

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA SECUENCIAL DE LA SUCESIÓN SEDIMENTARIA OLIGO-MIOCENO EN LA ENSENADA DE LA VELA, SECTOR NORORIENTAL DE LA CUENCA DE FALCÓN

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la T.S.U Rueda R., Ehimar K.
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2016

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA SECUENCIAL DE LA SUCESIÓN SEDIMENTARIA OLIGO-MIOCENO EN LA ENSENADA DE LA VELA, SECTOR NORORIENTAL DE LA CUENCA DE FALCÓN

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Rafael Falcón
TUTORA INDUSTRIAL: Ing. Solange Ortega
COTUTOR: Prof. Enrique Toribio

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la T.S.U Rueda R., Ehimar K.
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2016

Caracas, Octubre de 2016

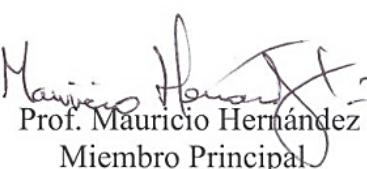
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por la T.S.U. Ehimar Rueda, titulado:

“Interpretación estratigráfica secuencial de la sucesión sedimentaria Oligo-Mioceno en la Ensenada de La Vela, sector nororiental de la Cuenca de Falcón”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Lenín González
Miembro Principal




Prof. Mauricio Hernández
Miembro Principal


Prof. Rafael Falcón
Miembro Principal
Tutor Académico

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD INGENIERÍA
ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFÍSICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

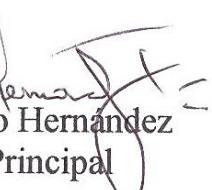
ACTA DE EVALUACIÓN DE TRABAJO ESPECIAL DE GRADO DE
LA T.S.U. EHIMAR KRISTAL RUEDA ROBALLO, C.I. 18392563.

Los abajo firmantes, integrantes del Jurado examinador designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado “INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA SECUENCIAL DE LA SUCESIÓN SEDIMENTARIA OLIGO-MIOCENA EN LA ENSENADA DE LA VELA, SECTOR NORORIENTAL DE LA CUENCA DE FALCÓN” presentado por la T.S.U. Ehimar Kristal Rueda Roballo, titular de la C.I. 18392563, para obtener el título de Ingeniero Geólogo, en el acto de defensa correspondiente, acordaron por unanimidad otorgar MENCIÓN DE HONOR, por considerar que el mismo es sobresaliente en todo su desarrollo y además constituye un valioso aporte al conocimiento del tema investigado y a la geología de la Cuenca de Falcón.

En fe de lo cual nos suscribimos, en la ciudad de Caracas a los veinticinco días del mes de octubre del año dos mil dieciseis.


Prof. Lenín González
Miembro Principal




Prof. Mauricio Hernandez
Miembro Principal


Prof. Rafael Falcón
Miembro Principal
Tutor

DEDICATORIA

A mis padres, quienes me lo han dado todo y son mi motivo de inspiración... Y a mis otras dos mamás: Delia y Lenny, este logro también es de ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios padre todopoderoso; a mi familia y a Juan Manuel Dagert por siempre apoyarme en todos mis proyectos. A la ilustre Universidad Central de Venezuela, en especial a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica por su formación profesional. A mis tutores: Rafael Falcón, Solange Ortega y Enrique Toribio, por sus contribuciones y valiosos consejos. A PDVSA- Intevep, por darme la oportunidad de formar parte del Proyecto Costa Afuera, al personal asociado a este proyecto, en especial al Ing. Javier Vasquez por su orientación y al Ing. Israel Graterol por sus valiosos aportes y enseñanzas durante la realización de la presente investigación.

Rueda R., Ehimar K.

INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA SECUENCIAL DE LA SUCESIÓN SEDIMENTARIA OLIGO-MIOCENO EN LA ENSENADA DE LA VELA, SECTOR NORORIENTAL DE LA CUENCA DE FALCÓN

**Tutor Académico: Prof. Rafael Falcón. Tutor Industrial: Ing. Solange Ortega.
Cotutor: Prof. Enrique Toribio. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2016, 170 p.**

Palabras claves: estratigrafía secuencial, sismo-estratigrafía, Cuenca de Falcón, Ensenada de La Vela.

Resumen

La interpretación estratigráfica secuencial de la sucesión sedimentaria Oligo-Mioceno de la Ensenada de La Vela, sector nororiental de la Cuenca de Falcón, costa afuera, se basó en el análisis de 1130 km² de sísmica 3D, migrada en tiempo y la integración de datos de 23 pozos ubicados dentro del volumen sísmico, a partir de registros eléctricos e información sedimentológica y bioestratigráfica procedente de 1943,25 pies de núcleos recuperados.

Se determinaron seis (6) discordancias mayores, que separan cuatro (4) secuencias estratigráficas de 2do orden, referidas como: Secuencia A (Oligoceno-Mioceno Inferior), Secuencia B (Mioceno Inferior - Medio), Secuencia C (Mioceno Medio - Superior) y Secuencia D (Mioceno Superior - Plioceno Inferior), y dos (2) secuencias menores de 3er orden, dentro de la secuencia C, separadas por una discordancia de carácter regional, de edad Mioceno Tardío. Estas secuencias descansan sobre un basamento de edad Meso-Neoproterozoico. Sísmicamente las secuencias presentan una configuración variable de los reflectores, con patrones que van desde divergente y paralelo en las dos primeras secuencias, a sigmoidal y oblícuo en las tres últimas. Los tipos de terminaciones de las reflexiones sísmicas, que definen las discontinuidades estratigráficas presentes, son principalmente de truncamiento erosivo, de onlap y de downlap, y responden principalmente a eventos tectónicos y en menor proporción a cambios eustáticos, como factores modificadores de su disposición en el área.

Las secuencias estratigráficas definidas, expresan la historia geológica del relleno sedimentario de la Ensenada de La Vela y su relación con la evolución geodinámica de la Cuenca de Falcón, durante el Oligo-Mioceno, periodo en el que se tiene

subsidencia de la cuenca, la acción compresiva de la placa Caribe y el levantamiento andino. Como consecuencia de estos eventos, se tiene el desarrollo de discordancias que constituyen prominentes marcadores estratigráficos y una predominancia de ciclos regresivos a partir del Mioceno Medio, lo cual indica más aporte de terrígenos, provenientes del suroeste, cuya dirección de transporte es comprobada por la existencia de canales y/o cañones y abanicos submarinos, observados al norte del volumen sísmico, dentro de las secuencias más jóvenes. Estos depósitos de ambientes marinos de aguas profundas, asociados a sistemas de nivel bajo (LST), poseen grandes dimensiones y podrían representar nuevas oportunidades exploratorias en el Campo La Vela Costa Afuera, tanto en un contexto de sistemas petrolíferos/gasíferos convencionales como no convencionales.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Resumen.....	vii
Índice general.....	ix
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	5
1.5 OBJETIVOS.....	6
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.6 ANTECEDENTES.....	6
CAPÍTULO II.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 GENERALIDADES.....	11
2.2 ESTRATIGRAFÍA SECUENCIAL EN CARBONATOS.....	20
2.3 ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA.....	21
2.3.1 CONFIGURACIÓN DE LAS REFLEXIONES SÍSMICAS.....	22
2.3.2 TIPOS DE TERMINACIONES SÍSMICAS DE LOS ESTRATOS.....	23
CAPÍTULO III.....	26
3. MARCO GEOLÓGICO.....	26
3.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	26
3.2 GEOLOGÍA LOCAL.....	33
3.2.1 MODELO ESTRATIGRÁFICO.....	33
3.2.2 DESCRIPCIÓN DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS.....	38
3.2.3 MODELO ESTRUCTURAL.....	52
CAPÍTULO IV.....	62
4. MARCO METODOLÓGICO.....	62
4.1. I ETAPA- PROCESAMIENTO DE LA BASE DE DATOS.....	63
4.2 II ETAPA- INTERPRETACIÓN SÍSMICA.....	69
4.3 III ETAPA-INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS DE POZOS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE DE NÚCLEOS.....	74
4.4 IV ETAPA – INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA CON LA DE REGISTROS DE POZOS Y NÚCLEOS.....	77

CAPÍTULO V.....	79
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	79
5.1 PROCESAMIENTO DE LA BASE DE DATOS.....	79
5.1.1 Calidad de los datos sísmicos.....	79
5.1.2 Resolución sísmica vertical.....	80
5.2 INTERPRETACIÓN SÍSMICA.....	82
5.2.1 Interpretación de fallas.....	82
5.2.2 Interpretación de secuencias sismo-estratigráficas.....	84
5.2.3 Calibración sísmica.....	104
5.3 INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS DE POZOS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE DE NÚCLEOS.....	107
5.3.1 Identificación de superficies estratigráficas en núcleos.....	107
5.3.2 Amarre núcleo-pozo.....	115
5.3.3 Definición y correlación de secuencias depositacionales en los registros de pozos.....	117
5.4 INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	121
5.5 DESCRIPCIÓN DE LAS SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS.....	126
5.6 MARCO CRONOESTRATIGRÁFICO.....	128
5.7 MODELO ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL.....	130
5.7.1 SECUENCIA A (OLIGOCENO TARDÍO-MIOCENO TEMP.).....	132
5.7.2 SECUENCIA B (MIOCENO TEMPRANO - MEDIO).....	134
5.7.3 SECUENCIA C (MIOCENO MEDIO-TARDÍO).....	137
5.7.4 SECUENCIA D (MIOCENO TARDÍO- PLIOCENO TEMP.).....	138
CAPÍTULO VI.....	140
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
6.1 CONCLUSIONES.....	140
6.2 RECOMENDACIONES.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
ANEXOS.....	150

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Ubicación relativa del área de estudio.	5
Figura N°2. Descripción esquemática de diferentes definiciones de secuencias.....	13
Figura N°3. Ilustración esquemática de parasecuencias definidas por facies.....	15
Figura N°4. Ilustración esquemática de parasecuencias definidas por cambios de espesor de los estratos	16
Figura N°5. Tipos de conjuntos de parasecuencias.....	17
Figura N°6. Representación diagramática de los conceptos de jerarquía.....	19
Figura N°7. Etapas genéticas en la deposición de carbonatos.	21
Figura N°8. Configuraciones de reflexiones sísmicas.....	23
Figura N°9. Tipos de terminaciones sísmicas de los estratos.....	24
Figura N°10. Relación estratigráfica y significado cronoestratigráfico de los patrones de las terminaciones de reflexión sísmica.....	25
Figura N°11. Tabla de correlación generalizada de la Cuenca de Falcón.....	27
Figura N°12. Modelo esquemático estratigráfico secuencial (A) OSO-ENE, (B) NNO-SSE, para el relleno de la Cuenca de Falcón	30
Figura N°13. Modelo evolutivo para la cuenca “pull-apart” de Falcón.....	32
Figura N°14. Modelo de orógeno en flotación para la Cuenca Falcón-Bonaire.....	32
Figura N°15. Mapa de ubicación de los pozos exploratorios en la Ensenada de La Vela.....	35
Figura N°16. Columna geológica generalizada del área de la ensenada de La Vela, sector costa afuera, Cuenca de Falcón.....	37
Figura N°17. Porcentaje de núcleos recuperados por unidad sedimentaria en el área de la ensenada de La Vela.....	39
Figura N°18. Sección sísmica vertical en dirección SE – NO, en la cual se observan fallas normales en configuración tipo “cola de caballo”.....	53
Figura N°19. Superficie en 3D del tope del Miembro Cauderalito, donde se observan las estructuras identificadas.....	55

Figura N°20. Polígonos de fallas identificadas en el tope del basamento, en color rojo se muestran las fallas maestras y en negro las fallas secundarias.....	56
Figura N°21. Transecto sísmico regional, el cual muestra la zona norte del cubo sísmico y la falla normal más al norte del área de estudio, con rumbo este-oeste.....	57
Figura N°22. Superficie del tope del basamento en profundidad, se muestran las fallas maestras y estructuras identificadas en el área de estudio.....	59
Figura N°23. Línea arbitraria del cubo sísmico, orientada SO-NE, donde se observan las estructuras definidas, inversión de fallas y plegamiento en La Ensenada de La Vela.....	60
Figura N°24. Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	62
Figura N°25. Diagrama de flujo de la I etapa de estudio.....	63
Figura N°26. (A) Mapa de calidad de los datos de los pozos. (B) Mapa de calidad de los núcleos recuperados por pozo.....	67
Figura N°27. Mapa del levantamiento sísmico 3D de La Vela de Coro.....	68
Figura N°28. Diagrama de flujo de la II etapa de estudio.....	69
Figura N°29. Malla de interpretación y horizonte interpolado del tope del basamento, en tiempo.....	70
Figura N°30. Polígonos de fallas sobre la malla de interpretación en tiempo y ubicación relativa de los polígonos de fallas del tope del basamento.....	71
Figura N°31. Diagrama de flujo de la metodología usada para la generación de sismogramas sintéticos.....	72
Figura N°32. Típico flujo de trabajo para construir modelos de velocidades basados en tablas tiempo-profundidad.....	73
Figura N°33. Malla de interpretación y horizonte interpolado en profundidad del tope del basamento.....	74
Figura N°34. Diagrama de flujo de la III etapa de estudio.....	75
Figura N°35. Diagrama de flujo de la IV etapa de estudio.....	77
Figura N°36. Sección sísmica con dirección SO-NE, donde se observan artefactos y pérdida en la continuidad de los reflectores.....	79
Figura N°37. Espectros de amplitud, donde se observa la frecuencia dominante para una sección.....	80

Figura N°38. Sección sísmica con dirección SO-NE, donde se muestra el sistema de fallas maestras con dominio basal.....	82
Figura N°39. Sección sísmica con dirección SE-NO, donde se muestra el sistema de fallas secundarias con configuración tipo “cola de caballo”	83
Figura N°40. Sección sísmica orientada norte-sur, donde se muestran las discontinuidades estratigráficas mayores, en el área de La Ensenada de La Vela.....	84
Figura N°41. Sección sísmica orientada este-oeste, donde se muestran las discontinuidades estratigráficas mayores, en el área de La Ensenada de La Vela.....	85
Figura N°42. Sección sísmica orientada SO-NE, donde se muestran las discordancias locales.....	86
Figura N°43. Tipos de terminaciones de las reflexiones sísmicas existentes en el área de la Ensenada de La Vela.....	87
Figura N°44. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas del basamento acústico.....	89
Figura N°45. (A) Superficie del tope del basamento en profundidad (SB1), donde se muestran los altos y bajos estructurales. (B) Ubicación de las fallas que cortan el basamento, en color rojo las fallas maestras.....	90
Figura N°46. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “1” (S1).....	91
Figura N°47. Sección sísmica donde se muestra la existencia de la secuencia sismo-estratigráfica “1” (S1), en la depresión al norte del cubo sísmico, zona que corresponde a la Cuenca de Paraguaná.....	92
Figura N°48. Sección sísmica con dirección sur-norte donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “2” (S2).....	94
Figura N°49. Sección sísmica arbitraria SE-NO donde se muestra el mayor espesor de la secuencia sismo-estratigráfica “2” (S2).....	95
Figura N°50. (A) Superficie del SB3 en profundidad. (B) Ubicación de las fallas que cortan la secuencia sismoestratigráfica “2”	95
Figura N°51. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “3” (S3).....	97
Figura N°52. (A) Superficie del SB4 en profundidad. (B) Ubicación de las fallas que cortan la secuencia sismoestratigráfica “3”	98

Figura N°53. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “4” (S4).....	99
Figura N°54. Abanico submarino, ubicado al norte del cubo sísmico, dentro de la secuencia sismo-estratigráfica “4”	101
Figura N°55. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “5” (S5).....	102
Figura N°56. Sección sísmica arbitraria con dirección SE-NO, donde se muestran los canales y abanico submarino dentro de la secuencia sismo-estratigráfica “5”	103
Figura N°57. Calibración sísmica del pozo tipo P-28.....	104
Figura N° 58. Calibración sísmica de los pozos P-14 Y P-15, respectivamente.....	105
Figura N°59. Amarre pozo tipo P-28, curva de GR desplegada sobre la sísmica, mostrando un buen cotejo pozo-sísmica.....	106
Figura N°60. Superficies estratigráficas identificadas en los núcleos 5 y 3 del pozo P-28.....	108
Figura N°61. Superficies estratigráficas identificadas en los núcleos 3 y 1 del pozo P-28.....	110
Figura N°62. Resumen bioestratigrafía del pozo P-28.....	110
Figura N°63. Columna sedimentológica del pozo P-28.....	111
Figura N°64. Tipos de rocas presentes en la unidad siliciclástica del pozo tipo P-28.....	112
Figura N°65. Tipos de texturas depositacionales presentes en la unidad carbonática del pozo tipo P-28.....	113
Figura N°66. Tipos de texturas depositacionales presentes en el pozo P-14.....	114
Figura N°67. Tendencia paleoambiental, del pozo P-14, donde se observa el pico máximo de nanoplancton calcáreo.....	115
Figura N°68. Amarre núcleo-pozo del pozo tipo P-28.....	116
Figura N°69. Sección de correlación SE-NO, se muestran las secuencias estratigráficas definidas y las tendencias depositacionales.....	119
Figura N°70. Correlación sur-norte, donde se muestra el adelgazamiento en el espesor de las secuencias hacia el norte.....	120

Figura N° 71. Resumen de las edades determinadas en los pozos.....	121
Figura N°72. Integración sísmica-pozo, donde se muestran las edades de las secuencias estratigráficas.....	122
Figura N°73. Probable equivalencia entre las unidades litoestratigráficas del Oligo-Mioceno y las secuencias estratigráficas definidas.....	124
Figura N°74. Mapa de ubicación y orientación de las secciones estratigráficas.....	124
Figura N°75. Análisis estratigráfico secuencial del pozo tipo P-28. Se muestran las superficies estratigráficas interpretadas y las tendencias depositacionales.....	125
Figura N°76. Cuadro cronoestratigráfico de La Ensenada de La Vela.....	129
Figura N°77. Modelo esquemático-conceptual, donde se muestra la evolución tectono-estratigráfica de la secuencia A, durante el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano.....	134
Figura N°78. Modelo esquemático- conceptual, donde se muestra la evolución tectono-estratigráfica de la secuencia B, durante el Mioceno Temprano-Medio.....	136

INDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Sistema basado en la duración de ciclos eustáticos.....	19
Tabla N° 2. Núcleos recuperados por pozo en el área de estudio.....	39
Tabla N°3. Registros por pozo. Las principales curvas utilizadas en la investigación son: GR (Rayos Gamma), SP (Potencial espontáneo), RHOB (Densidad) y DT (Sónico).....	65
Tabla N°4. Pozos con checkshot.....	65
Tabla N°5. Pozos con núcleos.....	66
Tabla N°6. Cálculo de la resolución sísmica vertical.....	81

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El área de estudio se localiza en la Ensenada de La Vela, sector nororiental de la Cuenca de Falcón, costa afuera, al este de La Vela de Coro, ocupando una extensión de 1.130 km², que corresponden al cubo sísmico. Comprende el Campo La Vela Costa Afuera, el cual ha sido explorado desde los años 70, década donde se realizaron las primeras perforaciones, teniéndose hasta la fecha un total de 26 pozos exploratorios, 24 perforados por la Corporación Venezolana del Petróleo (CVP) entre los años 1972-1980 y dos por Phillips Petroleum entre 1998-2000, de los cuales se obtuvieron excelentes resultados de yacimientos de petróleo y gas.

En el marco de las actividades exploratorias llevadas a cabo actualmente por PDVSA-Intevep, Proyecto Costa Afuera, en el área comprendida entre la Península de Paraguaná y Golfo Triste, se tiene planteado establecer un marco tectono-estratigráfico regional, incorporando sísmica 3D, 2D, registros de pozos y estudios sedimentológicos y bioestratigráficos en núcleos. En este sentido se hace necesario conocer con mayor precisión la configuración estratigráfica del registro sedimentario en La Ensenada de La Vela, sobre la cual existe muchas discrepancias a pesar de que en el área se concentra la mayor cantidad de datos tanto de sísmica como de pozos; todo esto permite que los estudios en dicha área sean económica y académicamente viables. Por lo anterior, se plantea realizar la presente investigación que tiene como objetivo principal: realizar la interpretación estratigráfica secuencial de la sucesión sedimentaria Oligo-Mioceno en la Ensenada de La Vela sector nororiental de la Cuenca de Falcón (costa afuera), utilizando sísmica 3D e integrando datos de registros de pozos y núcleos.

El uso de los conceptos de estratigrafía secuencial en la integración regional de áreas relativamente cercanas, dentro de una misma cuenca y similar tiempo

geológico, no sólo conduce al mejoramiento de las correlaciones geológicas, sino que conlleva a un mejor entendimiento e interpretación del orden estratigráfico, rasgos estructurales y sistemas depositacionales. Por lo tanto, con la aplicación de esta técnica, se contará con una nueva y actualizada información del subsuelo de la Ensenada de La Vela, que posteriormente sirva de apoyo para la correlación y propuesta del marco geológico regional en el área comprendida entre la Península de Paraguaná y Golfo Triste.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el marco de las actividades exploratorias llevadas a cabo actualmente en el Proyecto Costa Afuera por PDVSA-Intevep, en el área comprendida entre la Península de Paraguaná y Golfo Triste, se plantea establecer un marco tectono-estratigráfico regional incorporando principalmente sísmica 3D, y estudios sedimentológicos a nivel de núcleos, y para ello es necesario conocer la configuración estratigráfica de la Ensenada de La Vela, información de la cual existe mucha discrepancia, no conociéndose con exactitud.

Las primeras investigaciones exploratorias en el área de estudio, se realizaron durante 1972 a 1974, por la Corporación Venezolana del Petróleo, descubriéndose el campo del mismo nombre y lográndose conocer por primera vez la estratigrafía del subsuelo de la plataforma de la Ensenada de La Vela, a través de las perforaciones de 12 pozos exploratorios. Luego Aboud y Aboud (1978), realizan una interpretación de las secciones sísmicas en la Ensenada de La Vela, utilizando principalmente información sísmica y de pozos, pero enfocándose estrictamente en la parte de geofísica.

Desde ésta fecha hasta la actualidad se han realizado numerosos trabajos concernientes a la evolución tectono-estratigráfica de la Cuenca de Falcón y a la región costa afuera al norte de Venezuela. Sin embargo, no se tienen estudios geológicos recientes que se concentren en la Ensenada de La Vela, y aún menos donde se halla realizado un análisis estratigráfico secuencial. Por lo tanto, surge la necesidad de realizar la presente investigación, para establecer la configuración estratigráfica de la deposición cenozoica de la Ensenada de La Vela a través de la interpretación sísmica, de registros de pozos y estudios sedimentológicos de núcleos, con la finalidad de contar con una nueva y actualizada información del subsuelo que sirva de apoyo para la correlación e interpretación del marco geológico del área comprendida entre la Península de Paraguaná y Golfo Triste.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Recientes hallazgos sobre la región costa afuera al norte de Venezuela, específicamente entre la Península de Paraguaná y Golfo Triste, evidencian su potencial de yacimientos de hidrocarburos, lo cual hace que los estudios sostenibles en esta región sean económicos y académicamente viables. Trabajos anteriores han revelado su complejidad geológica, tanto estructural como estratigráfica, de aquí surge la necesidad de realizar una integración de la información sísmica y de pozos para establecer un marco tectono-estratigráfico.

Una de las cuencas que ha tomado, especial interés es la Cuenca de Falcón, la cual ha sido explorada por la industria petrolera desde 1912, y hasta la actualidad más de 200 pozos exploratorios han sido perforados y se han adquirido cerca de 12.000 km de sísmica, arrojando como resultado el descubrimiento de campos petroleros productores como La Ensenada de La Vela; de allí que Boesi y Goddard (1991), establecieron que las cocinas probadas de hidrocarburos en Falcón están generalmente restringidas a las áreas de los surcos tales como el Surco de Urumaco al oeste y la Ensenada de La Vela al este. De igual manera, la Cuenca de Falcón, constituye probablemente una de las mejores regiones del país para evaluar la actividad tectónica durante los últimos 30 millones de años en el occidente de Venezuela, debido a la existencia de una sedimentación casi continua y bastante bien datada paleontológicamente (Audemard, 1995).

Ahora bien, En la Ensenada de La Vela de Coro, se cuenta con una gran cantidad de información sísmica y de pozos, por lo que utilizando la estratigrafía secuencial para la interpretación de la configuración de la deposición cenozoica en esta área, y correlacionando la información hacia la región comprendida entre la Península de Paraguaná y Golfo Triste, se lograría establecer un marco tectono-estratigráfico regional.

1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de interés para esta investigación, se encuentra ubicada en la Ensenada de La Vela, al este de la Península de Paraguaná, norte de La Vela de Coro, pertenece al sector nororiental de la Cuenca de Falcón, específicamente al Campo La Vela Costa Afuera, ocupando una extensión de 1.130 km², que corresponden al cubo sísmico, y se extiende al norte hasta la curva batimétrica de los 1500 pies aproximadamente. En la figura N°1, se muestra la ubicación del área de estudio.

Geológicamente se ubica en una plataforma con buzamiento al sureste, y en un área tectónicamente compleja, al sur del frente de deformación de la Placa Caribe con la Placa Suramericana y al norte del corrimiento de Guadalupe.

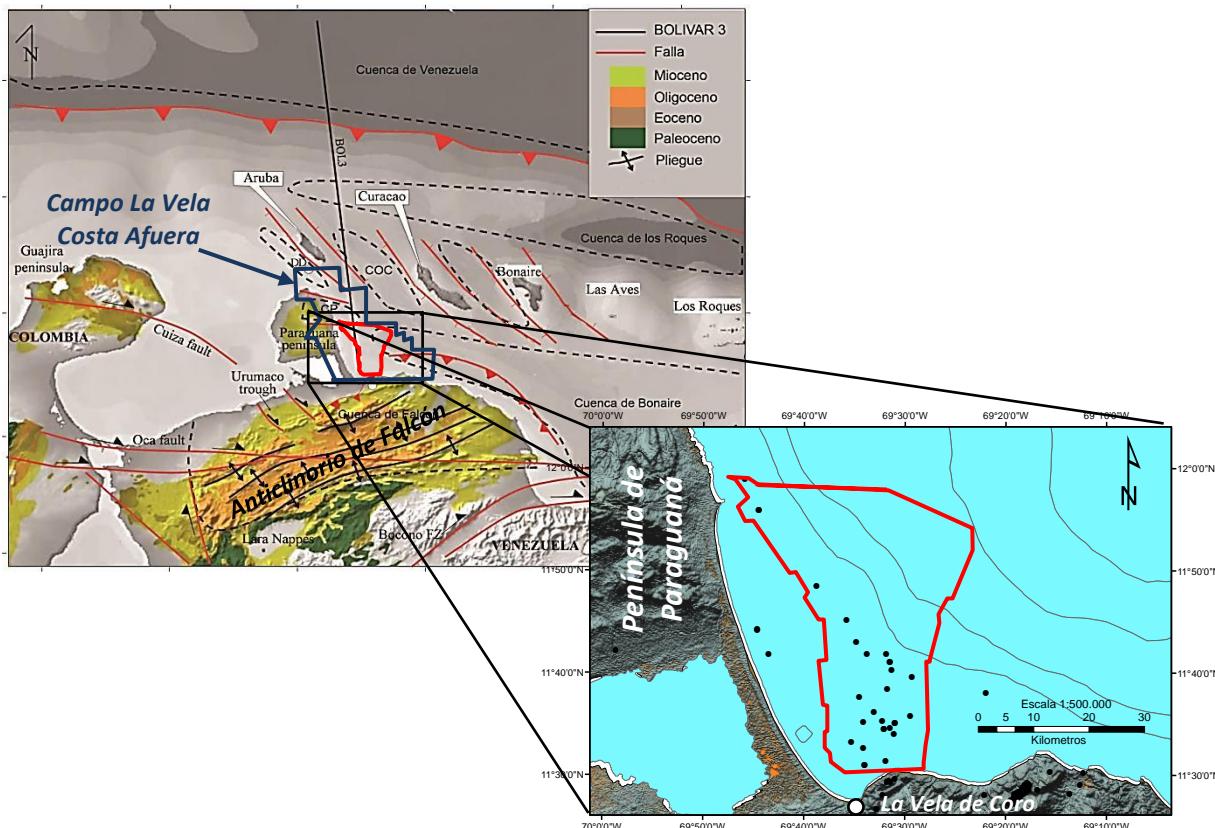


Figura N° 1. Ubicación relativa del área de estudio. También se muestra mapa geológico tomado de Gorney *et al.* (2007), donde se evidencia la complejidad geológica en el área.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la interpretación estratigráfica secuencial de la sucesión sedimentaria Oligo-Mioceno en la Ensenada de La Vela, sector nororiental de la Cuenca de Falcón (costa afuera), utilizando sísmica 3D e integrando datos de registros de pozos y núcleos.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Generar mapas de ubicación y calidad de los datos a utilizar en la investigación.
2. Identificar secuencias sismo-estratigráficas y sistemas encadenados involucrados.
3. Determinar secuencias estratigráficas, con la información de los registros de pozos y núcleos disponible.
4. Integrar la información sísmica con la información sedimentológica, bioestratigráfica y de registros de pozos, para elaborar secciones estratigráficas y un cuadro cronoestratigráfico.

1.6 ANTECEDENTES

Existe una gran variedad de estudios de carácter regional en la Cuenca de Falcón, donde se ha propuesto su marco estratigráfico, y su evolución tectono-estratigráfica, como los de: Muessing (1984), donde desarrolla un estudio sobre la configuración tectónica de la cuenca de Falcón y postula una evolución de cuenca tipo transtensional; Boesi y Goddard (1991), proponen un modelo de “cubeta”, para la Cuenca de Falcón, en base a la primera compilación estratigráfica de la cuenca, realizada por Wheeler (1963) y confirmada por González de Juana *et al.* (1980), lo

cual condiciona la distribución sedimentaria durante la depositación del Oligoceno-Mioceno; Audemard (1995), establece una síntesis estratigráfica, génesis e inversión tectónica de la Cuenca de Falcón, a través del análisis de los diversos eventos que han afectado ésta cuenca y la definición de tensores de esfuerzos asociados a cada uno de estos eventos; Macellari (1995), presentó una visión global de la Cuenca de Falcón, analizando la sedimentación cenozoica y la tectónica, a través del estudio de sísmica regional, pozos, trabajo de campo y análisis de literatura; Ghosh *et al.* (1997), realizan un trabajo sobre la evolución tectono-estratigráfica en la Cuenca de Falcón y una evaluación de los elementos del sistema petrolífero; Porras (2000), completa un estudio tectono-estratigráfico y discrimina cada uno de los eventos que han tenido lugar en la región de Falcón Oriental, mediante el uso de información sísmica y de pozos. Los tres últimos estudios hacen mención a la Ensenada de La Vela.

Los trabajos relacionados a la Ensenada de La Vela están fundamentados en pozos exploratorios y en sísmica adquiridos a través del tiempo (algunos de estos han sido publicados y otros son informes internos de PDVSA), entre estos se encuentran:

Corporación Venezolana del Petróleo, CVP (1974): en su proyecto “Evaluación Geofísica y Geológica de la Ensenada de La Vela y áreas adyacentes en tierra firme”, realizaron las primeras investigaciones hacia la búsqueda de trampas estructurales y estratigráficas miocenas en el área de estudio, a través de la perforación de 12 pozos exploratorios, la revisión integral e interpretación de dos líneas sísmicas, y el análisis de secciones estratigráficas; obteniendo excelentes resultados de acumulación de hidrocarburos y descubriendose así el campo con el nombre de Ensenada de La Vela.

Aboud y Aboud (1978): en su proyecto “interpretación sísmica del área Ensenada de La Vela”, realizan una prospección del potencial petrolífero de la Ensenada de La Vela, con la finalidad de reinterpretar las secciones sísmicas y ajustar las localizaciones exploratorias que se habían propuesto en base al estudio realizado por la CVP en 1974, utilizando principalmente información sísmica y registros de pozos

ya existentes en el área. El estudio se trató estrictamente a lo concerniente a la parte de geofísica.

Cabrera (1985): en su trabajo de maestría propone la evolución estructural de Falcón Central, incluyendo en ellas las áreas de la Ensenada de La Vela y del Golfo Triste, a través de información sísmica, donde reconoce y describe cuatro ciclos sedimentarios dentro del Terciario: (1) Oligoceno Medio a Superior; (2) Mioceno Inferior; (3) Mioceno Medio; y (4) Mioceno Inferior- Plioceno. Identifica dos etapas de deformación: (1) una extensional de edad Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano, evidente en la Ensenada de La Vela y Surco de Urumaco; y (2) una compresional, reciente, contemporánea con la orogénesis andina, responsable de la configuración actual de Falcón.

Carnevalli, et al., (2000): en el Proyecto de Exploración por Hidrocarburos Costa Afuera de Venezuela (PECA), evalúan el potencial de hidrocarburos por descubrir en 120.000 km² de área, ubicados principalmente en la Plataforma Continental Venezolana, desde el este de La Vela en Falcón hasta la Plataforma Deltana del río Orinoco. El estudio incluyó la información estratigráfica y de fluidos de unos 60 pozos perforados costa afuera, y se incorporó la interpretación de unos 15.000 km de sísmica distribuidos a lo largo de toda la plataforma. Como resultado muestran prospectos asociados a cada una de las cuencas dentro de esa extensión. El área de la Ensenada de La Vela no se estudió en detalle; sin embargo, la información de pozos y sísmica fue tomada en cuenta y usada durante la fase interpretativa.

Informe interno PDVSA, Estudios Integrados, (2009): la División EyP Costa Afuera decidió evaluar la prospectividad del Campo La Vela de Coro, con la finalidad de realizar un estudio de reservas para evaluar la potencialidad de los yacimientos contenidos en esta área; la metodología empleada, consistió en la caracterización estática mediante la elaboración de los modelos estructural, sedimentológico, estratigráfico y petrofísico, el modelado de fracturas y un análisis de ingeniería convencional. La integración de toda esta información permitió determinar

las áreas prospectivas del campo, para finalmente estimar los volúmenes de hidrocarburos en sitio y a partir de los resultados se consideró que era de alto riesgo realizar inversiones para el desarrollo del Campo La Vela de Coro, debido a la alta complejidad geológica y bajos volúmenes de hidrocarburo en sitio.

Informe interno PDVSA, Operaciones exploratorias Occidente, (2010): el informe integrado bioestratigráfico y sedimentológico presenta los resultados de los análisis de muestras de núcleos correspondientes a nueve pozos ubicados en la Ensenada de La Vela, determinando las edades y las condiciones ambientales en la sedimentación de las secuencias perforadas.

Baquero et al. (2010): en el marco del Proyecto de Generación de Oportunidades (PGO) Falcón Oriental Tierra, realizan la integración de datos de superficie-subsuelo, para generar un modelo tectono-estratigráfico y geoquímico regional que permita soportar seis oportunidades (plays) de edad Oligo-Mioceno, en la parte Oriental de la Cuenca de Falcón. Se obtuvo una significativa y vasta recolección de nuevos datos geológicos y geoquímicos en la región y la actualización del modelo estratigráfico/bioestratigráfico, y se concluyó que las mejores oportunidades exploratorias se encuentran en los extremos norte y sur del graben de la cuenca.

Toribio (2012): genera un modelo tectono-estratigráfico de la evolución de las cuencas de Falcón y Bonaire, costa afuera. En esta investigación realiza un análisis estructural con base en la interpretación sismo-estratigráfica y sísmica estructural de un conjunto de líneas sísmicas 2D, un cubo sísmico 3D ubicado en la Ensenada de La Vela (interpretó líneas arbitrarias en dirección NE-SO y este-oeste), e información de pozos (uno pertenece a la Ensenada de la Vela). Obtuvo como resultado, la definición de siete unidades sismo-estratigráficas, englobadas dentro de eventos tectono-estratigráficos principales que rigen la evolución de la región; de las cuales cinco de ellas se interpretaron en el subsuelo de la Ensenada de La Vela (integrando la información con CVP, 1974) y fueron determinados seis estilos estructurales asociados con distintos patrones de deformación y períodos de ocurrencia. Una de sus

recomendaciones fue establecer un modelo estratigráfico secuencial hacia el área de la Ensenada de La Vela.

Estudios de carácter local en el área de estudio, donde se realice un análisis secuencial no existen y algunas de las investigaciones geológicas mencionadas anteriormente son de hace varias décadas, fechas para las cuales los conceptos de estratigrafía secuencial no se habían desarrollado completamente; sin embargo, recientemente éste método ha sido utilizado en numerosas investigaciones en otras regiones, encontrándose las siguientes:

Porras (2003): proporciona un modelo geológico, en el contexto de la estratigrafía secuencial, integrando las áreas de Oritupano-Leona y Mata-Acema ubicadas en el flanco sur, en la plataforma distal de la Cuenca Oriental de Venezuela; de igual manera, compara e incorpora la interpretación con modelos estratigráficos-secuenciales regionales existentes, utilizando datos de sísmica, de pozos, núcleos y muestras de pared y canal.

Duarte (2011): desarrolla un modelo estratigráfico y sedimentológico de las unidades litoestratigráficas denotadas operacionalmente como “arenas” “R” y “F”, pertenecientes a la Formación Oficina en el Campo Aguasay Central, Cuenca Oriental de Venezuela. Para ello realizó la descripción y revisión de núcleos de rocas, y examinando los registros de pozos realizó el análisis secuencial y se correlacionaron las superficies de interés en los demás pozos de la zona, delimitando así las unidades estratigráficas de interés. No utilizó sísmica.

Abertini (2014): realiza un análisis estratigráfico secuencial de la Fm. Oficina, ubicada en la División Carabobo de la Faja Petrolífera de Orinoco, a partir de secciones estratigráficas, interpretación de líneas sísmicas y mapas paleoambientales.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES

La estratigrafía secuencial como método se originó con la interpretación estratigráfica de secciones sísmicas, a comienzos de los años 70, por la compañía petrolera Exxon, a través de su grupo de investigación encabezado por el Dr. Peter Vail. Posteriormente fue aplicada a correlaciones en el subsuelo y a partir de los años 80s es utilizada en afloramientos y en correlaciones entre afloramientos y el subsuelo por diferentes autores, como: Wilgus y Posamentier (1988). En 1977 se publica la Memoria 26 de la Asociación Americana de Geólogos Petroleros (AAPG), divulgándose el trabajo desarrollado en Exxon por Vail y su grupo de trabajo, e impactando significativamente a la comunidad científica y académica de las geociencias. Hoy en día la estratigrafía secuencial se basa en perfiles de pozos, núcleos y afloramientos, en adición a los perfiles sísmicos y es un aporte multidisciplinario al análisis estratigráfico.

Muchos autores han establecido una definición de la estratigrafía de secuencias, siendo las más aceptadas las que la definen como: “Es la interpretación integrada de los patrones de estratos a partir de datos sísmicos, pozos y afloramientos, junto con los ambientes depositacionales y las litofacies asociadas” (Vail, 1987); “Es el estudio de las relaciones de las rocas dentro de un marco cronoestratigráfico en el cual la sucesión de rocas es cíclica y está compuesta de unidades de estratos genéticamente relacionados (secuencias y sistemas encadenados)” (Posamentier *et al.*, 1988). En general, la estratigrafía secuencial o de secuencias estudia las secuencias depositacionales, a través de la interpretación integrada de los patrones de paquetes sedimentarios, genéticamente relacionados (asociaciones de facies-ambiente sedimentario), a partir de datos sísmicos, registros de pozos, núcleos y afloramientos.

La unidad fundamental de la estratigrafía secuencial es la secuencia, la cual es definida por Mitchum *et al.*, (1977), como una “sucesión de estratos más o menos concordantes o reflectores sísmicos de connotación estratigráfica, genéticamente relacionados y delimitados en el tope y la base por discordancias o sus superficies correlativas”. Por otra parte, Galloway (1989), define a una secuencia estratigráfica como el “paquete de sedimentos genéticamente relacionados que representa un episodio significativo durante el desarrollo de una cuenca, y limitado por períodos de inundación hacia el margen de la cuenca”; mientras que Posamentier (1988), opina que “una secuencia está constituida por una sucesión de sistemas depositacionales encadenados que se acumulan entre dos caídas consecutivas del nivel eustático del mar”, definición que es apoyada por Embry (2000), que establece que sus límites corresponden a superficies de máxima regresión.

A partir de la discrepancia entre las definiciones anteriores, surgen las diferentes escuelas que definen la secuencia estratigráfica en base a sus límites (figura N°2). La primera es la de Exxon Research (Mitchum *et al.*, 1977), la cual define a la secuencia como limitada por discordancias o superficies concordantes relativas, la segunda es la Galloway, que define a la secuencia como limitada por superficies de máxima inundación (Galloway, 1990), y la tercera es la de Posamentier, que establece que la secuencia se limita por superficies de máxima regresión. (Posamentier, 1995; Embry, 2000).

Sin embargo, en la memoria 26 de AAPG (1977) se define una secuencia estratigráfica como “una unidad estratigráfica que consiste en una sucesión relativamente concordante de estratos relacionados genéticamente, la cual está delimitada en su base y techo por discordancias o sus concordancias correlativas” (Mitchum *et al.*, 1977).

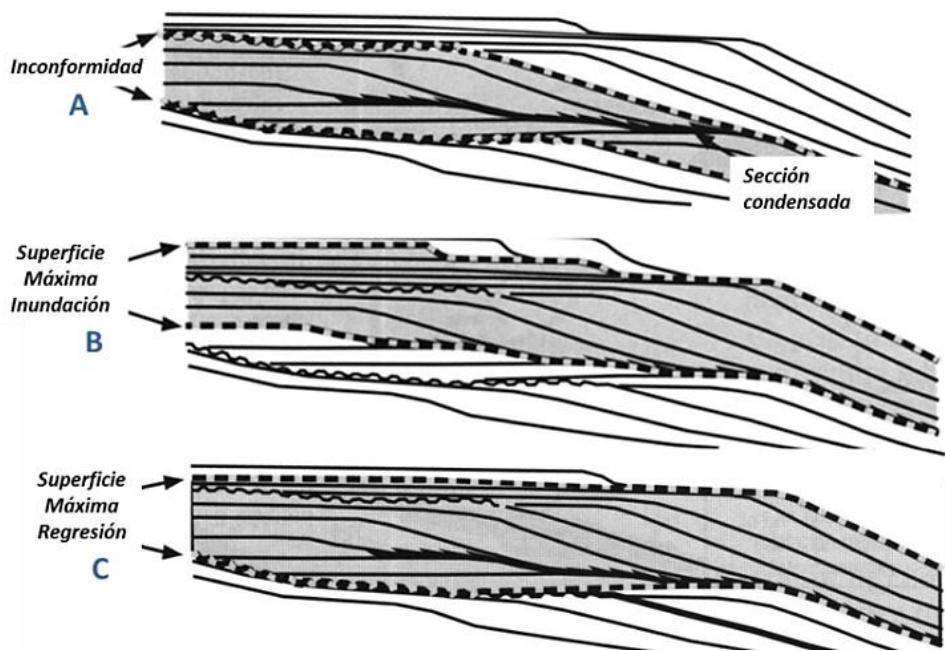


Figura N° 2. Descripción esquemática de diferentes definiciones de secuencias: A) Limitada por discordancias o sus superficies concordantes correlativas; B) Limitada por superficies de máxima inundación y C) Limitada por superficies de máxima regresión (Modificado de Posamentier y Allen, 1997).

Las secuencias estratigráficas se clasifican de acuerdo a la escala geológica de observación en: secuencia depositacional, parasecuencia o conjunto de parasecuencias.

Una **secuencia depositacional** debido a la magnitud de su extensión y espesor, solamente pueden ser bien reconocidas y definidas a través de información sísmica, está delimitada por discontinuidades estratigráficas o discordancias, denominadas límites de secuencia (*sequence boundaries*), las cuales son indicativas de una caída del nivel relativo del mar. Puede dividirse a su vez en sistemas encadenados (*system tracts*), los cuales están definidos por su posición dentro de la secuencia.

Los **sistemas encadenados** son un grupo de sistemas depositacionales contemporáneos naturalmente vinculados. Cada sistema se define objetivamente por

la geometría de los estratos en las superficies delimitantes, por la posición dentro de la secuencia y por los patrones internos de apilamiento de las parasecuencias.

1. Sistema de nivel bajo o “Lowstand System Tract” (LST): consiste en un conjunto de sedimentos depositados durante un intervalo de caída del nivel del mar hasta el quiebre de pendiente de la plataforma-talud y un subsiguiente aumento en el nivel del mar.

2. Sistema transgresivo o “Transgressive System Tract” (TST): consiste en un conjunto de sedimentos depositados durante una subida del nivel eustático y conformado por parasecuencias periódicas retrogradantes, que se depositan durante los eventos transgresivos, cuando el aumento del nivel relativo del mar permite que el volumen del grado de acomodo se incremente más rápido que la tasa de deposición. Están constituidos en su parte más distal por sedimentos pelágicos y minerales autigénicos, donde la tasa de deposición es mínima debido a que la mayoría de los sedimentos quedan depositados en la llanura costera, en posiciones cada vez más altas, cerca de su fuente.

3. Sistema de nivel alto o “Highstand System Tract” (HST): son los sistemas sedimentarios más jóvenes dentro de las secuencias. Estos sistemas son depositados después de una superficie de máxima transgresión y antes de un límite de secuencia. La tasa de aporte de sedimentos es más grande que la tasa de ascenso del nivel del mar. Se caracteriza por ser progradante, comúnmente asociado a progradaciones sigmoidales en su inicio, que pasan a oblicuas gradualmente, a medida que la tasa de creación de acomodo es menor a la tasa de sedimentación.

Las **parasecuencias** pueden ser reconocidas en núcleos, afloramientos y registros de pozos, y según Van Wagoneer, (1985), “es una sucesión de estratos o capas sedimentarias, más o menos concordantes, genéticamente relacionados y delimitada en su base y tope por dos superficies de inundación marina”. Se depositan durante un paracírculo eustático (ciclo eustático de 4º, 5º y 6º orden), con espesores entre 3 y 50 m y una duración menor a 0,5 Ma. y puede dividirse a su vez en sistemas

encadenados (*system tracts*), los cuales están definidos por los patrones de apilamiento de las parasecuencias. Existen dos tipos de parasecuencias:

1. Parasecuencias definidas por el tipo de facies: se pueden reconocer por las variaciones en el tamaño de grano (figura N°3) tales como los ciclos tipificados por un afinamiento hacia arriba (*fining upward*) o por un engrosamiento (*coarsening upward*). Estas indican directamente las variaciones en la energía del medio y están usualmente asociadas con estratos de espesores limitados (5 a 20 m) y son particularmente útiles en la interpretación de depósitos de areniscas (Falcón, 2011).

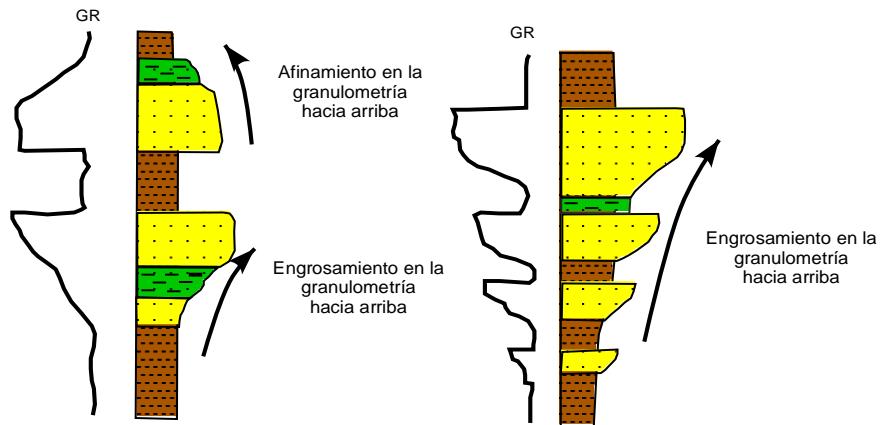


Figura N° 3. Ilustración esquemática de parasecuencias definidas por facies (Modificado de Falcón, 2011).

2. Parasecuencias definidas por variaciones en los espesores de los estratos: se pueden reconocer por una variación en el espesor de las capas (figura N°4), tales como los ciclos con tendencia de adelgazamiento en el espesor de las capas hacia arriba (*thinning upward*) o engrosamiento de las mismas (*thickening upward*). En el caso de ciclos de areniscas tipificados por un engrosamiento en el espesor de las capas, estos representan períodos de incremento tanto en el aporte de sedimentos como en la energía del ambiente y usualmente son de tendencia regresiva. Mientras que las parasecuencias caracterizadas por un adelgazamiento hacia arriba en el espesor, representan fases de abandono de areniscas y un decrecimiento en la energía del ambiente y con tendencia transgresiva.

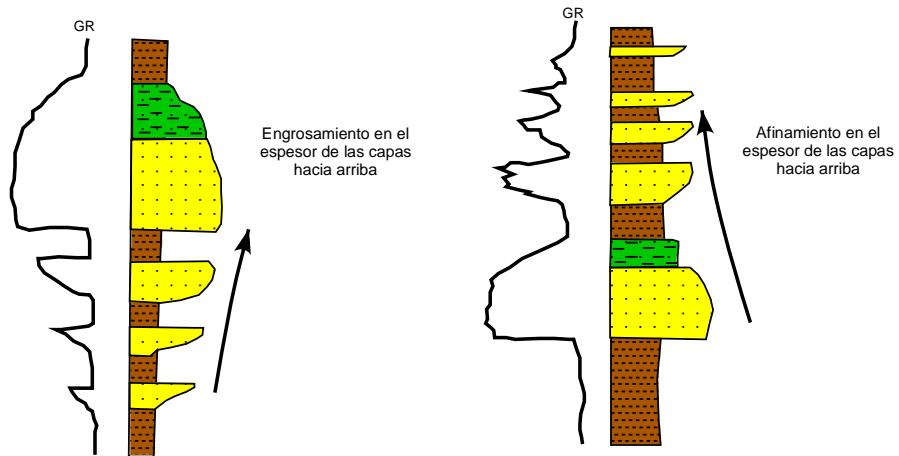


Figura N° 4. Ilustración esquemática de parasecuencias definidas por cambios de espesor de los estratos (Modificado de Falcón, 2011).

“Una sucesión de parasecuencias genéticamente relacionadas, formando un patrón de apilamiento distintivo que está limitado por superficies mayores de inundación marina” (Van Wagoneer, 1985), se conoce como **conjunto de parasecuencias**, estas pueden ser reconocidas en columnas de afloramientos, registros de pozos, núcleos y en secciones sísmicas. Se conocen tres tipos de conjunto de parasecuencias: progradacional, retrogradacional y agradacional (ver figura N°5).

En un conjunto de tipo progradacional (A) las parasecuencias sucesivamente más jóvenes se depositan hacia la cuenca, porque la tasa de suministro de sedimentos es mayor a la tasa de acomodamiento. En un conjunto de tipo retrogradacional (B) las parasecuencias sucesivamente más jóvenes se depositan hacia el continente, con un patrón que retrocede y la tasa de suministro de sedimentos es menor a la tasa de acomodamiento. En un conjunto de tipo agradacional (C), las parasecuencias se apilan verticalmente, sin cambios laterales significativos y la tasa de suministro de sedimentos se aproxima a la tasa de acomodamiento.

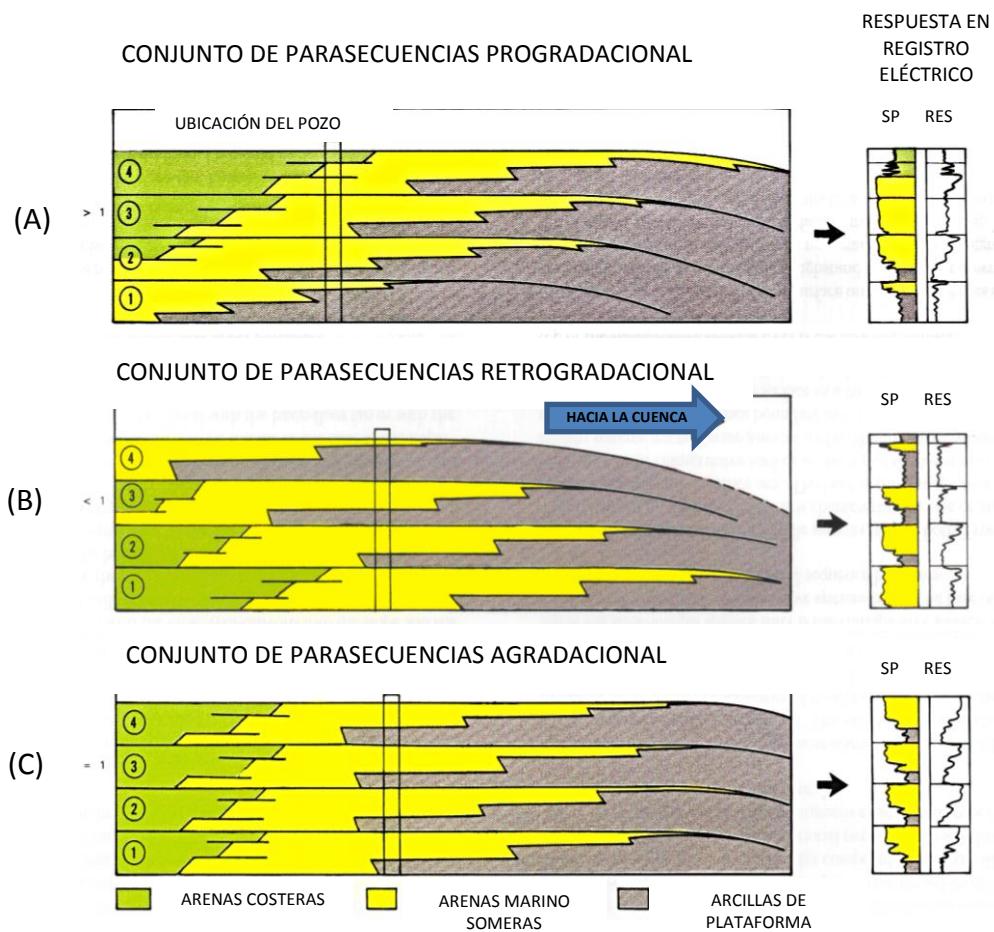


Figura N° 5. Tipos de conjuntos de parasecuencias (Modificado de Van Wagoneer *et al.*, 1988).

Debido a las diferentes escuelas y modelos propuestos para el análisis de secuencias estratigráficas, actualmente se plantea una estandarización de las unidades genéticas (secuencias estratigráficas) y de las superficies estratigráficas, que puedan ser delimitadas objetivamente, al seleccionar una escala de observación entre una sección estratigráfica, ya que el registro y las facies características de las superficies estratigráficas (SB y MFS- límites de secuencias) y de los sistemas encadenados varían considerablemente con la ubicación geográfica de la sección dentro de la cuenca, (Catuneanu *et al.*, 2009).

En el mismo orden de ideas, la metodología utilizada en la actualidad para analizar la configuración estratigráfica de una cuenca a partir del análisis de secuencias estratigráficas puede diferir de los modelos clásicos de estratigrafía secuencial que típicamente asumen el dominio de la sedimentación a través de cambios y fluctuaciones en el nivel del mar (Mitchum *et al.*, 1977; Posamentier y Vail, 1988). La visión moderna de la estratigrafía secuencial (Catuneanu *et al.*, 2009; Catuneanu *et al.*, 2010) promueve el análisis estratigráfico como una respuesta a los cambios en las tendencias depositacionales, debido a la interacción existente entre el espacio de acomodación y los procesos de sedimentación, controlados por los mecanismos de modelado regional.

La nueva concepción de la estratigrafía secuencial está próxima a ser asumida como un nuevo tipo de estratigrafía estandarizada, con definiciones formales y códigos de nomenclaturas únicos y válidos, los cuales pueden ser utilizados no solamente en márgenes pasivos sino también en cuencas que hayan sufrido deformación tectónica (Catuneanu *et al.*, 2010).

Catuneanu, (2008), establece que para lograr el estudio estratigráfico secuencial en cuencas, en donde se describen variaciones de fases tectónicas extensivas y compresivas, es necesario lograr un enlace entre las edades de los paquetes sedimentarios y las edades de deformación, así como, entender la naturaleza de la cuenca y los procesos modeladores que ejercen mayor influencia en la distribución y geometría de las sucesiones sedimentarias preservadas durante cada intervalo de tiempo.

Los límites de las secuencias estratigráficas, puedan ser ordenados de acuerdo a su jerarquía en tiempo o duración, como se muestra en la Tabla N°1, ya que se asume que las superficies que limitan cada unidad son líneas de tiempo y superficies con sentido cronológico y pueden ser utilizadas como una aproximación de líneas de tiempo, de tal forma que estas superficies pueden ser utilizadas para la reconstrucción de marcos cronológicos. Las secuencias, en este sentido, pueden ser clasificadas en

términos de su orden de duración, comúnmente denominados: I orden, II orden, III orden, IV orden, V orden y VI orden. La frecuencia de estos ciclos puede variar desde cientos de millones de años a decenas de miles de años. Ciclos de primero, segundo y tercer orden indican baja frecuencia, mientras que los ciclos de cuarto, quinto y sexto orden parecen reflejar una mayor regularidad cíclica o mayor frecuencia, como se muestra en la figura N°6.

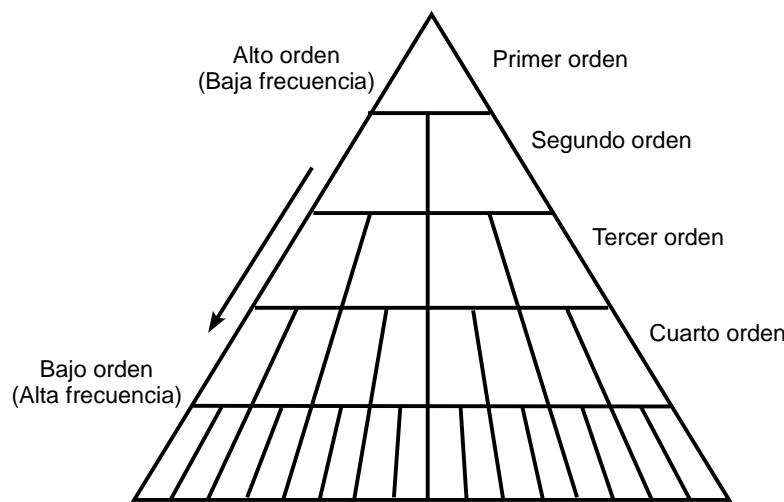


Figura N° 6. Representación diagramática de los conceptos de jerarquía. (Modificado de Catuneanu, 2006).

Tabla N°1. Sistema basado en la duración de ciclos eustáticos. (Modificado de Catuneanu, 2006)

ORDEN DE CICLO EUSTÁTICO O TECTONO-EUSTÁTICO	DURACIÓN Ma	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA SECUENCIAL
I orden	50 +	Megasecuencia
II orden	3 - 50	Supersecuencia
III orden	0,5 - 3	Secuencia depositacional-set de parasecuencias
IV orden	0,08 – 0,5	Set de parasecuencias - parasecuencias
V orden	0,03 – 0,08	Parasecuencias
VI orden	0,01 – 0,03	Parasecuencias

2.2 ESTRATIGRAFÍA SECUENCIAL EN CARBONATOS

La aplicación de la estratigrafía secuencial a sistemas depositacionales de carbonatos fue un tema de debate en los años 80s, particularmente con respecto a la configuración de una secuencia desarrollada en sistemas clásticos y si esto puede ser adaptado a ambientes de carbonatos (Vail, 1987; Sarg, 1988; Schlager, 1989). Posteriormente a principios de los 90, se tuvieron significantes contribuciones acerca de la estratigrafía secuencial en carbonatos, cuando las diferencias entre los modelos estratigráficos de clásticos y carbonatos fueron solucionados (Coniglio y Dix, 1992; James y Kendall, 1992; Jones y Desrochers, 1992; Pratt *et al.*, 1992; Schlager, 1992; Erlich *et al.*, 1993; Hunt y Tucker, 1993; Long, 1993; Loucks y Sarg, 1993; Tucker *et al.*, 1993).

Schlager, (2005), establece que “los principios de estratigrafía secuencial y los conceptos de secuencia estratigráfica, son independientes del tipo de ambiente depositacional dentro de una cuenca sedimentaria”.

Actualmente la nomenclatura de los sistemas encadenados, de los tipos de superficies estratigráficas y de las secuencias estratigráficas son los mismos, para carbonatos y para siliciclásticos. Sin embargo, existen notables diferencias entre los modelos estratigráficos de sistemas clásticos y carbonatos en relación principalmente a la geometría de los sistemas encadenados y a la tasa de sedimentos a la cuenca durante los diferentes estadios de los ciclos eustáticos (Catuneanu, 2006).

Según Jacquin *et al.* (1992), las etapas genéticas en la deposición de carbonatos se caracterizan por su patrón estratigráfico y distribución de litofacies y son la respuesta a la relación entre la tasa de producción de carbonatos y las variaciones del nivel del mar. Estas etapas son cuatro y se caracterizan por su patrón estratigráfico y asociación de litofacies y son las respuestas a la relación entre la tasa de producción de carbonatos y los cambios relativos del nivel del mar:

Etapa de relleno (*infilling*): se desarrolla al inicio de la regresión sobre una plataforma inundada, por lo cual los carbonatos tienden a crecer rápidamente para alcanzar la posición del nivel del mar (*catch up*).

Etapa de progradación (*forestepping*): se desarrolla durante los tiempos finales de la regresión sobre una plataforma reducida por la etapa de relleno, tendiendo los carbonatos a progradar hacia la cuenca.

Etapa de agradación (*aggrading*): tiene lugar en la primera fase de la transgresión. Los carbonatos crecen al mismo ritmo de la subida lenta del nivel del mar.

Etapa de retrogradación (*backstepping*): se desarrolla durante la última fase de la transgresión. En esta etapa, la generación de carbonatos no es suficiente para llenar el espacio disponible y las secuencias retrogradan en dirección del continente.

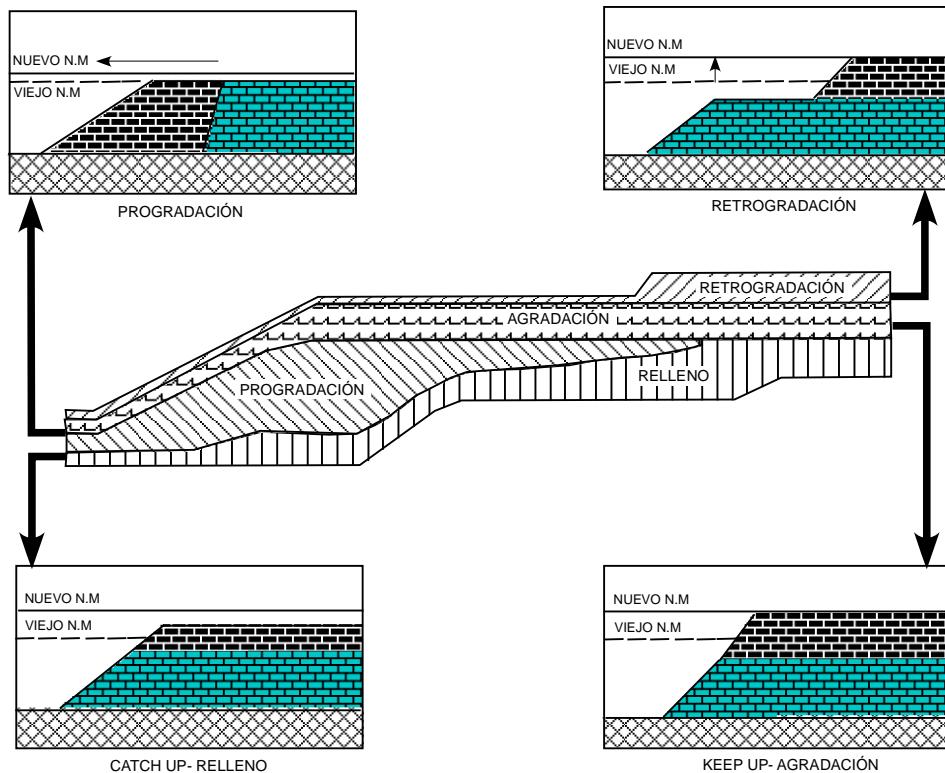


Figura N° 7. Etapas genéticas en la deposición de carbonatos. (Modificado de Murat y Azpiritxaga, 1995).

2.3 ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA

La estratigrafía sísmica o sismo-estratigrafía, se considera como el estudio de la estratigrafía de secuencias a partir de datos sísmicos.

La interpretación sismo-estratigráfica se basa en la identificación de las relaciones geométricas y propiedades acústicas de los reflectores sísmicos, que permitan distinguir eventos significativos a través de los cuales se puedan estudiar las sucesiones sedimentarias en términos de sus relaciones temporales y espaciales que marcan la configuración del relleno de la cuenca (Mitchum *et al.*, 1977).

En las secciones sísmicas las secuencias son definidas a partir del análisis geométrico del patrón de configuración de la reflexión y las terminaciones de las reflexiones sísmicas, complementando con datos de pozos, como litología y edades.

La estratigrafía sísmica normalmente trata con secuencias de 2do y 3er orden (Vail *et al.*, (1977), mientras que los estudios geológicos mediante secciones estratigráficas con pozos, afloramientos y núcleos, se apoyan en secuencias de 4to, 5to y 6to orden.

2.3.1 CONFIGURACIÓN DE LAS REFLEXIONES SÍSMICAS

La configuración de las reflexiones sísmicas revela patrones de espesor, para interpretar procesos depositacionales, erosión y paleotopografía. Las clinoformas de progradación están usualmente asociadas con descensos relativos del nivel del mar y a procesos regresivos, y estos buzan hacia la cuenca. Los sistemas de nivel alto (HST), están comúnmente asociados a progradaciones sigmoidales en su inicio, que pasan a oblicuas gradualmente. Los reflectores con geometría divergente es típico de las secuencias sín-sedimentarias.

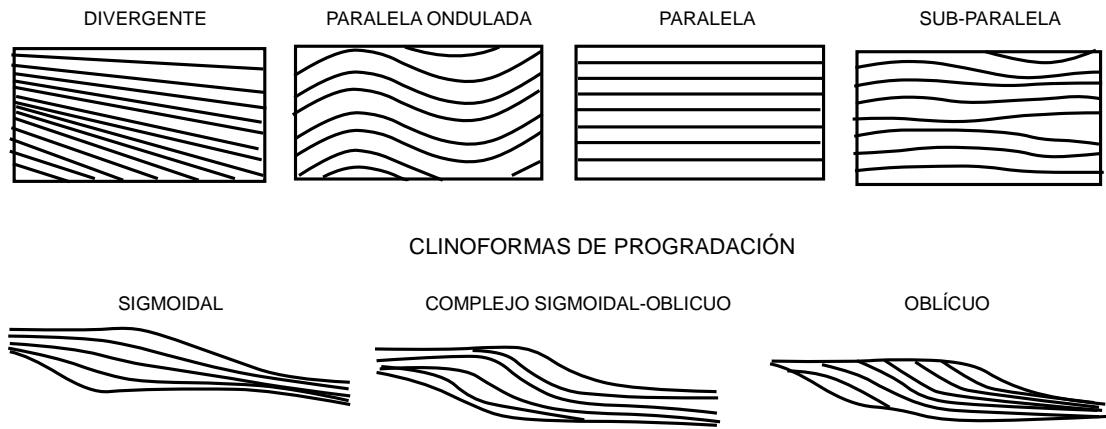


Figura N° 8. Configuraciones de reflexiones sísmicas (Modificado de Mitchum *et al.*, 1977).

2.3.2 TIPOS DE TERMINACIONES SÍSMICAS DE LOS ESTRATOS

Según Catuneanu, (2006), las terminaciones sísmicas estratales o de los estratos son definidas por la relación geométrica entre el estrato y la superficie estratigráfica contra las que terminan, estas son observadas a gran escala, particularmente en líneas sísmicas. Los principales tipos de terminaciones estratales son: truncamiento, toplap, onlap, downlap y offlap (ver figura N° 9). Exceptuando por el truncamiento, el cual es un término derivado de la geología clásica, los otros conceptos han sido introducidos con el desarrollo de la estratigrafía sísmica, en los años 70 al definir la arquitectura de las reflexiones sísmicas. Estos términos subsecuentemente han sido incorporados en la estratigrafía secuencial con el fin de describir los patrones de apilamiento de unidades estratales y proveer criterios para el reconocimiento de varias superficies y sistemas encadenados (e.g., Posamentier *et al.*, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1988; Christie-Blick, 1991).

En perfiles sísmicos las terminaciones de las reflexiones sísmicas son indicadores de discontinuidades y definen los límites de las secuencias estratigráficas. Por su parte, el truncamiento y los toplaps definen el límite superior, mientras que los onlaps y downlaps definen el límite inferior. (ver figura N° 10).

Truncamiento: terminación de estratos o reflectores sísmicos contra una superficie de erosión suprayacente, permite delimitar el tope o límite superior de una secuencia estratigráfica, se debe a importantes etapas de erosión.

Truncamiento aparente: terminación de los estratos o reflectores sísmicos del sistema transgresivo y los del nivel alto. Comúnmente se genera por debajo de la superficie basal de progradación, la cual delimita la máxima transgresión marina.

Toplap (cuña crestal): terminación de estratos inclinados contra superficies suprayacentes menos inclinadas, de debe a no deposición o a erosión muy leve.

Downlap (cuña de progradación): terminación de estratos inicialmente inclinados hacia la cuenca, contra superficies inicialmente horizontales o de bajo ángulo y marca la base de una secuencia depositacional. Es comúnmente visto en la base de los clinoformos de progradación, asociados a ambientes marinos, es poco común que se genere en depósitos no marinos a excepción de ambientes lacustres.

Onlap o solapamiento: terminación de estratos inicialmente horizontales o de bajo ángulo que se acuñan contra una superficie inclinada. Define la terminación lateral de una secuencia estratigráfica.

Offlap: se producen por una caída del nivel base, siendo diagnóstico de una regresión forzada.

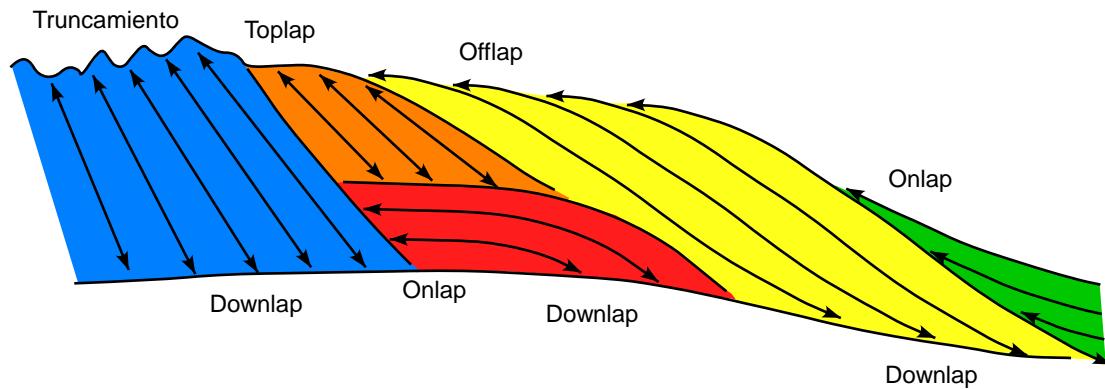


Figura N°9. Tipos de terminaciones sísmicas de los estratos (Modificado de Emery y Myers, 1996).

RELACIÓN ESTRATIGRÁFICA

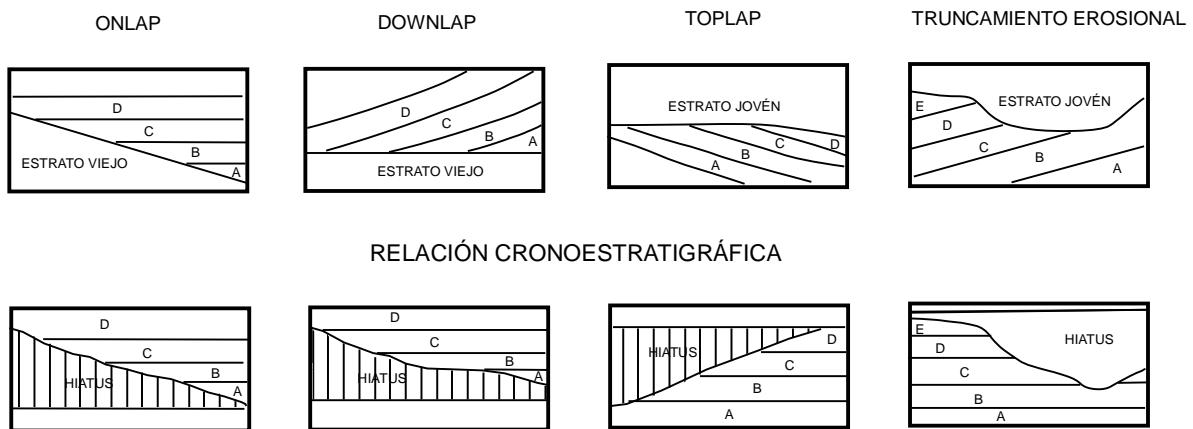


Figura N°10. Relación estratigráfica y significado cronoestratigráfico de los patrones de las terminaciones de reflexión sísmica. (Modificado de Mitchum *et al.*, 1997).

CAPÍTULO III

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La Cuenca de Falcón está localizada al noroeste de Venezuela, en los estados Falcón y Lara, actualmente abarca un área de unos 36.000 km², aflorando rocas que abarcan desde el Eoceno hasta el Cuaternario, en una faja de 150 km de largo desde la Plataforma de Dabajuro hasta la costa oriental del estado Falcón. La geología regional de esta cuenca, ha sido descrita en varias publicaciones: Wheeler, (1963); Chigne, (1980); Gonzalez de Juana *et al.*, (1980); Lorente *et al.*, (1982); Muessing, (1984); Boesi *et al.*, (1991); Macellari, (1995); Audemard, F. (1995, 1997); Rey, (1996); Díaz de Gamero *et al.*, (1997); Ghosh *et al.*, (1997); entre otros.

Los autores coinciden en que las secuencias estratigráficas descritas corresponden netamente al Cenozoico, y constituye probablemente una de las mejores regiones del país para evaluar la actividad tectónica durante los últimos 30 millones de años en el occidente de Venezuela, debido a la existencia de una sedimentación casi continua y bastante bien datada paleontológicamente (Audemard, 1995).

La configuración estratigráfica de los depósitos que rellenan la Cuenca de Falcón durante su formación es compleja, pues las facies depositacionales cambian drásticamente, tanto vertical (la secuencia evoluciona de depósitos marinos profundos a unidades sedimentarias esencialmente más continentales, pasando por depósitos de plataforma continental y de zona litoral) como lateralmente (se hacen progresivamente más marinas hacia el este) (Carnevalli *et al.*, 2000). Esto origina amplias descripciones de las unidades litoestratigráficas reconocidas en afloramientos y en pozos (ver figura N°11).

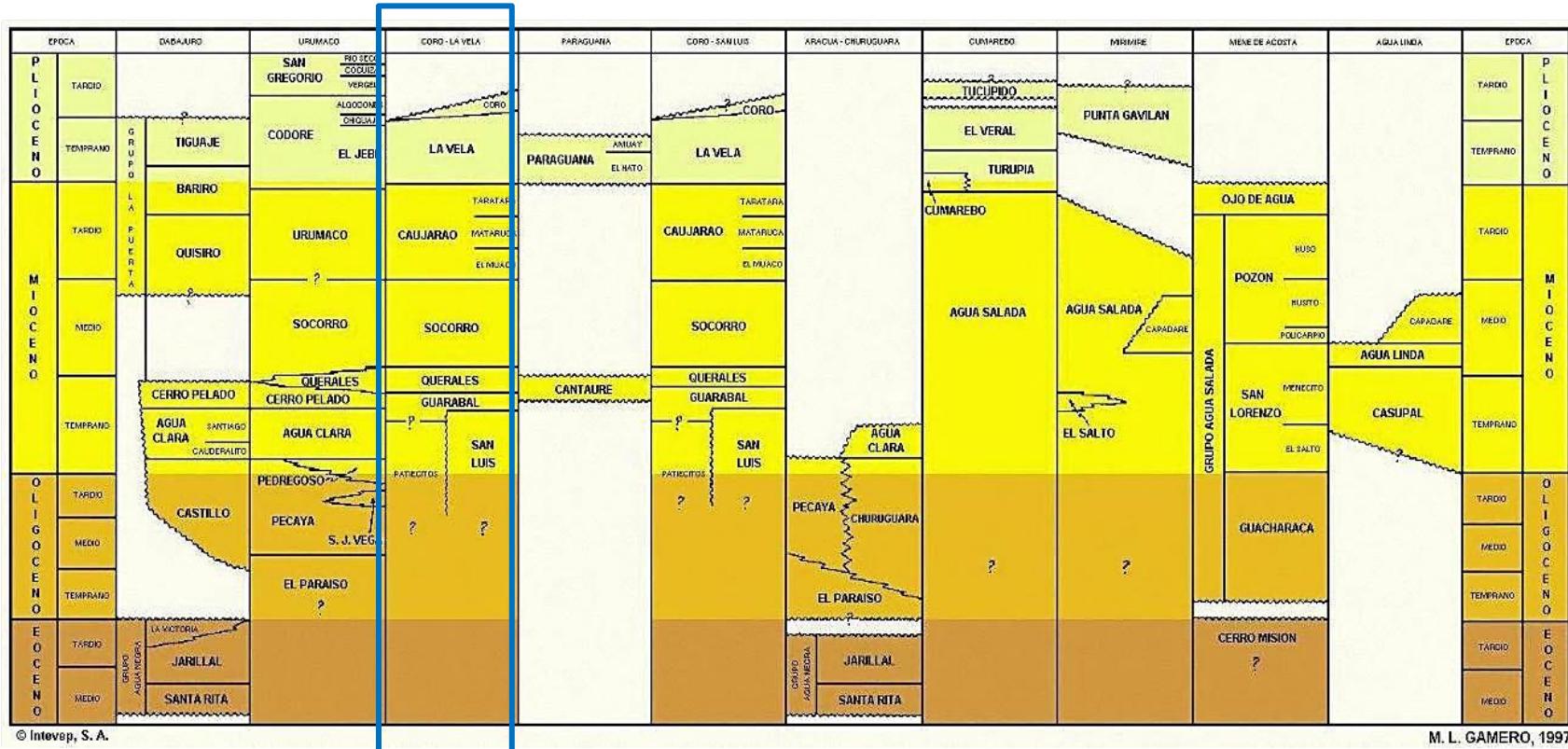


Figura N°11.Cuadro de correlación generalizado de la Cuenca de Falcón, el recuadro azul representa la zona de estudio (Gamero, 1997).

Estos cambios de facies verticales y horizontales generalmente ocurren de forma progresiva, pero a veces de manera abrupta, viéndose marcados en el registro sedimentario como discordancias (Audemard, 1995) y son el resultado de la interacción de dos factores que controlaron la depositación en la cuenca a lo largo del tiempo. El primero de ellos es el control estructural, producto de los diversos episodios tectónicos que han tenido lugar en la región ocasionando relieves dislocados estructuralmente (Stephan, 1977; Muessig, 1984; Audemard, 1995, 1997; Karolys y Bastos, 2008) y el segundo está ligado a la tectónica, y son los diversos escenarios depositacionales, que van desde fluviales y deltáicos, hasta arrecifales y marino profundo, con presencia de secuencias marginales carbonáticas.

Otros factores importantes que operan dentro de la interacción regional son las altas tasas de sedimentación y las fluctuaciones periódicas del nivel del mar. Así como las diferentes condiciones climáticas que prevalecieron durante cada época del Cenozoico.

En general, la Cuenca de Falcón, principalmente la región costa afuera, expone un escenario donde el principal mecanismo de generación de sus características estratigráficas lo establece principalmente la tectónica. El relleno sedimentario, su disposición regional, geometría y litología posee una marcada influencia del modelado tectónico. De igual forma, la dinámica de deformación sin-sedimentaria y la generación de depocentros importantes son atribuidas a la subsidencia que generan los procesos tectónicos que afectan el área.

Según muestran las tendencias en los patrones sedimentarios y la relación entre la tectónica y la sedimentación, la región costa afuera no tiene un patrón definido de relleno de cuenca, estos patrones fueron variando y superponiéndose durante todo el Cenozoico; de esta manera, el registro sedimentario posee una serie de secuencias que le confieren un carácter multihistórico a su configuración actual.

En el registro sedimentario de la Cuenca de Falcón, se pueden encontrar tres discordancias regionales de importancia, lo que permite subdividir a la secuencia

sedimentaria de esta cuenca en cuatro conjuntos o tectonosecuencias, separadas por estas discordancias, estos conjuntos son: Eoceno Superior – Oligoceno Inferior, Oligoceno Superior – Mioceno Inferior, Mioceno Medio – Superior y Plioceno – Reciente (Maceralli, 1995).

Por su parte, Audemard (1995), establece que la sedimentación en la Cuenca de Falcón ha sido bastante continua en el tiempo, excepto por tres discordancias de algún significado regional, lo cual permite dividir la secuencia sedimentaria en cuatro conjuntos: Oligoceno – Mioceno Inferior, Mioceno Medio – Superior, Mioceno Superior-Plioceno y Plioceno – Pleistoceno. Durante el Oligoceno-Mioceno Temprano, fue principalmente una cuenca marina abierta al este, rodeada por tierras emergidas casi completamente por el sur y oeste y parcialmente por el norte; “sufre una inversión tectónica a partir del límite Mioceno Medio-Temprano, formándose el Anticlinorio de Falcón y depositándose sedimentos solo al norte”. A partir del Mioceno Tardío, el proceso sedimentario fue restringido al flanco norte del Anticlinorio de Falcón y las secuencias sedimentarias se fueron haciendo progresivamente más continentales, mientras que lateralmente los ambientes sedimentarios fueron siempre más marinos hacia el este.

Wheeler (1963), González de Juana *et al.* (1980) y Boesi y Goddard (1991), establecen que los depósitos de edad Eoceno Tardío - Mioceno Temprano son de carácter transgresivo, debido a una subsidencia continua hasta el Mioceno Medio, cuando comienza la inversión de la cuenca, teniéndose depósitos de carácter regresivo hasta el Reciente. Mientras que Audemard (1995), expresa que “a groso modo la secuencia sedimentaria de la Cuenca de Falcón es regresiva”.

PDVSA-Intevep (2009), generan un modelo estratigráfico secuencial para el relleno de la Cuenca de Falcón, donde subdivide las cuatro secuencias estratigráficas establecidas anteriormente para la cuenca. En la figura N°12 se observa la relación

entre las secuencias estratigráficas y las unidades litoestratigráficas presentes en la cuenca.

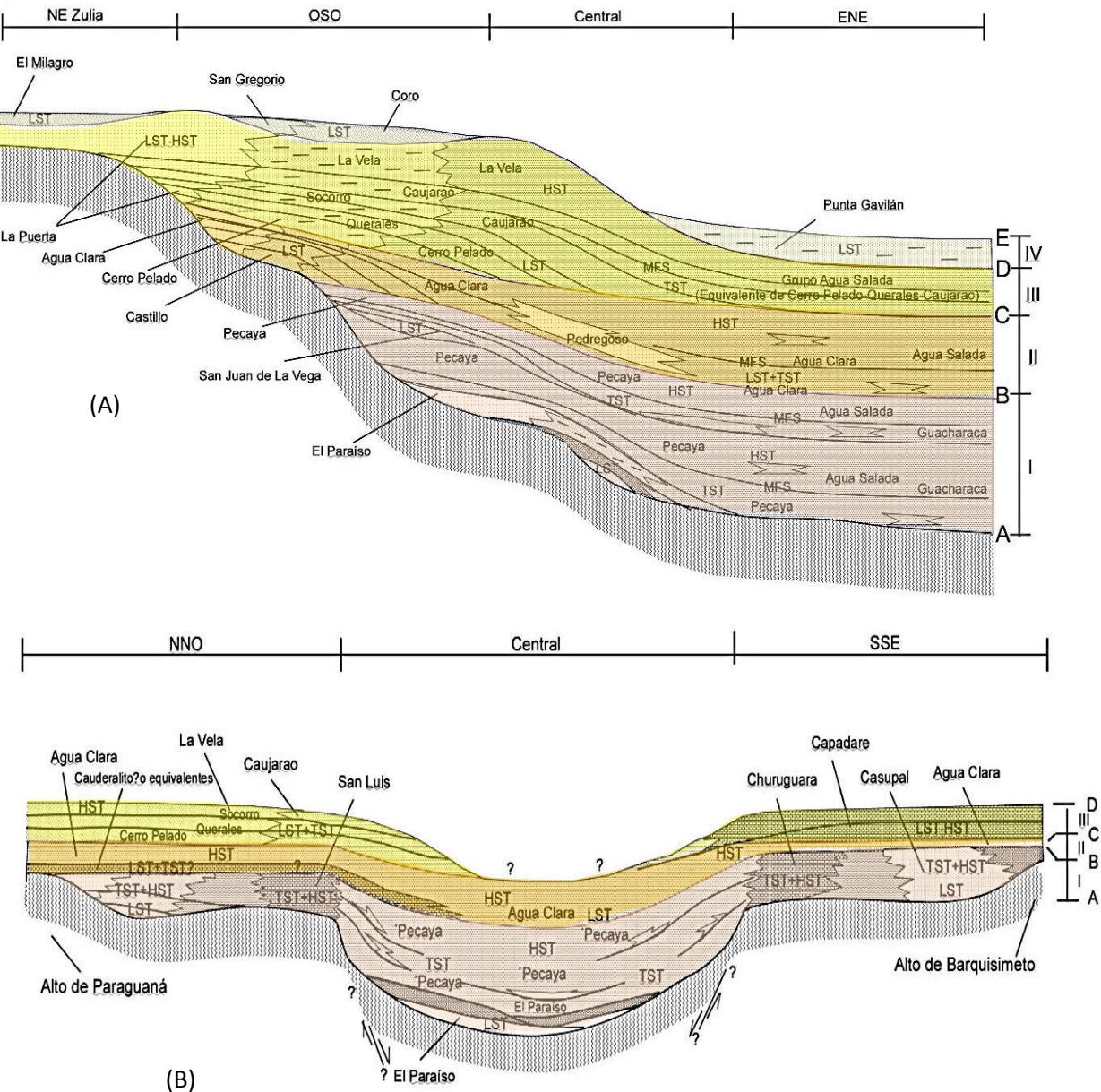


Figura N° 12. Modelo esquemático estratigráfico secuencial (A) OSO-ENE, (B) NNO-SSE, para el relleno de la Cuenca de Falcón, LST: Lowstand System Tract, TST: Transgressive System Tract, HST: Highstand System Tract, MFS: Maximum Flooding Surface. (PDVSA-Intevep (INT-13034, 2009)).

Se plantean diversos orígenes y edades para la Cuenca de Falcón, pues mientras para algunos autores es de edad Oligoceno (González de Juana *et al.*, 1980), para otro el comienzo de la depositación sobre esta cuenca es más antiguo, asociado al Eoceno Tardío (Muessig, 1984; Boesi y Goddard, 1991; Ysaccis, 1997). En cuanto a la formación de la misma, hay dos hipótesis:

La primera establece que la Cuenca de Falcón resulta de la transtensión o “pull-apart” a lo largo de los límites transcurrentes dextrales (figura N°13), entre las placas Caribe y Sudamericana al norte y el sistema de fallas de Oca-Ancón al sur (Pindell *et al.*, 1988; Muessig, 1984; Case *et al.*, 1984; Boesi y Goddard, 1991; Macellari, 1995). La otra hipótesis plantea que la cuenca nace como un orógeno en flotación (figura N°14), durante un colapso post-orogénico, detrás de un arco de islas volcánicas, asociado a la desaceleración de la placa Caribe (Audemard, 1993, 1997; Mann, 1999; Porras, 2000). Este evento fue diacrónico de oeste a este desde el Cretácico Tardío hasta comienzos del Mioceno Temprano. “La Cuenca de Falcón no se pudo haber formado como una cuenca pull-apart, porque el movimiento transcurrente destral, del sistema de Oca-San Sebastián, El Pilar, es difícil que haya generado una cuenca con las dimensiones de la Cuenca de Falcón y Bonaire, además una fase distensiva es observada a lo largo del margen norte del continente sudamericano” (Audemard, 1995).

Los análisis tectóno-estratigráficos de la región sugieren que los depósitos en la cuenca se generaron bajo una tectónica muy activa con períodos de compresión y extensión relacionados a colapso tectónico hacia el centro de la cuenca como producto de un adelgazamiento cortical, seguida por una serie de intrusiones ígneas basálticas que afloran hoy en día en la parte central de la cuenca y que permaneció levantada hacia los extremos norte y sur en estilo flexural, lo que estaría más de acuerdo con la formación de un graben como propone Audemard (1993), Sousa y Rodríguez (2003) y Baquero (2015). Posterior al adelgazamiento cortical, se tuvo una inversión tectónica como consecuencia de la acción compresiva de la placa Caribe (Baquero *et al.*, 2009) y/o levantamiento de los Andes venezolanos.

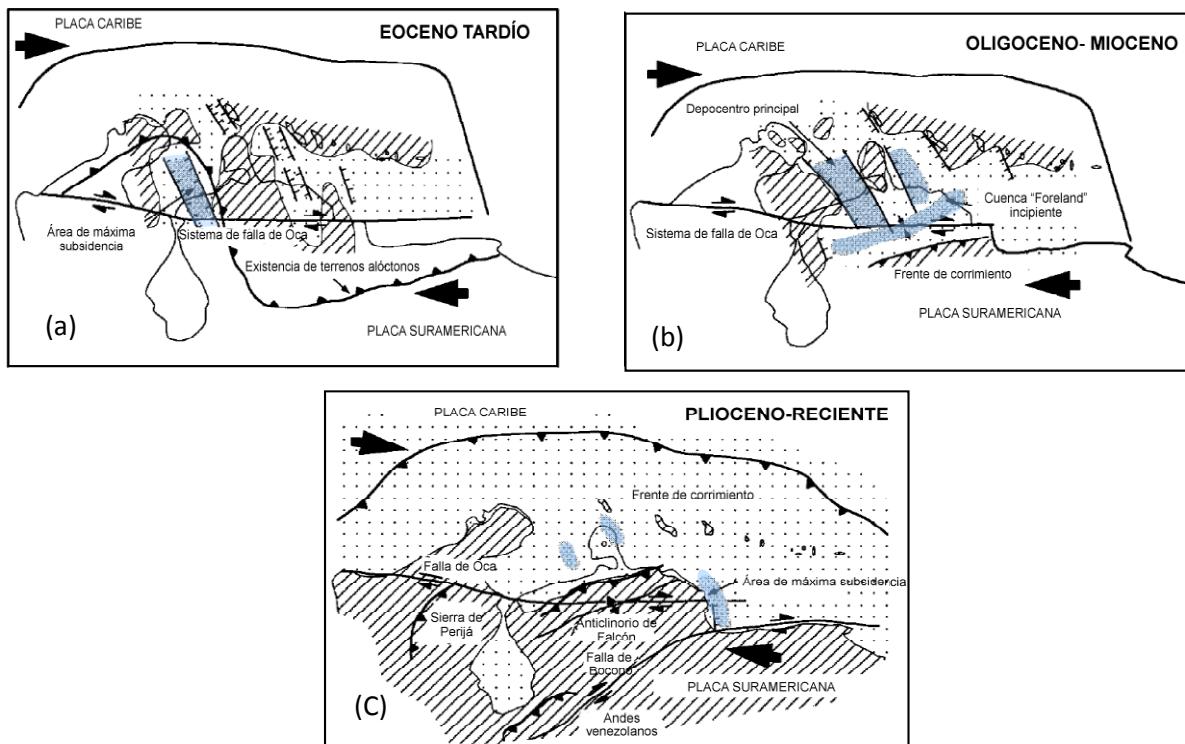
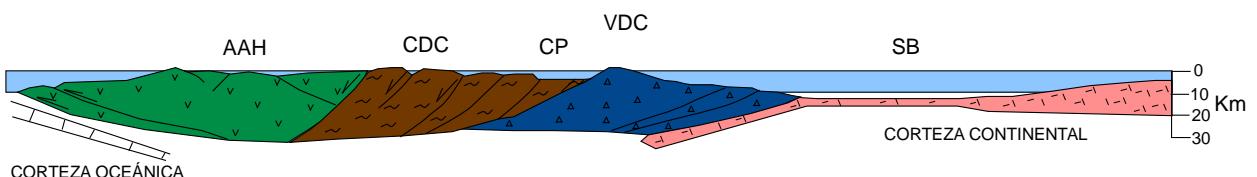


Figura N°13. Modelo evolutivo para la cuenca “pull-apart” de Falcón. a) Inicio del movimiento transcurrente dextral entre las placas Caribe y Suramericana; para este tiempo, las zonas de mayor subsidencia se ubicaron al norte; b) máxima extensión en la cuenca “pull-apart”; y c) formación del anticlinorio de Falcón como resultado de movimientos compresionales asociados a la interacción entre las placas Caribe y Suramericana. (Modificado de Macellari, 1995).

A CONFIGURACIÓN TECTÓNICA PARA EL PALEOCENO- EOCENO MEDIO



B CONFIGURACIÓN TECTÓNICA PARA EL EOCENO TARDÍO

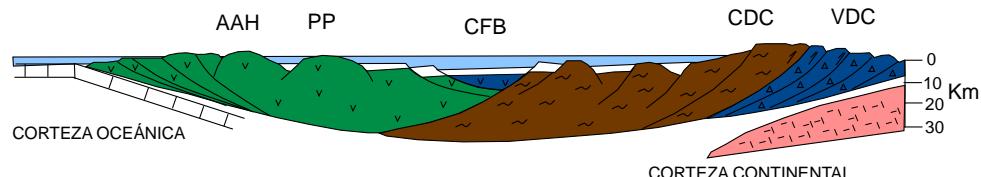


Figura N° 14. Modelo de orógeno en flotación para la Cuenca Falcón-Bonaire. A) Configuración tectónica para el Paleoceno-Eoceno Medio B) Configuración tectónica para el Eoceno Tardío; SB: Surco de Barquisimeto, CP: Cuenca retroarco de Paracotos, VDC: Arco de las islas de Villa de Cura, CDC: Terrenos de la Cordillera de la Costa, AAH: Alto de las Antillas Holandesas, PP: Alto de Paraguaná, CFB: Sedimentación marina en el centro de la cuenca y continental. (Modificado de Porras, 2000).

3.2 GEOLOGIA LOCAL

El área de la Ensenada de La Vela, forma parte de la extensión costa afuera de la Cuenca de Falcón y se ubica dentro de la plataforma de la Costa Oriental de Falcón (González de Juana *et al.*, 1980). Esta plataforma tiene una forma arqueada, subparalela a la línea de costa actual, cuyo ancho varía entre 10 y 40 km, y su borde este se aproxima gradualmente a la Península de Paraguaná. Hacia el norte se ensancha de nuevo englobando un bajo ubicado al NE de la península. “El talud en esta zona es más suave y baja lentamente hasta el ramal de la Fosa de Bonaire que pasa al sur de Curazao. La dinámica sedimentaria en esta región aporta mayor volumen de sedimentación plataformal terrígena que la observada en la plataforma al norte de la Cordillera de la Costa” (Baquero *et al.*, 2010).

De la Ensenada de La Vela, se ha obtenido gran información geológica a partir de la exploración petrolera llevada a cabo en los años 70s, 80s y 90s. Sin embargo, la mayoría de los datos permanecen como confidenciales; pero esto no ha limitado el importante aporte de numerosas investigaciones que se han realizado en el área en el transcurso de estos años.

Existe una relación compleja entre la litoestratigrafía y la actividad tectónica, que da como resultado una deposición diacrónica de muchas unidades, una estrecha relación de las facies con los eventos tectónicos y una variación de espesores visible, tanto en el área norte como al sur, generando aumento de los espesores de algunas unidades litoestratigráficas y adelgazamientos y acuñamientos de otras (Baquero *et al.*, 2010).

3.2.1 MODELO ESTRATIGRÁFICO

En general la estratigrafía de la Ensenada de La Vela es compleja debido a los cambios de facies tanto horizontales como verticales, influenciados por la tectónica, lo que impide realizar correlaciones estrictamente litológicas, para lo cual las correlaciones deben ser realizadas bajo un marco cronoestratigráfico secuencial.

Los estudios bioestratigráficos realizados por Hunter, 1974 y Arnstein *et al.*, 1983, han permitido datar los eventos sedimentarios del subsuelo de la Ensenada de La Vela e incorporarlos a la historia geológica regional de la Cuenca de Falcón (Corpoven, 1980).

En los primeros estudios descritos por C.V.P (1974), Corpoven (1980), González de Juana *et al.* (1980) y Gamero (1989), se establece que el subsuelo de la Ensenada de La Vela, corresponde a rocas sedimentarias terciarias que descansan sobre un basamento ígneo-metamórfico de edad Cretácico. Sin embargo, estudios recientes establecen que el basamento sobre el cual descansa la sucesión sedimentaria cenozoica de la Ensenada de La Vela, es un basamento ígneo-metamórfico alóctono, de posible afinidad *Grenvilliana* ca. 0.9 – 1.2 Ga (Grande *et al.*, 2009), y de edad Meso- Neoproterozoico (Baquero *et al.*, 2011).

Las características litológicas de la secuencia estratigráfica de la Ensenada de La Vela, se conocen de las descripciones de 26 pozos exploratorios perforados (figura N° 15): 12 pozos perforados entre los años 1972-1976, que se describen en el informe de la C.V.P, 1974; 12 pozos entre 1978-1980, descritos en el informe de Corpoven, S.A., (1980), donde las secuencias sedimentarias descritas en estos dos informes son similares, con excepción de una espesa columna de rocas volcánicas encontradas en el pozo P-16; y los dos últimos pozos (P-28, P-29) perforados por Phillips Petroleum entre 1998-2000, que difiere de las anteriores tanto en edades como en unidades litoestratigráficas.

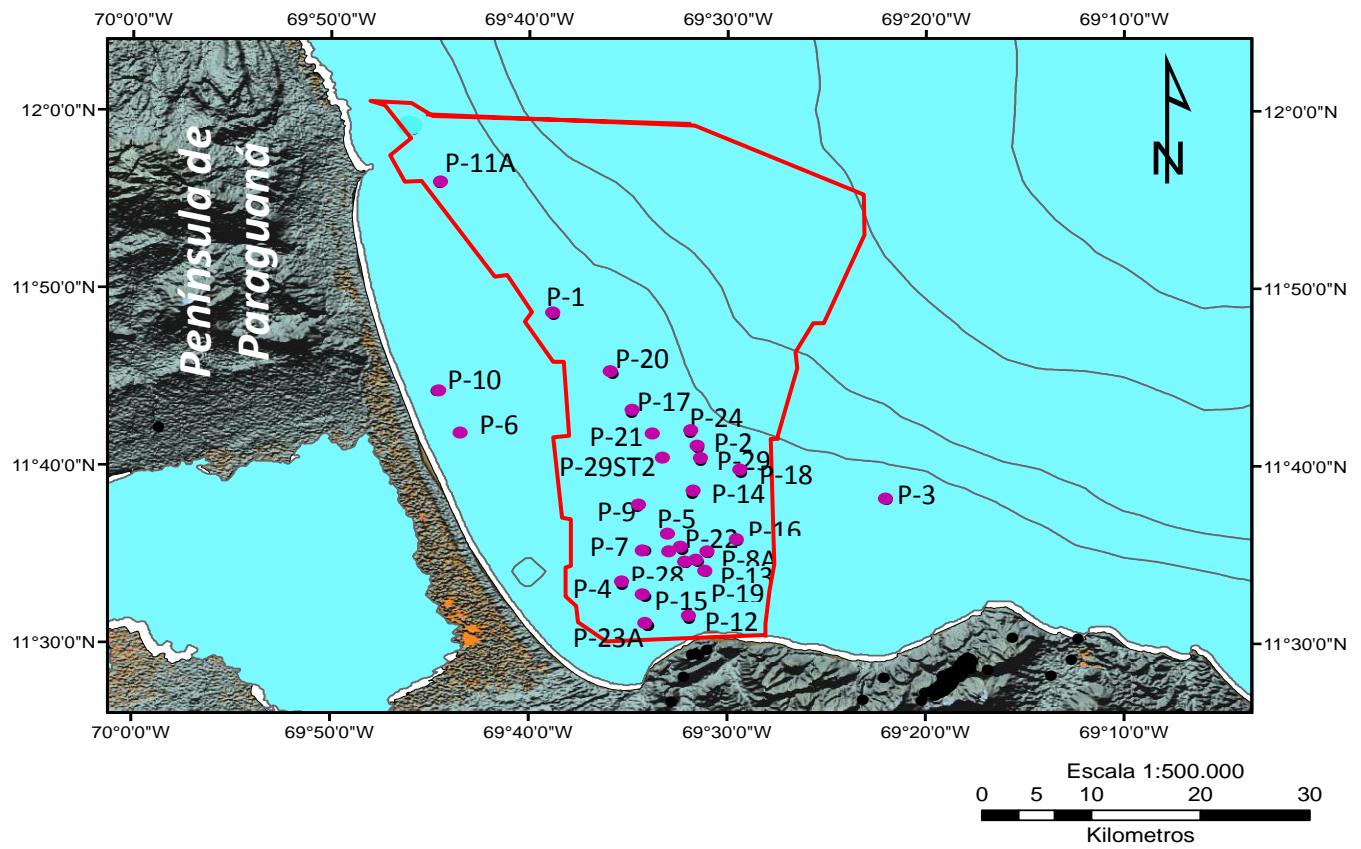


Figura N°15. Mapa de ubicación de los pozos exploratorios en la Ensenada de La Vela.

Phillips Petroleum International (2000), establece en forma general, que en el área se presentan las siguientes unidades estratigráficas, de base a tope: basamento de rocas ígneas y metamórficas de posible edad Cretácico, Unidad de Conglomerado Basal y Formación Guarabal del Eoceno, formaciones Agua Clara y Cerro Pelado del Mioceno Inferior, Formación Socorro del Mioceno Superior, Formación Caujara del Mioceno Superior-Plioceno, Formación La Vela del Plioceno y sedimentos sin diferenciar del Plio-Pleistoceno.

Más recientemente PDVSA, Estudios Integrados, División Costa Afuera (2009), establece con base en sísmica e información de pozos y núcleos, que en el

subsuelo de la Ensenada de La Vela se encuentra la Formación Castillo de edad Oligoceno-Mioceno Temprano, redefinida en cuatro unidades litoestratigráficas sucesivas: Unidad de Conglomerado Basal, Unidad Capas Rojas, Unidad Guarabal y Unidad Castillo. De igual manera, indican que la secuencia estratigráfica de base a tope es: basamento ígneo-metamórfico de edad Cretácico?, Fm. Castillo del Oligoceno, Fm. Agua Clara con sus miembros Cauderalito y Santiago del Miocene Inferior, las formaciones Socorro y Caujarao del Miocene Medio, Fm. La Vela del Miocene Superior y sedimentos del Plio-Pleistocenos sin diferenciar.

Actualmente, El proyecto de Intevep Costa Afuera (2016), del cual forma parte la presente investigación, asume la presencia de las formaciones Castillo, Cantaure, Agua Clara, Querales, Socorro, Caujarao y La Vela, descartando la presencia de las rocas volcánicas y de la formaciones Guarabal y Cerro Pelado (figura N° 16), en base al análisis sedimentario micro y macroscópico, así como al análisis bioestratigráfico.

De lo anterior expuesto, se evidencia la complejidad estratigráfica del área, lo cual ha causado que distintos nombres formacionales hayan sido aplicados por diversos autores a las mismas unidades litoestratigráficas, e impide realizar correlaciones estrictamente litológicas, por lo cual las correlaciones deben ser realizadas bajo un marco cronoestratigráfico secuencial (ver anexos A, B y C), como se mencionó al principio. Existe diacronismo de algunas formaciones (Agua Clara, Caujarao y Cerro Pelado, se hacen más jóvenes hacia el oeste) e interdigitación entre unidades (Baquero, *et al*, 2010).

Para la presente investigación se utilizaron datos estratigráficos de: sísmica, sedimentología y bioestratigrafía, lográndose una visión regional y general del área en el ámbito estratigráfico, lo cual ésta ampliamente influenciado por el componente estructural.

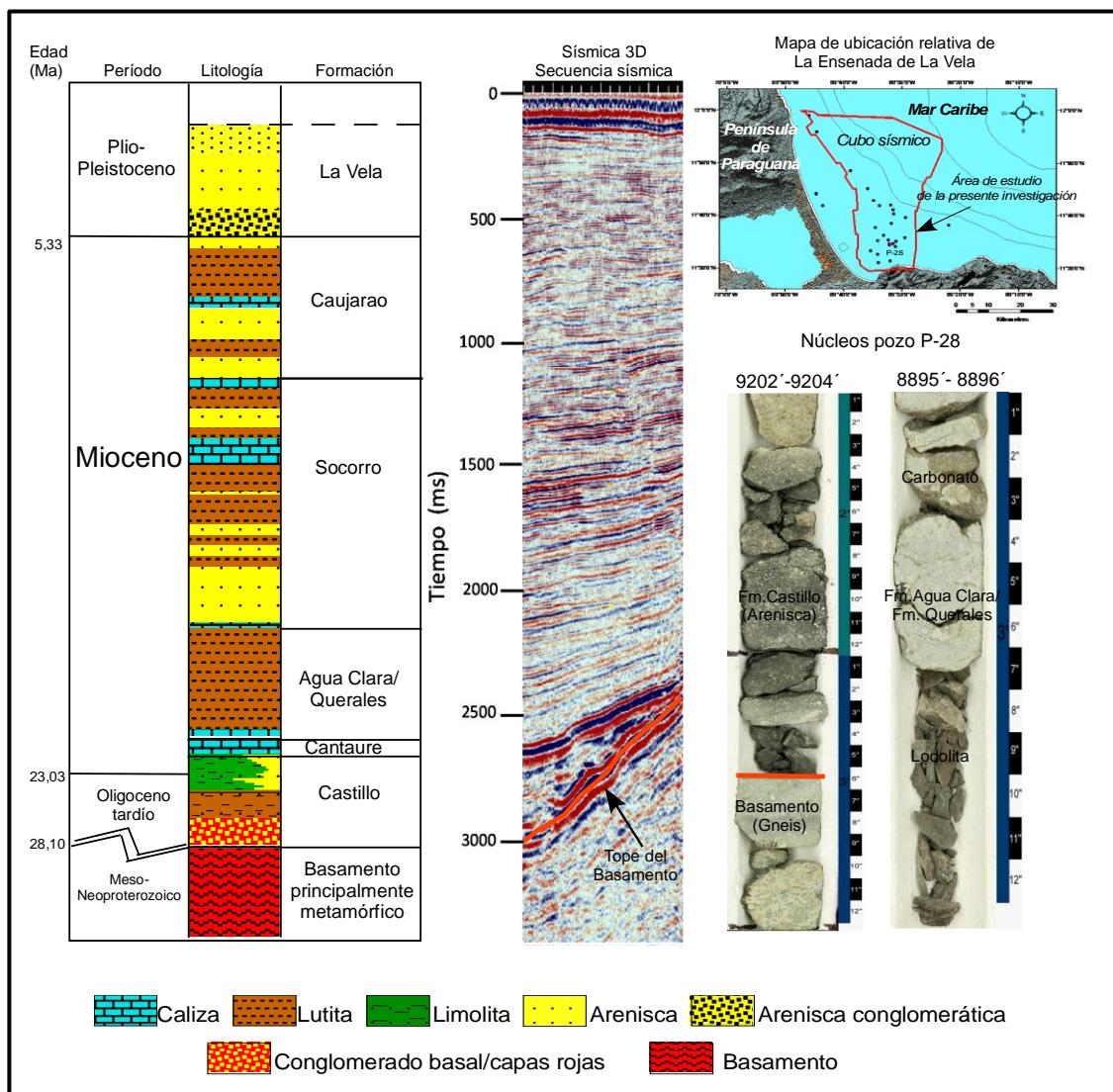


Figura N° 16. Columna geológica generalizada del área de la Ensenada de La Vela, sector costa afuera, Cuenca de Falcón. En la secuencia sísmica se observa claramente el tope del basamento, éste también fue reconocido en los núcleos del pozo P-28, donde se tiene un gneis en contacto con una arenisca de grano grueso a conglomerática, perteneciente a la Fm. Castillo.

La sedimentación en la Ensenada de La Vela, inicia en general con capas conglomeráticas, que pasan progresivamente a niveles detríticos más finos, arenosos y/o arcillosos, las cuales han sido identificadas en los núcleos de la mayoría de los pozos, los mismos pertenecen a la Formación Castillo. Reportes internos de pozos realizados por PDVSA Exploración llaman a estas unidades como “Capas Rojas” y

“Conglomerado Basal”, y sobreyacen a un basamento metamórfico de alto grado, de edad Meso-Neoproterozoico (Baquero *et al.*, 2015). Estos primeros depósitos posiblemente son producto de la erosión del Alto de Paraguaná o por exposición a la erosión del basamento Meso-Neoproterozoico (Baquero, 2015).

Los datos bioestratigráficos disponibles sugieren que la depositación del nivel conglomerático, cubre algunos bloques (deprimidos) en el Chatiense (Oligoceno Tardío) y otros (bloques levantados) en el Aquitaniense (Mioceno Temprano). No obstante, en algunos pozos (P-15, P-4, P-7) no se perfura la secuencia sedimentaria completa, por lo que no se descarta la posibilidad de la existencia de depósitos más antiguos. En La Vela Tierra, la sedimentación inicia en el Rupeliense Tardío (Oligoceno Temprano), definida por la presencia de foraminíferos índices como: *Laterostomella cubensis*, *Paragloborotalia opima opima* y *Globigerina ciperoensis* (zonas P20 y P21; Arnstein *et al.*, 1983); siendo el ambiente depositacional continental a costero, que evoluciona en un ambiente nerítico más o menos profundo hacia el tope.

3.2.2 DESCRIPCIÓN DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Las descripciones de las unidades litoestratigráficas están basadas en la descripción de núcleos recuperados y en muestras de canal, correspondientes a los pozos perforados en la Ensenada de La Vela (ver tabla N°2); y en el Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela (2007). Se utilizaron las descripciones micro y macroscópica de las unidades litoestratigráficas, expresadas en diferentes informes, así como análisis bioestratigráficos. En la figura N°17 se muestra el porcentaje de núcleos recuperados de cada una de las unidades litoestratigráficas perforadas por los pozos en el área de La Ensenada de La Vela.

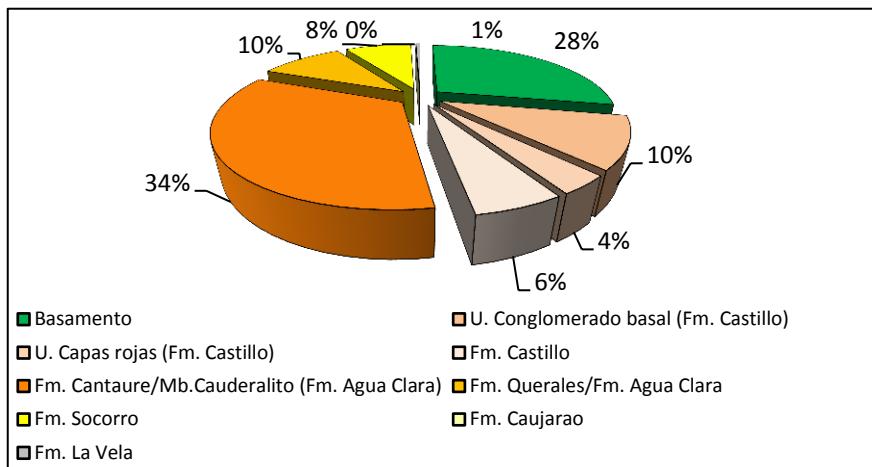


Figura N°17. Porcentaje de núcleos recuperados por unidad sedimentaria en el área de la ensenada de La Vela. Información extraída de informes internos de PDVSA.

Tabla N° 2. Núcleos recuperados por pozo en el área de estudio.

Pozo	Profundidad final (pies)	Longitud (pies)/Núcleos recuperados
P1	7858'	102'/6
P2	8018'	100'/6
P4	11975'	144'/7
P5	9507'	23,5'/5
P7	13321'	66,25'/5
P8A	11023'	33'/2
P9	9992'	13,5'/3
P11A	6140'	9'/1
P12	8739'	17,5'/2
P13	9712'	18'/3
P14	8479'	82'2
P15	11722'	115'2
P16	12050'	34'2
P17	7968'	15'1
P18	11046'	44'/2
P19	10170'	232,5'/23
P21	8271'	43'/2
P22	9595'	154,5'/15
P24	8020'	60'/1
P28	9850'	349,5'/8
P29	8538'	61'/2
P29ST2	9920'	61'/1
Total de Núcleos recuperados:		1943,25'

Ambientes marinos desde batiales hasta costeros/marginales, se desarrollaron a lo largo de la historia geológica de La Ensenada de La Vela, propiciando condiciones para la generación de grandes espesores de rocas lutíticas, areniscas y bancos carbonáticos.

En el área se tiene una sucesión sedimentaria que va desde el Oligoceno Tardío hasta el Reciente, la cual suprayase a un basamento principalmente metamórfico. A continuación se describen las unidades de base a tope:

Basamento ígneo- metamórfico de alto grado: en su gran mayoría los pozos ubicados en el área penetraron el basamento, presentando así una variedad de litologías: filitas, gneises, granulitas, metagranodiorita, metagabro, cuarzo sienita granatífera, granito y piroxenita, predominando las rocas metamórficas (Mendi *et al.*, 2005; Grande *et al.*, 2009, Grande, 2012). El análisis radiométrico de las filitas a partir de roca total dió una edad K-Ar de 83.5 millones de años, Cretácico Tardío (C.V.P, 1974), pero esta edad podría representar la edad máxima de metamorfismo de esta secuencia filítica, mientras que la edad K- Ar determinada en el feldespato potásico del gneis, pozo P-2, es de 114 Ma. (Feo-Codecido *et al.*, 1984).

Con base en las dataciones anteriores algunos autores como Audemard (1991), Porras (2000), Escalona y Mann (2011) proponen que este basamento es alloctono, de edad Cretácico Temprano y por tanto es considerado como un terreno fragmentado de la placa Caribe que colisionó y se suturó oblicuamente en el extremo oriental de la Cuenca de Falcón, consumiendo probablemente corteza oceánica proto-Caribe, convirtiéndose luego en un orógeno flotante.

Sin embargo, recientes dataciones, realizadas por Baquero *et al.* (2011) por el método U-Pb en circones por el método LA-ICP-MS en gneises en facies de la granulita, de algunos núcleos de los pozos del área (P-11A, P-12, P-17 y P-22), el basamento de la Ensenada de La Vela tiene una edad de 1280 Ma., Meso-

Neoproterozoico, confirmando así la existencia de rocas grenvillianas en la Cuenca de Falcón, establecidas por Grande (2009-2012), Grande *et al.* (2009) y Mendi *et al.* (2005), por lo cual este basamento no está relacionado con el Cratón Amazónico (Grande *et al.*, 2009; Grande, 2013).

En las descripciones petrográficas realizadas por Mendi, *et al.*, 2005, del basamento de cinco pozos en la Ensenada La Vela (P-12, P-13, P-17, P-18 y P-22), se obtuvo que el protolito de todas las muestras es ígneo, principalmente plutónico felsico, con afinidad de corteza continental. Sin embargo, unas muestras de los pozos P-13, P-17, P-22 no concuerdan con el resto, ya que son máficas con afinidad oceánica, semejantes a las rocas aflorantes en la Península de Paraguaná. Estas mezclas de unidades se debe a que en la zona de la Ensenada de La Vela existe un escalonamiento tectónico de basamento producto del emplazamiento de las napas de Lara, además de estar dentro de la zona de interacción entre la placa Caribe y Suramericana, que propicia esta mezcla de unidades (Baquero *et al.*, 2011). Este escalonamiento es observado en las secciones sísmicas, teniendo un basamento altamente fracturado, como también lo estableció Chigne en 1980.

Formación Castillo: representa la unidad litoestratigráfica más antigua encontrada en el subsuelo de la Ensenada de La Vela, suprayaciendo discordantemente al basamento ígneo metamórfico. Su litología cambia progresivamente del oeste al este, de depósitos continentales a depósitos neríticos internos. Las areniscas se vuelven más finas y con capas más delgadas hacia el mar abierto. La edad de la formación es Oligoceno-Mioceno Temprano según Wheeler (1960), con foraminíferos índices como: *Lepidocyclus canellei*, *L. senni*, *Operculinoides bullbrookii*, *O. semmesi*, *Miogypsina hawkinsi* en el Oligoceno y con foraminíferos bénicos y moluscos del Mioceno. Su espesor varía entre 800 y 1477m.

Con base en la información de núcleos recuperados, la sedimentación se inicia en general con capas conglomeráticas que pasan progresivamente a niveles detríticos

más finos, arenosos o arcillosos y en el tope capas carbonáticas. Teniendo en cuenta el carácter granodecreciente y estratodecreciente de estos depósitos que se marca también sobre los registros de pozos, así como a los estudios bioestratigráficos (Chatiense – Aquitaniense), las unidades descritas en estudios anteriores: Conglomerado Basal y Capas Rojas, pertenecen a la misma secuencia estratigráfica y posiblemente a la misma unidad litoestratigráfica (Fm. Castillo).

Los depósitos denominados “Conglomerado basal y Capas rojas” están constituidos por lutitas, de color ladrillo a verde pálido, micáceas, intercaladas con limolitas silíceo-ferruginosas de color rojo parduzco a gris rosado y areniscas arcósicas de grano fino a conglomerático, de color gris rosado pálido; en la parte media se encuentra una capa delgada de conglomerado de grano fino, y en la parte basal se encuentran conglomerados líticos, con fragmentos de hasta 15 cm de diámetro, de cuarzo lechoso y de rocas de origen ígneo y metamórfico en una matriz escasa, pirítico-clorítica (C.V.P, 1974). Las “Capas Rojas” representan un ambiente oxidante propio de deposición continental, “equivalente a la sección basal de la transgresión cenozoica, su edad podría abarcar hasta el Eoceno Tardío, tiempo cuando se concluyó la regresión representada por la parte superior del Grupo Santa Rita y se inició dicha transgresión en la Cuenca de Falcón (C.V.P, 1974).

Dos unidades conglomeráticas se observan en el pozo P-7. En este pozo, la primera unidad de 550' (pies) de espesor comienza con 100' de arcilla siguiendo con intercalaciones arenosas. Una capa de lignito ha sido observada entre 10976' y 10979'. El intervalo de 11834'-11841' es rico en óxido de hierro (nivel condensado) y marca probablemente el tope del Chatiense. El color es variable: naranja, amarillo, rojo y gris. El ambiente de deposición es deltaico con influencia continental; marina costera a lagunar en las partes grises que contienen bioturbaciones. Capas delgadas de calizas bioclásticas se intercalan en las arcillas a la base del Aquitaniense y varias capas de calizas arenosas aparecen en el tope.

En el pozo P-8A, la unidad se haya representada por una caliza con bioclástos que sobreyace al basamento, seguida por arcillas. La base de la formación es conglomerática en el pozo P-16 vecino. Este intervalo pasa progresivamente a arcillas del dominio nerítico externo que contienen *Globigerina ciperoensis*. El pozo muestra una secuencia compuesta por la alternancia de arcillas y areniscas hacia el tope que representa probablemente el Chatiense, con *Cicatricosisporites dorogensis* a 10126' y 10135'.

Respecto a la presencia del Mioceno Inferior, se reconocieron intervalos correspondientes al Aquitaniense, en los pozos P-28 y P-4, donde el núcleo de 11688' a 11699' de este último pozo muestra areniscas y limolitas de color rojo y naranja, un nivel de brecha y conglomerado entre 11694' y 11697'. Bioturbaciones ocurren a 11695' y huellas de raíces entre 11688' y 11693', en las areniscas de color rojo y naranja. El ambiente de deposición pertenece a una llanura costera, con influencias continentales y marinas en estos intervalos. Contreras *et al.* (2010), menciona en el pozo P-3, palinomorfos del Mioceno Temprano.

La sísmica 3D del área de estudio, muestra que la sedimentación de la Formación Castillo en La Ensenada de La Vela, estuvo influenciada por una falla lístrica, ubicada al sur del cubo sísmico, específicamente al norte de los pozos P-23 Y P-12.

Los datos bioestratigráficos disponibles sugieren que la deposición de la Formación Castillo comienza en el Chatiense, cubriendo algunos bloques del área de estudio y otros en el Aquitaniense. No obstante, en el Campo La Vela Tierra, el Rupeliense Superior fue reconocido en los pozos P-25 y P-26, por lo que se puede considerar la posible existencia de edades más antiguas en la Ensenada de La Vela.

Formación Cantáure: esta unidad está en contacto con la Formación Castillo en la mayoría de los pozos del Campo La Vela. El ambiente de deposición va de una

zona litoral en la base de la formación (debido a la presencia de *Balanus sp.*) hasta un ambiente nerítico externo, indicado por la presencia de *Uvigerina peregrina* y *Bolivina subaenariensis mexicana*.

Según Baquero *et al.*, (2011), “la transgresión del Langhiense es progresiva en el área de la Ensenada de La Vela”. La primera etapa constituye una unidad compuesta por una sucesión de conglomerados, lutitas y limolitas costeras más calizas de la plataforma que sobreyacen al basamento (pozos P-5, P-14, P-1, P-20, P-17, P-19). La segunda comienza con capas arcillosas y culmina con una alternancia de calizas y lutitas, las cuales pueden transgredir directamente sobre el basamento (P-2, P-6, P-17, P-9, P-10, P-11A, P-23A, P-24 y P-29).

Los núcleos del pozo P-28 muestran el contacto de la Formación Cantaire con el basamento y la litología de sus dos secuencias. El tope del basamento metamórfico se ubica a 9205'. Se observa la alternancia de bloques moteados, de conglomerados y brechas hasta 9082'. Una capa de arenisca de 0,7' de espesor suprayace a los conglomerados. La sedimentación continúa con una limolita moteada que contiene abundantes huellas de raíces hacia la base y fragmentos orgánicos hacia el tope. Bioturbaciones tipo *Thalassinoides* aparecen desde 9066' mostrando una influencia marina. Una capa de caliza bioclástica (9063'-9064,7') y un intervalo de arenisca de grano fino a grueso (9059,5'-9063') sobreyace a las limolitas. Se observa la alternancia de limolita y arenisca con cemento calcáreo hasta 9041'. (BioStrat, 2000).

En el pozo P-18, la primera parasecuencia está compuesta por la alternancia de calizas de tipo mudstone y de lutitas de color gris. Los núcleos del pozo P-19 muestran una litología similar, areniscas más o menos gruesas con guijarros, limolita, niveles bioturbados o moteados. Una capa de lignito ha sido observada entre 9486' y 9487'. Las calizas bioclásticas de la plataforma predominan al tope de la formación donde culmina la parasecuencia. Las calizas de tipo mudstone con bioclástos dominan en el pozo P-20, intercalaciones delgadas de arcillas laminadas están

presentes en la parte inferior del núcleo, el pozo P-24 muestra igualmente la predominancia de las calizas de tipo packstone a la base del núcleo (7854'-7857,5') que se vuelven más finas hacia arriba: grainstone con pisolitos y fragmentos de moluscos (BioStrat, 2000).

Con base en estudios bioestratigráficos (Contreras *et al*, 2010), llevados a cabo en los núcleos del pozo P-28 y a la presencia del género *Miogypsina*, el cual desaparece en el Burdigaliense en Europa, pero persiste hasta la zona M5 del Langhiense en América según los datos publicados por Akers y Drooger (1957), la edad de la formación en el área de la Ensenada de La Vela se asigna al Aquitaniense-Langhiense. Sin embargo, la presencia de los nanofósiles calcáreos *Sphenolithus disbelemnos*, *S. belemnos*, *Helicosphaera scissura* que indican el intervalo NN2-NN3 (equivalente de las zonas M1-M3) entre 8871' y 9013', contradicen estos resultados, siendo posiblemente fósiles retrabajados de la Formación Agua Clara.

En informes anteriores existe una confusión entre el Miembro Cauderalito de la Formación Agua Clara y la Formación Cantaure en la Ensenada de La Vela. La primera, de edad Mioceno Temprano (zona M2, Aquitaniense Tardío-Burdigaliense), es el primer depósito, carbonático de la Formación Agua Clara. La segunda, arcillosa y carbonática, ubicada en la zona M5, introduce la transgresión que culmina con la deposición de la Formación Querales. Actualmente, el Proyecto de Intevep Costa Afuera (2016), del cual forma parte la presente investigación, asume la presencia tanto del Mb. Cauderalito como de la Fm. Cantaure, y los análisis bioestratigráficos y sedimentológicos, que permitan discriminar entre una y otra unidad, aún se encuentran en discusión.

Formación Querales: compuesta con más del 90% de lutitas oscuras, con intercalaciones de areniscas de grano fino, muy bioturbadas escasas margas y calizas conchíferas en capas delgadas y algunos finos niveles carbonosos, representa un evento transgresivo, consecuencia de una invasión marina discreta, durante el

Mioceno Temprano y Medio. Su contacto superior es transicional con la Fm. Socorro, y se coloca en la base de la primera arenisca. Sin embargo, varios autores, incluyen a las lutitas de la Fm. Querales en la Formación Socorro como su miembro inferior (Senn, 1935; González, 1937). Gamero (1989), demuestra que la unidad conocida como Fm. Agua Clara, es una extensión de la Fm. Querales y que ésta a su vez corresponde a una parte de la Fm. Socorro. El ambiente de deposición es probablemente batial según los datos de los pozos P-7, P-8A, P-10A, P-12 y P-18 (BioStrat, 2000).

En la Ensenada de La Vela, la Fm. Querales está caracterizada por la predominancia de lutitas. Capas delgadas de calizas han sido mencionadas en algunos pozos (P-1, P-26, P-27), y arenosas en otros (P-8A, P-25). Dentro de la Fm. Querales se pueden definir dos (2) unidades: La primera es granocreciente con un espesor entre 900' y 1100'. Su tope es un pico resistivo (marcador "Intra-Querales"). La segunda forma un paquete de 300'-600' de espesor y muestra una resistividad globalmente más elevada que la unidad precedente. Está constituida por la alternancia de capas más o menos arcillosas y arenosas. Está erosionada al norte del pozo P-2, en el triángulo que forman los pozos P-21 – P-24 – P-14 y entre los pozos P-19 y P-28.

La edad de la Fm. Querales, está basada en diferentes estudios. Una edad Serravallense fue mencionada en el pozo P-27 con la zona *Fohsiella fohsi* entre 4420' y 5090' y con la zona *Globigerinoides rubra* de 3590' a 4420'. *Fohsiella fohsi robusta* estaría presente en el pozo P-18 entre 8400' y 8650'. En el pozo P-2 se tiene la presencia del género *Praeorbulina*, al igual que en la mayoría de los pozos. La zona M6 ha sido determinada en la última parasecuencia de la Formación Querales, por encima del marcador "Intra-Querales". Por lo anterior, se le asigna una edad Serravallense- Langhiense (Mioceno Medio).

Formación Agua Clara: su contacto superior es discordante con la Fm. Socorro y en algunos casos se encuentra infrayaciendo concordantemente a la Fm. Querales. Gamero (1989), demuestra que la unidad denominada Agua Clara, es en realidad la extensión hacia el este de la Fm. Querales. Wheler (1960), divide a la formación en dos (2) miembros; el inferior, Miembro Cauderalito, es de calizas, lutitas, limolitas y areniscas interestratificadas. El superior, Miembro Santiago, es esencialmente lutítico, con pocas areniscas interestratificadas. Según Gamero (1989), la Fm. Agua Clara es una unidad marina, que en su parte inferior, fue sedimentada en un ambiente somero, pasando hacia arriba a un ambiente de prodelta.

En la Ensenada de La Vela la unidad está constituida por lutitas fosilíferas, de color gris verde oscuro, localmente pirítica y micácea, con pocas intercalaciones de caliza arenosa fosilífera y hacia su parte basal contiene localmente capas de calizas bioclásticas, de color gris amarillento pálido o marrón claro, lo cual se le atribuye al Miembro Cauderalito.

Su fauna contiene elementos que indican un ambiente batial: (*Alveovalvulina pozonensis*, *Ammodiscus parianus*, *Valvulina flexilis*, *V. jacuraensis*) y especies del dominio nerítico interno a medio: *Archaias* sp., *Miogypsina hawkinsi*, *M. venezuelana*, *Sphaerogypsina globula*, etc. *Miogypsina hawkinsi* es una especie del Oligoceno y su determinación no es correcta. Según Díaz de Gamero, (1977), la edad de la formación es Mioceno Temprano (Aquitaniense Tardío a Langhiense, zonas M2-M5). No obstante, Gamero, (1989) atribuyó la formación a las zonas M2-M3 (Aquitaniense Tardío-Burdigaliense Medio) y establece que la parte Langhiense pertenece a las formaciones Cerro Pelado y Querales: la primera está separada de la segunda por el hiatus correspondiente a la zona M4.

Actualmente, el proyecto de Intevep Costa Afuera (2016), se encuentra en el desarrollo de nuevos estudios para verificar o descartar la presencia de la Fm. Agua Clara en el área de La Ensenada de La Vela.

Formación Socorro: está constituida por areniscas, lutitas, margas fosilíferas y calizas en su base y areniscas, turbas y lutitas laminadas sin elementos calcáreos en su parte superior. La sedimentación de la unidad se efectuó inicialmente en condiciones deltaicas, que pasan a marinas someras hacia arriba, y eventualmente, a profundidad de plataforma interna a media, hacia el tope regresan a marinas someras (Gamero, 1989).

Contiene dos asociaciones de foraminíferos distintas: *Fohsiella fohsi fohsi*, *F. fohsi peripheronda*, *Menardella archaeomenardii* en la base (desde la base de la zona M 8) y *M. menardii s. l.* *Globorotalia lenguaensis*, *Cassigerinella chipolensis* y *Hastigerina siphonifera* en el tope (zonas M9-M11 indefinidas; Díaz de Gamero, 1977). Por consecuencia, la formación representa el Serravallense Tardío.

En la sísmica 3D del área de estudio, se observa la complejidad de la sedimentación dentro de la formación. La sedimentación se haya influenciada por dos estructuras. La primera es un bloque basculado al norte del área de estudio, con buzamiento hacia el sur, delimitado al norte por una falla normal. La segunda es un bloque levantado con orientación NO-SE, ubicado en la parte sur-central, en esta estructura se encuentran una gran cantidad de pozos, casi alineados (P-19, P-13, P-28, P-22, P-5 y P-9).

La Formación Socorro, se puede dividir claramente en dos unidades (Baquero *et al.*, 2011). La “Unidad Socorro 1”, cubre un solapamiento al norte de la Fm. Querales, identificado en la sísmica al norte del cubo sísmico, producto del bloque basculado. Los espesores son importantes al sur (4-500m) y disminuyen fuertemente al norte, cerca de 100m por encima de la falla del bloque basculado al norte. El tope de la unidad es un truncamiento y nivel condensado que se observa sobre la sísmica con un marcador muy fuerte.

La “Unidad Socorro 2” es la superposición de clinoformos progradantes hacia el norte, y sus límites son superficies de erosión. El espesor del conjunto es de 400-500m al sur y puede disminuir hasta 200m hacia el norte, al igual que la “Unidad Socorro 1”. El tope de Socorro 2 es una superficie de erosión submarina que se observa particularmente bien al noreste del cubo sísmico. Ésta unidad, está constituida por una alternancia de lutitas y areniscas de grano fino a grueso en el pozo P-23.

El cambio litológico entre las unidades Socorro-1 y 2 está bien marcado, las intercalaciones de calizas desaparecen al tope de la primera y las areniscas de grano fino a muy fino están presentes a la base de la segunda. Esta litología es típica en la Fm. Socorro. Una litología similar, lutitas con numerosas capas arenosas, ocurre en los pozos P-4, P-5, P-15 y P-12, al sur de la Ensenada de La Vela.

Según (Baquero *et al.*, 2011), la Formación Socorro pertenece a las zonas M8 y M9 del Serravalliene. Esta edad es conforme a la determinada en el estratotipo de la unidad. La presencia de la zona M7 es posible en algunos pozos. Una determinación reciente (Contreras *et al.*, 2009) ha establecido la presencia de las zonas NN8-NN9 (Tortoniense Temprano) en la formación a partir de un núcleo del pozo P-1, donde *Catinaster cf. coalitus* indica estas zonas (M12-M13a) entre 3658,5' y 3678'. Por lo anterior, se establece una edad Serravalliene-Tortoniense Temprano para la Formación Socorro.

Formación Caujara: en la sección tipo, esta unidad consiste principalmente de arcilitas con intercalaciones de margas y calizas fosilíferas y algunas capas de areniscas de grano fino. El miembro inferior, El Muaco, es principalmente arcilloso con intercalaciones de calizas y margas fosilíferas y algunas areniscas friables de grano fino y con un espesor aproximado de 646m. El Miembro Maturaca, intermedio, está caracterizado por algunas capas de caliza margosa y fosilífera (331m de espesor).

Las arcilitas y lutitas predominan al tope de la formación en el Miembro Taratara (245m de espesor).

En el subsuelo de la Ensenada de La Vela es difícil la definición de la Fm. Caujarao, donde su litología corresponde a la de la parte inferior del estratotipo, pero no se reconocen los miembros superiores (Taratara, Corocorote, equivalente El Jebe). Según, C.V.P (1974) la unidad está formada por arcilitas de colores claros, amarillo, marrón y verdosas, con intercalaciones de lodolitas verdosas con abundancia de glauconita y arcilitas grises azuladas que localmente se hacen carbonáceas.

El contacto de las formaciones Socorro y Caujarao es abrupto en los pozos ubicados en esta área (P-3, P-5, P-6, P-7, P-8A, P-10A, P-11A, P-12). La “unidad Socorro 2” arcillosa, está cubierta por la unidad más arenosa de la Fm. Caujarao, y la cantidad y el espesor de las intercalaciones arenosas disminuyen fuertemente al norte del pozo P-20.

El ambiente de deposición es nerítico interno a medio, con base en la presencia de: *Amphistegina lessonii*, *Uvigerina isidroensis*, *Bolivina sp.*, *Elphidium sp.*, *Ammonia beccarii*, entre otros.

En cuanto a la edad de la Fm. Caujarao, las determinaciones de las biozonas están contradictorias en los pozos del área. La zona M13a. fue reconocida en el pozo P-18 (BioStrat, 2000). Las zonas M10-M11 están mencionadas en los pozos P-9 y P-11A. La zona M1 está presente en los pozos P-1 y P-5. El Plioceno está presente en los pozos P-2, P-8A y P-12. Por su parte, Contreras *et al.*, (2010) han establecido la presencia de las zonas NN9-NN10 en la formación a partir de los núcleos del pozo P-1: *Discoaster bollii* (NN 9-NN10 = 13a) entre 2384' y 2390'.

Considerando que la Fm. Socorro, llega hasta la zona M12, la Fm. Caujarao no debería ser más antigua que la zona M13a. Sin embargo, en base a las

contradicciones de los estudios bioestratigráficos, en la presente investigación se establece una edad Mioceno Tardío- Plioceno Temprano para la Fm. Caujarao.

Formación La Vela: consiste principalmente en intercalaciones de lutitas con limolitas arenosas; areniscas con microfauna, calcarenitas de colores claros, marrón a gris y lutitas grises duras y compactas. Debido a la fauna encontrada se le atribuye un ambiente depositacional de aguas poco profundas variando entre 0 y 30 metros, muy cercano a la playa en condiciones de manglares; sin embargo, la presencia de coccolitos y discoastéridos, evidencian que en parte durante la deposición este ambiente estuvo en comunicación con el mar abierto (Gamero, 1968).

En algunas partes la unidad no está presente en el subsuelo de la Ensenada de La Vela, teniéndose una marcada discordancia que pone en contacto a la Fm. Caujarao con los sedimentos del Plio-Pleistoceno.

Depósitos marinos Plio-Pleistocenos y Reciente: están constituidos por intercalaciones de limolitas arenosas, lutitas y areniscas de grano fino a grueso, compuestas de granos de cuarzo y feldespatos muy angulares y subangulares; además se tienen fragmentos de calizas, restos de peces, fragmentos de foraminíferos, corales y otros.

En general, el proceso sedimentario en la Ensenada de La Vela se desarrolló bajo ciertas condiciones tectónicas, como la subsidencia continua que se presentó desde el Oligoceno hasta inicios del Mioceno Medio, que dió paso a una etapa transgresiva en toda la Cuenca de Falcón. La invasión marina tuvo lugar desde el noreste estableciéndose en la Ensenada de La Vela condiciones ambientales de marino profundo. La segunda etapa, regresiva, comenzó en el Mioceno Medio, a consecuencia de la inversión que sufrió la cuenca, con lo cual las condiciones ambientales en la ensenada pasaron a ser marinas someras (Boesi y Goddard, 1991).

3.2.3 MODELO ESTRUCTURAL

Chigne (1980), establece la existencia de un pilar tectónico o horst, el cual corresponde a un bloque estructuralmente levantado, y el mismo es identificado por Cabrera (1985), determinando una dirección NO-SE, donde la presencia y actividad del pilar tectónico pudo haber tenido un importante impacto en la distribución de los sedimentos en la Ensenada de La Vela, lo cual se refleja en la naturaleza de los clásticos transgresivos (capas rojas y conglomerado basal), y en los sedimentos de la Formación Agua Clara. De igual manera, Cabrera (1985), identificó un conjunto de fallas normales en dirección NO-SE y fallas transcurrentes SO-NE de edad Mioceno Temprano.

Porras, (2000), por su parte establece que las principales estructuras que se desarrollan en la Ensenada de La Vela, son un conjunto de “grábenes” y “semigrábenes” de sentido NO-SE, en las cuales se han depositado espesas secciones de origen marino descansando discordantemente sobre el basamento metamorfizado.

Estudios más recientes (PDVSA, 2009), establecen un modelo estructural para el área de la Ensenada de La Vela, con base en la interpretación de sísmica 3D. Se definieron 108 planos de fallas aproximadamente, de los cuáles la mayoría tienen una dirección predominante SE-NO, y los otros direcciones SO-NE, norte franco y en menor proporción planos de fallas de rumbo este-oeste. Muchas de las fallas identificadas, poseen dominio basal, lo que las relaciona al período de colapso extensional detrás del arco sufrido en el Eoceno; a partir de este momento se inicia la generación de estructuras extensionales tipo graben y semi-graben (Audemard, 1991). Éste período extensional está presente hasta el Mioceno Temprano (Porras, 2000).

Asociadas al sistema de fallas principal, también existe un grupo de fallas secundarias, las cuales tuvieron menor actividad durante el desarrollo de la cuenca, ya que su expresión es variada y se manifiesta como un sistema de fallas con

terminación en forma de cola de caballo, un sistema de fallas conjugadas y un sistema de fallas que sólo tienen expresión en el basamento (PDVSA, 2009). Las estructuras tipo cola de caballo, pueden estar posiblemente relacionadas a los esfuerzos transtensionales ocasionados por el desplazamiento entre la Placa Caribe respecto a la Placa Suramericana, evidencias de esto es la existencia de una componente transcurrente dextral, sobre todo a niveles someros (ver figura N°18).

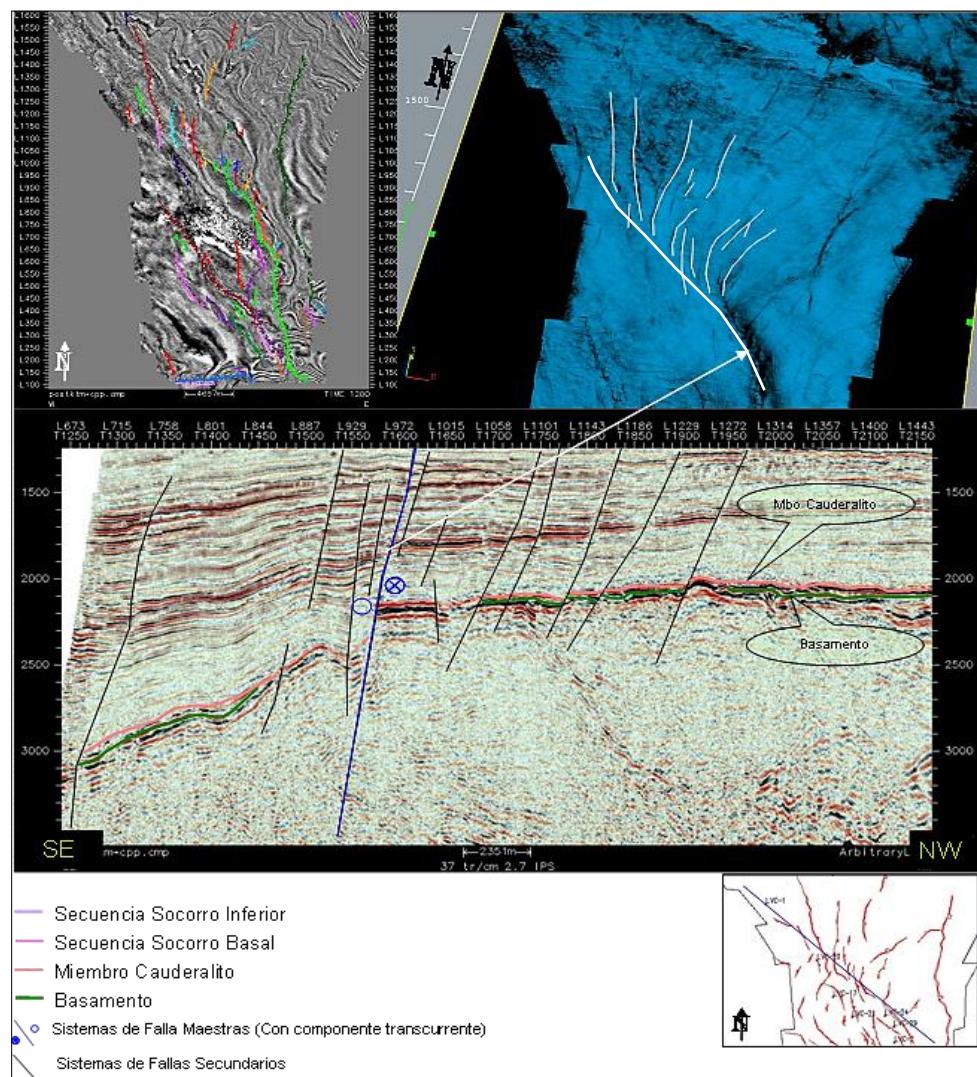


Figura N° 18. Sección sísmica vertical en dirección SE – NO, en la cual se observan fallas normales en configuración tipo “cola de caballo”. (Tomado de PDVSA, 2009).

De acuerdo a las condiciones estructurales interpretadas en el campo y tomando en cuenta los trabajos previos de CORPOVEN S.A (1980) y Phillips Petroleum International (2000), PDVSA (2009) reafirma la existencia de cinco estructuras principales en el área de la Ensenada de La Vela (ver figura N°19), las cuales de norte a sur son:

Estructura 1: pertenece a un sistema de anticlinorio, a una profundidad de 7644 pies y abarca un área aproximada de 19 km². Se encuentra limitada al norte por dos fallas normales, con direcciones SO – NE y SO-NE respectivamente, y al sur por la estructura 2 y una silla estructural, formada entre estas dos estructuras. Dentro de ésta estructura se encuentran los pozos P-17 y P-21.

Estructura 2: se encuentra enmarcada dentro del mismo sistema anticlinorio de la estructura 1, a una profundidad mayor, 7700 pies, es un anticlinal más elongado y con una extensión areal de aproximadamente 42 km². Está limitada al norte por la silla estructural y una falla normal con rangos de transcurriencia, de rumbo SE-NO, y al sur por el buzamiento de dicho anticlinal hacia el sur y el pronunciado valle entre las estructuras 2 y 3 visualizado en la sísmica y corroborado por el pozo P- 8A. Dentro de ésta estructura se encuentran los pozos P-2, P-24, P-29 y P-29ST.

Estructura 3: está caracterizada por un pilar tectónico cerrado de rumbo SE – NO, elongado y estrecho, afectado a lo largo del bloque por un gran número de fallas normales que lo dividen en una serie de sub – bloques, y dentro del cual se ubican los pozos P-19, P-13, P-28, P-22, P-5 y P-9. Se extiende sobre un área aproximada de 18 km², a una profundidad de 8800 pies. Está delimitada al norte por una serie de fallas normales de rumbo SE – NO, que separan esta estructura del valle mencionado anteriormente.

Estructura 4: consiste en un domo resultante del arrastre de la falla lístrica ubicada al sur, con rasgos de transcurriencia, con rumbo este-oeste y buzamiento al Norte. Está ubicada al sur del área de estudio a una profundidad de 10665 pies

aproximadamente., encontrándose los pozos P-4 y P-15 y abarca un área aproximada de 6 km².

Estructura 5: pertenece al bloque levantado de la falla lístrica ubicada al sur, dentro del cual se ubican los pozos P-23 y P-12, se encuentra a una profundidad aproximada de 8500 pies y su extensión mínima es de al menos 18 km², ya que no se conoce su límite sur y oeste, por estar al borde del cubo sísmico.

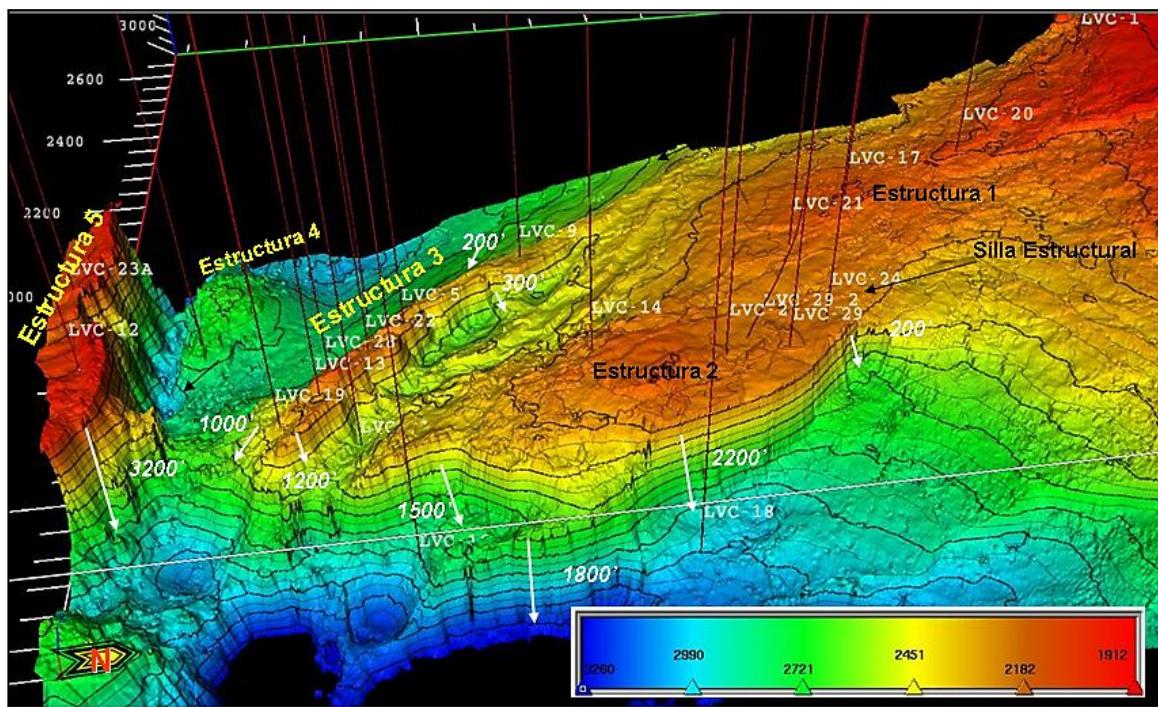


Figura N° 19. Superficie en 3D del tope del Miembro Cauderalito, donde se observan las cinco (5) estructuras identificadas, Estructura 5 al sur, estructuras 4 y 3 en la parte central y estructuras 1 y 2 al norte. (Tomado de PDVSA, 2009).

Para efectos de esta investigación se realizó una interpretación estructural, tomando como base la interpretación estructural de la sísmica 3D realizada por PDVSA (2009), ya que el mismo cubo sísmico corresponde al área de estudio. Además de las fallas reinterpretadas, se identificaron un conjunto de fallas no interpretadas anteriormente que cortan los niveles más someros.

En esta investigación se apoya la interpretación estructural realizada por PDVSA (2009), donde se identificaron un conjunto de fallas maestras que controlan la deposición de las secuencias estratigráficas, estas fallas son de carácter normal y con direcciones preferenciales: este-oeste, SW-NE, SE-NW, y casi norte-sur, y un conjunto de fallas secundarias con dirección preferencial SW-NE, las cuales se muestran en la figura N°20.

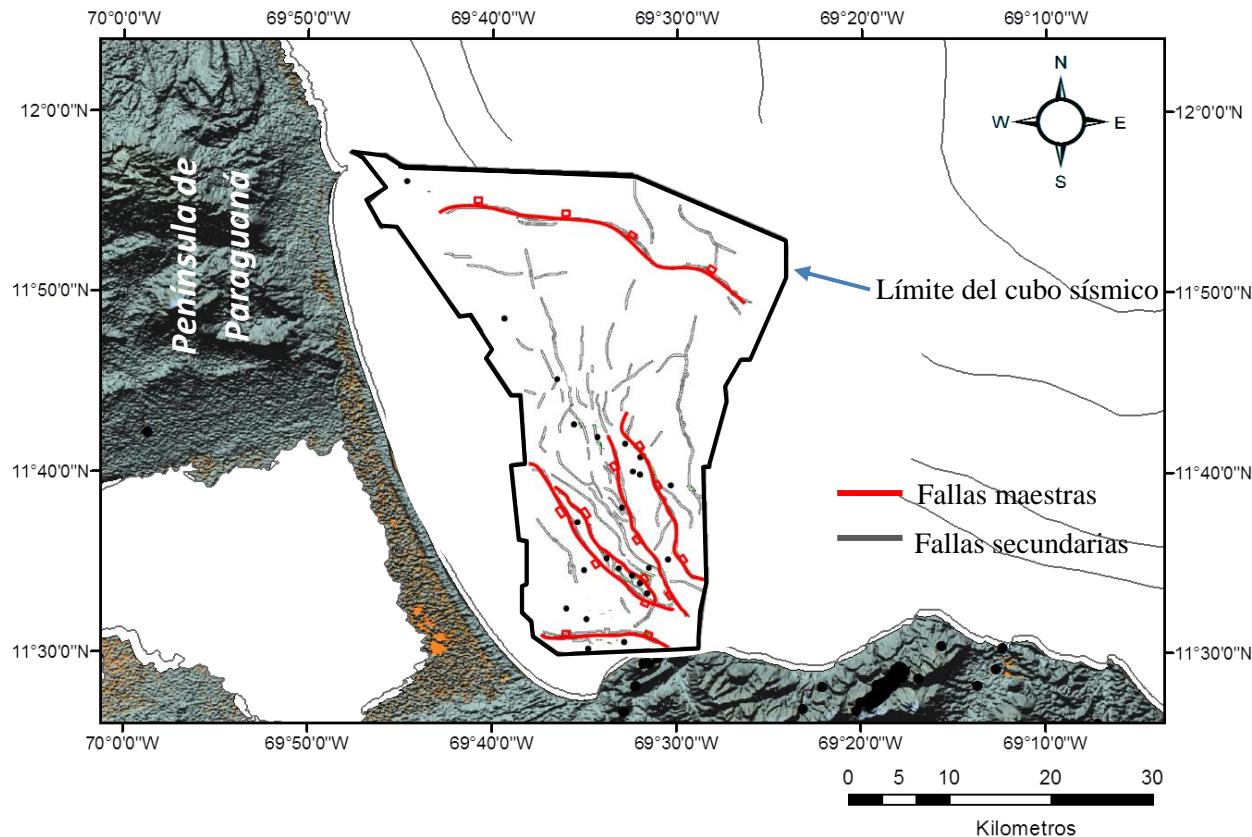


Figura N°20. Polígonos de fallas identificadas en el tope del basamento, en color rojo se muestran las fallas maestras y en negro las fallas secundarias.

Con base en la interpretación sísmica se infiere la existencia de tres sistemas de fallas: un primer sistema compuesto por dos fallas normales, donde la primera corresponde a una falla lístrica de rumbo este-oeste, ubicada al sur del cubo sísmico; la segunda con el mismo rumbo y ubicada al norte, corresponde a una falla normal,

que limita al sur a una estructura tipo graben, la cual no es visible por encontrarse fuera del cubo sísmico, la misma es interpretada en un transecto sísmico regional presentado por Gorney *et al.* (2005), (ver figura N°21). Esta falla condiciona la sedimentación en el área de estudio, haciendo que se tengan facies marinas más profundas al norte. El carácter sinsedimentario de la primera falla indica que los procesos de depositación estuvieron muy influenciados por la tectónica presente durante todo el desarrollo de la cuenca, observándose claramente al sur del área de estudio, donde se tiene un mayor desarrollo de los espesores.

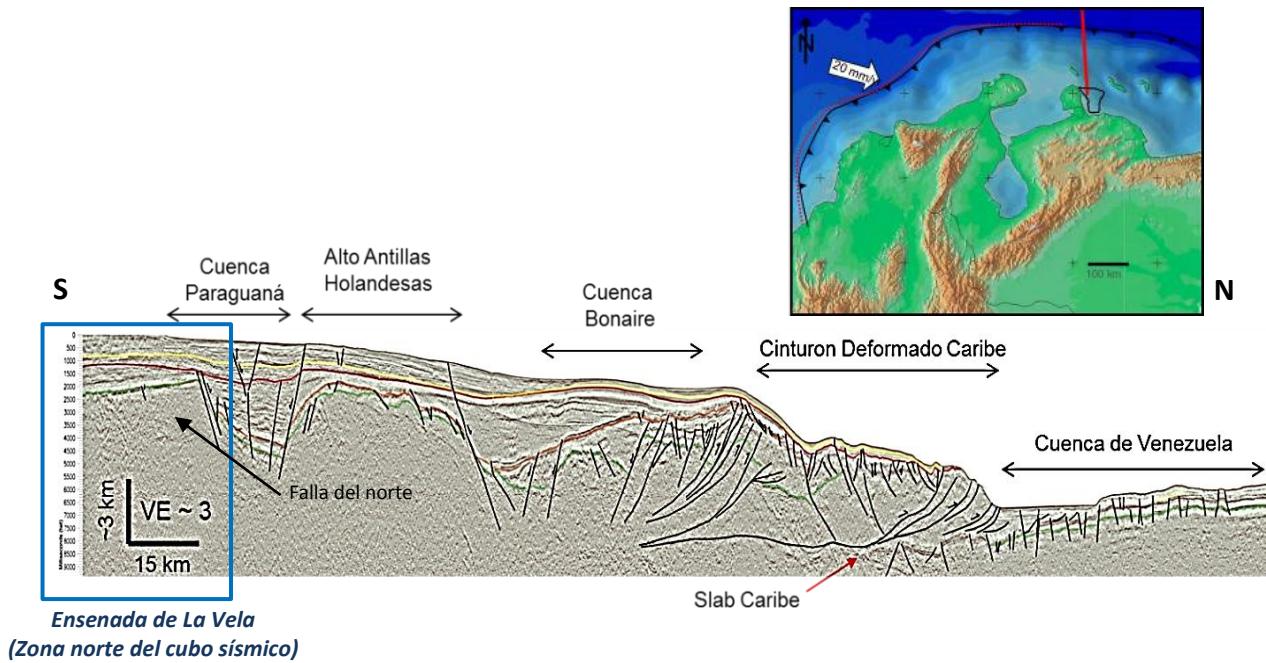


Figura N°21. Transecto sísmico regional, el cual muestra la zona norte del cubo sísmico (recuadro azul) y la falla normal más al norte del área de estudio, con rumbo este-oeste. Se observa que esta falla limita la Cuenca de Paraguaná y La Ensenada de La Vela. En la parte superior se muestra la ubicación relativa del transecto sísmico en color rojo. (Tomado de Gorney *et al.* 2005).

Un segundo sistema está conformado por un conjunto de fallas con dirección preferencial SE-NO, el cual genera estructuras extensionales de tipo horts y grabens, que condicionaron la sedimentación durante el Mioceno. Asociado al sistema de esfuerzos que dio origen al segundo sistema de fallas, se evidencian un conjunto de fallas secundarias que componen el tercer sistema de fallas con dirección predominante SO-NE.

El conjunto de fallas maestras delimitan las estructuras identificadas en el área de estudio, las cuales de manera generalizada se pueden ver como altos y bajos estructurales (ver figuras N°22 y 23), generados por el régimen tectónico predominante extensivo, que caracteriza el área, durante el Oligoceno-Mioceno Temprano; estos altos y bajos están enmarcados dentro de las estructuras definidas en trabajos anteriores.

De sur a norte las estructuras presentes en la Ensenada de La Vela son: a) Alto estructural (bloque levantado de la falla lístrica) donde se localizan los pozos P-12 y P-23, ubicado al sur del área de estudio, corresponde a la estructura 5, previamente definida. b) Bajo estructural (bloque deprimido delimitado por la falla lístrica y la falla que buza al sur de la estructura 3, donde su ubican los pozos P-15, P-4 y P-7 y dentro del cual se encuentra la estructura 4, definida anteriormente. c) Alto estructural (pilar tectónico), donde se ubican los pozos P-19, P-13, P-28, P-22, P-5 y P-9 y corresponde a la estructura 3, definida anteriormente. d) Bajo estructural, donde se ubica el pozo P-8A, limitado por las fallas maestras de las estructuras 3 y 2; en ésta investigación se define con el nombre de estructura 3.1 y corresponde a la silla estructural nombrada en informes anteriores. Por último se tiene e) el alto estructural donde se ubican los pozos P-2, P-24, P-29 y P-29ST2 y corresponde a la estructura 2, definida anteriormente.

La estructura 1 definida en informes anteriores, se muestra en la sísmica como el bloque levantado producto del mismo tren de fallas que generó la estructura 2, pero no se observan fallas que cierren dicha estructura al norte, dentro de este bloque se ubican los pozos P-21, P-17, P-20 y P-1.

En general, se tiene un periodo de colapso extensional y subsidencia, durante el Oligoceno-Mioceno Temprano, donde se desarrollaron un conjunto de grábenes y horts, en sentido NO-SE, las fallas que componen estas estructuras presentan rasgos transcurrentes dextrales, caracterizados por una geometría particular conocida como “configuración en cola de caballo”, y características sinsedimentarias evidentes, al

sur. En algunas de estas estructuras se observa plegamiento e inversión de fallas (ver figura N°23), que afecta la sucesión estratigráfica del Mioceno Temprano-Medio, lo cual pudiera estar asociado a la inversión tectónica de la Cuenca de Falcón a finales del Mioceno Temprano o comienzos del Mioceno Medio, producto del levantamiento de los Andes venezolanos, como lo sugieren varios autores (Audemard, 1995, 1997; Porras, 2000; Baquero, 2007, 2009, entre otros).

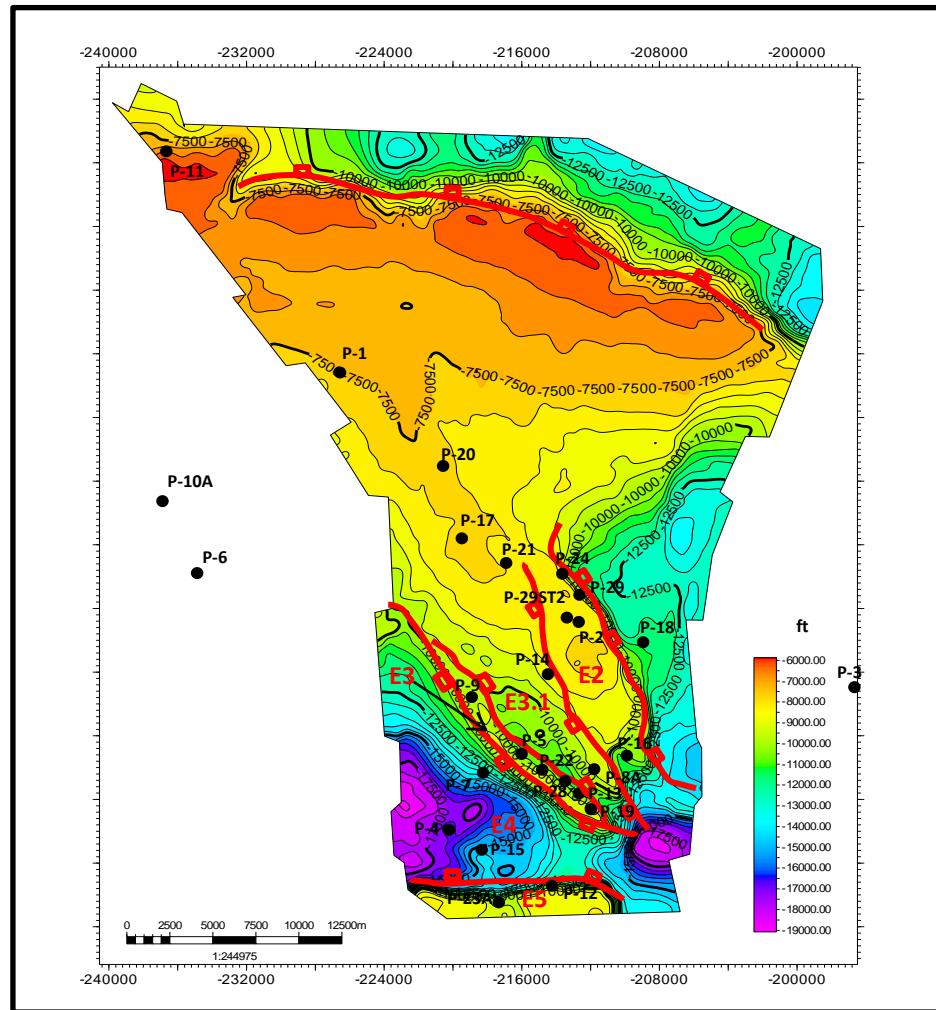


Figura N°22. Superficie del tope del basamento en profundidad, se muestran las fallas maestras y estructuras identificadas en el área de estudio (E5-Estructura 5).

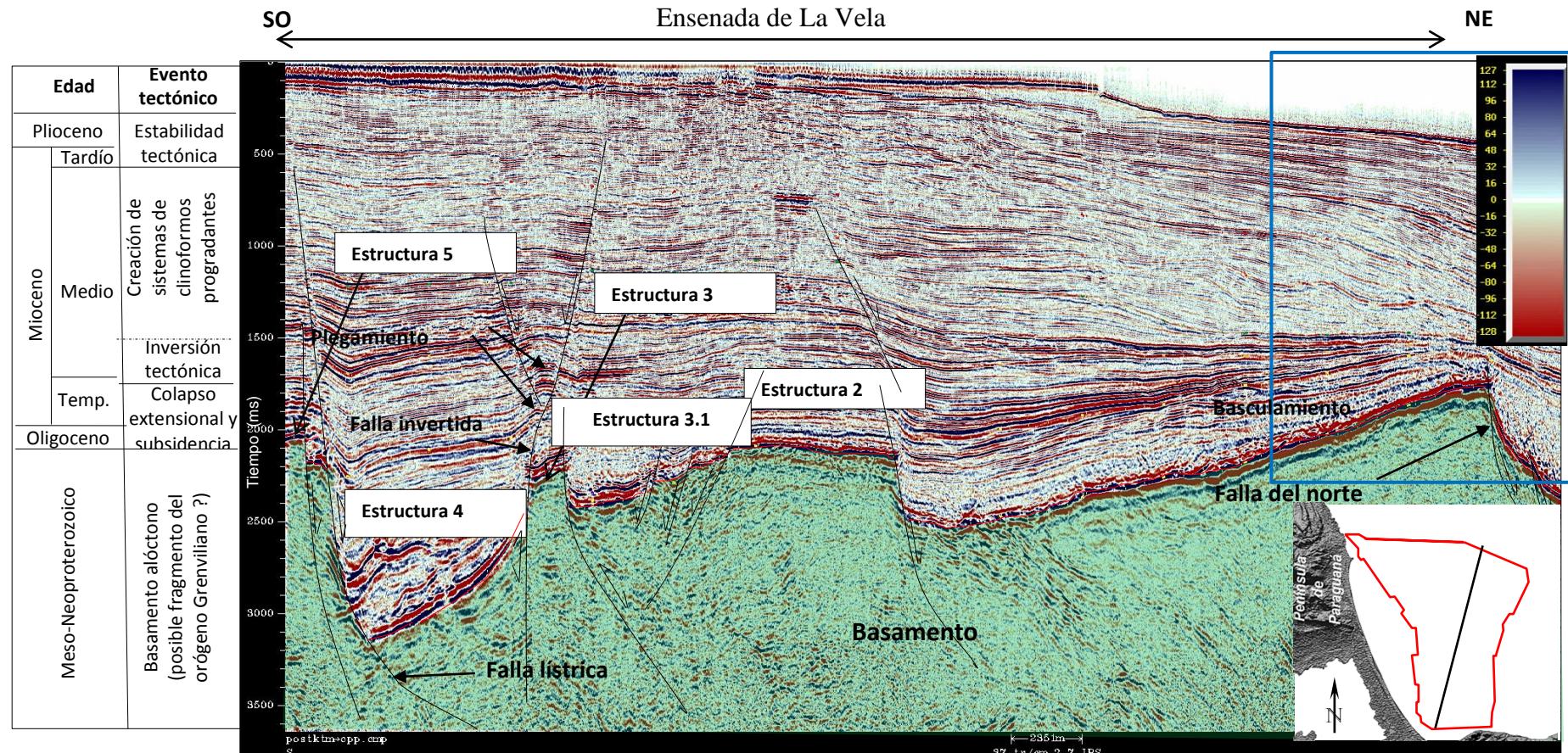


Figura N°23. Línea arbitraria del cubo sísmico, orientada SO-NE, donde se observan las estructuras definidas, inversión de fallas y plegamiento en La Ensenada de La Vela, el recuadro azul es la zona norte del cubo sísmico que se muestra en el transecto regional de Gorney *et al.* 2005.

La condición estructural aunada a los cambios eustáticos durante el desarrollo de los diferentes episodios tectónicos, determina la fuerte variación de las facies y espesores de las secuencias sedimentarias presentes en el área; tanto a nivel regional, entre las diferentes estructuras; como a nivel local, entre pozos ubicados en una misma estructura.

CAPÍTULO IV

4. MARCO METODOLÓGICO

La metodología llevada a cabo en el trabajo de investigación comprende cuatro etapas, las cuáles están relacionadas a los objetivos específicos propuestos. El siguiente diagrama de flujo (figura N°24) muestra estas etapas:

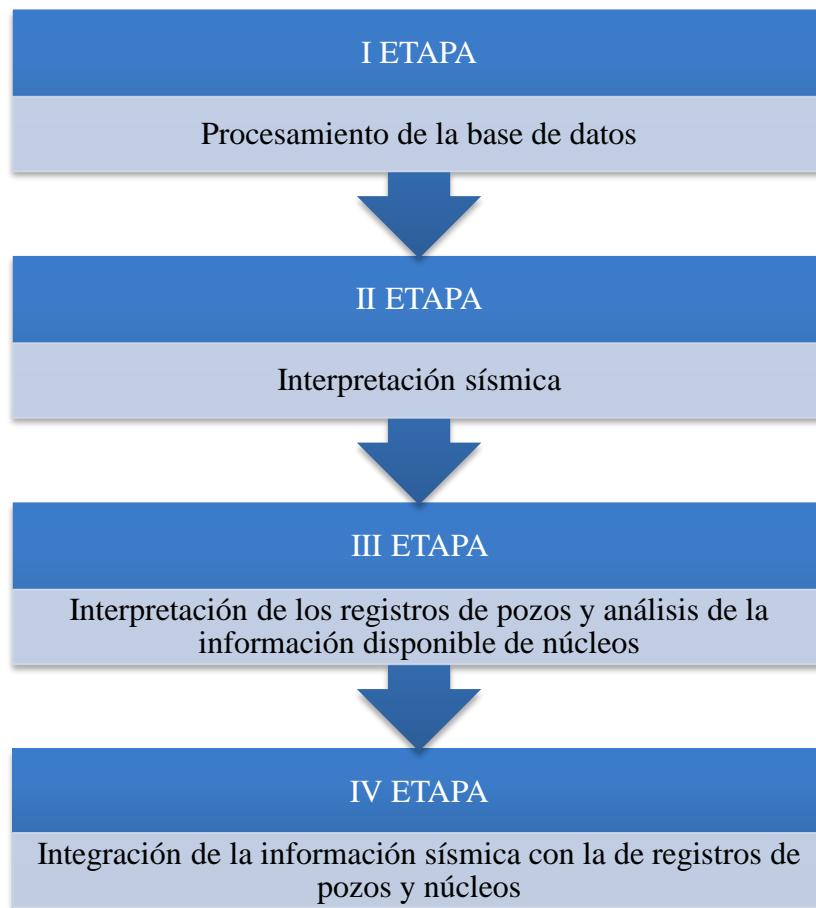


Figura N°24. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

4.1. I ETAPA- PROCESAMIENTO DE LA BASE DE DATOS

Ésta etapa abarca la recopilación bibliográfica de los trabajos realizados en el área de estudio, la generación de tablas de datos y mapas de ubicación y calidad de los datos que se utilizaron en el desarrollo de la investigación. Se subdivide a su vez en varias actividades, como lo muestra el siguiente diagrama de flujo:

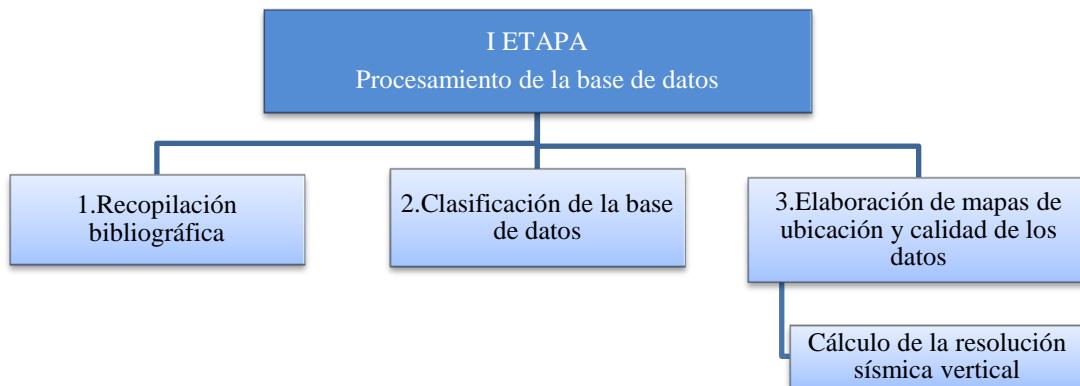


Figura N°25. Diagrama de flujo de la I etapa de estudio.

1. Recopilación bibliográfica: abarca la recopilación de trabajos realizados en el área de estudio y de trabajos relacionados a la metodología de estudio, estos incluyen: informes técnicos de PDVSA, textos especializados, tesis de grado, publicaciones, trabajos inéditos, congresos, boletines de la Asociación Americana de Geólogos Petroleros (AAPG), entre otras; encontrados en la web, Biblioteca Dr. Virgil Winkler de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica (UCV) y C.I.T. de PDVSA-Intevep. La información recopilada sirvió como base del marco geológico regional y local de la Cuenca de Falcón.

2. Clasificación de la base de datos: Para la realización de este estudio se utilizó, sísmica 3D, registros de pozos e información sedimentológica y bioestratigráfica de núcleos, suministrados por la Dirección de Exploración de PDVSA-Intevep. La base de datos se puede dividir en tres grupos principales:

Datos de Sísmica:

- ✓ 1130 km² de sísmica 3D, reprocesada, post-apilada y migrada en tiempo, de muy buena calidad, adquirida por Phillips Petroleum International entre los años 1998 y 2000, mediante un contrato de adquisición sísmica con Geco-Prakla, división de Schlumberger, quien fue el responsable de proveer la embarcación junto con los equipos geofísicos, el personal y la logística necesaria para dicha adquisición. La sísmica cubre una ventana de tiempo cuyo rango es de 0 a 6 segundos, con un intervalo de muestreo de 4 milisegundos y su datum es el nivel del mar.

Datos de Pozos:

- ✓ 26 pozos, los cuales presentan gran variedad de registros (ver tabla N°3), 23 de estos pozos se encuentran dentro del área del volumen sísmico, los pozos P-10A, P-6 y P-3 se ubican fuera del cubo sísmico, 11 pozos presentan tiros de verificación (WST-Checkshots), los cuales permitieron generar los sismogramas sintéticos para la calibración sísmica (ver tabla N°4).

Datos de Núcleos: de los 23 pozos que se ubican dentro del cubo sísmico, 22 tienen núcleos (el pozo P-23A no cuenta con núcleo), repartidos en intervalos de pocos pies de longitud (ver tabla N°5), que en total llegan a 1943,25' de núcleos recuperados. Se contó con análisis de núcleos convencionales de 22 pozos y análisis de muestras de canal para los pozos P-1, P-13, P-14, P-16, P-18 y P-22.

- ✓ Análisis sedimentológico de los núcleos de 22 pozos, suministrados por PDVSA-Intevep.
- ✓ Análisis bioestratigráficos de los núcleos de 16 pozos, suministrados por PDVSA-Intevep.

Tabla N°3. Registros por pozo. Las principales curvas utilizadas en la investigación son: GR (Rayos Gamma), SP (Potencial espontáneo), RHOB (Densidad) y DT (Sónico).

POZO	REGISTROS																
	SP	LLD	LLS	SFL	MSFL	GR	SGR	RHOB	I6FR	DT	CAL	ASN	NPHI	ILD	DPHI	PEF	RMN
P1	X					X		X	X	X	X	X					
P2	X						X		X	X	X	X	X	X			
P4	X						X			X	X	X	X	X			
P5	X						X		X	X	X	X	X	X			
P7	X								X	X		X	X	X			
P8A	X						X		X	X	X	X	X	X			
P9	X	X	X				X			X	X	X	X		X		
P11A	X						X			X	X	X	X	X	X		
P12	X						X			X	X	X	X	X	X		
P13	X						X		X	X	X	X	X	X	X		
P14	X						X		X	X	X	X	X	X	X		
P15	X						X		X	X	X	X	X	X			
P16	X						X		X	X	X	X	X	X			
P17	X						X		X	X	X	X	X	X			
P18	X	X	X				X		X	X	X	X	X	X	X		
P19	X	X	X	X	X	X						X		X	X	X	
P20	X	X	X	X			X					X	X		X	X	
P21	X	X	X	X			X					X	X		X	X	
P22	X	X	X	X			X					X			X	X	
P23A	X			X			X					X	X		X	X	
P24	X	X	X	X			X		X		X	X		X	X		
P28	X						X	X	X		X	X		X		X	X
P29	X						X		X		X	X		X		X	
P29ST2	X						X		X		X	X		X		X	X

Tabla N°4. Pozos con checkshot.

POZO	Validado con reporte	Curva Densidad	Curva Sónico
P-4	si	RHOB_v_ds	Dt_v_ds
P-8A	si	RHOB_ds	Dt_v_ds
P-12	si	RHOB_ds	Dt_ds
P-14	si	RHOB_v_ds	Dt_v_ds
P-15	si	RHOB_ds	Dt_v_ds
P-17	si	RHOB_v_ds	Dt_ds
P-18	si	RHOB_v_ds	Dt_v_ds
P-20	si	RHOB_v_ds	NT
P-23A	si	RHOB_v_ds	Dt_ds
P-28	si	RHOB_ds	Dt_ds
P-29	si	RHOB_ds	Dt_ds

Tabla N°5. Pozos con núcleos.

POZO	Elevación de la mesa rotaria	Profundidad final (pies)	NÚCLEOS CONVENCIONALES			
			Longitud (pies)/Núcleos recuperados	Análisis		Sedimentológico
				Si	No	
P1	83'	7858'	102'/6	x		x
P2	84'	8018'	100'/6	x		x
P4	137'	11975'	144'/7	x		x
P5	89'	9507'	23,5'/5	x		x
P7	84'	13321'	66,25'/5	x		x
P8A	84'	11023'	33'/2	x		x
P9	84'	9992'	13,5'/3	x		x
P11A	84'	6140'	9'/1	x		x
P12	84'	8739'	17,5'/2	x		x
P13	84'	9712'	18'/3	x		x
P14	96'	8479'	82'/2	x		x
P15	96'	11722'	115'/2	x		x
P16	96'	12050'	34'/2	x		x
P17	96'	7968'	15'/1	x		x
P18	96'	11046'	44'/2	x		x
P19	96'	10170'	232,5'/23	x		x
P20	96'	7834'	58,5'/2	x		x
P21	96'	8271'	43'/2	x		x
P22	96'	9595'	154,5'/15	x		x
P23A	96'	9080'	NO TIENE NÚCLEO			
P24	96'	8020'	60'/1	x		x
P28	98'	9850'	342'/8	x		x
P29	76'	8538'	61'/2	x		x
P29ST2		9920'	61'/1	x		x

3. Elaboración de mapas de ubicación y calidad de los datos: Con la información contenida de sísmica y en las tablas de datos de los pozos y de los núcleos, se elaboraron mapas de ubicación y calidad de los datos, en los softwares ArcGIS 10.2.1 y Petrel 2014.

El mapa de calidad de los datos de pozos (figura N°26A) se realizó utilizando como criterio la existencia de análisis convencionales de núcleos y de los perfiles resistivos, radiactivos y acústicos (GR, SP, RHOB Y DT), por lo que los pozos de buena calidad contienen todos los perfiles y los análisis sedimentológicos y

bioestratigráficos de los núcleos recuperados; los pozos de mediana calidad no poseen análisis bioestratigráficos y curva de densidad (RHOB); y por último, los pozos de mala calidad no poseen núcleos (P-23A) y sólo cuentan con registros de resistividad. El mapa de calidad de los datos de núcleos recuperados (figura N°26B) se realizó utilizando como criterio que unidad sedimentaria cortaban los núcleos recuperados por pozo, y como se encuentra el núcleo. A Los núcleos en mal estado de preservación no fue posible realizarles análisis sedimentológicos.

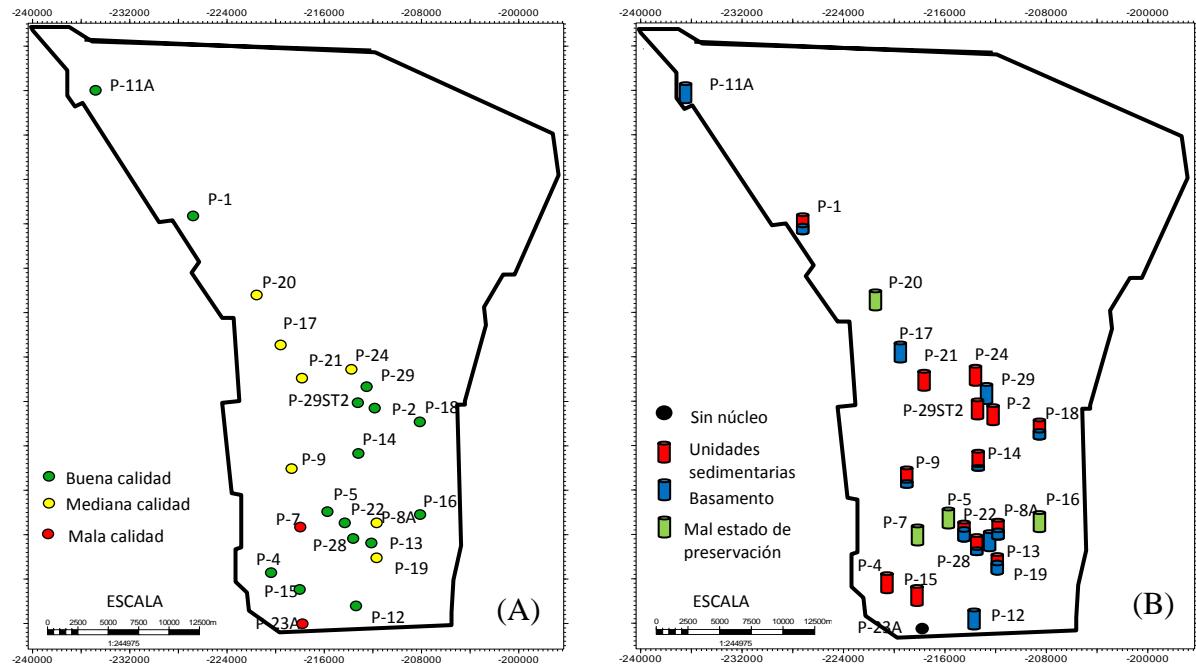


Figura N°26. (A) Mapa de calidad de los datos de los pozos. (B) Mapa de calidad de los núcleos recuperados por pozo.

Con respecto a la sísmica se evaluó la calidad de los datos sísmicos y se realizó el cálculo de la resolución sísmica vertical, dado que la frecuencia de la onda sísmica se atenua en profundidad a medida que ésta se propaga en el medio rocoso y que las velocidades intervlálicas varían debido a las condiciones físicas anisotrópicas del mismo, con el propósito de cuantificar el efecto de la pérdida de frecuencia en la

resolución vertical y considerando que en el caso del área de estudio existen grandes variaciones en los espesores y facies, se decidió hacer el cálculo en varios niveles estratigráficos, aplicando la ecuación de la Resolución Sísmica Vertical:

$$Res. Sís. Vert. = \lambda / 4 , \quad Sí: \lambda = V_{\text{intervalo}} / f$$

Se obtiene que: $Res. Sís. Vert. = R = \frac{V_{\text{intervalo}}}{4 * f}$

Donde:

$Res. Sís. Vert.$ = Resolución Sísmica Vertical

λ = Long. de onda

f = Frecuencia contenida en el intervalo.

La velocidad se obtiene del sónico. Lentitud = $1/V$

Ecuación de la Resolución sísmica vertical. Tomado de Sheriff y Geldart, 1995.

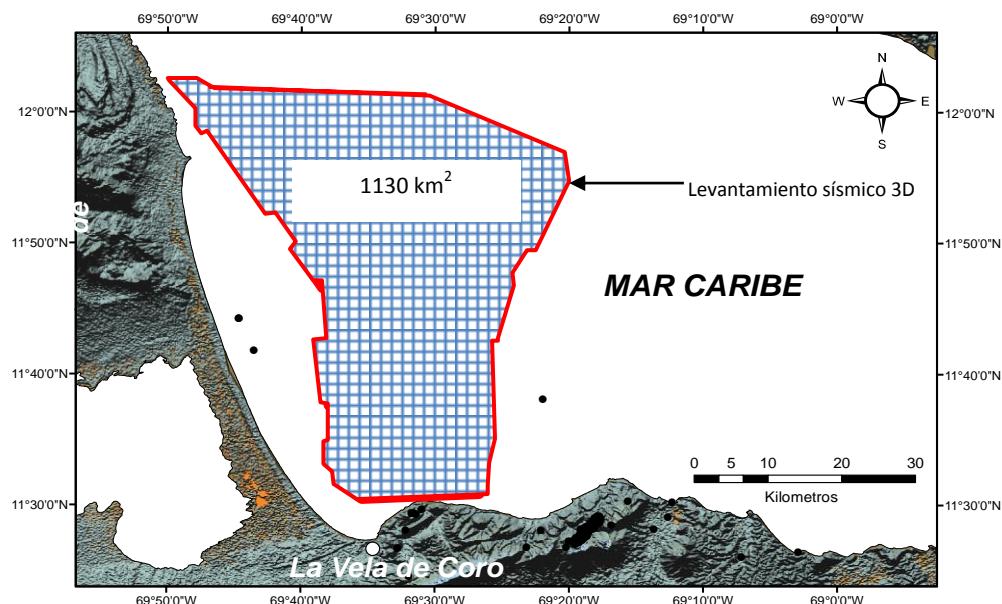


Figura N°27. Mapa del levantamiento sísmico 3D de La Vela de Coro. La sísmica cubre una ventana de tiempo cuyo rango es de 0 a 6 segundos, con un intervalo de muestreo de 4ms.

4.2 II ETAPA- INTERPRETACIÓN SÍSMICA

La interpretación sísmica se realizó en la plataforma OpenWorks, Suite de Landmark. Los materiales, software y equipos para esta etapa fueron facilitados por PDVSA- Intevep. En primer lugar se llevó a cabo una visualización rápida del volumen sísmico para identificar las discontinuidades y estructuras principales. En esta etapa se identificaron las fallas y las secuencias sismo-estratigráficas y sistemas encadenados involucrados, según el procedimiento de interpretación sísmica estratigráfica propuesto por Mitchum *et al.* (1977). Se subdivide a su vez en las siguientes actividades:

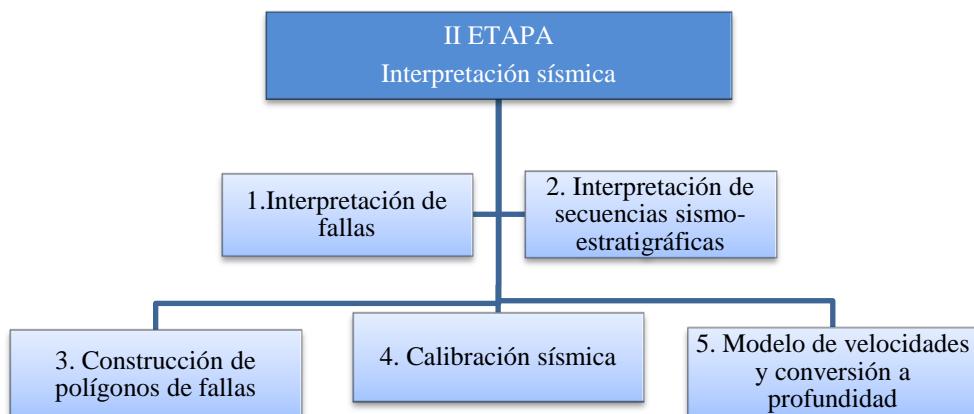


Figura N°28. Diagrama de flujo de la II etapa de estudio.

1. Interpretación de fallas: la interpretación de las fallas se realizó a lo largo de un mallado de 25x25, tanto de las líneas como de las trazas que conforman el cubo sísmico, utilizando la aplicación SeisWorks_3D de la plataforma OpenWorks (Suite de Landmark). Se utilizó como base la interpretación previa de PDVSA Estudios Integrados (2009). La identificación de los planos de fallas se realizó sobre las secciones sísmicas de norte a sur y de este a oeste, controlando en profundidad el rumbo correcto y la continuidad de cada plano de falla interpretado.

2. Interpretación de secuencias sismo-estratigráficas: al igual que la interpretación de las fallas la interpretación de las secuencias sismo-estratigráficas se realizó en el

mallado de 25x25, en SeisWorks_3D. Ésta se realizó como ya se mencionó anteriormente, según el procedimiento de interpretación sísmica estratigráfica de Mitchum *et al.* (1977), donde se identificaron discontinuidades, que corresponden a los límites de secuencias, con base en las terminaciones de los patrones de reflexión sísmica, como los son: onlap y downlap sobre la discontinuidad; y truncamiento, toplap y truncamiento aparente, debajo de la discontinuidad, esto permitió la definición de las secuencias sismo-estratigráficas en el área de estudio (ver Capítulo V-Resultados). De igual manera, en base a los patrones de reflexión se definieron algunos paquetes de reflexiones genéticas (sistemas encadenados), según la geometría de los reflectores sísmicos y la posición que ocupaban dentro de la secuencia. Es importante resaltar que en el caso del tope del basamento, la interpretación no es continua debido a las limitaciones de resolución sísmica vertical ocurriendo el fenómeno de entonación sísmica.

Luego de interpretar cada uno de los horizontes sísmicos, asociados a los límites de secuencia, se realizó una correlación o interpolación automática (ZAP!) a partir del mallado sísmico que permitió la obtención de las superficies finales en tiempo (figura N°29).

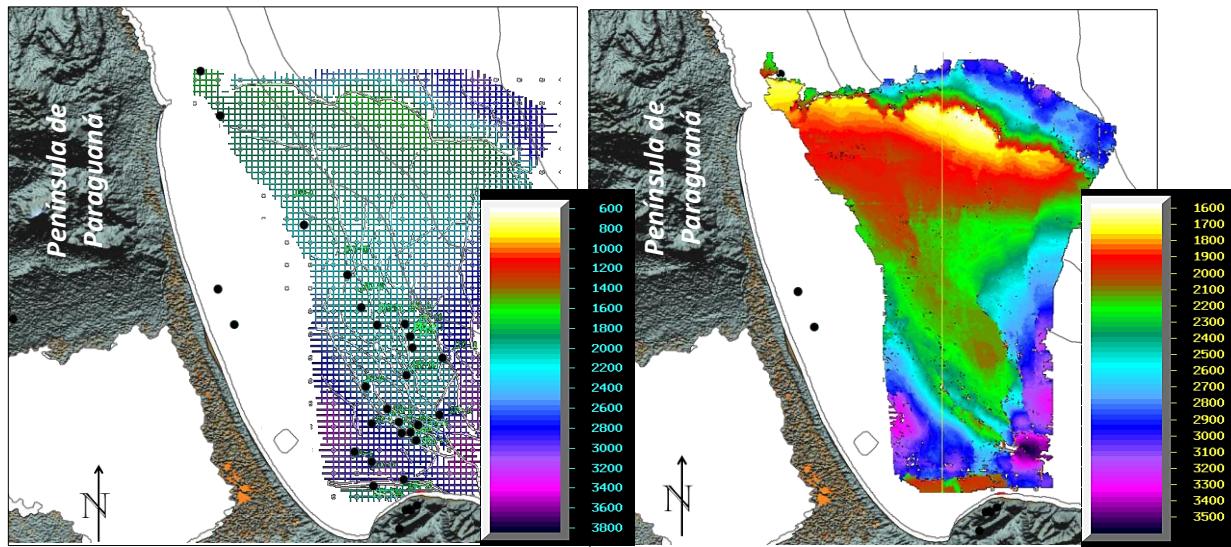


Figura N°29. Malla de interpretación y horizonte interpolado del tope del basamento, en tiempo.

3. Construcción de polígonos de fallas: se generaron polígonos de fallas (figuras N° 30, 44B, 45B, 51B) para cada uno de los horizontes sísmicos interpretados, a partir de los desplazamientos o saltos horizontales de las fallas llamados “*fault-heaves*”, los cuales se calcularon luego de la interpretación de los planos de fallas y de los diferentes horizontes.

Una vez culminados los polígonos de fallas, se realizó una comparación del modelo estructural local con el marco regional del área con la finalidad de corroborar estilos y eventos estructurales presentes.

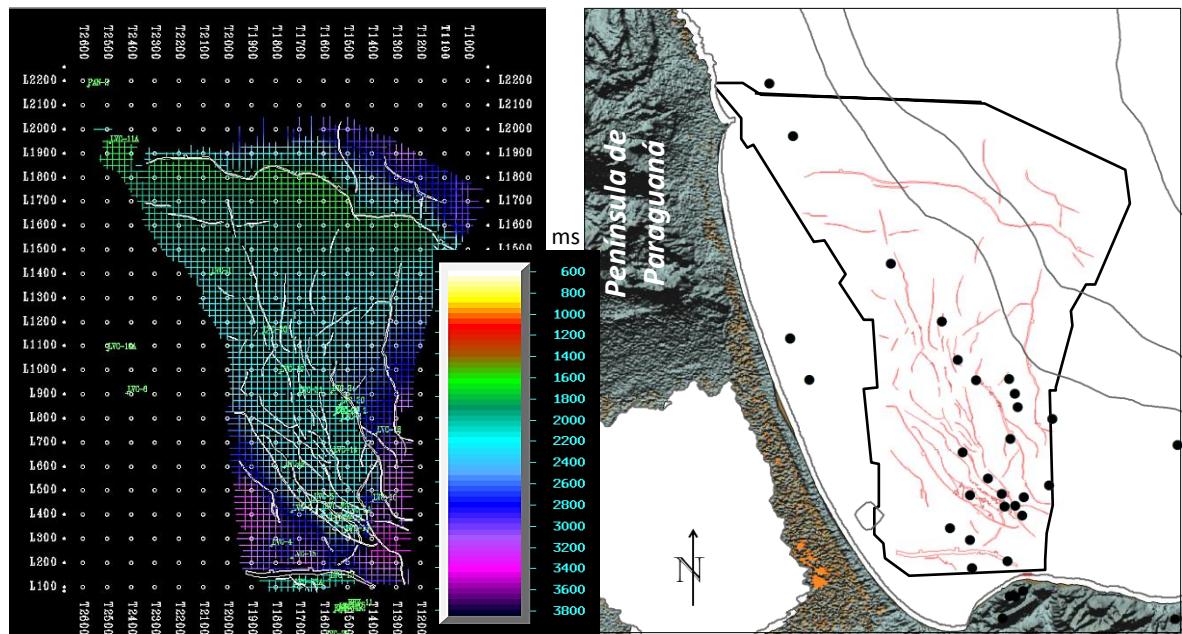


Figura N°30. Polígonos de fallas sobre la malla de interpretación en tiempo y ubicación relativa de los polígonos de fallas del tope del basamento.

4. Calibración sísmica: es una de las etapas más importantes en la interpretación de datos sísmicos, ya que permite establecer la relación entre los eventos geológicos interpretados en los pozos y los eventos geofísicos observados en la sísmica, a través de la generación de un sismograma sintético.

Para la realización de esta actividad se contó con la calibración sísmica de todos los pozos del área de estudio realizada por PDVSA - Estudios Integrados (2009) (pozos con checkshot, pozos con pseudocheckshot generados y pozos a los cuáles se les asignaron las tablas tiempo-profundidad de los pozos más cercanos), por lo que se tenían muestras representativas de velocidades en zonas estructuralmente distintas y en zonas donde no se presentan variaciones importantes de velocidades. No obstante, en esta investigación se realizó la calibración de tres pozos ubicados en diferentes estructuras, P-28, P-14 y P-15.

La ejecución de los sismogramas sintéticos de los tres pozos, se realizó en la aplicación SynTool de la plataforma OpenWorks (Suite de Landmark), utilizando la metodología de generación de sismogramas sintéticos de la aplicación SynTool, la cual se simplifica en el siguiente diagrama de flujo:

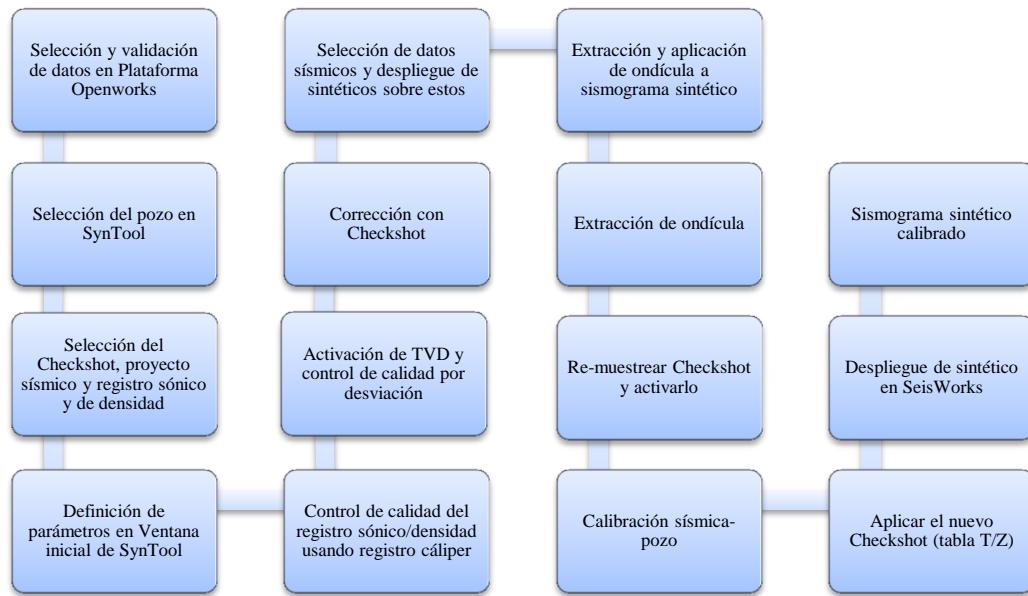


Figura N°31. Diagrama de flujo de la metodología usada para la generación de sismogramas sintéticos.
(Modificado de Brian Villamizar, Empresa Mixta Petrocarabobo, S.A, 2013).

En general, se generó un registro de impedancia acústica mediante el uso de las velocidades (registro sónico) y las densidades (registro de densidad), y de esta

manera se calculó la serie de reflectividad en la locación del pozo. Seguidamente se hizo convolucionar con una ondícula, extraída del volumen sísmico a través de diferentes tipos de filtros, para generar un sismograma sintético, el cual posteriormente simularía el comportamiento de la ondícula a través del subsuelo. Finalmente se hicieron variar parámetros como la fase, la frecuencia y el ajuste en tiempo, para conseguir una traza sintética, de la vertical sísmica sobre la que está situado el pozo, que mejor representara el comportamiento sísmico, es decir se asemeje a la traza original, relación que ésta representada por el coeficiente de correlación, el cual debe ser mayor al 60%, de forma tal que se genere una traza sintética lo más corregida y adaptada posible a los datos de pozo disponibles.

5. Modelo de velocidades y conversión a profundidad: se generó un modelo de velocidades promedio a partir de las tablas tiempo-profundidad generadas previamente por el personal de PDVSA, 2009- Estudios Integrados, para realizar la conversión a profundidad de los horizontes y fallas interpretadas en la presente investigación. Para ello se utilizó la aplicación TDQ de la plataforma OpenWorks (Suite de Landmark), aplicando el siguiente diagrama de flujo:

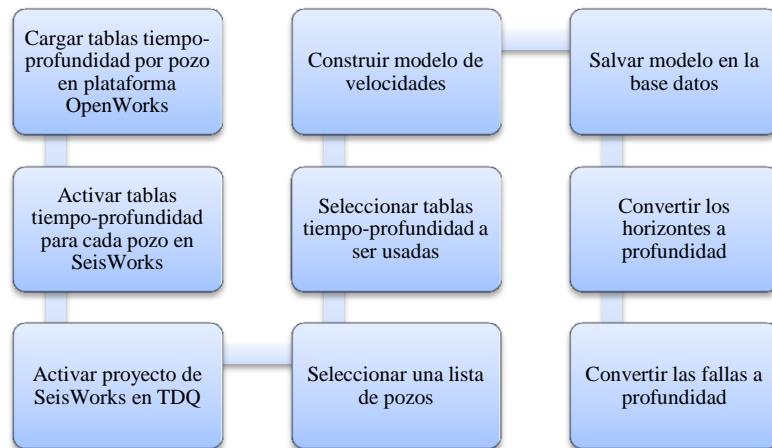


Figura N°32. Típico flujo de trabajo para construir modelos de velocidades basados en tablas tiempo-profundidad. (Modificado del Manual de Landmark, 2003).

En general, inicialmente se realizó un control de calidad en la aplicación SeisWorks de cada una de las tablas tiempo-profundidad a ser usadas, para evitar valores anómalos dentro del modelo de velocidades, una vez revisadas se activaron. Las tablas activadas aparecerán seleccionadas por default en la aplicación TDQ y a partir de éstas se construyó el modelo de velocidades.

Posteriormente, se realizó la conversión a profundidad de todas las fallas, horizontes y superficies interpretadas, a través del uso del modelo de velocidades generado, observando un buen cotejo entre el pozo y la sísmica.

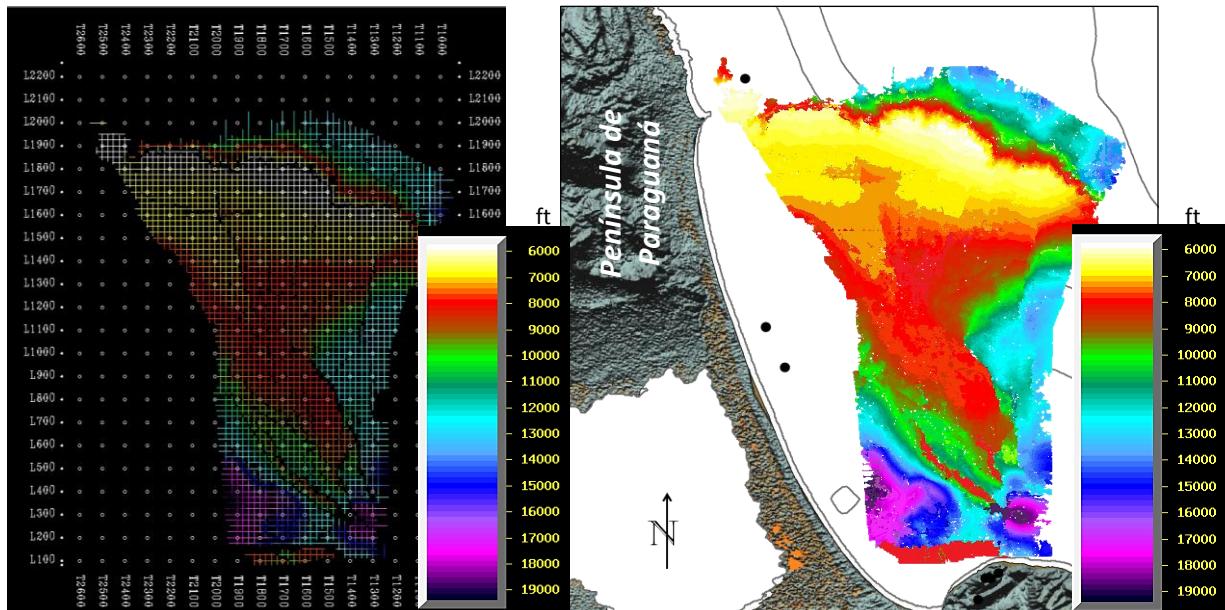


Figura N°33. Malla de interpretación y horizonte interpolado en profundidad del tope del basamento.

4.3 III ETAPA-INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS DE POZOS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE DE NÚCLEOS

En esta etapa se realizó el amarre núcleo-pozo, a partir de la información sedimentológica y bioestratigráfica, de igual manera se correlacionaron los pozos en base a las secuencias depositacionales definidas. Ésta etapa se llevó a cabo en la

aplicación StratWorks de la plataforma OpenWorks, Suite de Landmark. Se divide a su vez en varias actividades, como lo muestra el siguiente diagrama de flujo:

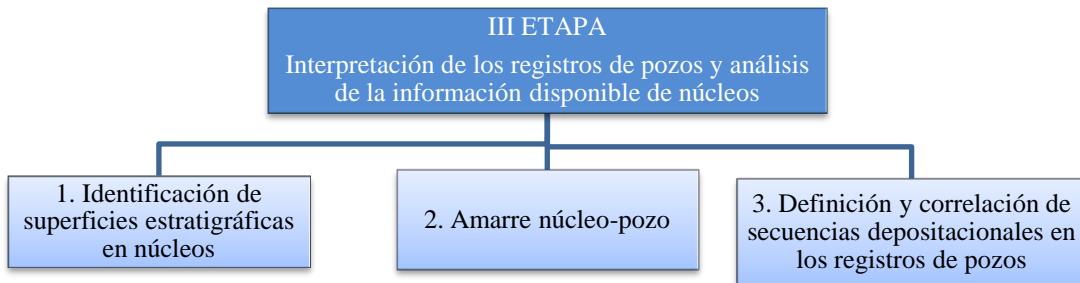


Figura N°34. Diagrama de flujo de la III etapa de estudio.

1. Identificación de superficies estratigráficas en núcleos: en esta actividad se contó con informes de petrografía, sedimentología y bioestratigrafía suministrados por la Gerencia de Exploración de PDVSA-Intevep. No obstante, durante el desarrollo de la actividad se tuvieron algunas limitaciones, como: el escaso registro litológico (1943,25' de núcleos recuperados), el pobre estado de preservación de muchos de los núcleos recuperados y la escasa y contradictoria información existente de los núcleos recuperados.

Sólo en los pozos P-14 y P-28 se tuvieron informes de petrografía. Los análisis con sedimentología se realizaron para el pozo P-28, ya que este es considerado el pozo clave, pues cuenta con el mejor y mayor registro de núcleos recuperados, 349,5' del total de núcleos (1943,25 pies); sin embargo, no es continuo, está repartido en ocho intervalos de núcleos.

Los datos bioestratigráficos se obtuvieron de las tablas bioestratigráficas de diferentes autores: Contreras, *et al.* (2010), Soto, *et al.* (2012) y BioStrat (2000), basadas en estudios de foraminíferos, nanoplancton y palinología en muestras

principalmente de núcleos (P-4, P-14, P-28) y en algunos casos de canal (P-16 y P-18).

Inicialmente se determinaron superficies de importancia estratigráfica (SB, MFS, entre otras) en los núcleos del pozo P-28 y luego estas fueron corroboradas por petrografía, lo que permitió establecer tendencias depositacionales (ciclos regresivos y transgresivos) y ambientes sedimentarios, que se traducen en cortejos depositacionales (sistemas encadenados).

2. Amarre núcleo-pozo: El amarre núcleo-pozo se realizó para el pozo P-28, ya que como se dijo anteriormente cuenta con la mayor cantidad de núcleos recuperados y además sus núcleos están seguidos, mientras que en los demás pozos se tienen intervalos muy pequeños que no alcanzan a llegar a los 20' y dispersos a lo largo del pozo, siendo difícil o casi imposible, establecer secuencias depositacionales en los núcleos.

3. Definición y correlación de secuencias depositacionales en los registros de pozos: esta actividad se llevó a cabo en la aplicación StratWorks de la plataforma OpenWorks, Suite de Landmark. Para la interpretación de los registros se tuvieron algunas limitaciones como: la no continuidad de las curvas de GR en algunos pozos y en el caso del Pozo P-7 no se cuenta con esta curva, también la heterogeneidad en los registros a nivel de respuesta electrográfica, por ejemplo los pozos P-12 y P-23 a pesar de que están cercanos y dentro de la misma estructura.

La definición de las secuencias depositacionales en los registros se realizó considerando que en el área se tienen siliciclastos, carbonatos puros y carbonatos de mezcla. No obstante, se utilizó la misma metodología aplicada para siliciclásticos, como se establece actualmente (Catuneanu, 2006), “los principios y conceptos de estratigrafía secuencial son independientes del tipo de ambiente depositacional dentro de una cuenca sedimentaria” (Schlager, 2005).

La correlación se realizó a través de las superficies estratigráficas interpretadas, las cuáles fueron límites de secuencia, superficies de máxima regresión y superficies de máxima inundación.

Inicialmente, la correlación se hizo para los pozos que se encontraban dentro de una misma estructura, y luego se extendió entre los demás pozos, con la finalidad de obtener correlaciones en diferentes direcciones y que atravesarán diferentes estructuras. Esto permitió conocer la dirección de sedimentación, la deposición de las secuencias estratigráficas en el área de estudio y las variaciones laterales entre los sistemas encadenados dentro de una misma secuencia.

4.4 IV ETAPA – INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA CON LA DE REGISTROS DE POZOS Y NÚCLEOS

En esta etapa se integró la interpretación sísmica y la de los registros de pozos, con la información sedimentológica y bioestratigráfica procedente de los núcleos, y de la geología regional, con la finalidad de definir las secuencias estratigráficas en el área de estudio, elaborar secciones de correlación y un cuadro cronoestratigráfico. Se subdivide a su vez en las siguientes actividades.



Figura N°35. Diagrama de flujo de la IV etapa de estudio.

1. Amarre sísmica-pozos: sobre las secciones sísmicas se desplegaron los pozos previamente calibrados, observándose la relación entre las superficies estratigráficas identificadas en los pozos y las secuencias sismo-estratigráficas definidas.

Se realizaron ajustes con estudios sedimentológicos para el establecimiento de sistemas depositacionales en cada una de las secuencias, y la datación de estas se hizo mediante la integración de la información bioestratigráfica existente.

Con la integración de estos datos se logró crear un marco cronoestratigráfico y una descripción de cada secuencia estratigráfica, así como una reconstrucción paleogeográfica del área de estudio.

2. Elaboración de secciones estratigráficas: para el desarrollo de esta actividad se utilizó la aplicación StratWorks de la plataforma OpenWorks, Suite de Landmark. Se elaboraron 3 secciones estratigráficas (Anexos A, B y C) en diferentes direcciones, utilizando criterios cronoestratigráficos derivados del análisis estratigráfico secuencial.

3. Elaboración de un cuadro cronoestratigráfico: se elaboró un cuadro cronoestratigráfico (ver Capítulo V, figura N° 76) para el área de estudio, con base en las secciones sísmicas e información bioestratigráfica y sedimentológica de varios pozos, con la finalidad de mostrar las variaciones de facies y ambientes depositacionales y los hiatus a lo largo de las discontinuidades, así como las equivalencias entre las unidades litoestratigráficas y las secuencias estratigráficas definidas en el presente estudio.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 PROCESAMIENTO DE LA BASE DE DATOS

5.1.1 Calidad de los datos sísmicos

En cuanto a la respuesta sísmica, en líneas generales el cubo presenta buena continuidad lateral de los reflectores, permitiendo interpretar fallas y horizontes sin mucha dificultad. Sin embargo, en zonas puntuales (figura N°36) se pierde la continuidad lateral, como por ejemplo en los bordes del cubo, donde se tienen fallas con alto ángulo, lo cual produce dispersión o difracción de la onda, también se observan artefactos en las líneas sísmicas producto del procesamiento.

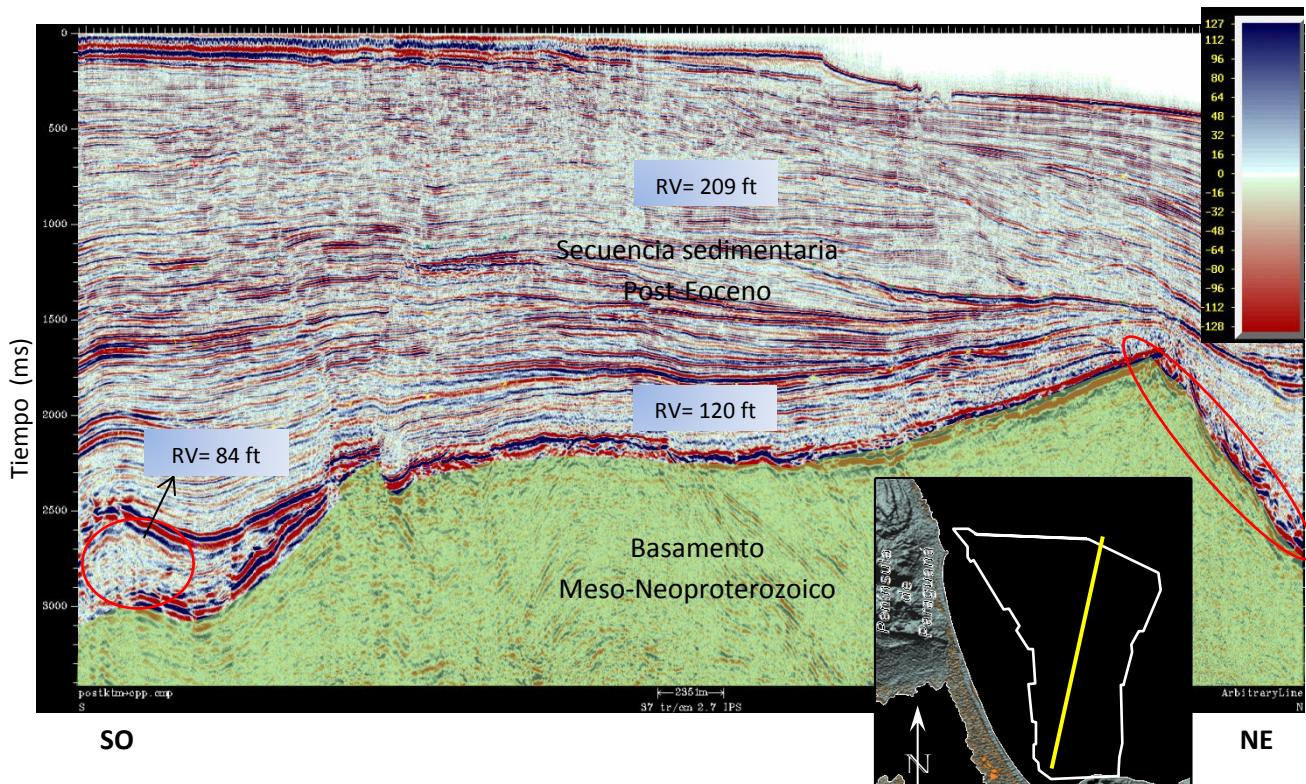


Figura N°36. Sección sísmica con dirección SO-NE, donde se observan artefactos y pérdida en la continuidad de los reflectores, RV= resolución sísmica vertical.

5.1.2 Resolución sísmica vertical

En el volumen sísmico se obtuvieron valores de frecuencia entre los 10 y 50 Hz, para una ventana de tiempo entre los 0 y 3500 ms, que es lo que abarca la secuencia sedimentaria. De igual manera, se obtuvieron las frecuencias dominantes para una sección de los pozos P-28, P-14 y P-15 (ver figura N°37), a partir de trazas y líneas ubicadas alrededor de cada uno de los pozos, obteniendo una frecuencia dominante de 10 Hz.

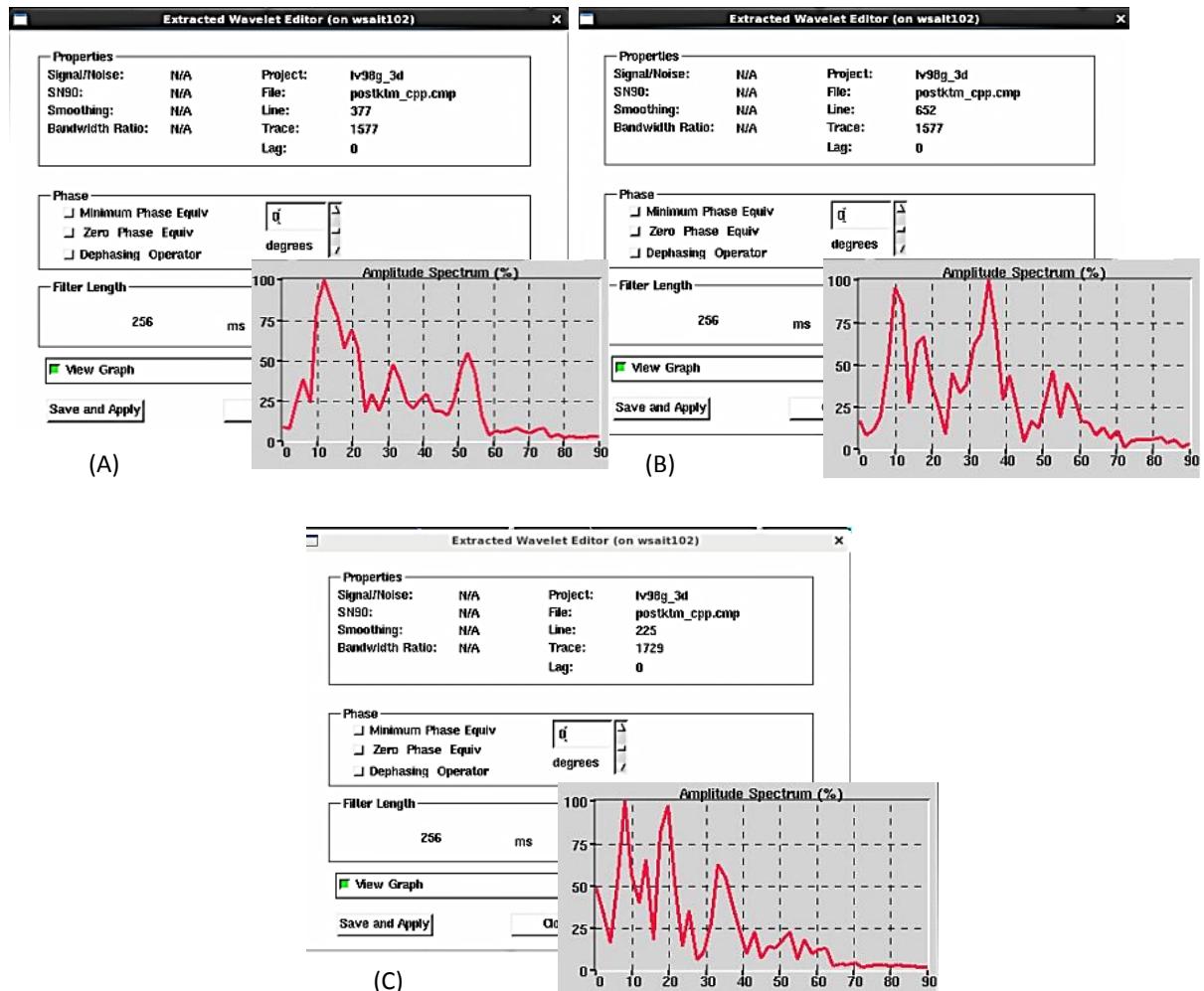


Figura N°37. Espectros de amplitud, donde se observa la frecuencia dominante para una sección. (A) Pozo P-28, (B) Pozo P-14, (C) Pozo P-15.

La resolución sísmica vertical se calculó para cada una de las secuencias estratigráficas identificadas. Para ello se seleccionaron los pozos P-17 y P-8A, ya que cortaban todas las secuencias y contaban con el registro sónico, a partir del cual se extrajeron las velocidades interválicas promedios.

La siguiente tabla N°6 muestra los datos y resultados obtenidos para cada uno de los pozos.

Tabla N°6. Cálculo de la resolución sísmica vertical.

POZO	Secuencia	Profundidad (ms)	Profundidad (ft)	Frecuencia dominante (Hz)	Vel. Int. Prom (ft/s)	Res. Sísm.Vert. Prom. (ft)
P-17	S1	1796-2132	6749-8341	23	11111,11	120,77
	S2	1414-1796	5119-6749	18	9090,91	126,26
	S3	1194-1414	4233-5119	13	7692,31	147,93
	S4	1062-1194	3755-4233	23	6993	76,01
	S5	898-1062	3189-3755	12	6451,61	134,41
P-8A	S1	2372-2560	9711-10800	22	10100,7	114,78
	S2	2004-2372	8105-9711	15	9200,12	153,33
	S3	1468-2004	5950-8105	11	8200,5	186,37
	S4	1160- 1468	4325-5950	19	6555,51	86,25
	S5	950-1160	2500-4325	10	5434,78	135,86

Según los resultados obtenidos, se tienen variaciones de la resolución sísmica vertical a un mismo nivel estratigráfico, lo cual es atribuible directamente a la atenuación de la frecuencia de la onda sísmica y al aumento de la velocidad interválica con la profundidad. Por lo anterior, se debe considerar esta situación a la hora de la interpretación de horizontes y definición de los yacimientos de hidrocarburos.

5.2 INTERPRETACIÓN SÍSMICA

5.2.1 Interpretación de fallas

Se identificaron aproximadamente 100 fallas normales, las cuales tienen una dirección predominante SE-NO, y en menor proporción se tienen fallas con dirección preferencial SO-NE, norte franco y este-oeste. Se tiene un conjunto de fallas maestras (figura N°38) con direcciones SE- NO y este-oeste, que afectan desde el basamento hasta el fondo marino, las cuales condicionaron la sedimentación en la cuenca y la generación de fallas secundarias. Las fallas este-oeste se extienden de un extremo a otro del cubo sísmico, por lo que no fue posible definir su extensión lateral, es evidente el carácter sinsedimentario de estas fallas, ya que dominan la configuración de los depósitos asociados.

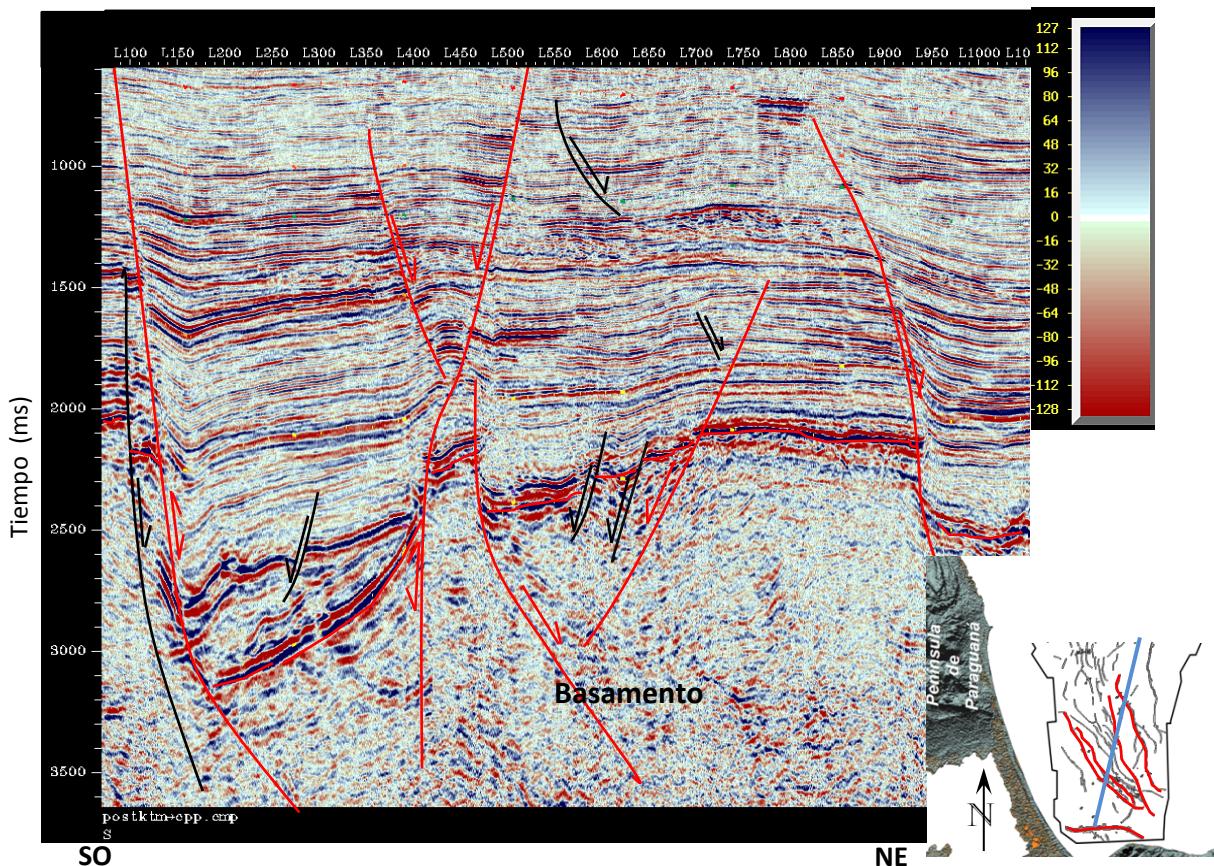


Figura N°38. Sección sísmica con dirección SO-NE, donde se muestra en color rojo el sistema de fallas maestras con dominio basal y en color negro las fallas secundarias.

Se observan altos buzamientos hasta la primera secuencia (Mioceno Inferior), esto debido al comportamiento rígido que presentan estas rocas en contraste a la cobertura sedimentaria, donde se observan bajos buzamientos, debido al carácter dúctil de estas rocas.

Es posible evidenciar que la mayoría de estas fallas maestras poseen dominio basal, relacionándolas principalmente al periodo de colapso extensional detrás de arco sufrido en el momento del origen de la Cuenca de Falcón, lo cual generó estructuras extensionales tipo graben y semi-graben. De igual manera, se tienen evidencias de una componente transcurrente dextral, en algunas de las fallas maestras, donde se tienen estructuras tipo “cola de caballo”, posiblemente relacionado a los esfuerzos transtensionales ocasionados por el desplazamiento entre la Placa Caribe respecto a la Placa Suramericana.

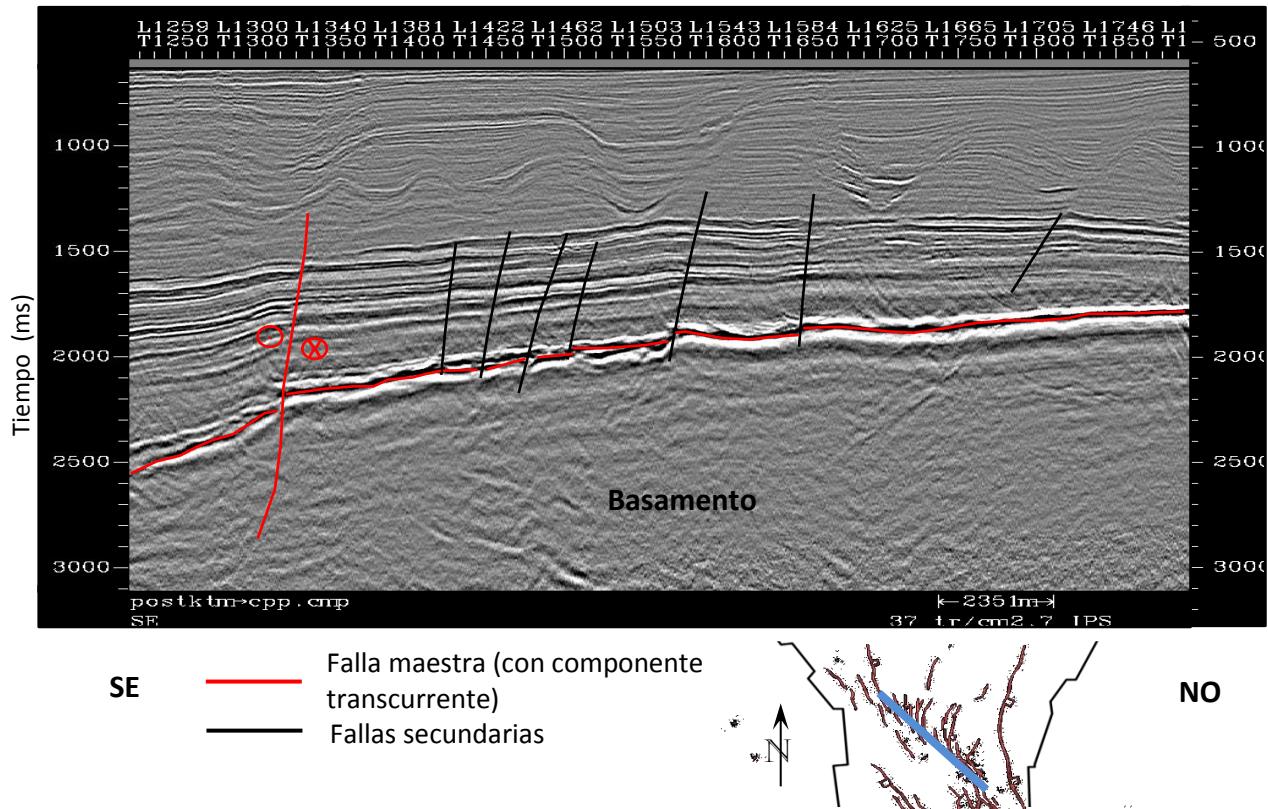


Figura N°39. Sección sísmica con dirección SE-NO, donde se muestra el sistema de fallas secundarias con configuración tipo “cola de caballo”.

5.2.2 Interpretación de secuencias sismo-estratigráficas

A partir de las terminaciones y configuración de las reflexiones sísmicas, se reconocieron 6 discontinuidades estratigráficas mayores, las cuales pueden ser seguidas a lo largo de todo el volumen sísmico (Figuras N° 40 y 41). Estas discontinuidades mayores marcan eventos importantes de deformación y modificación de la cuenca, por lo que definen los límites de las secuencias sismo-estratigráficas establecidas en el área de estudio. A nivel local, es posible reconocer otras discontinuidades de menor magnitud que permiten distinguir algunas variaciones en los sistemas depositacionales (Figura N° 42).

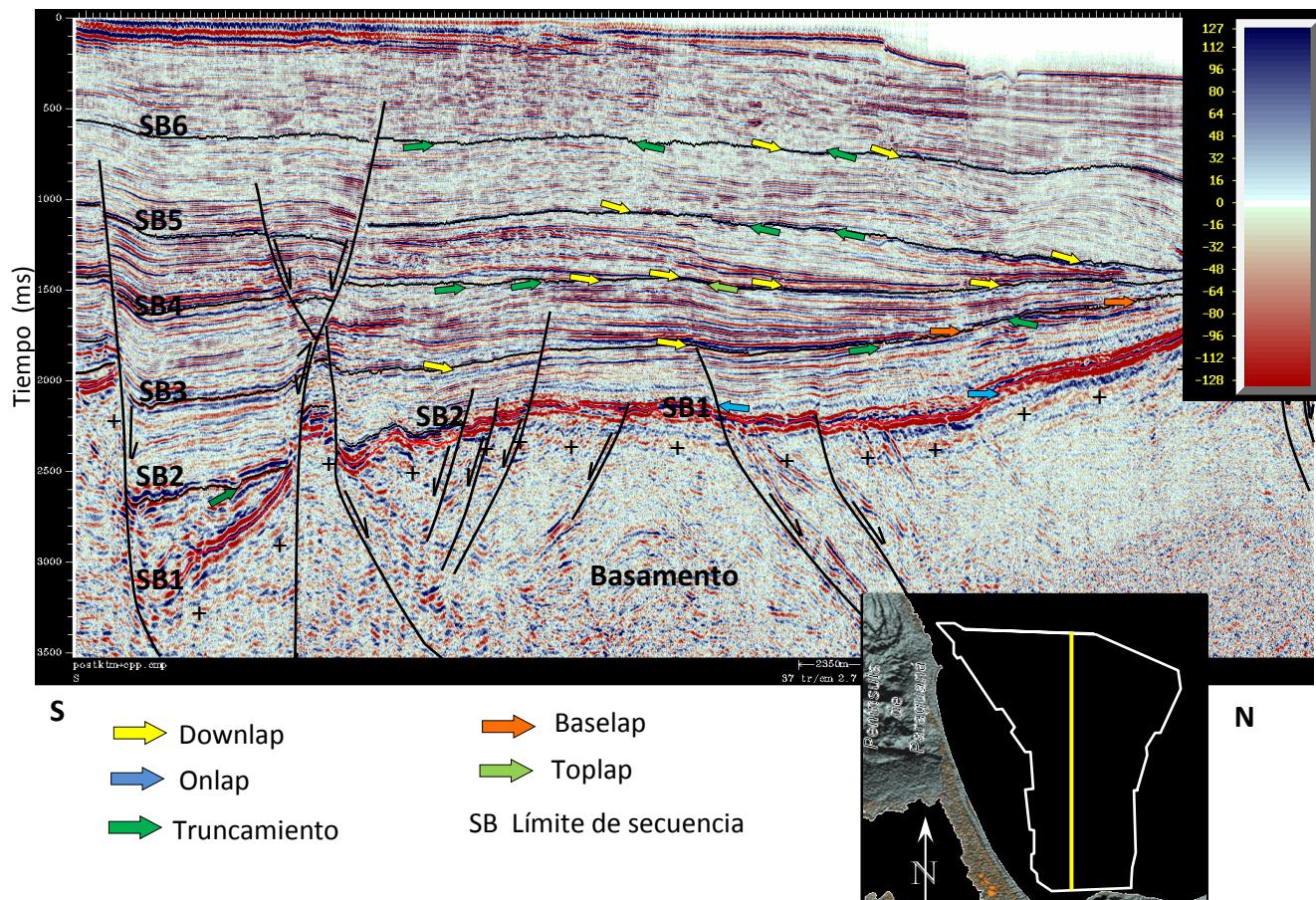


Figura N°40. Sección sísmica orientada norte-sur, donde se muestran las discontinuidades estratigráficas mayores, en el área de La Ensenada de La Vela.

El límite de la secuencia 1 (SB1), está representado por la inconformidad de la sucesión sedimentaria, depositada sobre el basamento principalmente metamórfico; mientras que los demás límites de secuencia (SB2, SB3, SB4, SB5 y SB6) están relacionados a otras discontinuidades estratigráficas como discordancias y superficies de erosión subaérea (SU) junto con su superficie de conformidad correlativa (CC).

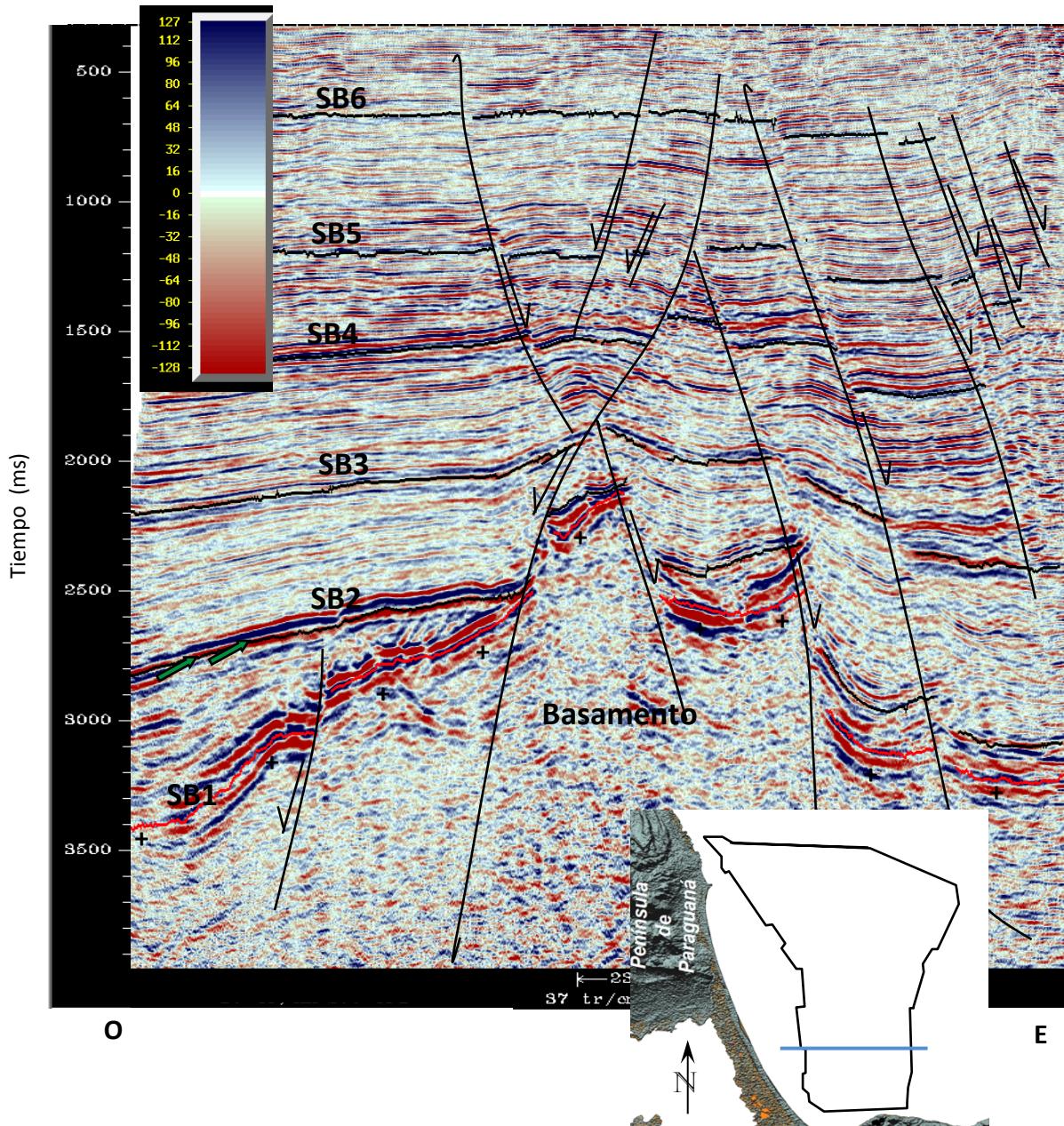


Figura N°41. Sección sísmica orientada este-oeste, donde se muestran las discontinuidades estratigráficas mayores, en el área de La Ensenada de La Vela.

Las discordancias poseen carácter angular generalmente hacia los altos estructurales, mientras que hacia los depocentros la relación se hace más concordante, a partir de ellas y de sus superficies correlativas se establecieron las relaciones estratigráficas existentes dentro de la cuenca.

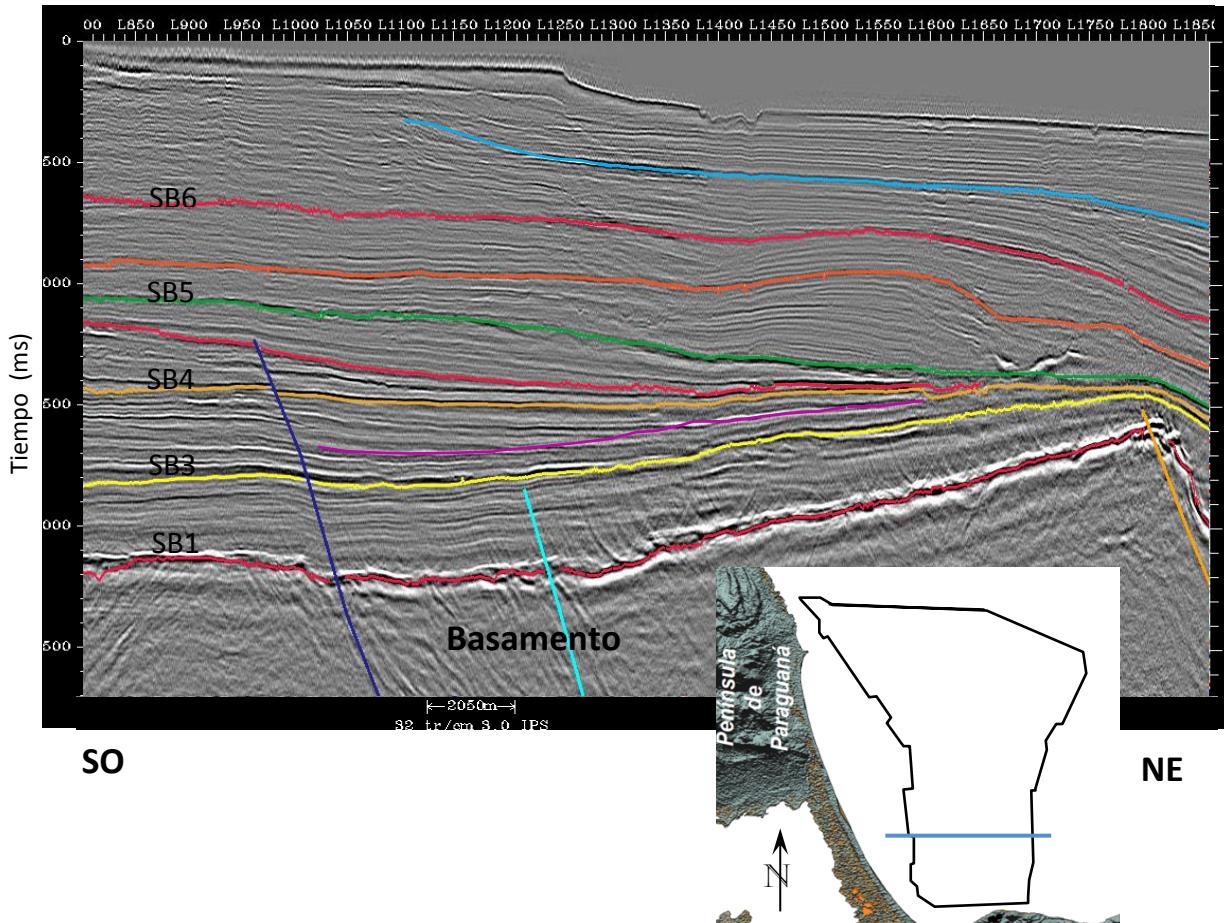


Figura N°42. Sección sísmica orientada SO-NE, donde se muestran las discordancias locales.

Los tipos de terminaciones de las reflexiones sísmicas, que definen las discontinuidades estratigráficas presentes en el área de La Ensenada de La Vela, son principalmente de truncamiento erosivo, solapamiento (*onlap*) y cuña de progradación (*downlap*), las cuales pueden ser apreciadas en la figura N°43, se muestran estas terminaciones. Su identificación en la sísmica es generalmente clara, se observan los truncamientos como discordancias angulares en la cuenca, y el

solapamiento como la relación de prolongación de los reflectores sobre los altos estructurales y zonas deformadas.

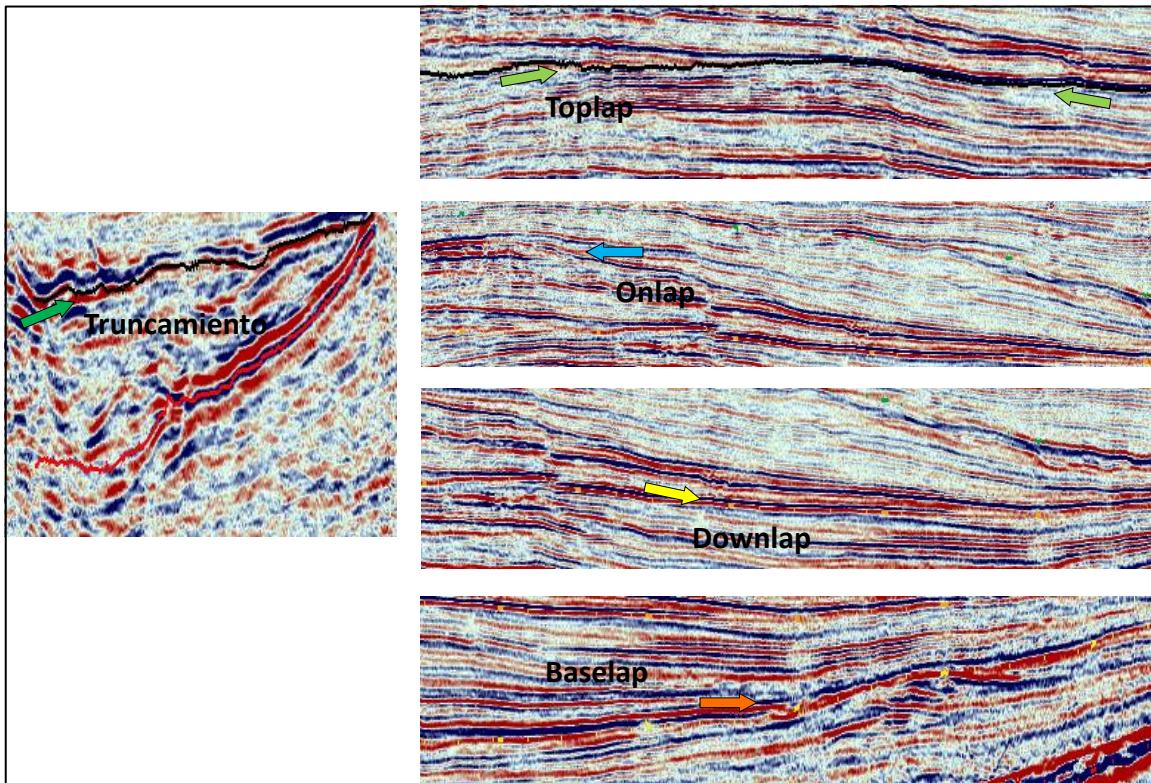


Figura N°43. Tipos de terminaciones de las reflexiones sísmicas existentes en el área de la Ensenada de La Vela.

Como ya se mencionó anteriormente, las discontinuidades interpretadas representan los límites de las secuencias sismo-estratigráficas, cuyos depósitos sedimentarios se comportan como variables en el espacio y en el tiempo, y responden principalmente a eventos tectónicos y en menor proporción a cambios eustáticos, como factores modificadores de su disposición en el área. Estas secuencias expresan la historia geológica del relleno sedimentario de la Ensenada de La Vela y su relación con la evolución geodinámica de la Cuenca de Falcón.

Sobre la base de las consideraciones anteriormente señaladas, en el área de la Ensenada de La Vela, se definieron cinco secuencias sismo-estratigráficas mayores

apoyadas en la identificación de discordancias regionales, sus características sísmicas, y su relación geométrica, las cuales se extienden a lo largo de todo el área de estudio (ver anexo D). Las secuencias definidas en esta investigación, suprayacen un basamento acústico de edad Meso-Neoproterozoico (Baquero *et al.*, 2011).

Basamento acústico: es la unidad infrayacente a las secuencias sismo-estratigráficas, siendo su tope la primera discontinuidad estratigráfica interpretada, la cual marca el comienzo de la sedimentación en el área de estudio y corresponde a un reflector positivo en la sísmica, con alta amplitud y buena continuidad lateral (figura N°44); no obstante, en algunos zonas se pierde la continuidad lateral de éste, debido a las limitaciones de la resolución sísmica vertical. Se caracteriza por presentar un fuerte contraste de impedancia y un patrón de configuración caótico en los reflectores, observándose también lineamientos de estos, relacionados al metamorfismo de alto grado que caracteriza esta unidad (Mendi *et al.*, 2005; Grande *et al.*, 2009, Grande, 2012).

El basamento se ubica por debajo de los 2 segundos aproximadamente, hasta el límite del tiempo de adquisición de la sísmica, de 6 segundos. Se observa un comportamiento estructural en bloques, altamente fracturado, algunas de estas fallas con carácter sinsedimentario (fallas este-oeste), las cuales coinciden con la dirección de las fallas La Vela y Adícora, presentadas por Cabrera (1985); un grupo con expresión hasta el lecho marino y el otro con expresión solo hasta las secuencias inferiores, estas fallas se asocian al colapso extensional que sufrió la cuenca y algunas estuvieron activas debido a los efectos transtensivos, posiblemente relacionados a los movimientos de las fallas de Oca y San Sebastián. En la figura N°45, se visualiza el carácter tectónico del basamento, siendo éste el responsable del control tectonoestratigráfico del área.

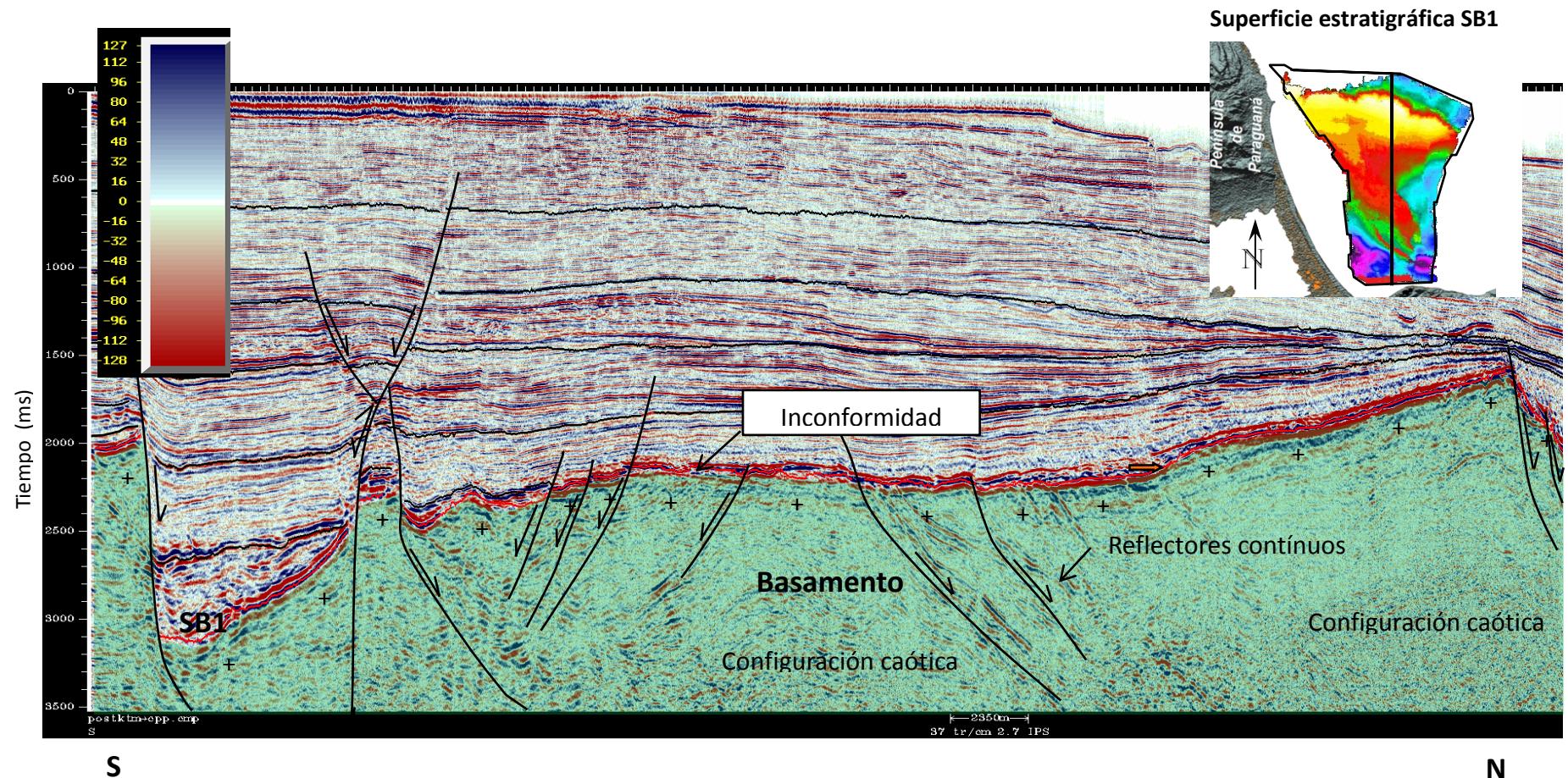


Figura N° 44. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas del basamento acústico.

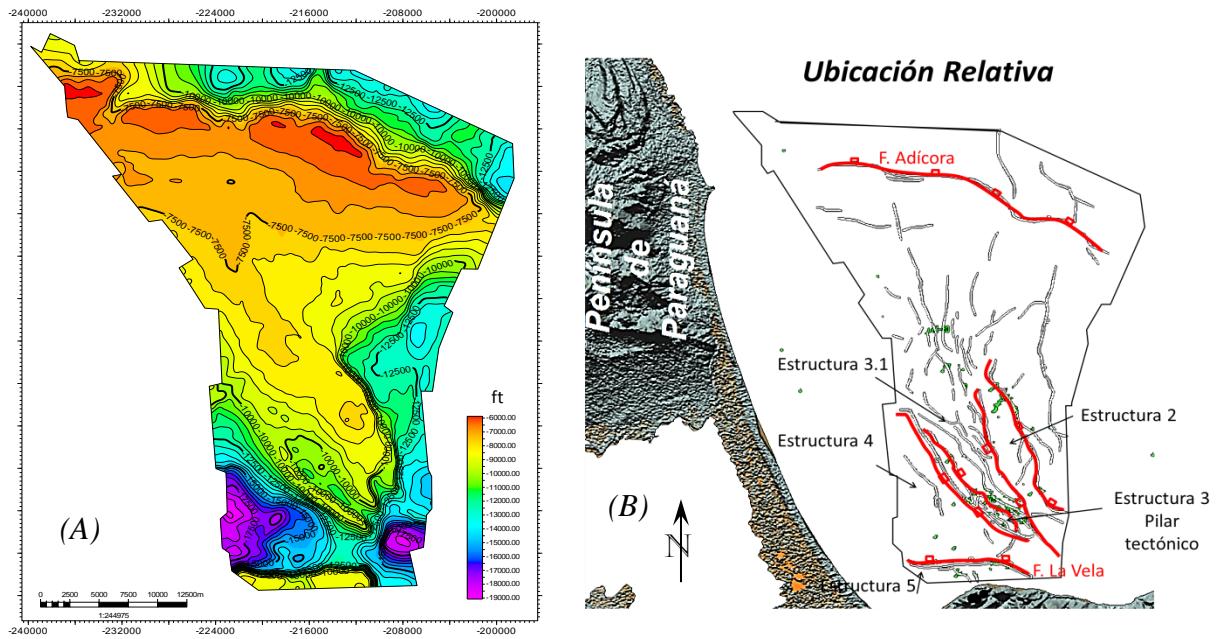
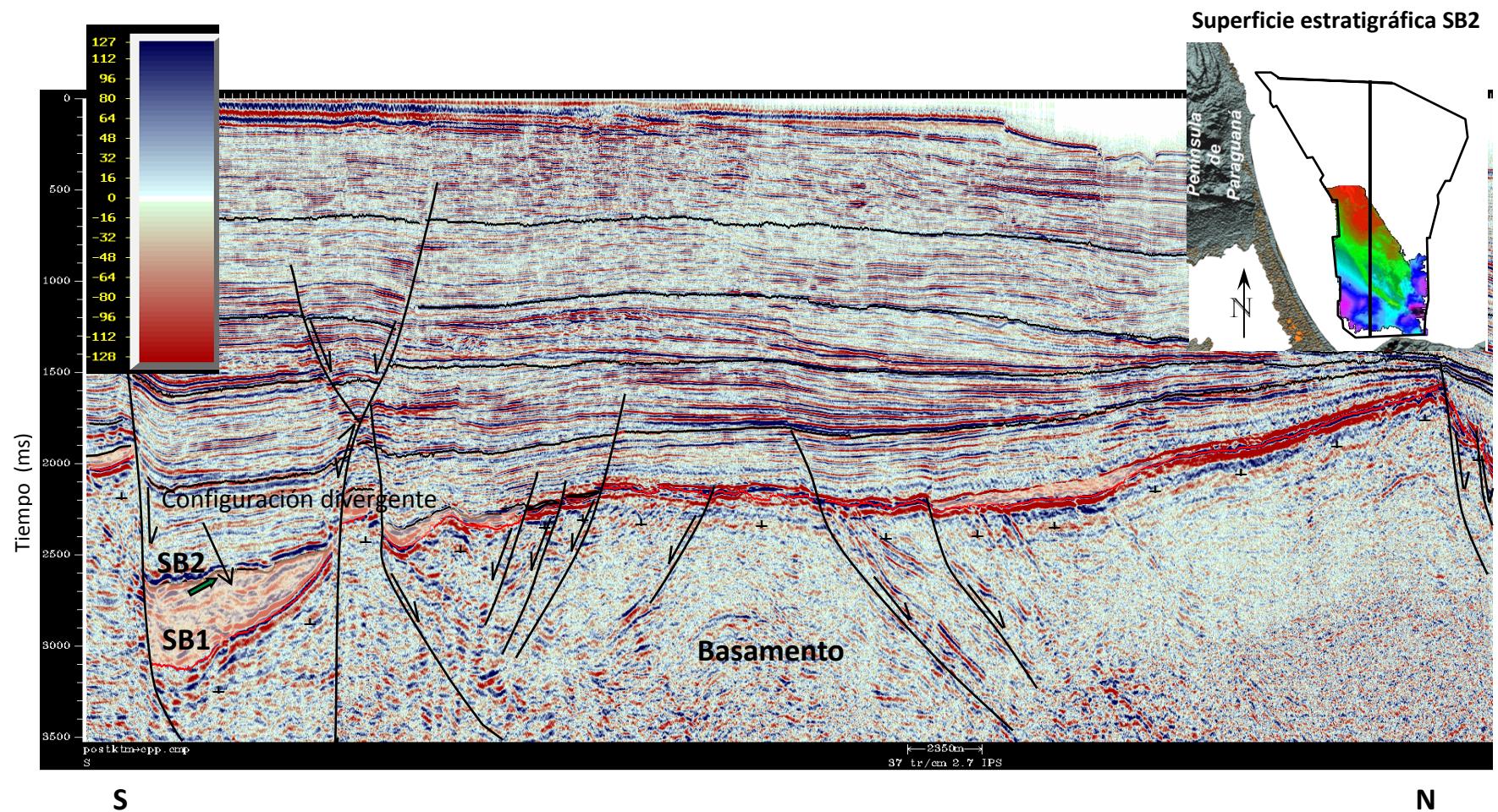


Figura N° 45. (A) Superficie del tope del basamento en profundidad (SB1), donde se muestran los altos y bajos estructurales. (B) Ubicación de las fallas que cortan el basamento, en color rojo las fallas maestras.

Secuencia sismo-estratigráfica “1”: su límite inferior está definido por el tope del basamento, donde se presentan terminaciones tipo onlap contra este y truncamiento erosional por debajo del límite de secuencia 2 (SB2), siendo ésta superficie su límite superior. Se caracteriza por presentar un patrón de configuración divergente, característico de la secuencias sinsedimentarias; poca continuidad de los reflectores y de alta a mediana amplitud (ver figura N°46).

Es una secuencia altamente influenciada por la tectónica, principalmente por las fallas con dirección este-oeste, ubicadas al sur y norte del cubo sísmico. Se acuña contra el alto de basamento, correspondiente a la estructura 2 donde se ubican los pozos P-29, P-2 y P-24, perdiendo espesor hacia el noreste del cubo sísmico, hasta llegar a coincidir los dos límites de secuencia con un mismo reflector, lo cual conlleva a que el mayor desarrollo de estos depósitos se tengan en la depresión



estructural correspondiente a la estructura 4, donde se ubican los pozos P-15, P-4 y P-7.

No se descarta la posibilidad de la existencia de esta secuencia al norte de La Ensenada de La Vela, lo cual se hace imposible interpretar por encontrarse al borde del cubo sísmico, no obstante en las interpretaciones de una sección sísmica presentada por Gorney *et al.* (2005), se muestra la presencia de esta secuencia, al norte de la falla este-oeste, la cual limita al sur a una estructura tipo graben que corresponde a la Cuenca de Paraguaná (ver figura N°47). De igual manera, se tienen depósitos de esta secuencia en la depresión generada por la falla normal, con dirección NO-SE, que limita al norte a la estructura 2, donde se ubica el pozo P-18.

Por lo anterior, se deduce que se tienen dos sistemas de fallas normales que condicionaron la sedimentación de la secuencia “1” en la Ensenada de La Vela, un primer sistema con dirección este-oeste y el otro con dirección NO-SE.

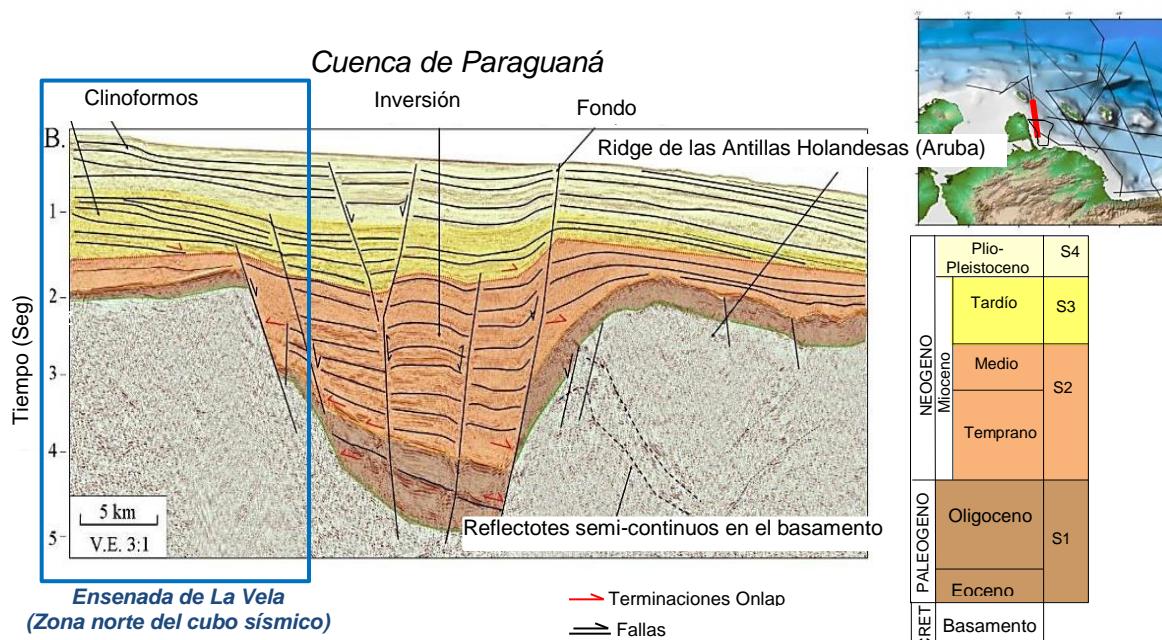


Figura N°47. Sección sísmica donde se muestra la existencia de la secuencia sismo-estratigráfica “1” (S1), en la depresión al norte del cubo sísmico, zona que corresponde a la Cuenca de Paraguaná. Sin embargo, la secuencia “1” (S1) de edad Eoceno-Oligoceno resaltada en color marrón, para la presente investigación es de edad Oligoceno-Mioceno Temprano en el área de La Ensenada de La Vela. En la parte superior mapa donde se muestra en color rojo la ubicación relativa de la sección sísmica.

(Tomado de Gorney *et al.*, 2005).

Secuencia sismo-estratigráfica “2”: Se caracteriza por un patrón de configuración paralelo de reflectores, bastante continuos y con amplitudes variables, altas hacia la base y más bajas hacia el tope. Las terminaciones de los reflectores son de tipo onlap, directamente contra el SB1 en el bloque levantado al norte o sobre el SB2 hacia el sur, y su límite superior está definido por el SB3, teniéndose toplaps y truncamiento de bajo ángulo por debajo de este, particularmente visibles en la parte norte del cubo sísmico, indicando que la secuencia “2” se encuentra parcialmente erosionada (ver figura N°48).

La secuencia se extiende a lo largo de todo el volumen sísmico, al igual que la secuencia “1”, se observa adelgazamiento en el espesor hacia el norte, y en el alto del basamento, correspondiente a la estructura 5 donde se ubican los pozos P-12 y P-23, lo cual se asocia a las fallas con dirección este-oeste ubicadas al norte y sur del cubo sísmico.

En la zona norte del área de estudio, se tiene el mayor espesor de la secuencia (ver figura N°49), controlado por la falla normal este-oeste del norte del cubo sísmico, donde se observan reflectores de poca continuidad y baja amplitud, en contraste con las características sísmicas que presenta esta secuencia en la mayoría del área.

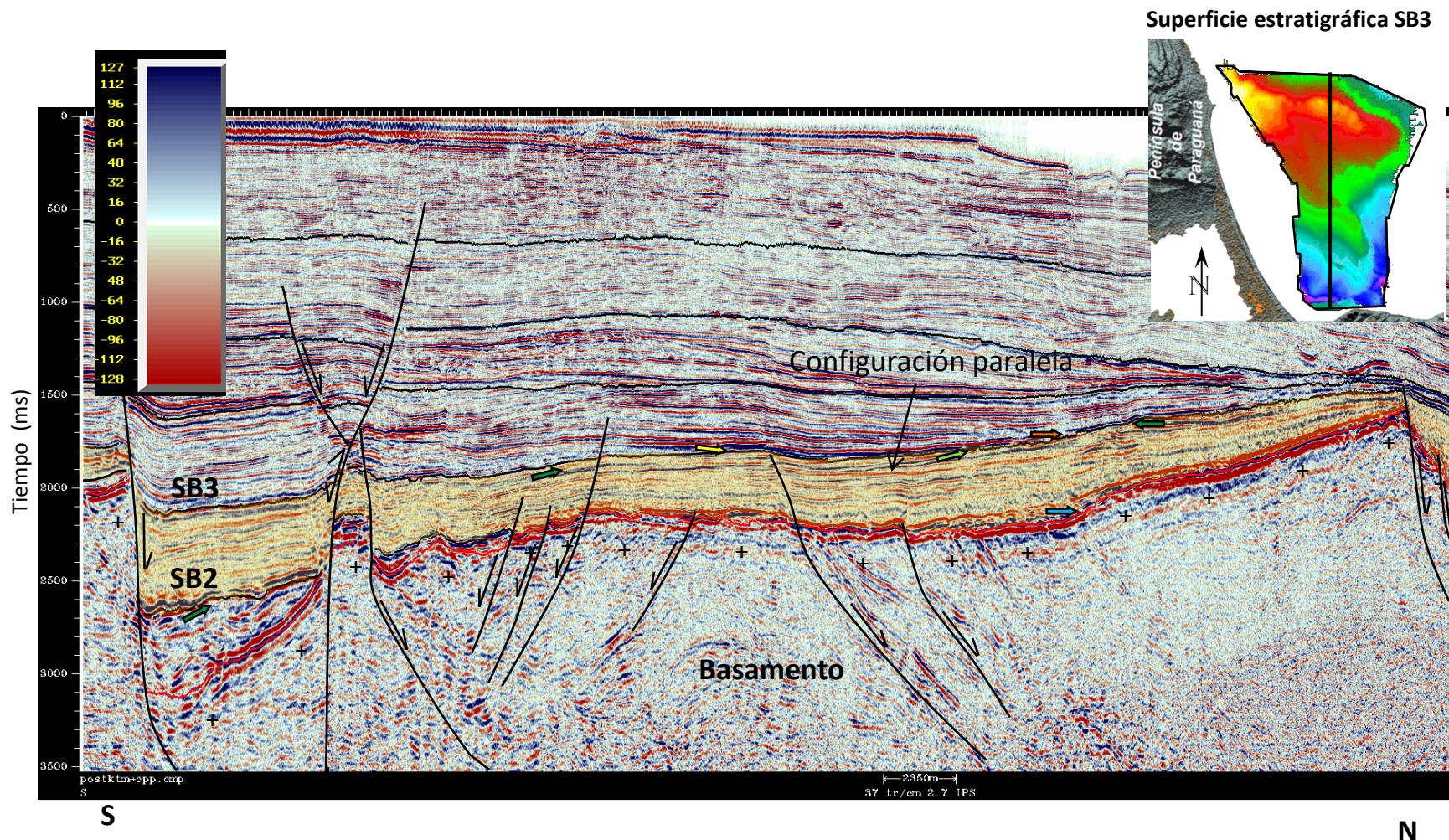


Figura N°48. Sección sísmica con dirección sur-norte donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “2” (S2)

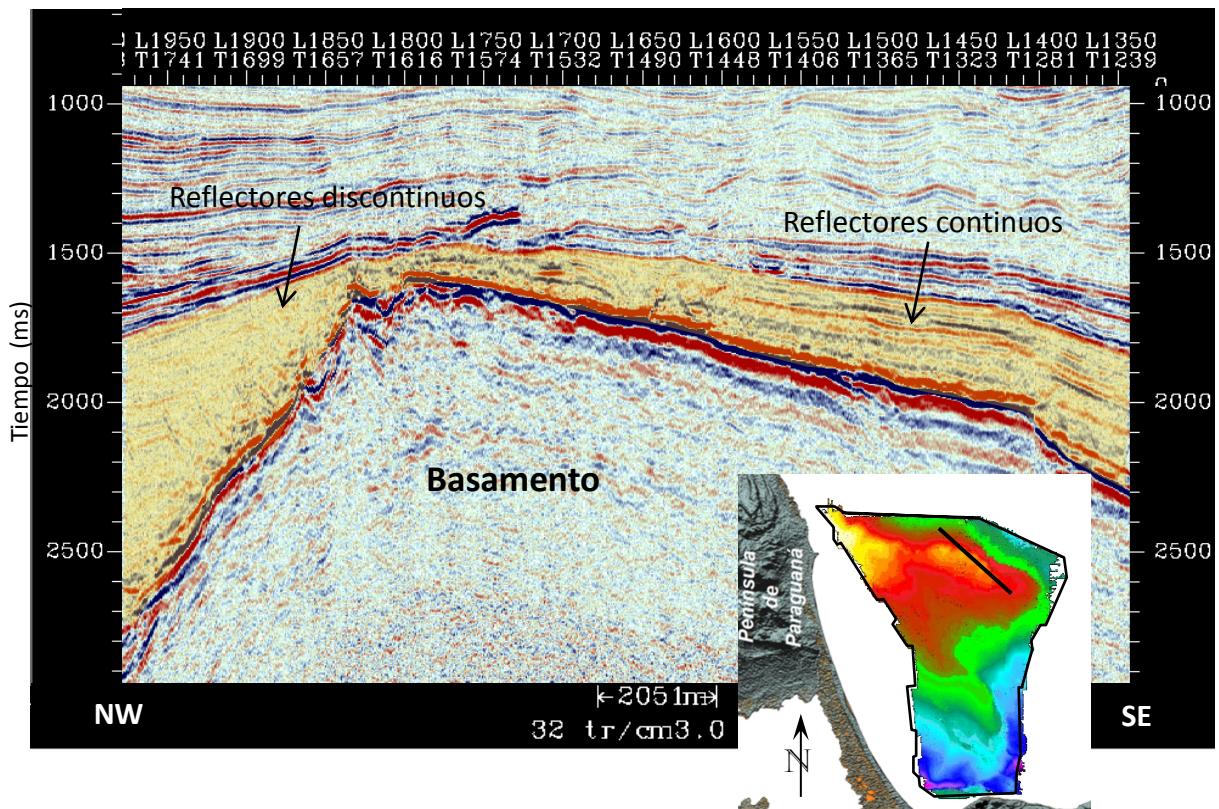


Figura N°49. Sección sísmica arbitraria SE-NO donde se muestra el mayor espesor de la secuencia sismo-estratigráfica “2” (S2), al norte del cubo sísmico, depresión que corresponde a la estructura tipo graben de la Cuenca de Paraguaná.

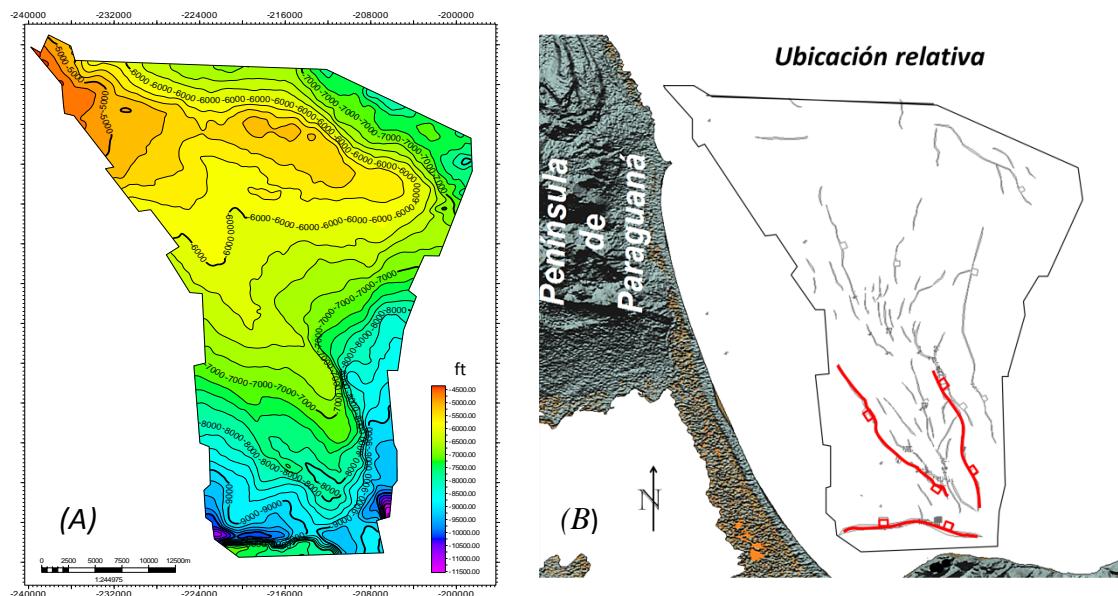


Figura N°50. (A) Superficie del SB3 en profundidad. (B) Ubicación de las fallas que cortan la secuencia sismoestratigráfica “2”, en color rojo las fallas maestras.

Secuencia sismo-estratigráfica “3”: Se ubica entre los 1,5 y 2 segundos, representa un sistema depositacional progradante, con geometría oblícua y buzamiento hacia el NE, lo cual indica la dirección de transporte. Su límite superior (SB4) lo define un fuerte reflector de amplitud negativa, donde se tienen terminaciones tipo downlap por encima y truncamiento por debajo de este (figura N°51). Por su parte el límite inferior, está definido por terminaciones tipo downlap y hacia el norte del área terminaciones tipo baselap, se le asigna este nombre, ya que se presume que originalmente se depositaron tipo downlap, pero actualmente se muestran como onlaps, debido al basculamiento de la secuencia, producto de la reactivación de la falla este-oeste del norte del cubo sísmico. El carácter de los reflectores es variable, se pueden agrupar en moderada amplitud y buena continuidad y por lo general presentan un patrón de configuración de divergente a sub-paralelo.

La secuencia marca un evento tectónico importante, que dá como respuesta el comienzo de una deposición regresiva a nivel regional, posiblemente relacionado al levantamiento andino, responsable de la inversión de la Cuenca de Falcón. Se extiende a lo largo de todo el cubo sísmico, y disminuye de espesor hacia el norte, se caracteriza por presentar fuertes reflexiones y algunas discontinuidades internas, definidas por truncaciones y solapamientos.

Superficie estratigráfica SB4

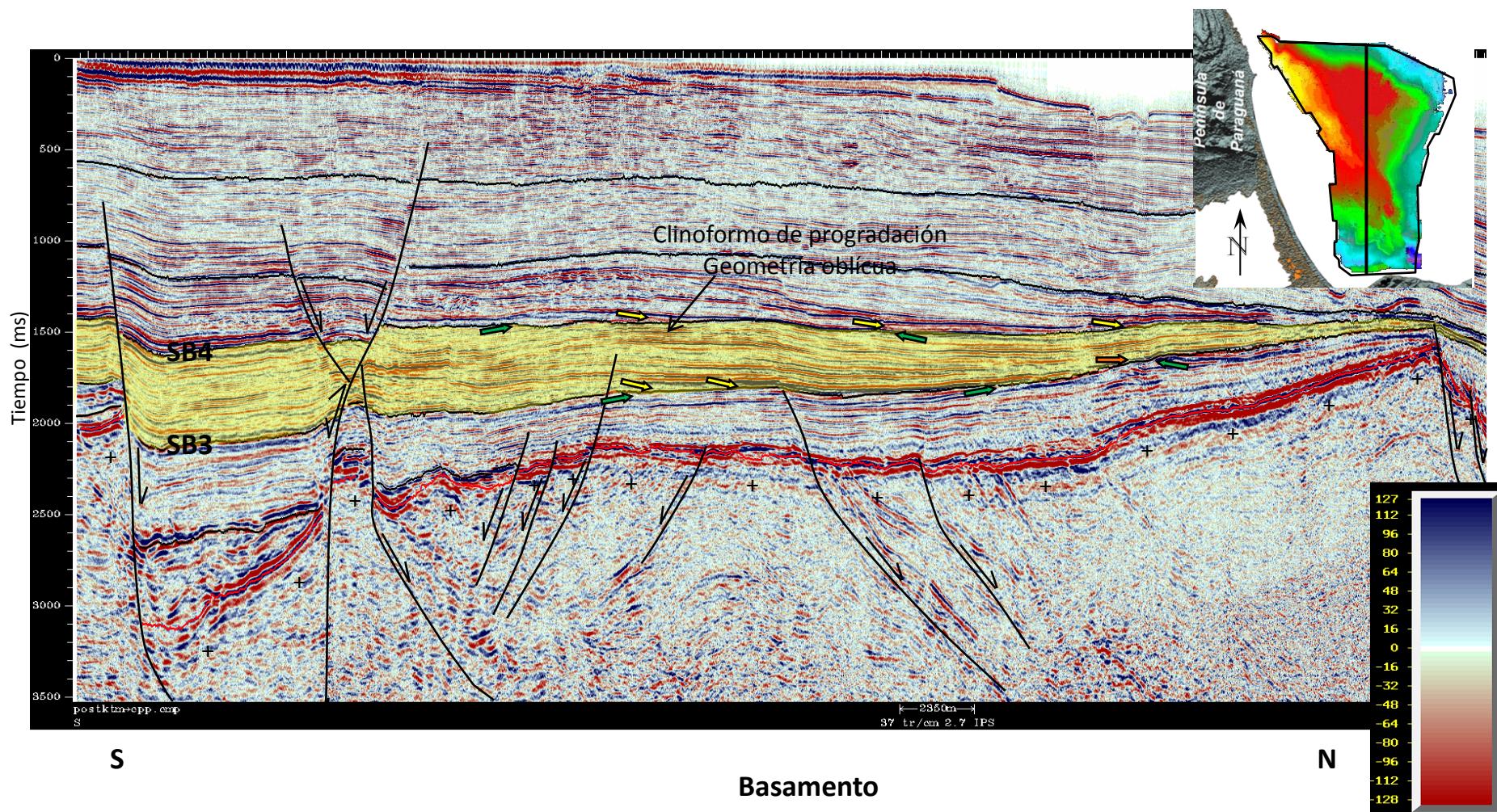


Figura N°51. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “3” (S3).

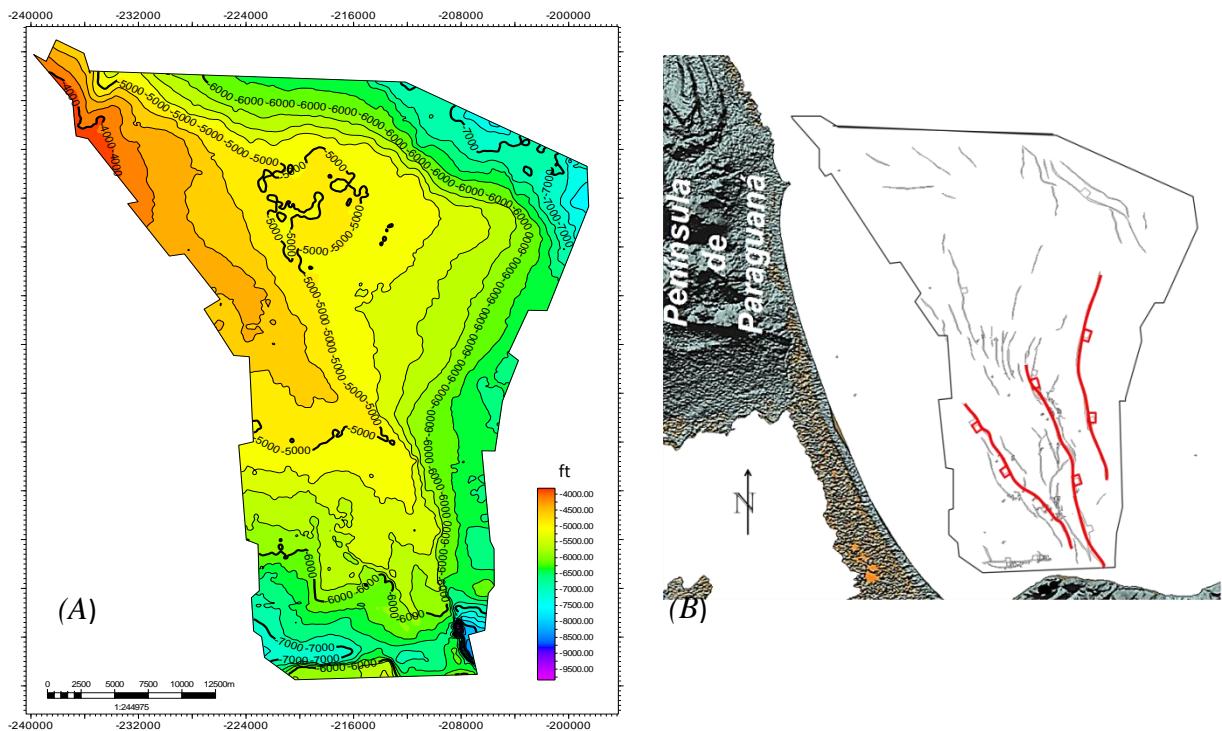


Figura N°52. (A) Superficie del SB4 en profundidad. (B) Ubicación de las fallas que cortan la secuencia sismoestratigráfica “3”, en color rojo las fallas maestras.

Secuencia sismo-estratigráfica “4”: abarca 1 segundo en la sísmica, y se extiende por todo el volumen sísmico, representando otro sistema depositacional progradante con una geometría compleja, de sigmoidal a oblicuo (ver figura N°53). Su límite superior lo representa el SB5, definido por terminaciones tipo downlap por arriba y truncamiento por debajo. Presenta un carácter sísmico de poca continuidad y baja amplitud, con un patrón difuso, de sub-paralelo a divergente hacia el norte, en contraste con el sur, donde se presentan reflectores bastante continuos y con un patrón paralelo.

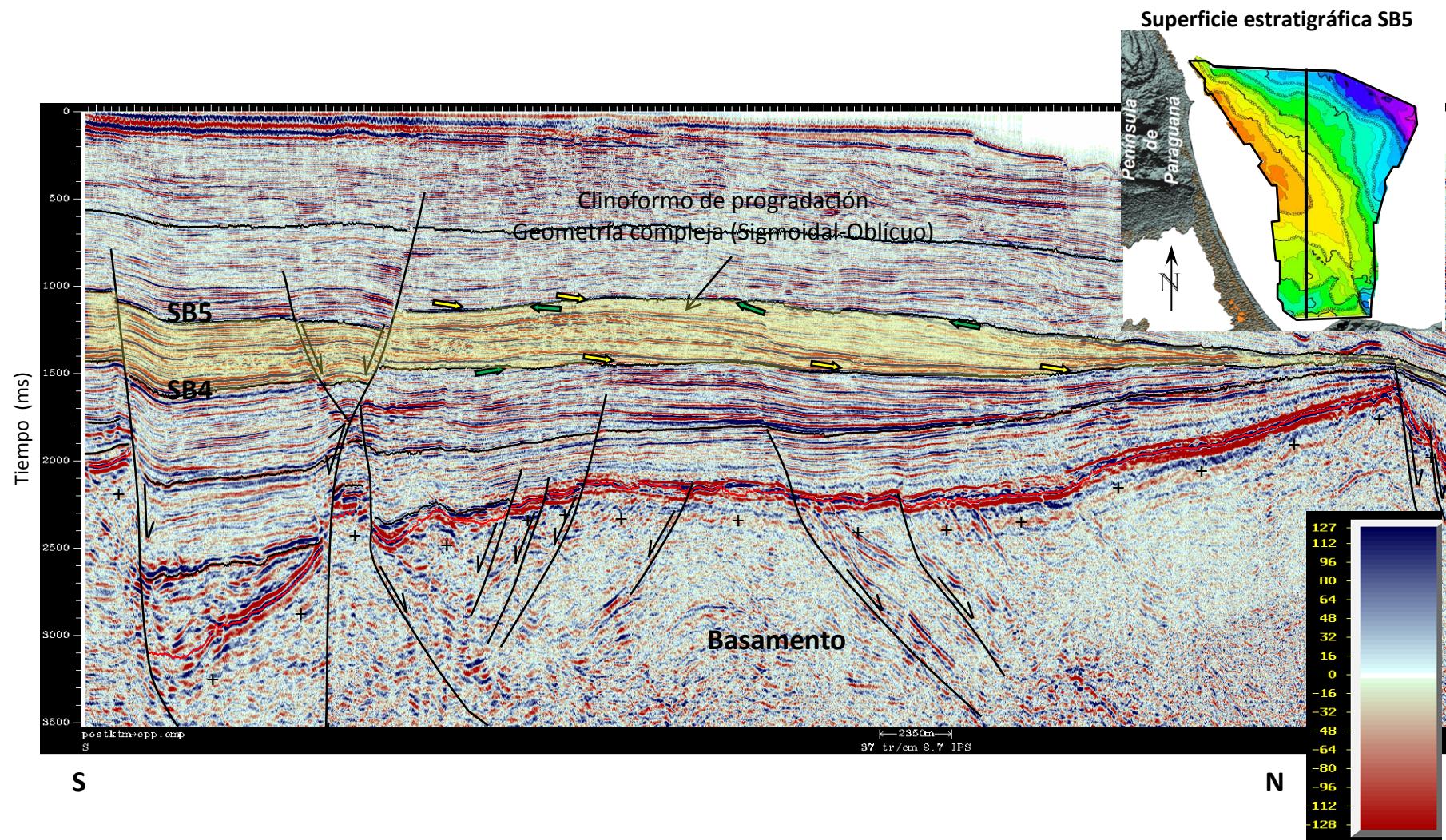


Figura N°53. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “4” (S4).

Dentro de la secuencia, se muestran discontinuidades menores, caracterizadas por terminaciones tipo downlap y onlap, asociadas a los sistemas depositacionales. Esta secuencia al igual que la secuencia anterior disminuye su espesor hacia el norte, y su geometría (clinoformo progradante) evidencia que la dirección de transporte era en sentido SO-NE.

También se observan algunos canales y/o cañones submarinos y la presencia de un posible abanico susbmarino de gran dimensión al NO del cubo sísmico (ver figura N°54), caracterizado morfológicamente por una geometría monticulada o convexa. En la sección transversal se observa erosión en la base del abanico y debido a la baja resolución sísmica, no se observan los detalles internos del monticulado. Posiblemente éste abanico es causado por los grandes flujos de masas, transportados por canales submarinos, asociados al levantamiento de los Andes venezolanos y por ende a una caída relativa del nivel del mar, durante un sistema de nivel bajo (LST).

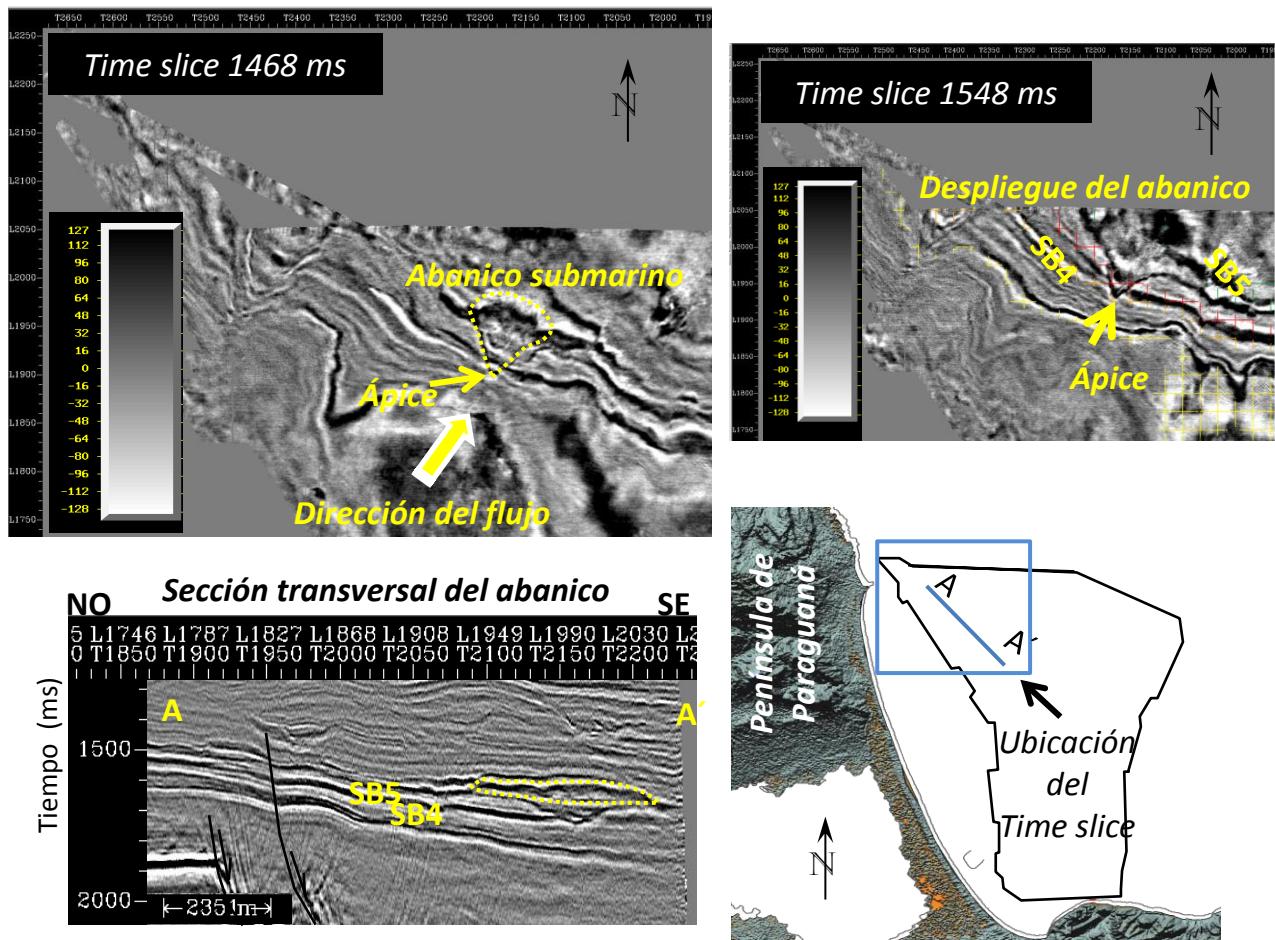


Figura N°54. Abanico submarino, ubicado al norte del cubo sísmico, dentro de la secuencia sismo-estratigráfica “4”.

Secuencia sismo-estratigráfica “5”: corresponde a la última secuencia sismo-estratigráfica interpretada en esta investigación, se ubica entre los 0,5 y 1 segundo, constituye una secuencia bastante espesa, asociada a los clinoformos progradantes anteriores, pero con geometría sigmoidal, sísmicamente se caracteriza por presentar reflectores poco continuos y de baja amplitud, con un patrón principalmente sub-paralelo. Está definida por dos (2) discontinuidades (SB5 y SB6), caracterizadas por terminaciones en downlap sobre el reflector y truncamiento por debajo de este (figura N°55).

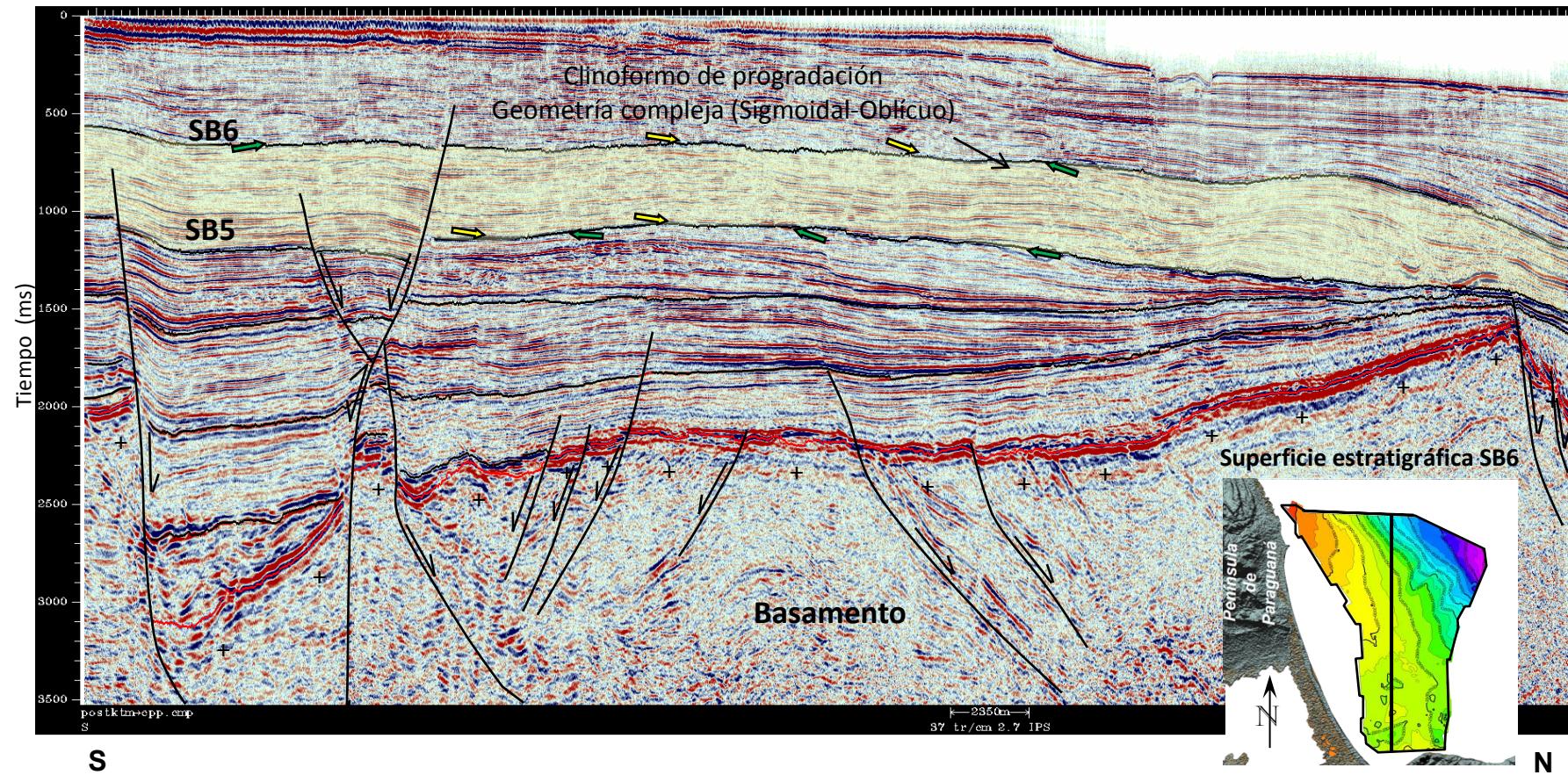


Figura N°55. Sección sísmica con dirección sur-norte, donde se muestran las características sísmicas de la secuencia sismo-estratigráfica “5” (S5).

Al norte del área de estudio, dentro de esta secuencia, se observan una serie de canales y/o cañones submarinos de corta trayectoria y alineados (ver figura N°56), cuya base la define una discontinuidad menor que corresponde a la superficie de erosión submarina; algunos presentan entallamiento. Los paleocanales, parecen estar controlados por un conjunto de fallas secundarias, dispuestas en la misma dirección de los canales y posiblemente asociadas a la reactivación de la falla normal del norte. La dirección de estos canales indica que la dirección de sedimentación para el tiempo de depositación de la secuencia sigue siendo SO-NE.

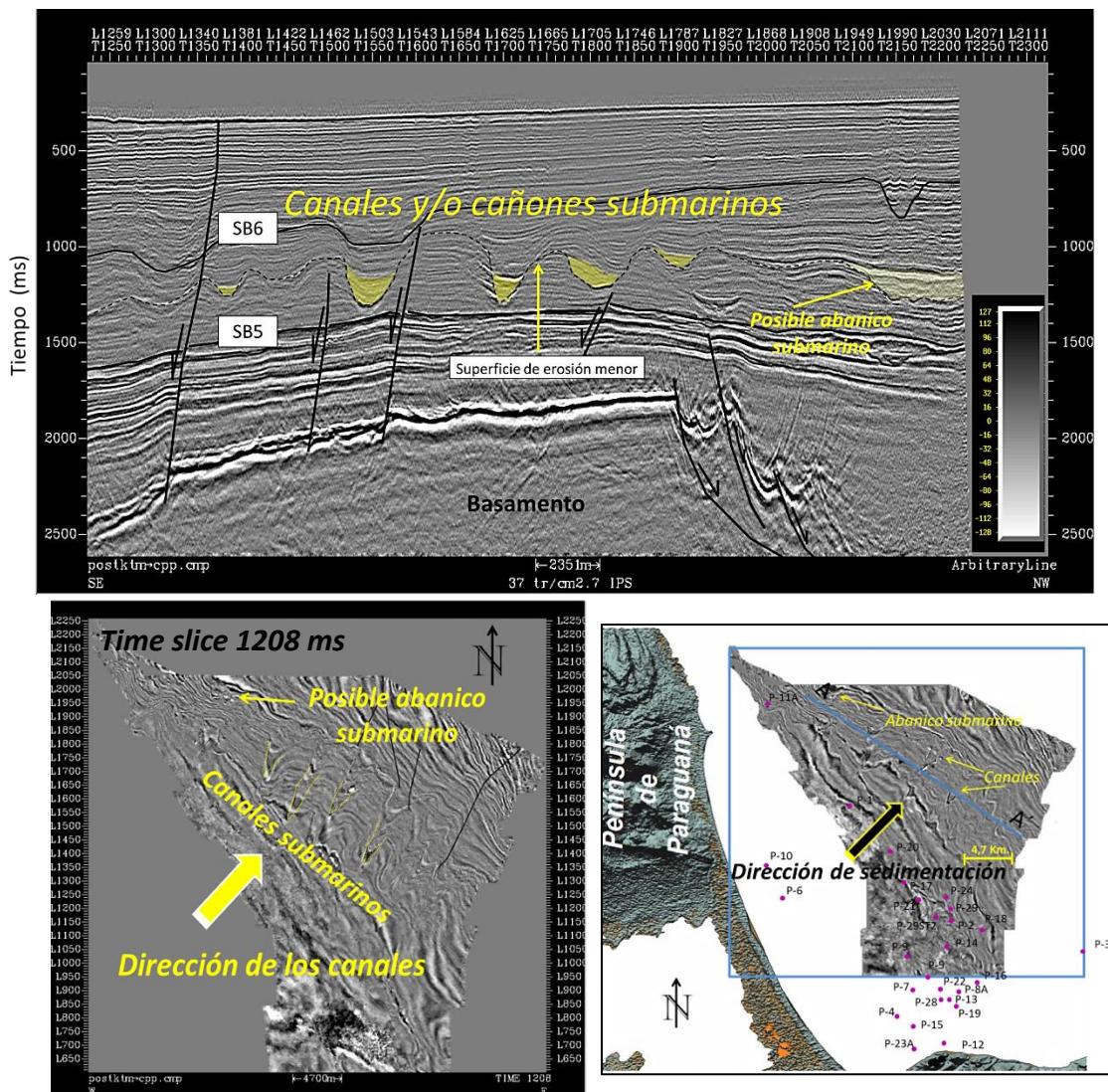


Figura N°56. Sección sísmica arbitraria con dirección SE-NO, donde se muestran los canales y abanico submarino dentro de la secuencia sismo-estratigráfica “5”.

En el borde NO del cubo sísmico, se presenta un cuerpo que se interpreta como un abanico submarino, el cual solapa al abanico de la secuencia anterior y no se observa su cierre, ya que este se sale del volumen sísmico.

5.2.3 Calibración sísmica

Se generaron los sismogramas sintéticos de los pozos, P-14, P-15 y P-28, de los cuales se puede tomar el pozo P-28 como un ejemplo representativo de la calibración, ya que corta toda la secuencia sedimentaria. La calibración de los tres pozos se presenta en las figuras N° 57 y 58.

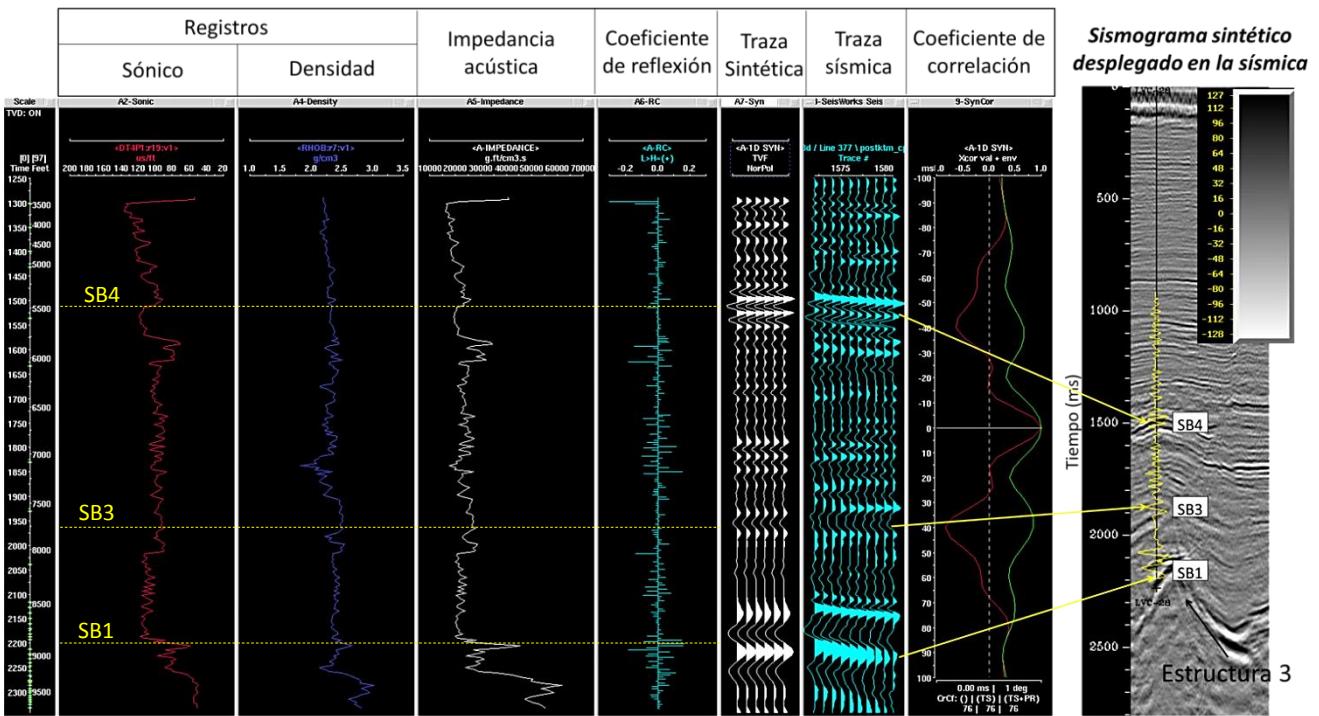


Figura N°57. Calibración sísmica del pozo tipo P-28.

Los eventos sísmicos más importantes usados para la calibración fueron:

- Una fuerte reflexión positiva asociada al contraste entre las rocas sedimentarias y el basamento principalmente metamórfico.

- Un reflector negativo asociado a la superficie discordante que corresponde al límite de secuencia 3. Esta superficie tiene una marcada expresión en toda el área, muestra un quiebre característico en el registro sónico de los pozos calibrados.
- Un fuerte reflector sísmico negativo asociado al límite de secuencia 4.

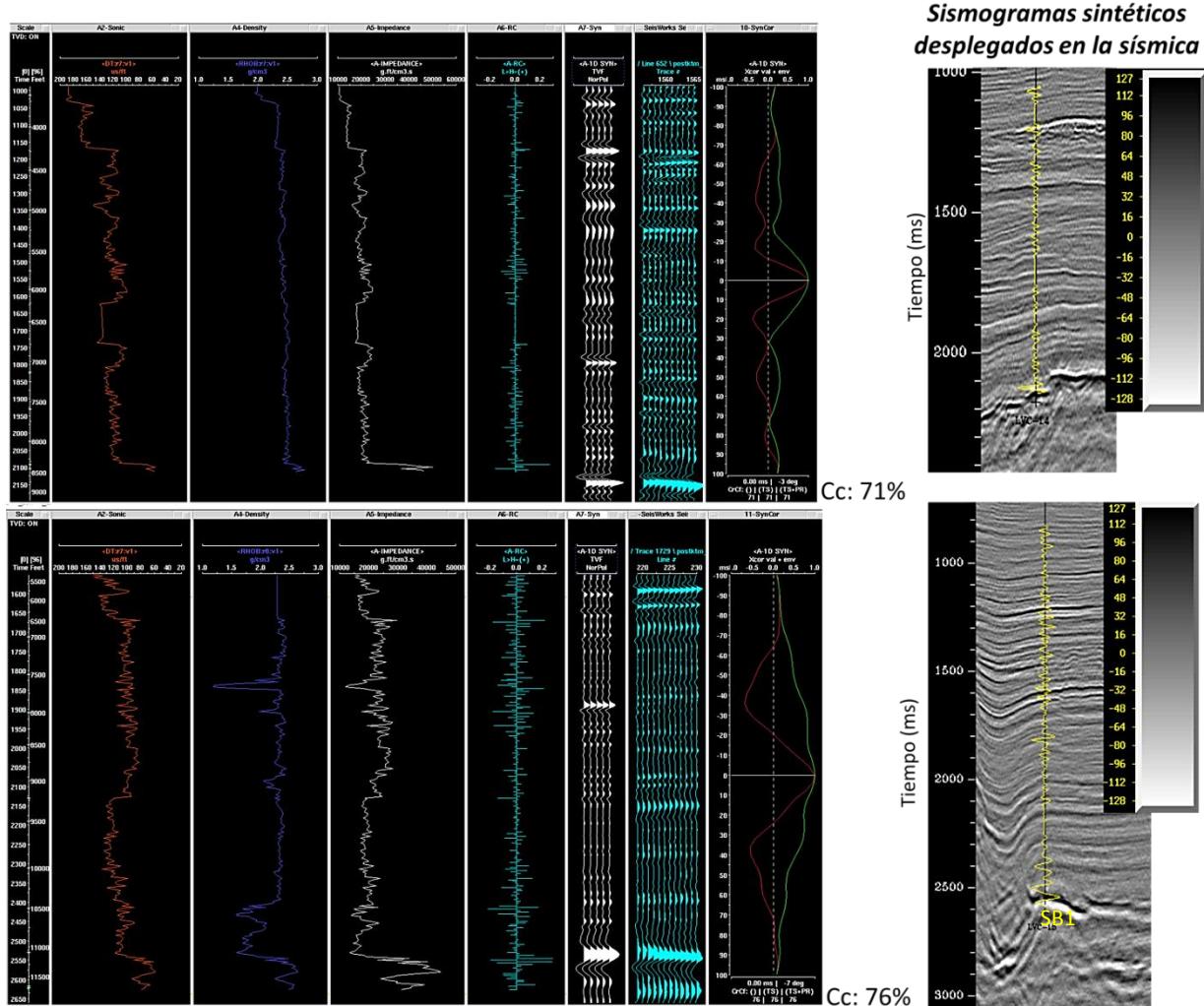


Figura N° 58. Calibración sísmica de los pozos P-14 Y P-15 respectivamente.

En el área de estudio, se observaron diferencias marcadas en la respuesta sísmica asociada a las variaciones estratigráficas y estructurales presentes, las cuales

también fueron observadas en los pozos. A partir de las calibraciones realizadas en ésta investigación y en el proyecto previo de PDVSA (2009), se evidencia el bajo nivel de detalle que ofrece la sísmica en contraste con los pozos, especialmente en lo que respecta al poco espesor de algunos intervalos estratigráficos asociados a tendencias depositacionales, esto debido a la resolución sísmica vertical, en algunas zonas del área de estudio, lo cual genera que varios eventos estratigráficos y sedimentológicos se agrupen en un mismo evento sísmico (figura N°59).

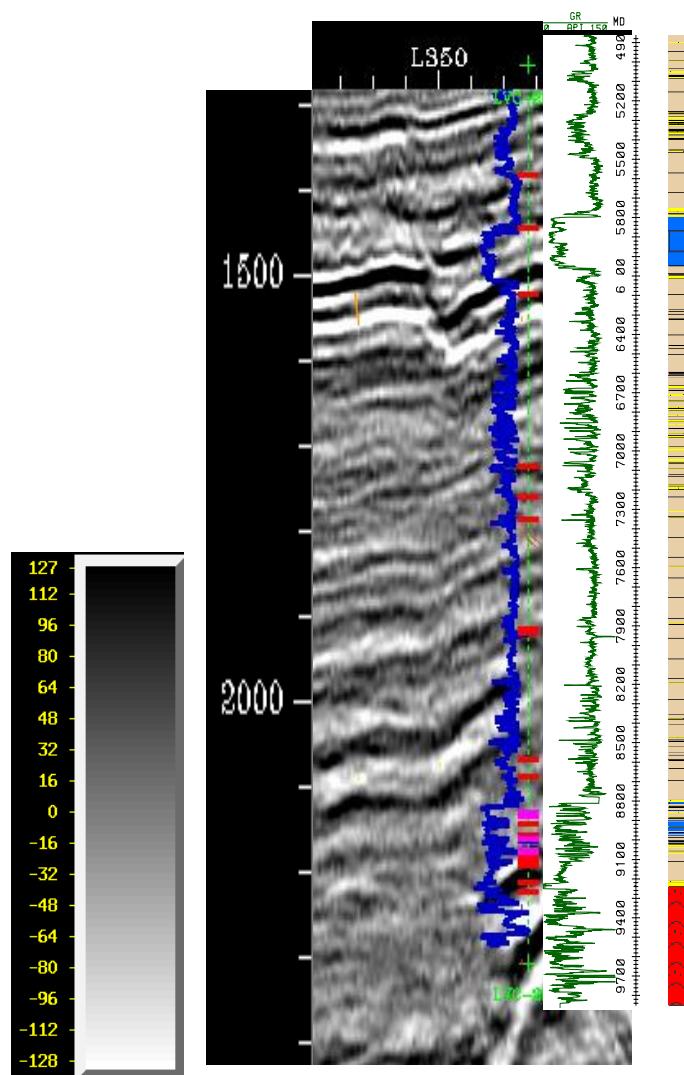


Figura N° 59. Amarre pozo tipo P-28, curva de GR desplegada sobre la sísmica, mostrando un buen cotejo pozo-sísmica. A la derecha escala de profundidad en pies y *cut-off* de litología.

5.3 INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS DE POZOS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE DE NÚCLEOS

5.3.1 Identificación de superficies estratigráficas en núcleos

En la descripción de los 349,5' de núcleos recuperados del pozo tipo P-28, realizada por la Gerencia de Exploración de PDVSA-Intevep, se interpretaron tendencias depositacionales, que permitieron la definición de algunas superficies de importancia estratigráfica como lo son: superficies de máxima inundación (MFS- Maximum Flooding Surface), superficies de máxima regresión (MRS- Maximum Regression Surface) y superficies erosivas que representan límites de secuencia (SB- Sequence Boundary); como también se identificaron superficies de inundación (FS- Flooding Surface).

Algunas de las superficies identificadas están ajustadas con información bioestratigráfica, basada en estudios de foraminíferos, nanoplanton calcáreo y palinología, realizados por diversos autores, principalmente Contreras *et al.* (2010), el cual empleó la zonación palinológica de Muller *et al.*, (1987), para la identificación de las zonas palinológicas, y la Escala del Tiempo para el Mioceno Tardío- Medio de Berggren, (1995), en el caso de foraminíferos y nanoplanton calcáreo.

La primera superficie claramente identificada es la inconformidad (SB_1) que representa el contacto de la sucesión sedimentaria sobre el basamento principalmente metamórfico. A la profundidad de 9203', se tienen depósitos tipo coluvión y aluvional, conformados por areniscas y conglomerados, inmediatamente sobre el basamento (ver figura N°60). El tope del basamento en este pozo, consiste de un gneiss con clorita y un 80% de cuarzo con cristales euhedrales y subeuhedrales de hasta 2cm de diámetro dispersos hacia la base, con escaso desarrollo de bandeamiento y escasas fracturas, algunas rellenas de calcita. En contacto con éste se tiene una arenisca de color gris claro a gris verdoso, de grano grueso a muy grueso, muy cuarzosa, con granos angulares a subangulares, con cemento calcáreo.

Otra superficie identificada es una superficie de máxima inundación (MFS_A) a la profundidad de 9065', asociada a una lutita (ladolita), gris oscuro, con algunos lentes de arenisca de grano fino y con moderadas bioturbaciones tipo *Thallassinoides* de 2 a 3cm, llenas de arenisca de grano fino similar al material de la capa suprayacente, la cual es una arenisca de grano fino de color gris claro a verdosa, bien escogida, con granos de cuarzo muy gruesos y dispersos, subangulares a subredondeados y con moderado contenido de conchas marinas de hasta 2cm de longitud, escasa bioturbación sin diferenciar y posibles nódulos de óxidos de 3mm de diámetro. A 9063,75' se tiene un nódulo calcáreo de aproximadamente 6x12 cm constituido de un wackstone con cuarzo y fragmentos de bivalvos y gastrópodos, con pocos equinodermos y foraminíferos miliólidos y miogypsínidios en cantidades traza. Menos común se observa glauconita en cámaras de macroforaminíferos, matriz (micrita) parcialmente dolomitizada y minerales opacos (posible leucoxeno). Esta arenisca representa los primeros depósitos de un sistema de nivel alto (HST).

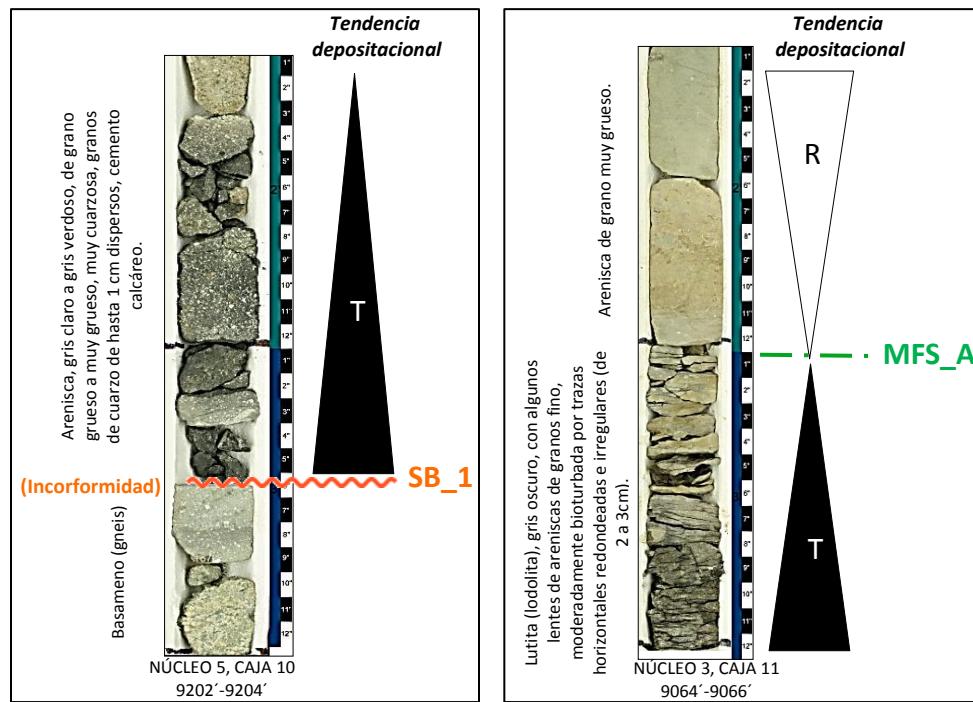


Figura N°60. Superficies estratigráficas identificadas en los núcleos 5 y 3 del pozo P-28.

De igual manera, se identificó a 9053,4' aproximadamente, otra superficie erosiva, que corresponde al límite de secuencia SB_2 (ver figura N°61). Se tiene una arenisca con base erosiva, de color marrón, granodecreciente y pobremente escogida, conglomerática a muy grueso, con granos angulares a subredondeados, con gránulos de cuarzo de hasta 5mm de diámetro dispersos y escasa bioturbación sin diferenciar. Suprayacente a ésta se tienen areniscas granodecrecientes, características de ambientes próximos costeros y de sistema de nivel bajo (LST). En el informe de bioestratigrafía de Contreras *et al.* (2010), se establece una edad de Mioceno Temprano (Aquitaniense-Burdigaliense) para el intervalo de 9031'-9077', siendo la edad de la base aproximadamente 21,2 Ma.

A menor profundidad entre 8896' y 8923' se identificó y ubicó una superficie de máxima inundación (MFS_B.2) en el tope de una lodolita, de color gris oscuro, laminada, dura, con fractura, calcárea, localmente friable y con restos de conchas milimétricas, principalmente de bivalvos y ostrácodos?; la laminación es continua y muy delgada, plano paralela. Ésta superficie MFS_B.2 está interpretada en el informe de bioestratigrafía de Contreras *et al.* (2010) con base en las curvas de abundancia y diversidad paleontológica y fue definida por la ocurrencia de *Praeorbulina glomerosa*, y otros foraminíferos, nanoplanton calcáreo y palinomorfos, estableciéndose además una edad aproximada de 15,6 Ma. para este intervalo (ver figura N°62).

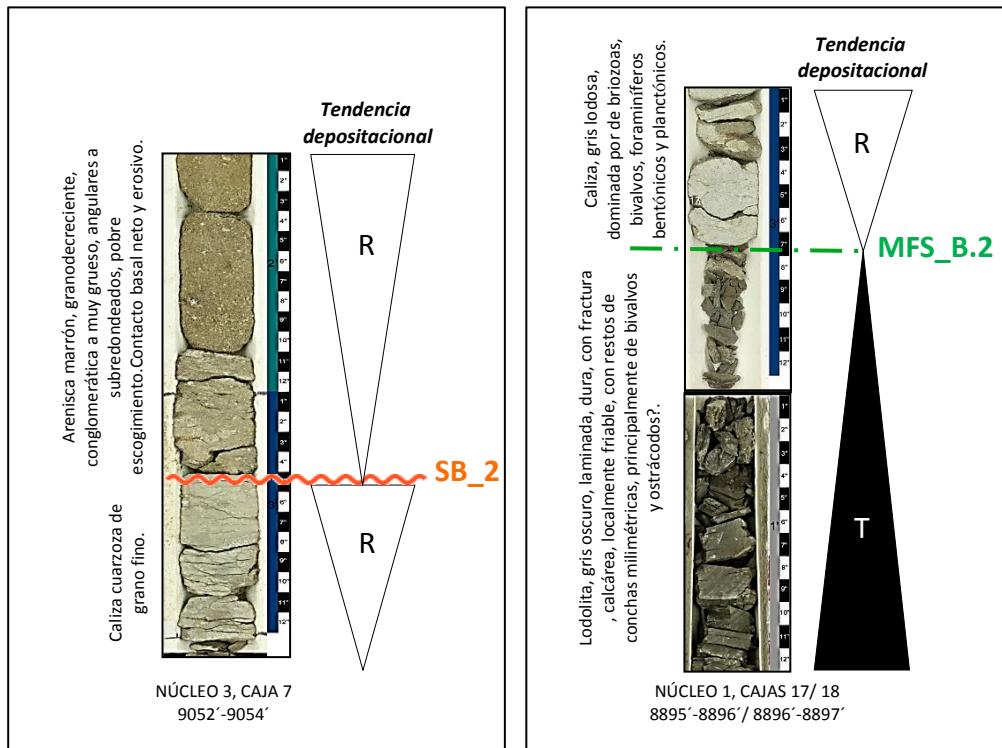


Figura N°61. Superficies estratigráficas identificadas en los núcleos 3 y 1 del pozo P-28.

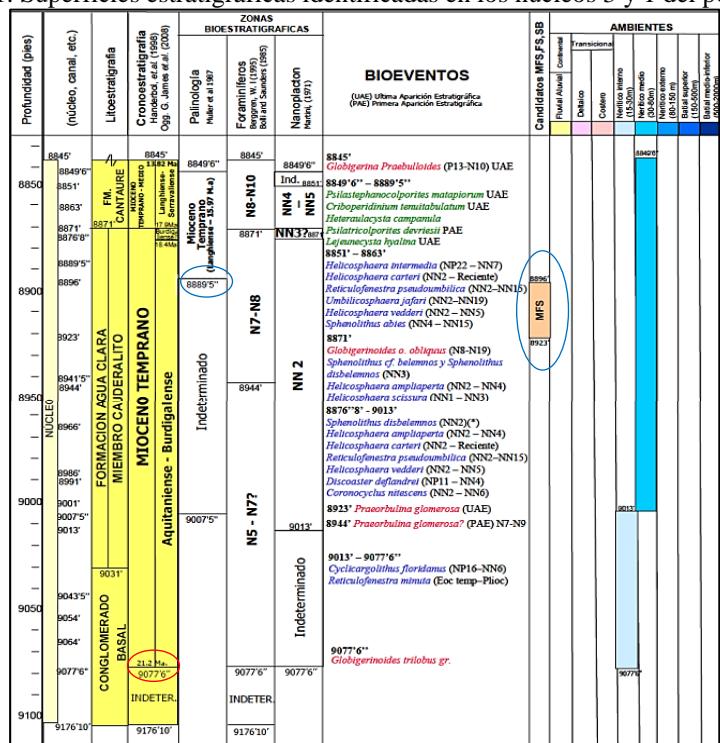


Figura N°62. Resumen bioestratigráfica del pozo P-28 (Tomado de Contreras, et al., 2010).

Según la descripción sedimentológica y los análisis petrográficos, por parte de PDVSA- Intevep (2015), de 38 secciones finas del pozo tipo P-28, se evidencian dos (2) grandes unidades sedimentológicas en los núcleos recuperados correspondientes a este pozo (figura N°63), claramente diferenciables: la primera en la base del núcleo, de 9151' a 9033', dominada por facies siliciclásticas y la segunda hacia el tope, de 9016' a 8845', dominada por facies carbonáticas alternadas con depósitos lutíticos.

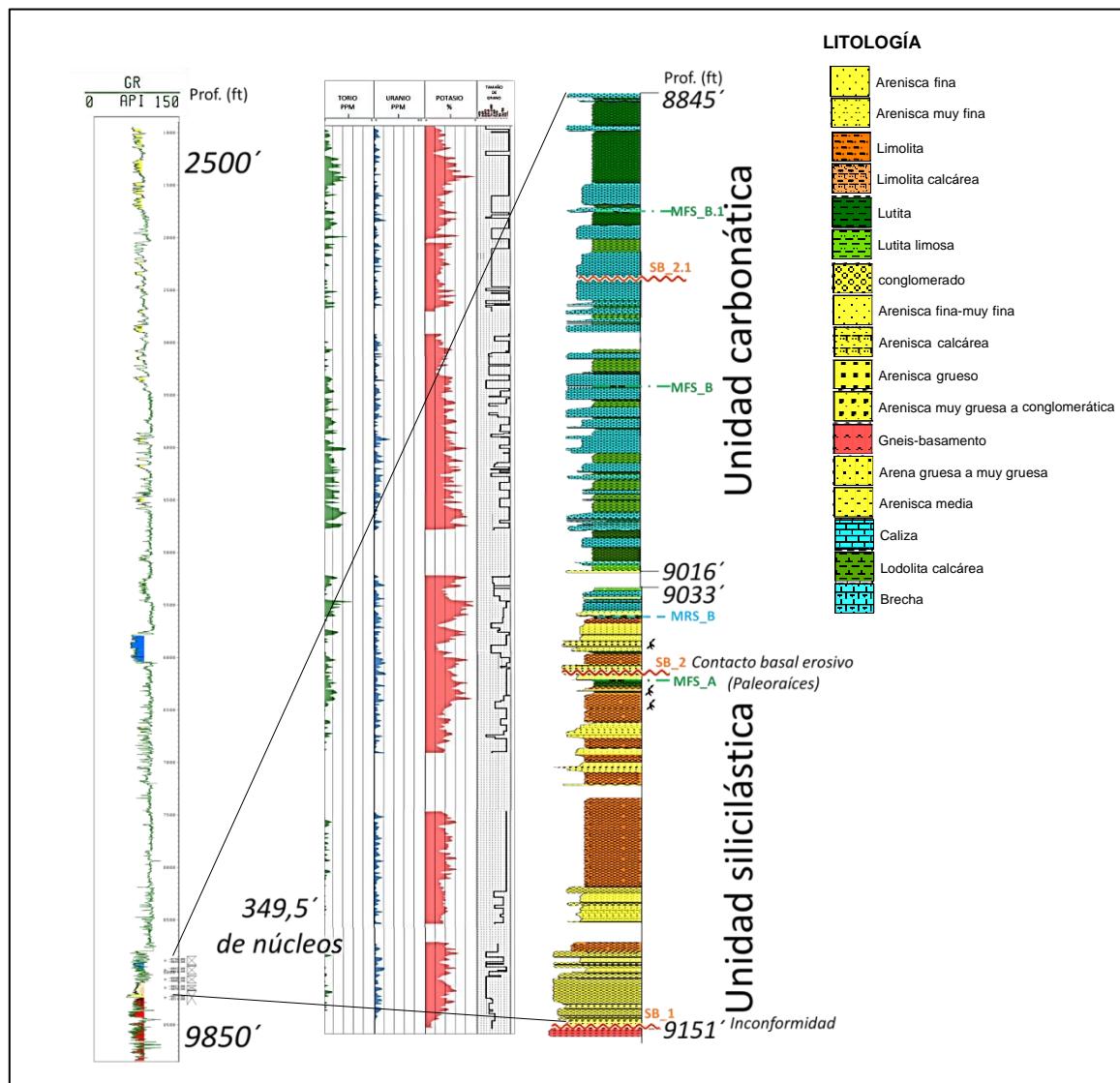


Figura N°63. Columna sedimentológica del pozo P-28 (Tomado de PDVSA-Intevep, 2015).

La primera unidad, se caracteriza por la predominancia (45%) de wackas cuarzosas, y en menor proporción se tienen sublitarenitas y areniscas con bioclastos. Los componentes principales en esta unidad son los granos de cuarzo monocristalino (62%) y policristalinos y en menor proporción los fragmentos de rocas sedimentarias y metamórficas, feldespatos sódicos y potásicos, pirita y componentes autigénicos como la caolinita, glauconia y fosfatos, llenando los espacios porosos y como reemplazamiento de granos, matriz y cemento.

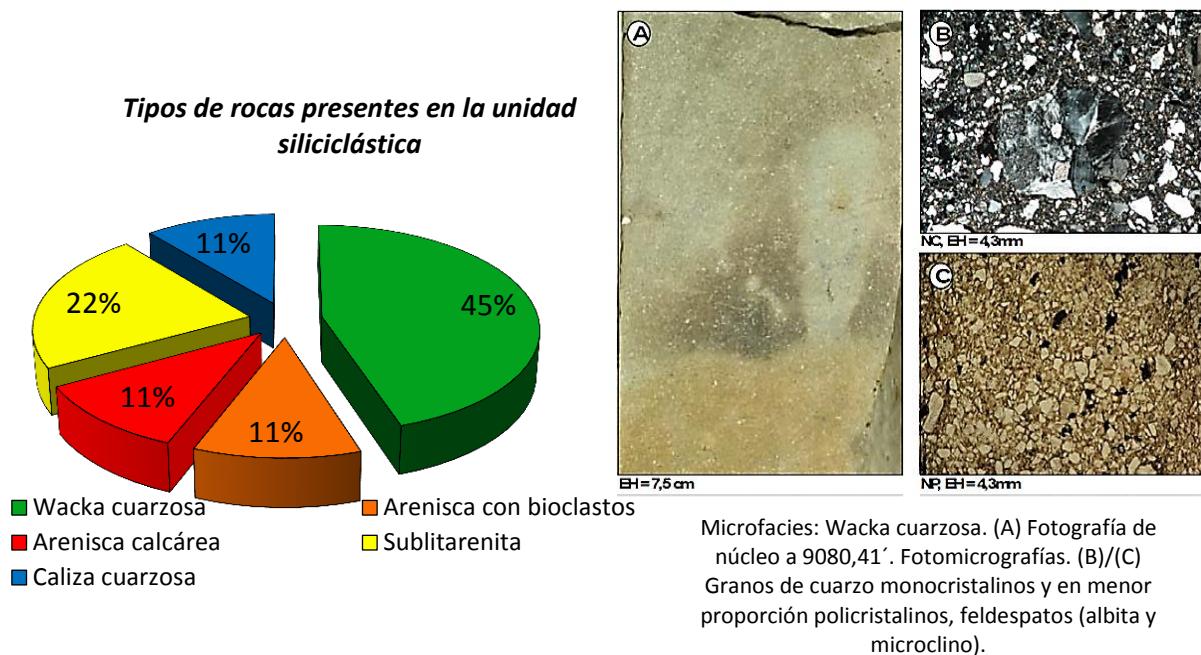


Figura N°64. Tipos de rocas presentes en la unidad silicicástica del pozo tipo P-28. A la derecha se muestran imágenes del núcleo y secciones finas de una Wacka cuarzosa (Tomado de Medina *et al.* 2015, en impresa).

La segunda se encuentra dominada por facies carbonáticas, constituida principalmente (62%) por calizas con textura wackstone y cuyo componente principal (27,5%) son los bivalvos desarticulados y fragmentados y en menor contenido se tienen foraminíferos planctónicos y bentónicos (miliólidos, textuláridos y rotálidos), gastrópodos, pellets, fragmentos de briozoarios, macroforaminíferos

(miogypsinidos) ostrácodos, balánidos, equinodermos, serpúlidos, fragmentos de algas rojas e intraclastos.

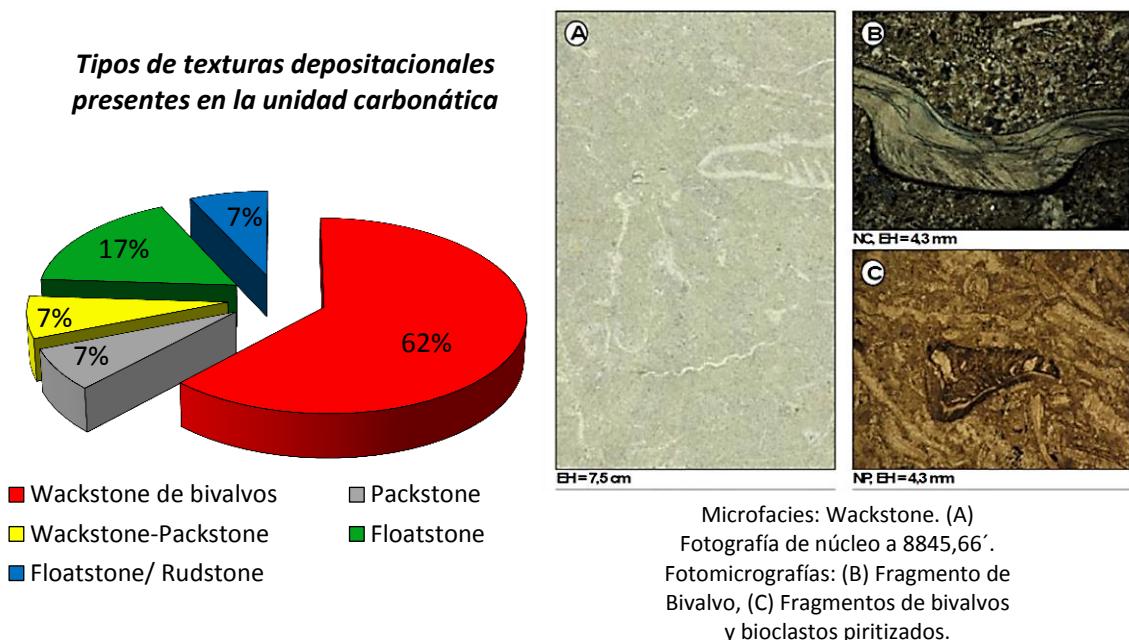


Figura N°65. Tipos de texturas depositacionales presentes en la unidad carbonática del pozo tipo P-28. A la derecha se muestran imágenes del núcleo y secciones finas de un wackstone de bivalvos (Tomado de Medina *et al.*, 2015, en imprenta).

De igual manera, se contó con la interpretación de tendencias depositacionales en 82 pies de núcleos recuperados del pozo P-14, realizada por la Gerencia de Exploración de PDVSA-Intevep, las cuales permitieron la definición de una sección condensada y asociada a ésta una superficie de máxima inundación (MFS).

De 8427' a 8412' de profundidad, se identificó una sección condensada de poco espesor, donde se tienen intercalaciones de floatstone-rudstone con lodoletas, dentro de un sistema transgresivo (TST). Los carbonatos, son de color gris claro a gris rojizo, compuesta principalmente de fragmentos redondeados de algas rojas y macroforaminíferos, con menor proporción de rodolitos pralines y ramificados de 1 a 2 cm de diámetro. Presentan un moderado contenido de foraminíferos bentónicos,

pocos equinodermos, bivalvos, foraminíferos planctónicos, briozoas, ostrácodos, balánidos y traza de probables intraclastos; pocos granos piritizados, moderada matriz micrita y común cemento de calcita. Las lodochas por su parte, son de color marrón oscuro a gris oscuro y friables. Dentro de estas intercalaciones se presenta materia orgánica y minerales autigénicos, como glauconita y fosfatos, reemplazando los bioclastos.

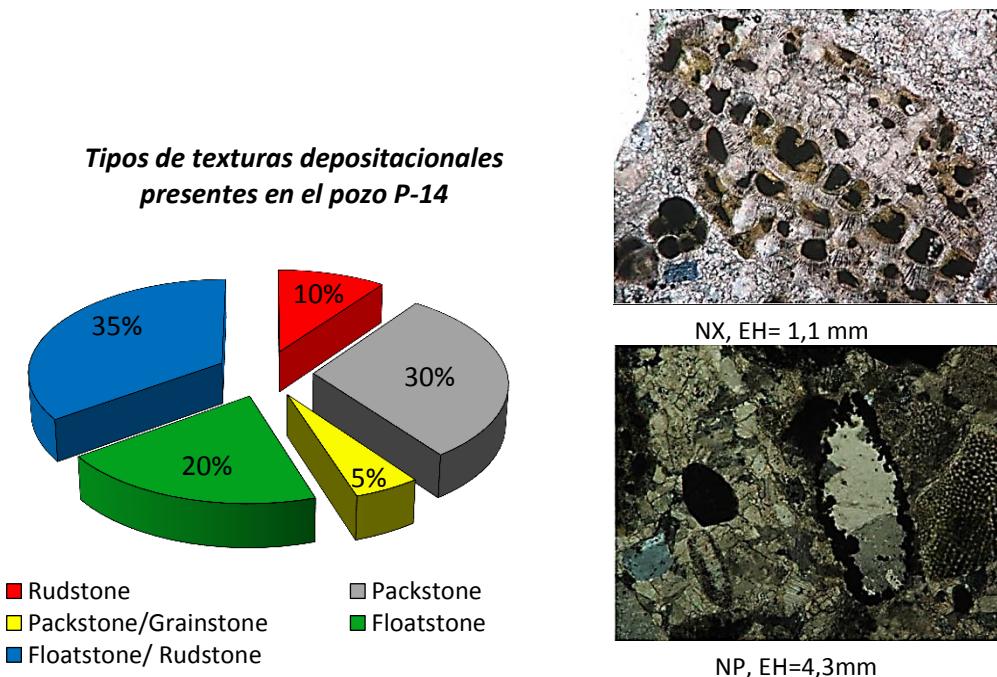


Figura N°66. Tipos de texturas depositacionales presentes en el pozo P-14, a la derecha se muestran imágenes de secciones finas donde se observa glauconitización y piritización de bioclastos a 8413 y 8427 pie, respectivamente (Tomado de Medina *et al.* 2015, en imprenta).

La superficie de máxima inundación (MFS), fue definida por el pico de máxima abundancia de nanoplanton calcáreo (figura N°67), entre la profundidad 8412' a 8407,9', dentro de una lodocha, gris a marrón, con cantidades variables de fragmentos de algas rojas aumentando hacia el tope, y pocos rodolitos pralines pequeños (0,5cm de diámetro). Corresponde a la misma superficie identificada en el pozo P-28, MFS_A. Por encima de los 8407,9' hasta 8347' se tienen carbonatos del sistema de nivel alto (HST).

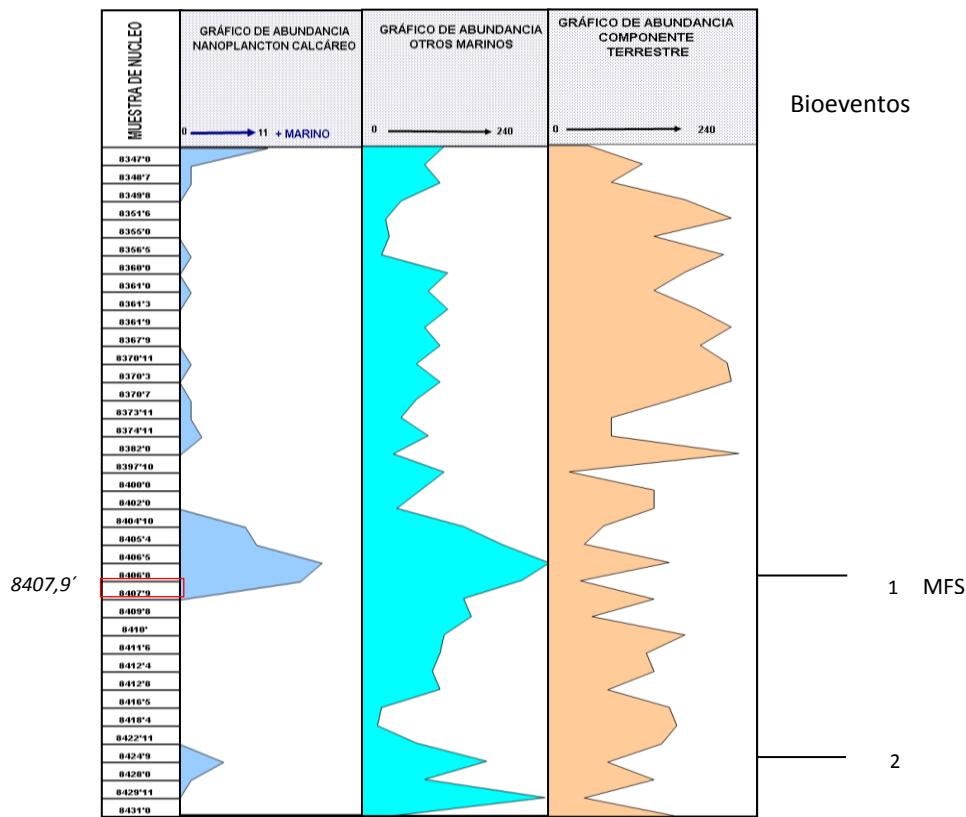


Figura N°67. Tendencia paleoambiental, del pozo P-14, donde se observa el pico máximo de nanoplancton calcáreo. (Tomado de Cañizares *et al.*, 2016, en imprenta).

5.3.2 Amarre núcleo-pozo

A partir de la definición de las superficies estratigráficas identificadas en los núcleos recuperados del pozo P-28, se realizó el amarre núcleo-pozo, obteniéndose un buen cotejo entre el patrón electrográfico de la curva de gamma-ray (GR) y las tendencias depositacionales en los núcleos.

En la figura N°68 se muestran tres secuencias estratigráficas de 3er orden, para los intervalos con núcleos del pozo tipo P-28. Dentro de la primera secuencia estratigráfica de casi 200' de espesor, se encuentra la unidad siliciclástica interpretada previamente, su límite inferior lo define la inconformidad, SB_1 de 23 Ma. aproximadamente y el límite superior lo define la superficie erosiva, SB_2 de aproximadamente 21 Ma., por lo que la secuencia en este pozo tiene una edad

Mioceno Temprano (Aquitaniense-Burdigaliense). En la curva GR se observa una tendencia granodecreciente (*fining-up*) principalmente y se tienen minerales autigénicos como caolinita, glauconita y fosfatos, lo que permite inferir que estos siliciclastos se depositaron durante un sistema transgresivo (TST), cuya superficie de máxima inundación (MFS_A), está definida en el intervalo lutítico, caracterizado por un pico de máximo valor en la curva GR.

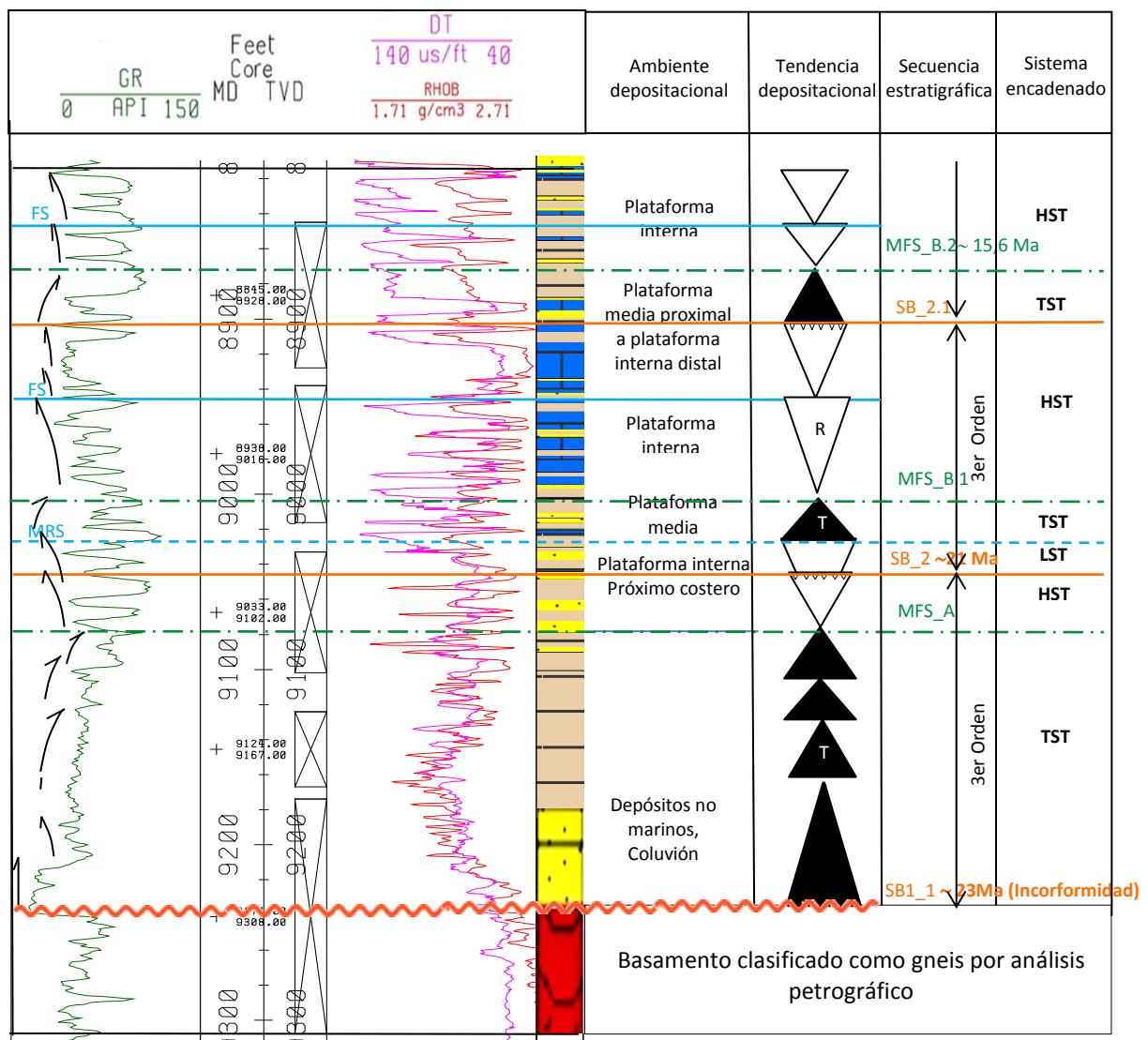


Figura N°68. Amarre núcleo-pozo del pozo tipo P-28.

La segunda secuencia de 3er orden, también de edad Mioceno Temprano, está definida por una superficie erosiva (SB_2.1), posee un espesor de 140'aproximadamente y se diferencian claramente los tres sistemas encadenados que componen la secuencia, prevaleciendo los depósitos regresivos del sistema de nivel alto (HST), caracterizados en la curva de GR por una tendencia granocreciente (*coarsing-up*). Dentro de esta secuencia se ubica parte de la unidad carbonática, caracterizada por carbonatos de mezcla con textura principalmente tipo wackstone, depositada en ambientes de plataforma interna a media.

De la última secuencia su límite superior no está definido, por no contarse con más núcleos. No se tienen depósitos del nivel bajo (LST), sólo se conservan los depósitos del sistema transgresivo (TST) y del sistema de nivel alto (HST), separados por una superficie de máxima inundación (MFS_B.2) de 15,5 Ma. Se caracteriza por ser una secuencia principalmente regresiva normal.

5.3.3 Definición y correlación de secuencias depositacionales en los registros de pozos

Una vez amarradas las superficies estratigráficas identificadas en los núcleos recuperados, a la curva de GR del pozo P-28, se identificaron las demás superficies a lo largo de todo el registro del pozo, con base sólo en los cambios en el patrón electrográfico de las curvas de GR, resistividad, sónico y densidad, ya que no se contaba con núcleos.

El análisis de secuencias depositacionales en los registros, se realizó bajo la definición de paquetes transgresivos y regresivos, a partir de los cambios en las respuestas de los registros de pozos y la aplicación de técnicas y procedimientos de estratigrafía secuencial. Estos paquetes corresponden a los sistemas encadenados dentro de cada secuencia. El pozo tipo utilizado para la correlación fue el pozo P-28, su escogencia se basó en que posee la columna estratigráfica completa, la mayor

cantidad de pies de núcleos recuperados, penetró basamento y dispone de información bioestratigráfica y análisis sedimentológico.

Se definieron cinco secuencias depositacionales de 2do y 3er orden, las cuales se correlacionaron con todos los pozos del área. La clasificación de las secuencias fue basada en la duración o frecuencia de éstas, información que se extrajo de los informes de bioestratigrafía.

En las correlaciones realizadas (figuras N°69 y 70), se observan las fuertes variaciones estratigráficas tanto laterales como verticales dentro de los pozos del área, debido al control que ejerce la tectónica en la deposición de las secuencias estratigráficas, lo que hace que las correlaciones estratigráficas tanto de norte a sur como de este a oeste, sea un trabajo difícil, y por lo tanto la correlación se hizo bajo un marco secuencial, criterio que establecen Ghosh *et al.*, (1998), para la Cuenca de Falcón.

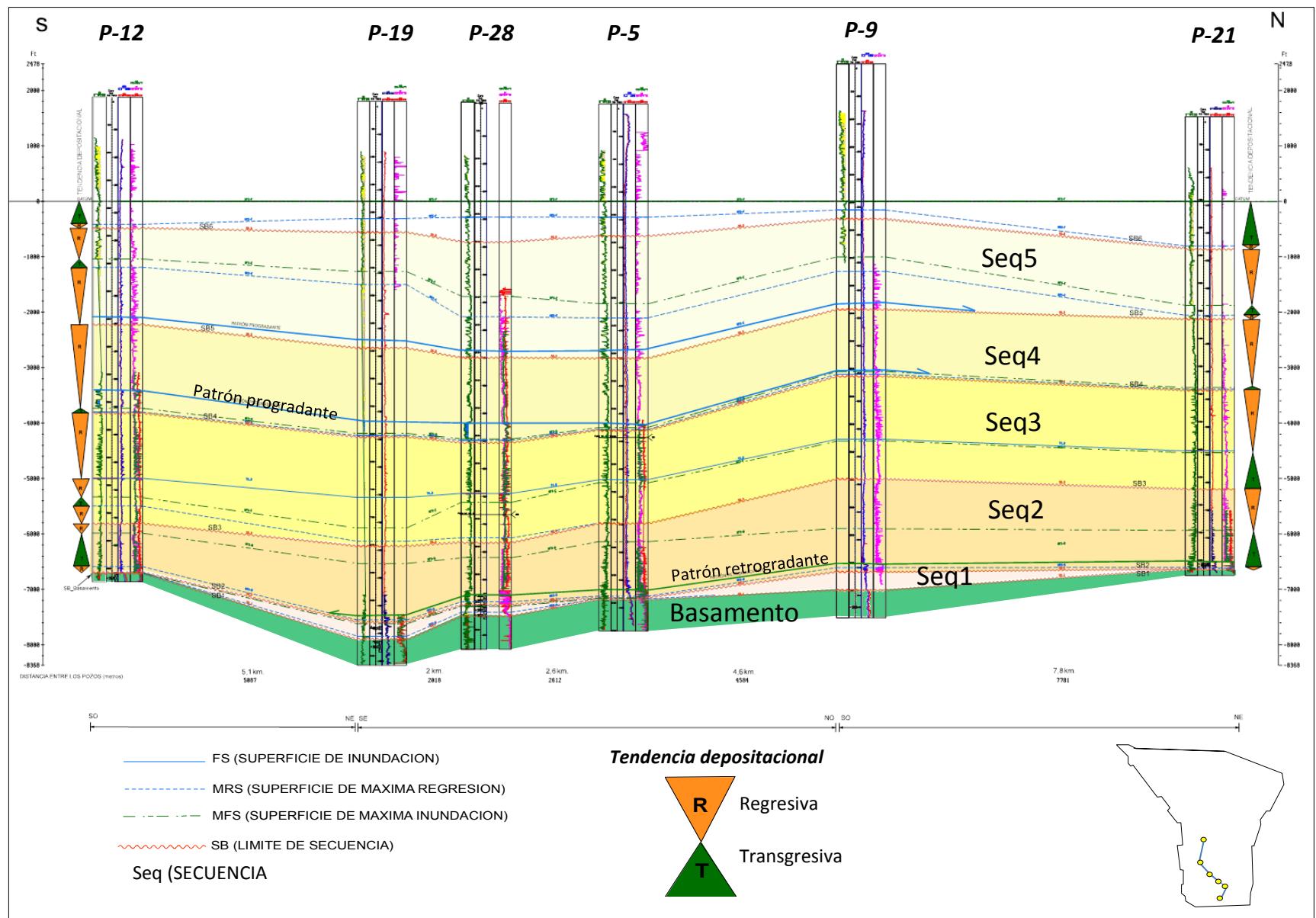


Figura N°69. Sección de correlación SE-NO, se muestran las secuencias estratigráficas definidas y las tendencias depositacionales.

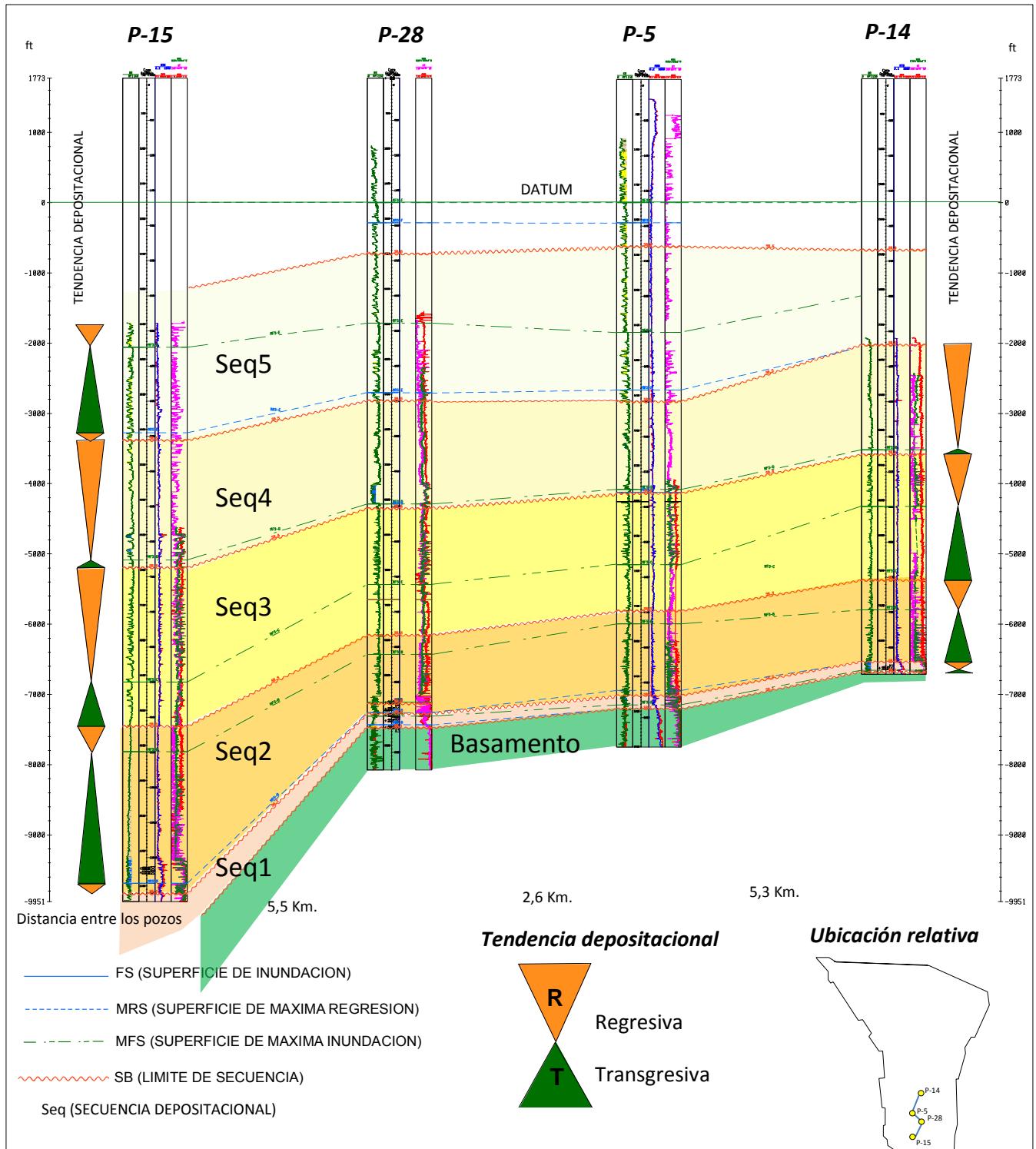


Figura N°70. Correlación sur-norte, donde se muestra el adelgazamiento en el espesor de las secuencias hacia el norte.

5.4 INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN

El desarrollo del modelo estratigráfico secuencial, para la Ensenada de La Vela, fue logrado mediante la interpretación, análisis e integración de registros de pozo, información sedimentológica y bioestratigráfica de núcleos y sísmica 3D. Para la definición del marco cronoestratigráfico se llevó a cabo la revisión de los datos bioestratigráficos y la correlación de 23 pozos, lo cual permitió definir para el área cuatro secuencias estratigráficas informales de 2do orden y dos de 3er orden, enmarcando así las unidades litoestratigráficas dentro de un marco cronoestratigráfico (ver figura N° 73).

La edad de las secuencias estratigráficas, ha sido generada a partir de los estudios bioestratigráficos realizados con los datos de los pozos P-4, P-28, P-16, P-14 y P-18 de diferentes autores (figuras N° 71 y 72).

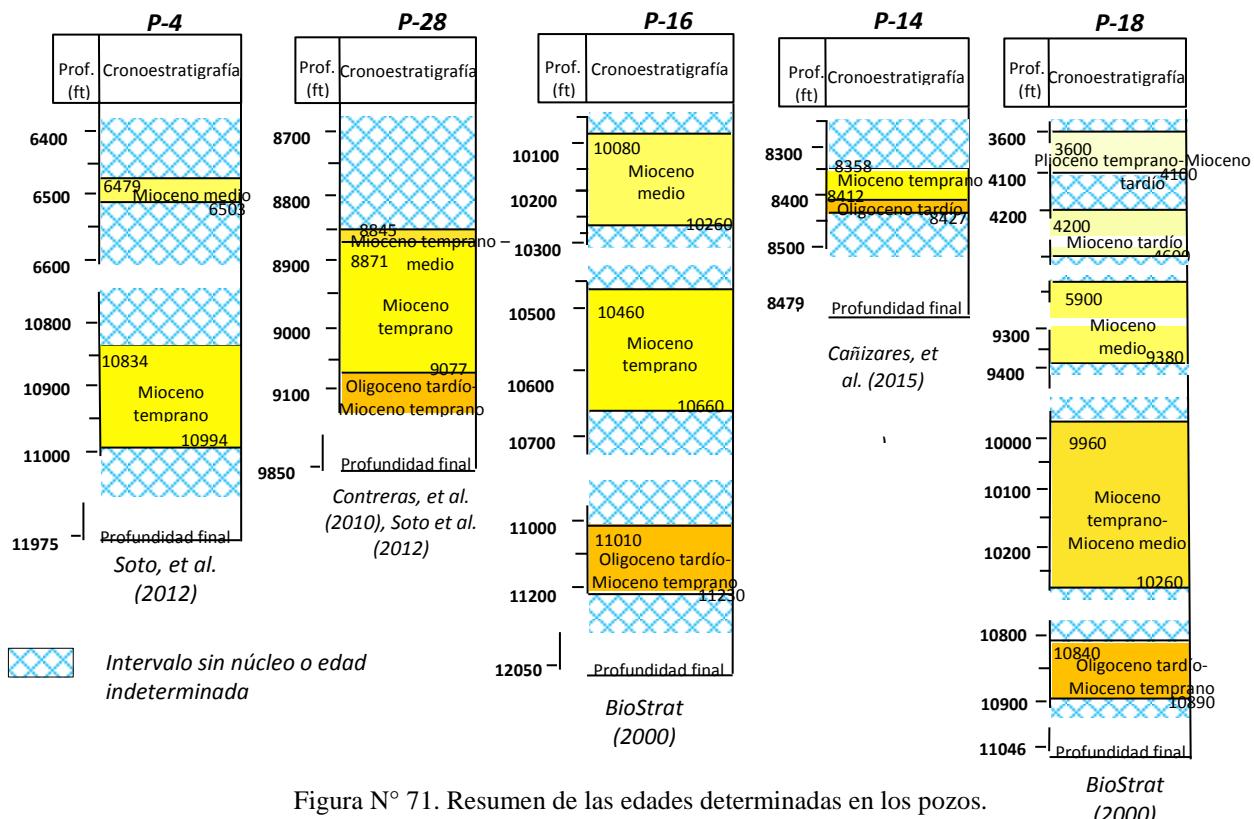


Figura N° 71. Resumen de las edades determinadas en los pozos.

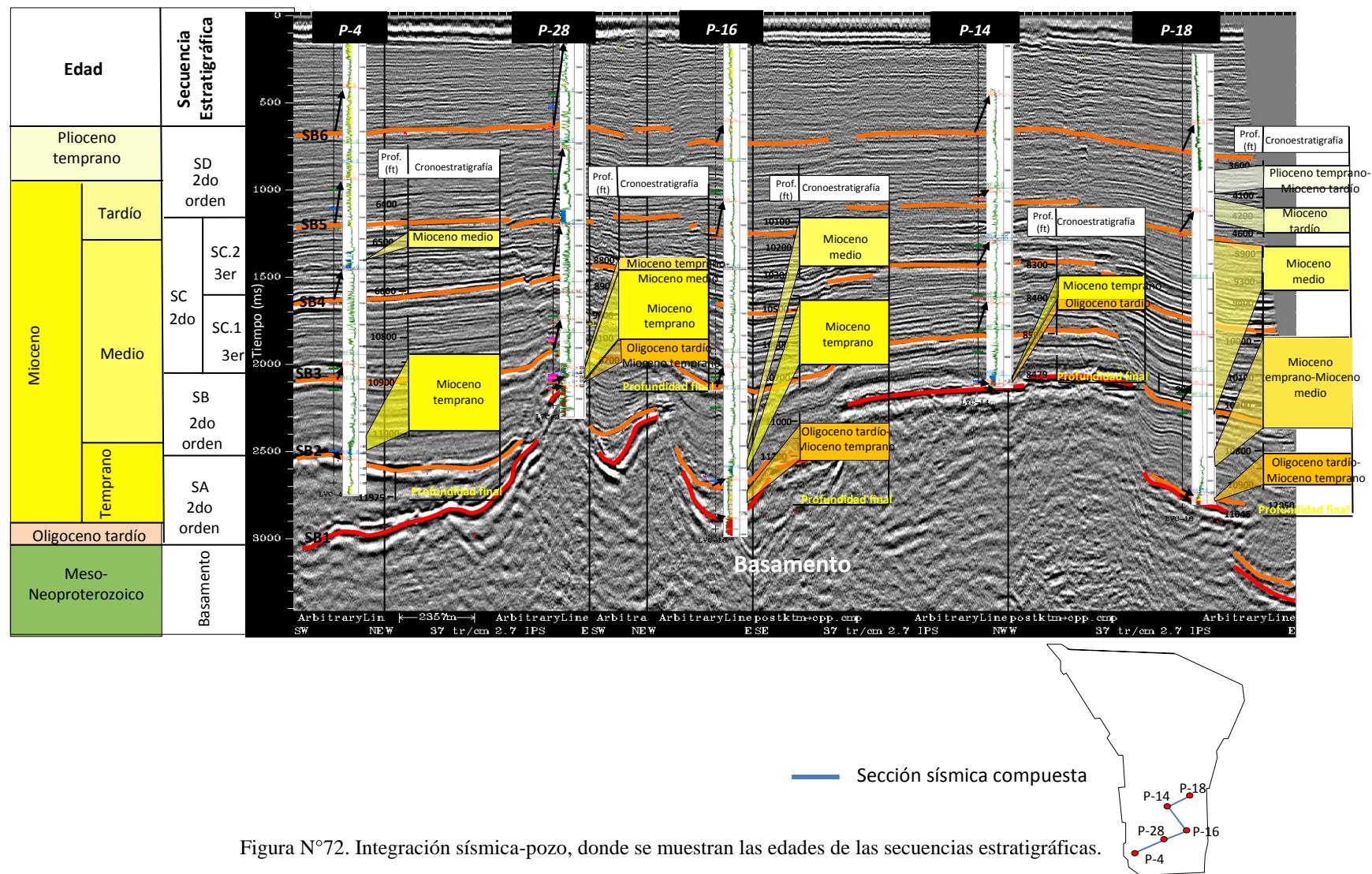


Figura N°72. Integración sísmica-pozo, donde se muestran las edades de las secuencias estratigráficas.

Con base en la información bioestratigráfica, se determinó que la columna estratigráfica de la Ensenada de La Vela comprende rocas del Oligoceno Superior al Reciente; pero para efectos de ésta investigación sólo se interpretó la sucesión sedimentaria Oligo-Mioceno.

Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que el Eoceno-Oligoceno Inferior esté presente en el área, ya que los pozos P-7, P-14 y P-15, no perforan la primera secuencia estratigráfica completa, en la estructura 4 donde se encuentra el mayor espesor de esta secuencia, y donde se tienen los primeros depósitos del área. Una asociación de palinomorfos de la zona T5 del Eoceno Tardío ha sido determinada en el pozo P-7 (11213', 11395') según BioStrat (2000). No obstante, Arnstein (1989) ha identificado *Paragloborotalia kugleri* del Aquitaniense en este intervalo, y también los palinomorfos indican Mioceno Temprano entre 11403'6" y 11413'4" según Contreras *et al.* (2009). Por otra parte, foraminíferos del Eoceno? fueron mencionados en el pozo P-8A entre 10102' y 10142', según BioStrat (2000), pero según los registros, este intervalo se correlaciona con capas del Chatiense (Oligoceno Tardío) del pozo vecino, P-16 (Contreras *et al.*, 2009). Para el desarrollo del marco cronoestratigráfico se utilizó la edad del Oligoceno Tardío para los depósitos más antiguos, existentes en el área de estudio.

En la figura N°73 se observa una tendencia depositacional regional, que inicia en el Oligoceno Tardío, con un ciclo transgresivo hasta inicios del Mioceno Medio, donde predominan los ciclos regresivos, lo cual indica más aporte de terrígenos desde el SO del área de estudio, relacionado posiblemente al levantamiento andino y por ende la inversión de la Cuenca de Falcón.

Un total de tres secciones estratigráficas fueron realizadas para la correlación de las secuencias estratigráficas de 2do y 3er orden en el área de la Ensenada de La Vela, presentándose estas secciones en los anexos A, B y C. En la figura N°74 se indica la ubicación y orientación de cada una de las secciones estratigráficas y se señala el pozo tipo utilizado en la investigación (ver figura N°75).

Periodo	Época	Piso	Ma	Unidad Litoestratigráfica	Secuencias sismo-estratigráficas	Tendencia depositacional regional	Límites estratigráficos de mayor orden
Neógeno	Mioceno	Plioceno	T	Zancleamense	SD (2do Orden)	R	SB6~3 Ma?
			T	Messiniense		R	
			M	Tortoniense	SC (2do Orden)	R	
			T	Serravaliense	SC.2 (3er Orden)	SB5~10 Ma	
			T	Langhiense	SC.1 (3er Orden)	SB4~12 Ma	
			T	Burdigaliense	SB (2do Orden)	SB3~13 Ma	
			T	Aquitaniense	SA (2do Orden)	SB2~21 Ma	
		Oligoceno		Chatiense		T	SB1~28 Ma/~23 Ma?
				Rupeliense		?	
MFS (Lutitas de la Fm. Querales y/o Fm. Agua Clara)							

Figura N°73. Probable equivalencia entre las unidades litoestratigráficas del Oligo-Mioceno y las secuencias estratigráficas definidas.

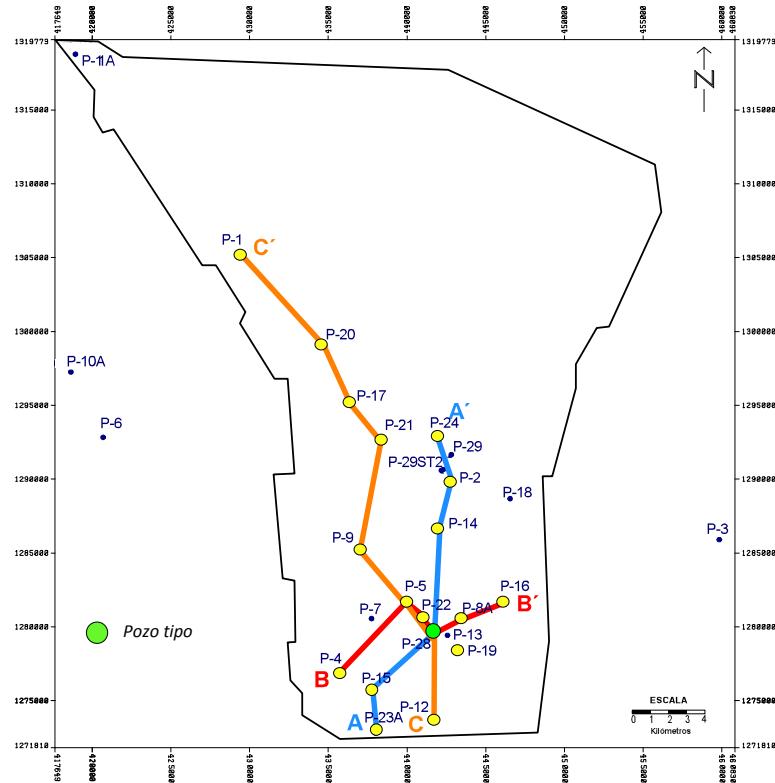


Figura N°74. Mapa de ubicación y orientación de las secciones estratigráficas.

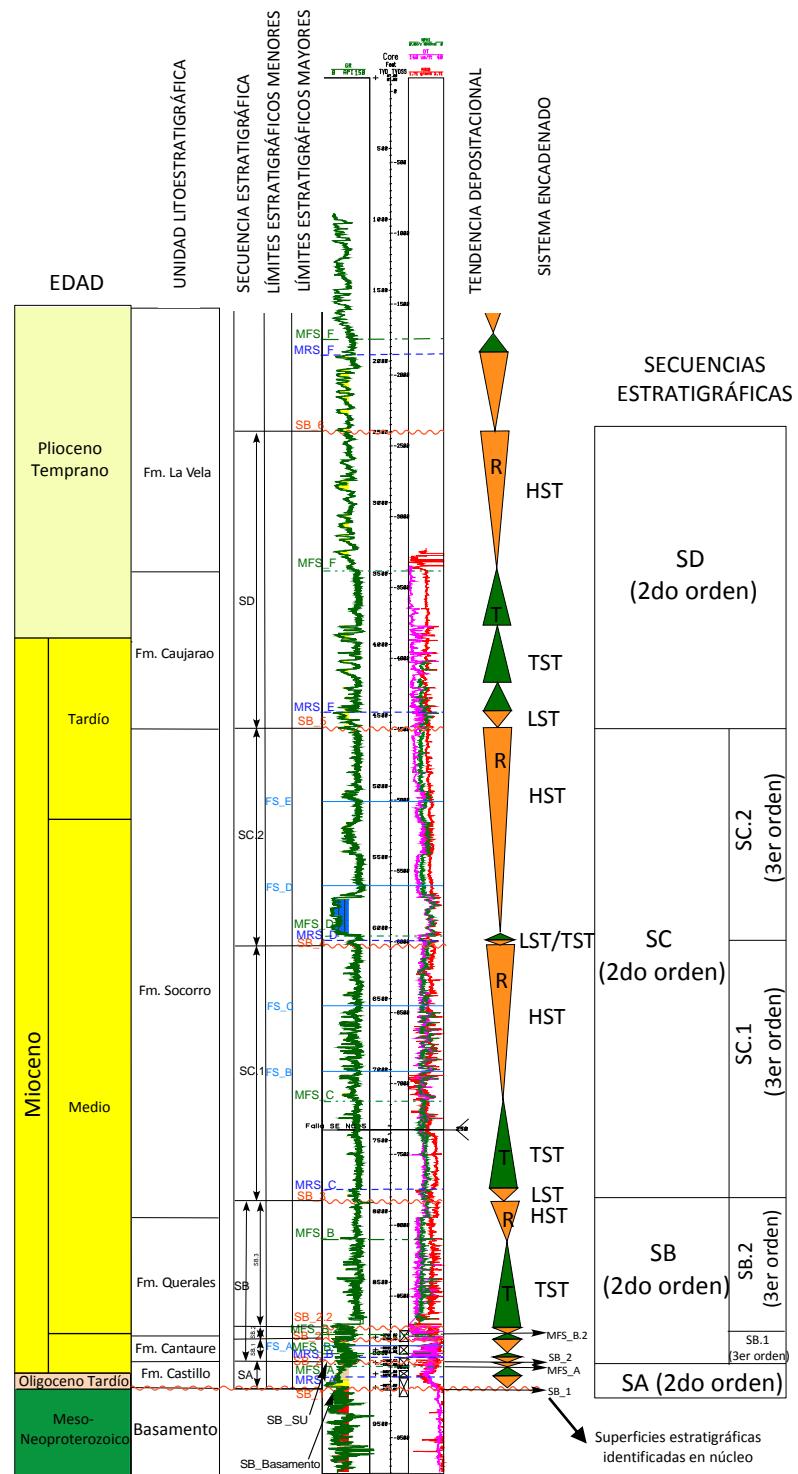


Figura N°75. Análisis estratigráfico secuencial del pozo tipo P-28. Se muestran las superficies estratigráficas interpretadas y las tendencias depositacionales.

5.5 DESCRIPCIÓN DE LAS SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS

Sección estratigráfica A-A': mostrada en el Anexo A, se orienta en dirección SO-NE, tomando información de los pozos P-23, P-15, P-28, P-14, P-2 y P-24, con una longitud de 22,004 km. Los pozos P-23 y P-15 no perforan el basamento, se observa como la primera secuencia estratigráfica (SA) se adelgaza hacia el norte, teniéndose espesores que no alcanzan los 60', en el alto correspondiente a la estructura 2, donde se ubican los pozos P-14, P-2 y P-24. En las curvas GR, se muestran intervalos más arenosos hacia el suroeste, en contraste con los pozos ubicados al noreste donde los intervalos se hacen más lutíticos, lo que se traduce en una profundización de las facies hacia el norte, en ambientes de plataforma o neríticos.

La sucesión carbonática del Mioceno Temprano (calizas de la Formación Cantaire/Mb. Cauderalito), se ubica dentro de la segunda secuencia estratigráfica, y constituye una unidad regionalmente transgresiva, que se presenta en solapamiento (onlap) sobre la primera secuencia (SA) o sobre el basamento, adelgazándose hacia el norte; mientras que los carbonatos del Mioceno Medio, ubicados dentro de la cuarta secuencia estratigráfica (SC.2) pertenecientes a la Formación Socorro, se depositaron durante un sistema de nivel alto (HST), y desaparecen en la estructura 2.

Se tiene poco desarrollo de los sistemas de nivel bajo (LST), característica de los sistemas carbonáticos. También se observa un adelgazamiento de las secuencias estratigráficas y un patrón progradante de los cuerpos sedimentarios hacia el noreste, siendo ésta la dirección de sedimentación, a partir del Mioceno Medio.

Sección estratigráfica B-B': mostrada en el Anexo B, tiene una dirección oeste-este, con una longitud de 13,93 km y tomando información de los pozos P-4, P-5, P-22, P-28, P-8A y P-16. Todos los pozos atraviesan el basamento a excepción del pozo P-4, ubicado en la depresión estructural (estructura 4), donde se tiene el mayor espesor de la primera secuencia estratigráfica (SA).

Ésta sección atraviesa transversalmente el pilar tectónico (estructura 3), donde se ubican los pozos P-5, P-22 y P-28, observándose un engrosamiento en el espesor de la primera secuencia estratigráfica a ambos lados del pilar, por lo que se infiere que gran parte de esta secuencia fue erosionada producto del levantamiento de ésta estructura a finales del Mioceno Temprano. En el pozo P-28, se tiene una edad de Mioceno Temprano dentro de la primera secuencia, para los conglomerados basales, correspondientes a la Formación Castillo, en el intervalo 9031'-9077', según Contreras, *et al.* (2010); mientras que Soto *et al.* (2012), establecen una edad Oligoceno Tardío? - Mioceno Temprano para estos mismos conglomerados, pero para una profundidad de 9091', intervalo que resultó indeterminado en Contreras *et al.* (2010). Asimismo, Farias (2012), menciona un Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano para los conglomerados basales, en el intervalo 9031'-9207'.

Para esta investigación, se toma la presencia de un Oligoceno Superior en el pozo P-28, lo cual concuerda con lo interpretado en la sísmica, donde se muestra que el levantamiento de la estructura 3, es posterior a la depositación de la primera secuencia estratigráfica, (ver figura N° 77).

Al igual que en la sección estratigráfica anterior, se observa una profundización de las facies hacia el este.

Sección estratigráfica C-C': mostrada en el Anexo C, es la sección estratigráfica más larga con 36,65 km de longitud y con una dirección SE-NO, tomando información de los pozos P-12, P-28, P-22, P-5, P-9, P-21, P-17, P-20 y P-1, los cuales todos perforan el basamento. Las facies lutíticas predominan en los pozos ubicados más al norte, P-20 y P-1, mientras que en los demás pozos se observa un predominio de facies arenosas.

La primera secuencia estratigráfica (SA), se adelgaza hacia el norte, esto debido al control que ejerce la tectónica sobre la deposición. Las tres últimas secuencias también disminuyen su espesor hacia el norte, mostrando un patrón progradante hacia la cuenca.

5.6 MARCO CRONOESTRATIGRÁFICO

Los conceptos tradicionales y la metodología aplicada en los estudios realizados en el área costa afuera y en especial en la Ensenada de La Vela, junto con el poco entendimiento de las relaciones que existen entre la tectónica y la estratigrafía, generó que la definición de las unidades estratigráficas estén basadas únicamente en sus características litológicas, lo que ha causado, que se tengan discrepancias entre las unidades litoestratigráficas formales presentes y unidades informales, que pretenden describir secuencias locales.

En este sentido, una de las grandes necesidades que presenta el área costa afuera en términos geológicos, tiene que ver con la revisión de las unidades litoestratigráficas que se han manejado históricamente y la búsqueda de unificación de criterios para poder llevarlas a niveles de correlación regional.

De ahí, que la presente investigación, pretende establecer la arquitectura estratigráfica, mediante la relación genética de la sucesión sedimentaria en la Ensenada de La Vela y dentro de un marco cronoestratigráfico (ver figura N°76), información que será utilizada en estudios posteriores, para correlacionar las secuencias estratigráficas hacia la región comprendida entre la Península de Paraguaná y el Golfo Triste. En consecuencia, se podrá establecer de manera coherente la evolución geológica integral del área costa afuera de la Cuenca de Falcón, y por ende sus recursos potenciales.

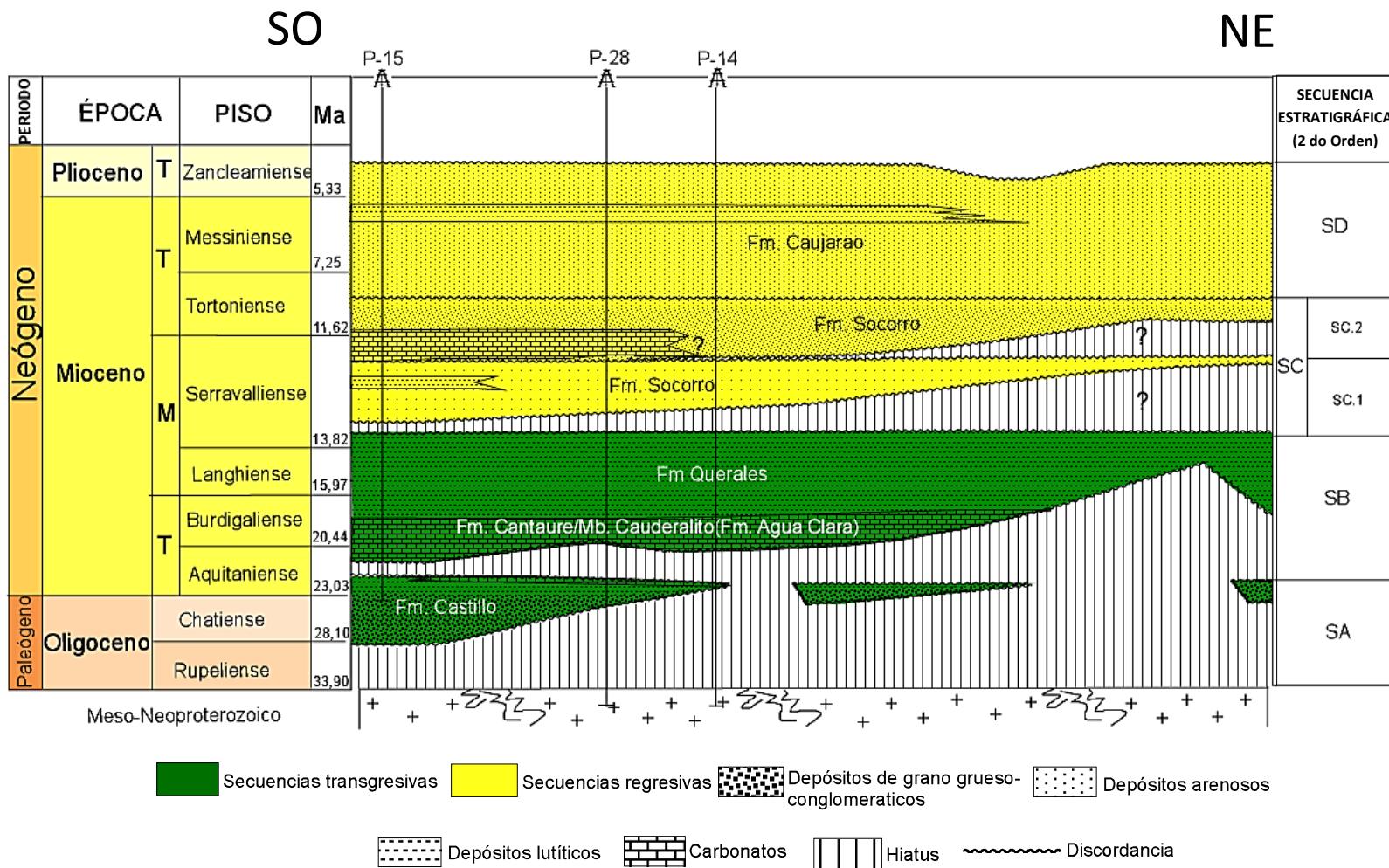


Figura N°76. Cuadro cronoestratigráfico para el área de la Ensenada de La Vela.

5.7 MODELO ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL

Las secuencias estratigráficas definidas en ésta investigación, fueron relacionadas con los trabajos de Ghosh (1997) y PGO Falcón Oriental (2010) en la Cuenca de Falcón, y Toribio (2012) en el área costa afuera.

Ghosh (1997), identifica cuatro ciclos de 2do orden y nueve de 3er orden, bajo un marco cronoestratigráfico y secuencial, siendo los ciclos de 3er orden los siguientes:

- ✓ Ciclo Oligoceno (SB 30 Ma)
- ✓ Ciclo Oligoceno-Mioceno Temprano (SB 25,5 Ma)
- ✓ Ciclo Mioceno Temprano (SB 21 Ma)
- ✓ Ciclo Mioceno Temprano-Medio (SB 16.5 M.a)
- ✓ Ciclo Mioceno Medio (SB 13,8 Ma)
- ✓ Ciclo Mioceno Medio- Tardío (SB 12,5 Ma)
- ✓ Ciclo Mioceno Tardío- Plioceno Temprano (SB 6,3 Ma)
- ✓ Ciclo Plioceno Temprano-Tardío (SB 3.8 M.a)
- ✓ Ciclo Plioceno Tardío-Pleistoceno (SB 2,4M.a)

PGO Falcón Oriental (2010), establecen ocho secuencias depositacionales informales de 3er orden, separadas por eventos tectónicos mayores, compresivo en el Eoceno y en Mio-Plioceno y distensivo durante el Oligoceno y el Mioceno inicial.

- ✓ Eocene Medio a Superior (SB 41.3 Ma)
- ✓ Secuencias Oligoceno 1 (SB 33.5 Ma)
- ✓ Secuencia Oligo – Mioceno Inferior inicial (SB27 Ma)
- ✓ Secuencia Mioceno Inferior (SB 22.5 Ma.)
- ✓ Secuencia Mioceno Inferior a Mioceno Medio (SB 16.4 Ma)
- ✓ Secuencias Mioceno Medio (SB 14 Ma)
- ✓ Secuencias Mioceno Superior a Plioceno Inferior (SB 11 Ma)
- ✓ Secuencias Plioceno Inferior-Superior (SB 5.3 Ma)

Toribio (2012), define seis secuencias para la región costa afuera, englobadas dentro de eventos tectonoestratigráficos:

- ✓ Secuencia A: Eoceno Medio, Pre-emplazamiento de las napas de Lara.
- ✓ Secuencia B: Oligoceno-Mioceno Inferior, Tectónica extensiva.
- ✓ Secuencia C: Mioceno Medio, Inversión tectónica.
- ✓ Secuencia D: Mioceno Superior-Plioceno Inferior, Estabilidad tectónica.
- ✓ Secuencia E: Plioceno Superior, Estabilidad tectónica.
- ✓ Secuencia F: Cuaternario, Estabilidad tectónica.

En la Ensenada de La Vela, no se presenta la secuencia del Eoceno, planteada por los dos últimos autores, y las secuencias del Plioceno no se interpretaron en esta investigación, se concentró en la sucesión sedimentaria Oligo-Mioceno.

Las secuencias aquí descritas son unidades de rocas basadas en tiempo geológico (unidades cronoestratigráficas), y se apoyan exclusivamente en la información sísmica y la obtenida a través de pozos. Teniendo en cuenta la baja resolución sísmica vertical y las discrepancias en la información de pozos, especialmente la información bioestratigráfica y sedimentológica de núcleos, las interpretaciones estratigráficas secuenciales a nivel de detalle no fueron posibles.

A escala regional, en la Ensenada de La Vela se tiene una secuencia de mayor orden, la cual inicia en el Oligoceno Tardío con un ciclo transgresivo, durante una tectónica extensiva, cuya superficie de máxima inundación se representa asociada a un intervalo lutítico de amplia distribución areal (lutitas de la Fm. Querales o la Fm. Agua Clara), seguido de un ciclo regresivo expresado por una secuencia progradacional que culmina a inicios del Mioceno Medio.

Dentro de la secuencia de orden mayor, se definieron cuatro secuencias estratigráficas de 2do orden y dos de 3er orden, donde la sedimentación se encuentra poco influenciada por la eustacia y los límites de secuencias son de origen tectónico.

Estas secuencias se describen a continuación:

5.7.1 SECUENCIA A (OLIGOCENO TARDÍO-MIOCENO TEMPRANO)

Corresponde a una secuencia estratigráfica de 2do orden, de ~23-28 a ~21Ma., con carácter principalmente transgresivo, y con un patrón granodecreciente, depositada durante el Oligoceno Tardío (Chatiense) y Mioceno Temprano (Aquitaniense), bajo un régimen tectónico extensivo y sobre un basamento exhumado, principalmente metamórfico, de edad Meso-Neoproterozoico, con posible afinidad Grenvilliana (Grande, 2009 y Baquero *et al.*, 2010).

La deposición se inicia con unos conglomerados basales, durante un sistema transgresivo (TST), provenientes posiblemente de la erosión del Alto de Paraguaná, o del basamento Meso-Neoproterozoico expuesto de la Ensenada de La Vela, como lo expresa Baquero *et al.* (2010), mediante una comparación de las edades obtenidas del basamento perforado en los pozos P-12, P-13, P-17 y P-22, y de los zircones detríticos de la unidad conglomerática en el pozo P-4.

Posteriormente, se depositan carbonatos de un sistema de nivel alto (HST), los cuales, se caracterizan por tener más terrígenos en los pozos ubicados al sur y ser más limpios en los pozos ubicados al norte, pozos P-14, P-2, P-24 y P-29.

Su depositación, se ve interrumpida por un primer pulso compresivo, disminuyendo la subsidencia y por ende no hay espacio para acomodar, esto asociado a la transición del régimen tectónico extensivo que dominó durante el Paleógeno al régimen compresivo – transpresivo que prevalece durante el Neógeno, aproximadamente en el límite Oligo-Mioceno (Audemard, 1995), lo cual generó una discordancia (SB2) en el Mioceno Temprano, claramente identificable en la sísmica, donde persisten relaciones de solapamiento con los estratos superiores y truncamiento con los estratos inferiores.

La sísmica 3D, muestra que, el proceso de deposición de esta secuencia estuvo altamente influenciado por la tectónica, como ya se mencionó anteriormente, definido por dos sistemas de fallas (ver figura N°77). El primero, compuesto por dos

fallas normales con dirección este-oeste, ubicadas al norte y sur del cubo sísmico. Estas fallas están relacionadas con la dirección de las fallas asociadas a una fase rifting, durante un colapso orogénico, detrás de un arco de islas, teoría expresada por diferentes autores como: Audemard (1995, 1998), Mann (1999) y Porras (2000), para explicar el origen de la Cuenca de Falcón. Bajo esta teoría, todas las cuencas ubicadas costa afuera forman un mismo tren de cuencas alineadas, asociadas al Arco del Caribe (Toribio, 2012).

Dentro del segundo sistema de fallas, en el área se presenta una falla normal ubicada al este del cubo sísmico con buzamiento hacia el sur y con dirección SE-NO, presuntamente posterior a la formación del primer sistema de fallas, la cual genera la presencia de depósitos de edad Oligoceno –Mioceno Temprano, en el bloque deprimido de la falla, registrados en el pozo P-18, según BioStrat (2000). La dirección de esta, se asocia a la dirección de las fallas generadas durante la formación de la Cuenca de Falcón, durante una fase transtensiva, teoría planteada por diferentes autores como: Muessig (1984), Boesi y Goddard (1991), Macellari (1995).

Por su parte, Gorney *et al.* (2007), proponen tres fases tectónicas, para el NO de Venezuela, que contiene elementos de ambos modelos, identificando tres (3) familias de fallas normales: la familia 1, formada por fallas con rumbo este-oeste, de edad Eoceno-Oligoceno, las cuales soportan el intra-arco de la apertura de las cuencas de Falcón y Bonaire; la familia 2, compuesta por fallas con rumbo NO, de edad Oligoceno-Mioceno, que soportan el modelo pull-apart y la familia 3 compuesta por fallas inversas de edad Mioceno Medio-Plioceno. Por lo anterior, la familia más antigua controla las cuencas de Falcón y Bonaire, mientras que la familia 2 controla las cuencas de Aruba y Curazao. Esta área por ubicarse en la zona media, donde se establecieron los dos modelos, al sur de la Cuenca de Aruba y al norte de la Cuenca de Falcón, contiene ambos sistemas de fallas, por lo que pudiera ser visto como un área de interés tectónico, donde los dos modelos coexisten.

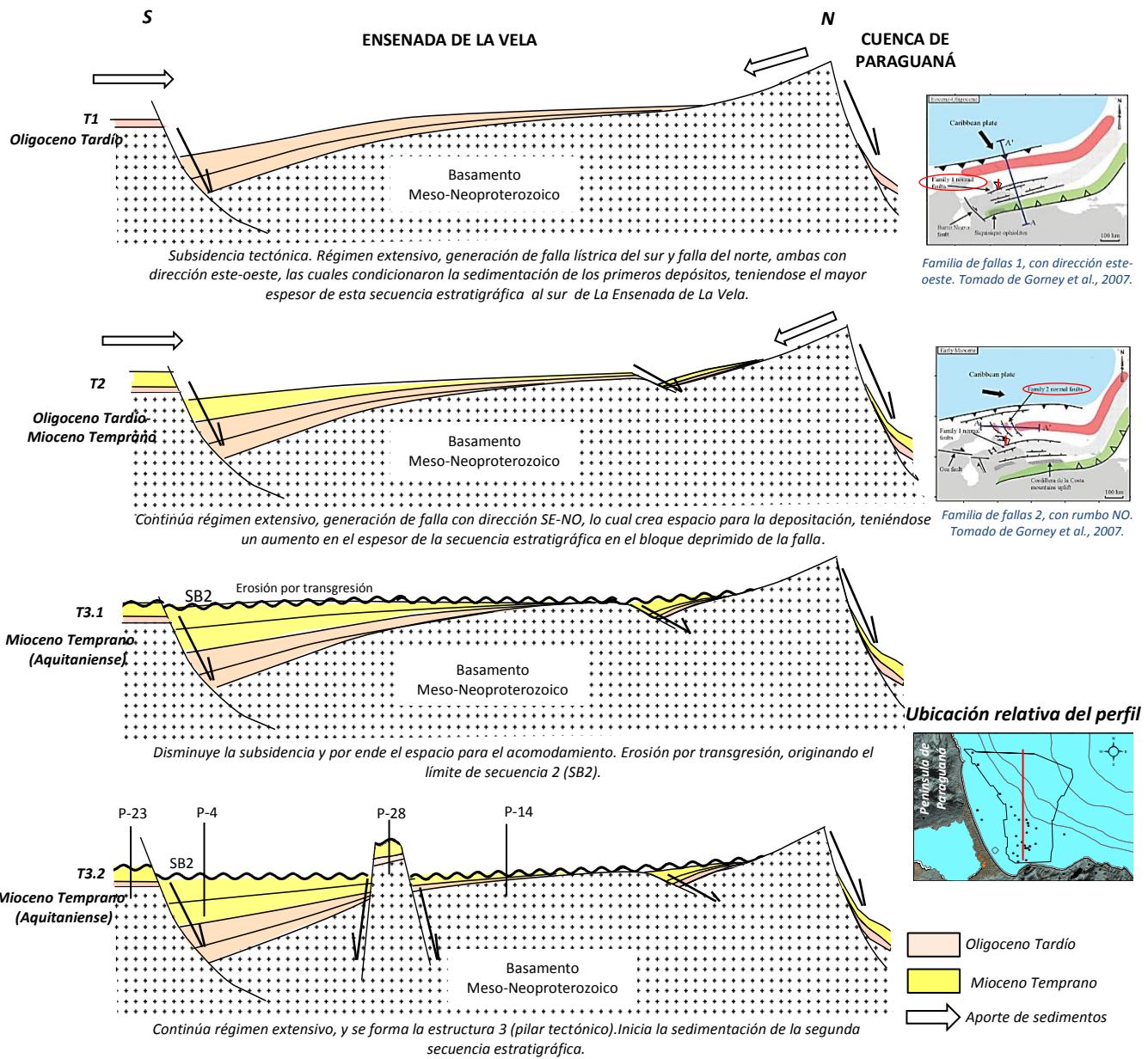


Figura N°77. Modelo esquemático-conceptual, donde se muestra la evolución tectono-estratigráfica de la secuencia A, durante el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Rueda, 2016).

5.7.2 SECUENCIA B (MIOCENO TEMPRANO - MEDIO)

Representa una secuencia de 2do orden, depositada durante el Mioceno Temprano (Burdigaliense) a Medio (inicios del Serravallense). Los efectos de la

tectónica de la Placa de Caribe y de los Andes comienzan a manifestarse desde el tope del Burdigaliense (Baquero *et al.* 2010).

La secuencia yace generalmente sobre la primera secuencia (SA), aunque hacia la zona centro-norte del cubo sísmico, puede encontrarse directamente sobre el basamento. Así, el límite inferior (SB2) de la unidad está representado por la discordancia del Mioceno Temprano (~21 Ma.) o la discordancia basal (SB1); y el límite superior (SB3) lo constituye la discordancia del Mioceno Medio (~13 Ma.), ambas de carácter angular. Esta secuencia se desarrolla durante un periodo bastante dinámico dentro de la configuración tectónica del Caribe Central, y en el cual, dentro de su registro sedimentario quedan grabados los indicios del comienzo de la inversión de la cuenca. Evidencias de esto se observan en la sísmica, donde se tienen fallas invertidas, plegamiento y basculamiento.

Con base en la interpretación sísmica, esta secuencia se encuentra definida por dos estructuras. La primera, es un bloque basculado con buzamiento hacia el sur, delimitado por el movimiento de la falla normal con dirección este-oeste, al norte del cubo y la segunda, es un pilar tectónico (estructura 3), con dirección NO-SE, que atraviesa de oeste a este el cubo sísmico, y sobre el cual se observa una disminución en el espesor de la secuencia (ver figura N°78).

Según los datos sedimentológicos y bioestratigráficos, los procesos depositacionales observados en este intervalo de tiempo sísmico, son característicos de ambientes de plataforma interna a media, generados durante la profundización de la cuenca. En los registros de pozos, se observa un predominio litológico sedimentos finos, donde en la base prevalecen carbonatos y lutitas que se intercalan con intervalos delgados de limolitas y areniscas muy finas. Los sedimentos finos comúnmente presentan abundancia de fragmentos de conchas, y se tienen minerales autigénicos como, caolinita, glauconita y fosfatos (según pozo tipo P-28), los cuales están asociados a un intervalo lutítico donde se ubica la superficie de máxima inundación que separa el sistema transgresivo (TST) del sistema de nivel alto (HST).

La tendencia depositacional que caracteriza esta secuencia, está fuertemente influenciada por el control tectónico. Inicia con un sistema transgresivo (TST), el cual predomina y finaliza con el desarrollo de depósitos asociados a sistemas de nivel alto (HST), los cuales son parcialmente erosionados por la acentuación de efectos tectónicos compresivos que generaron la inversión de la cuenca, lo que modifica el patrón sedimentario y evidencia la discordancia regional datada para el Mioceno Medio (SB3).

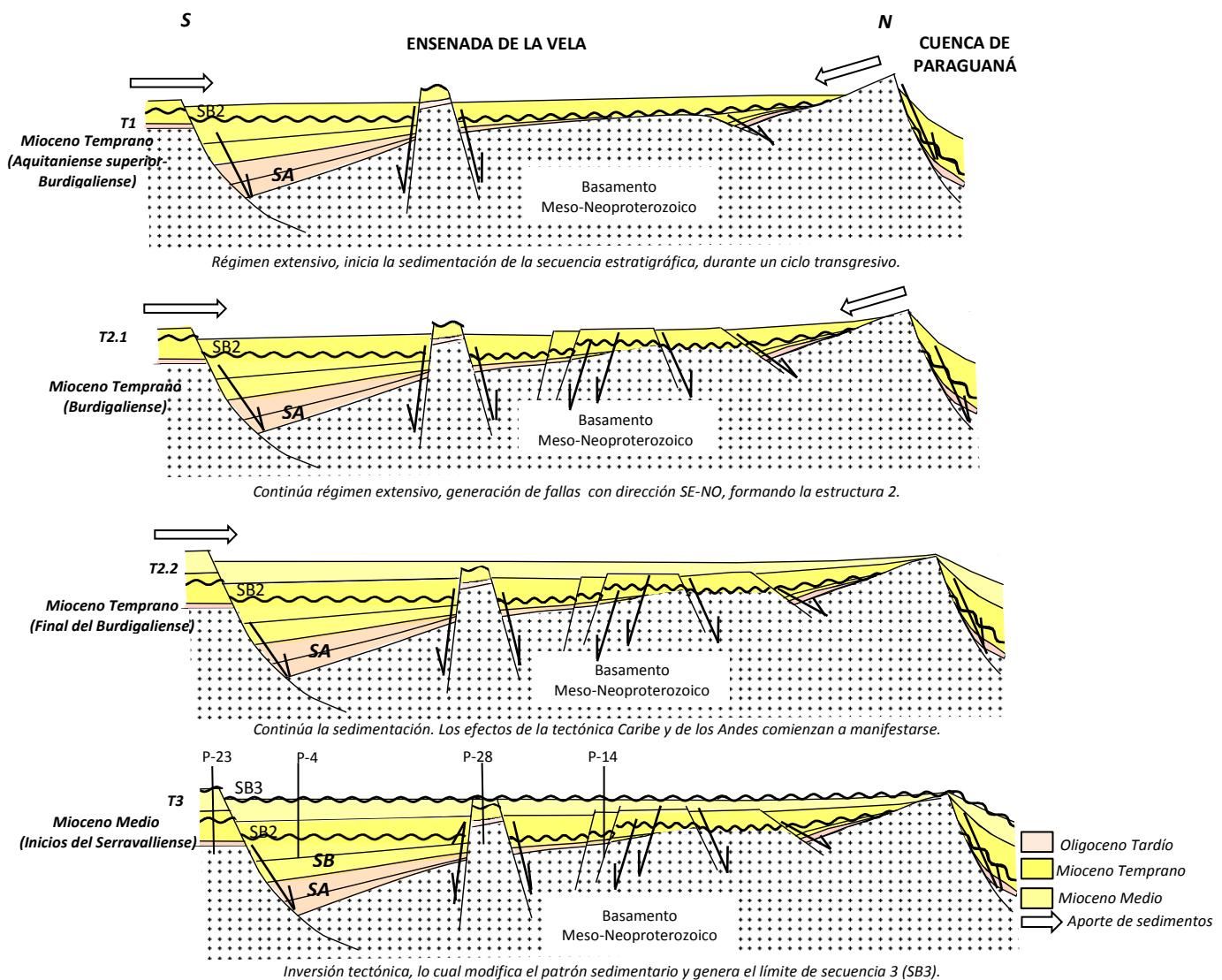


Figura N°78. Modelo esquemático-conceptual, donde se muestra la evolución tectono-estratigráfica de la secuencia B, durante el Mioceno Temprano-Medio (Rueda, 2016).

5.7.3 SECUENCIA C (MIOCENO MEDIO-TARDÍO)

Es una secuencia progradacional, de 2do orden, depositada durante el Mioceno Medio (Serravalliene) a tardío (inicios del Tortoniano), de ~13 a ~10 Ma. La sísmica y la interpretación de los registros de pozos muestran la presencia de una discordancia regional erosiva (SB4 ~13Ma) dentro de ésta secuencia, lo cual permite definir dos secuencias depositacionales de 3er orden; la primera (SC.1) de edad Mioceno Medio y la segunda (SC.2) depositada durante el Mioceno Medio a Tardío.

La secuencia estratigráfica C, se encuentra limitada por la discordancia del Mioceno Medio (SB3), en la base, que evidencia procesos tectónicos de inversión y levantamiento de la cuenca; y por la discordancia del Mioceno Tardío (SB5) al tope, producto de la erosión que generan zonas de canales y/o cañones submarinos, observándose truncamiento, principalmente al norte del cubo sísmico. Se depositó bajo un régimen dominado por movimientos transpresivos asociados al avance del frente de deformación andino (Porras, 2000) en el oeste y a la interacción entre las placas Caribe y Suramericana en el este (Ysaccis, 1997; Giunta, 2006).

Esta secuencia es descrita a partir de la sísmica, ya que la escasez de núcleos en este intervalo no permitió caracterizar los ambientes sedimentarios. En líneas generales, en los registros de pozos se muestra un predominio de facies lutíticas y calcáreas, intercaladas con intervalos arenosos. También se considera posible la existencia de condiciones más distales hacia el norte, debido a la reducción del espesor de la secuencia, la presencia de canales submarinos y de un abanico submarino, dentro de la secuencia estratigráfica SC.2 de 3er orden, ubicado al noroeste del cubo sísmico (figura N°54), el cual puede ser un importante objetivo para la prospección de hidrocarburos.

En la sísmica 3D, las dos secuencias estratigráficas de 3er orden, se muestran regionalmente, como sistemas depositacionales progradantes sobre una plataforma marina poco profunda (CVP, 1974). Posee una dirección de transporte NE, cuyos sedimentos provienen de zonas levantadas al SO del área de estudio, inducido por el

levantamiento andino. Al final del Mioceno Medio, el patrón de sedimentación de la Cuenca de Falcón cambia significativamente, como resultado de un rápido levantamiento asociado con el inicio de la inversión de la cuenca. Por tanto, surgieron áreas levantadas, las cuales aportaron considerable material sedimentario hacia el nuevo depocentro, ubicado al norte de la cuenca (Audemard, 1993, 1995 y 1998; Maceralli, 1995).

5.7.4 SECUENCIA D (MIOCENO TARDÍO- PLIOCENO TEMPRANO)

Esta secuencia fue depositada desde el Mioceno Tardío (Tortoniano) a inicios del Plioceno Temprano (Zancleano), corresponde a una secuencia estratigráfica de 2do orden, de ~10 a ~3 Ma.?

En los registros de los pozos, se muestran grandes intervalos de material clástico grueso, que irumpen sobre pequeños intervalos lutíticos, erosionándolos. De igual manera, las características observadas en pozos y sísmica, permiten determinar que el relleno sedimentario preservado durante este periodo posee características de sistemas agradacionales de nivel alto (HST), que posteriormente es interrumpido por sistemas depositacionales de nivel bajo (LST) y/o transgresivos (TST), los cuales solapan discordantemente sobre el sistema progradante precedente, generando el límite de secuencia (SB6) del Plioceno Temprano.

Hacia el norte del cubo sísmico, se observa una serie de canales alineados (figura N°56), posiblemente controlados por las fallas secundarias que cortan las secuencias someras, asociados a la reactivación de la falla normal este-oeste del norte. Estos canales tienen dimensiones considerables, y su base corta el sustrato infrayacente, generando una discordancia erosiva de menor orden y en ocasiones esa erosión afecta la secuencia estratigráfica anterior. Esta serie de paleocanales, al igual que en la secuencia estratigráfica SC.2, se sugieren como canales submarinos, algunos se presentan encajados y con facies de relleno principalmente paralelas, las cuales definen sedimentación de material fino en suspensión (Somoza, 1991).

Estos canales submarinos son característicos de sistemas depositacionales de nivel bajo y/o transgresivos (Catuneanu, 2008), que solapan discordantemente sobre el sistema progradante precedente.

La presencia de numerosas superficies de erosión y la dirección de los canales ubicados al norte del cubo sísmico, indican una dirección de sedimentación SO-NE, para este periodo.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas modernas de sísmica 3D, integrada con registros de pozos y núcleos, ayudaron a conocer la arquitectura estratigráfica de la sucesión sedimentaria Oligo-Mioceno, en un contexto cronoestratigráfico, lográndose interpretar seis (6) discordancias mayores, que están asociadas a eventos tectónicos importantes, y que definen los límites de las cinco (5) secuencias estratigráficas de 2do y 3er orden, establecidas. Sin embargo, el escaso registro de núcleos recuperados en los pozos y la discrepancia en los estudios bioestratigráficos, no permitió hacer interpretaciones de secuencias de menor orden y cortejos depositacionales, por consiguiente, las interpretaciones realizadas representan una generalización de las tendencias depositacionales a gran escala.

La sedimentación de las secuencias establecidas se encuentra poco influenciada por los ciclos eustáticos, son altamente influenciadas por la tectónica, principalmente las dos primeras secuencias estratigráficas (A y B), por lo que con base en la información cronoestratigráfica y en las interpretaciones de las estructuras y las secuencias depositacionales en el volumen sísmico, se realizó un modelo conceptual de la evolución tectono-estratigráfica de las dos primeras secuencias, el cual ayudó a comprender las relaciones entre las estructuras y la sedimentación.

Hacia el norte del área de estudio, se interpretan una serie de canales y/o cañones y abanicos submarinos, dentro de las secuencias más jóvenes, depositadas durante el Mioceno Medio- Plioceno Temprano, los cuales podrían representar nuevas oportunidades exploratorias en el Campo La Vela Costa Afuera.

Existe una relación entre el análisis de las secuencias establecidas en este estudio, la acción compresiva de la placa Caribe y el levantamiento Andino, responsables de la inversión de la Cuenca de Falcón, pues a partir del Mioceno Medio, predominan los ciclos regresivos, evidenciando un carácter progadante en las secuencias más jóvenes, observado en la sísmica, lo cual indica un mayor aporte, proveniente del SO de La Ensenada de La Vela, cuya dirección de transporte es comprobada por la orientación de los canales y/o cañones y abanicos submarinos.

Se identificaron dos sistemas de fallas que condicionaron la sedimentación de los primeros depósitos en el área de La Ensenada de La Vela: un primer sistema (más antiguo), con dirección este –oeste y otro con dirección SE-NW, direcciones que coinciden con la de las fallas planteadas en los dos modelos (pull-apart y orógeno en flotación detrás de un arco de islas) que explican el origen de la Cuenca de Falcón. Esta área por ubicarse en la zona media, donde se establecieron los dos modelos, al sur de la cuenca de Aruba y al norte de la Cuenca de Falcón, contiene ambos sistemas de fallas, por lo que pudiera ser visto como un área de interés tectónico, donde los dos modelos coexisten, esto es argumentado en Gorney *et al.* (2007), donde se proponen tres fases tectónicas, para el noroeste de Venezuela y que contiene elementos de ambos modelos.

Este estudio estratigráfico secuencial amarrado a datos bioestratigráficos, será el punto de partida para los estudios y correlaciones crono-estratigráficas en el área costa afuera.

6.2 RECOMENDACIONES

- ✓ El realizar un análisis de multi-atributos y reconocimiento automatizado de facies sísmicas, dentro de las secuencias estratigráficas establecidas en la presente investigación, ayudaría a establecer un modelo estratigráfico secuencial más detallado y preciso, y serviría para una mejor visualización y entendimiento de elementos a escala de yacimiento.
- ✓ Debido a la amplia relación que existe entre la tectónica y las secuencias estratigráficas, realizar un estudio de retrodeformación y balanceo de la sísmica 3D, sería de gran utilidad para completar el modelo de la evolución tectono-estratigráfica del área.
- ✓ A partir de este estudio, también se sugiere que los abanicos submarinos, identificados al noroeste del cubo sísmico, entre los límites de secuencia SB4 y SB6, podrían ser importantes objetivos de exploración en el futuro debido a que la profundización de las aguas y el espesor de sobrecarga ayudan a generar hidrocarburos. Se debe realizar un estudio detallado, ya que se pueden considerar como probables áreas prospectivas.
- ✓ La realización de análisis de secuencias, para otras áreas de la Cuenca de Falcón, ayudaría a argumentar la influencia de las pulsaciones de la orogénesis andina en la inversión de la Cuenca de Falcón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboud, J. y aboud, N. (1978). *Interpretación sísmica del área de la Ensenada de La Vela*. Reporte Corpoven No. E.P.C. 10856. (Inédito).
- Albertini, R. y Zulli, D. (2014). *Análisis estratigráfico secuencial de la Fm. Oficina, ubicada en la dirección Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Arnstein, R., Gámez, H., y Monroy, Z. (1983). *Informe bioestratigráfico*. Informe técnico CORPOVEN, p. 7. (Inédito).
- Audemard, F. (1993). *Néotectonique, sismotectonique, et aléa sismique du nordouest du Venezuela: système de failles d' Oca-Ancon*. Tesis Doctoral, Montpellier, Francia: Université Montpellier II.
- Audemard, F. (1995). *La Cuenca terciaria de Falcón, Venezuela noroccidental, síntesis estratigráfica, génesis e inversión tectónica*. Caracas: IX Congreso Latinoamericano de Geología.
- Audemard, F. (1997). *Tectónica activa de la región septentrional de la Cuenca Invertida de Falcón, Venezuela Occidental*. Porlamar: Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano. Sociedad Venezolana de Geología, Tomo I, pp. 93-100.
- Baquero, M., Acosta, J., Kassabji, E., Zamora, J., Sousa, J., Rodríguez, J., Grobas, J., Melo, L. y Schneider, F. (2009). *Polyphase development of the Falcón Basin in northwestern Venezuela: Implications for oil generation*, Geological Society, London, publicación especial, 328, pp. 587-612.
- Baquero, M., Silva, M., Varela, D., Bastos, P., Romero, F., Torres, A., Itriago, A., Daza, J., Boesi, T., y Benavides, J. (2010). *Proyecto de Generación de oportunidades (PGO) Falcón Oriental*, PDVSA. (Inédito).
- Baquero, M., Cordani, K., Urbani, F., Grande, S. y Mendi, D. (2011). *Geocronología del basamento del noroccidente de Venezuela: basados en nuevos datos de U-Pb zircón en LA-ICP-MS*. Revista GEOS, 41, pp. 16-19.
- Baquero, M. (2015). *Evolución geodinámica del noroccidente de Venezuela, basado en nuevos datos de Geocronología, geoquímica e isotópicos*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- BIOSTRAT. (2000). *Core description, petrography, SEM y XRD analyses of cores from 22 wells, La Vela block, Falcón basin, Venezuela*. Informe, Phillips Exploración de Venezuela L. L. C. (Inédito).

- Boesi, T. y Goddard, D. (1991). *A new geologic model related to the distribution of hydrocarbon source rocks in the Falcón basin, northwestern Venezuela*. AAPG Special Volumes, 52, pp. 303-319.
- Cabrera, E. (1985). *Evolución Estructural de Falcón Central*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Carnevalli, J., y otros. (2000). *Proyecto de Exploración por hidrocarburos Costa Afuera de Venezuela (P.E.C.A.)*: C.V.P. Exploración. Reporte interno PDVSA. Caracas, Venezuela. (Inédito).
- Case, J.E., Holcombe, T.L. y Martin, R.G. (1984) *Map of geologic provinces in the Caribbean region*, en (W.E. Bonini, R.B. Hargraves y R. Shagam), Geological Society of America, Memoir 162, pp. 1-20.
- Catuneanu, O. (2006). *Principles of Secuence Stratigraphy*. Primera edición, Elsevier B.V., 375 p.
- Catuneanu, O. (2009). *Towards the standardization of sequence stratigraphy*. Elsevier B.V., 33p.
- Chigne, N. (1980). *Consideraciones Geológicas y Evaluación Exploratoria del Pilar Tectónico en la Ensenada de La Vela*. Informe de Corpoven, S.A. (Inédito).
- Coniglio, M., y Dix, G. R. (1992). *Carbonate slopes. En Facies Models: Response to Sea Level Change* (R. G. Walker and N. P. James, Eds.), Asociación Geológica de Canadá, GeoText 1, pp. 349–373.
- Contreras, J., Puerta, A., Jouval, J., Mata, L., Rosa, J., y Discepola, P. (2010). *Informe integrado bioestratigráfico y sedimentológico PGO Falcón Oriental, PDVSA*. (Inédito).
- Corporación Venezolana de Petróleo (CVP). (1974). *Evaluación Geofísica y Geológica*. Reporte Maraven N° E.P.C. 10939. (Inédito).
- CORPOVEN, S.A. (1980), *Área mayor de la Vela, síntesis geológico-geofísica y futuras acciones*. (Inédito).
- Christie-Blick, N. (1991). *Onlap, offlap, and the origin of unconformity bounded depositional sequences*. Marine Geology, Vol. 97, pp. 35–56.
- Díaz de Gamero, M. L. (1977). *Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno Inferior del centro de la Cuenca de Falcón, Venezuela*. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Revista GEOS 22, pp. 2-55.

Díaz de Gamero, M. L. (1989). *El Mioceno Temprano y Medio de Falcón septentrional*. Aniversario Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Revista GEOS, 29, 50, tomo 22, pp. 2-50.

Díaz de Gamero, M. L., Giffuni G. y Castro, M. (1997). *Las formaciones Caujarao y Turupía al este de Cumarebo, Falcón nororiental*. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geología, Vol. 22, pp. 56-64.

Duarte, A. (2011). *Modelado estratigráfico y sedimentológico de las unidades “R” y “F” pertenecientes a la Formación Oficina en el Campo Aguasay Central, Cuenca Oriental de Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Emery, D. y Myers, K. (1996). *Sequence Stratigraphy*. Oxford, U. K., Blackwell, p. 297.

Falcón, R. (2011). *Curso de estratigrafía de secuencias*. Presentación de clases, Universidad Central de Venezuela.

Feo-Codecido, G., Smith, F. D., Aboud, N., Digiacomo, E. (1984). *Basement and Paleozoic rocks of the Venezuelan llanos basins*. En: BONINI, W. E., HARGRAVES,R.B.&SHAGAM, R. (eds) *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. Geological Society of America, 162, pp. 175–187.

Ghosh, S. K., Pestman, P., Mélendez. M., Truskowski, I. y Zambrano, E. (1997). *Evolución Tectonoestratigráfica y Sistemas Petrolíferos de la Cuenca de Falcón, Venezuela Noroccidental*. VIII Congreso Venezolano, Sociedad Venezolana de Geología, Tomo I, pp. 317–329.

Ghosh, S. K., Pestman, P. y Truskowski, I. (1998). *Paleofacies en la cuenca de Falcón y sus implicaciones sobre el sistema petrolífero*. PDVSA, p. 16.

Gonzalez de Juana, C., Iturridé, J. y Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Tomo I y II. Caracas, Ediciones Foninves.

Gorney, D. (2005). *Chronology of Cenozoic Tectonic Events in Western Venezuela and the Dutch Antilles Islands Based on Integration of Offshore Seismic Reflection Data and Onland Geology*. University of Texas at Austin. Tesis de maestría, p. 103.

Gorney, D. y otros. (2007). *Chronology of Cenozoic tectonic events in western Venezuela and the Leeward Antilles based on integration of offshore seismic reflection data and on-land geology*. AAPG Bulletin, 91 (5), pp. 653-684.

Grande, S., Urbani, F. y Mendi, D. (2009). *Presence of high-grade rocks in NW Venezuela of possible Grenvillian affinity*. Universidad Central de Venezuela.

Grande, S. (2012). *Terreno Falconia: bloque alóctono neoproterozoico en el NO de Suramérica*. Universidad Central de Venezuela. Revista GEOS 42, pp. 56-59.

Hunt, D. y Tucker, M. (1993). *Sequence stratigraphy of carbonate shelves with an example from the mid-Cretaceous (Urgonian) of southeast France*. In *Sequence Stratigraphy and Facies Associations* (H. W. Posamentier, Summerhayes, C. P., Haq, B. U., and Allen, G. P. Eds.). Asociación Internacional de sedimentología, publicación especial, pp. 307–341.

Hunter, V. F., (1974). *The mid-Tertiary stratigraphic unit of the southern Caribbean area, in P. Jung, ed., Contributions dedicated to the geology and paleobiology in the Caribbean and adjacent Area*. The Kugler Volume: Naturforschende Gesellschaft Basel, Verhandlungen, V. 84, pp. 172–190.

James, N. P., y Kendall, A. C. (1992). *Introduction to carbonate and evaporite facies models*. En *Facies Models: Response to Sea Level Change* (R. G. Walker and N. P. James, Eds.). Asociación geológica de Canadá, GeoText 1, pp. 265–275.

Jones, B y Desrochers, A. (1992). *Shallow platform carbonates*. En *Facies Models: Response to Sea Level Change* (R. G. Walker and N. P. James, Eds.). Asociación geológica de Canadá, GeoText 1, pp. 277–301.

Karolys, S. y Bastos, P. (2008). *Litoestratigrafía y Bioestratigrafía del área nororiental del estado Falcón*. PDVSA (Inédito).

Krause, F. (1996). *Caracterización Geológica de la Estratigrafía por Secuencias*. II. AAPG/SVG Curso No. 4, 133 p.

Léxico Estratigráfico de Venezuela, 3era. Edición (1997). Dirección general sectorial de SERVIGEOMIN, Caracas, 828 p.

Long, D. (1993). *Limits on late Ordovician eustatic sea-level change from carbonate shelf sequences: and example from Anticosti Island, Quebec*. En *Sequence Stratigraphy and Facies Associations* (H. W. Posamentier, C. P. Summerhayes, B. U. Haq and G. P. Allen, Eds.). Asociación Internacional de sedimentología, publicación especial, pp. 487–499.

Lorente, M.A., Noordermeer-Perreijn, E.J. y Nijssen L. (1982). *Late Tertiary Biostratigraphy of various Wells in Falcon, western Venezuela*. Informe Técnico Maraven, Caracas, Venezuela. (Inédito).

Macellari, C. (1995). *Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern Caribbean pull-apart basin, Venezuela and Colombia*. AAPG Memoirs, 62, pp. 757–780.

Mann, P. (1999). *Caribbean sedimentary basins: classification and tectonic setting from Jurassic to Present*. Sedimentary Basins of the World, pp. 3-31.

Margotta, J. (2010). *Análisis Tectonoestratigráfico del Área Caribe Central, Costa Afuera Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Caracas.

Mendi, D., Camposano, L., Urbani, F., y Baquero, M. (2005). *Petrografía de rocas del basamento del norte del estado Falcón*. Universidad Central de Venezuela. Revista GEOS 38, pp. 32–33.

Mitchum, R.M. JR., Vail, P.R. y Thompson III, S. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphic Analysis*. En C.E. Payton, Ed., Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration, AAPG Memoir 26, pp. 053-062.

Mitchum, R.M. JR., Vail, P.R. y Sangree, J.B. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences*. En C.E. Payton, Ed., Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 26, pp. 117-133.

Mitchum, R.M. JR., Vail, P.R. y Sangree, J.B. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Seismic Stratigraphic Interpretation Procedure*. En C.E. Payton, Ed., Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 26, pp. 135-143.

Muessing, K. (1984). *Structure and Cenozoic tectonics of the Falcón Basin, Venezuela, and adjacent areas*, Geological Society of America, 162, pp. Caracas, Venezuela, pp. 217-230.

Murat, B. y Azpiritxaga, Y. (1995). *Aplicación del análisis secuencial en los carbonatos del Cretácico de la Cuenca de Maracaibo*. Boletín SVG, 20 (1-2). pp. 7-29.

PHILLIPS PETROLEUM INTERNACIONAL CORPORATION VENEZUELA, (2000). *La Vela Costa Afuera: Reporte final de evaluación del proyecto*. Reporte interno, p. 58. (Inédito).

Pindell, J., Cande, S., Pitman, W., Rowley, D., Deway, J., Labrecque, J. y Haxby, W. (1988). *A plate kinematic framework for models of Caribbean evolution, Tectonophysics*, 155, pp. 121-138.

Porras, L. (2000). *Evolución tectónica y estilos estructurales de la región costa afuera de las cuencas de Falcón y Bonaire*. Memorias del VII Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Caracas, Venezuela.

Porras, J. (2003). *Estratigrafía secuencial del oligo-mioceno, Bloques Oritupano-Leona y Mata-Acema, área Mayor de Oficina, Cuenca Oriental de Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Posamentier, H., y Vail, P. (1988). *Eustatic controls on clastic deposition II—sequence and systems tract models*. In *Sea Level Changes—An Integrated Approach* (C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. St.C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross and J. C. Van Wagoner, Eds.), SEPM, publicación especial 42, pp. 125–154.

Pratt, B., James, N., y Cowan, C. (1992). *Peritidal carbonates*. En *Facies Models: Response to Sea Level Change* (R. G. Walker and N. P. James, Eds.), Asociación Geológica de Canadá, GeoText 1, pp. 303–322.

Rey, O. (1996). *Estratigrafía de la Península de Paraguaná, Venezuela*. Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, pp. 35–45.

Sarg, J. (1988). *Carbonate sequence stratigraphy*. En *Sea Level Changes—An Integrated Approach* (C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. St. C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross and J. C. Van Wagoner, Eds.), SEPM, publicación especial 42, pp. 155–182.

Sheriff, E. y Geldart L., (1995). *Exploration Seismology*. Sociedad sismológica de América. Texas, Estados Unidos, pp. 72-74.

Schlager, W. (1992). *Sedimentology and sequence stratigraphy of reefs and carbonate platforms*. Note Series #34, American Association of Petroleum Geologists, p. 71.

Schlager, W. (2002). *Sedimentology and Sequence Stratigraphy*. Vrije University, Amsterdam, Holanda, 148 p.

Schlager, W. (2005). *Carbonate Sedimentology and Sequence Stratigraphy*. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology # 8, p. 200.

Soto, G., Farías, A., Aparicio, M., Cabrera, L., y Cantos, G. (2012). *Estudio Bioestratigráfico, área costa afuera, estado Falcón*. Nota técnica, PDVSA- Intevep. (Inédito).

Sousa, J. y Rodriguez, J. (2003). *Estudio geológico estructural y geofísico de la sección Cabo San Román a Barquisimeto*. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Stephan J.F. (1977). *El contacto cadena Caribe-Andes Merideños entre Carora y el Tocuyo (Edo. Lara): observaciones sobre el estilo y la edad de las deformaciones cenozoicas en el occidente venezolano*. V Congreso Geológico Venezolano. Caracas, Venezuela, pp. 789-817.

Toribio, E. (2011). *Modelo geológico estructural 2D, integrando información de subsuelo y superficie, en la región central de la cuenca de Falcón-Costa Afuera*. Informe técnico Intevep, S.A. Los Teques, Venezuela. (Inédito).

Toribio, E. (2012). *Modelado estructural y retrodeformación, en la Cuenca Oriental de Falcón-Costa Afuera*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Caracas.

Tucker, M., Calvet, F., y Hunt, D. (1993). *Sequence stratigraphy of carbonate ramps: systems tracts, models and application to the Muschelkalk carbonate platforms of eastern Spain*. En *Sequence Stratigraphy and Facies Associations* (H. W. Posamentier, C. P. Summerhayes, B. U. Haq and G. P. Allen, Eds.). Asociación Internacional de sedimentología, publicación especial 18, pp. 397–415.

Vail, P., Mitchum, R., y Thompson, S. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part four: global cycles of relative changes of sea level*. AAPG Memoir 26, pp. 83–98.

Vail, P. (1987). *Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure*, AAPG Atlas of Seismic Stratigraphy: AAPG Studies in Geology N° 27, V.1, pp.1-10.

Van Wagoneer, J.C. y otros. (1987). *Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, part 2: Key definitions of secuence stratigraphy*, en A.W.Bally, ed., AAPG Atlas of Seismic Stratigraphy: AAPG Studies in Geology N° 27, V.1, pp.11-14.

Van Wagoneer, J.C. y otros. (1988). *An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions*, en C.K. Wilgus et al., eds., *Sea-level Change: an Integrated Approach*. SEPM, publicación especial 42, pp. 39-45.

Wheeler, C. B. (1960). *Estratigrafía del Oligoceno y Mioceno Inferior de Falcón occidental y Nororiental*. III Congreso Geológico Venezolano, tomo I, pp. 407-465.

Wheeler, C. B. (1963). *Oligocene and lower Miocene stratigraphy of western and northeastern Falcón basin, Venezuela*. AAPG Bulletin, V. 47, pp. 35–68.

Ysaccis, R. (1997), *Tectonic Evolution of the Northeastern Venezuela Offshore*, Ph.D. Dissertation Thesis, Rice University, Houston, Texas, U.S.A.

**[ANEXO A] SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA A-A', ORIENTADA SO-NE, EN EL
ÁREA DE LA ENSENADA DE LA VELA**

**[ANEXO B] SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA B-B', ORIENTADA OESTE-ESTE,
EN EL ÁREA DE LA ENSENADA DE LA VELA**

**[ANEXO C]: SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA C-C', ORIENTADA SE-NO, EN EL
ÁREA DE LA ENSENADA DE LA VELA**

**[ANEXO D]: SECCIÓN SÍSMICA NORTE-SUR, DONDE SE MUESTRAN LAS
SECUENCIAS ESTRATIGRÁFICAS DEFINIDAS EN EL ÁREA DE LA
ENSENADA DE LA VELA (A-D)**