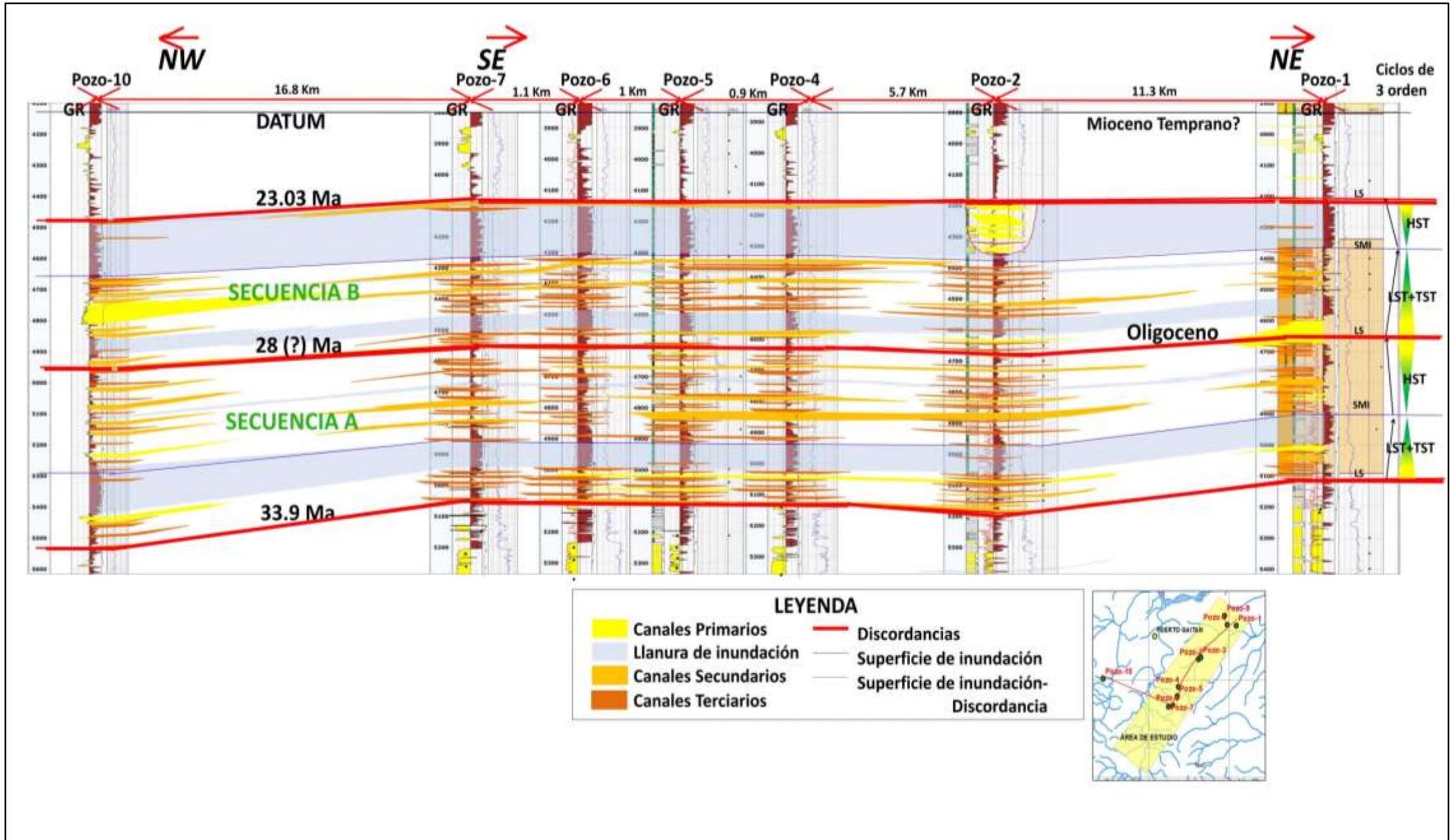
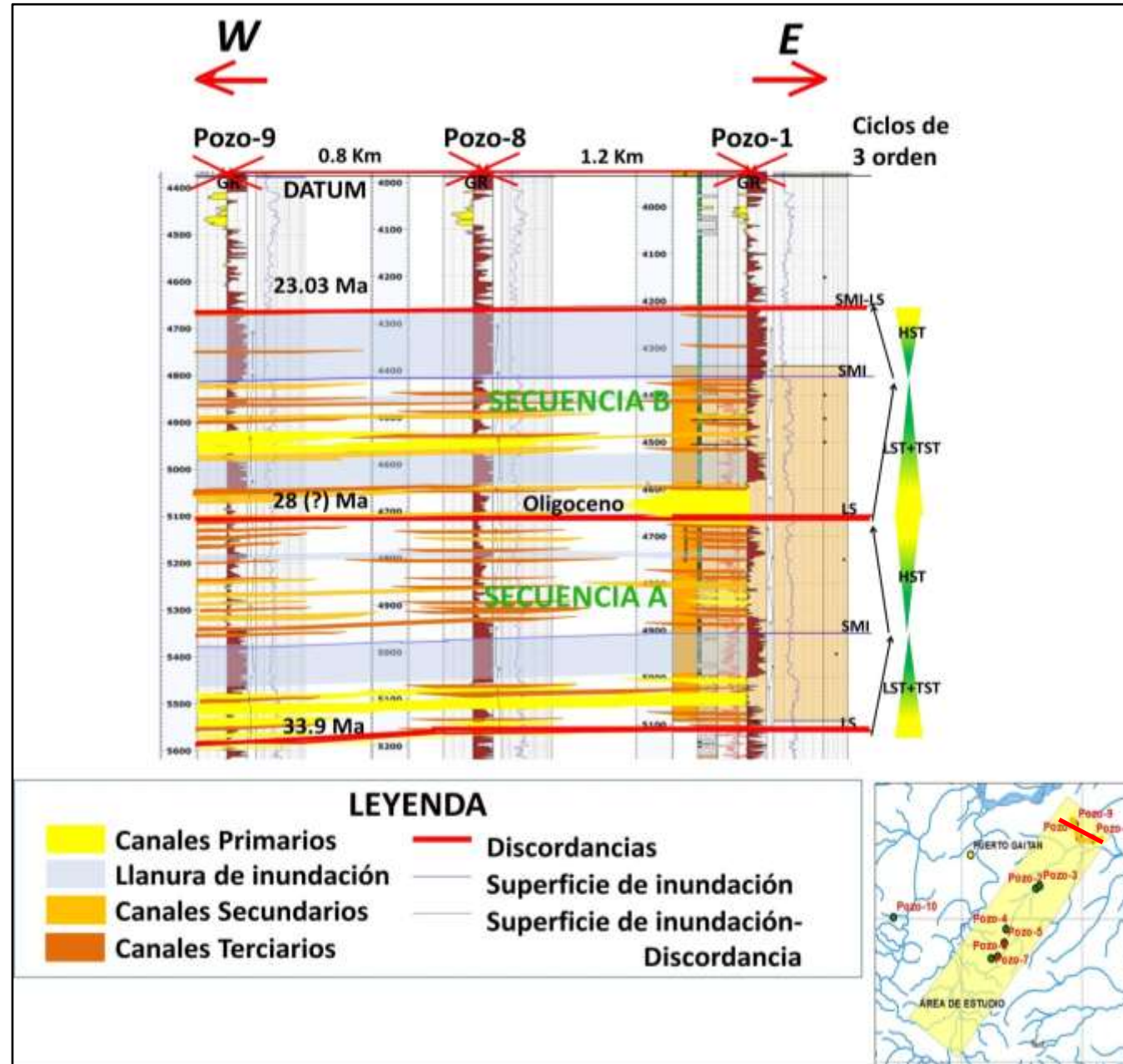


Figura 4-11: Correlación estratigráfica detallada Oeste-Este basada en estratigrafía de secuencias para el intervalo Oligoceno.



4.2 Estratigrafía sísmica

En el área de estudio se interpretaron seis horizontes sísmicos de acuerdo a la metodología planteada por Vail *et al.*, (1977), Mitchum *et al.*, (1977) y Widmier & Sangree (1977), en los cuales para el intervalo Oligoceno, se identificaron 2 secuencias sísmicas (Figura 4-12). En general, se observa que las secuencias depositacionales definen una sucesión “onlap” en dirección Sureste del área de estudio, el cual se enmascara por el paralelismo de los reflectores sísmicos.

La correlación de edad para estas secuencias está basada en datos palinológicos del Pozo-1, análisis realizados por Pérez (1986). Este pozo permitió dar sentido cronoestratigráfico al trabajo sismoestratigráfico, aunque su resolución y calidad no es buena (Figura 4-13).

Figura 4-12: Secuencias sísmicas identificadas en el área de estudio, sección sísmica en dirección Noreste.

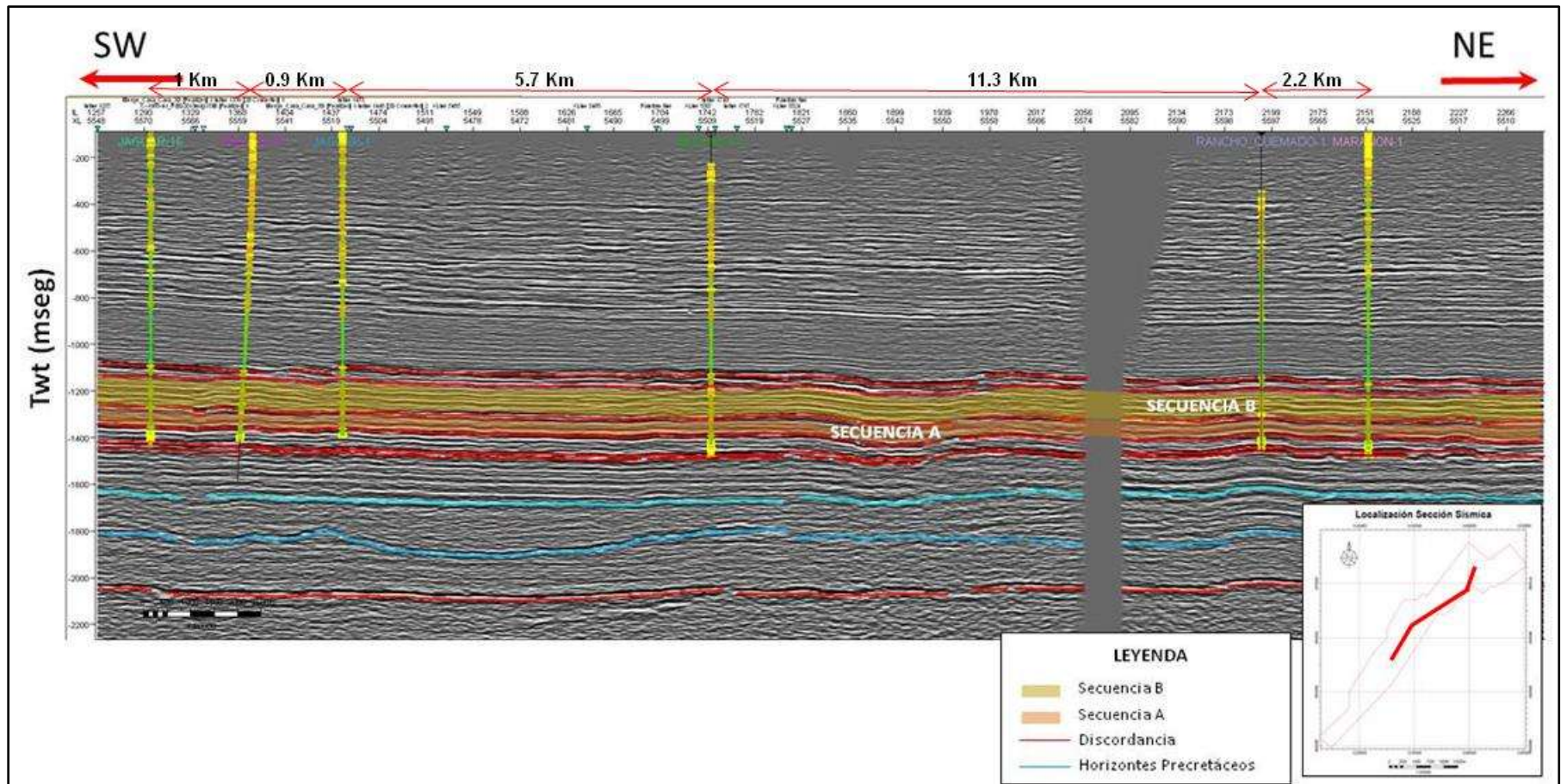
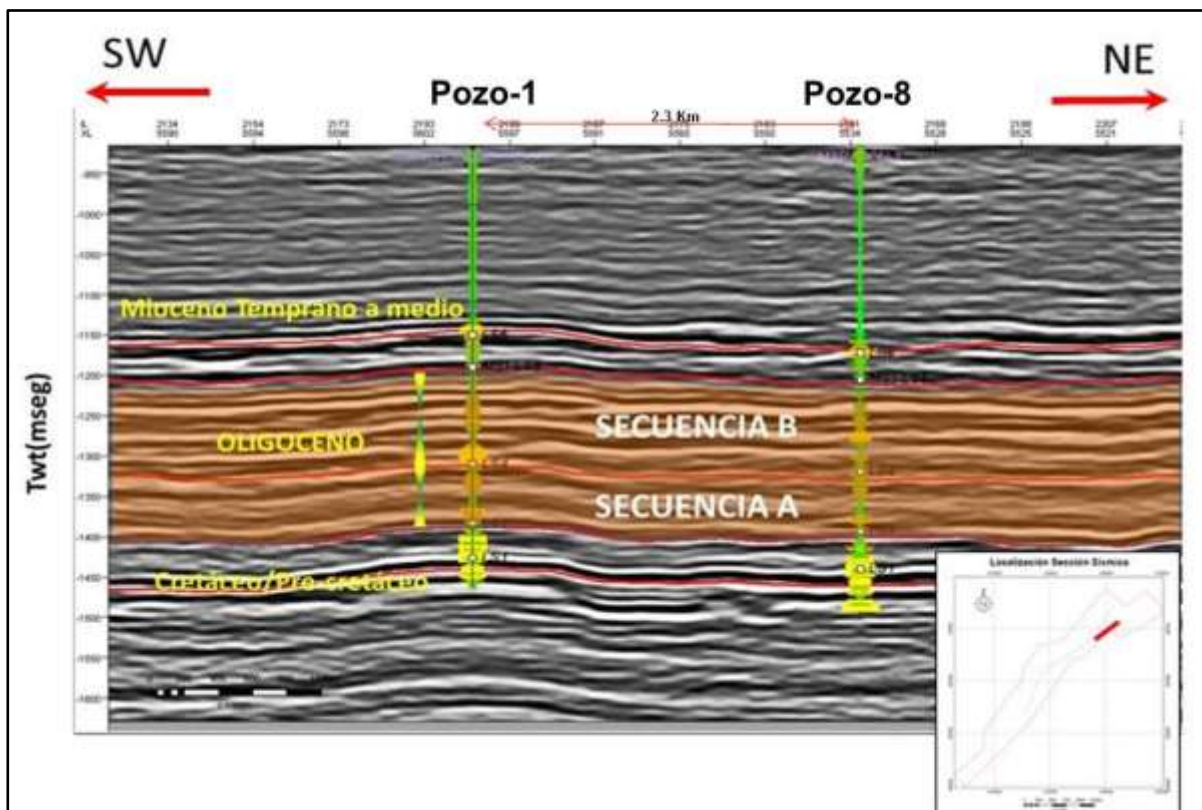


Figura 4-13: Datos bioestratigráficos de pozos que fueron extrapolados a la sísmica y representados en zonas sombreadas.

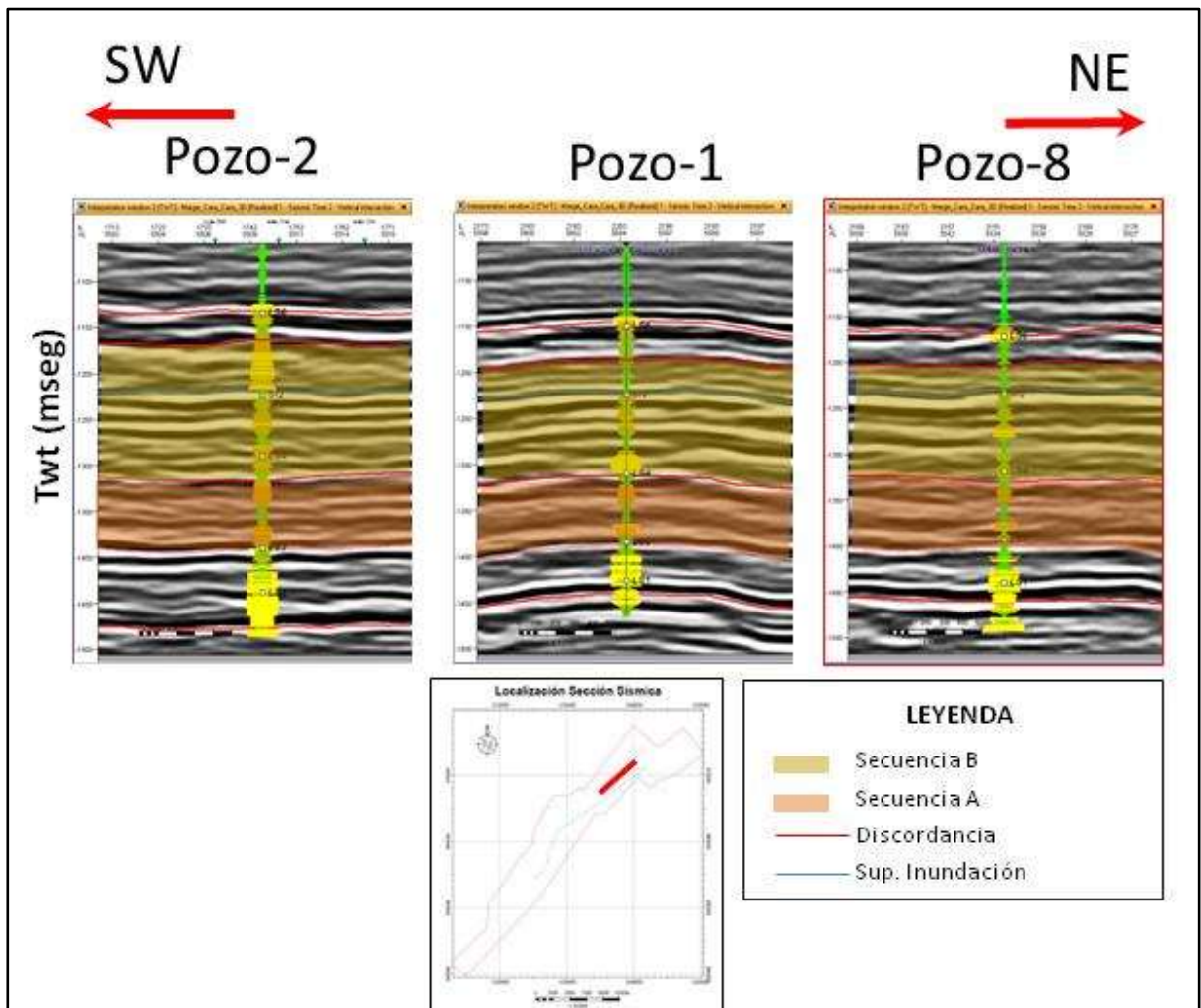


La extrapolación de datos bioestratigráficos y marcadores definidos en el análisis estratigráfico de pozos hacia la sísmica, se llevó a cabo mediante el empleo de las tablas tiempo profundidad de los pozos Pozo-3 y Pozo-10. En la Figura 4-14 se observa en detalle, el amarre de la sísmica con los pozos.

En general, se observa que las secuencias deposicionales tienen un leve aumento de espesor hacia el Oeste de la cuenca, hecho coincidente con el depocentro de la misma.

A continuación, se describen cada una de las secuencias sísmicas interpretadas desde la más antigua a la más joven, para el Oligoceno en el área de trabajo.

Figura 4-14: Calibración de los pozos a la sísmica, a partir de la generación de sismogramas sintéticos y tablas tiempo profundidad.



4.2.1 Secuencia A

La secuencia A, se caracteriza por mantener espesores moderadamente constantes a lo largo del área de estudio. El horizonte base de esta secuencia, corresponde al límite de secuencia de los 33.9 Ma; sus terminaciones suelen ser concordantes, mientras que las terminaciones hacia el tope de la secuencia son truncaciones y ocasionalmente son concordantes, su horizonte delimitador hacia el tope se encuentra cercano al límite de secuencia de los 28(?) Ma. En cuanto al análisis de las facies sísmicas, ésta secuencia se caracteriza por presentar reflexiones internas con bajas amplitudes, moderadas a bajas frecuencias y un patrón interno de reflexión ondulado, según criterio propuesto por

Sangree & Widmier (1977), (Figura 4-15). En la Figura 4-18, se observa la distribución espacial en el área de estudio.

En la sísmica, la sismofacies T-C/Ond, contiene reflexiones de amplitudes moderadamente altas que preliminarmente puedan estar coincidiendo con tenues cuerpos arenosos que progradan hacia el Noroeste y que corresponden a canales secundarios y terciarios, intercalados con cuerpos más continuos que corresponden a llanuras de inundación y que están representadas con reflexiones de bajas amplitudes oscuras en zonas sin mucha resolución (Figura 4-16). La sismofacies C-C/Ond, contiene reflexiones de amplitudes medias a bajas y que preliminarmente puede estar coincidiendo con llanuras de inundación, sin embargo la resolución de la sísmica no permite identificar canales secundarios y terciarios, tal y como se muestran en los pozos. (Figura 4-17).

Figura 4-15: Resultados del análisis de facies sísmicas en la Secuencia A, según metodología de Sangree & Widmier (1977).

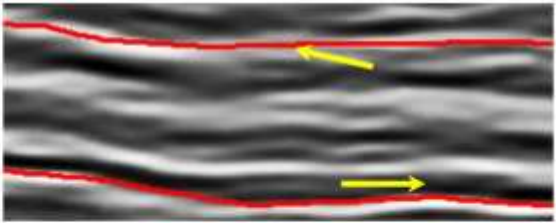
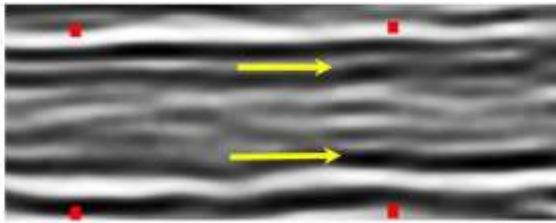
Secuencia	Sismofacies	Configuración interna	Patrón interno	Ejemplo
SECUENCIA A	T-C/Ond.	Amplitud: Moderada. Discontinua con frecuencia moderada.	Onduloso	 <p>En la Figura 4-18, ésta sismofacies se distribuye hacia centro del área y con dirección Noreste, correspondiendo a áreas con influencia de canales.</p>
	C-C/Ond	Amplitud: Moderada a baja. Discontinuos con frecuencia baja.	Onduloso	 <p>En la Figura 4-18, ésta sismofacies se distribuye de manera homogénea hacia los lados del área, correspondiendo a áreas de llanura de inundación.</p>

Figura 4-16: Sismofacies T-C/Ond identificada para la Secuencia A, correlacionada con los pozos y sus posibles asociaciones electrofaciales.

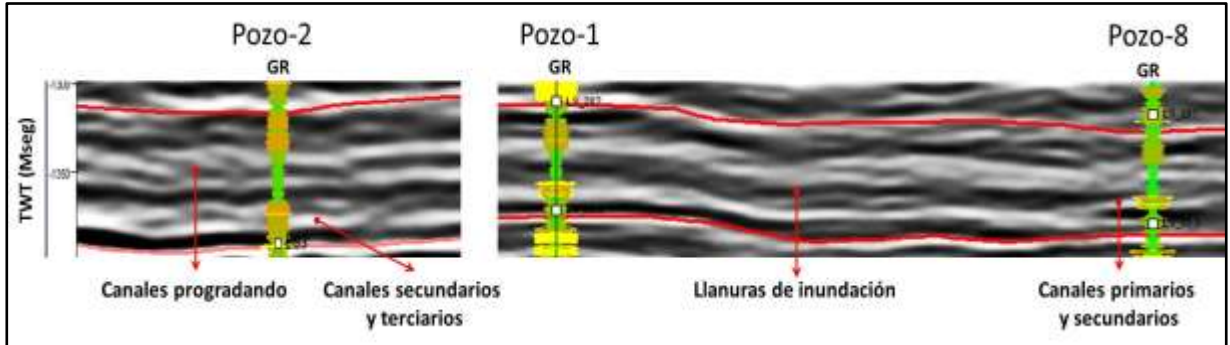
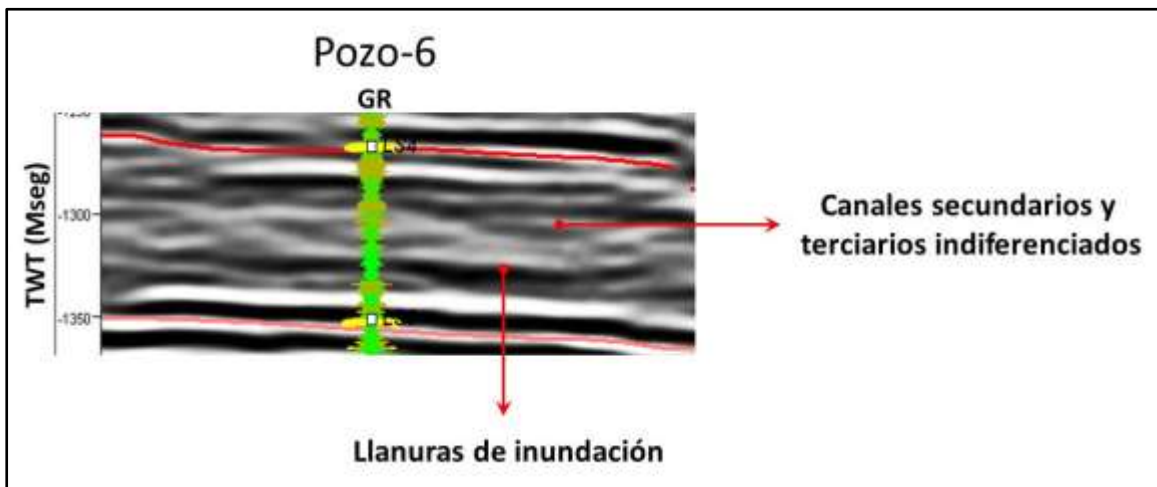


Figura 4-17: Sismofacies C-C/Ond identificada para la Secuencia A, correlacionada con los pozos y su posibles asociaciones electrofaciales.

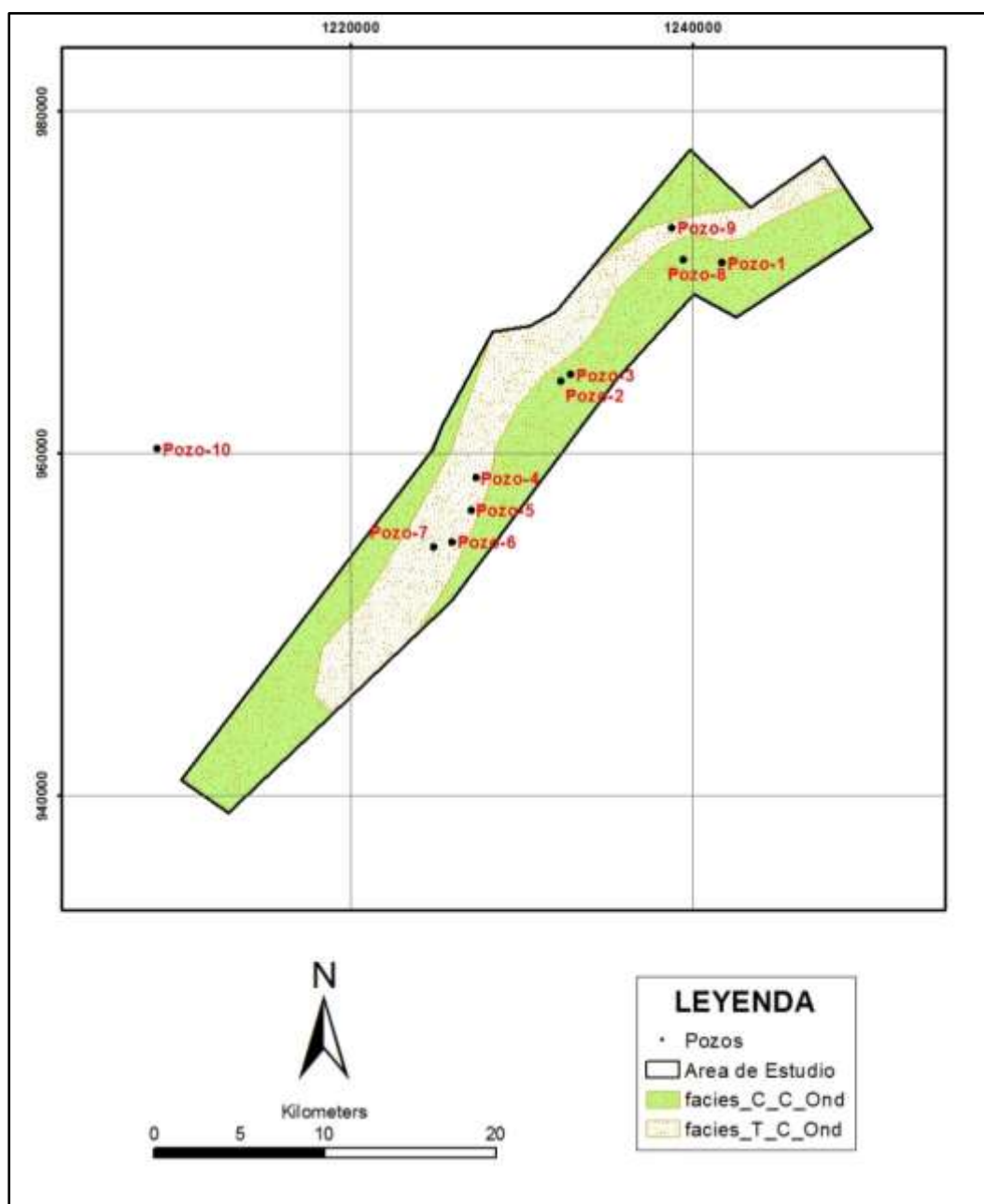


4.2.2 Secuencia B

La secuencia B es la superior y se caracteriza por mantener espesores constantes a lo largo del área de estudio. El horizonte base de esta secuencia, se encuentra cerca al límite de secuencia de los 28(?) Ma, las terminaciones hacia la base son de tipo concordante, las terminaciones hacia el tope de la secuencia son truncaciones y a veces suelen ser concordantes, su horizonte delimitador se encuentra cercano al límite de secuencia de los 23.03 Ma. Esta secuencia se caracteriza por presentar reflexiones internas cuyas amplitudes y frecuencias resultan ser altas a variables, su patrón interno

de reflexión es paralelo a subparalelo, según criterio propuesto por Sangree & Widmier (1977) (Figura 4-19). En la Figura 4-22, se observa su distribución espacial en el área de estudio.

Figura 4-18: Mapa de las distintas facies sísmicas (A/B-C) para la Secuencia A mostrando su distribución en el área de estudio.



En la sísmica, la sismofacies C-C/Subp a p, contiene reflexiones de amplitudes moderadamente altas que preliminarmente puede estar coincidiendo con tenues cuerpos arenosos y que pueden corresponder a canales secundarios y terciarios, intercalados con cuerpos más continuos que probablemente sean llanuras de inundación y que están representada con reflexiones de bajas amplitudes (Figura 4-20). La sismofacies T-C/Subp a p, contiene reflexiones de amplitudes medias a altas y que preliminarmente coinciden con canales primarios y que lateralmente varia a canales secundarios y terciarios, intercalados con llanuras de inundación, ésta información es ratificada con los pozos. (Figura 4-21).

Figura 4-19: Resultados del análisis de facies sísmicas en la Secuencia B, según metodología de Sangree & Widmier (1977).

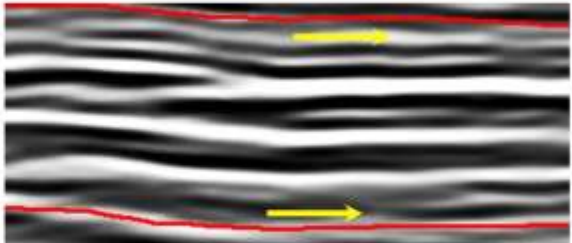
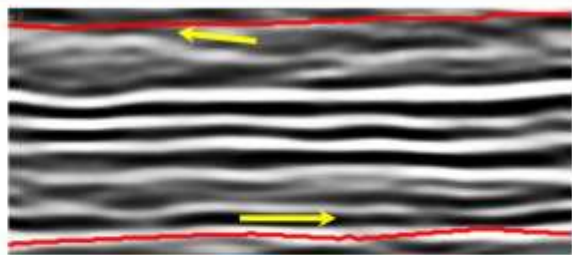
Secuencia	Sismofacies	Configuración interna	Patrón interno	Ejemplo
SECUENCIA B	C-C/P a Subp	Amplitud: Alta . Continua con frecuencia Alta	Paralelo a subparalelo	 <p>En la Figura 4-22, ésta sismofacies se distribuye hacia el norte y sur del área. Corresponde a áreas con influencia de canales indiferenciados, intercalados con posibles llanuras de inundación,</p>
	T-C/P a Subp	Amplitud: Alta pero Variable. Continua con frecuencia moderada a Alta	Paralelo a subparalelo	 <p>En la Figura 4-22, ésta sismofacies se distribuye hacia el centro y Noroeste del área, correspondiendo a áreas con influencia de canales primarios y secundarios que progradan hacia noroeste.</p>

Figura 4-20: Sismofacies C-C/P a Subp identificada para la Secuencia B, correlacionada con los pozos y su posibles asociaciones electrofaciales.

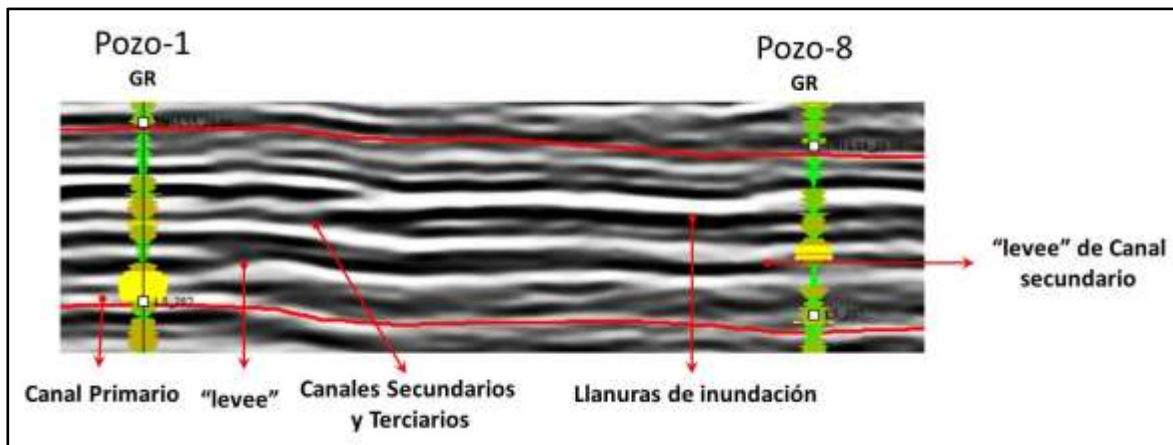
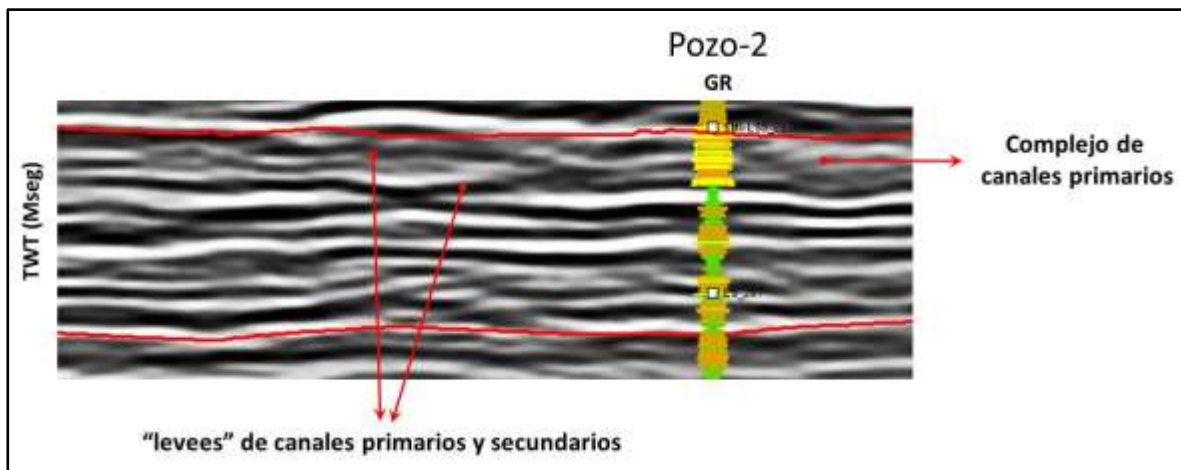


Figura 4-21: Sismofacies T-C/P a Subp identificada para la Secuencia B, correlacionada con los pozos y su posibles asociaciones electrofaciales.



4.2.3 Carta Cronoestratigráfica

Teniendo en cuenta la información bioestratigráfica del Pozo-1, se construyó un diagrama tiempo–espacio, más conocido como diagrama de Wheeler, el cual tuvo en cuenta la interpretación espacio-temporal de una sección sísmica transversal, que pasa por el Pozo-1 y en donde se ubicaron las secuencias sísmicas reconocidas en el área de estudio, permitiendo observar los eventos regresivos sobre las líneas de tiempo cercanos a: 33.9 Ma. y 28(?) Ma. Adicionalmente se logra observar, los aumentos del nivel base correspondiente a eventos transgresivos cercanos a las líneas de tiempo de: 32 Ma. y 25 Ma. aproximadamente (Figura 4-23).

Figura 4-22: Mapa de las distintas facies sísmicas (A/B-C) para la Secuencia B mostrando su distribución en el área de estudio.

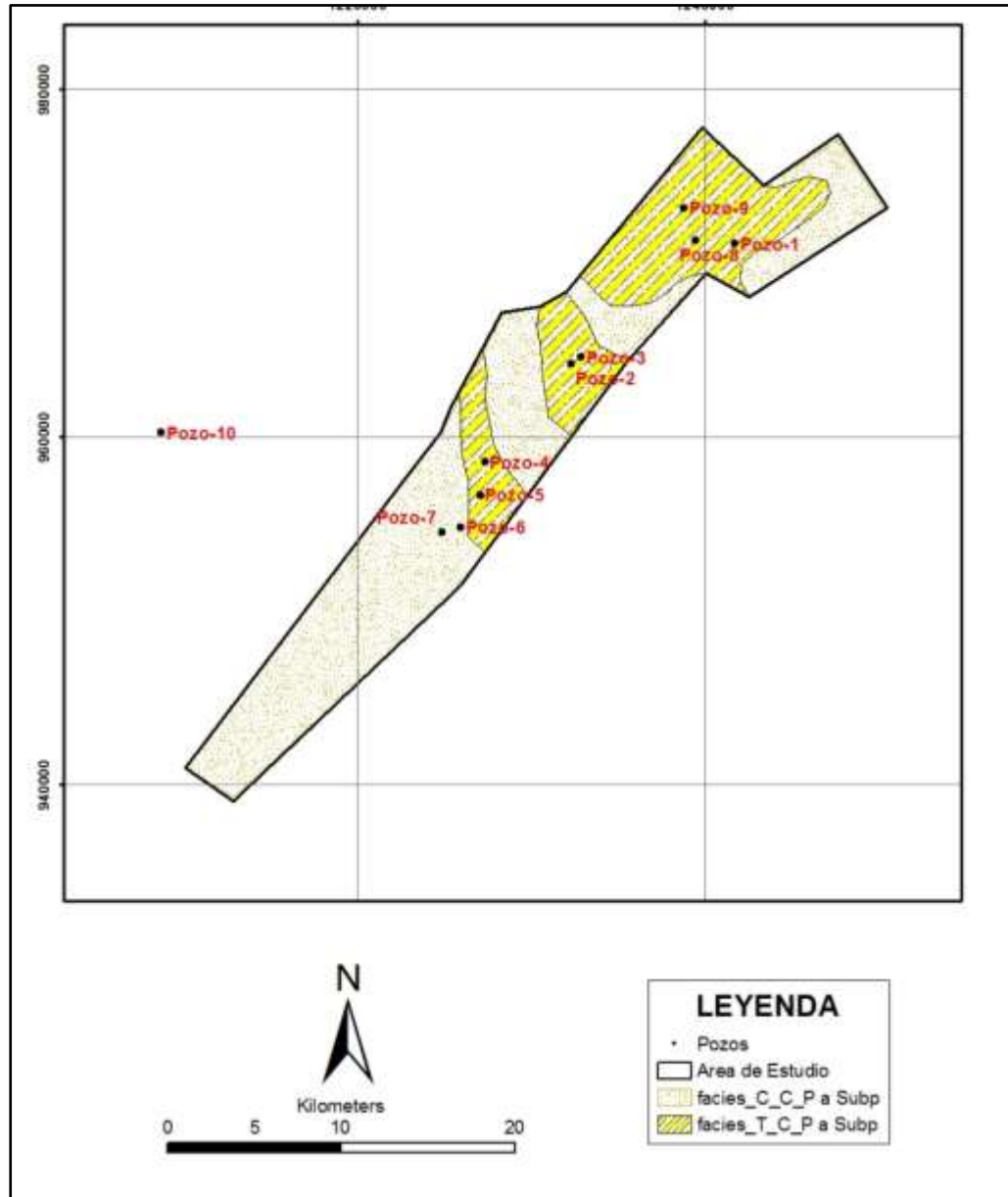
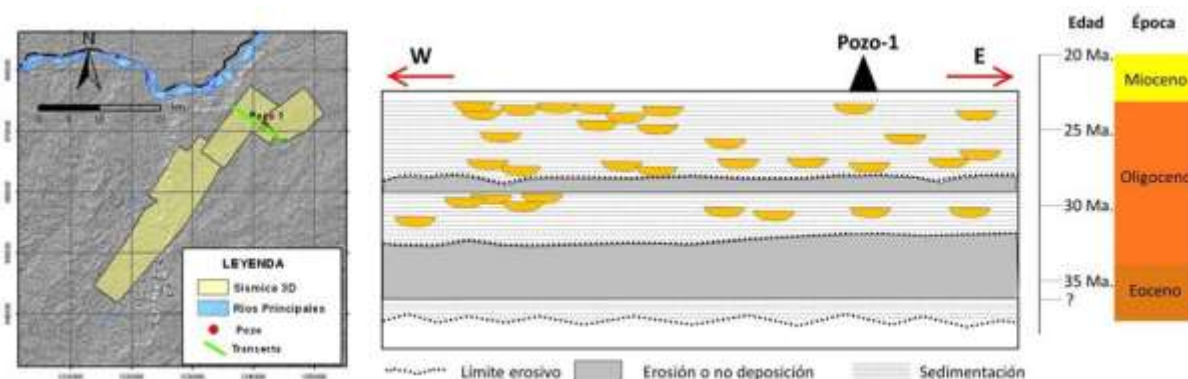


Figura 4-23 Diagrama de Wheeler para el área de estudio, con la ubicación temporal de las dos secuencias sísmicas reconocidas.



4.3 Mapas Estructurales

El área de estudio se encuentra ubicada en el flanco Oriental de la Cuenca Antepaís de los Llanos Orientales, la interpretación sísmica en el volumen sísmico permitió definir, a nivel de las secuencias A y B, una estructura monoclinual con dirección de buzamiento hacia el NW, definida por el paralelismo en los horizontes sísmicos. En la parte central del área, se evidencia un sistema de fallas predominante con dirección SW-NE y buzamientos en dirección SE y NW, presentando relevos hacia el NE del área como producto una tectónica compresiva que permitió la inversión de éstas fallas en ese periodo de tiempo (Sarmiento, 2011) y que en su mayoría afectan sedimentos que van desde el Paleozoico hasta el Mioceno temprano, incluyendo las secuencias A y B del Oligoceno, identificadas en éste estudio.

En las Figura 4-24 y Figura 4-25, se observan los mapas estructurales al tope de las secuencias A y B en tiempo, respectivamente.

Figura 4-24: Mapa estructural al tope de la Secuencia A (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia cercano a los 28? Ma.).

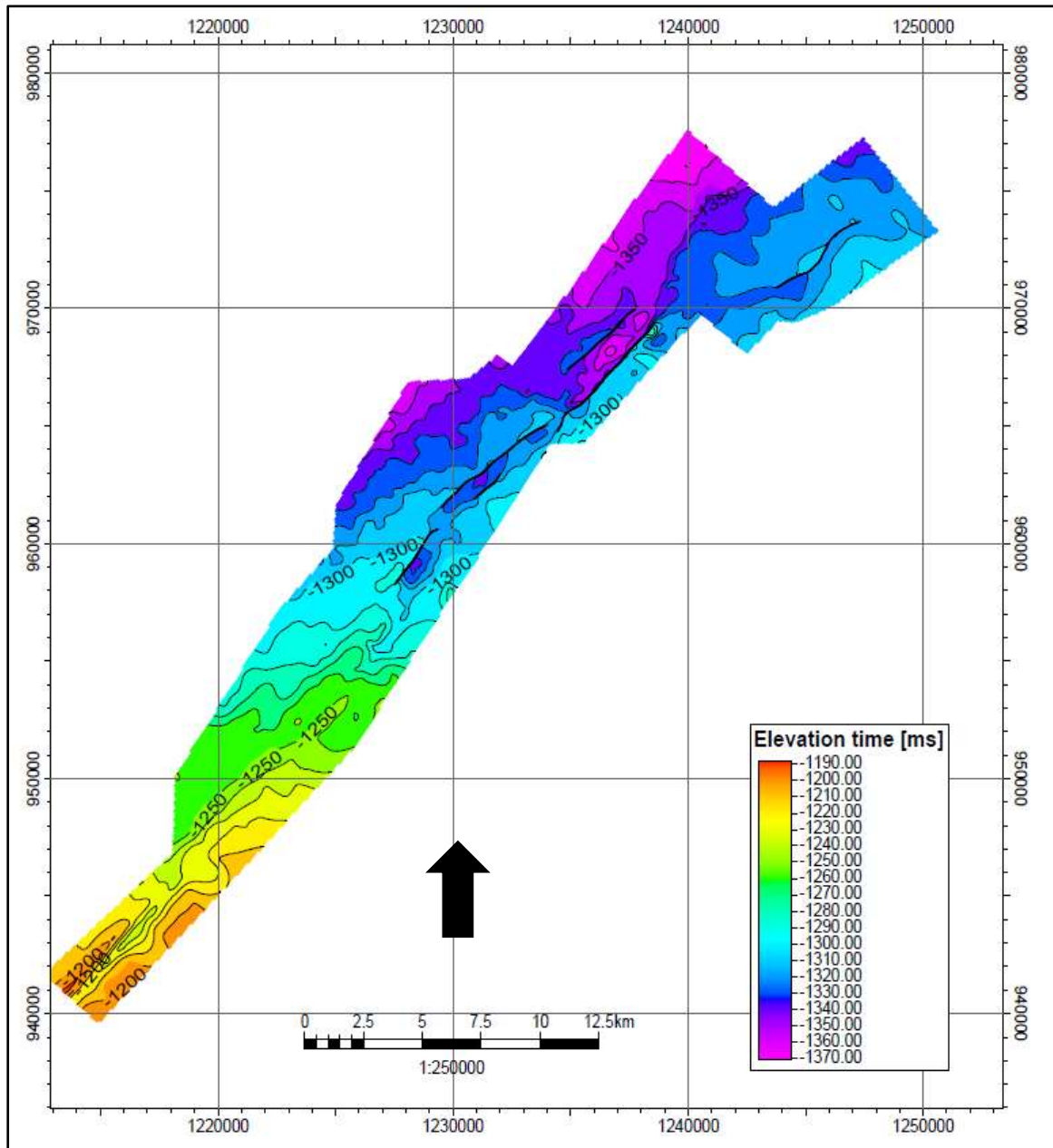
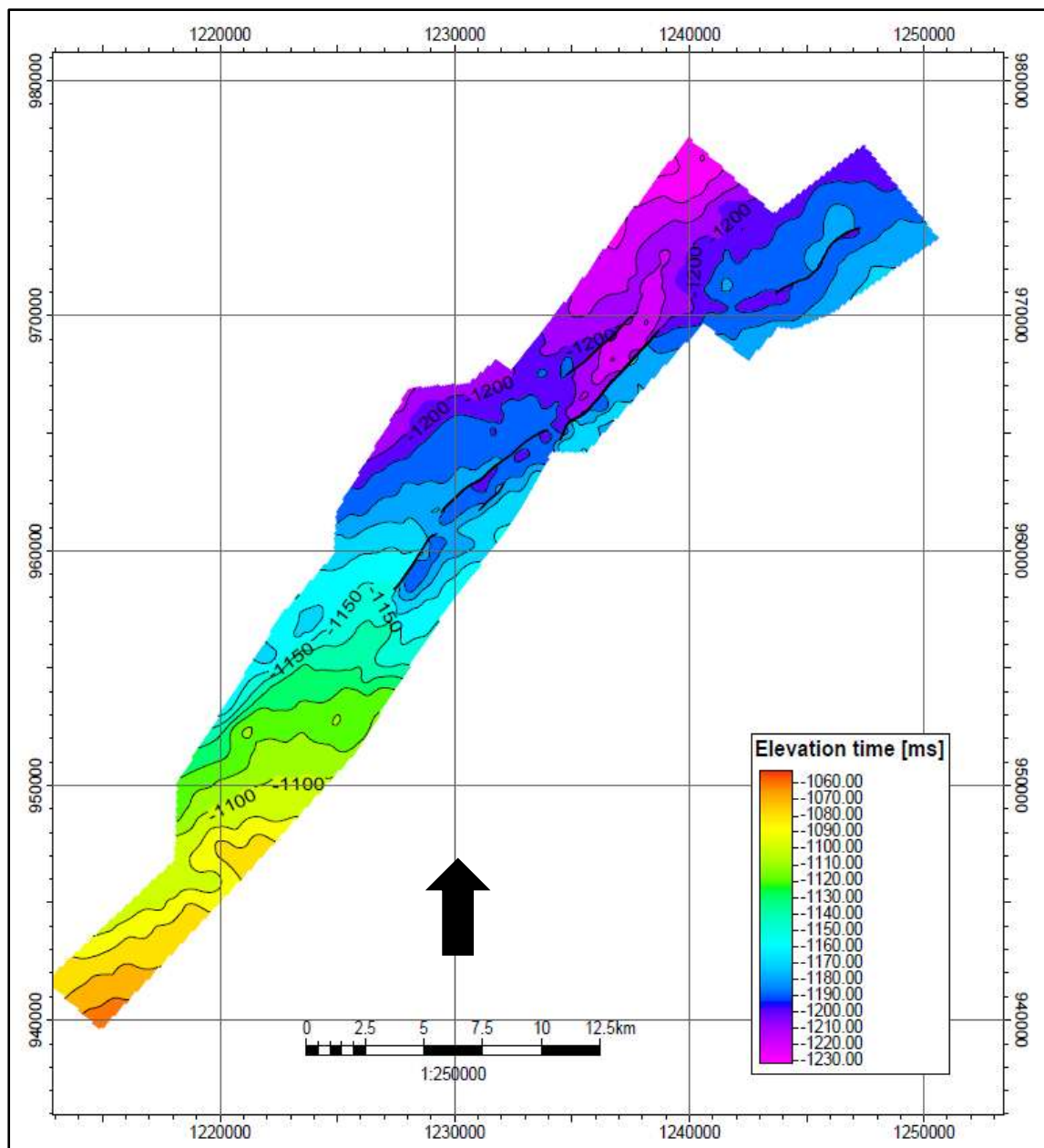


Figura 4-25: Mapa estructural al tope de la Secuencia B (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia, cercano a los 23.03 Ma.).



4.4 Análisis de atributos sísmicos

Los mapas de atributos sísmicos realizados, tuvieron como objetivo evidenciar los cuerpos arenosos en las dos secuencias previamente definidas. Los atributos fueron calculados a partir de cada horizonte interpretado y después en intervalos de tiempo de 20 milisegundos, en donde el archivo de salida es un nuevo horizonte que puede ser visualizado como un mapa.

Los mapas de amplitud RMS (Root Mean Square), son calculados como la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de las amplitudes encontradas en la ventana analizada y es muy sensible a valores extremos de amplitud, por lo que es bastante efectivo en la diferenciación de canales y arenas gasíferas (Landmark, 2004).

Los mapas de atributos sísmicos de suavizado (Sweetness), se calculan dividiendo la fuerza de la reflexión por la raíz cuadrada de la frecuencia instantánea, es muy útil para la detección de canales cuando la impedancia acústica entre arenas y arenas limosas son bajas o cuando las arenas y las lutitas están altamente intercaladas (Hart, 2008).

Los mapas del atributo de impedancia acústica relativa, son calculados a partir de la integración de la traza sísmica original seguido de un filtro pasa banda bajo, este atributo puede ser utilizado para: Indicar límites de contraste de impedancia acústica, mostrar disconformidades, discontinuidades y mediante altos contrastes indican límites de secuencias (Francis & Syed, 2001).

Los mapas de atributos sísmicos de Varianza, calculan el promedio de todas las muestras en la ventana, sustrae el promedio de cada muestra y calcula el cuadrado de la diferencia, el resultado es la suma de todos esos valores divididos por el número de muestras, finalmente éste atributo lo que hace es una correlación de trazas cercanas y dependiendo de la correlación le asigna un color (Landmark, 2004).

La Secuencia A, de manera general presenta bajas amplitudes, indicadoras de abundancia de zonas lutíticas o arcillosas, a excepción de la parte basal en donde se encuentra hacia la parte central del área. altas amplitudes que sugieren presencia de arenas (Figura 4-26 y 4-27). Al comparar la respuesta de los atributos respecto a la

sísmica vertical y la respuesta electrofacial para el pozo-2, se observa una correspondencia litológica predominantemente arenosa y que concuerda con un complejo de canales secundarios y terciarios que están progradando hacia el noroeste del área de estudio, los cuales aparentemente divagan sinuosamente en dirección Nor-Noreste; éste complejo de canales se encuentra rodeado de depósitos de desborde y canales abandonados (Figura 4-27), que lateralmente varía a zonas de llanura de inundación en el resto de área.

La Secuencia B, en términos generales presenta mayores amplitudes que la secuencia A. Hacia la parte basal y media de ésta secuencia se presenta amplitudes moderadas a bajas, lo que nos sugiere zonas con mayor contenido de material lutítico a arcilloso. En la parte media y hacia el tope de la secuencia B, se presentan las mayores amplitudes indicadoras de predominio arenoso (Figura 4-28 y 4-29). Al comparar la respuesta de los atributos respecto a la sísmica vertical y la respuesta electrofacial para el pozo-2, se observa una correspondencia litológica predominantemente arenosa y que corresponde a un sistema de complejo de canales primarios y secundarios que progradan hacia el noroeste del área de estudio, los cuales aparentemente divagan en dirección Nor-Noreste; éste complejo de canales se encuentran sobrepuestos algunos ligeramente curvados, y otros muy sinuosos que insinúan meandros abandonados, rodeados de depósitos de desborde y lateralmente variando a zonas de llanura de inundación (Figura 4.29).

La respuesta de los atributos en la Secuencia A y B en ventanas de tiempo de 20 Mseg, son presentados en el Anexo B.

Figura 4-26: Horizontes sísmicos con los atributos Sweetness y Amplitud RMS en la ventana de tiempo de -1360 Mseg, intervalo con altas respuesta de amplitudes en la Secuencia A.

Secuencia A - Horizonte cercano a 28(?) Ma

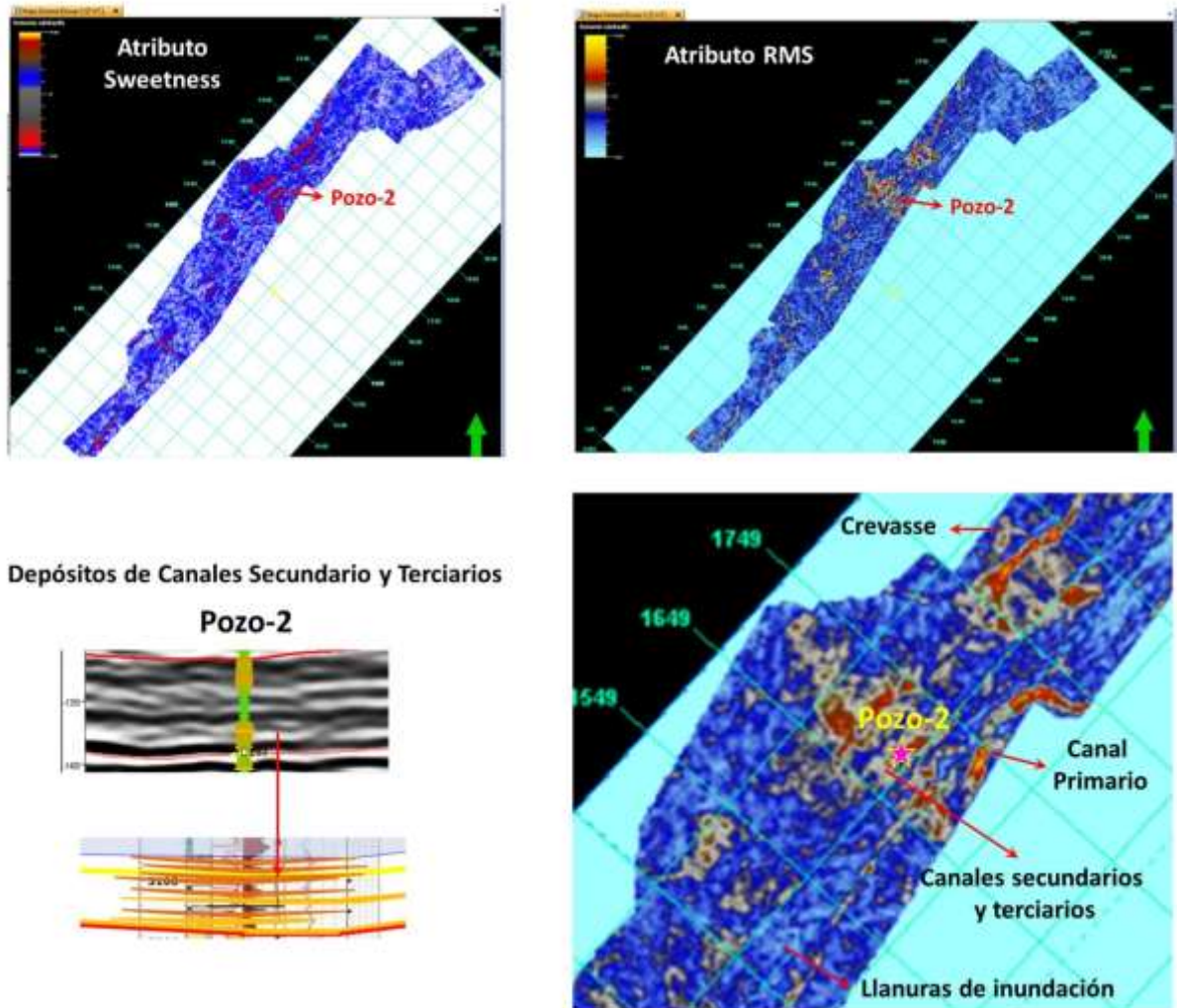


Figura 4-27: Horizontes sísmicos con los atributos de Impedancia acústica Relativas y Varianza en la ventana de tiempo 1360 Mseg, intervalo de tiempo en la Secuencia A.

Secuencia A - Horizonte cercano a 28(?) Ma

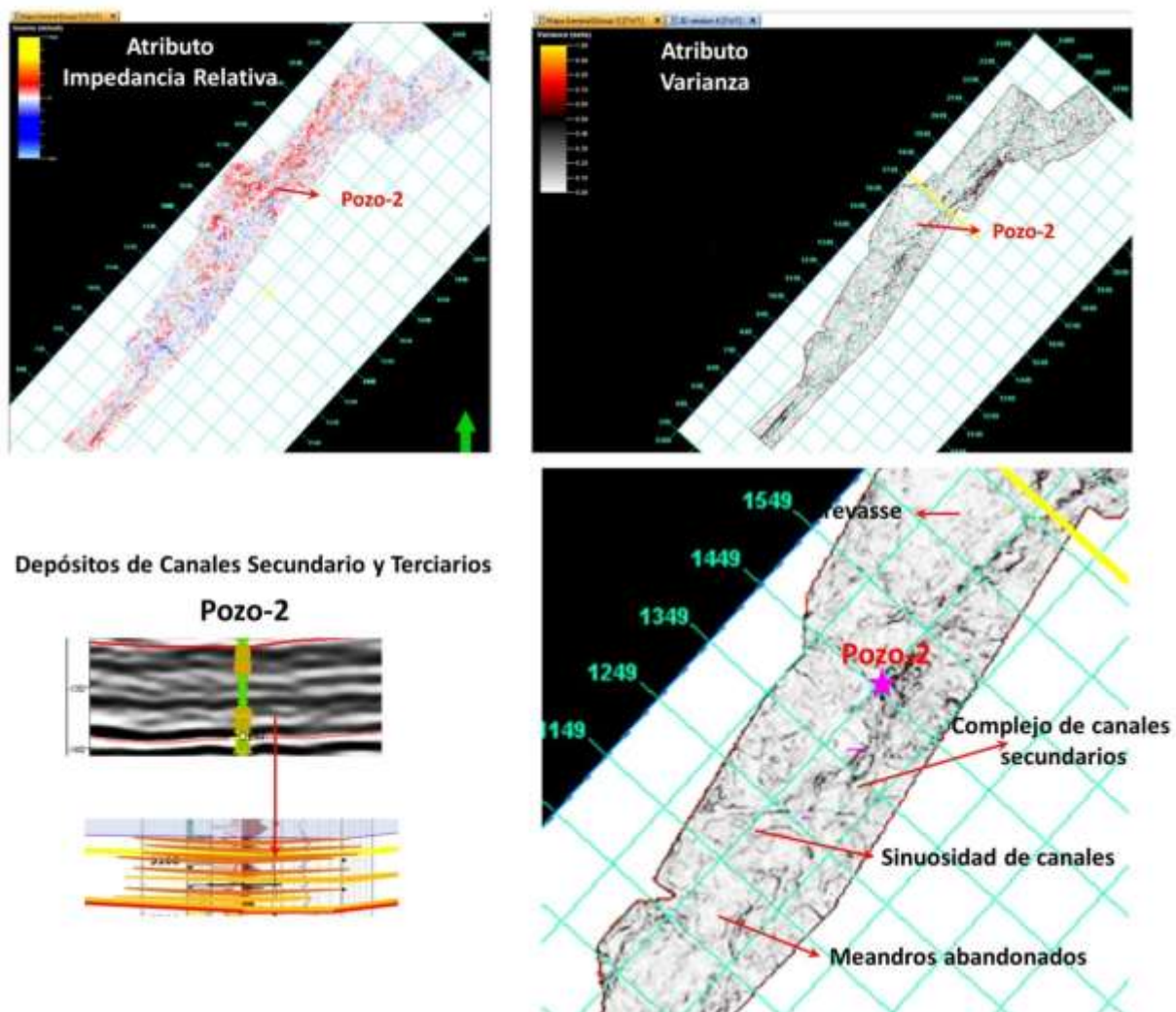


Figura 4-28: Horizontes sísmicos con los atributos Sweetness y Amplitud RMS en la ventana de tiempo de -1210 Mseg, intervalo de tiempo en la Secuencia B.

Secuencia B - Horizonte cercano a 23.03 Ma

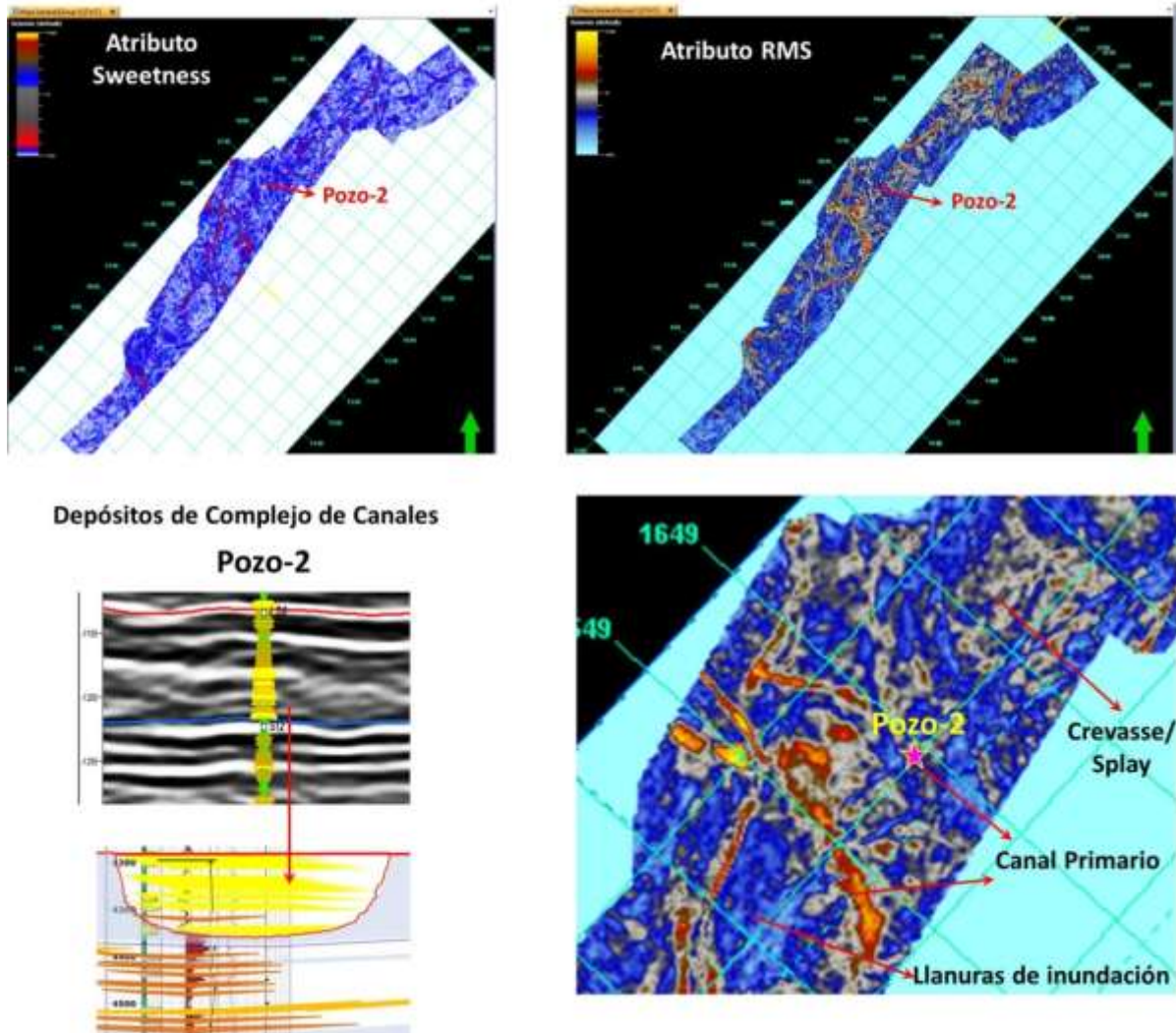
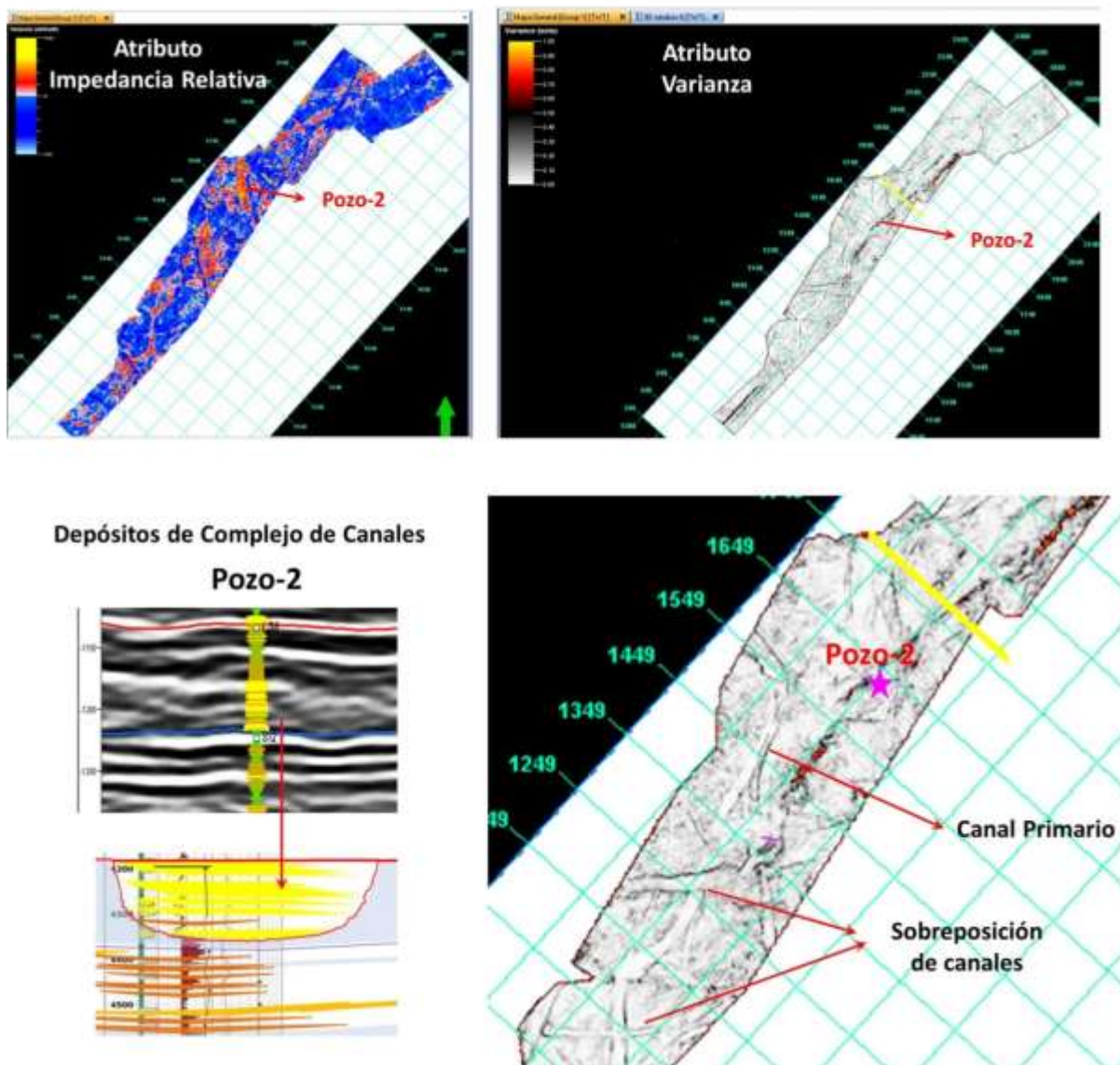


Figura 4-29: Horizontes sísmicos con los atributos de Impedancia acústica Relativas y Varianza en la ventana de tiempo -1210 Mseg, intervalo de tiempo en la Secuencia B.

Secuencia B - Horizonte cercano a 23.03 Ma



4.5 Integración y análisis de resultados

Con el fin de robustecer el modelo secuencial ya determinado y generar los mapas de distribución de arenas para el Oligoceno, se realizó un análisis integral haciendo uso de los resultados obtenidos anteriormente.

La secuencia A, que es la más antigua del Oligoceno en ésta sección de trabajo, está limitada a la base y al tope por superficies de mínima relación de A/S o discordancias, que corresponden respectivamente a un sistema con límite indiferenciado de tratos de nivel bajo y transgresivo “LST+TST” y un sistema de trato de nivel alto “HST”, hacia el medio de la secuencia se refleja una superficie de máxima inundación que se distingue en todos los pozos y que en el volumen sísmico se demuestra con bajas amplitudes y terminaciones tipo “downlap”, que potencialmente hace referencia a facies de llanura de inundación indiferenciada a distal, eventos característicos de un trato de nivel transgresivo “TST”, la importancia de éste último evento por su espesor y continuidad, es su potencialidad como sello dentro de la exploración de hidrocarburos.

Hacia la base de ésta secuencia, existe la tendencia en el área de encontrar materiales finos que varían a depósitos de desbordamiento y llanuras de inundación, sin embargo, hacia el centro y norte del área de estudio se encuentran una serie de cuerpos arenosos que corresponde localmente a canales primarios y secundarios sinuosos e intermitentes que van en dirección Norte, pero con predominio de canales distributarios terciarios. El cambio lateral de facies es alto, por lo que la conectividad y continuidad de los canales se ve comprometida, para ser un extenso reservorio de hidrocarburos, sumado al alto contenido de material arcilloso evidenciado en las bajas amplitudes de los atributos sísmicos y de la sísmica y que correspondería a llanuras de inundación y depósitos de desbordamiento, lo que confirma los ambientes sedimentarios reportados en los análisis palinológicos en el área y por ende a una transición con límite indiferenciado entre sistemas de trato de nivel bajo y trasgresivo (Figura 4-30).

Hacia el tope de la secuencia y al centro del área de estudio, los pozos presentan alto contenido de canales distributarios terciarios intercalados con algunos canales secundarios y que corresponden a un sistema de trato de nivel alto “HST” (Figura 4-31). Existe una variación lateral a materiales finos en el resto del área y que potencialmente

corresponden a llanuras de inundación proximal y depósitos de desbordamiento, es por ello, que tanto la respuesta sísmica como los resultados de los atributos sísmicos presentan bajas amplitudes, dificultando interpretar de manera continua dichos cuerpos arenosos en la sísmica.

Figura 4-30: Mapa de distribución de arenas para la secuencia A (intervalo más arenoso a -1360Mseg).

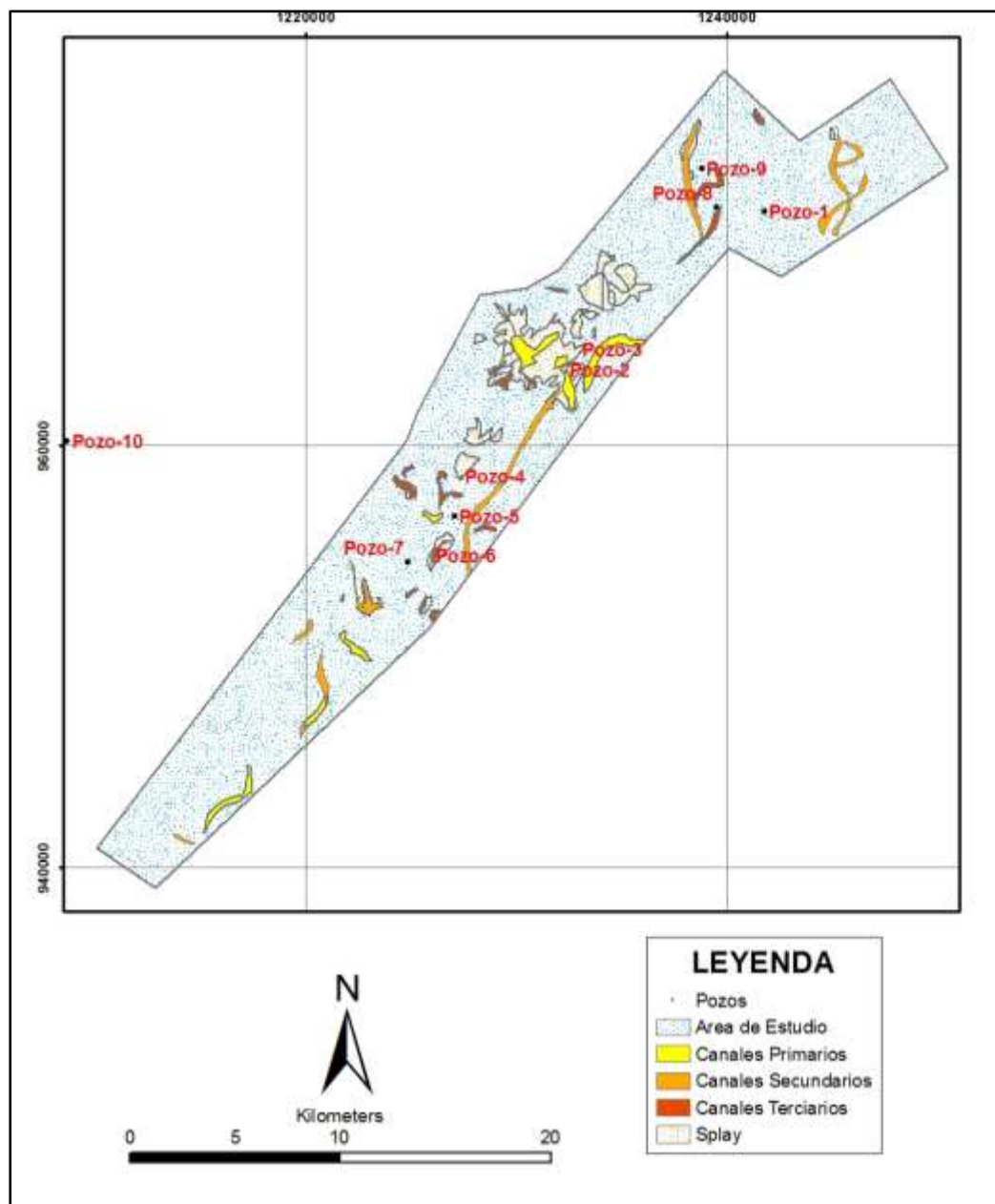
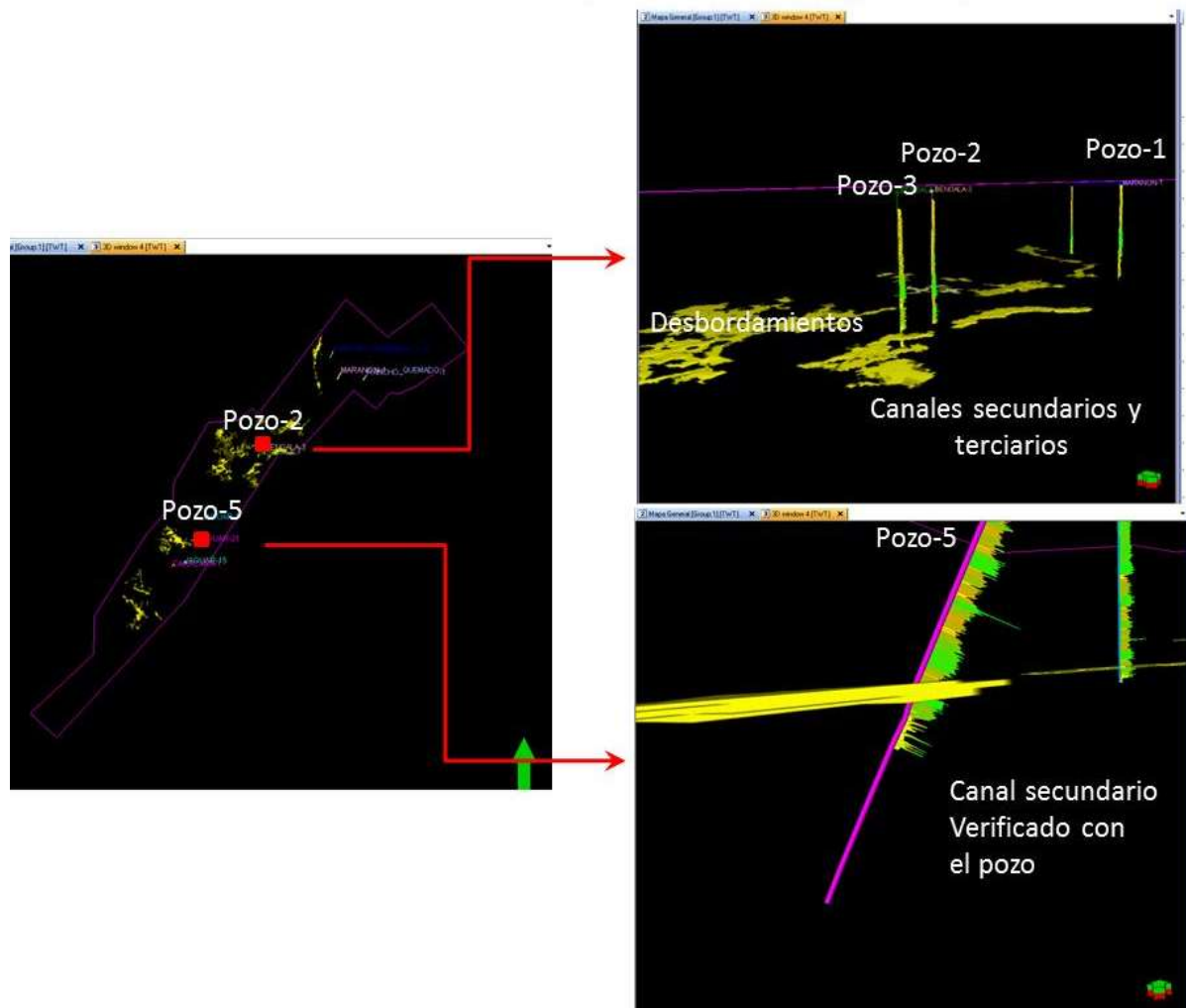


Figura 4-31: Mapa de distribución de arenas al tope de la Secuencia A (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia cercano a los 28? Ma.)



La secuencia B, es la más reciente del Oligoceno en ésta sección de trabajo, está limitada hacia el tope y la base por superficies de mínima relación A/S o discordancias. Hacia la parte basal y media de la secuencia, los ciclos estratigráficos muestran las mínimas relaciones de A/S, evidenciadas para el Oligoceno, ya que de manera general, la Secuencia B se muestra más arenosa en comparación con la Secuencia A y que corresponde a una transición con límite indiferenciado, entre sistemas de trato de nivel bajo y transgresivo “LST+TST”. Se encuentran una serie de cuerpos arenosos muy bien definidos y que corresponden a complejos de canales primarios y secundarios, algunos de estos canales tienden a ser rectilíneos y otros divagan de manera sinuosa en dirección Norte o Noreste; Además, en la sísmica, se pueden observar las

progradaciones presuntamente de las barras de arena hacia el Norte, así como también los rellenos de canal y “levees”. En los mapas de atributos se logra ver mejor, los depósitos de desborde y su cambio lateral de facies que correspondería a los materiales finos, reflejado en las bajas amplitudes, que sugieren llanuras de inundación intercaladas con canales distributarios terciarios, estos últimos reflejados abundantemente en los pozos. Este análisis de información corrobora el ambiente de deposición sugerido en el reporte palinológico para esta área de trabajo. Esta sección de la secuencia, aunque presenta cambios laterales de facies, la gran abundancia de canales permite una mejor conectividad y por ende algún tipo de continuidad de las arenas, lo que puede ser atractivo desde el punto de vista de reservorio de hidrocarburos. (Figura 4-32).

Hacia la parte media a superior de la secuencia se refleja una superficie de máxima inundación que se distingue en todos los pozos y que en el volumen sísmico se demuestra en la presencia de bajas amplitudes y terminaciones tipo “downlap”, que potencialmente hace referencia a facies de llanura de inundación indiferenciada a distal, eventos característicos de un trato de nivel transgresivo “TST”. La importancia de éste último evento por su espesor y continuidad, es su potencialidad como sello dentro de la exploración de hidrocarburos, hacia la parte superior la secuencia se revela un complejo de canales primarios y secundarios bien localizados y que en la sísmica se advierte como barras progradantes en dirección norte, las cuales corresponden a eventos de un sistema de trato de nivel alto “HST” (Figura 4-33).

Figura 4-32: Mapa de distribución de arenas para la secuencia B (intervalo más arenoso a -1210Mseg).

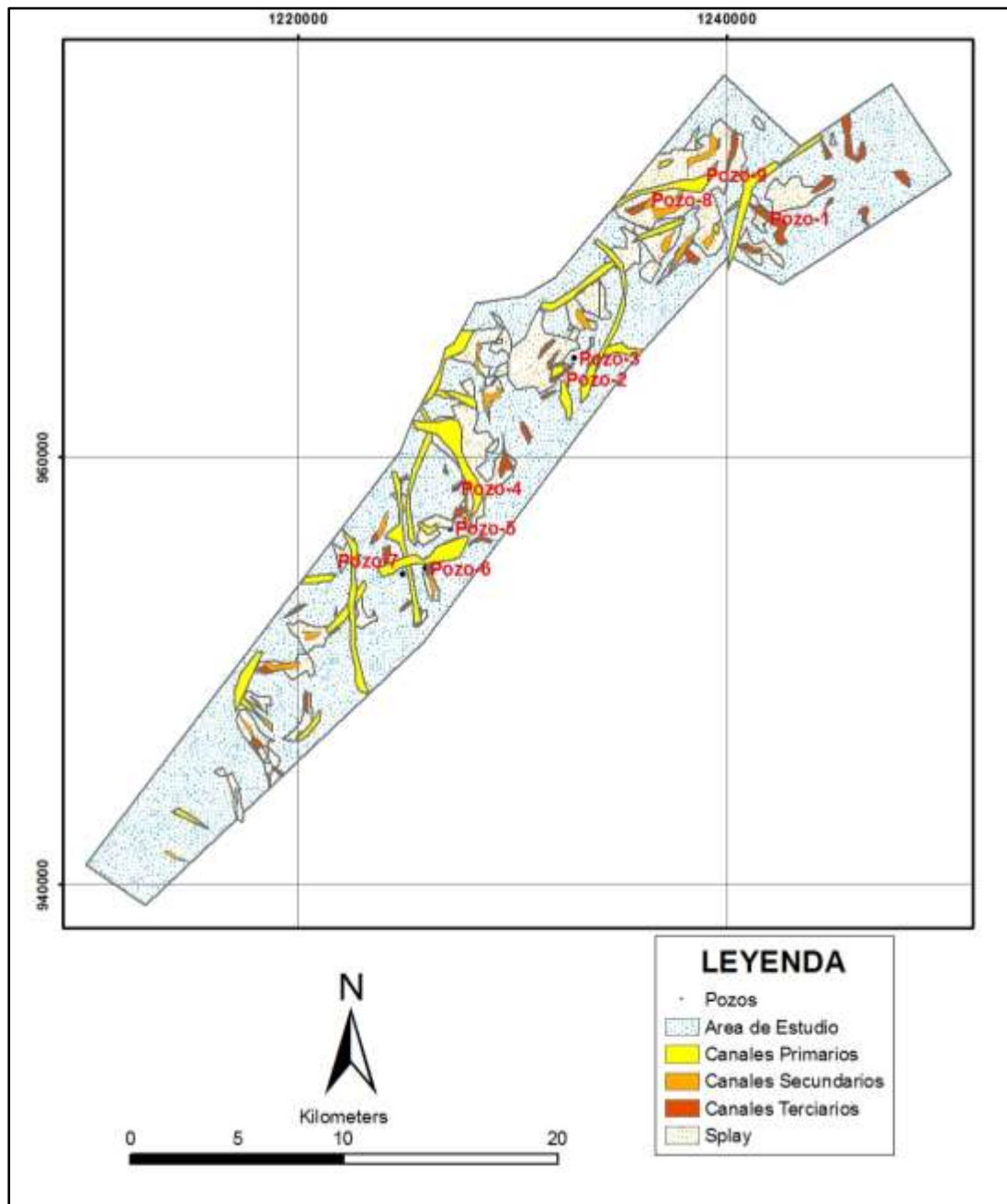
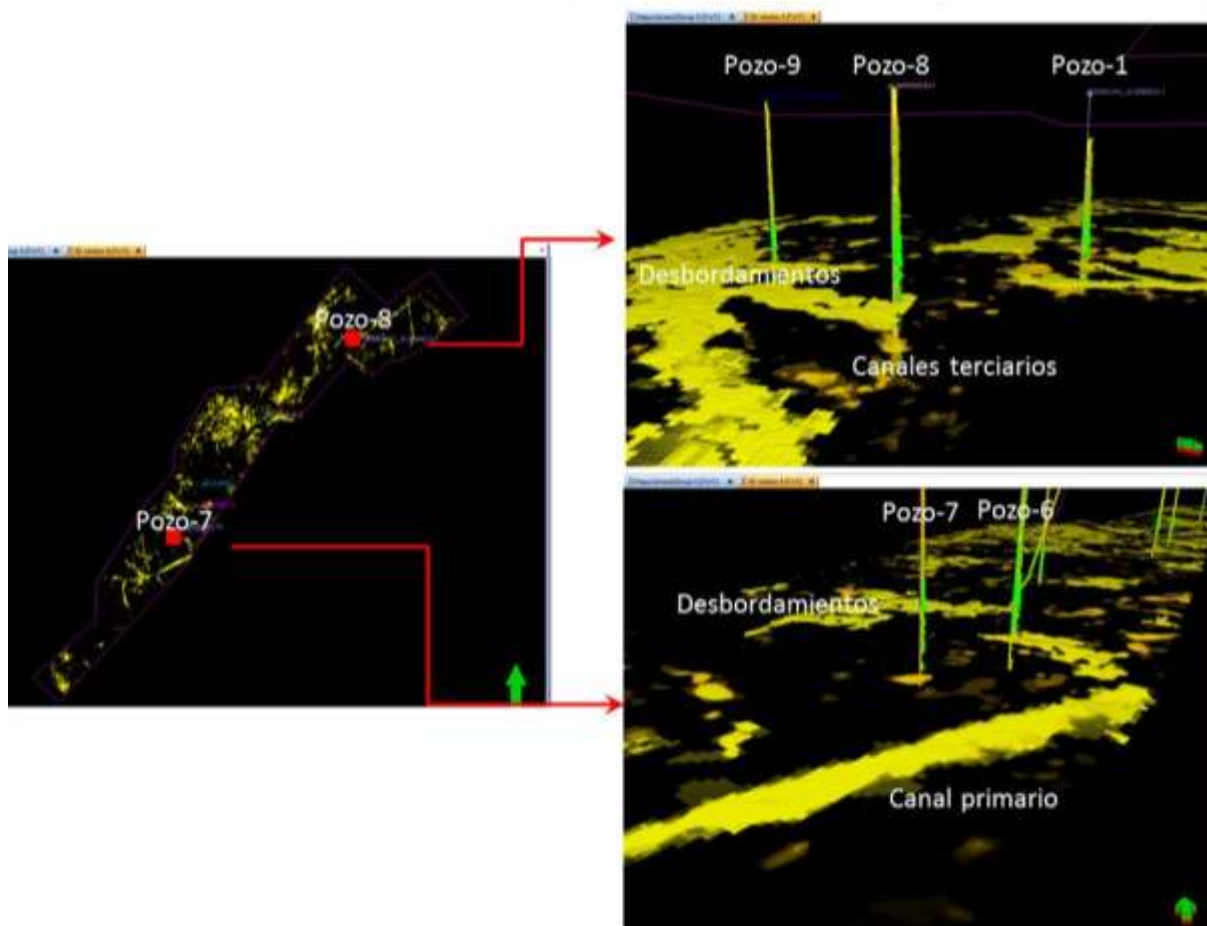
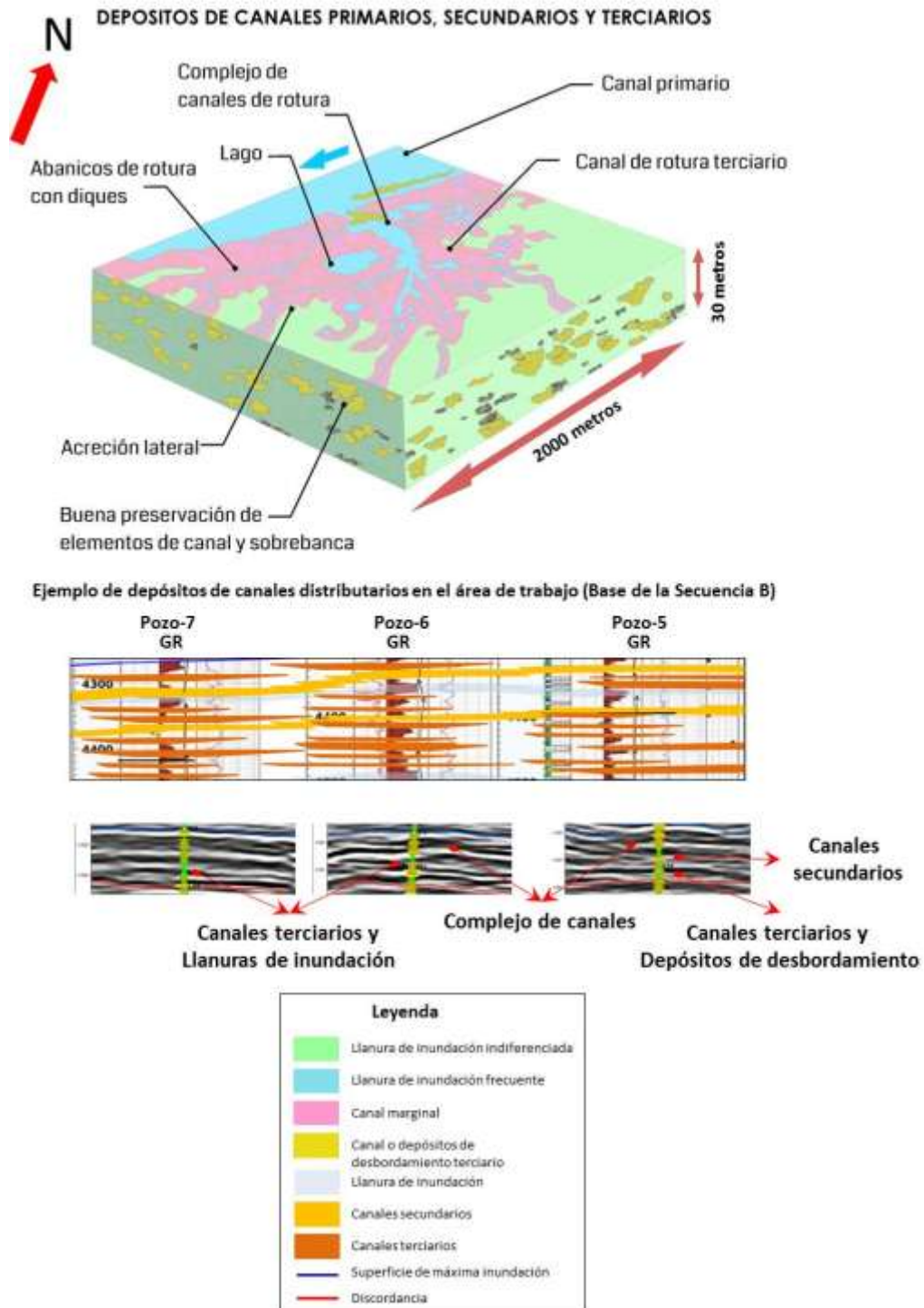


Figura 4-33: Mapa de distribución de arenas al tope de la Secuencia B (Horizonte correspondiente al límite superior de la secuencia cercano a los 23.03 Ma.)



De una manera básica, se puede realizar un modelo tridimensional que incorpore la información analizada para los diversos complejos de canales (primarios, secundarios y terciarios) con depósitos de desbordamientos y llanuras de inundación en el área de estudio, y que involucren las diferentes facies con sus respectiva variación lateral tanto en pozos como en la sísmica, soportados por los análogos propuestos por Stuart *et al.*, (2014) (Figura 4-34).

Figura 4-34: Esquema de posibles elementos arquitecturales y litológicos de complejos de canal con depósitos de llanura de inundación en el área de estudio (Modificado de Stuart *et al.*, 2014).



En la Figura 4-35, se observa una imagen satelital del Norte del Municipio de Barrancabermeja (Departamento de Santander, Colombia), tomado como ejemplo moderno del comportamiento de los distintos canales, depósitos de desborde y llanuras de inundación, y que puede prestarse como una referencia análoga de ambiente depositacional para el Oligoceno en el área de estudio.

Figura 4-35: Imagen satelital que muestra un análogo moderno con los distintos elementos arquitecturales encontrados en el área de estudio.



5. Conclusiones

El análisis de estratigrafía secuencial a partir de información de pozos y sísmica, permitió un mejor entendimiento y detalle de la arquitectura estratigráfica del Oligoceno en el área de estudio, reflejado en la definición de canales primarios, secundarios, terciarios, depósitos de desborde y llanuras de inundación.

Se definieron dos secuencias estratigráficas de tercer orden para el Oligoceno, la secuencia A con tendencia más arcillosa y que posee una relación A/S mayor que la secuencia B, la cual resulta más arenosa y con mayor número de canales. En cada secuencia se identifican tratos de nivel bajo con límite indiferenciado con tratos de nivel transgresivos “LST+TST” y tratos de nivel alto “HST”.

Se identificaron cinco electrofacies correspondientes a: Depósitos de canal primario, secundario, terciario, llanuras de inundación indiferenciada (depósitos de desbordamiento) y llanuras de inundación, que cotejan con las 4 sismofacies caracterizadas, y que supone un ambiente deposicional continental que varía entre sistemas fluviales a lacustres.

El comportamiento general de los canales primarios y complejos de canales primarios y secundarios, tienden a ser aislados y poco frecuentes, de manera contraria, son muy comunes las interdigitaciones de canales secundarios, terciarios y depósitos de desbordamiento en llanuras de inundación, lo anterior insinúa que éstas secuencias del Oligoceno tienen un alto contenido de material arcillo arenoso.

A partir de la integración la información y extracción de atributos sísmicos (dentro de los que se destacan: Amplitud RMS, impedancia relativa acústica y varianza), se logró establecer la distribución areal de los cuerpos arenosos, los cuales tienden a disponerse

en dirección Noroeste a Noreste y progradando principalmente hacia el Norte o Noroeste del área.

A partir de las metodologías y técnicas empleadas, se pueden observar paquetes arcillosos continuos lateralmente correspondientes a superficies de inundación, las cuales resultan ser potenciales sellos en la exploración de hidrocarburos; por otra parte, se pueden ubicar canales primarios y secundarios que resultan atractivos como rocas reservorios de hidrocarburos.

Se recomienda realizar análisis bioestratigráficos con mayor resolución, para disminuir la incertidumbre de las dataciones de las secuencias y mejorar el marco geocronológico del área.

Se recomienda un estudio más detallado, que involucre información de núcleos de pozos cercanos al área de estudio, para afinar los elementos arquitecturales estratigráficos reconocidos en éste trabajo.

Resulta interesante proyectar éste trabajo, con la realización de análisis petrofísicos, para comprender la calidad de los cuerpos arenosos, aprovechando su potencialidad como roca reservorio de hidrocarburos.

A. Anexo: Información de Secuencia de procesamiento de la sísmica 3D.

La secuencia de procesamiento se enumera a continuación:

1. SEG-D to Omega Format conversion
2. Geometry Updating
3. Stations and Records Renumbering
4. Bulk Scaling
5. Time Function Gain
6. Anomalous Amplitudes Attenuation (AAA)
7. Anomalous Amplitudes Attenuation (AAA) – Random Ground Roll Attenuation
8. F-X Coherent Noise Suppression (FXCNS) – Ground Roll Attenuation
9. Anomalous Amplitudes Attenuation (AAA) – Residual Ground Roll Attenuation
10. Surface Consistent Spiking Deconvolution
11. Surface Consistent Amplitude Compensation (SCAC)
12. Anomalous Amplitudes Attenuation (AAA)
13. Anomalous Amplitudes Attenuation (AAA) – Residual Ground Roll Attenuation
14. Anomalous Amplitudes Attenuation (AAA)
15. Preliminary Velocity Analysis
16. Refraction Miser Statics
17. Phase Control
18. Gridding and CMP Sorting
19. Velocity Analysis
20. Surface Consistent Residual Statics (First Iteration)
21. Velocity Analysis
22. Surface Consistent Residual Statics (Second Iteration)

A. Post Stack Migration Sequence

- 23A. Stack
- 24A. Post-stack Trace Interpolation
- 25A. 3D Random Noise Attenuation
- 26A. Time Variant Band-Pass Filter
- 27A. Post Stack Kirchhoff Migration
- 28A. Acquisition Footprint Attenuation
- 29A. 3D Spectral Whitening
- 30A. Time Variant Band-Pass Filter

31A. SEG-Y Conversion

B. Kirchhoff Pre-Stack Migration Sequence – PSTM

23B. Spectral Whitening

24B. 3D Random Noise Attenuation and 3D FK Filtering in the X-Spread Domain

25B. SEG-Y Conversion

26B. VORONOI weighting: Analysis and application

27B. Migration Geometry

28B. Migration Parameters Testing

29B. Irregular interpolation

30B. Pre-Stack Kirchhoff Migration (PSTM)

31B. Residual Velocity Analysis

32B. Multiple Attenuation in Radon domain

33B. Stack

34B. 3D Random Noise Attenuation

35B. Acquisition Footprint Attenuation

36B. Time Variant Band-Pass Filter

37B. SEG-Y Conversion

DESCRIPCIÓN SECUENCIA DE PROCESAMIENTO ESTANDARD

1. Conversión de formato SEG-D a Omega

2. Re-escalando Geometría

3. Renumerando estaciones y registros

4. Escalando

5. Función de ganancia en tiempo

Una ganancia de función exponencial se aplicó a los datos para compensar el deterioro en amplitud, que resulta de la propagación de una onda sísmica de una fuente puntual en un medio estratificado. El valor de la ganancia exponencial utilizado fue de 2,6.

6. Atenuación de Amplitudes anómalas (AAA)

Los datos sísmicos de esta zona se caracterizan por la presencia de varios tipos de ruidos, el primer paso se centra en atenuar amplitudes muy altas anómalas en el rango de frecuencia de 0 a 250 Hz, que se encuentra al azar dentro del proyecto.

7. Atenuación de Amplitudes anómalas (AAA)-Atenuación Aleatoria por capa meteorizada

Un segundo paso AAA se aplicó para atenuar grandes amplitudes aleatorias, se centra en frecuencias de 0 a 12 Hz.

8. Supresión de ruido coherente (FXCNS) – Atenuación efecto de capa meteorizada

FXCNS es un enfoque para la supresión del ruido coherente durante la adquisición de la sísmica, la cual ha tenido un muestreo irregular y variabilidad del ruido. Se usaron filtros de dominio FX y un esquema de optimización de mínimos cuadrados. Los rangos específicos filtrados para estos datos fueron: Velocidades y frecuencias aparentes de 200-1300 m / segundo y 0-17 Hz respectivamente.

9. Atenuación de Amplitudes anómalas (AAA)-Atenuación Residual por capa meteorizada
Para atenuar el ruido residual se aplicó una tercera etapa AAA, restringido a los rangos de 0-20 Hz.

10. Deconvolución

Se llevó a cabo una Deconvolución, utilizando una longitud operador de 200 ms y un porcentaje de blanqueamiento previo de 0.1%, el diseño y los procesos de aplicación fueron:

Design Windows	Zero Offset Start Time (ms)	Velocity (Hyperbolic) (m/s)	Zero Offset Stop Time (ms)	Velocity (Hyperbolic) (m/s)
1	280	1690	3110	3090

11. Compensación Consistente de Amplitud (SCAC)

La secuencia coherente de Compensación de amplitud superficial (SCAC) compensa tiro y variaciones de amplitud-detector, que son causados por efectos de adquisición y que no son consecuencia de la geología del subsuelo.

La amplitud de una ventana de tiempo dado se determina para cada traza utilizando un criterio RMS. A continuación, estas mediciones se descomponen en escalares consistentes de superficie para cada detector y la fuente usando una descomposición iterativa de Gauss-Seidel. Finalmente estos escalares son aplicados a cada traza.

12. Atenuación de Amplitudes anómalas (AAA)

Se aplicó una atenuación de amplitudes en el dominio del tiro, con rangos de frecuencia 0-200 Hz.

13. Atenuación de Amplitudes anómalas (AAA)-Atenuación Residual por capa meteorizada

Se aplicó una atenuación de amplitudes en el dominio del tiro, con rangos de frecuencia 0-20 Hz.

14. Atenuación de Amplitudes anómalas (AAA)

El último paso del AAA se aplicó en el dominio del CMP utilizando un umbral más pequeño para atenuar el ruido de alta frecuencia situada en la parte inferior de los datos (rango 50-200 Hz).

15. Análisis Preliminar de Velocidades

Se realizó un análisis preliminar de velocidades, usando la estática de elevación sobre las posiciones situadas cada 1.000 m. Las velocidades picadas se hicieron de forma interactiva en la estación de trabajo. Número total de posiciones: 648.

16. Corrección de Estáticas

Las variaciones laterales de las capas cercanas a la superficie terrestre distorsionan los tiempos de viaje de las reflexiones sísmicas. Con el fin de corregir estas anomalías, se aplicó una corrección de estáticas.

17. Control de fase

Otro tema importante al integrar datos sísmicos de diferentes adquisiciones es la comprobación de fase y ajuste. La metodología consiste en estimar las correlaciones cruzadas entre los reflectores, en las ventanas de tiempo específicas del apilado, para determinar si existe o no diferencias de fase, y si es necesario se hace filtro de designación de fases para su igualdad.

18. Grillado y Clasificación CMP

El proceso se divide en dos fases-La primera (denominado XPERT) recoge los desplazamientos de tiempo para cada trazo del apilamiento y la segunda (denominada MISER) calcula las estáticas consistentes de superficie de éstas selecciones. La ventana de tiempo usado para calcular las correlaciones cruzadas fueron de 500 a 2600 ms, el límite de cambio de tiempo fue de $+ / - 24$ ms. Las estáticas residuales resultantes para los tiros y detectores oscilaron entre -7 y 7 ms.

21. Análisis de Velocidades

Una etapa de análisis de velocidad se llevó a cabo después de las primeras estáticas residuales sobre las posiciones situadas cada 1.000 m. Para cada posición se utilizaron tres herramientas diferentes: Semblanzas, súper CMP y secciones apiladas, con un nuevo campo de velocidad.

22. Estáticas Residuales Consistentes en Superficie (Segunda iteración)

Una segunda iteración de MISER estática residual se ejecuta en todos los datos, usando el nuevo modelo de velocidad modelo.

SECUENCIA DE MIGRACIÓN POST STACK

23A. Apilado

Se hace apilamiento en el CMP con las estáticas aplicadas y con los mejores campos de velocidades.

24A. Interpolación de trazas Post- Apilado

Cuando se ejecuta la migración post-apilado, quedan zonas de despliegue nulo producido por problemas de los efectos de borde. Para lo cual fue necesario realizar una

interpolación posterior al apilamiento para obtener el espaciamiento constante dentro de la cuadrícula.

25A. Atenuación de ruido aleatorio en 3D

Un proceso de atenuación de ruido aleatorio en 3D (ARN) se aplicó de nuevo a los datos apilados.

26A. Filtro pasabanda variable en el tiempo

Un filtro pasabanda variable en el tiempo, es aplicado para atenuar cualquier ruido residual de bajo o alta frecuencia. Su diseño se basa en varias pruebas para comprobar que los límites de frecuencia fueron apropiados.

27A. Migración Post-apilado Kirchhoff

Debido a la forma integral de la migración Kirchhoff, su aplicación se reduce a apilar los datos a lo largo de las curvas que trazan la hora de llegada de la energía dispersa por puntos de imagen en la tierra. Algunas líneas se utilizaron para probar los siguientes parámetros: Máxima semi-apertura, buzamiento y el filtro de celdas. Para la etapa de producción que se asignaron respectivamente los siguientes valores de 3.000 m, 60 grados y 25 m.

28A. Atenuación de las huellas de la adquisición

Proceso FKFILT3D de WesternGeco suprime ruido coherente y huellas de la geometría a partir de volúmenes apilados 3D.

29A. Blanqueamiento espectral 3D

Como una etapa de procesamiento posterior del cubo migrado se decidió poner a prueba y aplicar un nuevo proceso de blanqueamiento para mejorar el contenido de frecuencias. Después de diferentes pruebas, la banda de paso de frecuencia se creó entre 15-130 Hz, el número de filtros en 9 y el ruido blanco en el 0,1%.

30A. Filtro pasabanda variable en el tiempo

Un filtro pasabanda de tiempo variable en el tiempo final se aplica para atenuar cualquier ruido residual de bajo o alta frecuencia.

31A. Conversión SEG-Y

Los productos finales de esta secuencia se convirtieron a formato SEG-Y.

B. Secuencia Preapilado en tiempo Tipo Kirchhoff, PSTM

23B. Blanqueamiento Espectral

Este proceso que lleva tiempo variantemente aplanar el espectro de la amplitud de las trazas sísmicas en una banda de frecuencia definida por el usuario. Las amplitudes de las frecuencias fuera de esta banda se suprimen. Es importante remarcar que este

proceso preserva amplitudes relativas. Después de diferentes pruebas, el filtro pasabanda de frecuencia se estableció en 12 a 130 Hz, el número de filtros en 2 y el ruido blanco en el 0,1%.

24B. Atenuación de ruido aleatorio en el dominio X-Spread

3 -D de ARN (atenuación de ruido aleatorio) mejora eventos lineales coherentes (más estrictamente, eventos planos coherentes) en relación con el ruido aleatorio mediante el uso de una técnica de filtrado que FXY

25B. Conversión SEG-Y

Los grupos de CDP resultados de esta secuencia se convirtieron a formato SEG-Y

26B. Ponderación de Voronoi: Análisis y aplicación

Las irregularidades en la geometría de adquisición pueden resultar en amplitudes anómalas. Los Polígonos de Voronoi se pueden utilizar como una alternativa eficaz particularmente en áreas donde la huella de adquisición es relativamente leve. El resultado es que las huellas de entrada se reducen (relativamente) en las zonas de cubrimiento alto reduciendo artefactos anómalos en los datos migrados.

27B. Geometría de la Migración

Un tema importante a tratar al ejecutar una migración pre-apilamiento es decidir cómo se repartirán los datos. Por último, un total de 72 offset planos fueron procesados de 0 m a 7200 m cada 100 m.

28B. Parámetros de prueba de Migración

Los parámetros son los siguientes: Máxima apertura, máximo buzamiento y filtro de tamaño de celda. Los valores que se probaron para cada parámetro son los siguientes:

- a) Máximo semi - apertura: 2000, 2500, 3000 m
- b) Máximo Buzamiento: 40, 60 grados
- c) Filtro de tamaño de celda: 25, 30, 37,5 y 45 m

29B. Interpolación irregular

Interpolación irregular se utiliza para regularizar, interpolando en celdas o agujeros que quedaron sin información.

30B. Migración Pre - apilado Kirchhoff (PSTM)

Después de ajustar los parámetros de la prueba de 2000 m (semi - apertura), 60 grados (por inmersión) y 25 m (tamaño del filtro de celdas) una iteración se ejecuta en las líneas de control de calidad para mejorar las velocidades escogidas. Las funciones de velocidad resultantes fueron interpoladas y suavizadas para crear finalmente un campo de velocidades de migración apropiado y que es utilizado para ejecutar el proceso PSTM

31B. Análisis de velocidad residual

Un análisis final de velocidad se realizó después de la migración con el fin de mejorar la respuesta del apilamiento en posiciones situadas cada 500 m.

32B. Atenuación múltiple en dominio Aleatorio

La propuesta de este proceso era mejorar la relación señal / ruido pre-apilado atenuando múltiples que interfieren con la continuidad de las reflexiones.

Para este proyecto, los grupos de CDP fueron corregidos con NMO, utilizando velocidades finales de apilamiento. Los grupos de CDP resultantes se convierten a formato SEG-Y.

33B. Apilamiento

Los grupos de CDP PSTM se apilaron sin la atenuación de múltiples usando el campo de velocidades del último análisis. La función de silencio exterior también se optimizó después PSTM.

34B. La atenuación de ruido aleatorio

Una atenuación de ruido aleatorio 3D (ARN) se aplicó de nuevo a los datos para atenuar cualquier ruido aleatorio de alta frecuencia que podría ser impulsado por el algoritmo de blanqueo espectral. La ventana de diseño fue de 51*51 celdas por 1000 ms.

35B. Adquisición Huella Atenuación

Un proceso de FKFILT3D se aplicó para suprimir el ruido coherente residual y la geometría del apilamiento.

36B. Filtro Pasabanda para tiempo variable.

Un filtro de pasabanda en tiempo variable se aplica para atenuar cualquier ruido residual de baja o alta frecuencia.

37B. Conversión SEG-Y

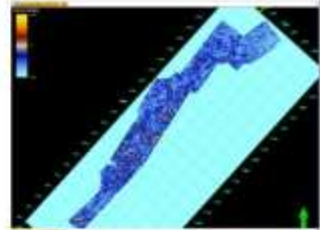
Todos los productos de esta secuencia (originales PSTM grupos de CDP, PSTM grupos de CDP después atenuación múltiple, PSTM apilado) también se convirtieron a formato SEG-Y.

B. Anexo: Resultados de Atributos Sísmicos

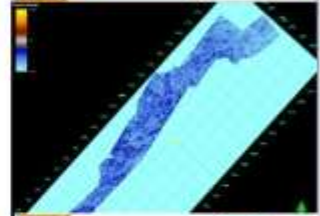
Secuencia A - Horizonte cercano a 28(?) Ma

Venta de tiempo

-1280 mseg

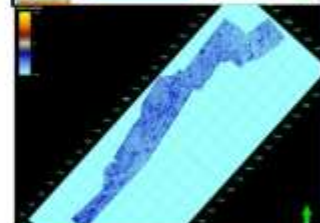


-1300 mseg

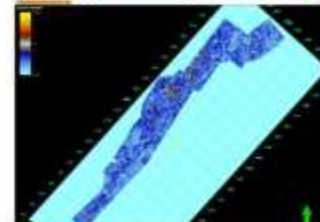


Atributo RMS

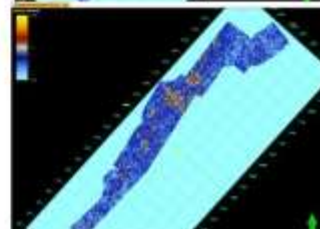
-1320 mseg



-1340 mseg



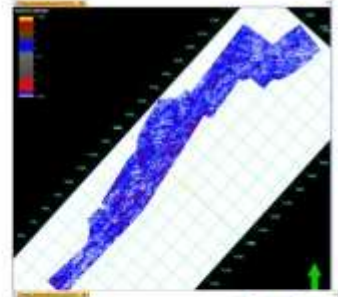
-1360 mseg



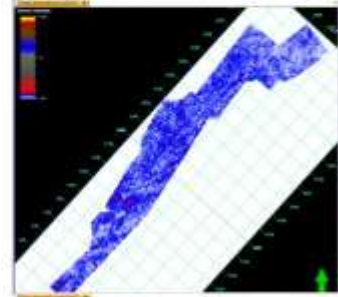
**Atributo
Sweetness**

Venta de tiempo

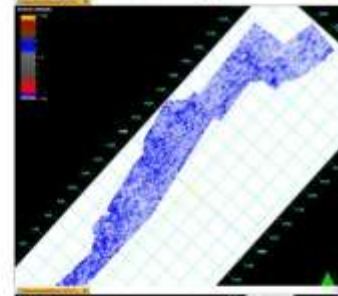
-1280 mseg



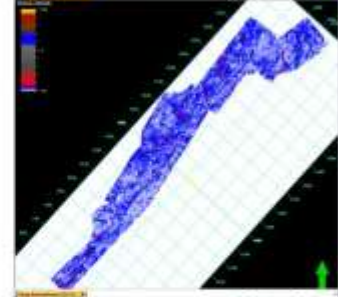
-1300 mseg



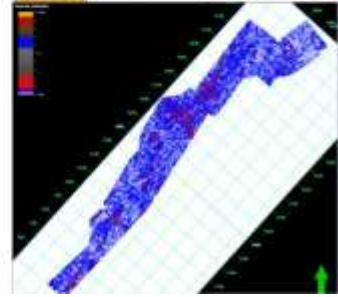
-1320 mseg

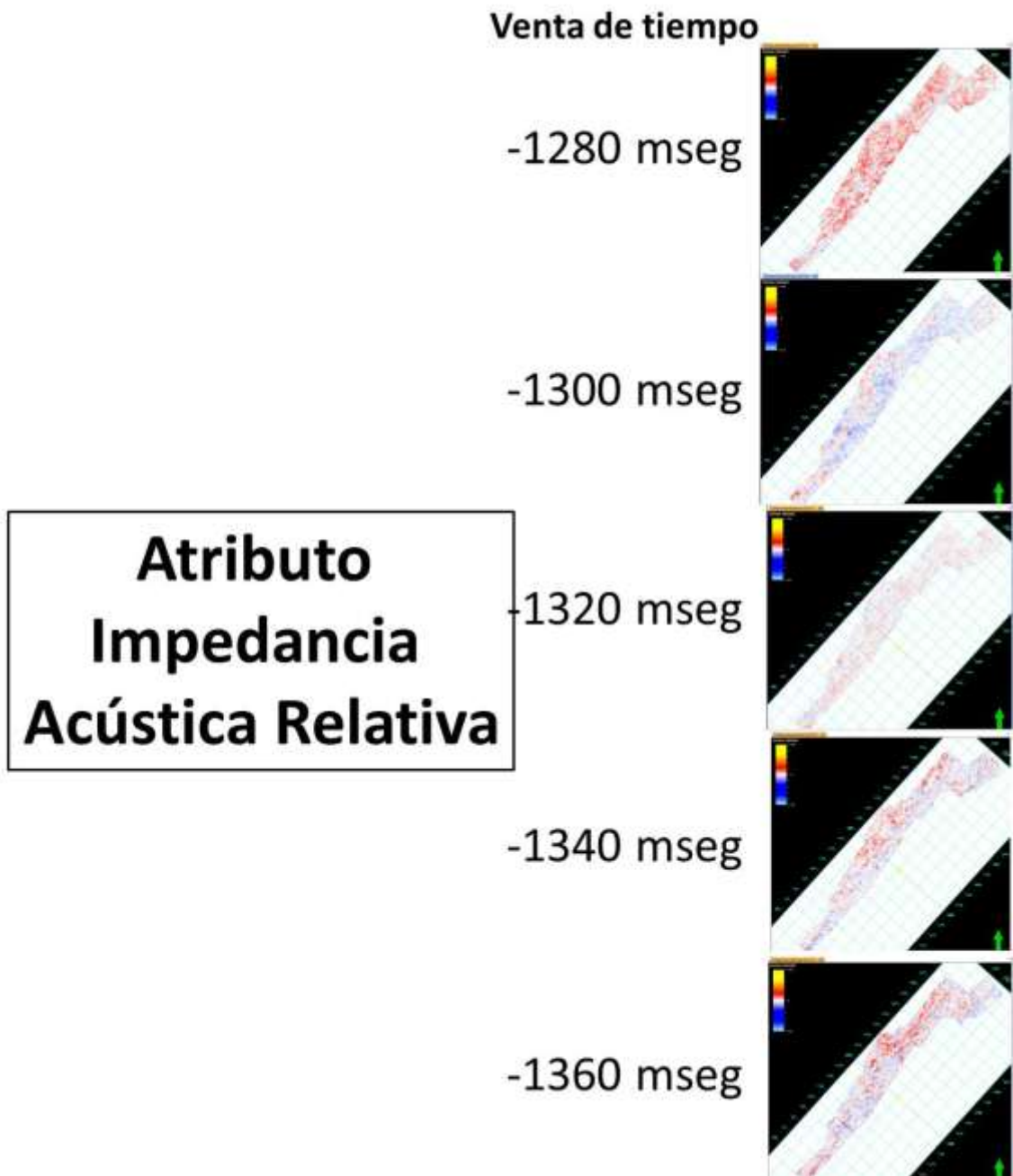


-1340 mseg

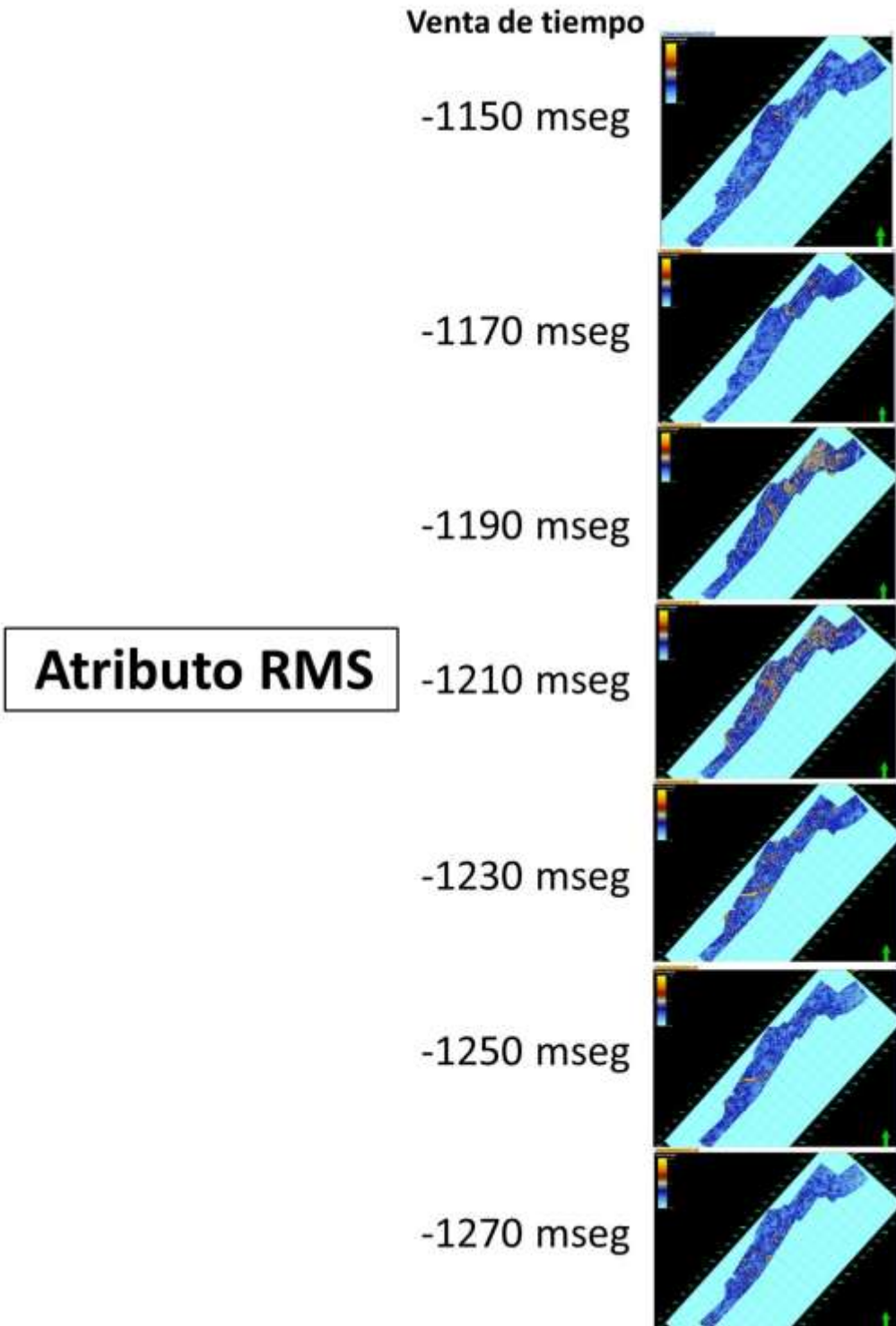


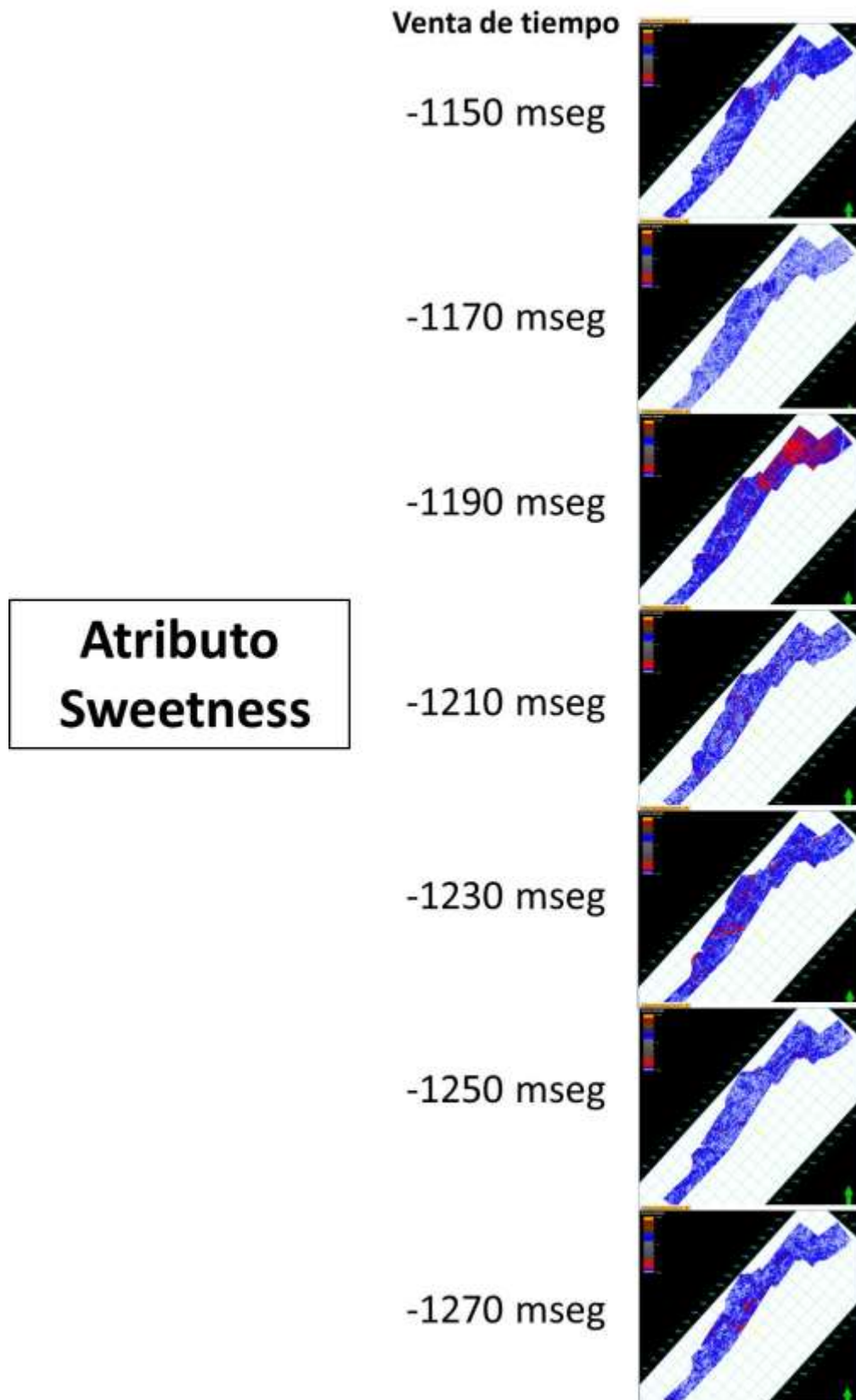
-1360 mseg

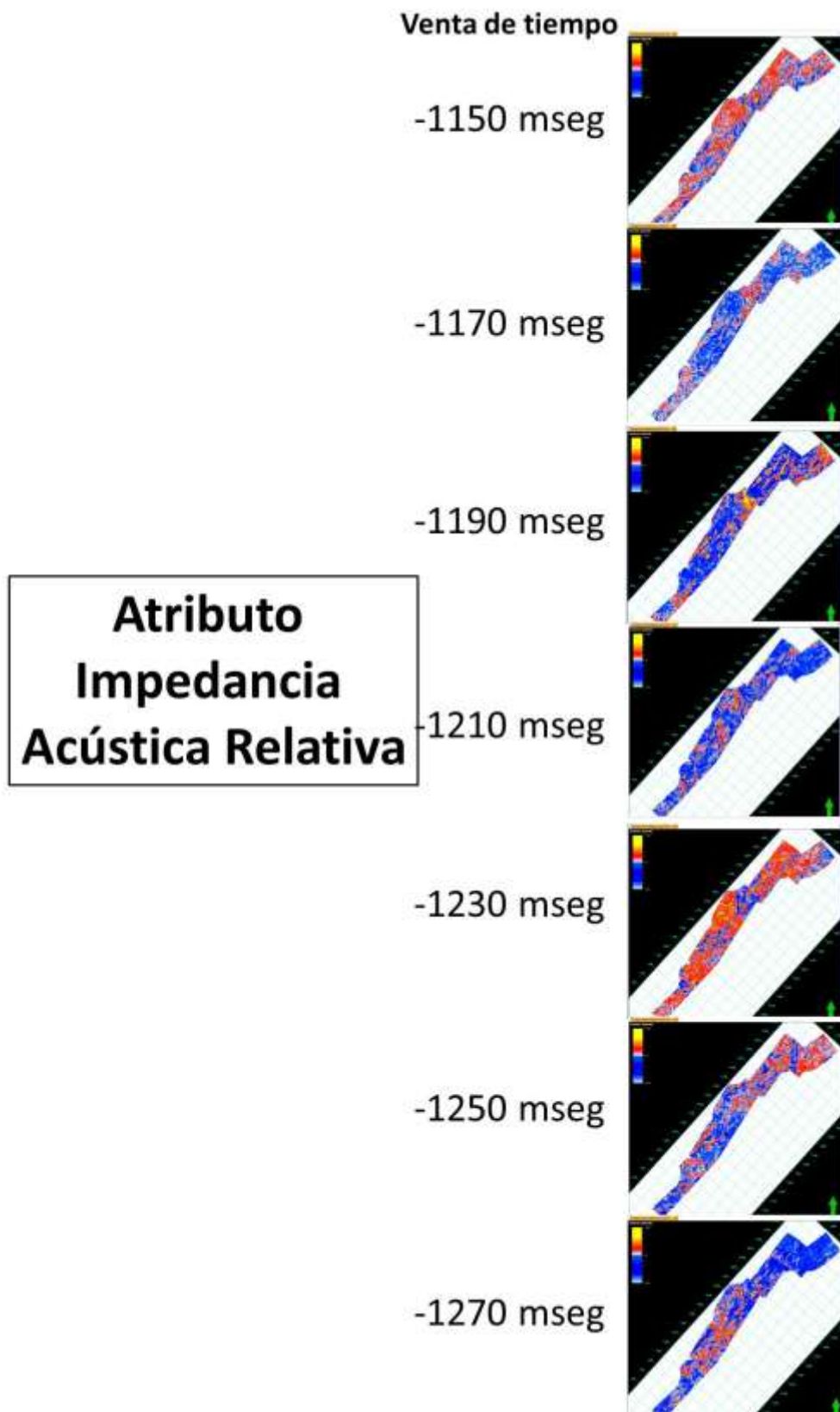




Secuencia B - Horizonte cercano a 23.03 Ma







Bibliografía

- Barrell, J. (1917). Rhythms and the measurements of geologic time. Geological Society of America Bulletin, 28, 745-904.
- Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Reyes-Harker, A. & Torres, V. (2007). Paleocene-Middle Miocene flexural-margin migration of the nonmarine Llanos foreland basin of Colombia. CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, 3(3), 141-160.
- Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J. & Reyes-Harker, A. (2008). An integrated analysis of an Orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera Orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. Geological Society of America Bulletin, 120, 1171-1197.
- Beicip Franlab & Ecopetrol. (1995). Estudio Geológico Regional: Cuenca de los Llanos Orientales, Bogotá.
- Brown, A. (1996). Seismic attributes and their classification. The Leading Edge, 15(10), 1090.
- Cepcolsa S.A. (2013). Análisis Assay. Disponible el 21 de Julio de 2013, de <http://dc336.4shared.com/doc/FQxPbijP/preview.html>
- Cooper, M. A., Addison, F.T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A. B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas. R., Pulham, A. J., & Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and middle Magdalena Valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologists, 79(10), 1421-1443.
- Cortés, M., Bayona, G., Aristizabal, J., Ojeda, G., Reyes Harker, A. & Gamba, N. (2006). Structure and kinematics of the eastern foothills of the eastern cordillera Of Colombia from balanced cross-sections and forward modelling. Memorias del IX Simposio Bolivariano de Cencas Subandinas, 14.
- Escalante, C. (2005). Integrated Seismic Stratigraphic and 1-D Basin Analysis of the Tayrona Depression–Offshore Baja Guajira Basin, Colombia. Tesis de Maestría. Oklahoma University.

- Fajardo, A., Rojas, E., Cristancho, J, & Consorcio G&G, Going System, L. (2000). Definición del Modelo estratigráfico en el intervalo Cretáceo tardío a Mioceno medio en la Cuenca Llanos Orientales y Piedemonte Llanero. Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Piedecuesta.
- Francis, A. & Syed F. (2001). Application of Relative Acoustic Impedance Inversion to Constrain Extent of E Sand Reservoir on Kadanwari Field. SPE & PAPG Annual Technical Conference, Islamabad, Pakistán.
- Galloway, W. & Hobday, D. (1983). Terrigenous clastic depositional systems: Applications to petroleum, Coal, and Uranium exploration. New York, Editorial Springer-Verlag.
- Gómez, E., Jordan, T., Allmendinger, R.W., & Cardozo, N. (2005). Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Geological Society of America Bulletin, 117(9-10), 1272-1292.
- Gómez, J., Nivia, A., Montes, N.E., Jiménez, D.M., Tejada, M.L., Sepúlveda, M.J., Osorio, J.A., Gaona, T., Diederix, H., Uribe, H. & Mora. M. (2007). Mapa Geológico de Colombia Escala 1:1'000.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- Gonzalez de Juana, C., Arozena De, I. & Picard, X. (1980). Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Caracas, Ediciones Foninves.
- Hart, B. (2008). Channel detection in 3-D seismic data using sweetness. America Association of Petroleum Geologists Bulletin, 92(6), 733–742.
- Jurado, M. J. (1989). Diagrafías: Su aplicación en el análisis sedimentario. Sociedad Geológica de España, 2, 3-4.
- Karogodin, Y. N. (1975). Relaciones mutuas entre los complejos cíclicos sedimentares emsecos de bacias contenido Petróleo e gas. Dohl. Akad. Nauk. SSSR, 220(6), 1414-1416.
- LANDMARK (2004). Post Stack Family Reference Manual. Houston: Landmark Graphics Corporation.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimate, C., & Rodríguez, F. (2006). Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. Tectonics, 25.
- Mitchum, R., Vail, P. & Thompson, S. (1977). The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis: Memoir 26 Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. America Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1, 53-62.
- Ojeda, G., Bayona, G., Pinilla, J., Cortés, M. & Gamba, N. (2006). Subsidence and geodynamic analysis of The Llanos Basin. Linking mountain building and basin filling processes. Memorias IX Simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas.

- Pérez, G. (1986). Chevron Petroleum Company of Colombia. Pozo-1 San Pedro de Arimena Association contract Final Report, Bogotá.
- Posamentier, H.W. & Allen, G. P. (1993). Siliciclastic sequence stratigraphic patterns in foreland ramp-type basins. *Geology*, 21, 455-458.
- Posamentier, H.W., Jervey, M.T. & Vail, P.R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition conceptual framework en: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. Sea Level Changes - An Integrated Approach. Special Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), 42, 110–124.
- Reyes, J. (1989). Estratigrafía de Secuencias y Potenciales trampas estratigráficas en el área del Meta-Llanos Orientales de Colombia. Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Piedecuesta.
- Reyes, J., Fajardo, A., Rubiano, J., Munar, F., Pérez, H., Sandoval, J., Soto, C., Hernandez, O. & Rojas, L. (1998). Evaluación Regional Meta. Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Piedecuesta.
- Rider, M. (2002). The geological interpretation of well logs. (2ª ed.). Scotland: Rider–French Consulting Ltd.
- Sangree, J. & Widmier, J. (1977). Seismic interpretation of clastic depositional facies: Memoir 26 Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. America Association of Petroleum Geologists Bulletin, 165-184.
- Santos, C., Jaramillo, C., Torres, V., Rueda, M., Flórez, P. & Rodríguez, G. (2007). Influencia Marina en el Eoceno Tardío del oriente y Suroriente de Colombia. *Boletín de Geología*, 29(2).
- Sarmiento, L.F. (2001). Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Inferences from tectonic models. Tesis de Doctorado. Netherlands research, School of Sedimentary Geology.
- (2011). Petroleum Geology of Colombia, Llanos Basin. Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT-ANH.
- Serra, O. (1984). Análisis de ambientes sedimentarios mediante perfiles de pozo. Editorial Schlumberger.
- Stuart, J., Mountney, N., Mccaffrey, W., Lang, S. & Collinson, J. (2014). Prediction of channel connectivity and fluvial style in the flood-basin successions of the Upper Permian Rangal coal measures (Queensland). *America Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 98(2), 191–212.
- Taner, M. T. (2001). Seismic attributes. *CSEG Recorder*, 48-56.
- Taner, M. T., Schuelker, O., Doherty, R. & Baysal E.(1994). Seismic Attributes revised. SEG 64th Annual International Meeting. 1104-1106.

- Vail, P.R., Mitchum, Jr. R.M. & Thompson III, S. (1977). Seismic Stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal "onlap". Memoir 26 Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1, 63–81.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S. & Hardenbol, J. (1988). An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. Sea Level Changes — An Integrated Approach. Special Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), 42, 39–45.