

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**INTERPRETACIÓN SISMO ESTRUCTURAL DE LA
SECUENCIA SEDIMENTARIA DEL PARQUE NACIONAL
AGUARO GUARIQUITO, SECTOR OCCIDENTAL DE LA
FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Pabón M. Rafael A.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INTERPRETACIÓN SISMO ESTRUCTURAL DE LA SECUENCIA SEDIMENTARIA DEL PARQUE NACIONAL AGUARO GUARIQUITO, SECTOR OCCIDENTAL DE LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Yaraixa Pérez
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Juan Carlos Suárez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Pabón M. Rafael A.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2009

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 el Bachiller Rafael Ángel Pabón Manzano, titulado:

**“INTERPRETACIÓN SISMO ESTRUCTURAL DE LA SECUENCIA
SEDIMENTARIA DEL PARQUE NACIONAL AGUARO GUARIQUITO,
SECTOR OCCIDENTAL DE LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO”**

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

Prof. Adriana González
Jurado

Prof. Francisco Bolívar
Jurado

Prof. Yaraixa Pérez
Tutor Académico

Ing. Juan Carlos Suárez
Tutor Industrial

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso y a la Virgen María por darme la fortaleza y sabiduría necesaria para levantarme y seguir adelante en los tiempos difíciles.

A mi madre, Taís, por haber dedicado su vida a sus hijos, brindándonos todo su tiempo, amor y comprensión, y dándonos la mejor formación y educación como seres humanos. Esto no hubiese sido posible sin tu apoyo y compañía, ¡te amo! A mi padre, Rafael, por su paciencia, sus consejos, sus palabras de aliento y por ayudarme siempre que lo necesité.

A mis hermanos, Luis y Diego, por ser mis compañeros de crecimiento y aprendizaje y por estar al pie del cañón en las buenas y en las malas. A mi ahijado Sebas por haber llegado a alegrarnos la vida. A mi abuela Angela por todo su amor, cariño y consejo, que aún hoy continúo recibiendo. A mi abuelo Luis por hacerme reír todo el tiempo sin importar la situación. A mi abuelo Diego †, el gran Don Dei, por haber sido un ejemplo de vida, de hombre, de padre de familia, dedicación, cariño y respeto, y a mi abuela Tomasa † por haber sido un ejemplo de lucha y aceptación ante la adversidad; por siempre me lamentaré el que no hayan podido verme graduado. A todos mis tíos y primos por ser y formar tan bella familia.

A mi granlitir, Marinés, por ser la persona más dulce y comprensiva del mundo. Gracias por aparecer y darle rumbo a mi vida, y por brindarme tu amor, tu apoyo incondicional, tu paciencia; y por hacerme reír todo el tiempo. Esto es para ti también ¡Te amo!

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por sembrar en mi la semilla del conocimiento y por formarme como un hombre de bien y responsable con la sociedad. Gracias, Casa que vence las sombras.

A Yaraixa Pérez por haber aceptado ser mi guía en este camino sin haberme conocido anteriormente y por estar siempre pendiente de enseñarme a pesar de todas sus responsabilidades y ocupaciones.

A Juan Carlos Suárez, el pelon, por ser tan buen amigo como geólogo, geofísico y tutor. Gracias por la ayuda y la paciencia durante todo este proceso.

A PDVSA por haber financiado los gastos de este trabajo. Al Sr. Humberto Sánchez por haberme otorgado la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo este último año. A Jaime Sosa por su constante ayuda y por ser la llave que me permitió entrar en este proyecto. A Daniel Chramcow por todas las dudas aclaradas a lo largo de la tesis. A Héctor Rondón por su ayuda en los inicios del trabajo. A todas las personas del Área de Boyacá que de alguna u otra manera colaboraron en el desarrollo de esta tesis.

A los encargados de la carga de datos, en especial a Jimmy y a Enrique. A los dibujantes Ovidio Pérez y en especial Carlos Correa sin cuya disposición los mapas no hubiesen estado listos a tiempo. Al señor Adolfo Ninapaytan por su inmensurable colaboración en el ploteo de los mapas. A Yulisbeth por su apoyo desde RRHH.

A los 2 compañeros de lucha en este largo año, Juan Carlos Zamora y Milagros Rodríguez por todos los momentos de seriedad y de relajo que pasamos. Gracias por su amistad.

No me olvido de quienes ya hace un tiempo compartieron ese pequeño rincón de los salones de Geofísica conmigo. Mis buenos amigos Daniel, Werner, Bryson, Daniela, Héctor, el Dr. Brett, Marianne; gracias por siempre estar pendiente.

Y por último al grupo de amigos que más allá de todo siempre estamos y estaremos ahí. A las plagas; Gerardo, Luis, Orlando, Darwin, Cleiber, Rubén, Leo, Rafael José, Kareimi; gracias por ser como hermanos.

Pabón M., Rafael A.

**INTERPRETACIÓN SISMO ESTRUCTURAL DE LA
SECUENCIA SEDIMENTARIA DEL PARQUE NACIONAL
AGUARO GUARIQUITO, SECTOR OCCIDENTAL DE LA
FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO**

Tutor Académico: Prof. Yaraixa Pérez. Tutor Industrial: Ing. Juan Carlos Suárez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2009, 109 pp.

Palabras Claves: Interpretación sísmica estructural, Sismograma Sintético, Tiro de Verificación Sísmica, Velocidad, Fallas, Arco de El Baúl.

Resumen. El objetivo principal de este trabajo es realizar una interpretación sísmo-estructural hacia el Oeste del Área Boyacá de la Faja Petrolífera del Orinoco, específicamente en el Parque Nacional Aguaro Guariquito; con la finalidad de estimar la distribución espacial de las principales superficies erosivas presentes en la secuencia Cretácico-Terciario y así poder tener mayor comprensión de los rasgos estructurales en la Faja. En primer lugar se contabilizó, evaluó y validó la base de datos para determinar su confiabilidad antes de empezar la interpretación. Posteriormente se interpretaron los horizontes en tiempo y las fallas geológicas. Los saltos de falla calculados se encuentran en un rango de 60 pies a 400 pies, lo que concuerda con lo reportado por PDVSA en 1983. De los 32 pozos en total, 21 contaban con registro de Tiro de Verificación Sísmica por lo que se procedió a construir un sismograma sintético para cada uno, obteniendo el mejor ajuste en el pozo PQE-7-P con un 74% de correlación. A partir de las tablas Tiempo-Profundidad obtenidas se calculó la velocidad para cada uno de los pozos. Luego, para generar los mapas estructurales en profundidad de las superficies de interés se utilizaron los mapas de tiempo doble de viaje y los mapas de velocidades interválicas. El rasgo estructural más importante identificado en los mapas de profundidad es el Arco de El Baúl, representado por un anticlinal de orientación N50O, lo cual coincide con la descripción de éste, encontrada en la bibliografía. Este alto está afectando de manera mas determinante a las superficies del Cretácico y del Precretácico y el mismo representa una barrera ideal para el entrapamiento de hidrocarburo. Asimismo, se identificaron 2 grupos de fallas, uno principal de rumbo N75E que coincide con los sistemas de fallas principales en el área y uno secundario de N50O. Por último, se realizó la comprobación del modelo con la colocación de tres pozos que no fueron utilizados en el análisis de velocidades con el fin de determinar el error. El error para el pozo PQE-7-O fue menor a la resolución vertical en todas las interfases, lo que demuestra que el modelo funciona bien para los 4 mapas generados.

ÍNDICE

	PAG.
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
RESUMEN.....	VI
INDICE.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Ubicación del Área de Estudio.....	3
1.4. Justificación.....	4
CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO.....	5
2.1. Cuenca Oriental de Venezuela.....	5
2.2. Evolución Geodinámica y Tectónica de la Cuenca Oriental de Venezuela.....	6
2.2.1. Fase Prerift (Paleozoico).....	6
2.2.2. Fase Rift.....	8
2.2.3. Fase de Margen Pasivo.....	10
2.2.4. Sistema Rumbo-Deslizante y Comprensivo-Transprensivo	11
2.3. Rasgos Generales de la Faja Petrolífera del Orinoco.....	11
2.4. Principales Estructuras del área Boyacá.....	13
2.4.1. Arco de El Baúl.....	13

	PAG.
2.5. Síntesis Estratigráfica del Área Boyacá.....	15
2.5.1. Formación Hato Viejo (Cámbrico Temprano).....	15
2.5.2. Formación Carrizal.....	15
2.5.3. Formación Ipire (Jurásico Medio-Tardío).....	16
2.5.4. Formación Canoa (Cretácico Medio).....	16
2.5.5. Formación Tigre (Albiense-Santoniense).....	17
2.5.6. Formación La Pascua (Oligoceno Temprano).....	18
2.5.7. Formación Roblecito (Oligoceno).....	18
2.5.8. Formación Chaguaramas (Oligoceno-Mioceno).....	19
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	21
3.1. Interpretación Sísmica.....	21
3.1.1. Análisis Sísmico Secuencial.....	21
3.1.2. Análisis de Registros de Pozos.....	21
3.1.3. Amarre Sísmica-Pozo.....	22
3.1.4. Análisis de Facies Sísmicas.....	22
3.2. Sismograma Sintético.....	22
3.3. Coeficientes de Reflexión.....	24
3.4. Ondícula.....	25
3.5. Modelo Convolutacional.....	25
3.6. Tiempo de Viaje.....	26
3.7. Registro Sónico.....	27
3.8. Puntos de Verificación (<i>Check Shots</i>).....	29
3.9. Efecto de Entonación.....	30
3.10. Resolución Vertical.....	31
3.11. Estructuras y Fallas.....	32
3.11.1. Detección y cartografiado de fallas.....	32
3.11.2. Propagación de horizontes.....	33
3.11.3. Conversión Tiempo Profundidad.....	33

	PAG.
3.12. Estratigrafía Sísmica.....	34
3.13. Atributos Sísmicos.....	35
3.14. Terminaciones y Parámetros Sísmicos.....	35
 CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....	 37
4.1. Recopilación y Revisión Bibliográfica.....	37
4.2. Base de Datos.....	37
4.3. Carga de Registros.....	40
4.3.1. Rango de Variación de las Curvas.....	40
4.3.2. Generación de Registros de RHOB faltantes.....	44
4.4. Interpretación Sísmica.....	45
4.4.1. Corrección del Defase entre Líneas.....	50
4.4.2. Interpretación de Fallas.....	51
4.4.3. Interpretación de Horizontes y Generación de Mapas en Tiempo.....	52
4.5. Sismograma Sintético.....	55
4.5.1. Evaluación de las Curvas de Tiro de Verificación Sísmica.	56
4.5.2. Selección de Curvas, Aplicado de TVS y Obtención de Serie de Reflectividad.....	58
4.5.3. Obtención de la Ondícula para la Convolución.....	58
4.5.4. Ajuste entre el Sismograma Sintético y la Sísmica.....	60
4.5.5. Cálculo de la Resolución Vertical.....	61
4.6. Mapas de Velocidad.....	64
4.7. Mapas Estructurales en Profundidad.....	68
4.8. Comprobación del Modelo.....	68
 CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	 70
5.1. Sismograma Sintético.....	70

	PAG.
5.2. Interpretación Sísmica.....	74
5.2.1. Interpretación de Horizontes.....	74
5.2.2. Interpretación de Fallas.....	80
5.3. Mapas en Tiempo.....	82
5.4. Mapas de Velocidad.....	83
5.5. Mapas Estructurales en Profundidad.....	86
5.6. Comprobación del Modelo.....	90
 CONCLUSIONES.....	 92
RECOMENDACIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97
APÉNDICES.....	101

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
4.1.	Clasificación de las líneas sísmicas por levantamiento, parámetros de adquisición y procesamiento.....	39
4.2.	Inventario de Pozos con TVS y sus respectivos registros disponibles.....	42
4.3.	Rango de los registros de pozo.....	44
4.4.	Tabla tiempo-profundidad (tz) correspondiente al pozo PQE-6-D..	64
4.5.	Cálculo de la resolución vertical para el pozo PQE-7-O, correspondiente al levantamiento Z.....	65
4.6.	Cálculo de la resolución vertical para el pozo PQE-6-D, correspondiente al levantamiento M.....	65
4.7	Cálculo de la resolución vertical para el pozo PQE-7-O, correspondiente al levantamiento CH-81.....	66
5.1.	Porcentajes de correlación de los sismogramas sintéticos realizados en este trabajo.....	71
5.2.	Cálculo del error en los mapas estructurales para el pozo PQE-2-B.....	90
5.3.	Cálculo del error en los mapas estructurales para el pozo PQE-7-G.....	90
5.4.	Cálculo del error en los mapas estructurales para el pozo PQE-11-G.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.1.	Mapa de ubicación del área de estudio.....	3
2.1.	Cuenca Oriental de Venezuela.....	6
2.2.	Configuración regional del Paleozoico Tardío.....	7
2.3.	Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el Norte de Sudamérica.....	8
2.4.	Configuración regional del Triásico y Cretácico Temprano.....	9
2.5.	Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela.....	9
2.6.	Distribución de las facies sedimentarias dominantes al Norte del cratón de Guayana.....	10
2.7.	Desplazamiento de la Placa Caribe con respecto a la Placa Suramericana durante el Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano.	11
2.8.	Sección esquemática estructural de la Faja Petrolífera del Orinoco	12
2.9.	Principales estructuras de la Cuenca Oriental de Venezuela.....	14
2.10.	Sección geológica esquemática del Área Boyacá.....	20
3.1.	Esquema de generación de un Sismograma Sintético.....	24
3.2.	Herramienta sónica.....	28
3.3.	Operación de sísmica de pozo para registros de verificación sísmica.....	29
3.4.	Efecto de entonación.....	30
3.5.	Efecto de la resolución vertical.....	31
3.6.	Terminaciones sísmicas.....	36
4.1.	Diagrama de flujo de las actividades realizadas durante este trabajo.....	38
4.2.	Líneas sísmicas mostradas de acuerdo al levantamiento en el que se adquirieron.....	41
4.3.	Ubicación de los pozos dentro del área de estudio.....	43

Figura	Página
4.4. Esquema de los pasos tomados para realizar la interpretación sísmica de las líneas.....	45
4.5. Sección sísmica Z-720.....	46
4.6. Sección sísmica M-728.....	47
4.7. Sección sísmica CH-2D.....	48
4.8. Sección sísmica M-7S.....	49
4.9. Corrección del desfase existente entre las líneas.....	51
4.10. Metodología seguida para interpretar las fallas.....	52
4.11. Metodología de rizos y zigzag utilizada para la interpretación de horizontes.....	53
4.12. Sección estratigráfica entre los pozos PQE-10-C, PQE-6-B y PQE-6-D.....	54
4.13. Sección sísmica donde se muestran los marcadores guías.....	55
4.14. Flujo de trabajo utilizado en la obtención de los sismogramas sintéticos.....	56
4.15. Evaluación de las curvas de los Tiros de Verificación Sísmica para los pozos utilizados en la generación de los sismogramas sintéticos.....	57
4.16. Ondícula extraída de la sísmica de fase cero y frecuencia dominante de 20 Hz.....	59
4.17. Sismograma sintético del pozo PQE-6-D.....	62
4.18. Ubicación de los 3 pozos utilizados para el cálculo de la resolución vertical.....	63
4.19. Ubicación del pozo PQE-6-D, utilizado como modelo para la explicación del cálculo de las velocidades.....	67
4.20. Ubicación de los pozos sin Tiro de Verificación Sísmica, resaltando los 3 utilizados en la comprobación del modelo.....	69
5.1. Sismograma sintético del pozo PQE-1-A.....	72

Figura	Página
5.2. Sismograma sintético del pozo PQE-11-E.....	73
5.3. Sección sísmica M-728 interpretada en tiempo.....	75
5.4. Sección sísmica Z-720 interpretada en tiempo.....	76
5.5. Presencia de truncaciones contra el tope Precretácico.....	78
5.6. Presencia de terminaciones <i>onlaps</i> contra el tope Precretácico.....	78
5.7. Presencia de terminaciones <i>downlap</i> contra el tope Cretácico.....	79
5.8. Presencia de terminaciones <i>downlap</i> contra el tope Oligoceno.....	79
5.9. Mapa de fallas para el Precretácico.....	81
5.10. Mapa de Tiempo Doble de Viaje para el Cretácico.....	82
5.11. Mapa de Tiempo Doble de Viaje para el Precretácico.....	84
5.12. Mapa regional para Venezuela de Anomalía de Bouger.....	88
5.13. Mapa estructural del Precretácico georeferenciado al mapa de Anomalía de Bouger.....	89

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema.

La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) representa una de las reservas de hidrocarburos más grandes e importantes con las que cuenta nuestro país hoy en día. Como parte del desarrollo y crecimiento de la industria petrolera, PDVSA ha decidido llevar a cabo el Proyecto Orinoco: Magna Reserva. A través del cual se espera cuantificar y certificar dichas reservas de crudo. Los hidrocarburos presentes en esta zona son calificados como pesados y extrapesados, con el objetivo de aumentar su rentabilidad, éstos son procesados para disminuir su gravedad API y posteriormente convertirlo en hidrocarburo mediano, obteniendo así un mayor valor económico.

La interpretación de líneas sísmicas adquiridas a lo largo de la Faja durante las décadas de los años '70 y '80 representa una de las fases de este proyecto. Dentro del área Boyacá de la Faja Petrolífera del Orinoco se encuentra el Parque Nacional Aguaro Guariquito, sector donde existen levantamientos sísmicos que aún no han sido interpretados. La interpretación de estas líneas sísmicas permitirá amarrar al resto de la sísmica interpretada dentro del Área de Boyacá y tener una visión general de las estructuras regionales que predominan en la zona y de las formaciones presentes; lo que conllevaría a establecer con un mejor criterio las posibles ubicaciones de pozos exploratorios y de producción, así como también la mejor distribución de los mismos.

Por otra parte, se conoce que en el área de interés se encuentra un rasgo estructural característico y dominante, el cual, está representado por un alto conocido como El Arco de El Baúl. Se sabe que el mismo se extiende en una

orientación preferencial NNO y que es uno de los principales generadores de entrapamiento de crudo en el Área de Boyacá.

En vista de lo planteado anteriormente, se propuso realizar una interpretación sísmo-estructural de las líneas sísmicas 2D que se encuentran dentro del área del Parque Nacional Aguaro Guariquito con el fin de poder generar los respectivos mapas estructurales e identificar los principales rasgos de la zona.

Para este estudio se contó con una totalidad de 21 pozos con tiros de verificación sísmica, los cuales se ubican sobre o muy cercanos a líneas sísmicas 2D. Asimismo se trabajó con un total de 106 transectos sísmicos, para una cantidad de 3727 Km totales de sísmica.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Realizar una interpretación sísmico-estructural de la secuencia sedimentaria del área correspondiente al Parque Nacional Aguaro Guariquito del Área Boyacá, Zona Occidental de la Faja Petrolífera del Orinoco, a partir de levantamientos de sísmica 2D y registros de pozos.

1.2.2. Objetivos específicos.

- a) Realizar el control de calidad de los datos sísmicos.
- b) Calibrar las secciones sísmicas con los datos de pozos.
- c) Interpretar los horizontes sísmicos asociados a la secuencia sedimentaria.
- d) Identificar las principales fallas dentro de las secciones sísmicas.
- e) Generar los mapas en tiempo para cada uno de los horizontes.
- f) Construir el modelo de velocidades.

- g) Generar los mapas en profundidad para cada uno de los horizontes.
- h) Identificar y cartografiar el rasgo estructural dominante de la zona (Arco de El Baúl).

1.3. *Ubicación del área de estudio.*

El área de estudio abarca un total de 11.000 Km², y la misma comprende la frontera occidental del área Boyacá (Bloque 3 y parte de los Bloques 1, 2 y Norte), la parte Norte y central del Parque Nacional Aguaro Guariquito y parte de la región más occidental de la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO), hacia el Oeste del Parque Nacional (figura 1.1).

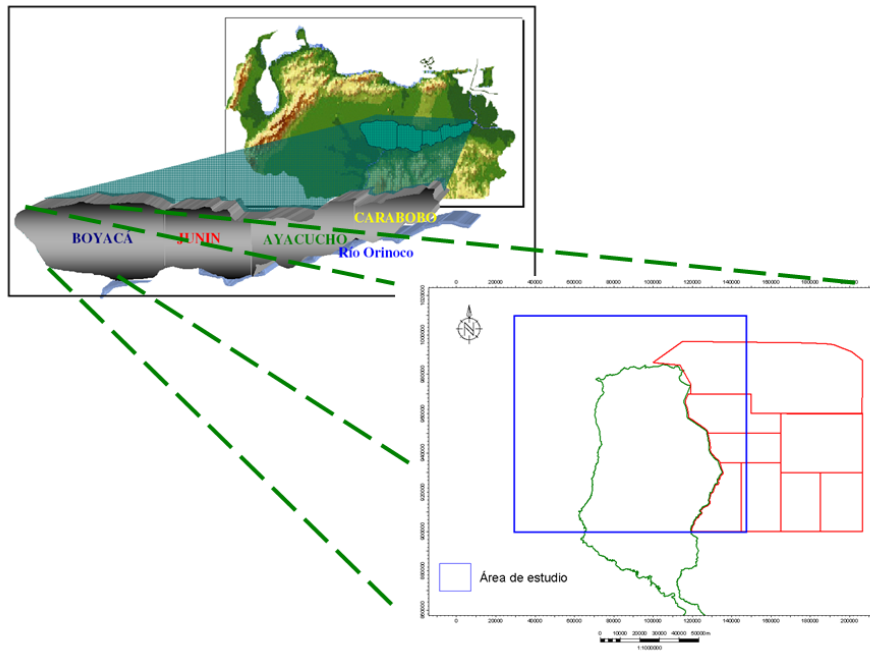


Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio.

1.4. Justificación.

A pesar de que la reciente recesión económica a nivel mundial llevó primeramente a fuertes bajas de precio del petróleo, el mismo ha mostrado una recuperación importante en tiempos recientes; debido a que la demanda internacional de hidrocarburos sigue siendo muy elevada. Por esta razón los países productores de crudo continúan invirtiendo y desarrollando tecnologías que los ayuden a mantener la producción de crudo, y a conseguir nuevos recursos a través de diversas campañas de exploración. En el caso de Venezuela, el proyecto más importante en la actualidad es la cuantificación y certificación de las reservas de crudo presentes en la Faja Petrolífera del Orinoco.

El estudio que se lleva a cabo a través de este trabajo de grado, permitirá conocer de una manera más detallada el comportamiento estructural de las formaciones presentes dentro del Parque Nacional Aguaro Guariquito, región más occidental de la FPO. Esto hará posible entender de una manera más precisa la evolución geológica del área, lo que permitirá tener mayor precisión a la hora de limitar posibles yacimientos, identificar zonas de entrapamiento y migración y/o proponer posibles ubicaciones de pozos. Además, logrará identificar en los mapas, la estructura más importante del área como lo es el Arco de El Baúl, el cual delimita por el Oeste a la Cuenca Oriental de Venezuela.

Por último, este trabajo contribuirá al estudio del modelo regional de la faja y servirá de referencia para estudios de interpretación sismo-estructural a realizarse en el futuro.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1. Cuenca Oriental de Venezuela.

La historia geológica de la Faja Petrolífera del Orinoco está estrechamente ligada con la historia geológica de la Cuenca Oriental de Venezuela. Esta cuenca forma una depresión topográfica y estructural, que comprende los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas, la extensión meridional del estado Sucre y el Delta Amacuro, y se prolonga hacia la Plataforma Deltana y el Sur de Trinidad, cubriendo un área aproximada de 170.000 Km² (Figura 2.1). Está limitada por el geotectoclinal de la Cordillera de la Costa al Norte, el Estado Guayana al Sur siguiendo la dirección del río Orinoco y al Oeste, está separada de la Cuenca de Barinas por el Arco de El Baúl (González de Juana et al., 1980).

Talwani (2002), afirma que entre los principales elementos estructurales de la cuenca se encuentran: el Corrimiento Frontal de Guárico, el Corrimiento de Anaco, el Sistema de Corrimientos Frontales de Anzoátegui y Monagas y el Sistema de Fallas del flanco Sur de la Cuenca.

De acuerdo a Di Croce en 1999, la Cuenca Oriental de Venezuela está subdividida en 2 subcuencas, la Subcuenca de Guárico hacia el Oeste y la Subcuenca de Maturín al Este. La interfase que separa las subcuencas de Guárico y Maturín de los plegamientos de la Serranía del Interior es el sistema de fallas de Urica; mientras que las subcuencas de Guárico y Maturín están separadas por el sistema de fallas de Anaco y sus estructuras asociadas.



Figura 2.1. Cuenca Oriental de Venezuela (Modificado de Hilla y Naval, 2005).

2.2. Evolución Geodinámica y Tectónica de la Cuenca Oriental de Venezuela.

La evolución geodinámica y tectónica de esta cuenca puede dividirse en 4 etapas (Parnaud, et al., 1995), que comprenden:

2.2.1. Fase Prerift (Paleozoico).

Esta megasecuencia tuvo lugar en el Paleozoico (figura 2.2) y está asociada a las formaciones Hato Viejo y Carrizal de la Subcuenca de Guárico, las cuales fueron depositadas en ambientes marinos costeros a neríticos.



Figura 2.2. Configuración regional del Paleozoico Tardío, nótese como todos los continentes estaban unidos y se comienzan a separar con el comienzo del drifting desde el este hacia el oeste (tomado de Hilla y Naval, 2005).

Los depósitos del Paleozoico presentes en esta fase (figura 2.3) han sido identificados en las bases de los registros sísmicos, donde se observa que los sedimentos de las Formaciones Hato Viejo y Carrizal son de un espesor muy delgado. La secuencia Paleozoica alcanza unos espesores de unos 1.5, 2 segundos (tiempo doble de viaje) lo que representa unos 3 a 5 Km, y no presentan rocas madres. (Talwani, 2002).

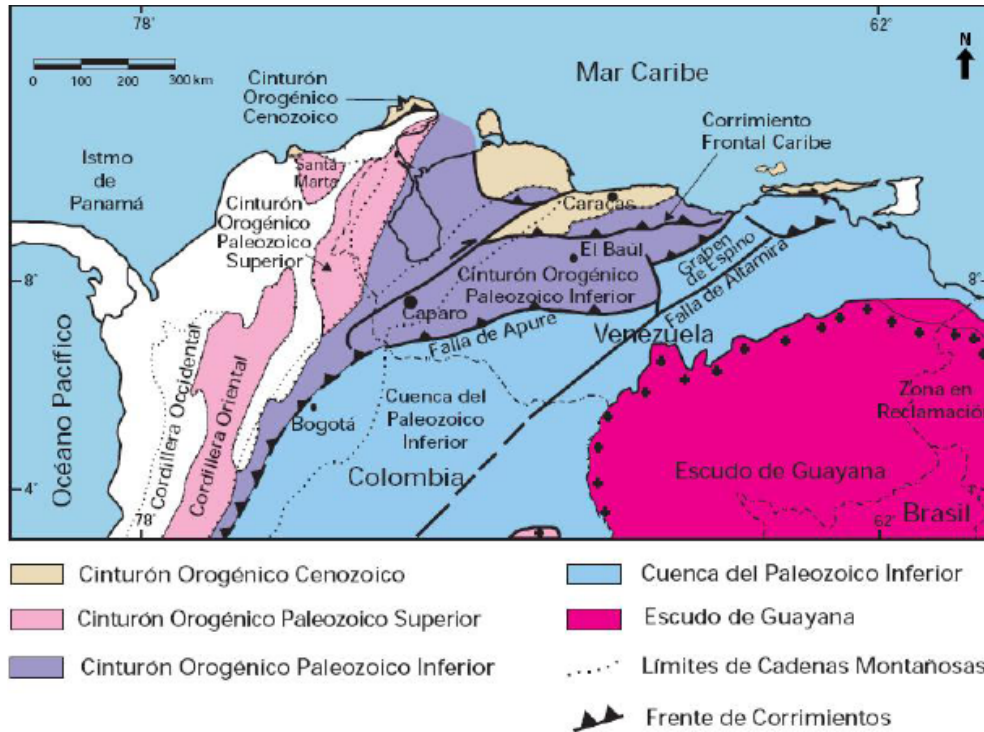


Figura 2.3. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el Norte de Sudamérica, en los cuales hay rocas Paleozoicas (tomado de Schlumberger, 1997).

2.2.2. Fase Rift.

Esta fase tuvo su origen durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano (figura 2.4). Cuando Norteamérica se separó de Gondwana se creó un sistema extensional que separó a Yucatán del Norte de la placa suramericana (Talwani, 2002). Esta fase está caracterizada por el levantamiento vertical del borde cratónico, actividad volcánica en el Macizo de El Baúl y por un largo período de erosión sobre la mayor parte de la Cuenca Oriental. La transgresión está bien representada por la sedimentación de clásticos y calizas marinas de la Formación Barranquín y la depositación hacia el Sur del Grupo Temblador con la Formación Canoa de ambiente continental. A su vez, está evidenciada en el basamento oriental de Venezuela por los basaltos y capas rojas del Jurásico Medio Temprano depositados en el Graben de Espino (figura 2.5). Durante esta fase el principal evento tectónico fue un sistema de fallas rumbo deslizantes o transformantes.

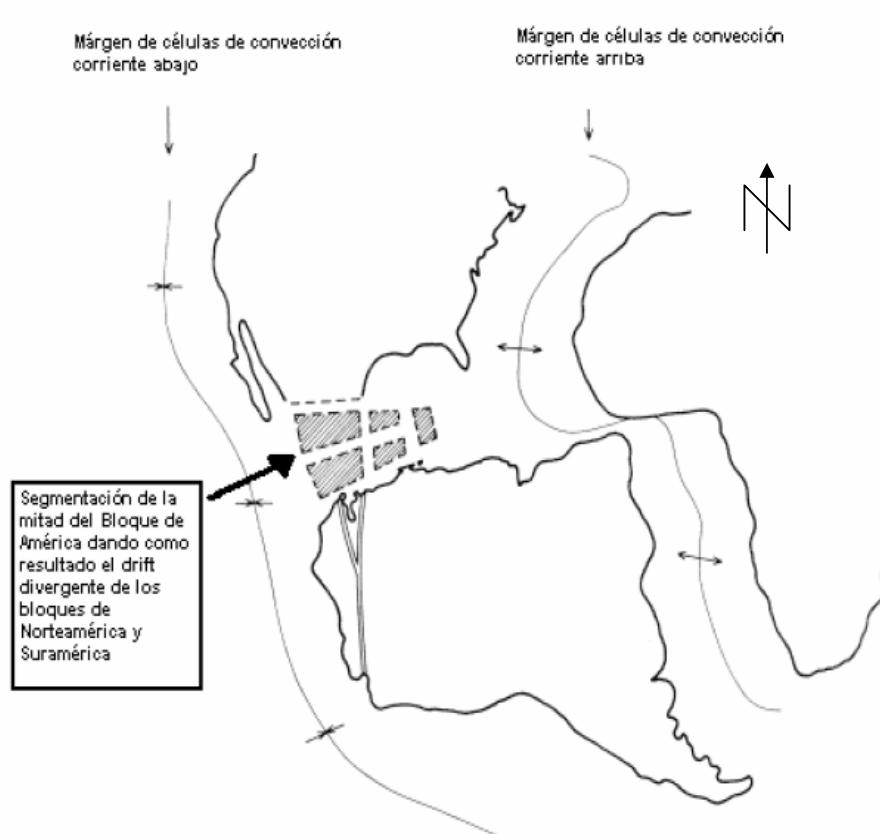


Figura 2.4. Configuración regional del Triásico y Cretácico Temprano (tomado de Hilla y Naval, 2005).

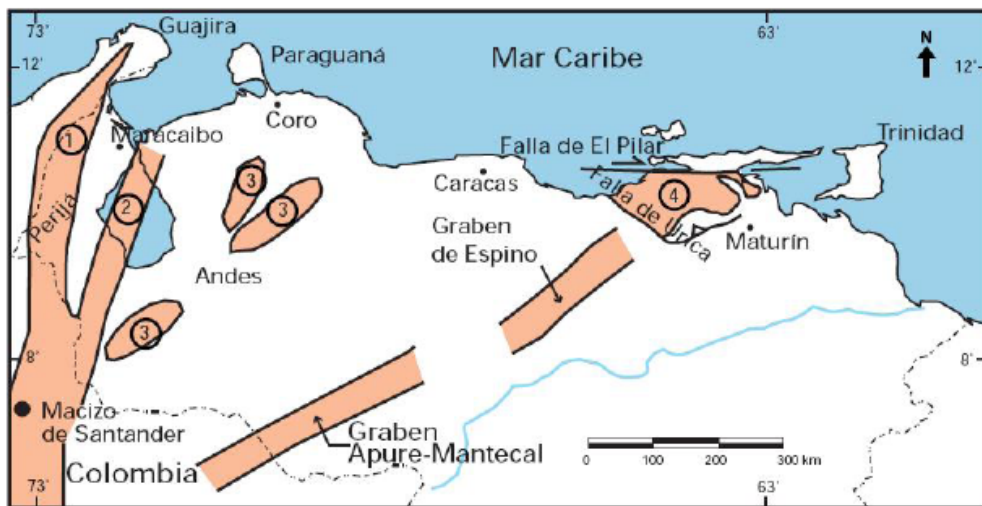


Figura 2.5. Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela (tomado de Schlumberger, 1997).

2.2.3. Fase de margen pasivo.

Esta fase está caracterizada por la subsidencia pasiva del margen Norte de Suramérica desde el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano hasta el Eoceno. Ésta comprende tres fases principales transgresivas observadas de Norte a Sur y que culminan durante el Turoniano, Paleoceno Temprano, Eoceno y Oligoceno respectivamente (Parnaud et al., 1995).

Durante este tiempo se depositaron entre 3 y 4 Km. de rocas clásticas, incluyendo gruesas capas de carbonatos del Cretácico Temprano. En esta fase también hay que destacar la depositación del material orgánico de las Formaciones Querecual y San Antonio, las cuales son rocas madres de petróleo pesado en la Faja (Talwani, 2002). Como puede observarse en la figura 2.6., en el área de estudio este período se caracteriza por la depositación del Grupo Temblador.

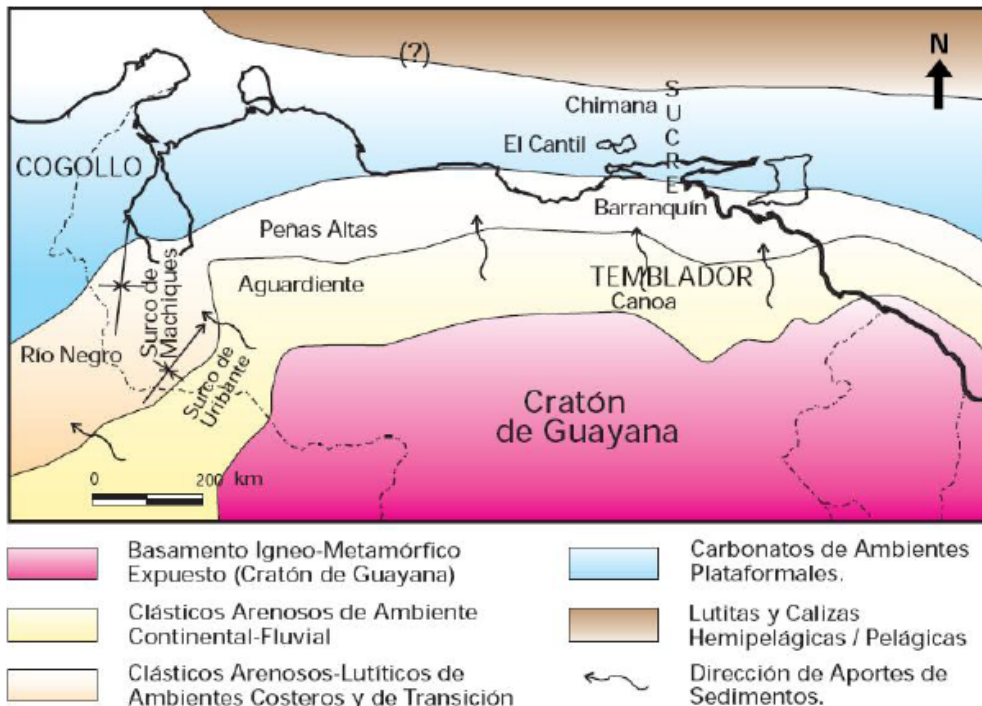


Figura 2.6. Distribución de las facies sedimentarias dominantes al Norte del cratón de Guayana (tomado de Schlumberger, 2007).

2.2.4. Sistema rumbo deslizante y compresivo transpresivo.

La colisión oblicua de la Placa del Caribe con la Placa Suramericana (figura 2.7), generó una Cuenca Antepais (*Foreland*). Los depósitos de esta Cuenca Antepais suprayacen a los de la etapa de margen pasivo, formando así sellos para el entrapamiento de hidrocarburos (Talwani, 2002). Como consecuencia de la carga litoestática generada por las napas formadas durante la colisión, ocurre una flexión isoestática de la litósfera, que provocó el levantamiento de la zona Sur de la Cuenca, exponiéndola a la erosión (Bartok, 2007).

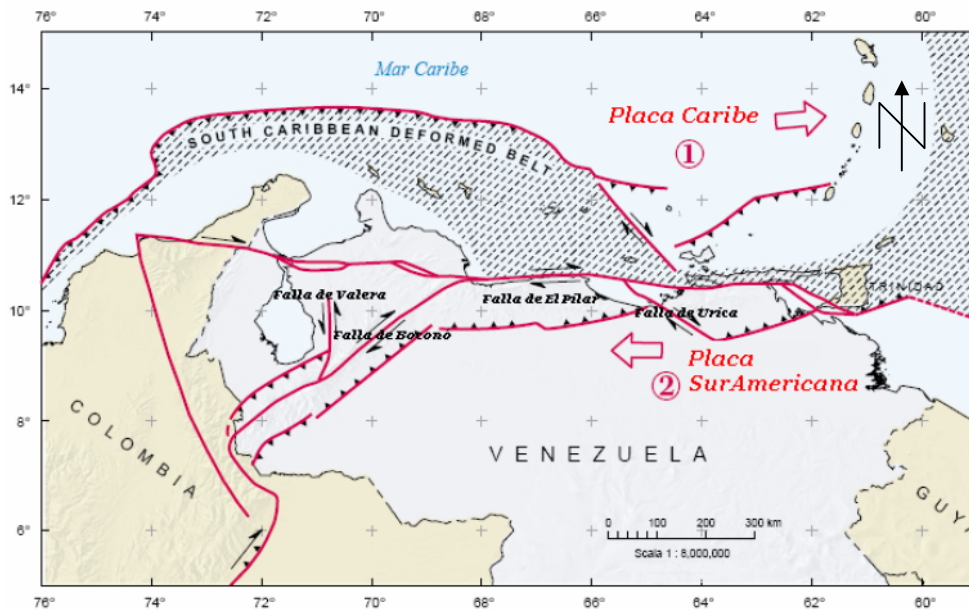


Figura 2.7. Desplazamiento de la Placa Caribe con respecto a la Placa Suramericana durante el Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano (tomado de Hilla y Naval, 2005).

2.3. Rasgos generales de la Faja Petrolífera del Orinoco.

La Faja Petrolífera del Orinoco está situada en el borde meridional de la Cuenca Oriental de Venezuela, y se extiende desde las cercanías de la ciudad de

Tucupita, Edo. Delta Amacuro, hasta inmediaciones de la ciudad de Calabozo en el Estado Guárico y la misma abarca un área aproximada de 55.300 Km².

Según Talwani (2002), la estructura de la Faja se describe como un homoclinal suave, con buzamientos de 3 a 4 grados hacia el Norte, cortado por fallas normales de rumbo predominante Noreste y un sistema más joven de dirección Noroeste. Los rasgos regionales predominantes permiten identificar dos provincias tectónicas separadas por el sistema de Fallas de Hato Viejo. La Provincia de Carabobo y Ayacucho, y la Provincia de Junín y Boyacá. En la figura 2.8 puede observarse una sección esquemática estructural de la faja.

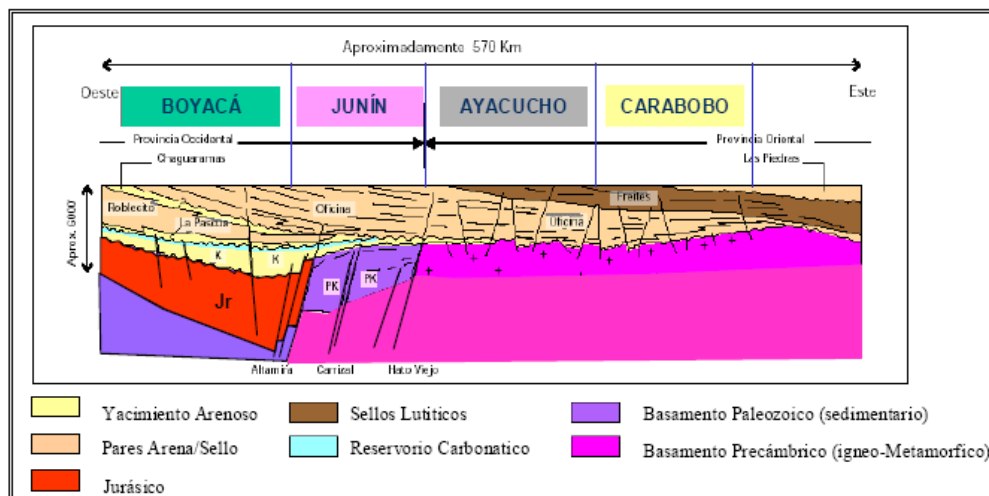


Figura 2.8. Sección esquemática estructural de la Faja Petrolífera del Orinoco (tomado de PDVSA, 2007).

Al Oeste del sistema de fallas, donde se ubica la zona de estudio, el Terciario yace de forma no concordante en secuencias delgadas de sedimentos del Cretácico y el Paleozoico, los cuales, fueron depositados en una depresión estructural profunda. Al Este, el Terciario yace sobre el basamento Precámbrico ígneo-metamórfico del Escudo de Guayana (Talwani, 2002).

2.4. Principales estructuras del Área Boyacá.

La Subcuenca de Guárico, desde el Paleozoico hasta el Cuaternario ha sido afectada por sucesivos movimientos tectónicos de intensidad variable durante su evolución geológica. Fuertes movimientos tectónicos originaron plegamientos, fallamientos e intrusiones ígneas. Se formaron dos sistemas de fallas normales, uno principal de orientación N67E con desplazamientos y extensión de gran magnitud, donde se destacan los sistemas de Altamira, Machete y Sabán Ruiz. El sistema secundario, de orientación N67O, está asociado con los sistemas primarios donde las fallas de Sabán y Altamira constituyen los límites del Graben de Espino (PDVSA, 1983).

Al comenzar la sedimentación de las Formaciones Cretáceas, la Cuenca se inclinó hacia el Norte, donde los depósitos del Cretácico alcanzan su máximo espesor. Por el levantamiento se reactivaron algunas de las fallas Paleozoicas principales, tales como Machete y Sabán Ruiz, y otras menores del sistema secundario. A su vez se formaron otras fallas normales siguiendo el mismo patrón de orientación. Al levantamiento lo siguió un fuerte período de erosión (Op. Cit.).

Luego, la Cuenca cambió de dirección antes del inicio de las sedimentaciones terciarias, hacia una orientación N25O, donde el Terciario alcanza su mayor espesor. Como consecuencia de la Orogénesis Andina, la cuenca basculó nuevamente hacia el Este reactivando algunas fallas del Paleozoico y otras del Cretácico, y permitió la formación de las fallas del Terciario (Op. Cit.).

2.4.1 Arco de El Baúl.

El rasgo estructural más característico dentro del área de estudio, es el Arco de El Baúl. Esta intrusión granítica de edad Paleozoica tardía (LEV III, 2009), tiene una orientación aproximada de N30O, es una ancha plataforma originada en el subsuelo del área de Espino, con una culminación estructural-topográfica en los afloramientos del área de El Baúl y continuando hacia

Calabozo y finalmente se conecta con el Estado Guayana en el área Este de Caicara del Orinoco (PDVSA, 1983).

Los resultados de interpretaciones anteriores, tanto de la sísmica como de los pozos, muestran que el Arco de El Baúl atraviesa el área Machete (ahora Boyacá) en dirección N30O, pasando cerca al pueblo Calabozo y uniéndose con el Escudo de Guayana cerca al pueblo de Caicara del Orinoco (PDVSA, 1992).

El Arco de El Baúl separa las cuencas sedimentarias terciarias de la Subcuenca de Guárico y Barinas-Apure y es el factor dominante que controla la ubicación de las grandes acumulaciones de crudos pesados y extra pesados del Área Boyacá. Todas estas acumulaciones se ubican en el Flanco Norte y la cresta del arco, extendiéndose un poco hacia el Flanco Suroeste pero sin llegar al acunamiento estratigráfico de las arenas terciarias del Flanco Sur de la Cuenca Barinas-Apure en su extensión dentro del Área de Boyacá (Op. Cit.). En la Figura 2.9 se observan los principales rasgos estructurales de la Cuenca Oriental de Venezuela, entre ellos el Arco de El Baúl (PDVSA, 1983).



Figura 2.9. Principales estructuras de la Cuenca Oriental de Venezuela, entre ellas el Arco de El Baúl, al Suroeste (tomado y modificado de Chramcow, 2008).

2.5. Síntesis Estratigráfica del Área Boyacá.

A la hora de interpretar los eventos sísmicos, es de relevante importancia conocer las características estratigráficas presentes en la zona de estudio. A continuación se describen brevemente las formaciones geológicas existentes en el área, incluyendo su descripción litológica, espesor, contactos, edades y ambientes.

2.5.1. Formación Hato Viejo (Cámbrico Temprano).

Según el LEV (2009), se sabe que esta formación se compone de areniscas de grano fino a grueso, ligeramente calcáreas e intercaladas con conglomerados. Representa el relleno de cuenca de una fase erosiva contemporánea o subsiguiente a alta actividad tectónica. Tiene un espesor máximo de 91 m y se encuentra en contacto discordante con el Escudo de Guayana y en contacto concordante con la Formación Carrizal.

2.5.2. Formación Carrizal (Cámbrico Temprano).

De acuerdo el LEV (2009), la Formación Carrizal está constituida por una espesa secuencia de arcilitas verdosas a gris oscuro, con algunas capas de limolita y areniscas. Hacia la base de la formación se han observado cuerpos de arena intercalados. Por registros de pozos, se ha medido un espesor de 1827 m, pero hay evidencias de que sea mucho mayor.

El tope de la Formación Carrizal es siempre erosional, cubierto por sedimentos precretácicos, correspondientes al Grupo Temblador o a la Formación Oficina. En su base suprayace a la Formación Hato Viejo. Las estructuras sedimentarias sugieren una depositación bajo ambientes marinos de aguas someras (LEV III, 2009).

2.5.3. Formación Ipire (Jurásico Medio-Tardío).

La litología tipo se caracteriza por una secuencia alternante de areniscas, arcosas, limolitas, lutitas y ocasionales intercalaciones conglomeráticas, de color marrón rojizo en distintas tonalidades, con ocasionales horizontes de color gris claro a verdoso. Los estratos arenáceos y arcósicos, frecuentemente presentan un cemento carbonático. Hacia el tope de la formación se halla intercalada una colada lávica de 113 m de espesor, conocido como el Basalto de Altamira (Op. Cit.).

En el pozo NZZ-88X se perforó un espesor total de 1540 m de sedimentos rojos. Esta formación yace en contacto erosional sobre la Formación Carrizal e infrayace en discordancia erosional a sedimentos cretácicos del Grupo Temblador, y la misma se depositó en un ambiente fluvial y lacustre (Op. Cit.)

2.5.4. Formación Canoa (Cretácico Medio).

Esta formación presenta conglomerados de grano fino y areniscas conglomeráticas, areniscas, limolitas y arcilitas generalmente moteadas con manchas grises, gris verdoso, amarillo, marrón, rojo, púrpura (Hedberg, 1950). Por su parte, Kiser (1987) describió a la Formación Canoa en el área de Machete (actual Área Boyacá) como arenas fluviales masivas, no consolidadas.

Con un espesor promedio de 90 m, acortándose hacia el Sur, esta Formación se acuña erosional y estratigráficamente contra el Escudo de Guayana y, aparentemente, se acuña estratigráficamente contra el Arco de El Baúl. La presencia de conglomerados y restos de plantas, sugiere su depositación en ambientes continentales (Hedberg *et al.*, 1947).

2.5.5. Formación Tigre (Albiense-Santoniense).

Esta formación está compuesta por los miembros La Cruz, Infante y Guavinita, descritos a continuación:

- (a) *Miembro La Cruz*: está constituido por un miembro inferior de areniscas lenticulares, caoliníticas, de grano grueso, con intercalaciones menores de lutita negra, carbonosa y fosilífera; y uno superior que se inicia con una lutita negra fosilífera y continúa con areniscas de grano fino, calcáreas y glauconíticas que presentan intercalaciones delgadas de lutita muy fosilífera (Patterson y Wilson, 1953).
- (b) *Miembro Infante*: está constituido por una caliza densa, compacta y fosilífera, gris, localmente glauconítica. Hacia el Sur y Noroeste se va haciendo más arenoso hasta convertirse en areniscas que no se pueden diferenciar de los miembros infra y suprayacentes (Patterson y Wilson, 1953).
- (c) *Miembro Guavinita*: está constituido por un intervalo basal lutítico de unos 15 m de espesor, seguido de intercalaciones de areniscas, lutitas, margas, calizas delgadas y ftanitas negras, todas con restos de peces y/o nódulos fosfáticos, con un espesor de unos 30 m (Patterson y Wilson, 1953).

El espesor promedio de esta Formación en el área de estudio es de unos 170 m. Su contacto inferior es diacrónico y transicional sobre los sedimentos continentales de la Formación Canoa (Patterson y Wilson, 1953). Su contacto superior es discordante, de carácter erosional, por debajo de la Formación La Pascua. Esta formación también se acuña con el Arco de El Baúl.

Según Cabrera y Villain (1987) la fauna encontrada en el Miembro Guavinita indica un ambiente de plataforma que varía hacia arriba desde la plataforma exterior a talud.

2.5.6. Formación La Pascua (Oligoceno Temprano).

La Formación La Pascua constituye un clástico basal asociado con la transgresión marina sobre una amplia extensión del norte de Venezuela. Mencher *et al.* (1953) describieron a La Pascua como areniscas y lutitas oscuras y algunos lignitos, que gradan hacia el Norte y Oeste a lutitas de la facies Roblecito. Isea (1987) reportó un espesor máximo de 137 m para el área de Machete (actual Área de Boyacá). Las tendencias de engrosamiento, la orientación NO-SE de los canales y el afinamiento de las areniscas hacia el Noroeste, indican una fuente de sedimentos en el Escudo de Guayana, aunque Peirson (1965) señaló una posible fuente en el Arco de El Baúl.

La formación descansa con discordancia angular sobre estratos cretácicos, o pre-cretácicos, peneplanados según el área. Su contacto con la suprayacente Formación Roblecito es transicional en sentido vertical y horizontal. Aparentemente, esta Formación se encuentra por encima del Arco de El Baúl, área de estudio de esta investigación.

2.5.7. Formación Roblecito (Oligoceno).

Patterson y Wilson (1953) describen la formación como la continuación de la depositación iniciada por la Formación La Pascua y predominantemente, una unidad de lutita marina que es transicional con las areniscas transgresivas de la Pascua y gradacional hacia arriba con las areniscas y lutitas menos marinas de la Formación Chaguaramas; con espesores de 460-580 m para la formación en el área mayor Las Mercedes.

El contacto La Pascua-Roblecito es transicional, tanto horizontal como verticalmente; en algunos pozos, las lutitas reemplazan totalmente a las areniscas de La Pascua. Igualmente, el contacto de Roblecito con Chaguaramas, en el subsuelo, es transicional sobre un intervalo relativamente corto. El ambiente

asociado a esta formación es de plataforma media a externa, con períodos de talud en el Oligoceno.

2.5.8. Formación Chaguaramas (Oligoceno-Mioceno).

Patterson y Wilson (1953) describieron la formación como una secuencia de arenisca-lutita-lignito. En el *Léxico Estratigráfico de Venezuela* (2009) se describe esta formación como una alternancia irregular de arenas, lutitas y lignitos, con arcillas y conglomerados de guijarros arcillosos. El espesor máximo de la Formación Chaguaramas en el área Machete (actual Área de Boyacá), varía entre 183 y 244 m adelgazándose por erosión hacia el este y sur (Isea, 1987). Kiser (1987) menciona un engrosamiento de las areniscas hacia la base de la Formación, lo que podría estar asociado a la cresta del Arco de El Baúl.

La Formación Chaguaramas es concordante y transicional sobre la Formación Roblecito. Isea (1987) considera que la Formación Chaguaramas corresponde al período regresivo que ocurre después del tiempo de la Formación Roblecito y que sedimentológicamente corresponden a unas barras de desembocaduras, interestratificadas con depósitos de pantano, relleno de bahías o bahías interdistributarias.

En la figura 2.10 se observa una sección geológica del Área Boyacá en dirección Este-Oeste, donde se puede observar la distribución de las formaciones previamente explicadas.

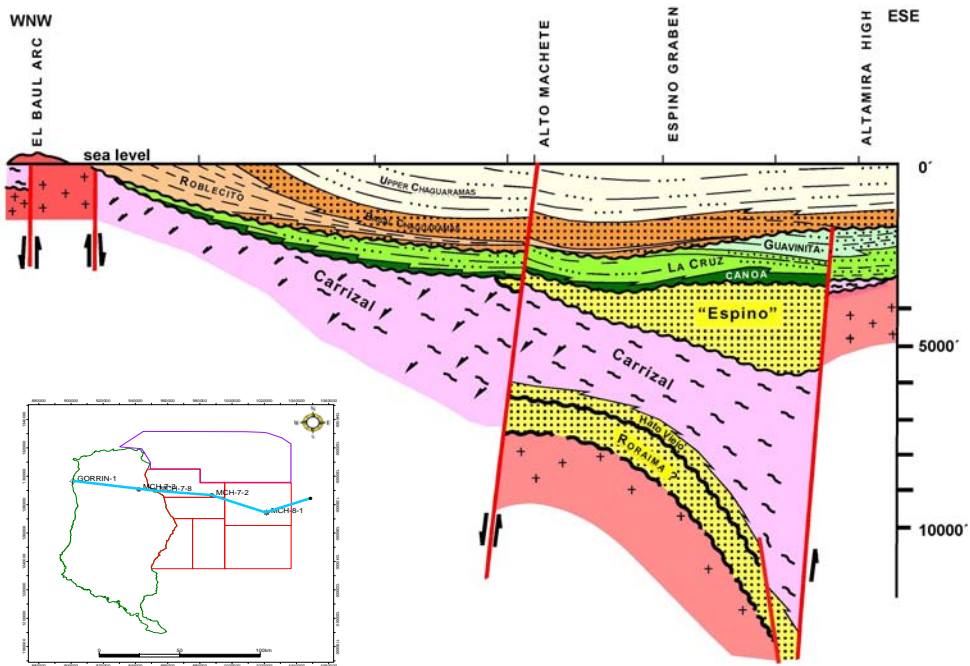


Figura 2.10. Sección Geológica Esquemática del Área de Boyacá (tomado y modificado de PDVSA, 2007).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. Interpretación sísmica.

Según Sheriff (2002) la exploración sísmica es el uso de distintas técnicas con el objetivo de cartografiar las estructuras presentes en el subsuelo y sus características geológicas y estratigráficas con la finalidad de localizar acumulaciones de petróleo, gas y otros minerales.

La interpretación sísmica es una fase clave dentro de las campañas de exploración y con la misma se busca sacar la mayor cantidad información posible de los datos, definiendo estilos estructurales por medio del estudio de la geometría de los reflectores de las secciones sísmicas (Liner, 2002).

Diversos autores, entre ellos Mitchum (1977) y Bally (1987) señalan que los aspectos más importantes dentro de un proceso de interpretación son:

3.1.1. Análisis Sísmico Secuencial.

En este paso se definen los paquetes de reflexión asociados a las secuencias sísmicas y a los sistemas encadenados; identificando las discontinuidades entre dichos paquetes a través de los patrones de reflexión (ver sección 3.14). Asimismo se determina la correlación de las edades geológicas en las secuencias sísmicas.

3.1.2. Análisis de Registros de Pozos.

Se realizan estimados preliminares de secuencias y sistemas encadenados interpolando litofacies depositacionales a partir de los registros de pozo calibrados

con núcleos y secciones finas. Estos estimados se verifican realizando la correlación (bioestratigráfica y cronoestratigráfica) de los marcadores de topes en los registros de pozos y por medio de los perfiles sísmicos.

3.1.3. Amarre Sísmica-Pozo.

En este paso se realiza el sismograma sintético, con los datos en profundidad de los pozos y los datos en tiempo de la sísmica. Además se busca conocer los distintos factores que causan la reflexión sísmica al entender los patrones de interferencia constructiva y destructiva de ondículas individuales que se originan en contrastes de impedancia. Este punto será explicado mas detalladamente en la sección 3.2.

3.1.4. Análisis de Facies Sísmicas.

En este paso se pretende determinar todas las variaciones posibles de los parámetros sísmicos dentro de las secuencias sísmicas individuales y sistemas encadenados con el fin de determinar cambios laterales de litofacies y tipo de fluidos.

3.2. Sismograma Sintético.

Un Sismograma Sintético es una de las formas variadas de realizar modelos predictivos de la respuesta sísmica del subsuelo y el mismo es un modelo unidimensional de una traza sísmica de *offset* 0 viajando a través de las capas del subsuelo (Pinto, 2007). Para realizar un sismograma sintético se supone que:

- (a) La fuente y el receptor coinciden con la localización del pozo.
- (b) El buzamiento geológico es cero.
- (c) El hoyo del pozo es vertical.
- (d) Las lecturas de velocidad, densidad y profundidad en los registros son precisas.

- (e) El campo de velocidad solo varía con la profundidad.

El Sismograma Sintético se obtiene de la convolución de la serie de reflectividad, obtenida de los registros de densidad, con la ondícula de la sísmica (Henry, 2000). Para poder realizar esto se debe conocer también el modelo de velocidad en función de la profundidad, el cual se obtiene principalmente a partir de los datos del Perfil Sísmico Vertical (VSP), Puntos de Verificación (*Checkshots*) y Registros Sónicos. El resultado final será una tabla que muestra la relación de valores de tiempo-profundidad. En la Figura 3.1 se observa el esquema general para generar un sismograma sintético.

Para Henderson (2008), pueden existir diversos problemas entre la traza sintética y los datos sísmicos debido principalmente a malas mediciones de la velocidad en el hoyo del pozo. Estos problemas son:

- (a) Problemas en el hoyo: los registros sónicos se ven perjudicados por problemas de zona lavada u otros, pudiéndose observar saltos cíclicos en el registro.
- (b) Anisotropía: en la realidad la energía de la onda no viaja verticalmente, sino que la misma tiene un componente horizontal que aumenta a *offsets* mas lejanos. Si el medio es anisotrópico la velocidad de la formación dependerá de la dirección de la propagación.
- (c) Dispersión: los registros sónicos son adquiridos a frecuencias medidas en KHz, mientras que los levantamientos sísmicos se adquieren a frecuencias menores de 120 Hz; lo que genera problemas de dispersión.
- (d) Herramienta de densidad: tiene muy poca tolerancia a los cambios de condiciones en la estabilidad del hoyo y en algunas ocasiones no es útil.
- (e) Atenuación: la reducción de amplitud de la onda compresional es probablemente la causa principal de registros acústicos de baja calidad. Algunas causas de atenuación son bajas velocidades de formación, alta porosidad, contenido de arcilla, fracturas, presencia de hidrocarburos, etc.

3.3. Coeficientes de Reflexión.

Los coeficientes de reflexión son la relación de la amplitud del desplazamiento de la onda reflejada, en función de la onda incidente; y vienen dados por la división entre la diferencia de impedancia acústica y la suma de impedancias acústicas como se ve en la fórmula 3.1.

$$R_i = \frac{\rho_{i+1}V_{i+1} - \rho_iV_i}{\rho_{i+1}V_{i+1} + \rho_iV_i}; \quad (3.1)$$

donde ρ = densidad del medio, V = velocidad del medio. Al calcular este coeficiente para todos los cambios de impedancias o interfases se obtiene la serie de reflectividad, lo que representa la ubicación y magnitud de los cambios litológicos en el subsuelo.

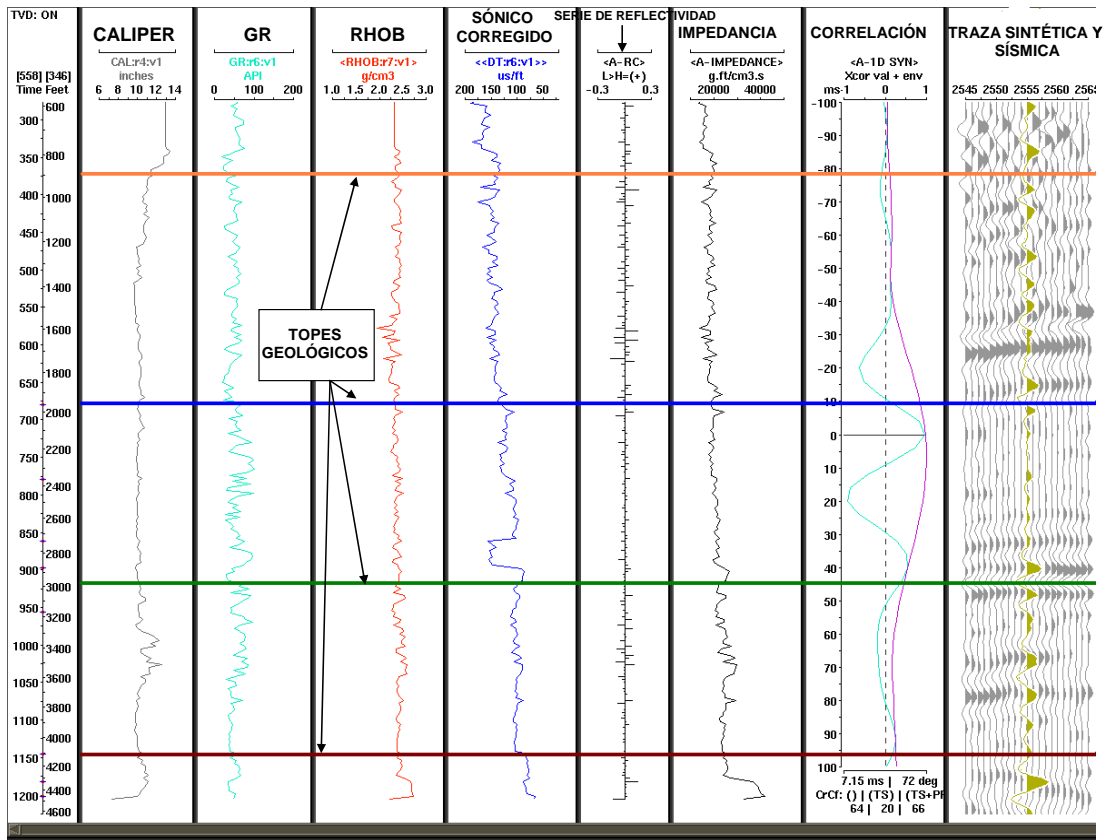


Figura 3.1. Esquema de generación de un Sismograma Sintético.

3.4. Ondícula.

Una ondícula es un pulso o señal la cual tiene un número pequeño de ciclos y donde predomina una amplitud. En la construcción del Sismograma Sintético, la selección de la ondícula adecuada representa un punto importante, ya que esta afectará directamente la calidad del ajuste de las secciones sísmicas con los datos del pozo. La ondícula se origina como un paquete de energía desde el punto fuente, teniendo un tiempo de origen específico, y siendo retornado a los receptores como una serie de eventos distribuidos en tiempo y energía. La distribución es función de los cambios de velocidad y densidad en el subsuelo y la posición relativa de la fuente y receptor. Estas ondículas pueden ser de fase máxima, mínima o cero, siendo esta última la recomendada para ser utilizada en la interpretación sísmica por las siguientes razones (Liner, 2004):

- (a) Son simétricas por lo que se obtiene una resolución vertical óptima.
- (b) Son bastante agudas (semejante a un pulso) debido a que los lóbulos laterales han sido minimizados.
- (c) Su amplitud pico se localiza en el centro de la ondícula.

En el caso de este trabajo se utilizó una ondícula fase cero extraída de la sísmica, como se verá en el próximo capítulo.

3.5. Modelo Convolutional.

Está referido al modelo unidimensional de la traza sísmica al paso de un frente de ondas plano viajando en sentido vertical descendente a través del subsuelo. A medida que el frente de ondas profundiza, se encuentra con cada interfase, la cual es representada en la traza sísmica por un pulso. Parte de la energía del frente de ondas se refleja y otra parte es transmitida al segundo medio continuando su descenso hasta la siguiente interfase (Hilla y Naval, 2005).

El modelo convolucional queda descrito entonces como la convolución entre la serie de reflectividad de la tierra y la forma de la onda u ondícula (la cual está dada por la fuente de energía utilizada para generar el frente de ondas) sumado a una componente de ruido.

De esta manera el modelo convolucional queda descrito por la siguiente ecuación (Ec. 3.2):

$$s(t) = w(t) * r(t) + n(t); \quad (3.2)$$

donde: $s(t)$ = traza sísmica

$w(t)$ = ondícula

$r(t)$ = serie de coeficientes de reflectividad

$n(t)$ = ruido

3.6. Tiempo de Viaje.

De acuerdo a Sheriff (2002) el tiempo de viaje viene dado por la fórmula 3.3:

$$Tiempo = \frac{d}{v} \Rightarrow \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} + \frac{d_3}{v_3} + \dots; \quad (3.3)$$

Para obtener el tiempo doble (TWT por sus siglas en inglés) se sustituye el doble de la distancia en la ecuación anterior y se obtiene:

$$TWT_1 = \frac{2h_1}{v_1}; \quad (3.4)$$

donde h_1 = espesor de la capa 1

v_1 = velocidad de la capa 1

Para el tiempo doble correspondiente a la segunda capa se calcula el tiempo doble en esta y se le suma el de la primera (fórmula 3.5).

$$TWT_2 = \frac{2h_1}{v_1} + \frac{2h_2}{v_2} = TWT_1 + \frac{2h_2}{v_2} \quad (3.5)$$

Generalizando para la n -ésima interfase se obtiene la fórmula 3.6:

$$TWT_n = TWT_{n-1} + \frac{2h_n}{v_n} \quad (3.6)$$

La ecuación anterior define los tiempos de reflexión asociados a cada una de las interfases o superficies, la cual ubica los puntos de cada una de estas superficies en el eje de tiempo donde se realizarán los cálculos del coeficiente de reflexión para la posterior construcción de la traza sintética.

3.7. Registro Sónico.

Es una herramienta de pozo que mide el tiempo de tránsito (lentitud) en la formación geológica. Se realiza a través de la medición del tiempo de tránsito de la onda cónica producida por refracción crítica en la formación geológica, donde el inverso de ese tiempo representa la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo a la profundidad en que se efectuó la medición. Su frecuencia de muestreo depende de la resolución vertical de la herramienta.

La curva de velocidad se obtiene a partir del registro sónico, el cual viene expresado en unidades de microsegundos por pie ($\mu\text{seg}/\text{pie}$), por lo que su inverso multiplicado por una constante de conversión, se transforma en velocidad expresada en metros por segundo (m/s) (Schlumberger, 1997).

La herramienta de medición (figura 3.2) consta de dos receptores, el lejano y el cercano, espaciados entre sí por 2 pies y una fuente que se encuentra a 3 pies

del receptor más cercano. La fuente genera un impulso de presión corto y oscilatorio de alrededor de 25 KHz sobre el lodo, lo que produce seis ondas: Compresional y de Cizalla, dos ondas Directas y dos Superficiales. Luego de activarse la fuente, el receptor cercano comienza a detectar la llegada de los diferentes frentes de onda, que más tarde llegan al receptor más lejano.

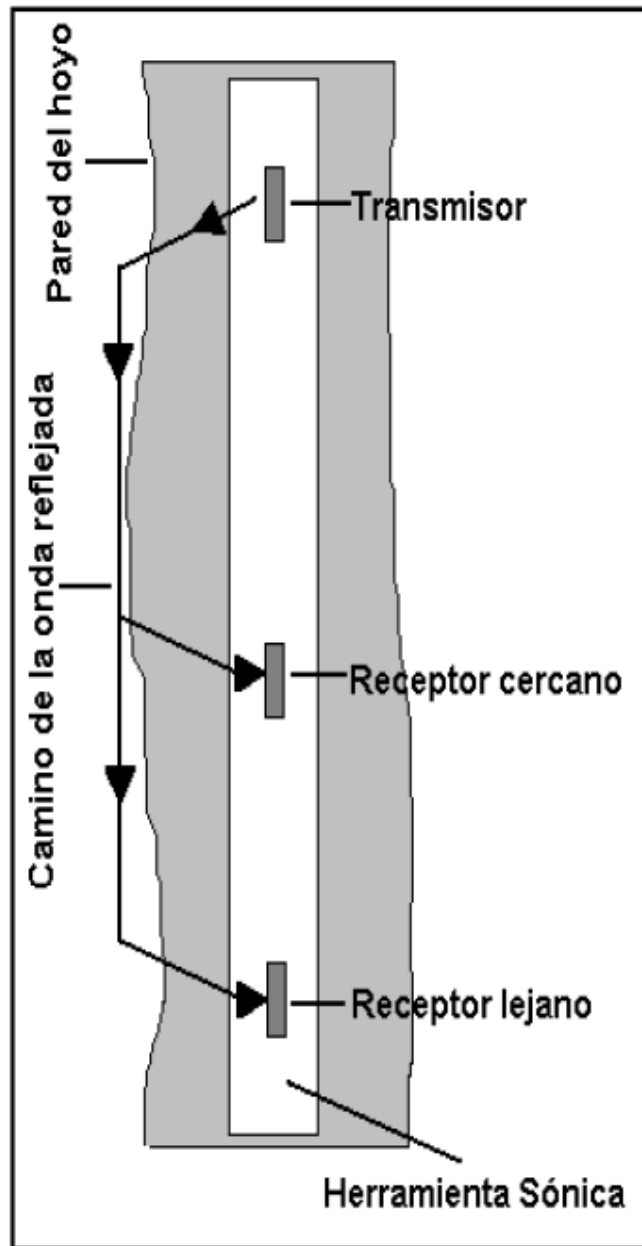


Figura 3.2. Herramienta sónica (tomado de Hilla y Naval, 2005)

3.8. Puntos de Verificación (Check Shots).

La toma de Puntos de Verificación es un método de prospección sísmica de onda directa con el fin de medir el tiempo de viaje de las ondas sísmicas desde una profundidad conocida hasta la superficie. Para ello se coloca la fuente en superficie y el sensor se introduce en el pozo para medir a distintas profundidades de interés (Sheriff, 2002). Con éstos se mide esencialmente el tiempo de llegada de la onda directa. De esta manera, si el registro se va haciendo a distintas profundidades se puede construir lo que se conoce como una tabla T-Z. En la figura 3.3 se puede observar el esquema de la toma de un registro de tiros de verificación sísmica.

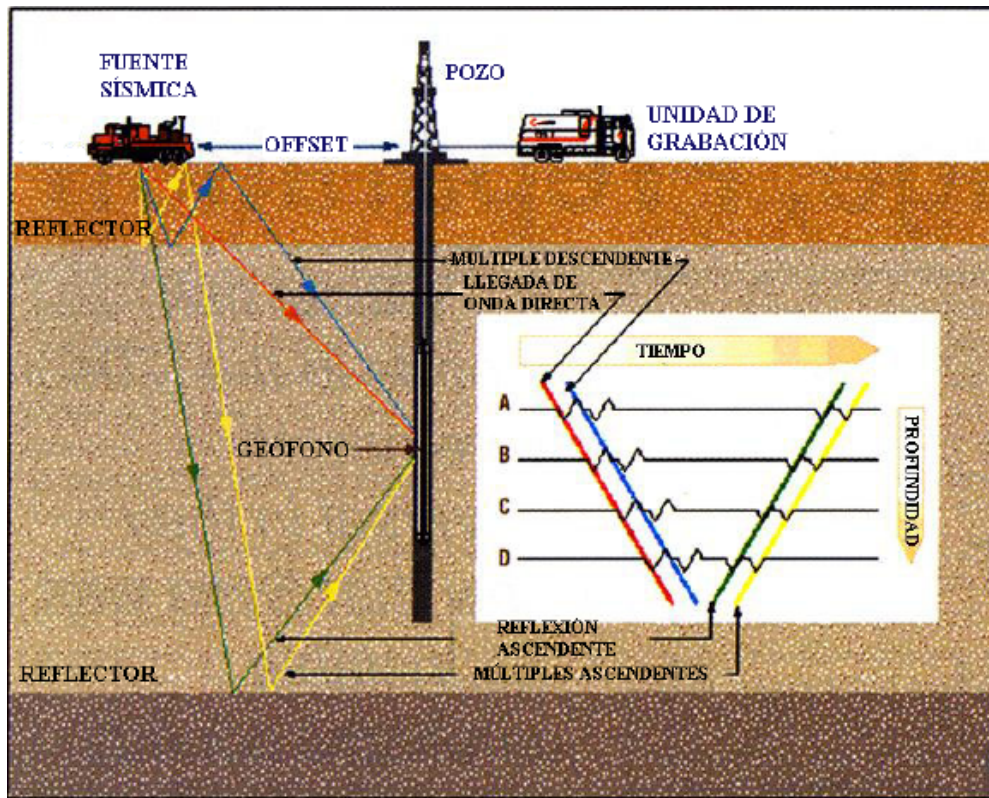


Figura 3.3. Operación de sísmica de pozo para registros de verificación sísmica (tomado de Hilla y Naval, 2005).

Sus principales aplicaciones son obtener la función de conversión de tiempo a profundidad para las secciones sísmicas de reflexión y calibrar los

registros sísmicos, debido a que la generación del sismograma sintético a partir de estos registros puede introducir un error en el tiempo de viaje de la onda sísmica causado por ruidos y distorsiones originados por los saltos de ciclos, efectos de invasión de lodo en las formaciones, rugosidad del pozo o problemas con la herramienta.

3.9. Efecto de Entonación.

Según Sheriff (2002), el efecto de entonación viene dado por el mínimo espesor con el cual se pueden reconocer distintos eventos en una Sección Sísmica (figura 3.4). Cuando el espesor de la capa sea menor a dicho valor se producirá el Efecto de Entonación o *Tunning*. Este está controlado por el contenido de frecuencia, la velocidad interválica, el espesor de los estratos y el *offset*; y dependerá de los parámetros de la adquisición, del procesamiento de los datos y de la disposición de los estratos de roca en el subsuelo.

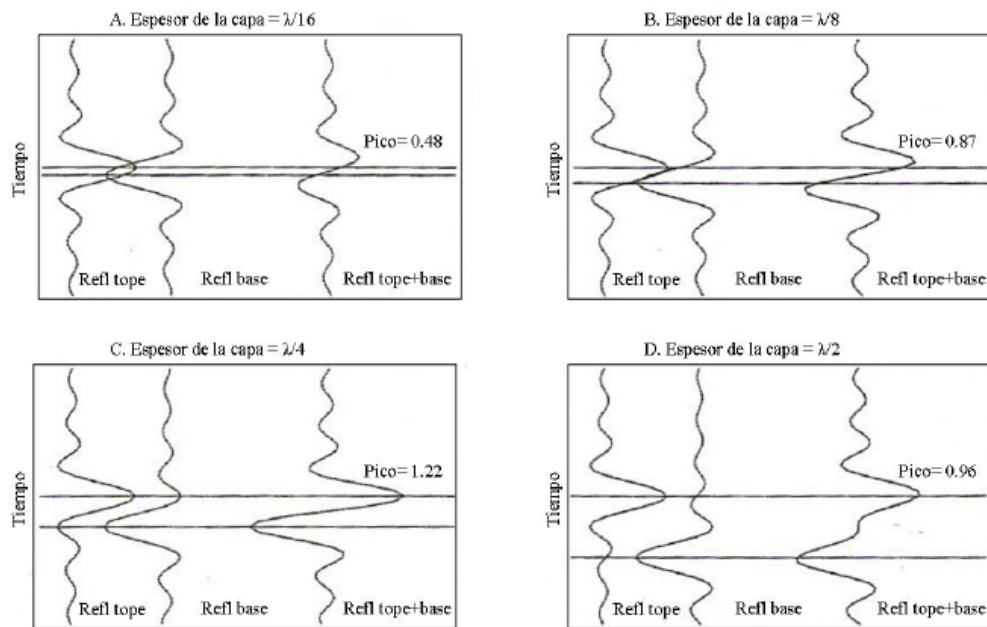


Figura 3.4. Efecto de entonación. En cada recuadro las 2 trazas de la izquierda son las reflexiones tope y base, la traza de la derecha es la traza resultante que se observaría en la sección sísmica migrada. Obsérvese como, cuando el espesor es un cuarto de la longitud de onda, la amplitud resultante llega a su máximo (tomado de Liner, 2004).

3.10. Resolución Vertical.

La Resolución Vertical de una unidad va a depender de la longitud de onda, su velocidad y su frecuencia; y dependiendo de ella se van a poder identificar picos individuales en una traza sísmica entre el tope y la base de una unidad geológica. En la figura 3.5 se observa este efecto.

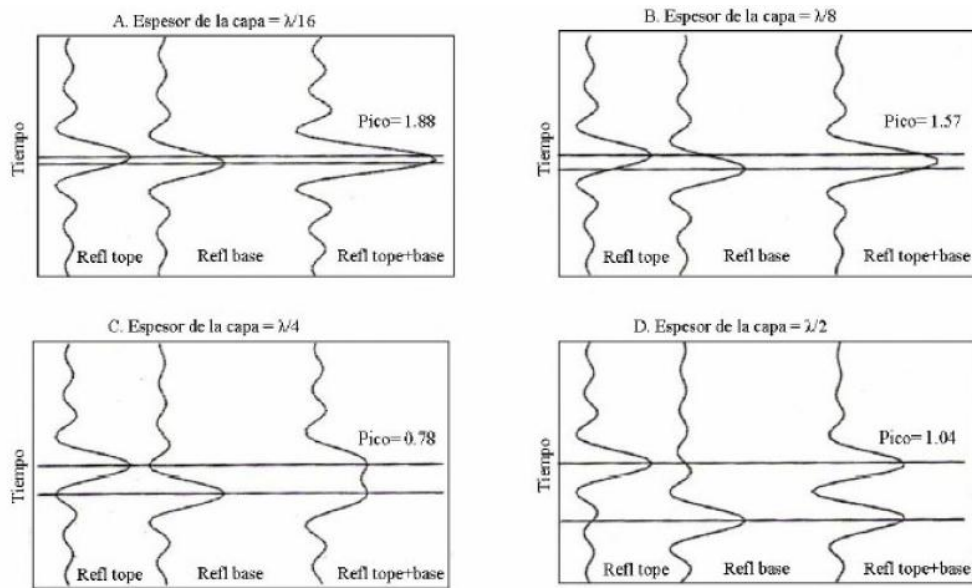


Figura 3.5. Efecto de la resolución vertical. En cada recuadro las 2 trazas de la izquierda son las reflexiones tope y base, la traza de la derecha es la traza resultante que se observaría en la sección sísmica migrada. Obsérvese que cuando el espesor es un cuarto de la longitud de onda, la traza resultante muestra 2 picos en vez del pico único que se obtiene para espesores menores (tomado de Liner, 2004).

El mínimo espesor de entonación en una unidad está dado por la expresión:

$$\lambda = \frac{v_{\text{int}}}{4f} \quad (3.7)$$

donde, λ = longitud de onda,

v_{int} = velocidad interválica y

f = frecuencia dominante.

3.11. Estructuras y fallas.

Con la Interpretación Sísmica se busca identificar regiones que propicien probables acumulaciones de hidrocarburos, sintonizando las estructuras y la historia geológica con los períodos de migración y expulsión. Esto se realiza a través del cartografiado estructural basado en la sísmica y los registros de pozo, lo que permite armar un marco estructural y uno o más mapas de horizontes en profundidad presentes en la zona de interés. Posteriormente la interpretación estructural procede con los siguientes tres pasos: (1) detección y cartografiado de fallas, (2) propagación de horizontes y (3) conversión tiempo-profundidad (Pinto, 2007).

3.11.1. Detección y cartografiado de fallas.

Según Liner (2004), las fallas pueden ser identificadas dentro de las secciones sísmicas por medio de los siguientes patrones:

- (a) Discontinuidad de los reflectores.
- (b) Cambios abruptos en el buzamiento de los reflectores.
- (c) Amplitudes pequeñas alineadas, llamadas *dim-out* o sombras de falla.
- (d) Reflexión en el plano de falla.

Adicionalmente, las fallas presentes en la sección producen un efecto de degradación en la calidad de la imagen sísmica, como resultado en el incremento de la complejidad estructural, difracción en pequeños bloques fallados o conversión de ondas en las zonas de fallas (Op. Cit). El desplazamiento de las fallas puede ser vertical, horizontal o una combinación de ambos.

El poder detectar y cartografiar las fallas es de suma importancia debido a que estas darán sentido estructural a los datos y además pueden actuar como trampas de petróleo, barreras de permeabilidad o vías de migración y comunicación de yacimientos.

3.11.2. Propagación de horizontes.

Es necesario cartografiar los patrones de falla antes de propagar los horizontes, debido a que las fallas segmentan en bloques la zona donde se encuentran los datos. Dentro de cada bloque se puede usar la técnica de *autopicking* para propagar los eventos de interés, para luego armar el mapa compuesto por todos los bloques. El objetivo es crear un mapa estructural en tiempo que represente la geometría de la superficie de reflexión (Liner, 2004).

3.11.3 Conversión Tiempo Profundidad.

Para realizar una conversión de tiempo a profundidad existen varias técnicas y el uso de cada una de ellas dependerá de diversos factores. Tradicionalmente se realiza utilizando un Mapa de Velocidades obtenido a partir de registros de velocidades en pozos o velocidades sísmicas. Posteriormente, los tiempos son convertidos a profundidad utilizando velocidades promedios o velocidades interválicas (Carter, 1989).

Pero esta no es la única forma de realizar una conversión tiempo-profundidad, debido a que algunas veces se presentan problemas relacionados al muestreo espacial de la velocidad obtenida a partir de registros de pozos, o con la confiabilidad del análisis individual de velocidades sísmicas.

Por esta razón, se han propuesto otros métodos alternativos para la conversión tiempo-profundidad. Carter (1989) plantea un método en el que se utilizan velocidades interválicas normalizadas, el cual genera los valores de velocidades necesarios entre los pozos y transforma el análisis de velocidades sísmicas en un formato de mejor resolución. El objetivo de esta normalización es expresar las velocidades interválicas independientes de la profundidad.

Por su parte, Guo (2002) propone la migración de datos sísmicos como la manera más precisa de visualizar estructuras en profundidad, debido a que la misma muestra las reflexiones en base a fuertes contrastes laterales en los valores de velocidad. En consecuencia, la migración que se utilizará para realizar la conversión dependerá de la variación lateral de velocidad. Así, si la variación lateral de velocidad es inexistente se suele utilizar migración en tiempo de datos Post-Apilados. A medida que la variación lateral de velocidad va aumentando se suelen utilizar procedimientos de mayor precisión tales como DMO, migración en tiempo de datos Pre-Apilados o migración en profundidad de datos Post-Apilados. Finalmente si la variación lateral de velocidad incrementa considerablemente se opta por migración en profundidad de datos de Pre-Apilados.

Existen otros métodos tales como el “*Layer Cake*”, el cual analiza cada unidad litológica de manera separada y la define por medio de una función matemática. Por ejemplo, expresando la velocidad interválica como una función de la profundidad (Marsden, 1989).

En el caso específico de este trabajo se utilizó la técnica de Conversión Tiempo-Profundidad utilizando un modelo de velocidades promedio por capa.

3.12. Estratigrafía Sísmica.

La estratigrafía secuencial es el estudio de las relaciones entre las rocas o paquetes de rocas dentro de un marco de tiempo o intervalos depositacionales repetitivos y relacionados “genéticamente”, encadenados por superficies de erosión u otra discontinuidad. Con la estratigrafía secuencial se reconoce y correlaciona aquellas superficies estratigráficas que manifiestan cambios en la secuencia depositacional de la formación. Tales cambios son generados por la interacción entre la sedimentación, la erosión y la oscilación del nivel base, y van a ser determinados por análisis sedimentológico y relaciones geométricas. (Van Wagoner et al., 1988). En el caso de este estudio sólo se realizó una interpretación

estructural, pero siempre deben tenerse claros estos conceptos al momento de interpretar las secciones sísmicas.

3.13. *Atributos sísmicos.*

Los atributos sísmicos son las propiedades cuantificables de los datos sísmicos, como la amplitud, rumbo, frecuencia, fase y polaridad. Pueden ser medidos en un instante sobre una ventana de tiempo, y pueden ser cuantificados en una traza simple, sobre un conjunto de trazas, o sobre una superficie interpretada de los datos sísmicos (Hilla y Naval, 2005). Estos parámetros son posteriormente comparados con los parámetros petrofísicos.

3.14. *Terminaciones y parámetros sísmicos.*

Los parámetros sísmicos son una serie de factores que dependen de las características de la onda y que varían dentro del medio sedimentario. Entre los principales parámetros encontramos: geometría del reflector, amplitud de la onda, continuidad, disposición de las secuencias y velocidad interválica (Pinto 2007).

En la Fig. 3.6 se observan las distintas terminaciones sísmicas:

- *Onlap*: Sedimentario transgresivo.
- *Downlap*: Sedimentario progresivo.
- Truncaciones erosionales: Origen tectónico.
- *Toplap*: Sedimentario progresivo.

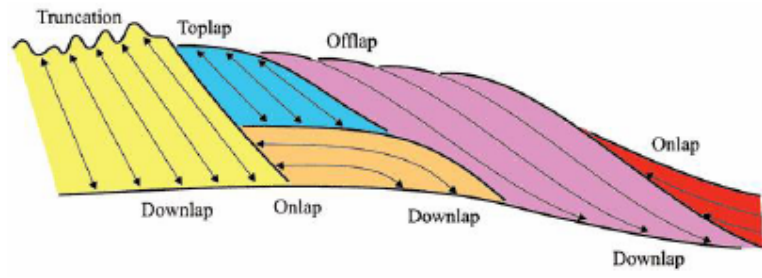


Figura 3.6. Terminaciones sísmicas (tomado de Mitchum, 1977; en Pinto, 2007).

CAPÍTULO IV

MÉTODOLOGÍA

En líneas generales este trabajo se realizó siguiendo los lineamientos de Mitchum (1977), Bally (1987) y Liner (2004), los cuales fueron explicados en el capítulo anterior. En este apartado se desarrollará detalladamente los pasos que se siguieron para la obtención de los mapas estructurales en profundidad de las superficies erosivas interpretadas. En la figura 4.1 se puede observar el diagrama de flujo de las actividades realizadas durante esta investigación.

4.1. Recopilación y Revisión Bibliográfica.

Al comienzo del trabajo se buscaron todas las fuentes necesarias para comprender de una mejor manera los procesos y metodologías a desarrollar durante el avance del mismo, entre ellas, publicaciones y tesis de interpretación sísmica de la zona y los manuales de los programas a utilizar. Asimismo, se consultó una variada bibliografía referente a la geología regional y local, incluyendo los diagnósticos y memorias descriptivas realizados por los grupos de trabajo dentro del Área de Boyacá. Por último, se buscaron los trabajos previos en la zona, los cuales, resultaron ser escasos debido a la condición de Parque Nacional en la que está la mayor parte del área de trabajo.

4.2. Base de datos.

Luego de reunir todos los datos sísmicos y de pozos necesarios (proporcionados por PDVSA) se procedió a realizar un inventario de los mismos con la finalidad de saber, de manera precisa, la cantidad de datos con los que se contaban al comienzo del trabajo; y poder así validar y determinar la calidad y utilidad de los mismos.

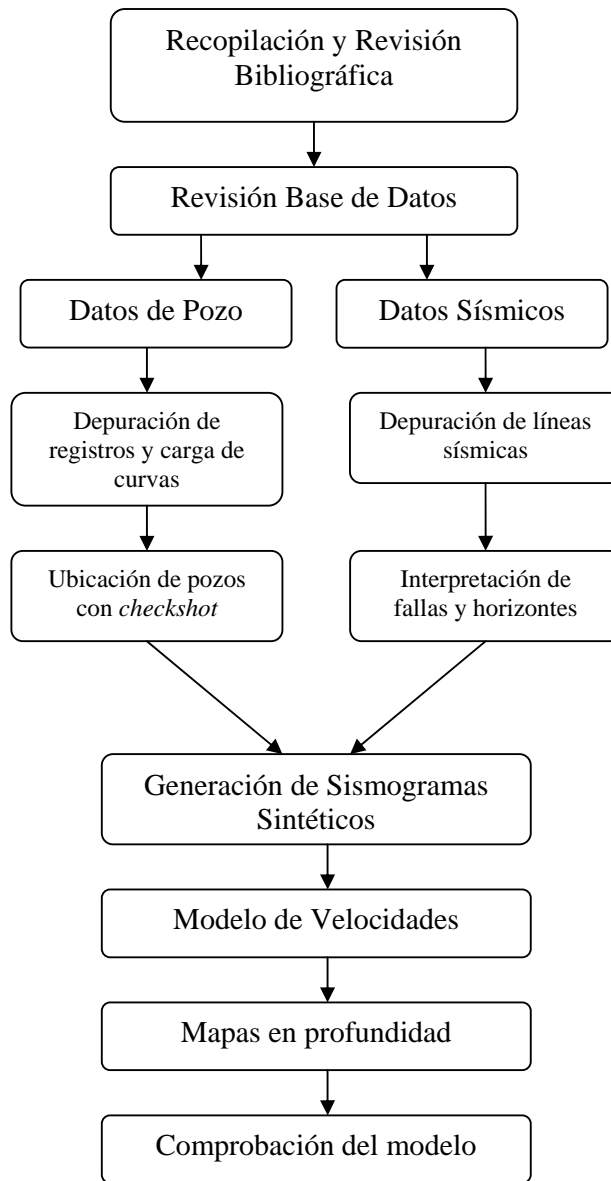


Figura 4.1. Diagrama de flujo de las actividades realizadas durante este trabajo. Cabe destacar que la revisión bibliográfica se realizó durante todo el proceso.

Esta etapa del trabajo debe ser realizada con sumo cuidado porque de la correcta depuración de los datos de origen va a depender la calidad de la interpretación realizada y por consiguiente, la calidad y precisión de los mapas y conclusiones finales.

En primer lugar se cuantificó la información disponible, resultando 106 líneas sísmicas con un total de 3327 Km de datos sísmicos. 58 líneas poseen orientación Norte-Sur y 48 líneas poseen orientación Este-Oeste. Posteriormente se clasificaron por levantamiento, parámetros de adquisición y tipo de procesamiento, como puede verse en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Clasificación de las líneas sísmicas por levantamiento, parámetros de adquisición y procesamiento

Levantamiento 2D	N° de líneas	Intervalo de Grupo (m)	Tasa me muestreo (ms)	Tiempo de registro (s)	Versión
Z (1975-1976)	23	75	2	5	Apilada
M (1978-1979)	43	50	2	4	Apilada
S (1981-1982)	9	75	2	4	Apilada
CH-81	14	50	2	4	Apilada
CH-82	11	50	2	4	Migrada
CH-83	6	50	2	4	Migrada

Luego de revisar las líneas sísmicas existentes, se concluyó que la calidad de la sísmica va de regular a insuficiente con un predominio de las estáticas. La densidad areal de las líneas es muy baja (entre 10 y 20 Km entre líneas) lo que genera mayor incertidumbre. De igual manera, se evidenció que las líneas con orientación NS poseían mucha mejor calidad que las líneas orientadas en sentido EO. En la figura 4.2 se observa la división de las líneas según el levantamiento.

Por otra parte, se realizó un inventario de los pozos existentes en la zona y se clasificaron en 2 grupos, los que tenían registro de Tiros de Verificación Sísmica y los que no contaban con éste. En total se contabilizaron 21 pozos con Tiros de Verificación Sísmica, cifra que en un principio puede parecer alta, pero teniendo en cuenta la extensión areal de la zona de estudio, puede entenderse el por que existe esta cantidad de pozos con Tiros de Verificación Sísmica. Luego se verificó, en las carpetas de pozo proporcionadas por PDVSA, cuáles de estos

contaban con Registro Sónico (DT), Gamma Ray (GR), Densidad (RHOB), Caliper (CAL) y Porosidad (DPHI). Además, se pudo conocer que, al momento de iniciar el desarrollo de este trabajo, todos estos pozos con Tiros de Verificación Sísmica poseían interpretación geológica secuencial a los niveles de interés. Por el contrario, muchos de los pozos que no poseían dicho registro, no habían sido correlacionados por el geólogo. En la tabla 4.2 se muestra la totalidad de los pozos con Tiro de Verificación Sísmica y con que curvas se contaba al momento de la revisión de la base de datos. En la figura 4.3, puede observarse la ubicación de los pozos dentro del área de estudio.

Luego de haber revisado y depurado detalladamente la base de datos, se procedió a efectuar la carga y generación de curvas faltantes de los pozos por un lado, y la interpretación de las líneas sísmicas por otro.

4.3. Carga de registros.

En este paso se procedió a verificar cuáles curvas estaban cargadas en el paquete de interpretación. Las curvas faltantes se cargaron en formato LAS al paquete Landmark® y se organizaron con la finalidad de contar con una base de datos de pozos con sus registros respectivos, que fuese óptima y de fácil manejo.

4.3.1. Rango de variación de las curvas.

Con la finalidad de que todas las curvas del mismo tipo se encuentren en una misma escala y así evitar picos anómalos o problemas a la hora de generar el sismograma sintético, se restringieron a un rango específico el valor de todos los registros. Con esto se consigue redimensionarlos y darles uniformidad a los mismos. En la tabla 4.3 se pueden observar los distintos rangos para cada uno de los registros.

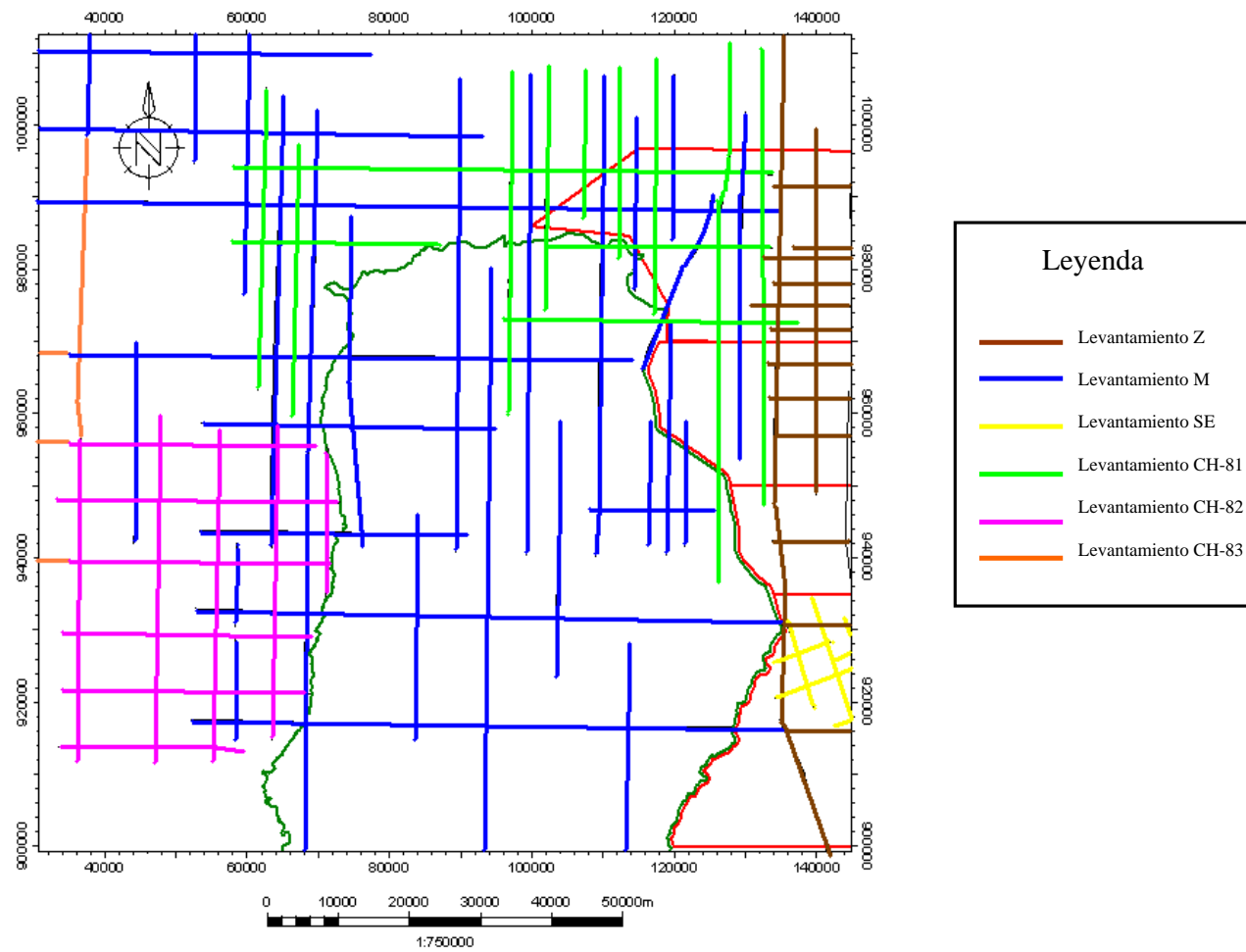


Figura 4.2. Líneas sísmicas mostradas de acuerdo al levantamiento en el que se adquirieron.

Tabla 4.2. Inventario de Pozos con TVS y sus respectivos registros disponibles.

Pozo/Registro	DT	GR	RHOB	CAL	DPHI
PQE-1-A	SI	SI	SI	SI	----
PQE-2-A	SI	SI	----	SI	SI
PQE-2-C	SI	SI	----	SI	SI
PQE-2-E	SI	SI	SI	SI	SI
PQE-2-X	SI	SI	SI	SI	SI
PQE-3-E	----	SI	----	SI	----
PQE-3-F	SI	SI	----	SI	SI
PQE-6-A	SI	SI	SI	SI	SI
PQE-6-B	SI	SI	SI	SI	----
PQE-6-C	SI	SI	----	SI	SI
PQE-6-D	SI	SI	SI	SI	----
PQE-6-E	SI	SI	SI	SI	SI
PQE-6-F	SI	SI	SI	SI	----
PQE-7-J	SI	SI	----	SI	SI
PQE-7-K	----	SI	SI	SI	----
PQE-7-L	SI	SI	SI	SI	SI
PQE-7-O	SI	SI	SI	SI	----
PQE-7-P	SI	SI	----	SI	SI
PQE-7-R	SI	SI	SI	SI	SI
PQE-7-S	SI	SI	SI	SI	----
PQE-10-C	SI	SI	SI	SI	SI
PQE-11-B	SI	SI	----	SI	SI
PQE-11-D	SI	SI	----	SI	SI
PQE-11-E	SI	SI	SI	SI	----
PQE-M-1	SI	SI	----	SI	SI

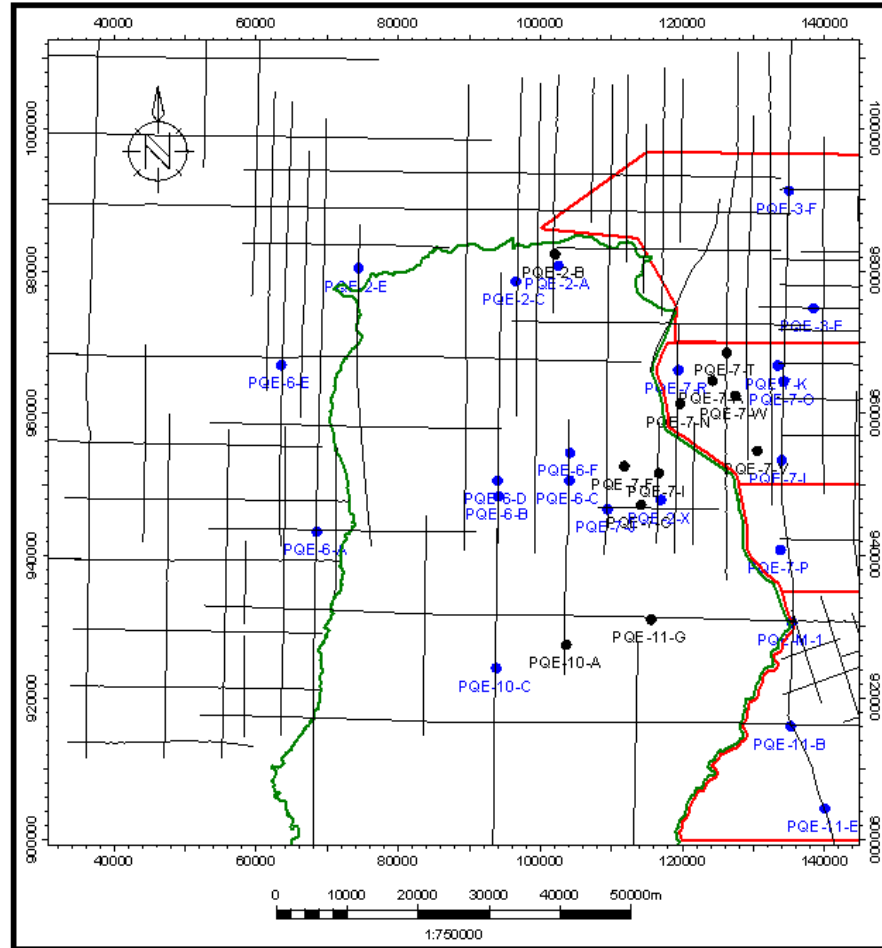


Figura 4.3. Ubicación de los pozos dentro del área de estudio. Los pozos con registro de Tiros de Verificación Sísmica se presentan en azul. Nótese como la mayoría de los pozos se concentran en el centro y Norte del Parque y en el Área Boyacá.

Tabla 4.3. Rango de los registros de pozo.

Registro	Rango	Unidades
DT	200 a 40	μs/ft
GR	0 a 150	°API
CAL	6 a 16	Pulgadas
RHOB	1.9 a 2.9	g/cm ³
DPHI	0.6 a 0	g/cm ³

4.3.2. Generación de registros de RHOB faltantes.

Como puede observarse en la Tabla 4.2, en 10 de los 21 pozos el registro faltante es el de Densidad (RHOB). En este caso fue posible generar un pseudo registro de densidad a partir del registro de Porosidad (DPHI), con los que si contaban este grupo de pozos (exceptuando el PQE-3-E). Esto se hizo utilizando la ecuación de Willie (4.1):

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{fl}}; \quad (4.1)$$

donde, ϕ es la porosidad (DPHI), ρ_{ma} es la densidad de la matriz (igual a 2.65 g/cm³ de acuerdo a la calibración para correr el registro), ρ_{fl} es la densidad del fluido que contiene la roca (igual a 1 g/cm³ porque se considera mayormente saturada de agua) y ρ_b es la densidad de la roca (RHOB). Despejando se obtiene:

$$RHOB = 2,65 - 1,65DPHI; \quad (4.2)$$

con lo cual, se obtiene las curvas de densidad necesarias para ser utilizadas posteriormente en la obtención de los sismogramas sintéticos.

4.4. Interpretación Sísmica.

Con todos los datos correctamente revisados y cargados se procede a realizar la interpretación sísmica con la finalidad de obtener los horizontes propagados en tiempo doble y los trenes de fallas que determinarán el comportamiento de la estructura. En la figura 4.4 se puede observar el diagrama de flujo que se llevó a cabo durante la interpretación.

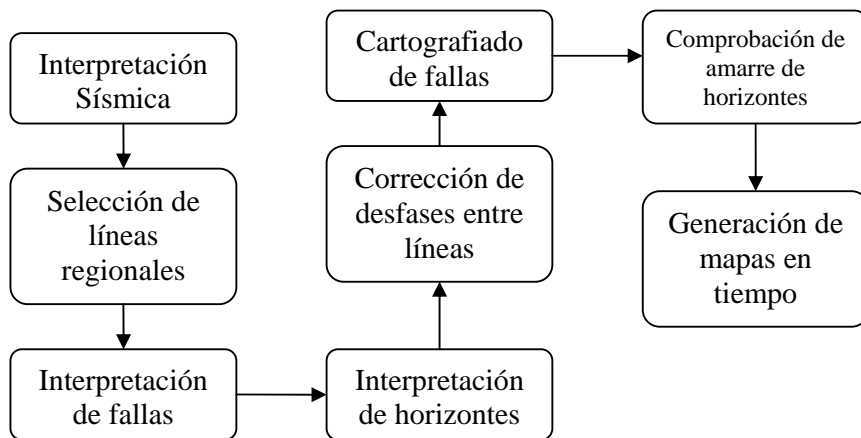


Figura 4.4. Esquemas de los pasos tomados para realizar la interpretación sísmica de las líneas.

Como primer paso se procedió a escoger las líneas principales que se utilizarían como punto de partida en la interpretación de los horizontes. Las líneas escogidas fueron, Z-720, M-728, CH-2D y M-7S; las mismas se seleccionaron tomando en cuenta la calidad de las reflexiones, su extensión y su posición con respecto a los pozos. Estas líneas se muestran en las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 respectivamente.

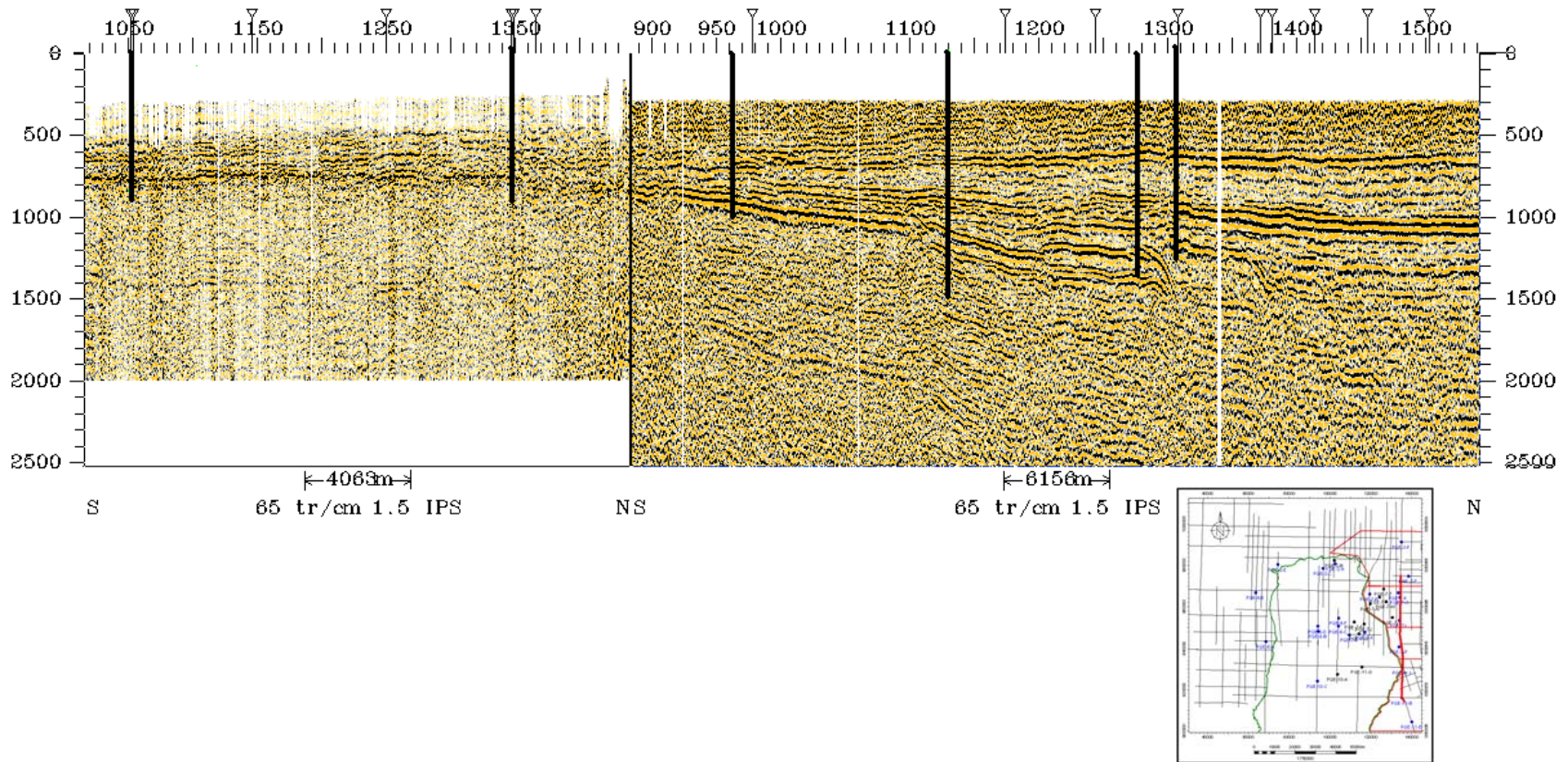


Figura 4.5. Sección sísmica Z-720, de orientación Norte-Sur y ubicada dentro de los Bloques del Área Boyacá. En negro se muestran los pozos que están sobre la línea y tienen registro de Tiro de Verificación Sísmica.

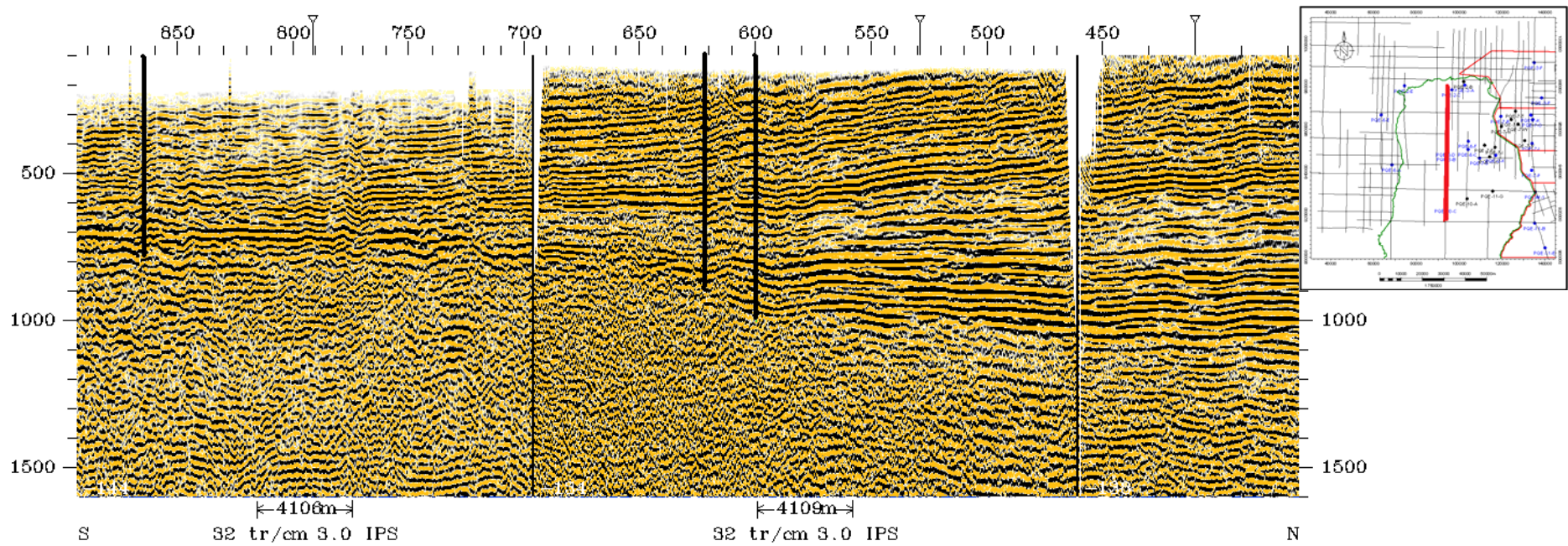


Figura 4.6. Sección sísmica M-728, de orientación Norte-Sur y ubicada dentro de los límites del Parque Nacional Aguaro Guariquito. En negro se muestran los pozos que están sobre la línea y tienen registro de Tiro de Verificación Sísmica.

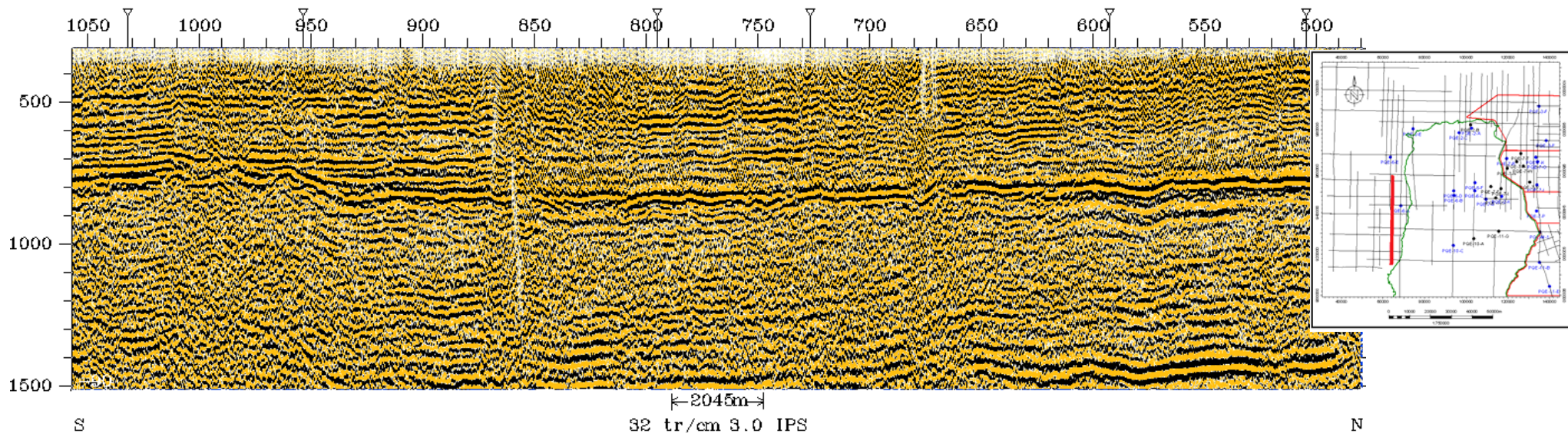


Figura 4.7. Sección sísmica CH-2D, la cual tiene una orientación Norte-Sur. Con esta línea se busca amarrar la interpretación de las secciones ubicadas al Oeste del Parque Nacional Aguaro Guariquito.

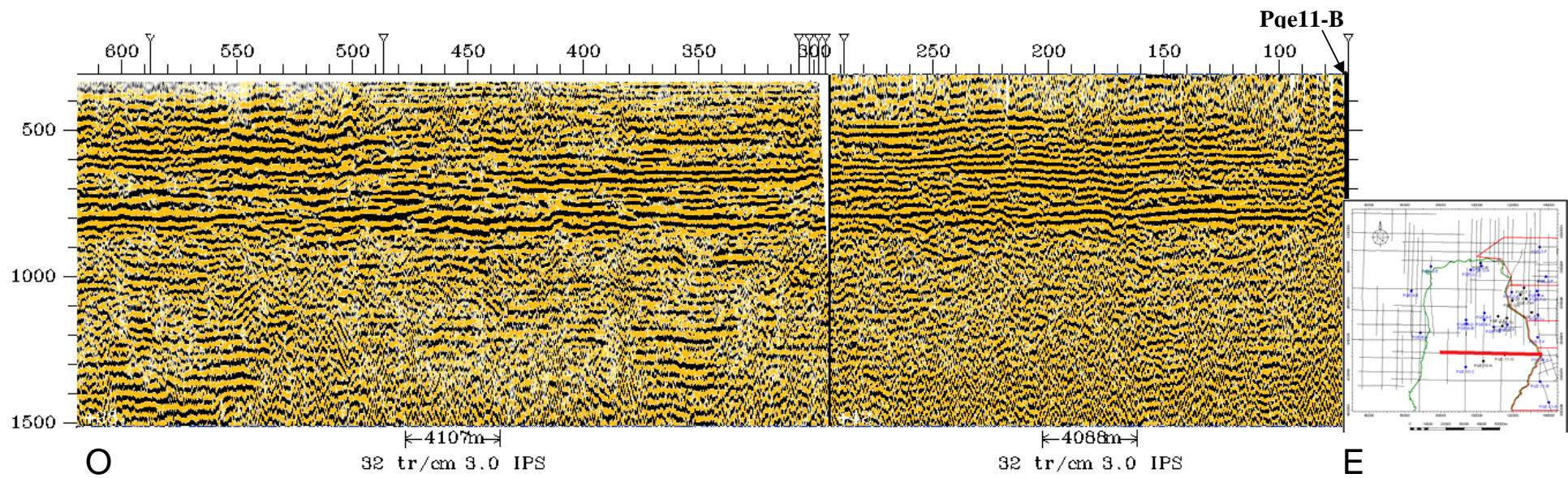


Figura 4.8. Sección sísmica M-7S, la cual tiene una orientación Este-Oeste y permitirá amarrar la interpretación de las líneas Norte-Sur mostradas anteriormente. En negro se muestran los pozos que están sobre la línea y tienen registro de Tiro de Verificación Sísmica.

Las terminaciones sísmicas fueron claramente definidas sobre las secciones sísmicas impresas, cuyas dimensiones permitieron identificar las fallas (corte brusco de horizontes) y los patrones sísmicos (truncaciones, *onlap*, *downlap*) que caracterizaban a las discordancias principales. Posteriormente estos eventos fueron trasladados al paquete de interpretación para ser utilizados como punto de partida para el resto de la interpretación. Cabe acotar en este punto que la plataforma utilizada para la interpretación fue Openworks® a través de la herramienta Seisworks®. Asimismo, para futuros trabajo se recomienda utilizar la escala de dimensión horizontal 22 trazas por cada centímetro, y vertical de 5 pulgadas por cada 500 ms, en papel, usada para este trabajo

4.4.1. Corrección del desfase entre líneas.

Al momento de realizar el control de calidad de las líneas sísmicas, se observó que la interpretación no presentaba continuidad cuando se combinaban varias secciones. Por lo tanto, se procedió a corregir el salto existente entre las líneas ajustando los desfases de tiempo de las mismas (figura 4.9). La mayoría de las líneas se encontraban con un desfase de 200 ms, las cuales, se tomaron como base para amarrar las líneas que no presentaban continuidad de reflectores. Revisando trabajos anteriores (PDVSA, 2007), se observó que esta corrección vertical de 200 ms se debe a que las velocidades de remplazo que se utilizaron en el procesamiento de los datos fueron alrededor de 1700 m/s, con un datum flotante equivalente a 558 pies. Este detalle es muy importante debido a que, como todo está amarrado a este datum, se les deberá restar este valor a los mapas en profundidad finales para referenciarlos al nivel medio marino.

Para terminar de corregir los desfases, se procedió a interpretar el horizonte más profundo y cuyo contraste sísmico es más fuerte y por consiguiente más fácil de seguir en todas las líneas, posteriormente nombrado Precretácico. Una vez que este horizonte fue interpretado en todas las líneas, se tuvo por seguro que los problemas de desfase (*mis-ties*) ya estaban resueltos.

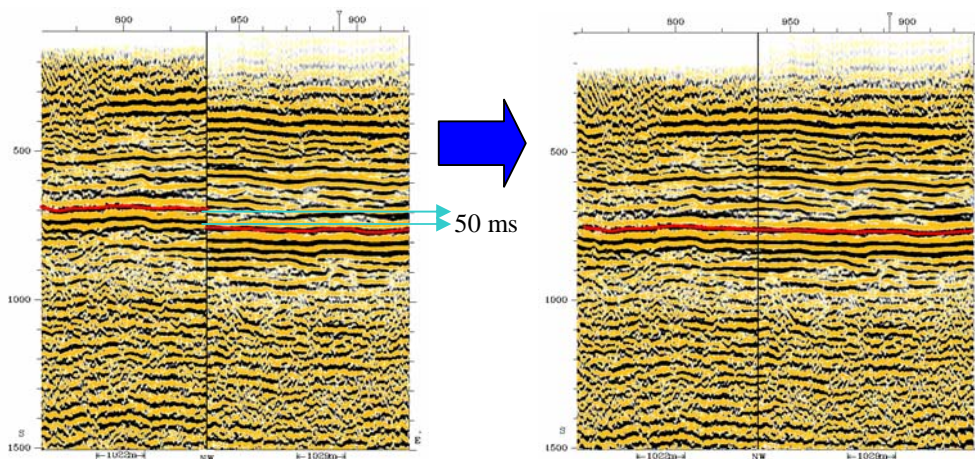


Figura 4.9. Corrección del desfase existente entre las líneas. Nótese como después de corregido el desfase de 50 ms, los eventos amarran totalmente.

4.4.2. Interpretación de fallas.

A cada falla interpretada en las secciones seleccionadas, se le determinó distintas características como el tipo de movimiento, ubicación en el espacio, salto aparente (en el horizonte interpretado en la sección anterior) y buzamiento (en tiempo); considerando los posibles errores de procesamiento que pudiesen llevar a una interpretación errónea. En las secciones sísmicas paralelas a la sección donde ya se identificó la falla, se procedió a buscar fallas que cumplieran con las mismas características y tuvieran respuestas similares. Este proceso se repitió para todas las fallas y sólo se siguieron y cartografiaron aquellas que se repitieron en 2 o más secciones sísmicas continuas paralelamente. En la figura 4.10 se grafica esta metodología.

Cabe destacar que las fallas se observaron sólo en las secciones con dirección N-S. Esto se debe a que la orientación principal de las estructuras en el área es de N67E, como se señaló en el Capítulo II, siendo casi perpendicular a dichas líneas.

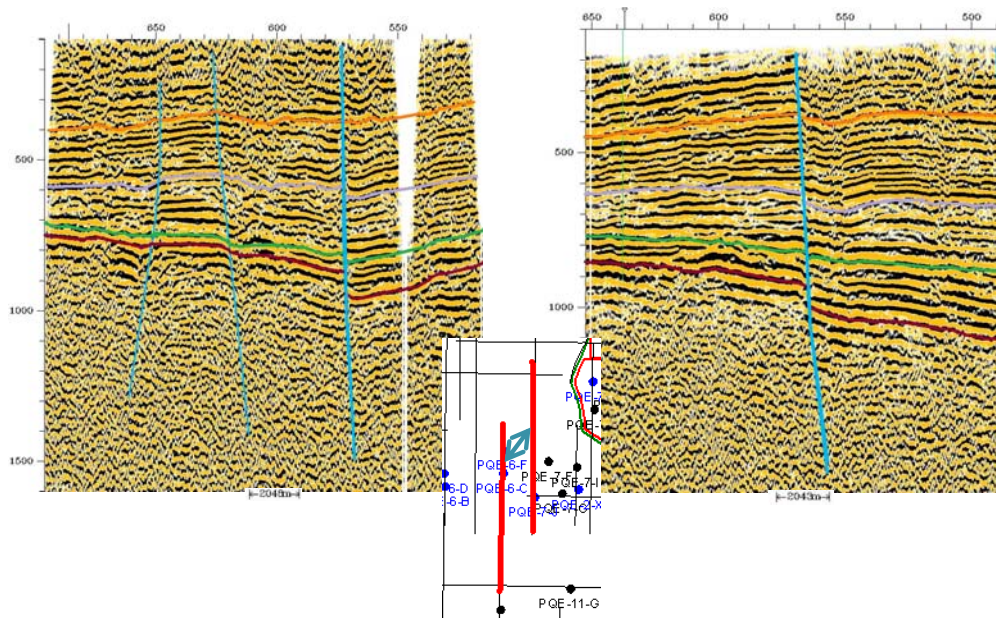


Figura 4.10. Metodología seguida para interpretar las fallas. Una vez que era identificada en una línea se procedía a buscarla en las líneas paralelas más próximas. Nótese como el comportamiento de la falla es idéntico en ambas secciones, con un gran salto para el tope secuencial del Precretácico y saltos más bajos en las otras secuencias.

4.4.3. Interpretación de horizontes y generación de mapas en tiempo.

Partiendo de las líneas preseleccionadas se interpretaron los horizontes, los cuales al igual que las fallas, poseen rasgos distintivos a lo largo de las diferentes secciones. Para realizar esta interpretación se utilizaron cruces de líneas denominados rizados, que forman un polígono cerrado. Hubo momentos en que no fue posible realizar estos rizados debido a que la extensión de las líneas no lo permitía. En esos casos se interpretaba usando cruces por zigzag, como puede observarse en la figura 4.11. A medida que se iban interpretando los horizontes por las distintas secciones, se hacía más fácil la ubicación de estos en las líneas no interpretadas porque se podían seguir los marcadores guías, los cuales representan la ubicación del horizonte en las líneas interceptadas (figura 4.11).

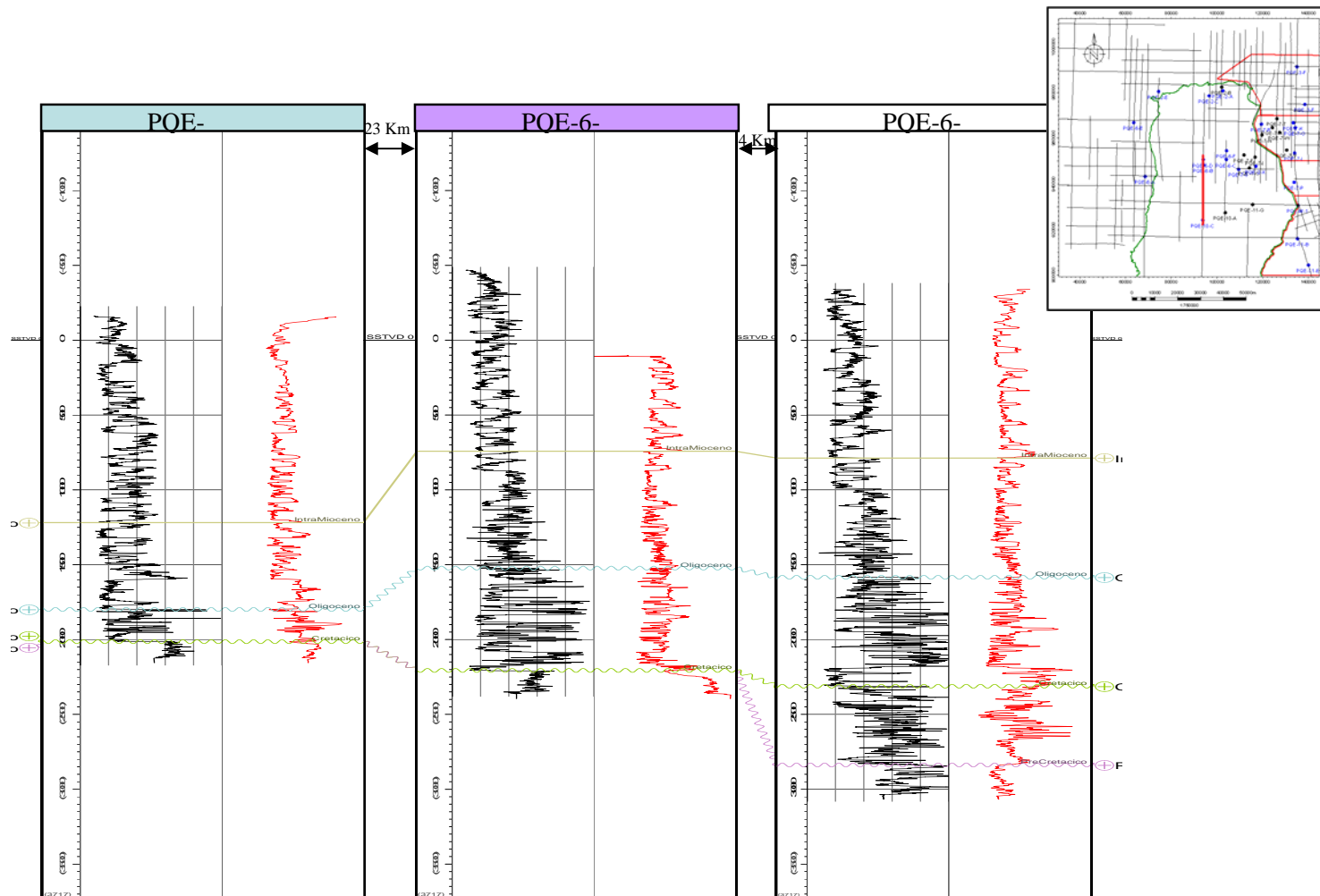


Figura 4.12. Sección estratigráfica entre los pozos PQE-10-C, PQE-6-B y PQE-6-D, correlacionando los 4 topes secuenciales interpretados en la sísmica.

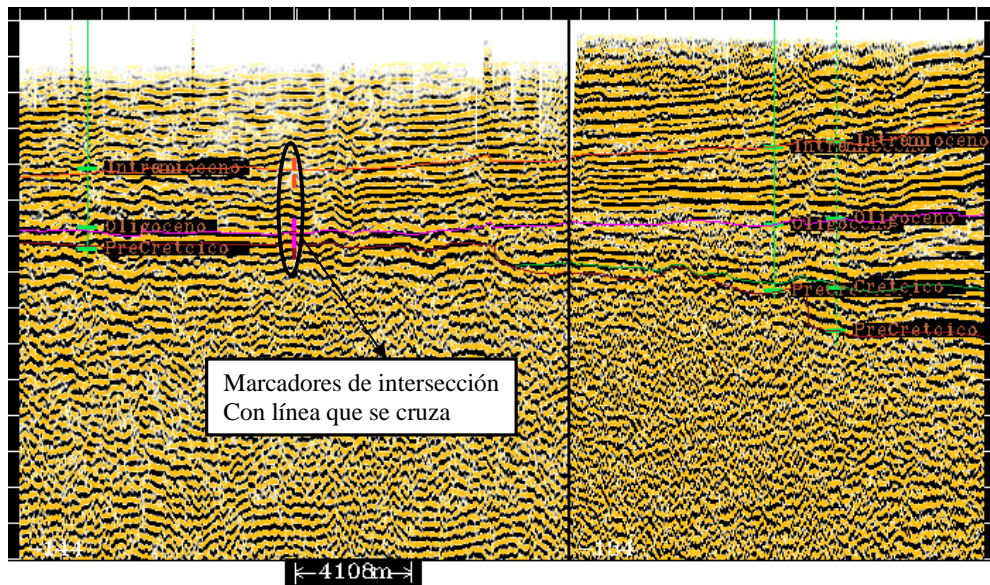


Figura 13. Sección sísmica donde se muestran los marcadores guías en los pozos PQE-10-C, PQE-6-B y PQE-6-D y en las secciones interceptadas.

Luego se procedió a exportar los horizontes interpretados de la plataforma Openworks® hacia el software Petrel 2007®. En este se generaron los mapas en tiempo por medio de la aplicación de una interpolación convergente entre los datos en tiempo doble de los horizontes en cuestión.

4.5. Sismograma Sintético.

Para la generación de los sismogramas sintéticos se siguió el esquema de trabajo mostrado en la figura 4.14. Esto se realizó para todos los pozos con Tiros de Verificación Sísmica, obteniendo así la relación entre los datos de pozo y la sísmica.

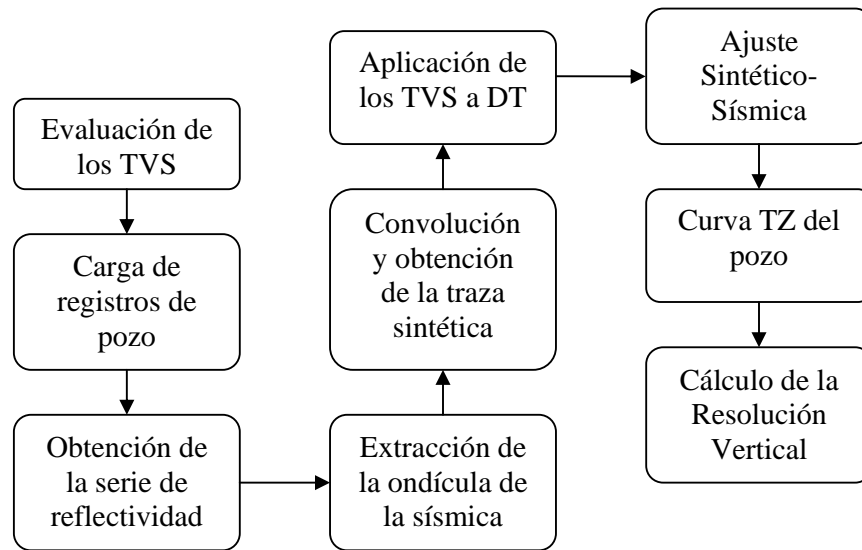


Figura 4.14. Flujo de trabajo utilizado en la obtención de los sismogramas sintéticos.

4.5.1. Evaluación de las curvas de Tiro de Verificación Sísmica.

Antes de comenzar con la generación de los sismogramas sintéticos fue necesario graficar las curvas de tiempo profundidad de los Tiros de Verificación Sísmica para cada pozo, con la finalidad de corroborar que las mismas cumplieran con los requerimientos necesarios para la elaboración de los mismos. Estas curvas T-Z deben mostrar una función creciente de la velocidad con respecto a la profundidad. Asimismo, se verificó que las curvas tuviesen tendencias similares y no presentaran ningún valor anómalo. Estos valores afectan la curva de tiempo-profundidad generada con el sismograma sintético, y los mismos, son generados por una carga incorrecta de los datos o por una mala medición durante la adquisición.

En la figura 4.15 se observa como se graficaron todas las curvas referenciadas al nivel medio marino con la finalidad de observar la tendencia general del gradiente de velocidades. Puede notarse que las mismas no presentan

tendencias similares entre si, por lo que no basta hacer sólo un sismograma sintético para todo el estudio. Esto es de esperarse ya que debido a la extensión del área los pozos se encuentran ubicados en varias zonas alejadas y con distintas características entre si. Además, se observa una brusca caída en la curva correspondiente al pozo PQE-2-X. Se sabe, por medio de la revisión bibliográfica, que en el área no se presentan velocidades anómalas que justifiquen este comportamiento, por lo que se procedió a verificar los datos de Tiro de Verificación Sísmica para este pozo y los mismos estaban bien cargados, deduciendo entonces de que se trata de un problema en la medición en campo.

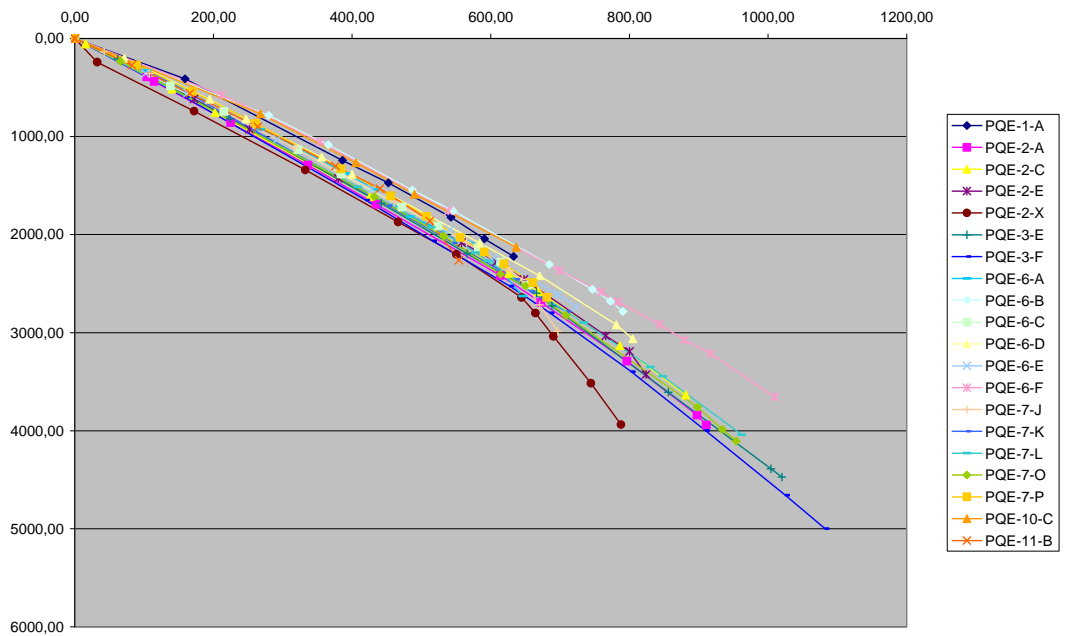


Figura 4.15. Evaluación de las curvas de los Tiros de Verificación Sísmica para los pozos utilizados en la generación de los sismogramas sintéticos.

4.5.2. Selección de curvas, aplicado de TVS y obtención de serie de reflectividad.

Se seleccionó en primer lugar el pozo con el cual se desea ajustar la correlación sísmica-pozo y seguidamente se eligieron las curvas de Tiro de Verificación Sísmica, de Densidad (RHOB) y de Registro Sónico (DT) de dicho pozo con la finalidad de, posteriormente, calcular la serie de reflectividad.

Se visualizan estas curvas junto a las de Gamma Ray (GR) y Caliper (CAL), con la finalidad de comparar los cambios de litología con los cambios de impedancia representados en la traza sintética a través del GR; y de observar que no haya habido ningún problema de estabilidad de hoyo o derrumbe en el pozo que pudiese afectar el resultado del sismograma.

A continuación se aplica la corrección del registro sónico por medio de la curva de Tiro de Verificación Sísmica, la cual ajusta las lecturas del sónico por tiempo de tránsito interválicos (ITT).

En este punto se calculan los coeficientes de reflectividad utilizando la ecuación 3.1. Se toman las velocidades interválicas provenientes del registro sónico corregido por TVS y los valores del registro de densidad (RHOB). Asimismo se le asignan los tiempos correspondientes a cada interfase y se calcula el TWT utilizando la ecuación 3.2. De esta manera se relaciona cada uno de los coeficientes de reflectividad a su tiempo doble correspondiente, generando así la serie de reflectividad necesaria para la convolución.

4.5.3. Obtención de la ondícula para la convolución.

La ondícula que se utilizó para la convolución con la serie de reflectividad fue extraída de la sísmica con fase cero, para una ventana que abarcara la columna estratigráfica interpretada completa en tiempo (Intramioceno-Precretácico) y de

10 a 20 trazas a cada lado del pozo (figura 4.16). Cabe destacar que esta ondícula se extrajo utilizando el método de autocorrelación.

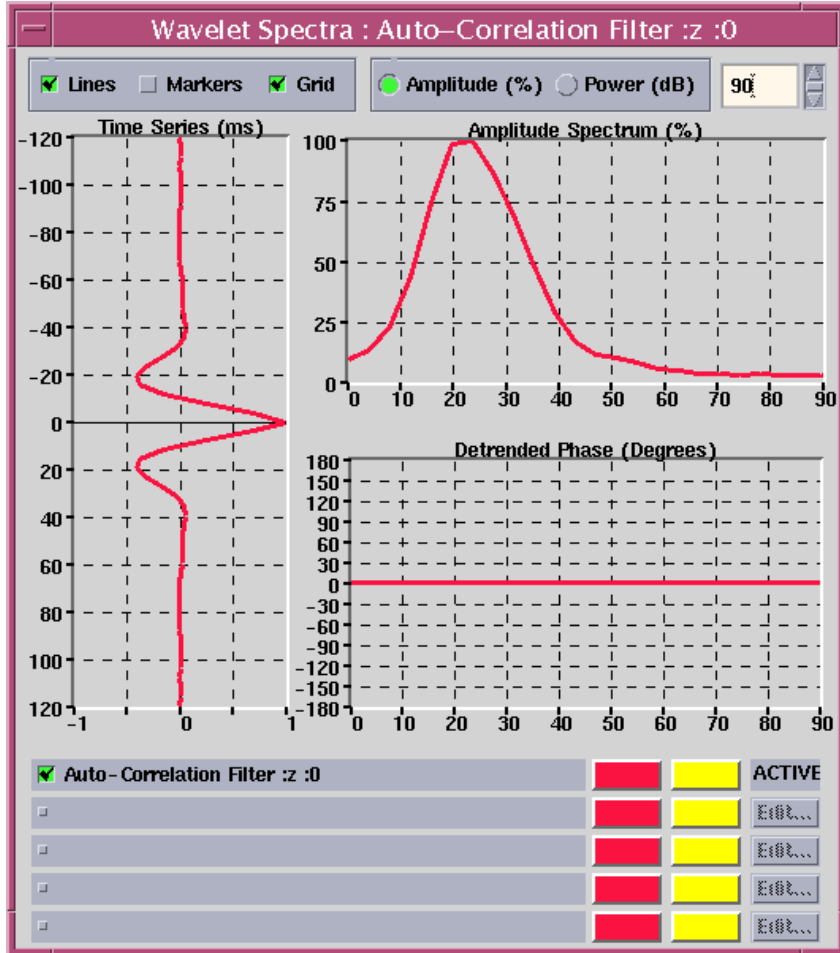


Figura 4.16. Ondícula extraída de la sísmica de fase cero y frecuencia dominante de 20 Hz, correspondiente a la ubicación del pozo PQE-7-O.

Con la serie de reflectividad y la ondícula seleccionada se procedió a realizar la convolución entre ambas obteniendo finalmente el sismograma sintético.

4.5.4. *Ajuste entre el sismograma sintético y la sísmica.*

Visualizando la traza sintética sobre las trazas de la sísmica real en la ubicación del pozo, puede observarse la correspondencia entre ambos eventos. Luego se obtiene el porcentaje de correlación utilizando el método de comparación estadístico de la autocorrelación, dentro de la ventana de tiempo definida para la extracción de la ondícula.

De la misma manera, se despliegan los topes determinados en la correlación de pozos, correspondientes a cada una de los topes de las superficies de erosión interpretadas. Esto se hace con la finalidad de amarrar la información geológica con el dato sintético y la sísmica. Así, guiándose por dichos topes, se puede variar verticalmente el sismograma sintético para ajustarlo a los eventos sísmicos, cambiando el datum del pozo con respecto a la sísmica. Con esto se logra que aumente la similitud entre el comportamiento de los registros de pozo y la sección sísmica. Al conseguir el mejor porcentaje de correlación matemático entre el sintético y la sísmica real, y que a su vez sea coherente geológicamente, se obtiene la curva TZ definitiva, la cual permitirá construir la ley de velocidades para el pozo en cuestión.

En la figura 4.17 se observa la traza sintética resultante, así como el resto de curvas utilizadas en la generación del sismograma sintético. Igualmente puede verse la correspondencia entre la curva de GR, los topes geológicos y el conjunto de eventos en las trazas sintéticas y de la sección sísmica. Para este caso la correlación fue de 62%, lo cual indica una buena calibración entre la sísmica y los datos de pozo. De esta manera se determinó que los topes geológicos obtenidos de la correlación estratigráfica que son identificados y pueden ser interpretados en la sísmica son el Intramioceno, Oligoceno, Cretácico y Precretácico; como ya se había mencionado anteriormente.

Finalmente, este proceso se realizó para todos los pozos con registro de Tiros de Verificación Sísmica en el área, obteniendo de esta manera, una mayor densidad de puntos en las superficies de interés, necesarios para la construcción de los mapas estructurales de velocidad.

4.5.5. Cálculo de la resolución vertical.

Para poder comprender y analizar de una mejor manera las dimensiones de las secuencias interpretadas, se procedió a calcular la resolución vertical para la columna completa (Intramioceno-Precretácico) y para cada uno de los paquetes individuales. En este punto se realizó el cálculo de las resoluciones verticales para cada uno de los levantamiento sísmicos (se omitió el levantamiento SE ya que no representa un porcentaje importante de las líneas interpretadas), debido a que, cada levantamiento tiene patrones de adquisición distintos, y por ende la resolución para las líneas de cada uno de dichos levantamientos varía. Las líneas y pozos seleccionados para este cálculo fueron: el pozo PQE-2-C para el levantamiento CH, el pozo PQE-7-O para el levantamiento Z, y para la resolución de las líneas del levantamiento M, el pozo PQE-6-D. En la figura 4.18 se puede observar la ubicación de estos pozos.

Se procedió a calcular la velocidad de la secuencia completa en cada uno de los pozos, con los tiempos y profundidades obtenidos de las curvas TZ generadas con el sismograma sintético (en la tabla 4.4 se observan los valores de la tabla TZ del pozo PQE-6-D), aplicando la fórmula:

$$V = \frac{Z_{PreKr} - Z_{Intra}}{t_{PreKr} - t_{Intra}}, \quad (4.3)$$

donde Z_{PreKr} y Z_{Intra} corresponden a las profundidades del Precretácico e Intramoceno respectivamente y, t_{PreKr} y t_{Intra} corresponden a los tiempos de viaje a dichas interfases.

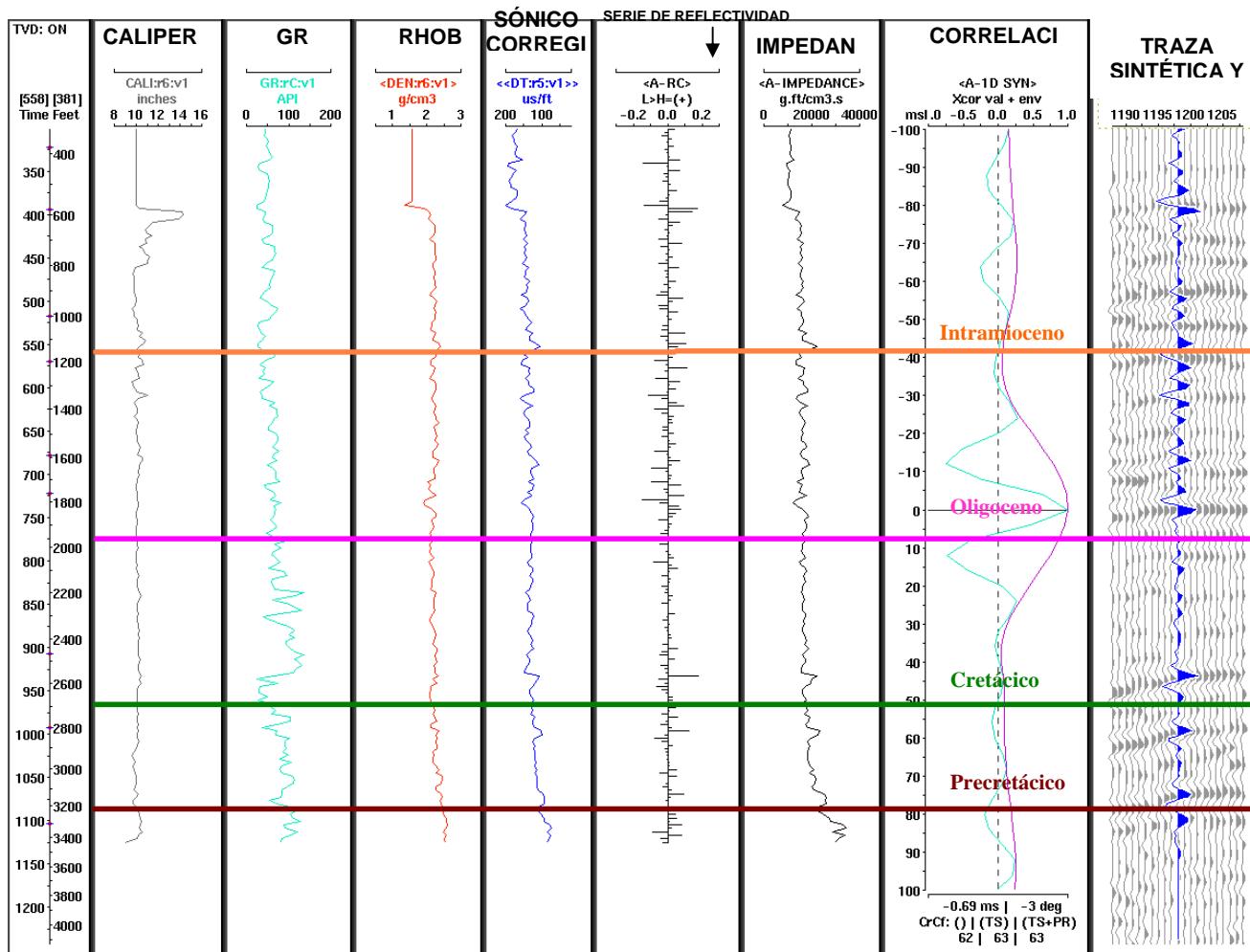


Figura 4.17. Sismograma sintético del pozo PQE-6-D. Obsérvese como coinciden los eventos geológicos determinados por el GR y los topes, con los eventos sísmicos en la sección.

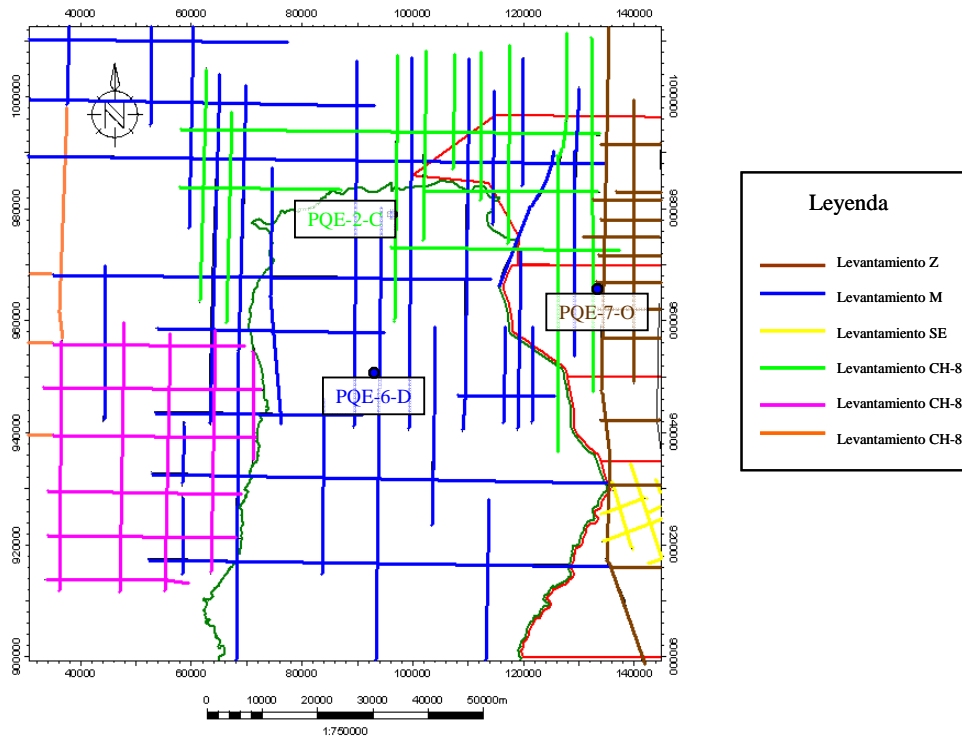


Figura 4.18. Ubicación de los 3 pozos utilizados para el cálculo de la resolución vertical. Nótese como cada pozo está asociado a cada uno de los 3 levantamientos mencionados.

A su vez, la frecuencia dominante del intervalo de interés se estimó a través de la extracción de la ondícula sísmica usando el método de autocorrelación, como se hizo en la generación de los sismogramas sintéticos.

Estos datos se utilizaron dentro de la fórmula para el mínimo espesor de entonación según Rayleigh (ecuación 3.7), obteniéndose así el límite de resolución vertical para la columna completa.

Finalmente, para el cálculo de la resolución en cada una de las secuencias individuales, se aplica la misma metodología que para la columna completa modificando las ecuaciones correspondientes para cada interfase. En las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se observan los valores de los límites de resolución vertical para cada uno de los pozos utilizados en este análisis.

4.6. Mapas de velocidad.

Para la generación de los mapas de velocidad fue necesario calcular el valor de esta en todos los pozos, para cada una de las superficies interpretadas. Con la finalidad de explicar este apartado, se tomarán como guía los cálculos realizados para el pozo PQE-6-D, ubicado al Centro del área de estudio (figura 4.19).

Tabla 4.4. Tabla tiempo-profundidad (tz) correspondiente al pozo PQE-6-D (los valores están referidos al dátum sísmico de 558 ft).

Profundidad (ft)	Tiempo Doble (ms)
200	71.68
400	143.48
600	214.20
800	284.12
1000	342.57
1200	400.17
1400	453.56
1600	508.78
1800	563.606
2000	615.83
2200	667.26
2400	720.05
2600	772.82
2800	824.68
3000	875.18
3200	922.05

Tabla 4.5. Cálculo de la resolución vertical para el pozo PQE-7-O,
correspondiente al levantamiento Z.

Capa	Prof. (pies)	TWT (ms)	Velocidad (pies/s)	Frecuencia extraída de la sísmica (Hz)	Resolución Vertical (pies)
Intramioceno	1107	372.69	5940.54	26	57.12
Oligoceno	2167	678.66	6928.67	24	72.17
Cretácico	3192	917.56	8581.28	22	97.51
Precretácico	4322	1146.39	9876.06	19	129.94
Columna completa	3215	773.70	8310.68	22	94.43

Tabla 4.6. Cálculo de la resolución vertical para el pozo PQE-6-D,
correspondiente al levantamiento M.

Capa	Prof. (pies)	TWT (ms)	Velocidad (pies/s)	Frecuencia extraída de la sísmica (Hz)	Resolución Vertical (pies)
Intramioceno	1345	437.18	6152.94	30	51.27
Oligoceno	2141	651.94	7413.16	28	66.18
Cretácico	2869	842.50	7640.35	26	73.46
Precretácico	3395	963.52	8693.42	23	94.49
Columna completa	2050	526.33	7789.77	24	81.14

Tabla 4.7. Cálculo de la resolución vertical para el pozo PQE-2-C, correspondiente al levantamiento CH-81.

Capa	Prof. (pies)	TWT (ms)	Velocidad (pies/s)	Frecuencia extraída de la sísmica (Hz)	Resolución Vertical (pies)
Intramioceno	736	321.67	4576.03	29	39.44
Oligoceno	1795	600.35	7600.08	27	70.37
Cretácico	3116	935.32	7887.34	25	78.87
Precretácico	4111	1139.47	9747.68	23	105.95
Columna completa	3375	817.79	8253.86	25	82.53

Para el pozo PQE-6-D se tiene que las superficies de interés, Intramioceno, Oligoceno, Cretácico y Precretácico; están ubicadas a una profundidad de 1345 pies, 2141 pies, 2869 pies y 3395 pies respectivamente (es importante resaltar que estas profundidades están medidas respecto al dátum sísmico de 558 pies, ya que a partir de este se inician los tiempos de reflexión). Los valores de tiempo doble de viaje (TWT) para cada interfase, se obtienen de la interpolación de la ley de velocidades del pozo, obtenida del amarre sintético-sísmica (tabla 4.4), a la profundidad correspondiente. Para este caso los valores fueron 437,19 ms; 651,94 ms; 842,51 ms y 963,52 ms respectivamente. Usando la fórmula

$$V_n = \frac{2000 * (z_n - z_{(n-1)})}{t_n - t_{(n-1)}}; \quad (4.4)$$

se obtiene el valor de velocidad interválica para cada capa sabiendo que z_n es el valor de la profundidad para la n-ésima interfase y t_n es el valor del tiempo doble de viaje para la n-ésima interfase. Multiplicando por 2000 se transforman las unidades de tiempo de ms a s y a su vez se transforman los TWT a tiempo simple. Cabe aclarar de nuevo que en este caso la interfase n=0 corresponde a 558 pies.

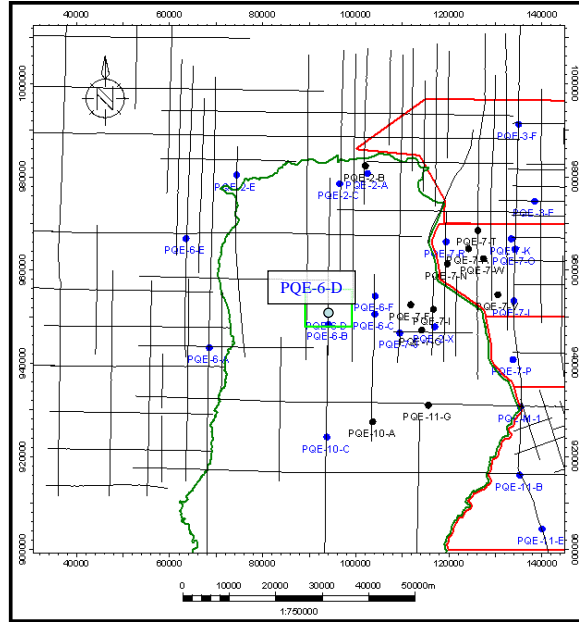


Figura 4.19. Ubicación del pozo PQE-6-D, utilizado como modelo para la explicación del cálculo de las velocidades.

Luego de calcular todos los valores de velocidad para todos los pozos se procedió a generar un mapa de velocidades por cada nivel utilizando el método de interpolación convergente. Luego de tener los 4 mapas se procedió a realizar un análisis cualitativo de los mismos. Se observó que el mapa correspondiente al Intramioceno presentaba una anomalía que no tenía sentido ni desde el punto de vista físico ni desde el punto de vista geológico. Para resolver esta situación se excluyeron los valores de velocidades de los pozos PQE-2-C y PQE-6-F en el mapa del Intramioceno ya que, debido a su cercanía y por el tipo de interpolación utilizada, estos generaban 2 picos de velocidad irreales. Al descartarlos el mapa de velocidad interválicas para el Intramioceno mostró mayor consistencia. Luego, se procedió a generar los mapas de velocidad definitivos, los cuales fueron utilizados para la conversión tiempo-profundidad.

4.7. Mapas estructurales en profundidad.

Una vez obtenidos los mapas en tiempo y en velocidad fue posible realizar la transformación a profundidad. Para esto se utilizó la fórmula 4.5, que se presenta a continuación:

$$z_n = z_{(n-1)} + \frac{V_n * (t_n - t_{(n-1)})}{2000}; \quad (4.5)$$

donde z_n es el mapa en profundidad de la superficie de interés, V_n es el mapa de velocidad para la misma superficie, y t_n es el mapa en tiempo de la n-ésima interfase. El 2000 multiplicador convierte los ms a s y el tiempo doble a tiempo simple. Para el caso del Intramioceno ($n=1$), la superficie z_0 corresponde a una superficie horizontal de cota 0 msnm. Por último se le debe restar el valor de 558 pies a los mapas para obtenerlos al nivel medio marino, debido a que los mapas en tiempo estaban amarrados a ese dátum, como ya se ha señalado anteriormente.

Finalmente, cada uno de los mapas tuvo que ser editado a mano para darle sentido geológico en las zonas en que el programa de interpolación no funcionó adecuadamente. Asimismo, fue necesario editar las curvas de nivel para darles el salto de falla calculado con anterioridad, debido a que el programa utilizado tampoco interpola correctamente contra las fallas.

4.8. Comprobación del modelo.

Para comprobar la certeza del modelo en profundidad obtenido, se tomaron 3 pozos que no fueron utilizados en el análisis de velocidades debido a que no contaban con el registro de Tiro de Verificación Sísmica correspondiente. Al ubicar estos pozos en cada uno de los mapas en profundidad generados y colocar su valor de profundidad correspondiente a cada nivel, obtenido previamente de la correlación estratigráfica, se pudieron comparar ambos valores

y determinar la utilidad de los mapas elaborados. Los resultados de esta comprobación se presentan en la sección 5.6.

En la figura 4.20 se tiene el mapa de ubicación con los once pozos que no contaban con registro de Tiro de Verificación Sísmica, resaltando los 3 utilizados en esta comprobación.

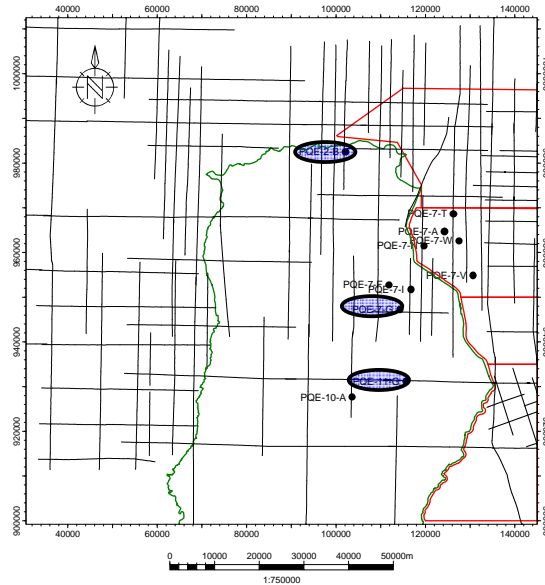


Figura 4.20. Ubicación de los pozos sin Tiro de Verificación Sísmica, resaltando los 3 pozos utilizados en la comprobación del modelo.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Sismograma sintético.

En la tabla 5.1 se observa que los valores de porcentaje de correlación entre la sísmica y los sismogramas sintéticos para cada pozo varían en un rango de 28% a 74%; ocurriendo las mejores correlaciones en los pozos PQE-7-P, PQE-6-E, y PQE-6-D; ubicados en las líneas Z-7520, M-7828 y M-7826 respectivamente. Los bajos valores que se obtuvieron en algunos pozos pueden ser causados por diversas razones. Primero varias de las líneas donde se ubican algunos pozos con TVS, poseen una calidad muy pobre y carecen de continuidad en los reflectores presentando bajo contenido de frecuencia, lo que a su vez conlleva a que la ondícula extraída de la sísmica no tenga el comportamiento deseado para realizar la convolución. Por otra parte existen pozos donde, basándose en las lecturas del registro Caliper, hubo problemas de estabilidad de hoyo como derrumbes o invasión del lodo de perforación hacia la formación. Estos problemas afectan las mediciones del tiempo de viaje de ondas P del registro sísmico y por consiguiente se verá afectado el cálculo de la impedancia acústica. En la figura 5.1 se observa el sismograma sintético del pozo PQE-1-A donde se tiene un comportamiento anormal de la curva Caliper.

Sin embargo puede decirse que los porcentajes de correlación son buenos, más aun tomando en cuenta la pobre calidad de las líneas. Esto permitió que por medio de los sismogramas sintéticos se lograran amarrar de manera satisfactoria los eventos sísmicos con las características geológicas de la traza sintética y los registros de pozo. Esto puede observarse en la figura 5.2 donde se presenta el sismograma sintético del pozo PQE-11-E en el cual se identifica la superficie erosiva correspondiente al tope Precretácico por un aumento en el conteo del registro GR y un máximo de amplitud positiva en la traza sintética causado por la

Tabla 5.1. Porcentajes de correlación de los sismogramas sintéticos realizados en este trabajo.

Pozo	Línea Sísmica usada en el amarre	Coefficiente de Correlación (%)	Frecuencia de la ondícula extraída
PQE-1-A	M-739	71	25
PQE-2-A	CH-8J	39	20
PQE-2-C	CH-8I	65	30
PQE-2-E	M-732	28	26
PQE-2-X	M-723	47	36
PQE-3-F	Z-720B	61	16
PQE-6-A	M-733	62	27
PQE-6-B	M-728	54	35
PQE-6-C	M-726	47	25
PQE-6-D	M-728	62	29
PQE-6-E	M-734	73	25
PQE-6-F	M-726	46	28
PQE-7-J	M-725	43	23
PQE-7-K	Z-720	36	18
PQE-7-L	Z-720	54	18
PQE-7-O	Z-720	64	22
PQE-7-P	Z-720	74	21
PQE-7-R	M-723	36	31
PQE-7-S	Z-7Q1	58	22
PQE-10-C	M-728	34	39
PQE-11-B	Z-7S1	51	26
PQE-11-D	SE-8IV	28	40
PQE-11-E	Z-720	64	29
PQE-M-1	Z-7R1	46	20

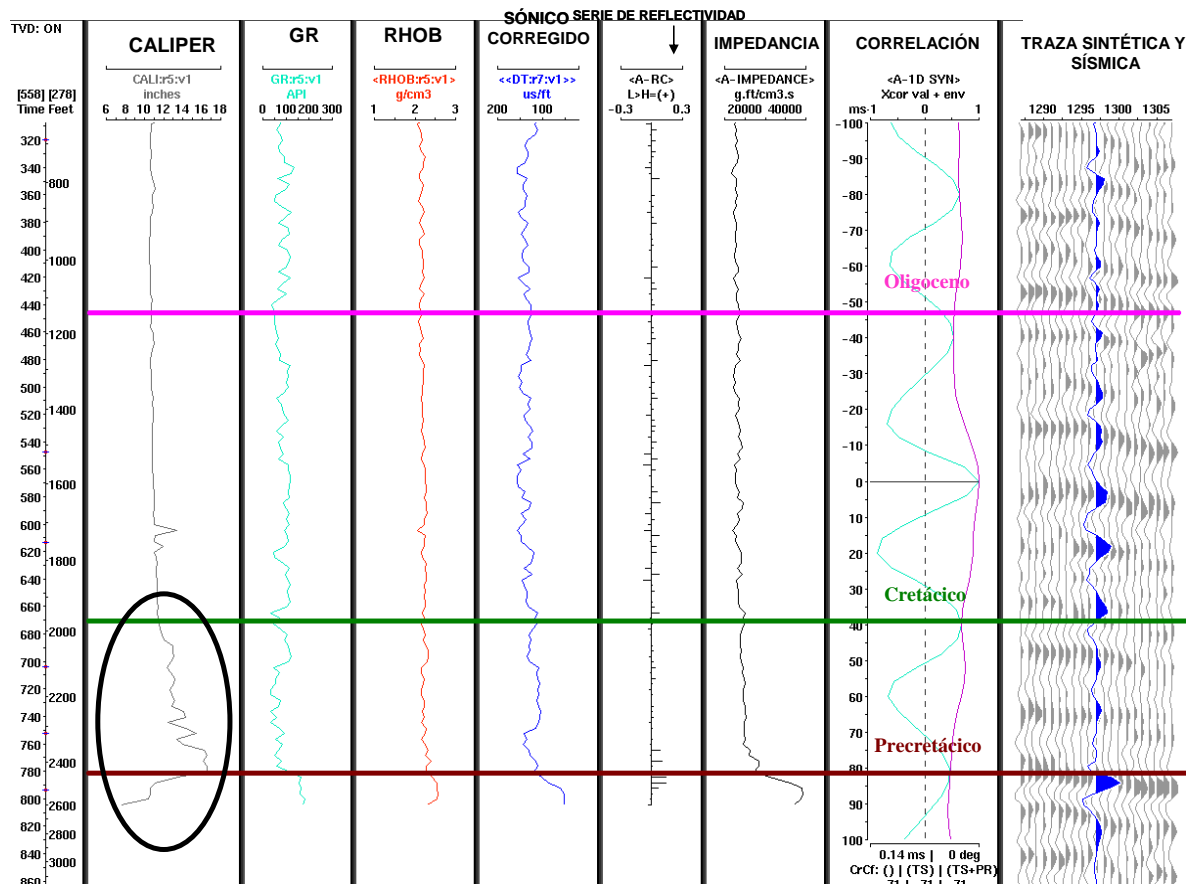


Figura 5.1. Sismograma Sintético del pozo PQE-1-A donde se muestra una lectura anómala del registro Caliper causada por algún problema de estabilidad de hoyo. A pesar de que la correlación no es mala este no es un sintético confiable porque los valores del registro sónico pueden estar afectados.

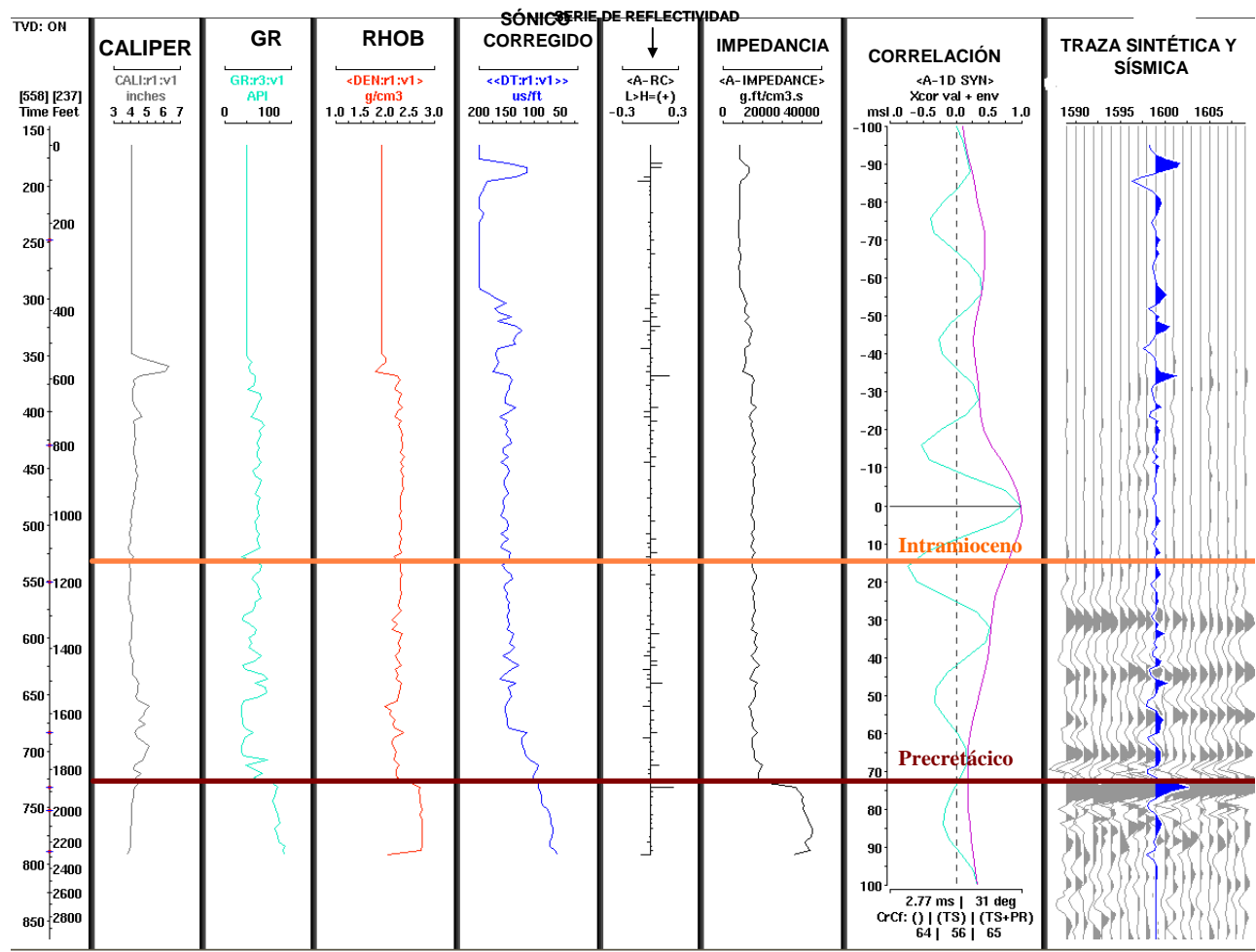


Figura 5.2. Sismograma Sintético del pozo PQE-11-E. Obsérvese como la superficie erosiva correspondiente al tope del Precretácico se presenta como la reflexión positiva de mayor amplitud en la traza, concordando completamente con la respuesta sísmica

diferencia de velocidad y densidad de roca entre las formaciones del Precretácico y las del Cretácico.

Asimismo, se determinó por medio del amarre con los sismogramas sintéticos, que los topes definidos en las correlaciones geológicas pueden ser seguidos y diferenciados en las líneas sísmicas correspondientes al Intramioceno, Oligoceno, Cretácico y Precretácico.

5.2. Interpretación sísmica.

5.2.1. Interpretación de horizontes.

Debido al buen amarre de las líneas sísmicas y los rasgos geológicos evidenciado en los sismogramas sintéticos, era de esperarse que la interpretación de las secciones sísmicas coincidiera con la de los registros litológicos como el Gamma Ray y el de resistividad. En la figura 5.3 puede observarse como cada uno de los horizontes interpretados presentan características y patrones de reflexión específicos que permiten relacionarlos a los eventos geológicos respectivos.

En la línea Z-720 (figura 5.4), la cual abarca la mayor parte del área de estudio en dirección Norte Sur y está ubicada en la zona Este de la misma, puede observarse la disposición de la secuencia Cretácico-Terciaria estudiada y como los espesores aumentan hacia el Norte, mientras que hacia el Sur estas se reducen hasta alcanzar el acuñaamiento de los topes correspondientes al Cretácico y al Oligoceno, tal y como se señala en PDVSA (1983). Como se mencionó en el capítulo anterior, la discordancia del Precretácico se pudo identificar fácilmente en todas las líneas interpretadas, al igual que el horizonte definido como tope del Cretácico el cual está presente en toda la zona, exceptuando hacia el sur debido a que este se acuña contra el Precretácico. Un poco mas al sur el Oligoceno también se acuña contra esta discordancia y el mismo aumenta su espesor hacia el noroeste del área de estudio hasta que ya no es visible en las secciones sísmicas. Por último el horizonte Intramioceno fue el más difícil de interpretar y propagar

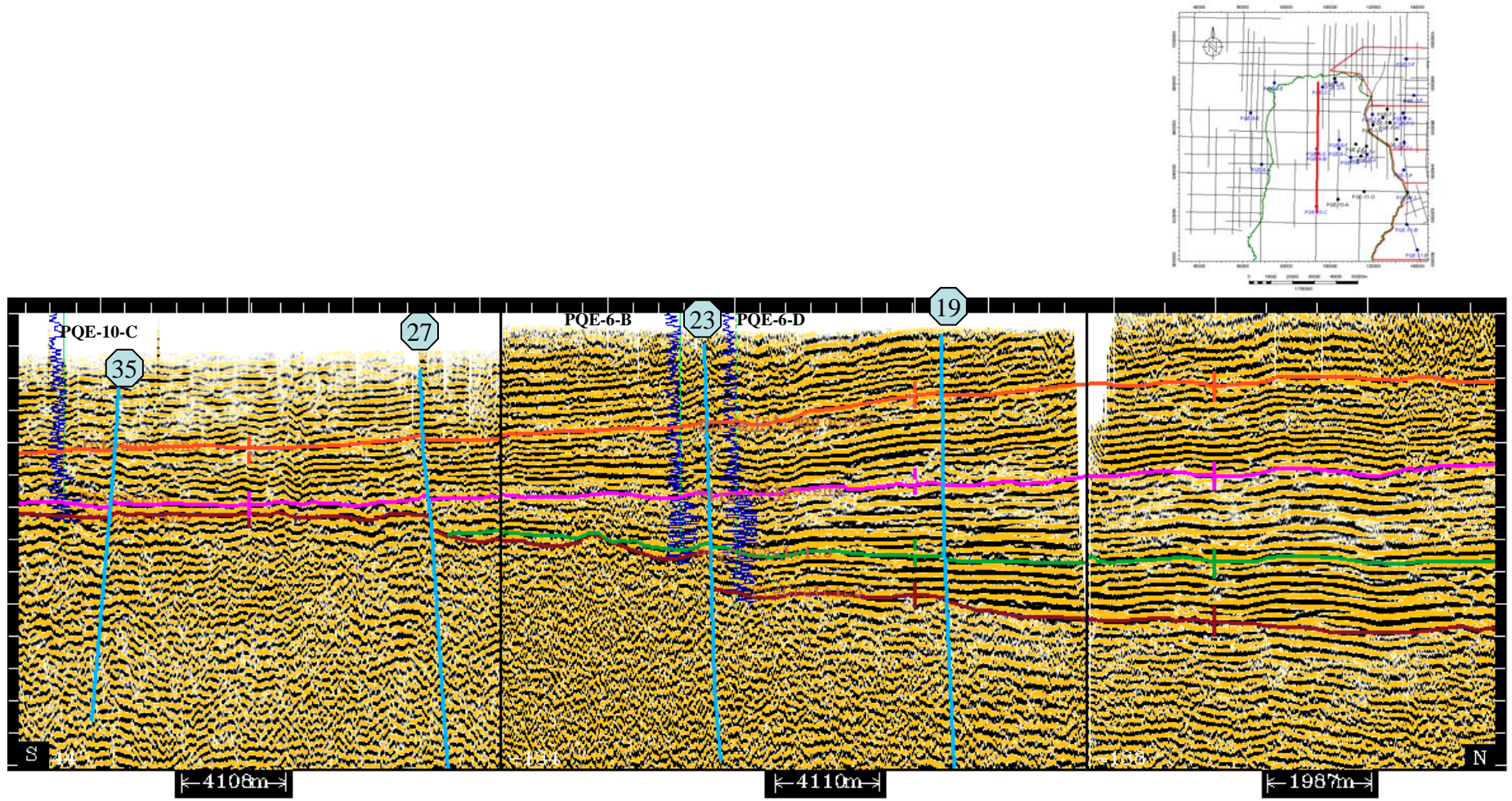


Figura 5.3. Sección sísmica M-728 interpretada en tiempo. En azul se encuentran los registros GR de los pozos, en celeste las fallas y su número asignado y en naranja, morado, verde y vinotinto las superficies erosivas interpretadas como Intramioceno, Oligoceno, Cretácico y Precretácico respectivamente.

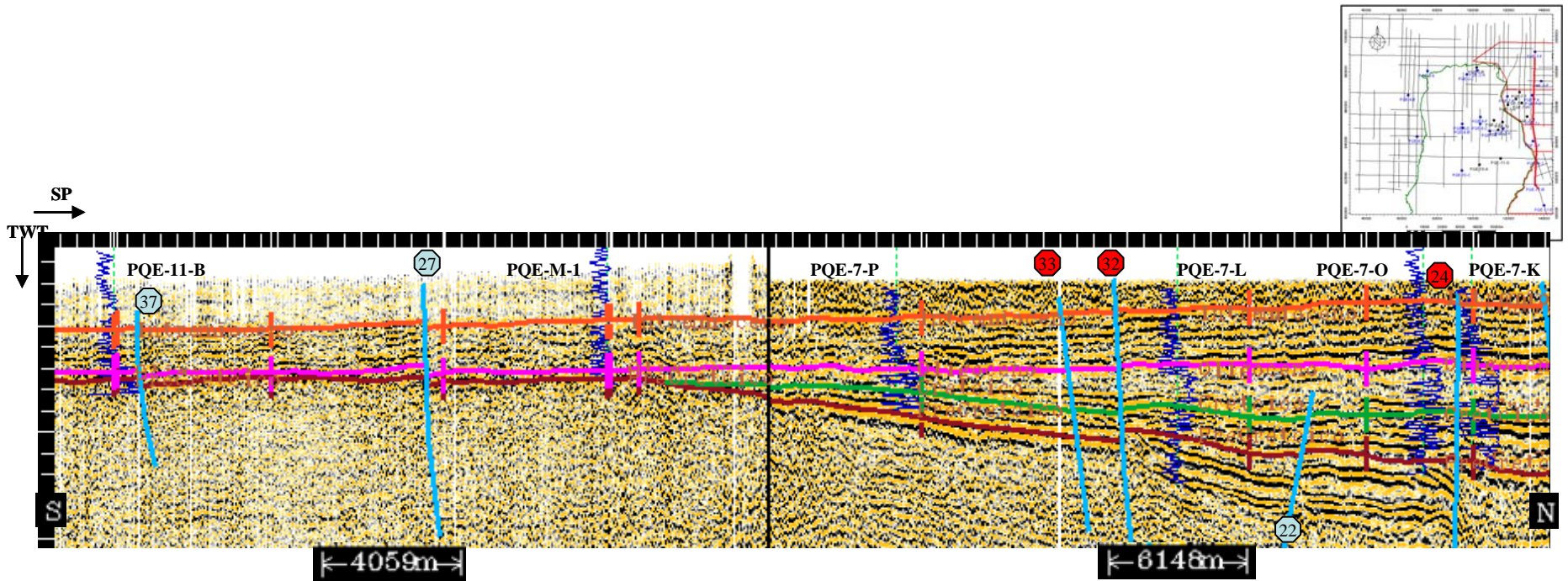


Figura 5.4. Sección sísmica Z-7520 interpretada en tiempo. En azul se encuentran los registros GR de los pozos, en celeste las fallas y su número asignado (las de fondo rojo son inversas) y en naranja, morado, verde y vinotinto las superficies erosivas interpretadas como Intramioceno, Oligoceno, Cretácico y Precretácico respectivamente. Obsérvese como los espesores aumentan hacia el norte, mientras hacia el sur puede verse el acuñamiento del Cretácico contra el tope del Precretácico.

por varias razones. Primero en algunas zonas, se sabe por correlaciones de pozo, que se encuentra concordante por lo que es complicado conseguir terminaciones sísmicas distintivas. Segundo en muchas de las líneas sísmicas, éste se encuentra por encima de los 500 ms, donde se presenta menor continuidad y calidad de la sísmica. Y tercero, el horizonte correspondiente al Intramioceno se va elevando hacia el Noroeste, región donde aflora la formación asociada al mismo, hasta que no es posible encontrarlo mas dentro de las secciones sísmicas.

Por otra parte, en la línea M-728 (figura 5.3), la cual está localizada en la región central del Parque Nacional Aguaro Guariquito, puede observarse como, al igual que en la sección anterior, los espesores de las secuencias Oligoceno e Intramioceno aumentan hacia el Norte. En esta sección es mas notorio el contraste entre los eventos de la secuencia Precretácico-Cretácico, y la roca Paleozoica discordante debajo de esta. Por último es evidente el alto estructural presente hacia el Sur de la línea, evidenciado por la falla 23, el cual está relacionado al Arco de El Baúl como se describirá más adelante.

Asimismo, pueden ser identificada, a lo largo del área de estudio, líneas que muestran las truncaciones contra el tope del Precretácico (figura 5.5) evidenciando la existencia de la superficie erosiva previa a la transgresión del Cretácico. Sobre esta discordancia también pueden identificarse *onlaps* hasta llegar al acuñamiento de los topes Cretácico y Oligoceno, dando igualmente muestras de dicha transgresión (figura 5.6). Sobre el horizonte correspondiente al tope del Cretácico pueden observarse *downlaps* (figura 5.7), indicadores de la regresión existente hacia finales del mismo. Igualmente se observan *downlaps* en el tope del Oligoceno que sugieren la continuación del margen regresivo en ésta parte de la cuenca (figura 5.8).

La línea M-82D también de orientación NS (apéndice A), está ubicada al Oeste del Parque y nos muestra la distribución de las secuencias en dicha zona del área de estudio. Al igual que en las otras secciones se presenta un incremento de los espesores hacia el Norte. Hacia el Sur de la sección, puede observarse como el

horizonte correspondiente al Precretácico mantiene un muy bajo grado de buzamiento manteniéndose de esta manera el alto a unos 800 ms. Los tope del Cretácico y Oligoceno continúan acuñaándose hacia el Sur, mientras que el tope del Intramioceno profundiza pronunciadamente también hacia el sur. Nótese también como en esta zona pueden observarse muchos mas eventos por encima del tope Intramioceno lo que no ocurre de igual manera hacia el Norte y el Este del área de estudio.

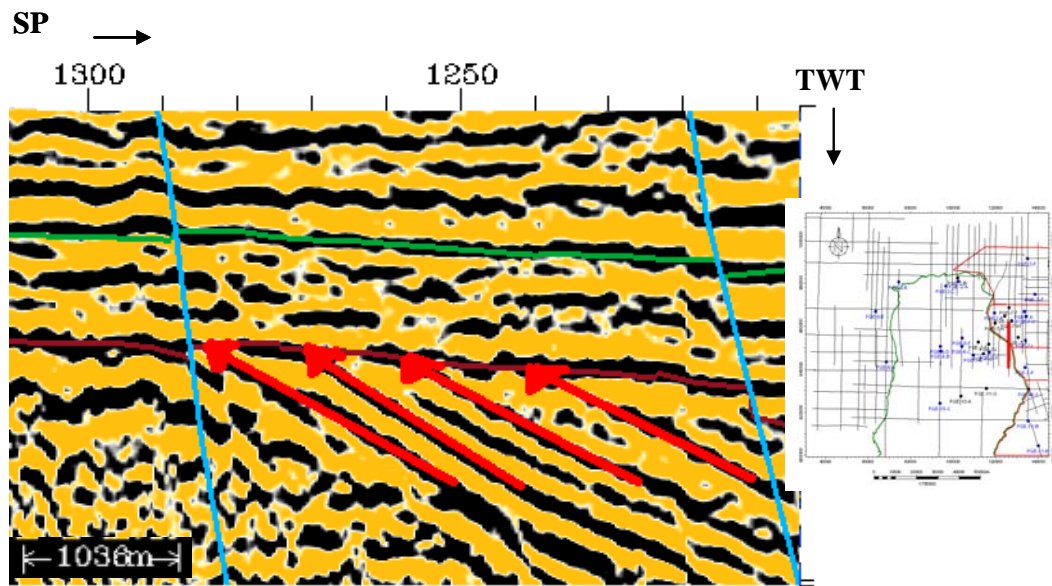


Figura 5.5. Presencia de truncaciones (flechas en rojo) contra el tope Precretácico (vinotinto), indicando la existencia de la superficie erosiva previa a la transgresión del Cretácico.

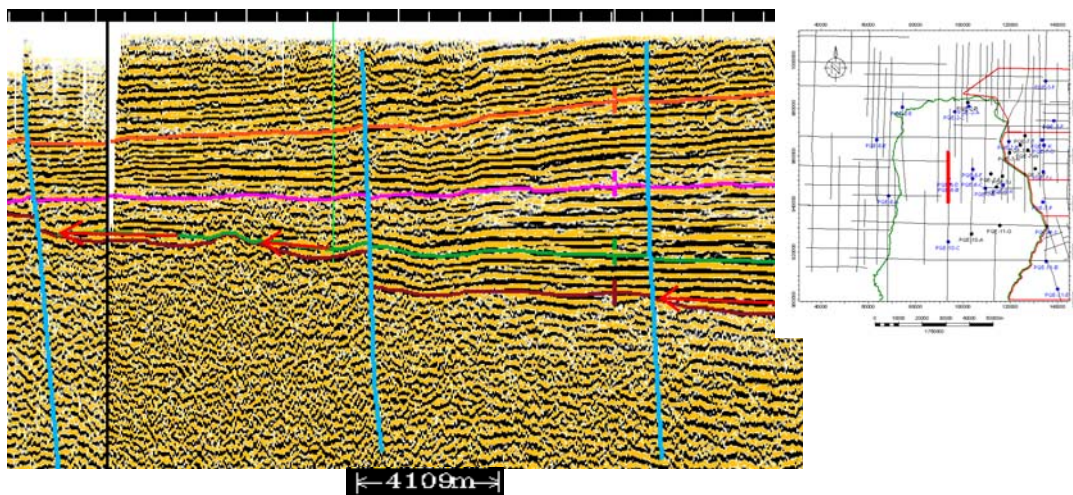


Figura 5.6. Presencia de terminaciones onlaps (flechas en rojo) contra el tope Precretácico (vinotinto), indicando el régimen transgresivo durante el Cretácico, hasta acuñaarse.

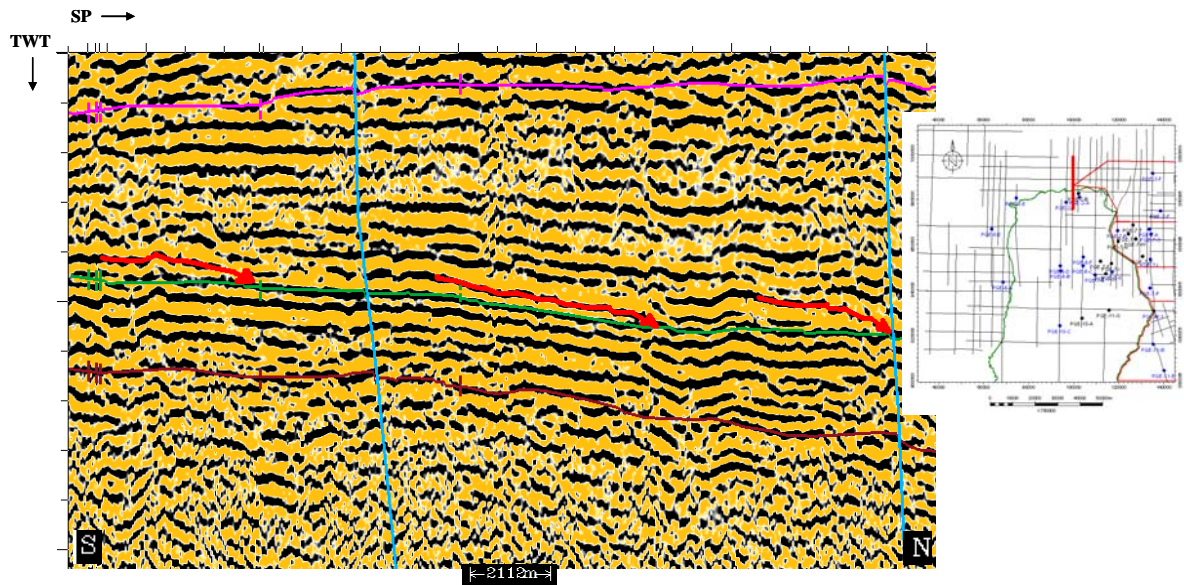


Figura 5.7. Presencia de terminaciones downlap (flechas en rojo) contra el tope Cretácico (verde), indicando el régimen regresivo hacia finales del Cretácico.

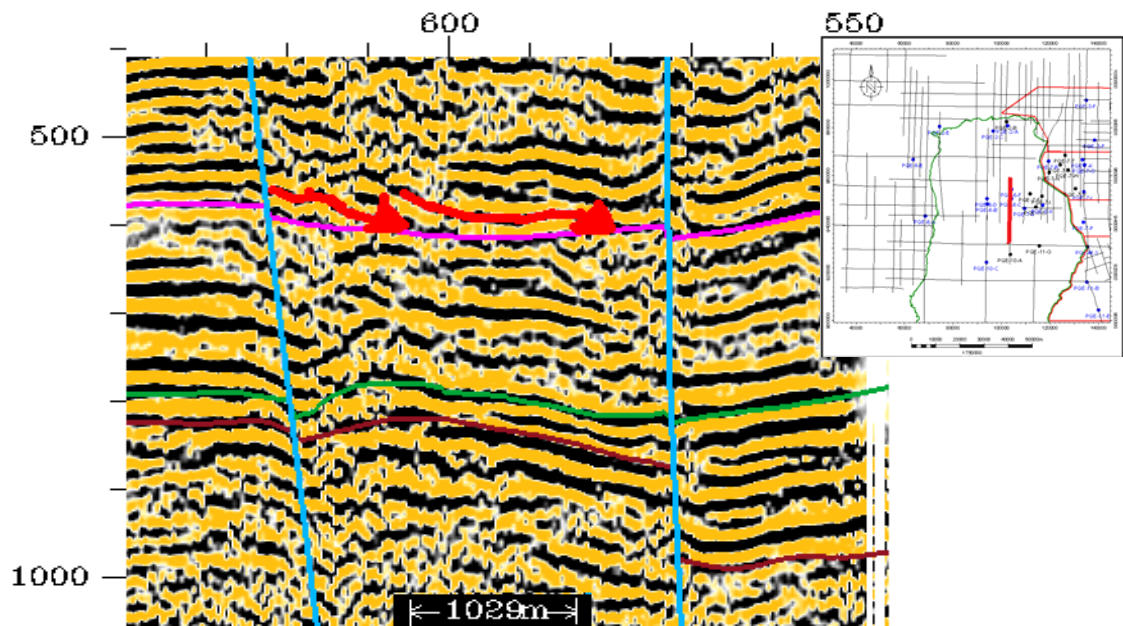


Figura 5.8. Presencia de terminaciones downlap (flechas en rojo) contra el tope Oligoceno (morado), indicando la continuación del régimen regresivo.

5.2.2. Interpretación de fallas.

La gran mayoría de las fallas interpretadas poseen un movimiento normal con una dirección principal aproximada de N75E y dirección de buzamiento alternados al Norte y al Sur. Esto coincide con lo que señala Talwani (2002) para la zona de estudio, quien describe una orientación Este-Oeste y Noreste-Suroeste de las estructuras y tectónica para la división Oeste de la faja y plantea que se deba posiblemente al margen extensional ocurrido en el Mesozoico inferior, en el cual la separación entre Yucatán y la Placa Suramericana crea un intenso fallamiento, representado en la Subcuenca de Guárico por fallas profundas, como la Falla Altamira, la cual se encuentra cercana al área de estudio. Asimismo, esta alineación de fallas coincide con el principal sistema estructural presente en el Área Boyacá, el sistema de fallas Machete (PDVSA, 1983).

Todas las fallas son de ángulo alto, entre 80° y 85° de buzamiento, y los saltos se encuentran en un rango entre 50 y 400 pies (Apéndice B). Cabe destacar en este punto que la falla identificada con el número 23, fue la falla donde se encontró el salto más grande, el cual fue de 400' para el tope del Precretácico, mientras que para las secuencias superiores el salto fue mucho más pequeño. Esta falla se encuentra hacia el flanco Norte del Arco de El Baúl, por lo que se pudiera decir que la misma está fallando de manera importante a dicha estructura. Esto último evidencia la fuerte influencia de la tectónica distensiva en las secuencias Paleozoicas y Jurásicas y no así para las posteriores al Cretácico, donde los saltos de falla son pequeños en la mayoría de los casos, hasta desaparecer el efecto en las secuencias superiores (PDVSA, 2007). En este punto debe señalarse que las fallas no son necesariamente ortogonales a las secciones sísmicas por lo que los saltos calculados en este trabajo son aparentes.

Puede identificarse un segundo tren de fallas con una dirección preferencial N50O. Estas fallas no son muy extensas pero puede observarse claramente su patrón dentro de las fallas interpretadas. Para Talwani (2002), las fallas de la división Este de la faja tienen una orientación de N30-45O. A pesar de

que el área de estudio se encuentra del lado oeste de la faja, este conjunto de fallas pueden estar relacionadas a las mencionadas por dicho autor, como lo señalan otros estudios tales como el de PDVSA (2007) y Espailat (2008). En la figura 5.9 se diferencian las 2 orientaciones principales de las fallas interpretadas.

Por último, se tiene que se interpretaron 3 fallas de movimiento inverso, todas ubicadas dentro de los Bloques del Área Boyacá y las cuales afectan toda la columna interpretada. Para PDVSA (2007), hacia el Oligoceno las fallas dejan de producir movimientos normales notables y en algunos casos pasan a invertir su movimiento reactivándose a inversas de ángulo alto. Sin embargo, no se observaron más fallas inversas en el resto del área, por lo que se concluyó que la presencia de estas 3 fallas responde a reacomodo y balanceo del modelo.

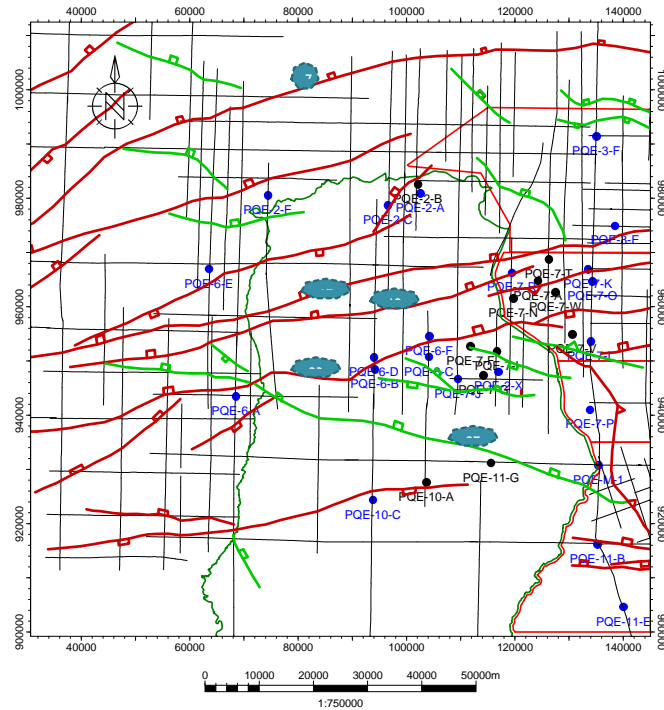


Figura 5.9. Mapa de fallas para el Precretácico. Las fallas en rojo representan la dirección principal de N75E y las fallas en verde el segundo tren de fallas identificado de orientación N50O. En blanco se muestran los números asignados a las fallas principales.

5.3. Mapas en tiempo.

Observando los mapas en tiempo de las 4 superficies de interés se puede concluir primeramente que existe similitud entre las tendencias del Intramioceno y el Oligoceno y entre las del Cretácico con el Precretácico, en toda la extensión del área. Asimismo, se tiene que hacia el Sur, las 4 superficies presentan un buzamiento hacia el Suroeste con dirección preferencial S45O y un gradiente promedio de 10 ms/km para las superficies del Intramioceno y el Oligoceno y de 5 ms/km para el Cretácico y el Precretácico, aclarando que la superficie del Cretácico se encuentra en muy poca extensión hacia esta zona debido a su acuñamiento contra la discordancia del Precretácico (figura 5.10), como también lo hace, mas hacia el sur, la superficie Oligoceno.

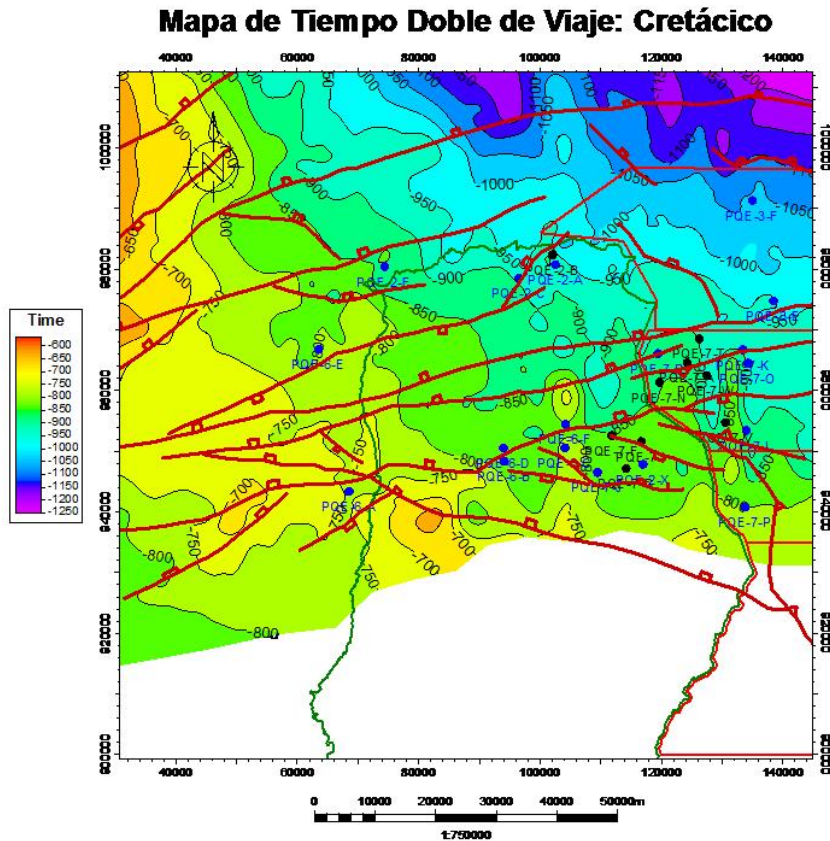


Figura 5.10. Mapa de Tiempo Doble de viaje para el Cretácico (ms), mostrando en color rojo las fallas interpretadas para esta secuencia. La línea verde indica el límite del Parque Nacional Aguaro Guariquito.

En el Norte del área de estudio se distinguen las diferencias entre las tendencias de las dos secuencias superiores y las 2 inferiores. Para el Intramioceno y Oligoceno, (Apéndices C y D) se observa una zona de muy bajo buzamiento, la cual se encuentra delimitada entre las fallas 18 y 27 y donde las curvas poseen una dirección preferencial EO. Al norte de la falla 18 el comportamiento de la superficie cambia y se presenta una disminución en los tiempos de viaje hacia el Noroeste del mapa, con una orientación preferencial de máximo crecimiento S45E. Los gradientes en esta zona son de unos 21 ms/km para el Intramioceno y de unos 16 ms/km para el Oligoceno.

Por otra parte, en los mapas del Cretácico y el Precretácico se presenta un alto en el centro del mapa, con forma de anticlinal, representado por cierres en las curvas de tiempo, con una dirección preferencial de N45O y el mismo se encuentra fuertemente fallado con un gran salto en la falla 23. Este alto es más evidente en el mapa de doble tiempo de viaje de la superficie correspondiente al Precretácico y el mismo está asociado a la intrusión granítica del Arco de El Baúl. (figura 5.11). Inclusive, en el mapa del Cretácico puede observarse como el acuñamiento de esta sección pareciera ser contra este alto. Al Norte del alto ambas superficies continúan con la tendencia presentada hacia el Sur, pero esta vez buzando hacia el noreste con dirección principal de N45E, presentando primero gradientes de 20ms/km aproximadamente, el cual luego disminuye a unos 5ms/km.

5.4. Mapas de Velocidad.

El mapa de velocidades interválicas para el tope del Intramioceno presenta una primera tendencia uniforme de las curvas desde la zona mas al Sur del área, en la que se encuentra el máximo de 7600 pies/s, disminuyendo los valores a un gradiente de 40 pies/s en dirección aproximada SN. Hacia el Noroeste esta tendencia se mantiene hasta conseguirse con un cierre de valor mínimo de 5000 pies/s. Este valor está relacionado al valor de velocidad del pozo PQE-6-E.

Lamentablemente hacia esta zona no se tiene un buen control de los datos debido a la baja densidad de pozos. Asimismo, esta tendencia puede seguirse también, desde el valor de 7600 pies/s, hacia el Este con una orientación de N80E, y un gradiente de unos 28,57 pies/s hasta encontrarse con un cierre de 5600 pies/s. En la región Noreste del mapa se observa una franja de mínimo gradiente de anchura aproximada de 42 Km, entre las curvas de 6000 y 5600 pies/s y con una dirección de N30E.

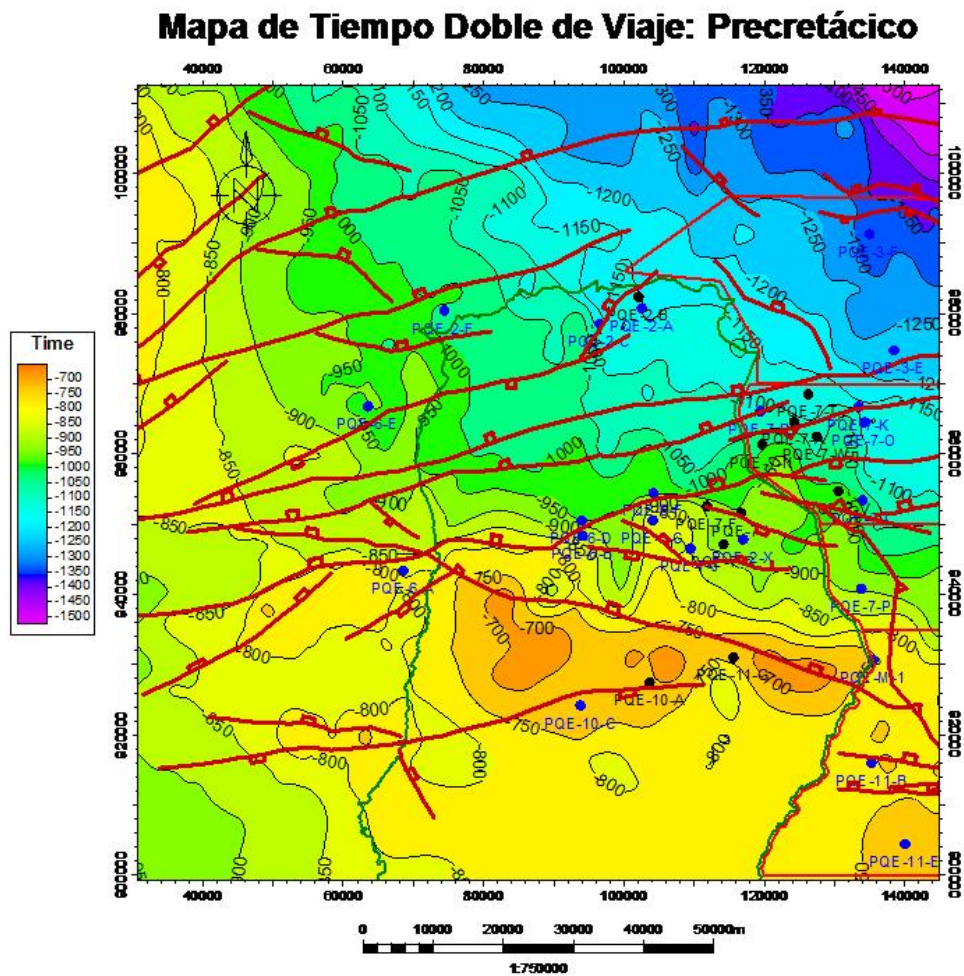


Figura 5.11. Mapa de Tiempo Doble de viaje para el Precretácico, mostrando en color rojo las fallas interpretadas para esta secuencia.

Los valores de velocidad para los pozos PQE-2-C y PQE-6-F fueron excluidos del mapa, debido a que los mismos generaban 2 picos de velocidad, uno máximo y otro mínimo, lo cual no era coherente geológicamente ni físicamente.

La superficie de velocidad para el tope Oligoceno presenta valores que van desde 8000 pies/s hasta 6200 pies/s. El valor máximo se encuentra al Este del área, entre los Bloques Norte y uno del Área Boyacá. Desde este punto la velocidad comienza a disminuir hacia el Este del mapa, presentándose en el centro una franja de mínimo gradiente entre las curvas de 7200 pies/s y 7400 pies/s, en dirección N85E y una anchura de 25 Km. Dentro de esta franja se observan 2 cierres de 7200 y 7400 pies/s. Esta franja de bajo gradiente coincide en ubicación con la zona de bajo buzamiento del mapa de tiempo, verificando así que se trata de una zona de bajo contraste lateral de densidades. Hacia el Noreste se encuentra el valor mínimo del mapa, en un cierre de 6200 pies/s. Como se mencionó anteriormente, es posible que debido al poco control y cantidad de pozos que hay en este sector los problemas de interpolación son mayores.

El tope Cretácico, presenta una variación homogénea de las velocidades con valores que van desde 7400 pies/s en el oeste del área de estudio hasta 9400 pies/s en la esquina noreste del mismo. La tendencia de las curvas es EO y hacia el centro del área se reflejan un poco para terminar en una orientación N45E. De los 4 mapas de velocidades, el del cretácico es el que presenta menor contraste lateral de velocidades.

Por último, el mapa de velocidades para el Precretácico presenta una tendencia bastante homogénea, con curvas que aumentan desde un valor mínimo de 5500 pies/s en el cuadrante Suroeste hasta el máximo de 12000 pies/s en el cuadrante Noreste, siguiendo una orientación N45E muy marcada. Hacia el centro del mapa se ven algunos cierres pequeños y anomalías, generadas seguramente por los pozos que están de un lado y otro de la falla 23, la cual tiene un salto de 400', generando un gran contraste de velocidades entre los valores de dichos pozos.

Como era de esperarse los mapas de velocidad muestran valores más altos hacia donde las superficies se profundizan, cumpliendo así la ley de velocidades.

También es importante el hacer mención a que en este tipo de análisis cuantitativo se pueden generar errores al interpolar a medida que el área sea más extensa. En este caso a pesar de que se cuenta con una buena cantidad de pozos, el área de 11000 Km² puede generar que el programa de interpolación incurra en algún tipo de error a la hora de generar las superficies.

5.5. Mapas estructurales en profundidad.

En los apéndices I, J, K y L pueden encontrarse los mapas estructurales generados para cada una de los topes de secuencia interpretados en este trabajo. Estos mapas estructurales están dominados por las fallas interpretadas y por el rasgo estructural más importante de la zona, un alto ubicado en el Sur y región central del área de estudio. Este alto coincide en ubicación y dirección con el Arco de El Baúl, y el mismo está a su vez asociado al Alto Machete y al Arco de Monasterio, separando las cuencas sedimentarias de la subcuenca de Guárico y Barinas-Apure. (PDVSA, 1992).

El mapa correspondiente a la secuencia Intramioceno puede ser dividido en tres zonas principales definidas por el comportamiento de las curvas isópacas. En primer lugar, hacia el Sur del área de estudio las curvas presentan un fuerte buzamiento en dirección Sur-Suroeste de gradiente promedio 35 pies/km. La segunda zona se consigue entre la falla identificada con el número 27 y la falla 18, las cuales forman una especie de cuña hacia el Oeste. En esta región se presenta una especie de meseta con un buzamiento muy bajo de un gradiente aproximado de 10 pies/km, observándose un importante efecto extensional del sistema de fallas presentes en el área. Al Norte de la falla 18 cambia de nuevo el comportamiento de las curvas, tomando estas una dirección N50E y elevándose hacia el Noroeste con un gradiente promedio de 26 pies/km. Hacia esta zona no se tiene mayor control de este tope pero se sabe, por los mapas de geología de superficie, que el mismo aflora un poco más adelante en esta dirección.

El mapa correspondiente al tope Oligoceno tiene un comportamiento igual, sino idéntico, al del Intramioceno. Al sur de la falla 27 presenta también un buzamiento con dirección Suroeste de gradiente promedio de 40 pies/km, con la diferencia que esta superficie termina en un acuñaamiento contra las formaciones Paleozoicas presentes en el alto. Entre las fallas 27 y 18 se tiene igualmente un área de bajo buzamiento y bastante fallada. Por último al norte de la falla 18 la superficie se eleva hacia el noroeste con unos 25 pies/km de gradiente.

En el mapa estructural del tope Cretácico puede observarse rápidamente que este está mucho más influenciado por el alto que las 2 superficies suprayacentes. En primer lugar esta superficie se encuentra acuñaándose contra el alto formando un límite de roca de dirección aproximada N85E. Hacia el Oeste se tiene la máxima elevación de las curvas a 1800 pies y las mismas se presentan de manera alargada formando un anticlinal de dirección N45O. A partir de este alto la superficie buza transversalmente hacia ambos lados del mismo, al suroeste y al noroeste. Para el resto del mapa se tiene que las curvas mantienen la misma tendencia buzando en una dirección N45E con gradiente promedio de 21 pies/km y controladas por el sistema de fallas extensivo interpretado.

Por último, en la superficie en profundidad del tope del Precretácico se puede identificar claramente el rasgo estructural característico del área, el alto asociado al Arco de El Baúl; y el mismo se origina desde la esquina Sureste del mapa en dirección N50O, con una curva de valor mínimo de 1800pies de forma anticlinal alargada. Asimismo es notable la manera en que este alto es fuertemente fallado por la falla 23 en la que se encontró el salto mas grande de la zona, siendo este de 400'. Esta falla es el otro rasgo estructural de importancia en esta secuencia. La misma abarca toda la extensión del área de estudio desde el oeste del Parque Nacional hasta el bloque 1 del Área Boyacá. A partir del alto la superficie del Precretácico buza transversalmente al anticlinal hacia el Suroeste y hacia el Noreste alcanzando hasta una profundidad de 6000 pies con un gradiente promedio de 42 pies/km.

Con el fin de darle mas certeza a la asociación que se establece entre el alto identificado y el Arco de El Baúl, se buscó un mapa de Anomalía de Bouger dentro del cual se pudiera identificar la anomalía producida por esta estructura con el fin de georeferenciarlo al mapa estructural y verificar la coincidencia entre los dos. El mapa que pudo conseguirse es muy regional, a nivel de toda Venezuela, por lo que la Anomalía de Bouger asociada al arco no representa una diferenciación importante dentro de este. Sin embargo, como puede verse en la figura 5.12, en la ubicación y dirección del Arco se encuentra interpretado un anticlinal que sin lugar a dudas hace referencia a este.

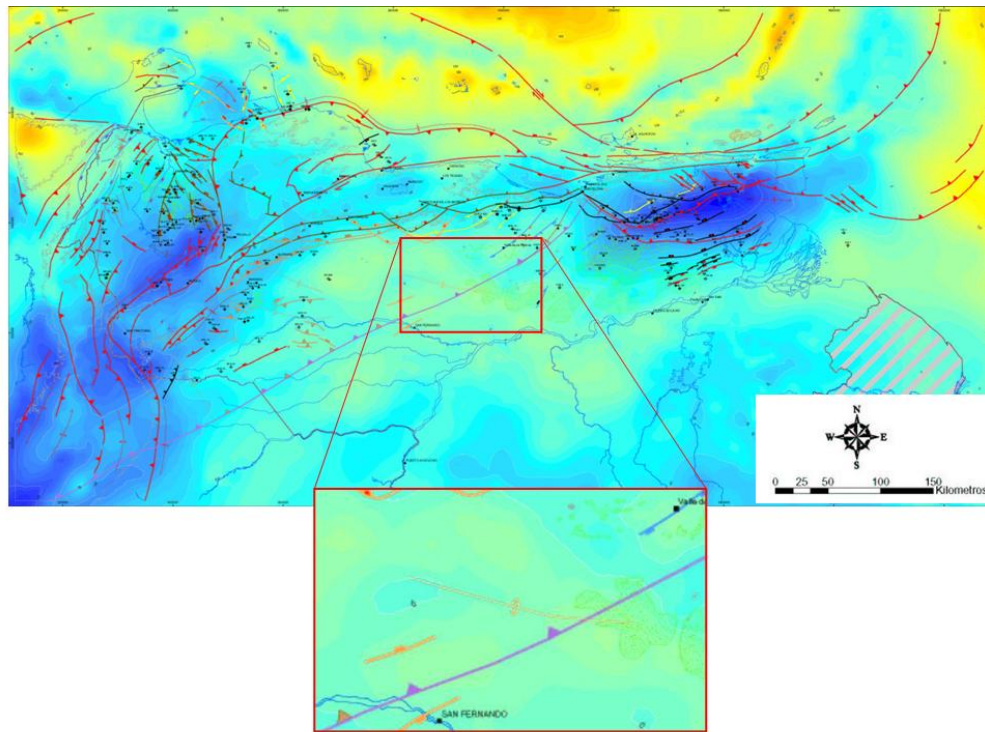


Figura 5.12. Mapa Regional para Venezuela de Anomalía de Bouger. (tomado de PDVSA,2000). En el centro se señala la zona donde se ubica este estudio. Nótese el anticlinal con dirección N50O en el centro de dicha zona.

Por lo tanto, al georeferenciar el mapa de Anomalía de Bouger y montar el mapa estructural en profundidad del tope Precretácico sobre éste, se tiene una clara correspondencia entre el anticlinal marcado en el mapa de Anomalía de Bouger y el anticlinal mapeado para esta superficie, como se observa en la figura

5.13. Esto último evidencia que en efecto el rasgo estructural más importante mapeado para el área de estudio corresponde al Arco de El Baúl, concretando así uno de los objetivos propuestos en el proyecto de este trabajo.

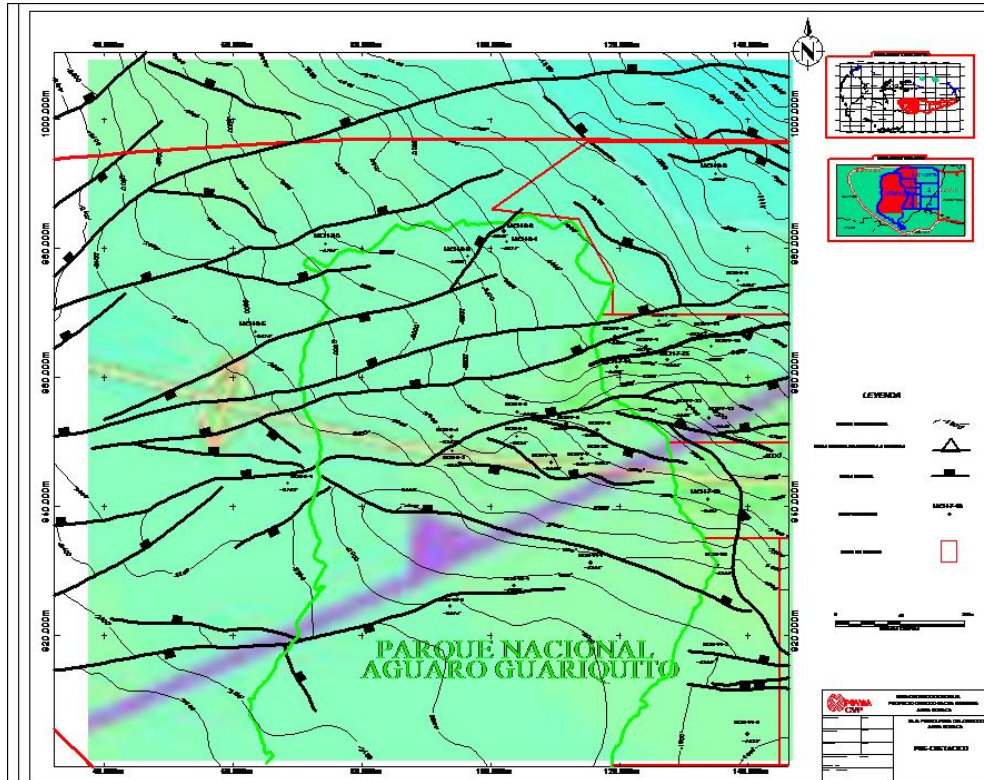


Figura 5.13. Mapa estructural del Precretácico georeferenciado al mapa de AB. Se observa claramente la coincidencia en dirección y ubicación del alto presente en el mapa estructural y el anticlinal (en naranja) marcado en el mapa de Anomalía de Bouger.

Finalmente, se tiene que luego de ver los 4 mapas estructurales en profundidad se puede decir que las fallas interpretadas definen un sistema de esfuerzos extensivos durante la evolución de la cuenca, como lo indican distintos autores. Las 3 fallas inversas interpretadas pueden tener su origen en el sistema compresional del Oligoceno. Asimismo, debe tenerse en claro que existe la posibilidad de que hayan más fallas que no pudieron ser interpretadas por causa de la resolución sísmica, si su salto fuese menor que el límite de la resolución vertical calculada.

5.6. Comprobación del modelo.

Con la finalidad de corroborar la validez y utilidad de los mapas estructurales generados se procedió a calcular el error en 3 pozos que no hayan sido utilizados en la construcción del modelo de velocidades. Estos 3 pozos fueron el PQE-2-B, el PQE-7-G y el PQE-11-G, al Norte, Centro y Sur del Parque Nacional respectivamente (figura 4.20). Al tener los topes correspondientes a las superficies erosivas interpretadas; provenientes de la correlación estratigráfica de pozos, se proyectaron los 3 pozos en los 4 mapas para conocer su intersección con las superficies en profundidad obtenidas durante este trabajo. En las tablas 5.2, 5.3 y 5.4; se tiene el resumen de estos cálculos.

Tabla 5.2. Cálculo del error en los mapas estructurales para el pozo PQE-2-B

Superficie	Profundidad proyectada en el mapa estructural (pies)	Profundidad en el pozo (pies)	Error (pies)	Resolución Vertical (pies)
Intramioceno	130	150	20	57.12
Oligoceno	1290	1310	20	72.17
Cretácico	2600	2630	30	97.51
Precretácico	3750	3742	8	129.94

Tabla 5.3. Cálculo del error en los mapas estructurales para el pozo PQE-7-G

Superficie	Profundidad proyectada en el mapa estructural (pies)	Profundidad en el pozo (pies)	Error (pies)	Resolución Vertical (pies)
Intramioceno	755	811	56	57.12
Oligoceno	1650	1661	11	72.17
Cretácico	2180	2191	11	97.51
Precretácico	2550	2501	49	129.94

Tabla 5.4. Cálculo del error en los mapas estructurales para el pozo PQE-11-G

Superficie	Profundidad proyectada en el mapa estructural (pies)	Profundidad en el pozo (pies)	Error (pies)	Resolución Vertical (pies)
Intramioceno	925	901	24	57.12
Oligoceno	1675	1659	16	72.17
Precretácico	1750	1806	56	129.94

Como se puede observar, en las tablas anteriores, el error es menor que la resolución vertical para las 4 secuencias en los 3 pozos estudiados. Este hecho demuestra que los mapas estructurales en profundidad generados en este estudio funcionan para las 4 secuencias interpretadas. Asimismo, cabe destacar que mientras mas alejados se encuentre el punto de prueba de los pozos utilizados para el cálculo y generación del modelo de velocidades utilizado para la transformación de tiempo a profundidad, la incertidumbre aumentará y probablemente el porcentaje de error será mayor.

CONCLUSIONES

- Luego de realizar la interpretación sismo estructural de la secuencia Cretácico-Terciario, presente a lo largo de toda el área de estudio, se observó que esta se encuentra dominada por los procesos tectónicos de la Cuenca Oriental de Venezuela, en especial de la Sub-Cuenca de Guárico. Esto se evidencia por la presencia de terminaciones sísmicas tipo *onlap* sobre la discordancia del Precretácico, terminando con el acuñaamiento del tope del Cretácico sobre la discordancia Precretácica, indicando así la transgresión ocurrida para ese período.
- Se observan terminaciones *downlaps* sobre los topes del Cretácico y del Oligoceno evidenciando la regresión desde finales del Cretácico.
- La discordancia del Precretácico se caracteriza por ser angular y la misma puede ser identificada a través de todas las secciones sísmicas al estar representada por una fuerte reflexión debido al contraste litológico con respecto a la secuencia Cretácico-Terciario. Asimismo, se pueden observar, en algunas secciones, truncaciones angulares contra esta discordancia.
- La superficie erosiva del Intramioceno se encuentra por encima de los 500 ms donde la sísmica es pobre y presenta poca coherencia lateral por lo que resulta difícil poder seguirla dentro de las secciones sísmicas.
- Se considera que el amarre sísmica-pozo realizado fue bueno en la mayoría de los casos, evidenciado por la correspondencia entre los eventos sísmicos y los rasgos litológicos de los registros GR. El mejor porcentaje de correlación se presenta en el pozo PQE-7-P con un valor de 74%. El valor mas bajo fue de 28% para el pozo PQE-2-E, generado

probablemente por problemas de calidad en la sísmica y/o registros de pozo.

- Se determinó que la mejor ondícula para la convolución es la extraída de la sísmica con fase cero debido a que esta coincide en su máxima amplitud con el valor del coeficiente de reflectividad, refleja un pulso y es simétrica.
- Para los mapas estructurales en tiempo se tiene que en el Sur del área de estudio las 4 superficies buzcan hacia el Suroeste con un gradiente promedio de 8 ms/km. Hacia el Norte se observan 2 tendencias distintas, una para las secuencias Oligoceno-Intramioceno con un aumento de los tiempos de viaje hacia el Noroeste del mapa con una dirección preferencial de máximo crecimiento S45E y gradiente promedio de 15 ms/km; y otra para el Precretácico-Cretácico con un evidente alto en el centro del mapa y un buzamiento de dirección N45E y gradientes promedio de 15 ms/km.
- La ley de velocidades se cumple en los mapas de velocidades para cada una de las superficies mostrando los valores más altos hacia donde estas se profundizan. En líneas generales los mapas son homogéneos presentando una variación lateral de velocidades entre 5000 pies/s y 7600 pies/s para el Intramioceno, 5600 pies/s y 7400 pies/s para el Oligoceno, 7400 pies/s y 9400 pies/s para el Cretácico y 5500 pies/s y 12000 pies/s para el Precretácico. Las zonas donde las curvas no son tan homogéneas y presentan cierres se generan en áreas fuertemente falladas o donde existe menor control y cantidad de datos lo que genera mayores errores en la interpolación.
- Los mapas estructurales en profundidad correspondientes a las secuencias Intramioceno y Oligoceno pueden ser divididos en tres sub-áreas estructurales. Al Sur de la falla 27 las curvas buzcan en dirección Suroeste con un gradiente promedio de 37 pies/km; entre las fallas 27 y 18 con buzamiento muy bajo; y al Norte de la falla 18 con buzamiento en

dirección S50E a un gradiente de 25 pies/km. Ambas secuencias se elevan hacia el Noroeste donde se sabe que afloran.

- Los mapas en profundidad para el Cretácico y el Precretácico se ven muchos más influenciados por un alto estructural de forma ovalada y dirección N50O. Ambas secuencias se encuentran buzando transversalmente a este alto, formando así una estructura antiformal con gradientes que van de 21 pies/km hasta 40 pies/km y el cretácico acuñándose contra dicho alto formando un límite de roca de dirección N85E.
- El rasgo estructural más importante identificado en los mapas en profundidad es el alto de dirección N50O, ovalado y de características antiformal. Este alto fue identificado como el Arco de El Baúl por medio de la bibliografía consultada y por la comparación con un mapa de Anomalía de Bouger. Este alto es el rasgo estructural dominante de la zona y el mismo representa una barrera ideal para el entrapamiento de hidrocarburos.
- Los saltos de falla interpretados van desde 60 pies hasta 400 pies, verificándose los saltos de 90 pies reportados por PDVSA en 1983. El conjunto de fallas mapeadas definen un sistema de esfuerzos extensivos durante la evolución de la cuenca y las mismas se dividen en 2 trenes de fallas; uno principal de orientación N75E que coincide con el señalado por Talwani (2002) y uno secundario de N50O. El proceso compresional del Oligoceno puede observarse en tres fallas inversas que se interpretaron en los bloques de Boyacá, sin embargo en el resto del área de estudio no pudieron identificarse más fallas inversas tal vez debido a la pobre resolución sísmica.
- Con la colocación de los pozos PQE-2-B, PQE-7-G y PQE-11-G se comprobó que el modelo de profundidad elaborado en este trabajo

funciona adecuadamente. Esto se evidencia en el hecho de que el error en cada tope de secuencia, para cada uno de los pozos es menor al de la resolución sísmica; aclarando que a medida de que el punto de prueba se aleje de la zona con mayor presencia de pozos, aumentará la incertidumbre y por consiguiente el error.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un levantamiento sísmico 2D al Oeste del Parque Nacional Aguaro Guariquito y en dirección ortogonal a la orientación del Arco de El Baúl con la finalidad de obtener el mejor perfil posible de esta estructura y así poder realizar estudios estratigráficos detallados con el fin de determinar posibles ubicaciones de entrapamientos en el flanco Norte del mismo.
- Se sugiere adquirir más detalles con respecto a las velocidades de apilamiento utilizada en el procesamiento de los datos con la finalidad de tener mayor precisión a la hora de construir el modelo de velocidades. Asimismo, se recomienda referenciar las secciones sísmicas al *datum* medio marino y así evitar confusiones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

Bartok, P. (2007). The Peripheral Bulge of the Interior Range of the Eastern Venezuela Basin and its Impact on Oil Accumulations: in The Circum Gulf of Mexico and Caribbean: Hydrocarbon Habitats Basin Formation and Plate Tectonics. Blickwede. AAPG Memoir. pp. 179.

Bally, A. (1987). Atlas of seismic stratigraphy. AAPG, Vol 1, pp 1-9.

Cabrera, S. de y J. M. Villain. (1987). Bioestratigrafía y ambientes sedimentarias del Cretáceo Superior en el noreste de Guárico. Mem. IV Jorn. Tecn. Corpoven, Puerto La Cruz. pp. 23.

Carter, M. (1989). II. Depth Conversion using Normalized Interval Velocities. Geophysics: The Leading Edge of Exploration. pp. 15-16.

Chramcow, D. (2008). Interpretación Sismo-Estratigráfica del Área de Pichincha perteneciente a la Faja Petrolífera del Orinoco. Informe Final de Cursos en Cooperación. Universidad Simón Bolívar. Caracas. pp. 5

Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura (2009). Léxico Estratigráfico de Venezuela (LEV). PDVSA – INTEVEP. Recuperado de: <http://www.pdv.com/lexico>.

Di Croce, J. (1999). Estratigrafía secuencial y Evolución estructural de la Cuenca Oriental de Venezuela. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Espailat, F. (2008). Modelado estructural tridimensional del Bloque Junín 2 de la Faja Petrolífera del Orinoco Trabajo Especial de Grado, Departamento de Geofísica. Universidad Central de Venezuela. Caracas. pp 50 – 54

Guo, N., Fagin, S. (2002). Becoming effective velocity-model builders and depth imagers, Part 1 - The basics of prestack depth migration. The Leading Edge. The Society of Exploration Geophysicists, pp 1205.

Hedberg, H. D. y Funkhouser, H. (1947). Oilfields of the Greater Oficina Area, central Anzoátegui, Venezuela. Amer. Assoc. Petról. Geol., 31(12): pp. 2089-2169.

Hedberg, H. D. (1950). Geology of the eastern Venezuela basin (Anzoátegui-Monagas-Sucre-eastern Guárico portion). Geol. Soc. Am., Bull., 61(11): pp. 1173- 1216.

Henderson, D. (2008). Consulting Formation Evaluation Services for the Oil and Gas Industry. Revisado en <http://www.hendersonpetrophysics.com>.

Henry S. (2000). Pitfalls in synthetics. The Leading Edge. The Society of Exploration Geophysicists, pp 604.

Hilla W, Naval D. (2005). Interpretación Estructural en las arenas gasíferas J3M-L, R0(U-M), en el Área Mayor de Socororo, Estado Anzoátegui. Trabajo Especial de Grado, Departamento de Geofísica. UCV. Caracas. pp 20 – 35.

Isea, A. (1987). Geological synthesis of the Orinoco Oil Belt, Eastern Venezuela. Journal of Petroleum Geology. 10(2): pp. 135-148.

Kiser, D. (1987). Exploration Results, Machete Area, Orinoco Oil Belt, Venezuela. Journal of Petroleum Geology. 10(2): pp. 149-162.

Liner, Christopher L. (2004). Elements of 3D Seismology. Segunda edición, Departamento de Geociencias de la Universidad de Tulsa, Oklahoma, E.E.U.U. pp. 403-427.

Marsden, D. (1989). I. Layer Cake Depth Conversion. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*. pp. 10-14.

Mencher E., Fichter H., Renz H., Wallis W., Patterson J., y Robie R. (1953). *Geology of Venezuela and its oil fields*. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, 37(4): pp. 690-777.

Mitchum, R. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences. En: Payton, C.E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*, vol. 26. *A.A.P.G. Memoir*, pp. 205–212.

Parnaud, F., Y. Gou, J-C. Pascual, Truskowski, O. Gallango, H. Passalacqua, and F. Roure (1995). *Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuelan Basin*, in *Petroleum Basins of South America*. Editores Tankard, Suarez y Welsink. *Memorias de la AAPG* 62, p. 741-756.

Patterson J., y Wilson J. (1953). Oil fields of Mercedes region, Venezuela. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, 37(12): pp. 2705-2733.

PDVSA (1983). Evaluación exploratoria de la Faja Petrolífera del Orinoco Área Machete. *Coordinación de la Faja Petrolífera del Orinoco, Vol VI*, pp. 347.

PDVSA (1992). Programa propuesta para renovar la exploración, Área Machete. *Coordinación de la Faja Petrolífera del Orinoco*.

PDVSA (2000). Potencial Hidrocarburífero de Venezuela. *PDVSA Exploración. Anexo 21*.

PDVSA (2007). Diagnóstico, Área Boyacá. *Proyecto Orinoco Magna Reserva*. pp. 41-65.

Peirson III, A. (1965-a). Geology of north-central Venezuela. Informe inédito. Creole Petr. Corp., Corpoven, pp. 337.

Pinto, R. (2007). Interpretación Sismoestratigráfica y Estructural de la Secuencia Sedimentaria (Cretácico-Terciario) del Bloque Norte del Área Boyacá, Faja Petrolífera del Orinoco. Trabajo Especial de Grado, Departamento de Geofísica. Universidad Central de Venezuela. Caracas. pp 12 – 39.

Sheriff, R. (2002). Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. 4th edition, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa. E.E.U.U.

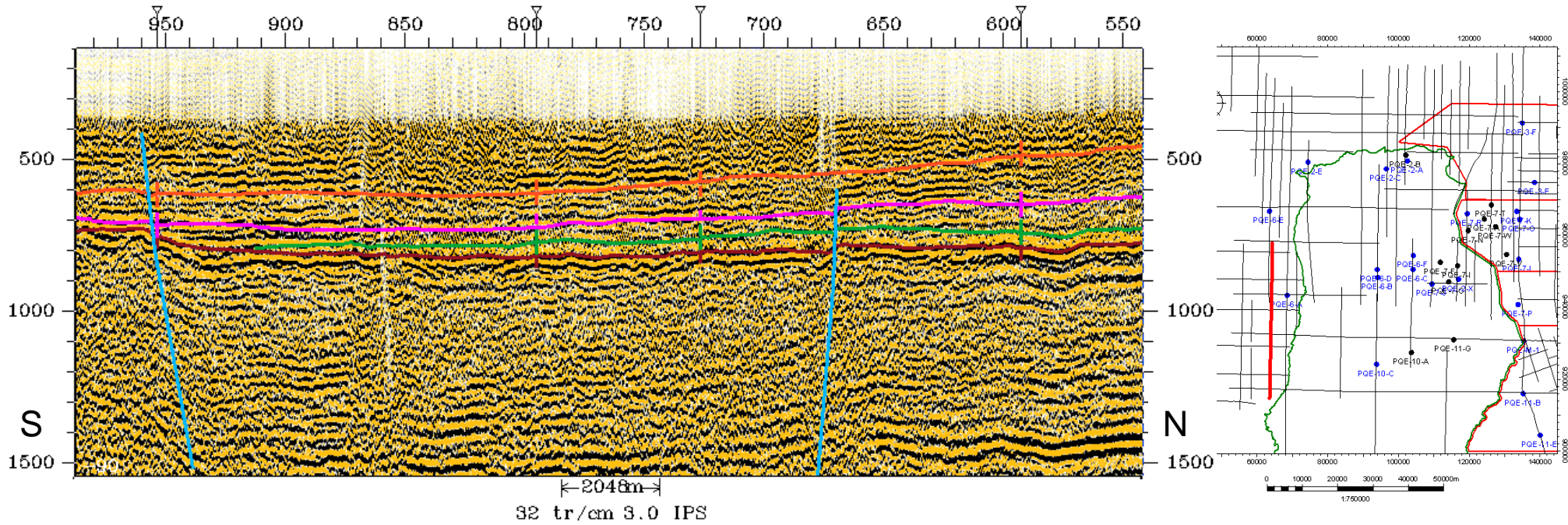
Schlumberger (1997). Evaluación de pozos (WEC). Capítulo I. Cuencas petrolíferas. Versión Multimedia (CD).

Talwani, M. (2002). The Orinoco Heavy Oil Belt in Venezuela (Or Heavy Oil to the rescue?). The James A. Baker III Institute for Public Policy of Rice University. pp 5 – 7.

Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. M., Campion, K. M. and Rhamanian, V. D. (1990). Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops. American Association of Petroleum Geologists, Methods in Exploration, N 7, Tulsa.

APÉNDICES

APÉNDICE A

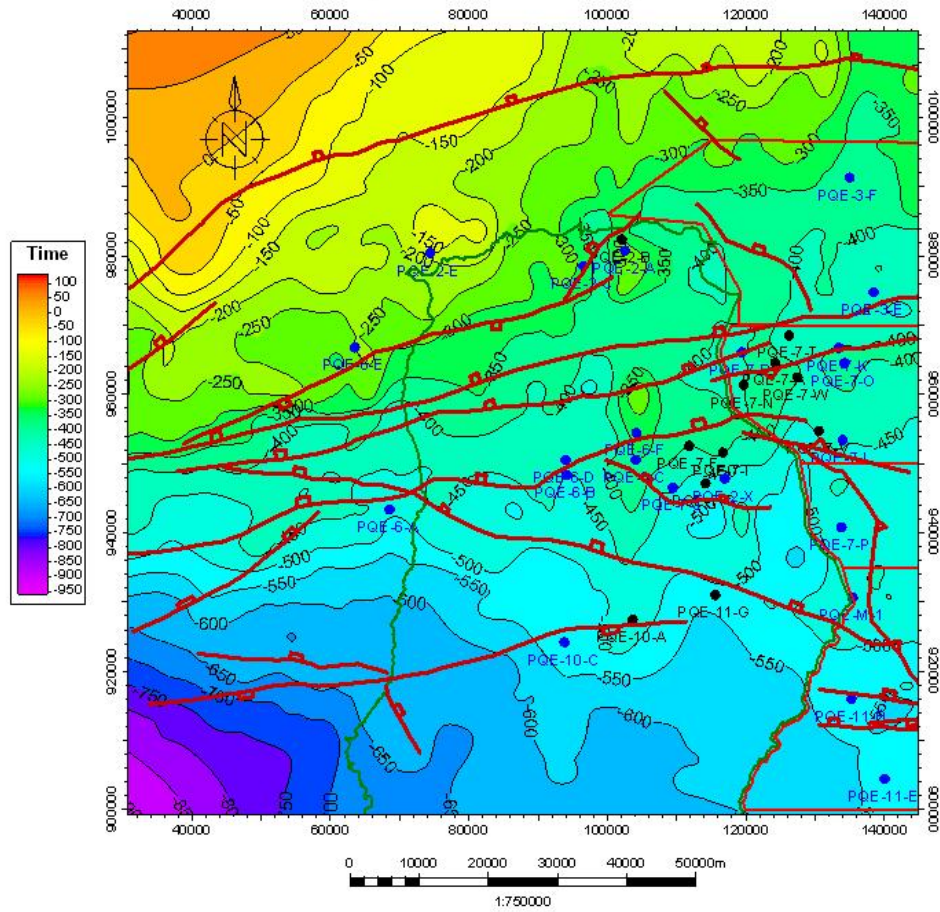


APÉNDICE B

Saltos de Fallas calculados para las 39 fallas interpretadas, a nivel de Precretácico.

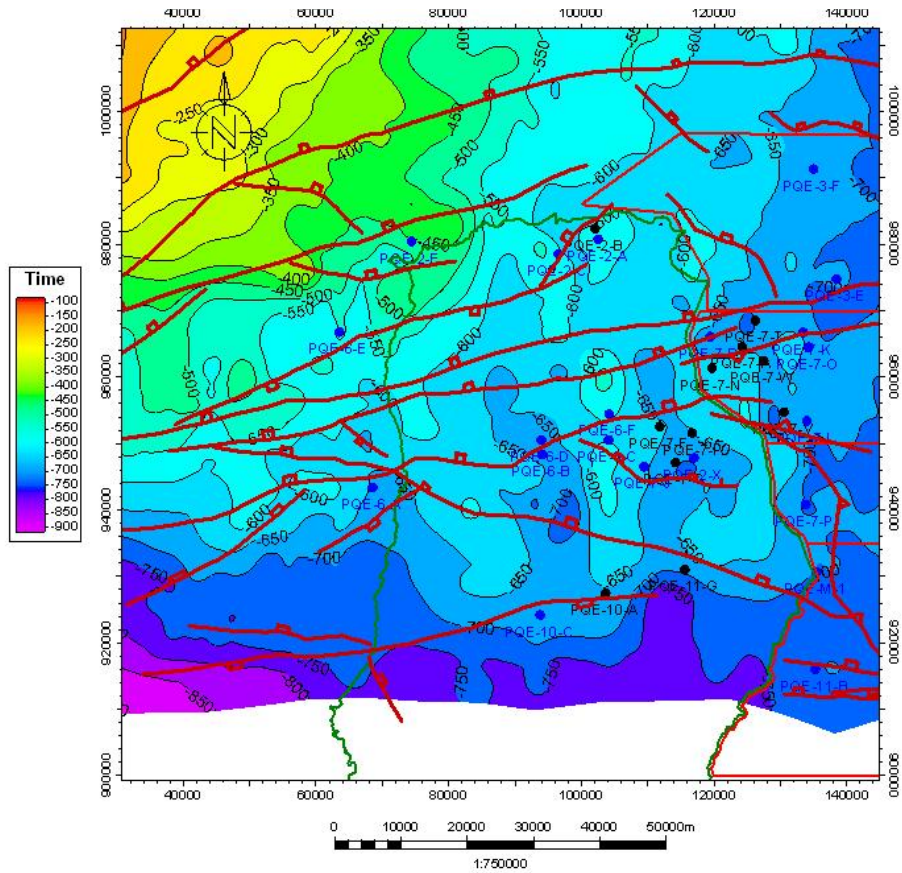
Falla	Salto (ft)
1	80'
2	80'
3	80'
4	80'
5	100'
6	60'
7	100'
8	60'
9	60'
10	80'
11	100'
12	60'
13	100'
14	80'
15	150'
16	200'
17	90'
18	100'
19	100'
20	60'
21	80'
22	90'
23	400'
24	50'
25	100'
26	100'
27	200'
28	80'
29	80'
30	80'
31	100'
32	100'
33	100'
34	80'
35	80'
36	150'
37	150'
38	130'
39	80'

APÉNDICE C



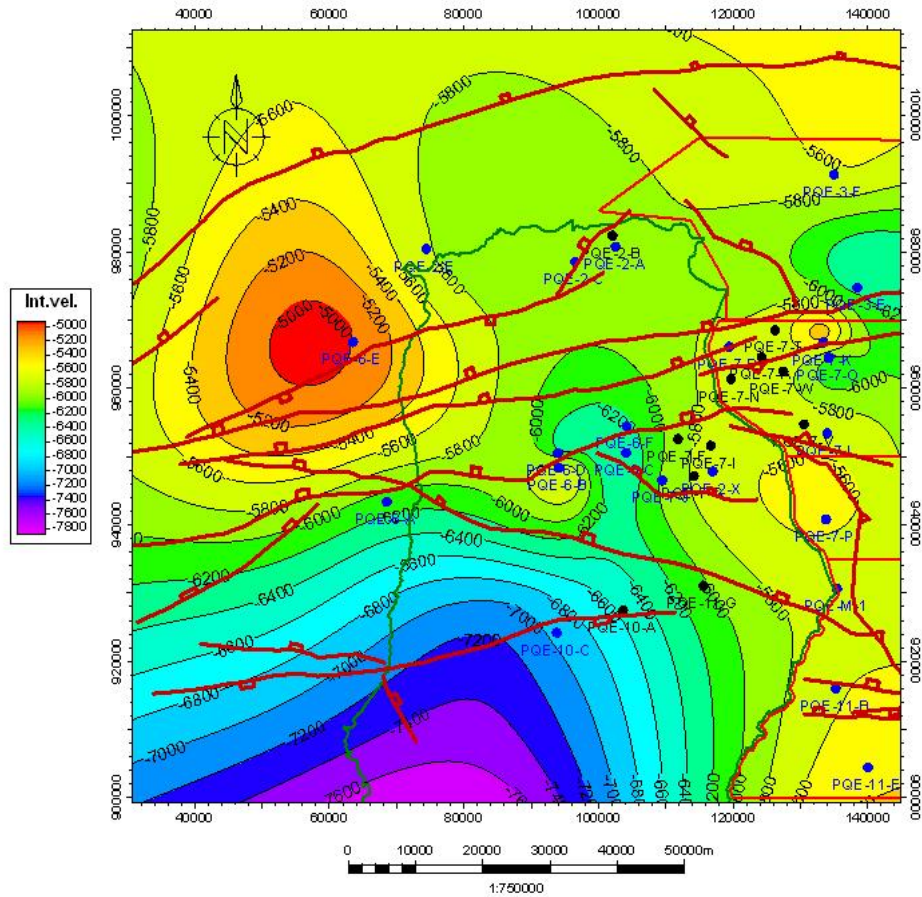
Mapa de Tiempo Doble De Viaje (ms) correspondiente a la superficie Intramioceno. En rojo se marcan las fallas interpretadas a este nivel. En azul los pozos con Tiros de Verificación Sísmica y en negro los que no fueron usados en el modelo de velocidades.

APÉNDICE D



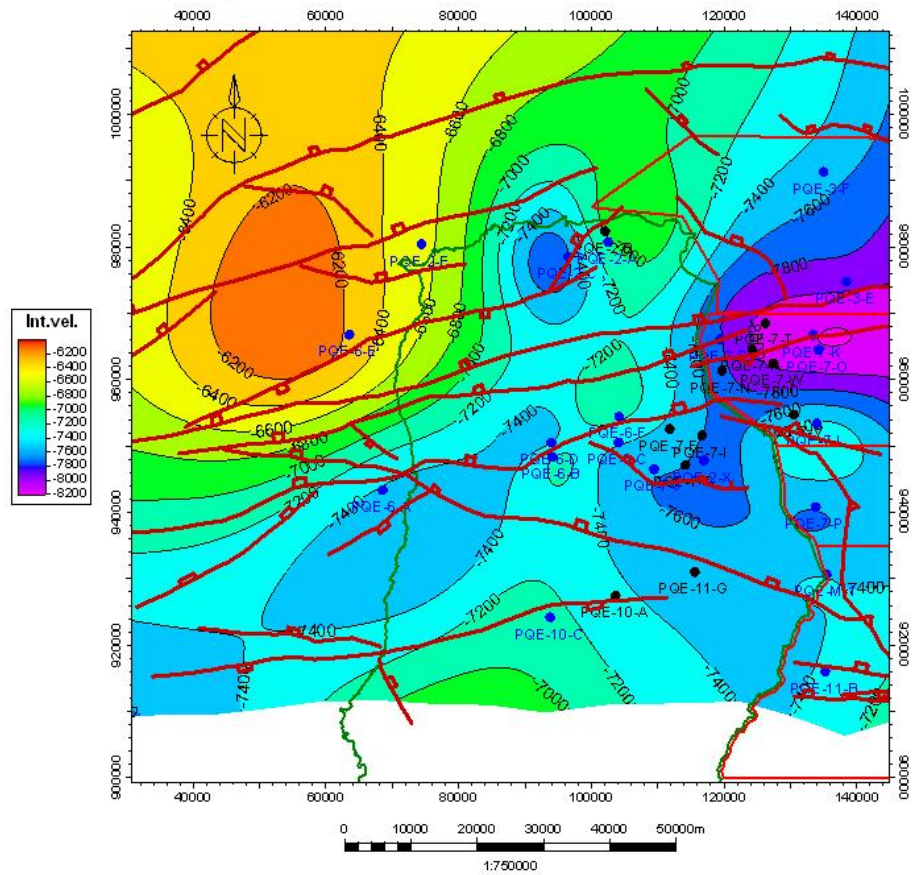
Mapa de Tiempo Doble De Viaje (ms) correspondiente a la superficie Oligoceno. En rojo se marcan las fallas interpretadas a este nivel. En azul los pozos con Tiros de Verificación Sísmica y en negro los que no fueron usados en el modelo de velocidades.

APÉNDICE E



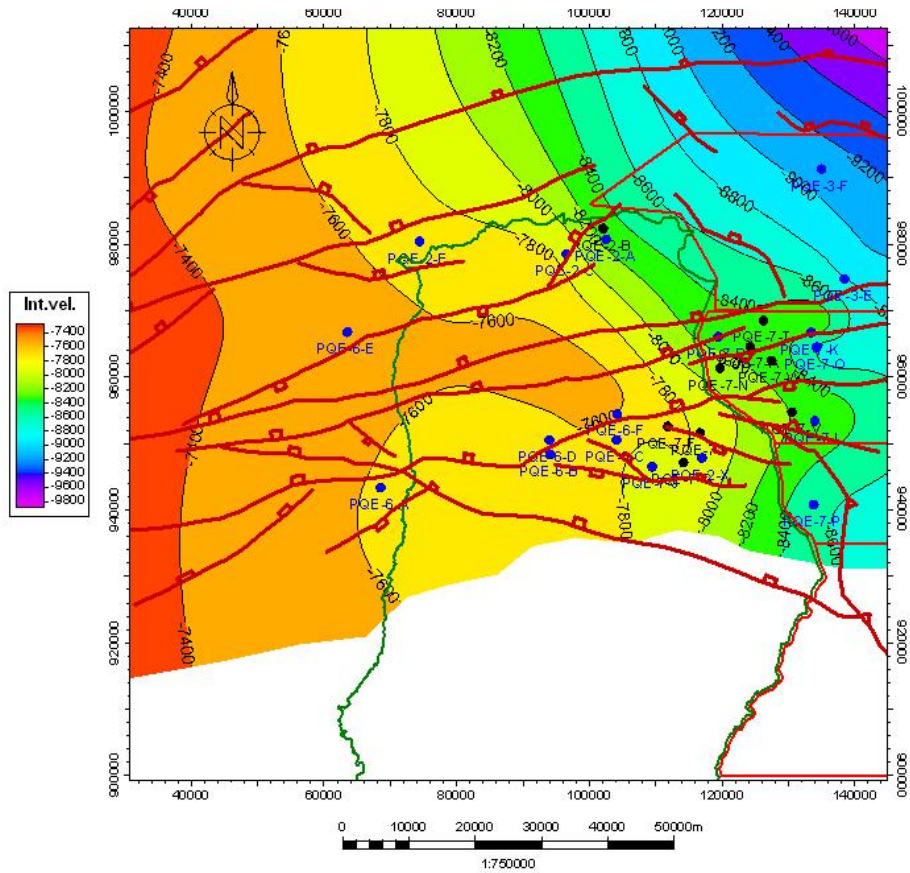
Mapa de Velocidades Intervállicas (pies/s) correspondiente a la superficie Intramioceno. En rojo se marcan las fallas interpretadas a este nivel. En azul los pozos con Tiros de Verificación Sísmica y en negro los que no fueron usados en el modelo de velocidades.

APÉNDICE F



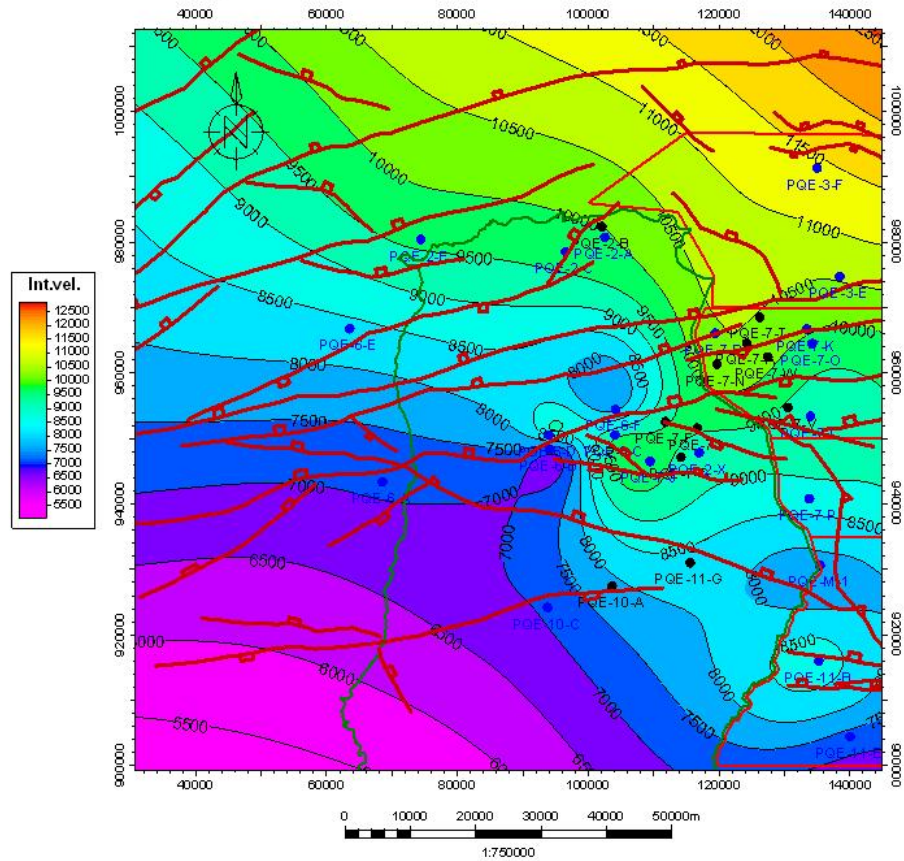
Mapa de Velocidades Interválicas (pies/s) correspondiente a la superficie Oligoceno. En rojo se marcan las fallas interpretadas a este nivel. En azul los pozos con Tiros de Verificación Sísmica y en negro los que no fueron usados en el modelo de velocidades.

APÉNDICE G



Mapa de Velocidades Interválicas (pies/s) correspondiente a la superficie Cretácico. En rojo se marcan las fallas interpretadas a este nivel. En azul los pozos con Tiros de Verificación Sísmica y en negro los que no fueron usados en el modelo de velocidades.

APÉNDICE H



Mapa de Velocidades Interválicas (pies/s) correspondiente a la superficie Precretácica. En rojo se marcan las fallas interpretadas a este nivel. En azul los pozos con Tiros de Verificación Sísmica y en negro los que no fueron usados en el modelo de velocidades.