

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE RIESGOS OPERACIONALES EN
PERFORACIONES COSTA AFUERA, MEDIANTE EL USO DE
SÍSMICA 3D, EN EL GOLFO DE VENEZUELA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Da Silva L. Gabriela M.
para optar al Título
de Ingeniera Geofísica

Caracas, junio 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE RIESGOS OPERACIONALES EN PERFORACIONES COSTA AFUERA, MEDIANTE EL USO DE SÍSMICA 3D, EN EL GOLFO DE VENEZUELA

TUTORA ACADÉMICA: Ing. Adriana González

COTUTORA ACADÉMICA: MSc. Yaraixa Pérez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Da Silva L. Gabriela M.
para optar al Título
de Ingeniera Geofísica

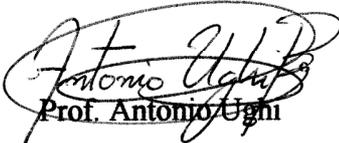
Caracas, junio 2012

Caracas, junio de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por la Bachiller **GABRIELA MILAGRO DA SILVA LOZADA**, titulado:

**“EVALUACIÓN DE RIESGOS OPERACIONALES EN
PERFORACIONES COSTA AFUERA, MEDIANTE EL USO DE
SÍSMICA 3D, EN EL GOLFO DE VENEZUELA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al Título de Ingeniera Geofísica, y sin que ello simplifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Antonio Ugni
Miembro del Jurado


Prof. Lenin González
Miembro del Jurado


Ing. Adriana González
Tutora Académica

DEDICATORIA

A mi mamá, papá y hermano (Erpa) por estar presentes en todas las etapas de mi vida, darme palabras de aliento, aconsejarme y ofrecerme apoyo incondicional, ustedes son mi ejemplo a seguir...

Los quiero!

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen por ser mis pilares de fe...

A mi familia por estar pendiente de mí, apoyarme en todo momento y animarme, sin ustedes no lo habría logrado.

A mi Tutora Académica Adriana González, por confiar en mí para ofrecerme este tema de tesis, haberme enseñado tanto durante este trabajo, sus consejos y por su paciencia, muchas gracias.

A la empresa Teikoku Oil & Gas Venezuela por permitirme el uso de sus datos para la elaboración de este trabajo de grado y en especial a mi cotutora Yaraixa Pérez y Colombo Da Encarnacao por el apoyo ofrecido durante el desarrollo del mismo.

A los profesores Antonio Ughi, Jesús González, Lenin González, José Cavada, Vicenzo de Liza, Ángela Rojas, Nuris Orihuela, Antonio Acosta y especialmente a Leonardo Araujo por su formación académica y su formación en principios y valores, de verdad gracias.

Al MSc. Alexander Medina por su apoyo incondicional, consejos y ayuda profesional, más que un asesor eres un gran amigo y una gran persona, muchas gracias.

A mis compañeros de estudio Verónica Torres, Atilio Torres, Roberto Ruíz, Manuel Medina y Yuniev Martínez, por su ayuda incondicional cuando más lo necesitaba, muchas gracias.

A mis amig@s Danys Mendoza, Sra. Morella, Yonathan Molina, Alexsay, Manuel “Bochinche”, Nestor Cahuana, Said Roa, Franklin, María Guaipo, Ricardo, Henry, Martin, Pedro, Luis Rangel, Yaneth, Sofía, Sinaí, Laura, Sara (Las Neeegras) y en especial a “MI PADRE” Mariano Arnaiz por estar a mi lado en todo momento, apoyarme, aconsejarme, hacerme reír, porque más que amig@s son mis herman@s, los quiero tanto.

A Harnold Alberti por ser mi amigo incondicional, compañero, apoyo, mi complemento durante toda la carrera, de verdad te agradezco todo lo que hiciste y haces por mí. Mil gracias por haber estado en mi vida y formar parte de ella. Aishiteru ^^

Da Silva L. Gabriela M.

EVALUACIÓN DE RIESGOS OPERACIONALES EN PERFORACIONES COSTA AFUERA, MEDIANTE EL USO DE SÍSMICA 3D, EN EL GOLFO DE VENEZUELA

Tutora Académica: Ing. Adriana González Cotutora Académica: Msc. Yaraixa Pérez. Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2012, 168 pág.

Palabras Claves: sísmica 3D convencional, amenaza geológica somera, atributos sísmicos, costa afuera.

Resumen: Con la finalidad de evaluar la factibilidad técnica del uso de los datos sísmicos tridimensionales, para determinar amenazas geológicas someras presentes en el Bloque Moruy II, del Golfo de Venezuela, se utilizaron datos sísmicos 3D convencionales en un área de 50 Km cuadrados y el pozo PTUCV_1 ubicado dentro de la zona de estudio. Para realizar la evaluación se efectuó la interpretación de los datos sísmicos 3D convencionales de 0 a 1,5 s, la generación de volúmenes de descomposición espectral, similitud y coherencia sobre estos datos, la correlación de las propiedades físicas de las rocas y datos sísmicos y la aplicación de atributos sísmicos, basados en la transformada de Hilbert y atributos geométricos.

Posteriormente, se realizó la evaluación de las amenazas geológicas presentes en la sección somera (<100 metros de profundidad) y la correlación de los datos sísmicos 3D con los datos sísmicos 2D de alta resolución, utilizados en los estudios de amenaza geológica convencional. A partir de los mapas generados de atributos y evaluación de riesgo geológico se pudo determinar que las anomalías se rigen por las estructuras presentes en el área, no se descarta la presencia de fluido (gas biogénico), pero la información es insuficiente para asegurar o descartar su existencia, por esta razón se debe considerar en la evaluación de amenaza a nivel somero. La morfología del fondo marino presenta pendientes suaves, eliminando la posibilidad de que se generen deslizamientos o cualquier tipo de inestabilidad del fondo marino que pueda afectar la instalación de estructuras submarinas tipo “*Jack up*”.

Finalmente se correlacionaron los resultados obtenidos con los datos sísmicos 3D y con los datos sísmicos 2D de alta resolución, observando que los datos sísmicos 3D carecen de resolución para identificar cuerpos de interés a nivel somero con el detalle requerido.

ÍNDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 ZONA DE ESTUDIO	5
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	7
2.1 EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA REGIONAL DE LA CUENCA DE FALCÓN Y DEL GOLFO DE VENEZUELA	7
2.1.1 Cretácico Medio-Tardío (96-65 Ma)	7
2.1.2 Paleoceno–Eoceno Inferior (65-50 Ma)	8
2.1.3 Eoceno Medio-Tardío (50-38 Ma)	9
2.1.2 Eoceno Tardío-Oligoceno (38-17 Ma)	10
2.1.3 Mioceno Temprano-Medio (17-5 Ma)	12
2.1.4 Plioceno (5-3 Ma)	15
2.1.5 Pleistoceno (1,64-0,01 Ma)	17
2.2 MARCO LOCAL	19
2.2.1 Fallas del Cuaternario presentes en la región de Falcón	20

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	22
3.1 SÍSMICA DE REFLEXIÓN MARINA	22
3.1.1 Geofísica Digital o Multicanal	23
3.2 INTERPRETACIÓN SÍSMICA TRIDIMENSIONAL	25
3.2.1 Análisis Sísmico Secuencial	25
<i>Interpretación sísmica estructural</i>	26
<i>Interpretación sísmica estratigráfica</i>	26
3.2.2 Análisis de Registros de Pozos	27
3.2.3 Amarre Sísmica-Pozo	28
<i>Sismograma sintético</i>	28
<i>Ecuación de Gardner</i>	30
<i>Resolución vertical</i>	30
3.3 ATRIBUTOS SÍSMICOS	31
3.3.1 Clasificación de los atributos sísmicos	32
3.3.2 Descomposición espectral	33
<i>Transformada de la ondícula continua (Morlet)</i>	34
3.3.3 Coherencia	35
3.3.4 Similitud	36
3.3.5 Transformada de Hilbert.....	37
<i>Fase Instantánea (“Instantaneous Phase”)</i>	37
<i>Frecuencia Instantánea (“Instantaneous Frequency”)</i>	38
<i>Impedancia acústica relativa (“Relative Acoustic Impedance”)</i>	40
<i>Q Instantáneo (“Instantaneous Q”)</i>	40
<i>Traza envolvente (“Trace Envelope”)</i>	41
3.3.6 Atributos geométricos	42
<i>Buzamiento instantáneo (“Instantaneous Dip”)</i>	42
<i>Varianza de similitud (“Similarity Variance”)</i>	42
3.4 AMENAZA GEOLÓGICA	43
3.4.1 Falla por punzonamiento	45
3.4.2 Falla por deslizamiento.....	48
3.4.3 Socavación del fondo marino	48
3.4.4 Inestabilidad del fondo marino (“ <i>mudslides, seabed slides</i> ”).....	49

3.4.5	Huellas dejadas por otros “ <i>Jack Up</i> ” (“ <i>foot prints</i> ”)	49
3.4.6	Acumulaciones de gas someras	49
3.4.7	Objetos sumergidos	50
CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO		51
4.1	BASE DE DATOS	51
4.2	METODOLOGÍA APLICADA AL ESTUDIO	52
4.2.1	Carga y validación de datos.....	54
	<i>Visualización de los datos sísmicos 3D y el pozo PTUCV_1</i>	54
	<i>Datos del pozo PTUCV_1</i>	55
4.2.2	Calibración Sísmica – Pozo.....	58
	<i>Generación del Sismograma Sintético</i>	58
4.2.3	Interpretación sísmo-estratigráfica	62
	<i>Cálculo de la resolución vertical</i>	67
4.2.4	Generación de volúmenes y estimación de atributos	69
	<i>Extracción de atributos sísmicos</i>	69
	<i>Atributos de descomposición espectral</i>	70
	<i>Atributos de similitud y coherencia</i>	72
	<i>Atributos de Hilbert y geométricos</i>	72
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS, INTEGRACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS 2D DE ALTA RESOLUCIÓN CON LOS DATOS SÍSMICOS 3D Y CORRELACIÓN DE ESTOS DATOS CON EL ESTUDIO DE AMENAZA GEOLÓGICA CONVENCIONAL	73
4.3.1	Conversión de horizontes de tiempo a profundidad	74
4.3.2	Correlación de los datos sísmicos 3D con el estudio de amenaza geológica convencional.....	75
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS		76
5.1	INTERPRETACIÓN SISMO-ESTRATIGRÁFICA DE LOS DATOS SÍSMICOS 3D.....	76
5.2	GENERACIÓN DE VOLÚMENES Y ESTIMACIÓN DE ATRIBUTOS	84

5.2.1 Atributos de descomposición espectral	84
<i>Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 4 (horizonte más profundo a 0,560 s o 594,36 m).....</i>	<i>87</i>
<i>Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 3 (0,350 s o 365,76 m).....</i>	<i>88</i>
<i>Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 2 (0,270 s o 274,32 m).....</i>	<i>89</i>
<i>Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 1 (0,200 s o 213,36 m).....</i>	<i>90</i>
<i>Descomposición espectral y aplicación de multiatributos.....</i>	<i>91</i>
5.2.2 Generación de volúmenes de atributos de similitud y coherencia	95
<i>Atributos de Varianza de Similitud y Buzamiento instantáneo</i>	<i>96</i>
5.2.3 Integración de atributos	100
<i>Definición de litologías</i>	<i>100</i>
<i>Gráficos cruzados de atributos (Crossplots).....</i>	<i>103</i>
<i>Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert y atributos geométricos.....</i>	<i>106</i>
<i>Atributo híbrido.....</i>	<i>115</i>
<i>Atributo de Q instantáneo (“Instantaneous Q”)</i>	<i>115</i>
5.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS, INTEGRACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS 2D DE ALTA RESOLUCIÓN CON LOS DATOS SÍSMICOS 3D Y CORRELACIÓN DE ESTOS DATOS CON EL ESTUDIO DE AMENAZA GEOLÓGICA CONVENCIONAL	119
5.3.1 Identificación de amenazas geológicas.....	119
<i>Inestabilidad del suelo marino como amenaza de origen geológico</i>	<i>120</i>
<i>Causas y mecanismos desencadenantes de inestabilidad del fondo marino en el bloque Moruy II.....</i>	<i>124</i>
<i>Amenaza sísmica.....</i>	<i>124</i>
<i>Fallas activas y reactivación de fallas</i>	<i>127</i>
<i>Erosión del fondo marino.....</i>	<i>127</i>
<i>Pendientes de las laderas empinadas</i>	<i>128</i>
<i>Litología del suelo marino.....</i>	<i>128</i>

Aspectos relacionados a presiones de gas y/o fluídos	128
- Gas biogénico y termogénico.....	128
-Flujo de aguas superficiales	129
<i>Evaluación de amenaza para la puesta del “Jack up”</i>	<i>129</i>
5.3.2 Correlación de los datos sísmicos 3D con el estudio de amenaza geológica convencional.....	131
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
ANEXOS	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. 1. Mapa de ubicación del Bloque Moruy II	6
Figura 2. 1. Modelo de generación de cuencas “pull-apart” episuturales (suroeste Caribe) por el desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana en el Eoceno Tardío.	9
Figura 2. 2. Evolución del modelo de generación de Cuencas “pull-apart” en su máximo desarrollo (SO Caribe) por el desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana para el Oligoceno Mioceno Tardío	12
Figura 2. 3. Elementos tectono–sedimentarios de la cuenca de Falcón, obsérvese la ubicación del área de estudio en función de las estructuras dominantes (Oligoceno–Mioceno temprano).	13
Figura 2. 4. Cuadro cronoestratigráfico realizado a partir de información geológica publicada de trabajos especiales de grado del departamento de Geología, escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela..	14
Figura 2. 5. Configuración actual de la Cuenca de Falcón según Macellari (1995).....	16
Figura 2. 6. Cortes esquemáticos (SN y OE) en el área del Golfo de Venezuela interpretados a partir de información sísmográfica.....	18
Figura 2. 7. Marco Estructural del Golfo de Venezuela.	18
Figura 3. 1. Imagen de sísmica digital multicanal de alta resolución que muestra condiciones estratigráficas y estructurales.....	24
Figura 3. 2. Imagen de sísmica digital multicanal de alta resolución que muestra un bright spot para un yacimiento de gas del plioceno al este, costa afuera, del Delta del Nilo, Egipto.....	24
Figura 3. 3. Sección de una secuencia estratigráfica general. Se pueden apreciar las áreas crono-espaciales en forma gráfica de las superficies estratigráficas mencionadas en la teoría. Unidades individuales de estratos del 1 al 28 son seguidos por las superficies de estratificación siguientes, y se asume conformidad donde sucesivos estratos están presente. Donde las unidades de estratos se pierden, los hiatos son evidentes.	27
Figura 3. 4. Generación de un sismograma sintético..	29

Figura 3. 5. Modelo de cuña que explica la resolución sísmica vertical y el efecto de entonación en capas delgadas. a) Sismograma sintético de un modelo de capa que se acuña; b) Sensibilidad de delta T vs. espesor; y c) de la amplitud vs. espesor, para el modelo de cuña presentado.....	31
Figura 3. 6. Descomposición de una señal en ondas de la transformada de Fourier	34
Figura 3. 7. Descomposición de una señal en ondas de la transformada de la ondícula (Morlet).	35
Figura 3. 8. Cubo de coherencia..	36
Figura 3. 9. Atributo de fase instantánea.	38
Figura 3. 10. Gráfico estadístico de fallas en plataformas tipo “ <i>Jack-up</i> ”.....	45
Figura 3. 11. Partes más importantes de una plataforma auto elevadiza tipo “ <i>Jack up</i> ” y visualización del “ <i>spudcan</i> ”.	46
Figura 3. 12. Gráficos de capacidad de carga vs. Profundidad que presentan potencial de falla por punzonamiento.....	47
Figura 3. 13. Daños generados a una plataforma tipo “ <i>Jack-up</i> ” como consecuencia del desnivel abrupto causado por una falla por punzonamiento.	48
Figura 4. 1. Preplot de inlines y crosslines del proyecto Moruy II en la parte superior y mapa batimétrico en la parte inferior.	52
Figura 4. 2. Esquema de metodología aplicada al estudio.	53
Figura 4. 3. Creación del “ <i>Base Map</i> ” y validación de datos.	54
Figura 4. 4. Visualización 3D del “ <i>Base Map</i> ”.	55
Figura 4. 5. Despliegue de los registros del pozo para la zona de estudio.....	56
Figura 4. 6. Grafica Tiempo-Profundidad del pozo PTUCV_1realizado en Excel.	58
Figura 4. 7. Ondícula extraída de la sísmica desde 0ms a 1500ms para el pozo PTUCV_1. Se observa en el espectro de frecuencia una ondícula con una forma bastante irregular, sugiriendo un contenido de ruido dentro de la misma o la interferencia de algún cuerpo a nivel profundo, el valor máximo de amplitud se corresponde con una frecuencia de 12Hz.	60
Figura 4. 8. Sismograma Sintético Calibrado.	61
Figura 4. 9. Sismograma Sintético representado en color azul sobre la sísmica junto con el despliegue del registro de Gamma Ray (GR) representado en color verde.	62

Figura 4. 10. “ <i>Inline</i> ” 1625, volumen PSTM representando el pozo PTUCV_1 y el sismograma sintético con los distintos puntos de calibración.....	63
Figura 4. 11. “ <i>Inline</i> ” 1625 con los horizontes interpretados.....	64
Figura 4. 12. “ <i>Crossline</i> ” 6632 con los horizontes interpretados.....	64
Figura 4. 13. Horizontes interpretados mediante la herramienta “ <i>Wiggle</i> ” resaltado en color amarillo.	65
Figura 4. 14. Interpretación de las fallas de forma indefinida en el “ <i>Inline</i> ” 1625.....	66
Figura 4. 15. Asignación de fallas y creación de polígono.	66
Figura 4. 16. Creación de la superficie de los horizontes en tiempo.	67
Figura 4. 17. Espectro de frecuencia en el intervalo de 0,200 s – 0,560 s. Frecuencia dominante de 20 Hz.	68
Figura 4. 18. Espectro de frecuencia en el intervalo de 0,270 s – 0,350 s. Frecuencia dominante de 20 Hz.	68
Figura 4. 19. Espectro de frecuencia en el intervalo de 0,350 s – 0,560 s. Frecuencia dominante de 40 Hz.	68
Figura 4. 20. Esquema de la generación de volúmenes y estimación de atributos.	70
Figura 4. 21. Espectro de frecuencia del volumen sísmicos PSTM para una ventana temporal entre 200 y 560 ms. La mayor contribución de energía ocurre a los 10Hz.	71
Figura 4. 22. Parámetros para generar los volúmenes de descomposición espectral.....	72
Figura 4. 23. Parámetros para generar los atributos de Hilbert y geométricos.....	73
Figura 4. 24. Mapa Isópaco entre el horizonte 1 y el horizonte 2.....	74
Figura 5. 1. Secuencia de ambiente costero a continental, reflejando ambientes marino somero y fluvial deltaico presentes en el área de estudio..	77
Figura 5. 2. “ <i>Inline</i> ” 1625 con los horizontes y fallas interpretados, en el cual se destacan el conjunto de fallas normales, evidenciando los procesos extensivos en el área.	78
Figura 5. 3. Mapa en tiempo del horizonte 4 a 0.560 s.....	80
Figura 5. 4. Mapa en tiempo del horizonte 3 a 0.350 s.....	81
Figura 5. 5. Mapa en tiempo del horizonte 2 a 0.270 s.....	82
Figura 5. 6. Mapa en tiempo del horizonte 1 a 0.200 s.....	83
Figura 5. 7. Visualización 3D de los horizontes y fallas interpretadas.....	84
Figura 5. 8. Atributo de descomposición espectral para las frecuencias de 8, 10, 12 y 14,3 Hz.....	86

Figura 5. 9. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 4. a) Mapa estructural del horizonte 4. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.....	87
Figura 5. 10. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 3. a) Mapa estructural del horizonte 3. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.....	88
Figura 5. 11. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 2. a) Mapa estructural del horizonte 2. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.....	89
Figura 5. 12. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 1. a) Mapa estructural del horizonte 1. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.....	90
Figura 5. 13. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 4.	92
Figura 5. 14. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 3, donde se observan dos geoformas resaltados con un círculo amarillo.....	93
Figura 5. 15. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 2, donde se observan tres geoformas resaltados con un círculo amarillo.	94
Figura 5. 16. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 1, donde se observa una geoforma resaltado con un círculo amarillo.	95
Figura 5. 17. Cubo de Similitud y coherencia sísmica. Las líneas blancas representan valores mínimos debido a la continuidad de los reflectores causada por la presencia de fallas.	97
Figura 5. 18. Atributo de Varianza de similitud donde se definen muy bien las fallas presentes en el área. a) Atributo visualizando las fallas con amplitudes altas y b) atributo identificando las fallas.....	98
Figura 5. 19. Atributo de Buzamiento instantáneo. a) Atributo visualizando las fallas con amplitudes altas y b) atributo identificando las fallas y los saltos estructurales.....	99

Figura 5. 20. Descripción litológica presente en el área de estudio. La zona amarilla representa un paquete de arenas de grano medio de 137.025 m, la zona azul representa un paquete de 243.84 m de lutitas variadas y arenas, la zona moradas representa un paquete de 152.4 m de arena y lutita, la zona roja representa un paquete de arenas, lutitas y caliza de 262.12 m y la zona naranja representa un paquete de 381 m de lutitas y arenas.....	102
Figura 5. 21. Gráfico cruzado Impedancia acústica vs. Gamma ray.....	103
Figura 5. 22. Gráfico cruzado de Impedancia acústica vs. Vsh.	104
Figura 5. 23. Gráficos cruzados de Densidad vs. Gamma ray.	105
Figura 5. 24. Descripción litológica amarrada a la sísmica.	106
Figura 5. 25. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert para el horizonte 4. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d) Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.	108
Figura 5. 26. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert para el horizonte 3. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d) Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.	110
Figura 5. 27. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert para el horizonte 2. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert para el horizonte 2. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d) Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.....	112
Figura 5. 28. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert para el horizonte 1. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d)	

Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.....	114
Figura 5. 29. Atributo de Q instantáneo resaltando calidad de roca asociado a porosidad, permeabilidad y fractura.	115
Figura 5. 30. Amarre de la descripción litológica y los registros del pozo PTUCV_1 con los datos sísmicos 3D, mostrando un ambiente transicional de progradación.	116
Figura 5. 31. Secuencia de los datos sísmicos 3D y facies ambientales asociadas.....	118
Figura 5. 32. Ubicación del área de estudio y de los ríos aledaños.....	120
Figura 5. 33. Mapa batimétrico del área de estudio.	121
Figura 5. 34. Mapa isópaco entre la batimetría y el horizonte 1.....	122
Figura 5. 35. Mapa estructural del horizonte 1.	123
Figura 5. 36. Mapa de amenaza sísmica mostrando los valores de a^*	125
Figura 5. 37. Mapa de amenaza sísmica mostrando los valores de γ	126
Figura 5. 38. Despliegue de los datos sísmicos 3D y 2D de alta resolución del área de estudio.	131
Figura 5. 39. Mapa batimétrico de los datos sísmicos 3D junto al mapa batimétrico de los datos sísmicos 2D y el mosaico de sonar de barrido lateral con el contorno de la batimetría monohaz.	133
Figura 5. 40. Registro de perfilador de fondo somero donde se observan las características de la zona de estudio.	134
Figura 5. 41. Interpretación de los datos sísmicos 3D con los datos sísmicos 2D de alta resolución. a) Superposición del “ <i>inline</i> ” 1625 de los datos sísmicos 3D con el “ <i>crossline</i> ” 13 de los datos sísmicos 2D de alta resolución. b) Visualización de los horizontes interpretados de la sísmica 2D de alta resolución junto con la interpretación del horizonte 1 de los datos sísmicos 3D.	135
Figura 5. 42. Mapa estructural en profundidad del área de estudio. a) Mapa estructural en profundidad para el horizonte 1 de los datos sísmicos 3D. b) Visualización 3D del mapa estructural en profundidad para el horizonte 1. c) Mapa estructural en profundidad del horizonte H4 de los datos sísmicos 2D de alta resolución.	138

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 4. 1. Tabla de ubicación de horizontes en tiempo.....	65
Tabla 5. 1. Evaluación de posibles amenazas para plataforma tipo “ <i>Jack-up</i> ”.....	130

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La inestabilidad del suelo marino, los desastres o catástrofes naturales, los sismos, las erupciones volcánicas, los desprendimientos de laderas, la subsidencia del terreno, entre otras son consideradas amenazas geológica debido a su potencial de afectar instalaciones y estructuras localizadas costa afuera, tomando en cuenta la naturaleza y el estado del sedimento del fondo marino, escapes de gas en la zona donde se propone construir la estructura y de los mecanismos de fallas asociados.

Como rasgo determinante, el fondo marino puede ser una superficie irregular con rasgos característicos que generaran morfologías complejas. Según esto, en varias zonas de las costas venezolanas, se conjugan variables geológicas y geotécnicas que permiten esta complejidad, tales como altas tasas de sedimentación, emanaciones de gas bio y termogénico, tectónica activa, alta amenaza sísmica, y morfología abrupta. Estas características permiten la posibilidad de que se generen diversas amenazas geológicas y geotécnicas tales como: deslizamientos submarinos, volcanes de lodo y gas, “*pockmarks*” o depresiones debidas a escapes de gas, gas somero presurizado, licuefacción de estratos de material granular suelto, afloramientos de material bioclástico calcáreo, estratos someros subconsolidados y fallas activas (Parra, 2008).

Para detectar estas amenazas es necesario realizar estudios geofísicos, geológicos y geotécnicos de forma integral. Con ellos es posible caracterizar el fondo marino y el subsuelo en términos de la morfología, características acústicas y propiedades geomecánicas (Jardine y Chow, 2005).

De esta manera, se realiza el muestreo del fondo marino y ensayos “*in situ*”, que compensarán el efecto sobre las propiedades geomecánicas de la fuerte descarga que sufren las muestras de suelos finos al ser llevadas a la superficie o la perturbación inevitable de las muestras granulares. En el caso particular, los estudios geofísicos proporcionan

información indirecta de las propiedades físicas del medio en términos de contraste de impedancia y los resultados variables según la resolución y la profundidad de investigación (Jardine y Chow, 2005). Adicionalmente, todas estas características corresponden a un entorno geológico que permitirá reconstruir las actividades tectónicas y/o sedimentarias del área de estudio.

Los estudios de amenazas geológicas son de vital importancia a la hora de colocar instalaciones en zonas costa afuera, especialmente aquellas relacionadas con la industria de hidrocarburos. En la actualidad, Venezuela ha tenido un incremento en la exploración costa afuera, dado el interés gasífero que hay en las costas venezolanas; dentro de estos desarrollos se encuentra el Proyecto Rafael Urdaneta, comprendido por varios bloques ubicados en el Golfo de Venezuela, en el cual se realizará este trabajo e investigación específicamente en el Bloque Moruy II.

Las profundidades de agua en el sitio de interés varían entre 22 y 25,8 m en el Golfo de Venezuela. Dado el amplio intervalo de profundidades del agua, el tipo de infraestructura de perforación y producción que podría ser desarrollado, varía entre plataformas fijas apoyadas en el fondo marino tipo “*jackets*”; estructuras de concreto estabilizadas por peso propio (“*concrete gravity based platforms*”), plataformas fijas flotantes ancladas al fondo marino o incluso equipos y cabezales de pozos directamente apoyados en el fondo marino (Parra, 2008).

Además, el gas bajo presión puede ocasionar una reducción del esfuerzo efectivo en el suelo, y por lo tanto, una reducción en su resistencia al corte. La presencia de gas somero debe ser considerada un factor importante como riesgo geológico para la perforación de pozos, debido a la amenaza de erupciones explosivas generadas por la liberación de gas presurizado contenido en acumulaciones someras. Esta concentración ocurre generalmente en la proximidad de fallas, las cuales pueden proporcionarle al gas termogénico, generado a profundidad, una ruta de escape hacia la superficie (MMS, 1998).

Por esta razón, resulta de gran utilidad el uso de los levantamientos geofísicos de alta resolución para la detección de los factores antes mencionados. Esto permite estudiar la morfología del fondo marino, establecer la continuidad lateral de los estratos identificados

en la exploración geotécnica, apoyar en la selección de los sitios de implantación de la infraestructura costa afuera e identificar riesgos de origen geológico y geotécnico (“*Geohazards*”) (MMS, 1998).

Los estudios integrados no solo son útiles en casos de exploración gasífera, también son aplicables para cualquier construcción costa afuera; es por ello que estos estudios deben ser realizados con una metodología eficiente que incluya el uso de la sísmica tridimensional y la sísmica de alta resolución bidimensional. Adicionalmente, por ser la geofísica un método indirecto se requiere de otros instrumentos como perforaciones geotécnicas, para realizar un amarre de los datos geofísicos con muestras directas del subfondo marino, lo que asegura una mejor interpretación y caracterización de las amenazas presentes (Izquierdo, 2010).

Muchos operadores de los diferentes bloques dentro del Proyecto Rafael Urdaneta, así como otros proyectos costa afuera a nivel nacional e internacional, requieren rápida y exacta determinación del posicionamiento final de las localizaciones a ser perforadas, con el objetivo de ejecutar los procesos de permisología y presupuesto, sin afectar el cronograma original, que incluye la evaluación de yacimientos profundos (uso de sísmica 3D y datos regionales), selección del prospecto y ubicación.

De esta manera, dentro de la planificación de una campaña exploratoria, el análisis y estudio de riesgo geológico conforman la última etapa antes de la movilización del taladro al punto donde se realizarán las operaciones de perforación. Estos estudios están conformados por las evaluaciones geológicas, geotécnicas y de los datos sísmicos multicanal 2D de alta resolución. El análisis de estos resultados permite conformar el posicionamiento exacto del taladro o si, por el contrario, requiere ser ajustado a otro punto geográfico.

En este orden, lo primero es caracterizar el yacimiento y encontrar las zonas objetivos; en función de eso se desarrollan las campañas de exploración y posterior producción. En la práctica, esto se traduce en que la geofísica de prospección es el primer paso en la caracterización de amenazas geológicas.

La sísmica 3D, en general, tiene una buena relación señal/ruido y un buen contenido de frecuencias, además logra resaltar la continuidad de los reflectores lo cual se traduce en un producto de buena calidad estructural y una buena resolución estratigráfica.

Por esta razón, en este proyecto de Trabajo Especial de Grado, se propone evaluar la factibilidad técnica del uso de datos sísmicos 3D, para el desarrollo de una metodología que permita la caracterización de amenazas geológicas someras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad técnica del uso de los datos sísmicos tridimensionales, en la determinación de amenazas geológicas someras presentes en el Bloque Moruy II, Golfo de Venezuela.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Interpretar estratigráficamente un cubo sísmico de 50 km².
- Generar volúmenes de descomposición espectral, similitud y coherencia sobre los datos sísmicos 3D.
- Correlacionar las propiedades físicas de las rocas y datos sísmicos, mediante la aplicación de atributos sísmicos, basados en la transformada de Hilbert y atributos geométricos.
- Caracterizar las amenazas geológicas presentes en la sección somera (<100 metros de profundidad) del Bloque Moruy II.
- Correlacionar los datos sísmicos 3D con los estudios de amenaza geológica convencional.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de las operaciones costa afuera implica una gran inversión de recursos económicos y humanos, por lo cual, resulta de vital importancia conocer y caracterizar las amenazas a las que están expuestas las instalaciones (plataformas de perforación) como el personal.

Como herramienta útil para la identificación y evaluación de amenazas geológicas someras relacionadas a la instalación y operaciones costa afuera, se encuentra la geofísica marina de alta resolución. Sin embargo, este tipo de evaluaciones, hasta ahora, no han sido realizadas en la fase de exploración donde los datos sísmicos convencionales, son usados para caracterizar el subsuelo y determinar la posición de las localizaciones a ser perforadas. Normalmente, las evaluaciones de amenazas geológicas utilizando la geofísica marina de alta resolución, son ejecutadas apenas 2 o 3 meses antes de las operaciones de perforación, provocando un retardo en las mismas, si existiese el caso de mover la localización por presencia de acumulaciones de gas y/o fallamiento somero. En pocas palabras, el desarrollo de estos proyectos depende de numerosas variables, que no se desenvuelven en paralelo; generando retrasos importantes que se traducen en desviaciones económicas respecto al presupuesto original. Es por esta razón que, a través de este Trabajo Especial de Grado se evaluará la factibilidad del uso de datos sísmicos convencionales, con miras a la caracterización temprana de amenazas geológicas someras.

1.4 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el Golfo de Venezuela, y está ubicado al noroeste de la sección occidental del estado Falcón, a 32 km al suroeste de la ciudad de Punto Fijo y a 140 km de Maracaibo, entre Punta Yuyo, Punta Santa Clara y Punta Recobo (Figura 1.1).

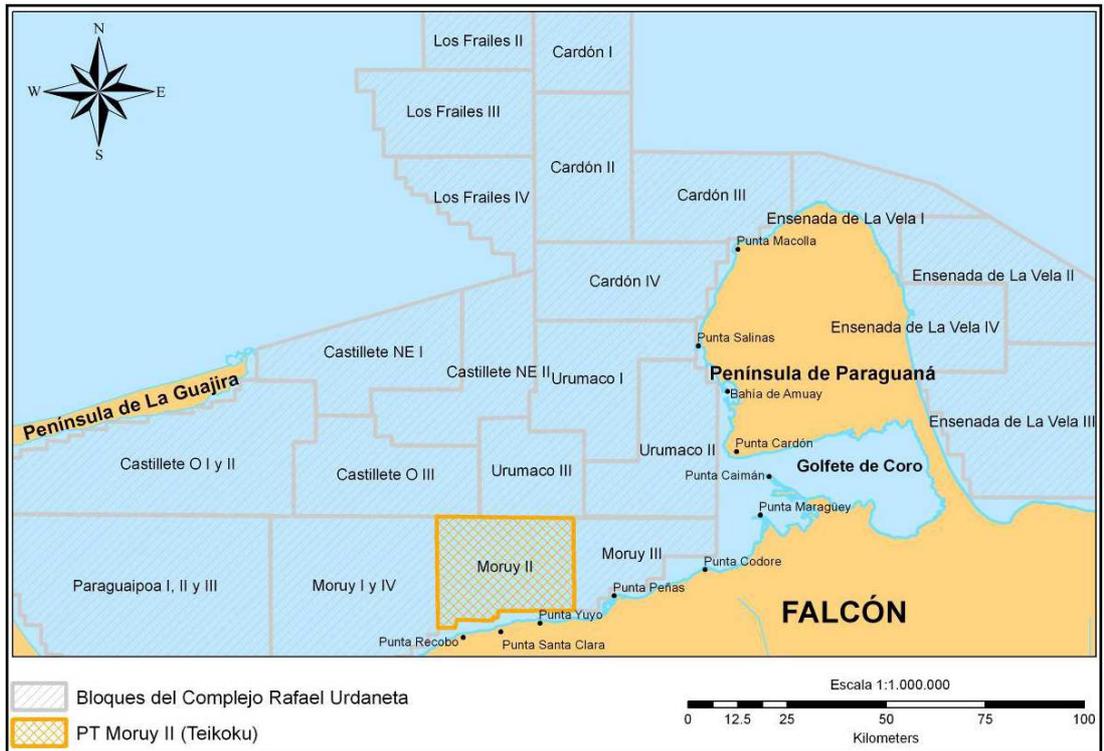


Figura 1. 1. Mapa de ubicación del Bloque Moruy II (GEOHIDRA, 2009).

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La geología de las costas venezolanas se encuentra dominada por los efectos de la zona de contacto entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana, limitado al norte por el cinturón de deformación del Caribe y al sur por el sistema de fallas de Oca-Ancón (Audemard et al., 2005). Dentro de esta zona se desarrollan varias estructuras, entre todas ellas, las que definen la evolución geológica reciente del área son el Alto de Paraguaná y la Fosa Septentrional (Mendi y Rodríguez, 2005).

Las cuencas sedimentarias Falcón-Bonaire, Golfo de Venezuela y del norte de Colombia constituyen una importante provincia geológica que relaciona la región del Mar Caribe con la parte norte de la América del Sur, formando una zona de transición entre el dominio oceánico del Mar Caribe y el dominio continental de las cadenas montañosas.

Por esta razón, para el objetivo de este estudio, se presentará la evolución estructural y estratigráfica regional de esta zona.

2.1 EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA REGIONAL DE LA CUENCA DE FALCÓN Y DEL GOLFO DE VENEZUELA

El margen estructural regional del Golfo de Venezuela y la evolución de la Cuenca de Falcón está totalmente influenciado por la tectónica activa producida por la Placa Caribe a principios del Terciario (Almazar, 1998). En consecuencia, esta evolución tectónica y estratigráfica de la cuenca correspondería a la secuencia que inicia durante el Cretácico Medio-Tardío hasta el Pleistoceno.

2.1.1 Cretácico Medio-Tardío (96-65 Ma)

Muessig (1984) menciona que la cuenca de Falcón se originó en el Cenozoico como consecuencia de efectos transtensionales relacionados con fallas transcurrentes como las fallas de Oca y San Sebastián además el desarrollo de una estructura pull-apart en la cuenca de Falcón refleja la evolución tectónica del período Terciario donde un largo bloque de

corteza reflejó al bloque Bonaire (Silver et al., 1975). Este bloque estuvo sujeto a cizallamiento dextral, entre la Placa del Caribe y la Placa Suramericana (Muessig, 1984).

En este período se presentaron distintos eventos regresivos y transgresivos, así como también la máxima transgresión aproximadamente en el Turoniense-Conienciense, trayendo como consecuencia un ambiente en condiciones euxínicas, por ende estuvo gobernado por plataformas carbonáticas. Asimismo, el gran espesor de sedimentos depositados dio como resultado la subsidencia o hundimiento diferencial mientras se daba dicha depositación, dichos espesores aumentan desde el Alto de Dabajuro hasta la Península de la Guajira en la parte oeste del Surco de Urumaco (Maraven, 1985).

Los sedimentos cretácicos se encuentran muy bien representados en la zona oeste y SO, por los clásticos basales de la Formación Río Negro, las calizas marinas someras del Grupo Cogollo, calizas y lutitas marino profundo de la formación La Luna y Colón. Por el contrario, al este en Paraguaná, no se evidencian secuencias cretácicas equivalentes, esto se adjudica a que fueron fuertemente erosionadas. (Stainforth, 1968).

También, se sugieren procesos de subducción, obducción, magmatismo, metamorfismo, emplazamiento de napas y generación del arco volcánico del Caribe (Antillas Menores) por efecto tectónico de la Placa Caribe con la Placa Suramericana (orogénesis del Caribe), que se evidencia con la Formación Washikemba en Aruba y el Grupo Bahía Honda en la Península de la Guajira, ambos caracterizados por intrusiones ácidas, turbiditas, dinamometamorfismos, entre otros, lo que indica que el norte del Golfo probablemente estuvo sometido a actividad volcánica (Stainforth, 1968).

2.1.2 Paleoceno–Eoceno Inferior (65-50 Ma)

Está caracterizado por ser de ambientes marino somero, el cual se manifiesta con capas de carbones producto de las regresiones hacia el oeste del Golfo, las formaciones Paleocenas sólo se conservan hacia la Península de la Guajira en algunos afloramientos de la Formación Macarao con algunas lutitas y carbonatos; existe una gran similitud entre los sedimentos de esta formación en la Guajira y al Formación Guasare en Falcón, lo que sugiere que se mantenga las características estratigráficas en la parte este del Golfo.

Asimismo, en este período continúan el ciclo regresivo del cretácico. (Stainforth, 1968; Maraven, 1985).

Gran parte de la columna sedimentaria depositada fue erosionada. Este primer ciclo comienza con una regresión en el borde norte del continente y que está acompañada por deformación tectónica en el Mar Caribe (González De Juana et al., 1980).

2.1.3 Eoceno Medio-Tardío (50-38 Ma)

La sedimentación en la Cuenca de Falcón, que ocurrió en algunas depresiones o fosas y grábenes fallados posterior al emplazamiento de las napas de Lara, debió iniciarse a finales del Eoceno Medio para el oeste de Falcón y a finales del Eoceno Tardío al este de esa entidad, además para esta época comienza el fallamiento transcurrente lateral dextral en el Norte de Venezuela (Figura 2.1), a lo largo de la cual se genera la extensión en la zona de tracción correspondiente a la Cuenca de Falcón (Muessig, 1984; Macellari, 1995).

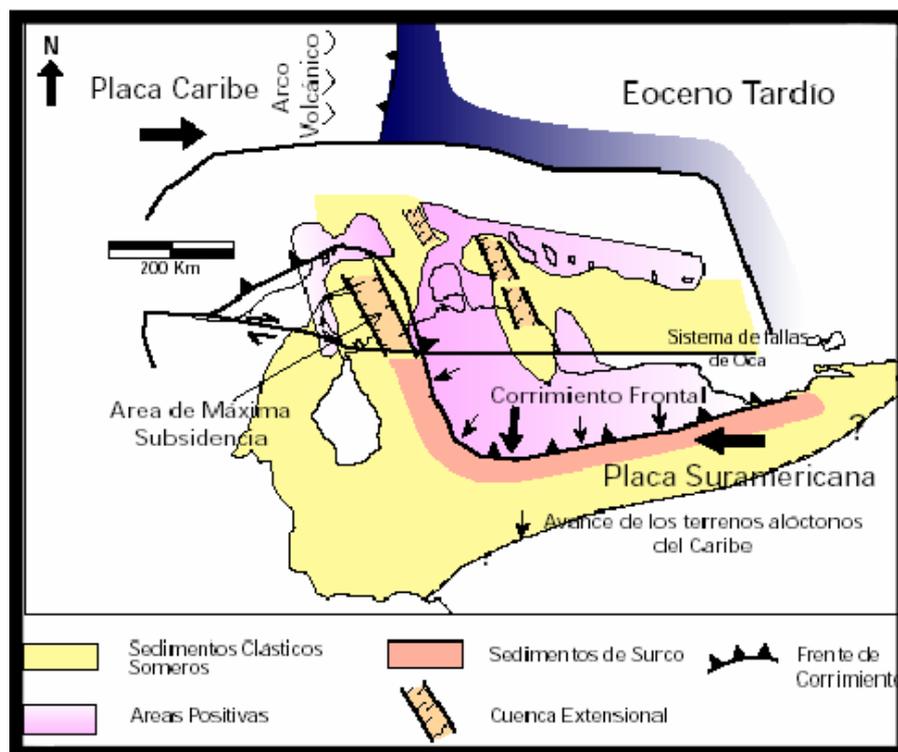


Figura 2. 1. Modelo de generación de cuencas “pull-apart” episuturales (suroeste Caribe) por el desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana en el Eoceno Tardío. (Tomado de Macellari, 1995).

La colisión oblicua progresa hacia el este con una inflexión en sentido horario del Arco Mesozoico del Caribe hacia el margen pasivo suramericano. Mientras que el “*rifting*” de la cuenca de Grenada avanza hacia el norte y el sur. Simultáneamente, las cadenas de pre-“*flysh*” del borde sur de las napas del caribe son plegadas y montadas hacia el SE. Audemard (1993), propone que la colisión entre el arco y el continente, y el acarreo de las napas derivadas, se realizaron según un dispositivo de bloques que son progresivamente arrastrados en el continente y rotados en sentido horario hacia la dirección EW. La estructura de los bloques podría beneficiarse de fallas transformantes antiguas del “*rift*” jurásico, idea propuesta por ciertos autores sobre las falla NW-SE, asociadas y sintéticas del movimiento dextral existente en la actualidad a lo largo del límite septentrional de la placa suramericana.

Ghosh, (1997) describe que se depositan las cinco formaciones Cerro Misión, Cerro Campana, Esperanza, La Victoria, Mene Grande (de origen turbidítico en áreas restringidas; probablemente relacionado con el inicio de la actividad transcurrente de la Falla de Oca). Se encuentra activa la extensión simétrica de la Cuenca de Grenada hacia el norte y hacia el sur, a través de un “*rifting*” (Audemard, 1995).

2.1.2 Eoceno Tardío-Oligoceno (38-17 Ma)

En el Eoceno Tardío comienza una nueva invasión marina, con sus sedimentos primarios de areniscas continentales y conglomerados, hacia mediados del Oligoceno-Mioceno comienzan nuevamente procesos asociados a márgenes extensivos o de tracción por los movimientos de transcurrencia dextral, caracterizado por cuencas de tracción que permitieron la invasión marina dentro del Golfo, y a su vez, una ligera compresión hacia el oeste del mismo. En el Mioceno Medio el occidente del Golfo y el Alto del Dabajuro se basculan y erosionan, hacia el Mioceno Tardío comienzan procesos regresivos que generan que las facies marino somero cambien a continentales (Guevara et al, 1977).

Continúa la extensión al norte de Venezuela, proceso que se prolonga hasta el límite Oligoceno-Mioceno Temprano y el estiramiento cortical alcanza el Banco de Saba al norte y la Cuenca de Falcón al sur (Audemard, 1995). Sobre este particular, Muessig (1982) y Ghosh (1997) indican que este adelgazamiento cortical provocó la inyección de magmas

alcalinos en la cuenca de Falcón. Por su parte, Macellari (1995) y Ghosh (1997) plantean que para esta época comienza la actividad del fallamiento transcurrente dextral en el Norte de Venezuela, a lo largo del cual se genera la extensión que origina la Cuenca “*Pull-apart*”, causado por movimientos transcurrentes entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana (Figura 2.2).

Muessig (1982) define este límite de placas como una falla transformante y la expresa como una serie de fallamientos dextrales a lo largo de una línea que permite conectar la Falla de Oca con la Falla de San Sebastián.

En este tiempo se comienza a generar la cuenca Falcón-Bonaire como un colapso tectónico detrás de la colisión entre las placas Caribe y la suramericana, a partir de este proceso se comienzan a generar estructuras extensionales tipo graben.

En el borde NO de la cuenca de Falcón se reconoce la Plataforma de Dabajuro, substrato levantado de rocas eocenas contra la cual se acuñan formaciones Oligo-Miocenas. Este levantamiento fue un elemento positivo durante el Oligoceno y parte del Mioceno inferior (Almazar, 1997).

Entre la Plataforma de Dabajuro al oeste y el Alto de Paraguaná al este se ha postulado la presencia de una depresión, el Surco de Urumaco, que aparentemente comunicó el Canal Falconiano con el Golfo de Venezuela en el Oligo-Mioceno.

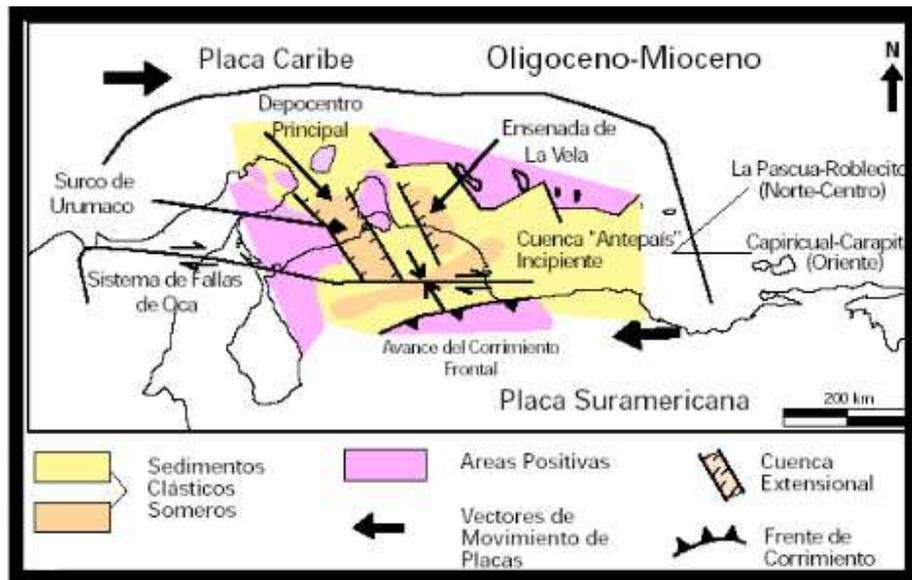


Figura 2. 2. Evolución del modelo de generación de Cuencas “pull-apart” en su máximo desarrollo (SO Caribe) por el desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana para el Oligoceno Mioceno Tardío. (Tomado de Macellari, 1995)

2.1.3 Mioceno Temprano-Medio (17-5 Ma)

Durante este periodo, el norte de Suramérica comienza a ser afectado por un régimen de esfuerzos compresivos noroeste-sureste a norte-sur, que provocan la orogénesis andina. Además ocurre la inversión tectónica de la Cuenca de Falcón. El patrón de sedimentación en este momento, es menos marino que el subyacente. Audemard (1993, 1995b) lo atribuye a la inversión bajo la forma de un anticlinorio, lo cual hace que la sedimentación se traslade al norte del mismo (Figura 2.3).

Los frentes de deformación generados por los movimientos transcurrentes dextrales de la Placa Caribe están caracterizados por una tectónica extensiva y el desarrollo de estructuras de tracción de edades Oligoceno-Mioceno; caracterizadas por fallas transcurrentes oeste-este y noroeste-sureste. Asimismo, la colisión violenta en el Eoceno generó una serie de napas al SE de la plataforma suramericana y seguidamente en el Oligoceno-Mioceno por una tectónica vertical en ambiente extensivo o transtensivo generando las cuencas de margen continental (Almazar, 1998).

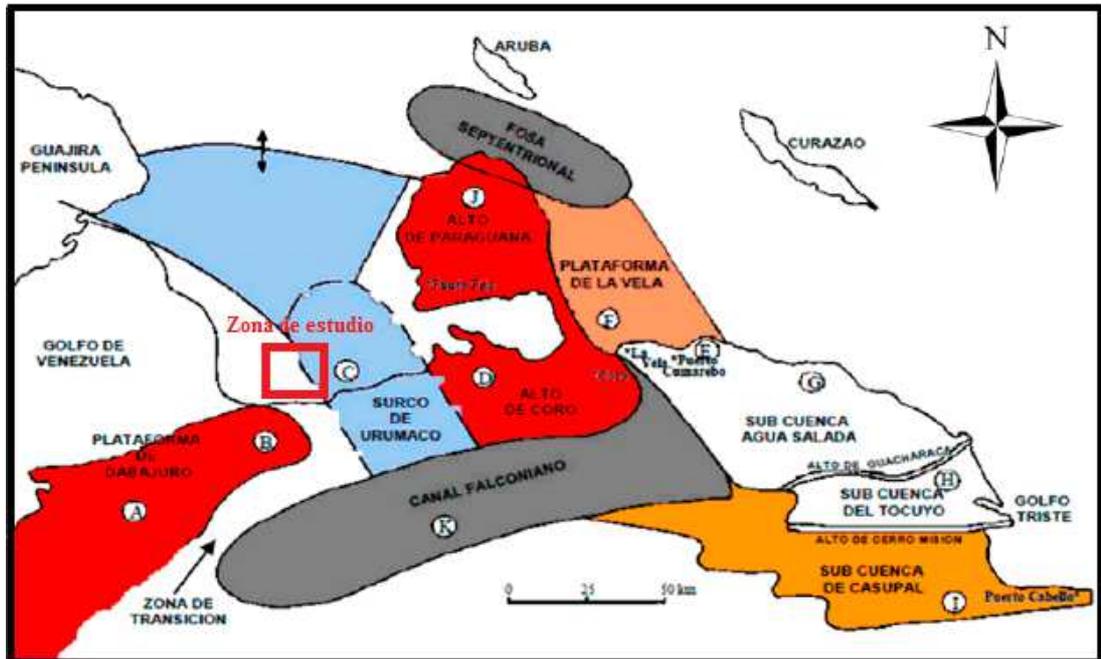


Figura 2. 3. Elementos tectono-sedimentarios de la cuenca de Falcón, obsérvese la ubicación del área de estudio en función de las estructuras dominantes (Oligoceno-Mioceno temprano) (Tomado de Mendoza, 2005).

Siguiendo con este ámbito, la Cuenca de Falcón nace durante una fase de “*rifting*” de edad Oligoceno a consecuencia de un campo de esfuerzos regional distensivo. La subsidencia tectónica de la cuenca culmina en el límite Oligo-Mioceno con las últimas intrusiones y coladas basálticas, y la colmatación sedimentaria, durante la subsidencia térmica, está representada por los depósitos lutíticos neríticos de la Formación Agua Clara de edad Mioceno Inferior.

González De Juana *et al.*, (1980), describe que, durante esta época, los extremos del Golfo de Venezuela, la Plataforma de Dabajuro y el sinclinal de Cocinetas en la Península de La Guajira, se ven afectados por el levantamiento de nuevas áreas montañosas con lo cual los sedimentos se acuñan contra las áreas estructuralmente positivas. Asociado a la tectónica compresiva que fue diacrónica se presentan ambientes marinos para el borde occidental (sector de la Guajira), y ambientes costeros para el borde oriental en el Alto de Dabajuro.

Los sedimentos involucrados en la depositación de la cuenca a nivel regional del área de estudio, están representados, de abajo hacia arriba por la Formación Querales de edad

Mioceno Temprano, la Formación Socorro de edad Mioceno Medio y la Formación Urumaco de edad Mioceno Tardío a Plioceno (Figura 2.4).

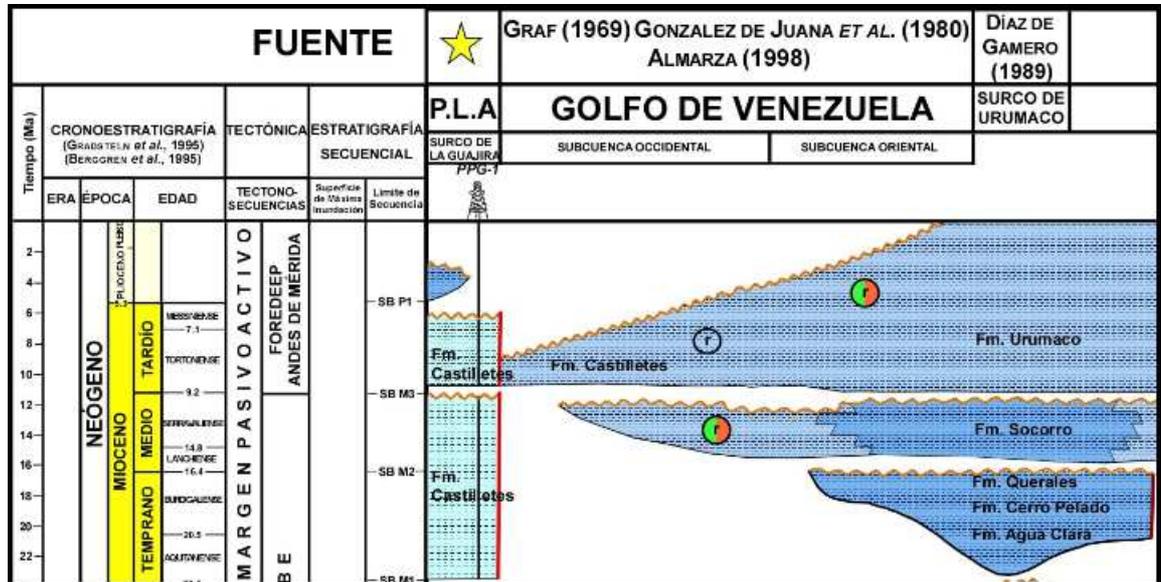


Figura 2. 4. Cuadro cronoestratigráfico realizado a partir de información geológica publicada de trabajos especiales de grado del departamento de Geología, escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. (Tomado y modificado de Tardáguila, 2008).

Siguiendo con lo anterior, para el Mioceno Temprano, Díaz de Gamero *et al.*, (1988), dice que la Formación Querales se creó en un evento transgresivo, consecuencia de una invasión marina discreta, dentro del marco general de sedimentación deltaica prevaleciente y medio en el surco de Urumaco. La sedimentación de la unidad se ubica en la parte más distal de un complejo deltaico, que aportaba sedimentos del sur y oeste y que se conforma por más del 90% por lutitas de colores oscuros, con intercalaciones de areniscas de grano fino, en paquetes de hasta 4 m de espesor, muy bioturbadas, escasas margas y calizas conchíferas en capas delgadas y algunos finos niveles carbonosos.

Siguiendo con esto, al oeste del Río Mitare, la Formación Socorro se depositó inicialmente en un frente deltaico, que pasa hacia arriba a depósitos de llanura deltaica, con todo el complejo de facies asociado y con persistente influencia marina al este, donde se desarrollan barras playeras y llanuras de marea. Díaz de Gamero (1996) identifica el sistema fluvial que construyó en el Mioceno Medio el delta representado hoy por la Formación Socorro como el proto-Orinoco. Este río drenaba la Cordillera Central de

Colombia, al oeste y el macizo Guayanés, al este y, fluyendo hacia el norte, desembocaba en el noroeste de Falcón.

Díaz de Gamero (1989) describe la unidad en la región del Surco de Urumaco como constituida de lutitas con intercalaciones frecuentes de areniscas, a veces de espesor considerable, con algunas calizas arenosas conchíferas y raros carbones en su parte inferior. Las areniscas son el elemento distintivo de la formación, de grano fino a medio, micáceas, con manchas ferruginosas, generalmente bioturbadas, con la máxima bioturbación hacia la base de las capas; frecuentemente muestran estratificación cruzada planar, en menor grado festoneada, con laminación paralela y ondulada hacia el tope.

Según Díaz de Gamero y Linares (1989), hacia el Mioceno Tardío y Plioceno, la Formación Urumaco, se ubica dentro de un complejo de ambientes marginales y próximos costeros, con desarrollo de amplias lagunas y bahías, semiprotegidas por barreras litorales, en un régimen principalmente transgresivo. El aporte de sedimentos fue relativamente escaso, predominantemente de grano fino, en parte proveniente de un sistema fluvial que desemboca en la laguna.

Según Díaz de Gamero y Linares en 1989, la sección tipo ha sido dividida en tres miembros: uno inferior, lutítico-limoso, compuesto de lutitas interestratificadas, yesíferas, azules, abigarradas, marinas y no marinas, con capas menores de calizas fosilíferas y algunas areniscas; las lutitas contienen algunas vetas de carbón. El miembro superior, lutítico-arenoso, es similar al inferior, pero muestra mayor influencia continental con mayor número de capas de areniscas que en los dos miembros inferiores. El miembro intermedio entre los dos, lutítico-arenoso-calcáreo, es similar al inferior pero con mayor contenido de moluscos marinos. Por su parte, en la facies continental fluvio-deltaico, hacia el tope de la formación, se localizó la denominada “capa de tortuga” y vertebrados fósiles, peces, reptiles y mamíferos, cocodrilos, etc.

2.1.4 Plioceno (5-3 Ma)

Para esta época, la configuración y los límites de la Placa Caribe muestran las condiciones actuales. El movimiento transpresivo entre el Caribe y Suramérica causa la migración hacia el norte del frente del Anticlinorio de Falcón y culmina la extensión a lo largo de las fallas

NO-SE (Macellari, 1995). Esta migración afecta también la sedimentación de la cuenca, presentándose depósitos continentales en la Plataforma de Dabajuro y en el sector nororiental, y depósitos marinos asociados a la línea de costa actual y a la Península de Paraguaná. Este cambio de límite puede deberse a la colisión del arco panameño contra el margen oeste del continente Sur Americano, lo cual conlleva a:

- El desplazamiento hacia el norte del bloque limitado por los sistemas de fallas dextrales de Boconó, las fallas de piedemonte de la Cadena oriental Colombiana y la falla de Guayaquil.
- La expulsión hacia el norte del bloque de Maracaibo, limitado por las fallas de Santa Marta-Bucaramanga y Boconó.
- La subducción de la cuenca de Venezuela (Placa Caribe) debajo del frente nor-venezolano, a nivel de las Antillas Holandesas.

La fase compresiva del Plio-Cuaternario es responsable del levantamiento de los Andes venezolanos actuales (Figura 2.5).

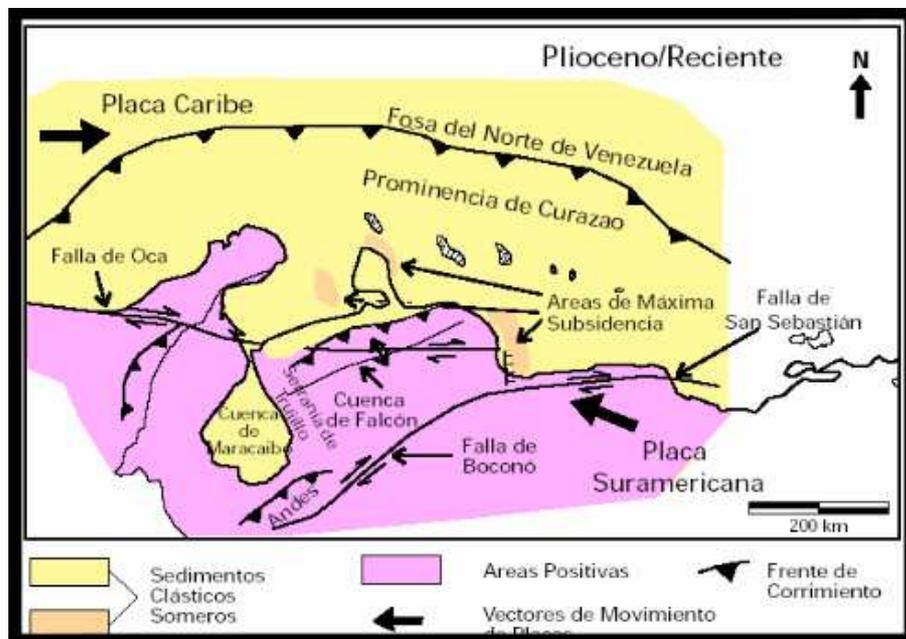


Figura 2. 5. Configuración actual de la Cuenca de Falcón según Macellari (1995)

2.1.5 Pleistoceno (1,64-0,01 Ma)

Durante el Pleistoceno los mares oscilaron notablemente y depositaron terrazas marinas escalonadas. Al mismo tiempo se desarrollaron terrazas continentales sierra adentro (Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1970).

Las terrazas cuaternarias de Los Andes, atribuidas a la actividad fluvio-glacial, presentan características geomorfológicas, estructurales y petrológicas que discrepan notablemente de las asociadas usualmente a las glaciaciones. Tricart y Milles_lacroix (1963) describen varios niveles de estas terrazas: en primer lugar, un depósito aluvional antiguo, compuesto de arcillas y arenas con estratificación de tipo deltáico y lacustre, poco material grueso y diseminado y lixiviación avanzada. Por encima se desarrollan terrazas sucesivamente más jóvenes, constituidas por aluviones más gruesos, heterogéneos y mal escogidos, pero que muestran estratificación local, sugestiva de sedimentación periódica de flujos de barro. Todas estas últimas terrazas han sufrido inclinación y fallamiento de intensidad cada vez menos, en bloques sucesivos (Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1970).

Royo y Gomez (1956) describen, en el estado Falcón, terrazas y playas levantadas que afloran en la línea de costa, además indica que éstas se encuentran a lo largo de las costas de Venezuela entre los 3 m y 6 m.

Geomorfológicamente, desde el Golfo de Venezuela a Golfo Triste, en las villas del Lago de Maracaibo afloran capas de ambiente lacustre atribuidas al Plio-Pleistoceno en el cual se establecieron mayormente ambientes de pantanos, y hacia el suroeste del golfo ambientes lacustrinos. (Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1970).

González De Juana et al., (1980) hace referencia, de que en el propio golfo puede existir una cobertura de sedimentos marinos poco profundos a transicionales y fluviales separados por hiatos.

En la figura 2.6 se muestran dos cortes esquemáticos (SN y OE) en el área del Golfo de Venezuela interpretados a partir de información sismográfica por González De Juana et al., (1980).

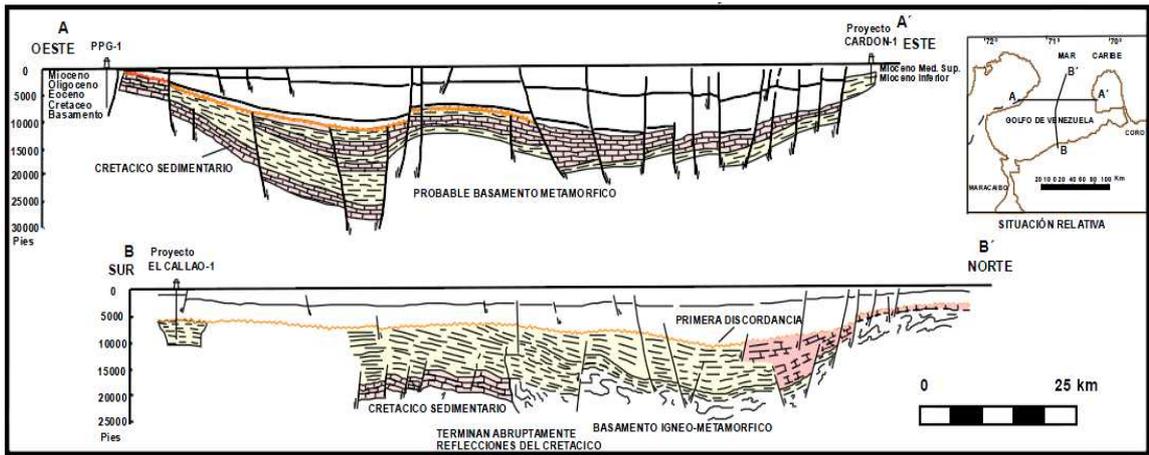


Figura 2. 6. Cortes esquemáticos (SN y OE) en el área del Golfo de Venezuela interpretados a partir de información sísmográfica. (Tomado de González De Juana et al., 1980).

Hoy en día la dinámica sedimentaria aporta un volumen muy bajo de sedimentos desde las penínsulas de Paraganá y La Guajira, y ambas costas contienen zonas de erosión y playas de barrera. En la figura 2.7 se muestra el marco estructural actual del área del Golfo de Venezuela.

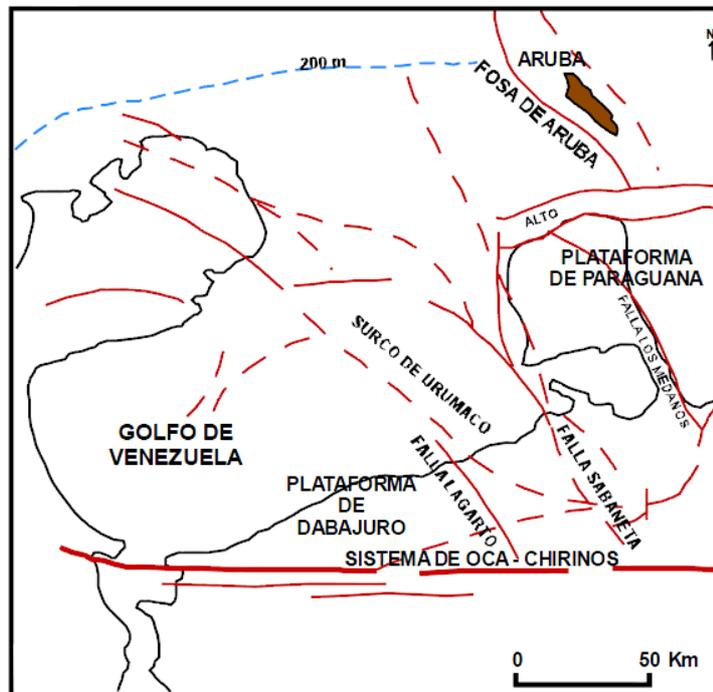


Figura 2. 7. Marco Estructural del Golfo de Venezuela. (Tomado y modificado Código geológico de Venezuela, 2007).

2.2 MARCO LOCAL

En estudios realizados por Audemard (1996), se determina que la activación tectónica en Falcón centro-occidental es de edad Pleistoceno Tardío a Holoceno Temprano. Además en el área de estudio corresponde a una secuencia de ambiente costero a continental reflejando ambientes marino somero y fluvial deltaico.

Según el Léxico Estratigráfico de Venezuela (2007), hacia la zona del Golfo y la Bahía de Calabozo se encuentran evidencias de los siguientes eventos:

- Los niveles interglaciares cubrían la región, depositándose sedimentos de ambientes costeros.
- Al comenzar la glaciación se inicia la regresión marina, permitiendo la exposición del Risco de Calabozo, permitiendo su erosión y la formación de lagunas costeras producto de la invasión ocasional del mar.
- Durante la máxima extensión de los glaciares estas lagunas pudieron quedar separadas del mar abierto, constituyendo una cuenca de drenaje interior permitiendo así la depositación de sedimentos finos durante las estaciones pluviales.
- Con el inicio del deshielo de los glaciares continentales el mar comenzó una transgresión, convirtiendo la cuenca interior en laguna costera. Durante este avance marino, comenzaron a depositarse los sedimentos litorales.

De igual manera, hacia el Golfete de Coro en la zona más cercana a la Península de Paraguaná, se encuentra el delta del Río Mitare con playas erosivas y constructivas.

Según Díaz de Gamero y Linares (1989), la sedimentación de la Formación Urumaco, se ubica dentro de un complejo de ambientes marginales y próximos costeros, con desarrollo de amplias lagunas y bahías, semiprotegidas por barreras litorales, en un régimen principalmente transgresivo.

El aporte de sedimentos de esta formación fue relativamente escaso, predominantemente de grano fino, en parte proveniente de un sistema fluvial que desemboca en laguna. La

importancia de los depósitos de acarreo de tormenta, es indicativa de un régimen micromareal con tormentas frecuentes, a veces de gran intensidad. La abundancia de materia orgánica vegetal y la composición de los conjuntos de vertebrados, indican la presencia de cubierta vegetal selvática, en un clima húmedo tropical. Dentro de este marco ambiental, la sedimentación del miembro medio de la formación, indica una reducción en el aporte de sedimentos respecto al miembro inferior, mientras que el miembro superior es de carácter regresivo, con un aumento en el aporte de sedimentos y el desarrollo de una llanura fluvial en el sector occidental del área.

Durante la sedimentación de la Formación Urumaco, se produjo un equilibrio entre el ascenso relativo del nivel del mar, producto del ascenso eustático y la subsidencia local, y el suministro de sedimentos, de manera que se preservaron las secuencias detrás de las barreras litorales, sin que se produjera una invasión marina en el área.

Actualmente en el Golfo de Venezuela y la bahía de Calabozo se están distribuyendo y acumulando sedimentos de la plataforma somera en las zonas litorales y costeras, así como sedimentos fluviales y paludales.

2.2.1 Fallas del Cuaternario presentes en la región de Falcón

Los principales estudios han demostrado que el contacto de Placas no es una simple interacción transcurrente dextral, ya que hay evidencias de 100 km de una amplia y activa zona transpresiva. Según Audemard (1997), esta región está actualmente sometida a un tensor de esfuerzo horizontal máximo con dirección NNO-SSE a NS y un esfuerzo mínimo horizontal en dirección ENE-OSO, el cual es responsable de la cinemática y de la actividad tectónica de diversos rasgos estructurales, que afectan los depósitos Plio-Cuaternarios de la zona.

Entre estas fallas tenemos:

- Fallas dextrales con orientación E-O como lo son el sistema de fallas de Oca – Ancón y Adícora.
- Fallas dextrales con orientación NO-SE sintéticas de las fallas con orientación E-O como lo son las de Lagarto, Urumaco, Río Seco, La Soledad y Santa Rita.

- Fallas normales NNO-SSE como lo son las de Cabo San Román, Puerto Escondido y Los Médanos.
- Fallas sinestrales con orientación N-S a NNE-SSO como la de Carrizal y El Hatillo.
- Fallas inversas con orientación ENE-OSO, subparalelas a los ejes de pliegue como lo son las de Mina de Coro, Taima-Taima, Chuchure, Matapalo y Araurima.

La tasa de desplazamiento de estas fallas es baja (generalmente inferior a 0,4 mm/a), a excepción del sistema Oca-Ancón, que se desplaza a razón de 2mm/a, siendo este el accidente tectónico activo más importante de la región noroccidental de Venezuela por su longitud, la cual es de aproximadamente unos 650 km de largo (Audemard, 1997).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

A continuación se presentaran los conceptos básicos para un estudio de ambiente marino somero y su respectiva aporte geofísico asociada a este tipo de estudios.

3.1 SÍSMICA DE REFLEXIÓN MARINA

Actualmente la industria petrolera utiliza la sísmica 2D y 3D como herramienta base para la exploración, con el fin de localizar yacimientos, dichos estudios geofísicos no se limitan a adquisiciones terrestres, sino que también tienen su aplicación marina o costa afuera (“*offshore*”).

La adquisición de sísmica de reflexión marina puede ser llevada a cabo mediante dos tipos de estudios distintos, los cuales, difieren considerablemente en costos operativos, tamaño de fuente, penetración efectiva, entre otros aspectos. El primero de ellos es el estudio tipo Punto de Profundidad Común (CDP) y el otro es el estudio conocido como perfilamiento marino (Stone, 1994).

En líneas generales la sísmica convencional 2D terrestre se puede resumir como una fuente seguida por un grupo de receptores sobre una línea recta tanto como el medio lo permita. La adquisición marina es exactamente de esta naturaleza, por lo tanto, todas las ecuaciones y principios descritos para la sísmica 2D se aplican para la sísmica marina. Sin embargo, existen diferencias claras entre la adquisición 2D terrestre y la adquisición marina. En tierra, hay una completa libertad para el intervalo de tiempo entre disparo y disparo y el muestreo espacial, por el contrario, sobre el agua el bote debe mantener el movimiento de tal modo que conserve al cable recto y alineado, lo que conlleva a la existencia de un factor limitante basado en el tiempo necesario para re-armar y disparar la fuente, y que está relacionado a la velocidad del bote y a la distancia que viaja mientras re-arma la fuente. Por otro lado, la longitud de registro (tiempo de grabación) también afecta el espaciamiento entre disparos. Otro factor de importancia es el giro de retorno que realiza el bote, ya que después de cada viaje lineal cubriendo el diseño sísmico, el bote necesita bastante espacio para girar arrastrando el cable por su parte trasera (popa), lo que implica que dicha área de

giro necesita estar tan libre de obstáculos como sea posible, puesto que el tráfico de otras embarcaciones podría interferir en las actividades e incluso dañar los equipos o cortar los cables (Stone, 1994).

3.1.1 Geofísica Digital o Multicanal

La sísmica multicanal o digital para estudios de sitio (“*site surveys*”) es una forma de sísmica de alta resolución y miniaturizada de la sísmica 2D/3D con propósitos de yacimiento. Esta sísmica es empleada principalmente para detectar la presencia de gas somero a alta presión que puede representar una amenaza para la perforación sin encamisado que la sísmica monocanal no puede detectar por debajo del primer múltiple del fondo marino, ya que éste es difícil de remover en el procesamiento. La detección de gas somero, se hace mediante la técnica de identificación de puntos brillantes (“*bright spots*”) e inversiones de fases. Otra de las ventajas (según Parkinson, 2001) es que permite realizar un estudio sismoestratigráfico a unos 2-3 segundos en tiempo doble de viaje, donde también se puede realizar un modelado estructural de la zona que aporta información importante al momento de perforar.

La efectividad de los estudios de sísmica multicanal de alta resolución depende de un conjunto de factores, entre los que se encuentran la penetración del pulso sísmico, resolución vertical y horizontal, y la capacidad de muestreo del sistema de adquisición utilizado. La penetración está determinada por la energía y frecuencia de la fuente sísmica utilizada, el tiempo, interferencia sísmica, longitud del “*streamer*”, número de canales, entre otros. La absorción del pulso sísmico típica esta alrededor de los 0.2 dB por longitud de onda. (Parkinson, 2001).

En la figura 3.1 se presenta una sección sísmica multicanal donde se muestran ciertas características estratigráficas y estructurales (fallas y su influencia en los estratos), mientras que en la figura 3.2 se muestran ejemplos de puntos brillantes identificados en sísmica convencionales, los cuales pueden ser indicativos de presencia de gas.

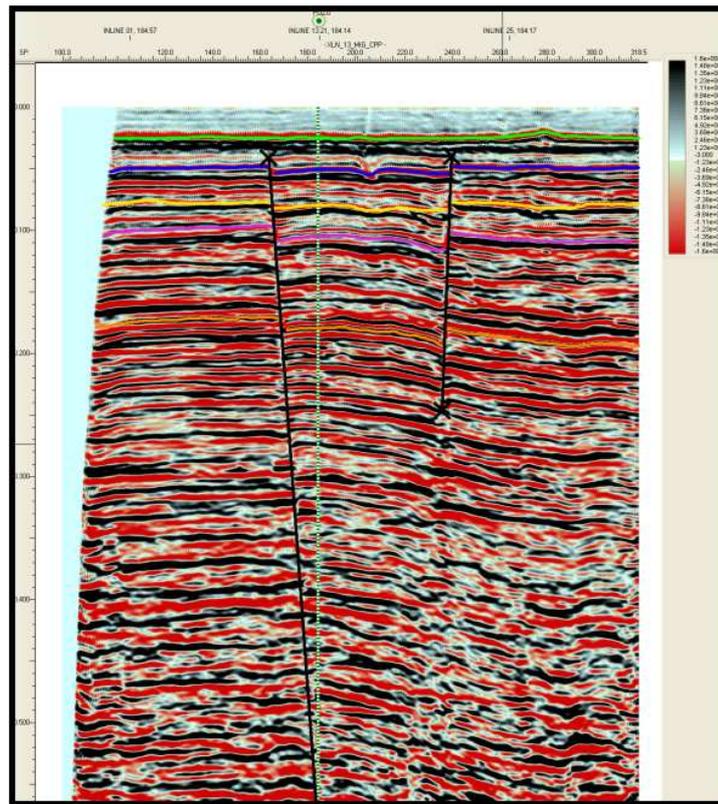


Figura 3. 1. Imagen de sísmica digital multicanal de alta resolución que muestra condiciones estratigráficas y estructurales. (Tomado de Nelson Izquierdo, 2007).

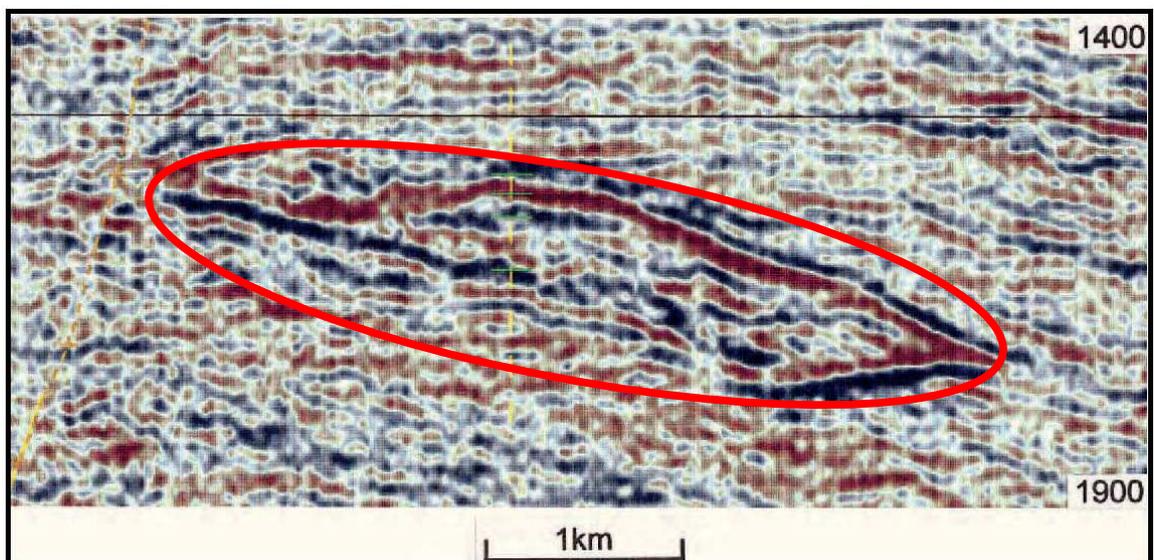


Figura 3. 2. Imagen de sísmica digital multicanal de alta resolución que muestra un “*bright spot*” para un yacimiento de gas del Plioceno al este, costa afuera, del Delta del Nilo, Egipto. (Tomado de Interpretation seismic data Allister Brown).

La efectividad de los estudios de sísmica multicanal de alta resolución depende de un conjunto de factores, entre los que se encuentran la penetración del pulso sísmico, resolución vertical y horizontal, y la capacidad de muestreo del sistema de adquisición utilizado. La penetración está determinada por la energía y frecuencia de la fuente sísmica utilizada, el tiempo, interferencia sísmica, longitud del “*streamer*”, número de canales, entre otros. La absorción del pulso sísmico típica esta alrededor de los 0.2 dB por longitud de onda. (Parkinson, 2001).

3.2 INTERPRETACIÓN SÍSMICA TRIDIMENSIONAL

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:

3.2.1 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. Asimismo se determina la correlación de las edades geológicas en las secuencias sísmicas.

Entre los principales tenemos la interpretación sísmica estructural y la interpretación sísmica estratigráfica.

Interpretación sísmica estructural

La interpretación sísmica estructural tiene como objetivo principal generar el contorno o marco estructural de la cuenca sedimentaria, lo cual a su vez, nos dará una visual de cómo la misma puede estar dividida en distintos compartimientos generados por las fallas que la atraviesan, según sea el caso. El resultado de una interpretación estructural es de suma importancia, ya que provee una fuente de información fundamental en la búsqueda de hidrocarburos, es decir, la estructura de la cuenca nos permite tener una idea general de cómo es la posible disposición de los estratos que descansan sobre ella y su evolución en el tiempo geológico. Asimismo, nos indica cuales pudieron haber sido las posibles rutas de migración del hidrocarburo, así como también las zonas que estructuralmente son potenciales trampas para la acumulación del mismo (Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M., 2009).

Las principales etapas de la interpretación sísmica estructural comprenden una evaluación geológica general, en la cual el interprete se ubica en el marco geológico regional y trata de identificar las fallas principales con el fin de delimitar los bloques a estudiar en detalle, luego entra en juego la correlación estratigráfica de pozos, la cual permite identificar la secuencias estratigráficas de interés, que a su vez están asociadas a contrastes de impedancias acústicas importantes (cambios de velocidades y densidades) que se identifican en las secciones sísmicas como reflectores continuos y con buena amplitud; éstos son denominados reflectores de interés (horizontes). Dichos horizontes serán interpretados a lo largo de todas las líneas 2D o el cubo 3D según sea el caso, a fin de obtener como resultado final distintos mapas estructurales en tiempo y en profundidad. (Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M., 2009).

Interpretación sísmica estratigráfica

La interpretación sísmica no sólo está enfocada en la determinación del modelo geológico estructural de la cuenca sedimentaria, sino también puede ser dirigida o complementada por una interpretación de menor escala y de mayor detalle que abarca el ámbito estratigráfico, con el fin de generar el análisis del comportamiento, configuración geométrica, disposición y características de los reflectores asociando a un ambiente de depositación de sedimentos.

Asimismo, la interpretación estructural es complementada, refinada y realizada por las interpretaciones estratigráficas, mayormente conocida como sismo-estratigrafía o estratigrafía secuencial (Figura 3.2).

Los fundamentos básicos que gobierna la interpretación estratigráfica están sujetos a tres procesos principales como lo son: cambios en el nivel eustático del mar, ya sea a escala global o local, la tasa de aporte sedimentario y eventos tectónicos de subsidencia o levantamiento.

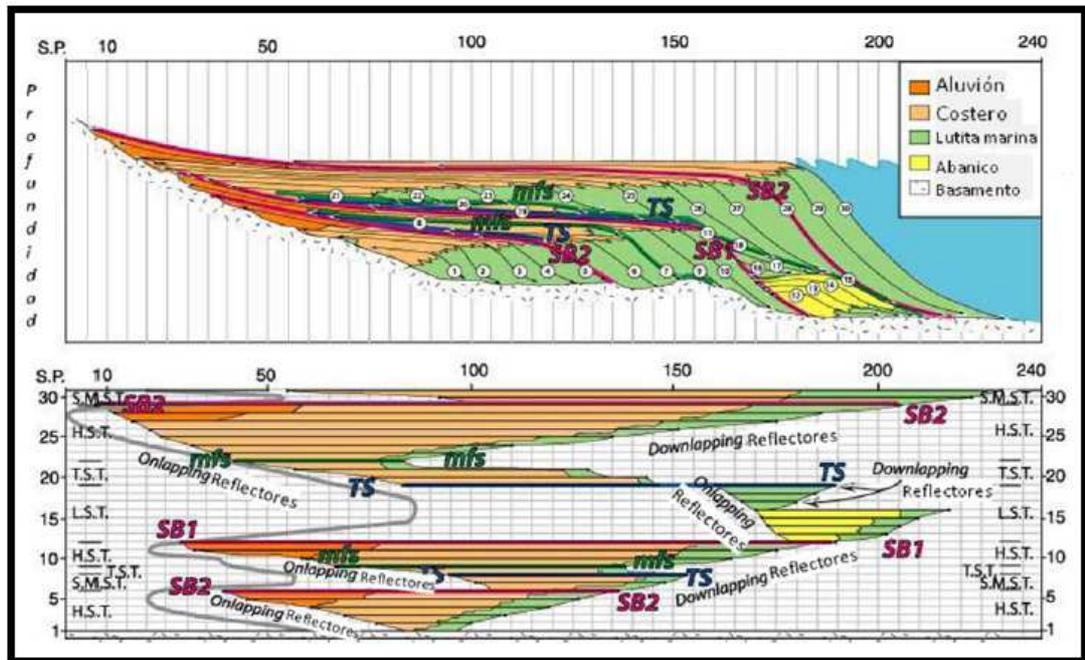


Figura 3. 3. Sección de una secuencia estratigráfica general. Se pueden apreciar las áreas crono-espaciales en forma gráfica de las superficies estratigráficas mencionadas en la teoría. Unidades individuales de estratos del 1 al 28 son seguidos por las superficies de estratificación siguientes, y se asume conformidad donde sucesivos estratos están presente. Donde las unidades de estratos se pierden, los hiatos son evidentes. (Tomado de Mitchum y Sangree, 1998).

3.2.2 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 Mitchum (1977) y Bally (1987).

3.2.3 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 Mitchum (1977) y Bally (1987).

Sismograma sintético

Son el resultado de una de las formas de modelado que predice la respuesta sísmica de la Tierra. Una definición más específica empleada por intérpretes sísmicos es que, un sismograma sintético, es un modelo directo unidimensional de la energía acústica que viaja a través del interior de la Tierra. Los sintéticos se generan a través de la convolución de la serie de reflectividad (que se obtiene a partir de registros de densidad y acústico), con la ondícula derivada de la data sísmica.

Según Liner (2004), el propósito de la simulación 1D es crear una traza sísmica de offset cero, que teóricamente haya sido grabada en la posición del pozo, basada en los registros grabados en el mismo. Dicha traza es el sismograma sintético. Las asunciones que implica un sismograma sintético son:

- ✓ La fuente y el receptor coinciden con la localización del pozo.
- ✓ El buzamiento geológico es cero.
- ✓ El hoyo del pozo es vertical.
- ✓ Las lecturas de velocidad, densidad y profundidad en el registro son precisas.
- ✓ El campo de velocidad solo varía con la profundidad.

De las asunciones anteriores la más difícil de concebir en muchas circunstancias es la del buzamiento geológico igual a cero, debido a que la estructura en el subsuelo normalmente

no es despreciable. Sin embargo, se aplica la metodología convencional que será descrita más adelante para calcular la traza sintética, pasando por alto la Ley de Snell, la cual, explica que los rayos que viajan hacia el subsuelo se reflejan con el ángulo de incidencia respecto a la normal de la superficie, por lo que si la interface buza, el rayo se alejará de la vertical del pozo. Esto significa que los tiempos de viaje vertical del sintético no son tiempos de tránsito físicos, sin embargo, si los datos de campo correspondientes a la localización del pozo han sido adecuadamente migrados, representaran tiempos de viaje verticales que pueden ser amarrados al sintético (Liner, 2004).

Si se comparan efectivamente los marcadores de los topes en el pozo con las reflexiones en la sección sísmica, se puede dar pie a la interpretación. El buen acoplamiento de un sismograma sintético depende de la calidad de los registros de pozo y del procesamiento de la data sísmica, así como de la habilidad de extraer ondículas representativas de la sísmica. El registro acústico es generalmente calibrado con tiros de verificación (“*Checkshots*”) o con información de las primeras llegadas de perfiles sísmicos verticales (VSP), y luego es combinado con el registro de densidad para generar la impedancia acústica (Figura 3.4).

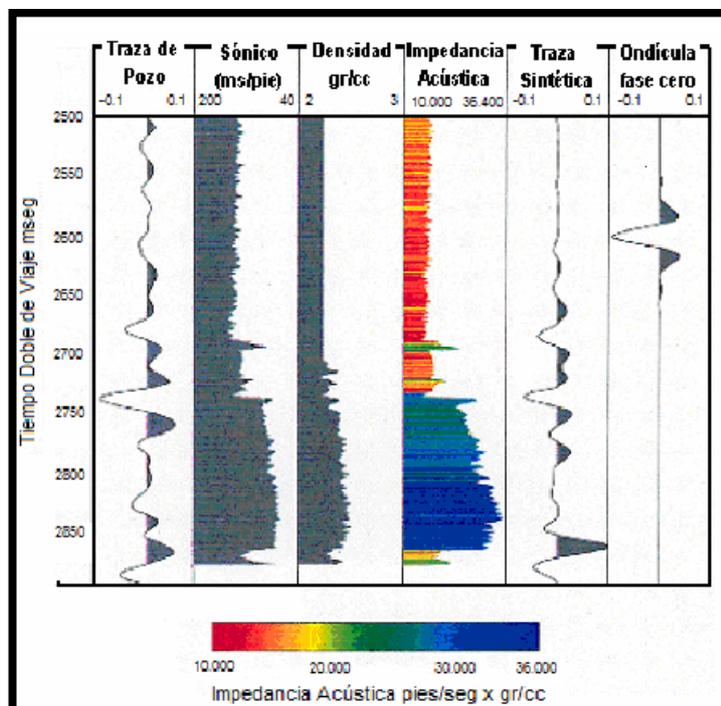


Figura 3. 4. Generación de un sismograma sintético. (Modificado de Schlumberger Oilfield Glossary).

Ecuación de Gardner

Esta es la ecuación utilizada para convertir registros de densidad en registros pseudo-sónicos de origen densico (Ecuación 1).

$$\rho = aV^{(1/4)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

ρ = Densidad g/cc.

V = Velocidad intervállica.

a = Constante que depende de la unidad de velocidad intervállica, para m/s es 0,31 y para pies/s es 0,23.

b = Depende de la litología, porosidad y fluidos presentes en la roca.

Resolución vertical

La resolución vertical de un registro sísmico puede definirse como la menor distancia vertical (espesor) entre dos interfaces litológicas que produce dos reflexiones discretas, las cuales pueden separarse visualmente (Regueiro, 2007).

Para ejemplificar el modelo de resolución sísmica vertical podemos utilizar la figura 3.5, en el eje Y se muestra delta T que es el tiempo de tránsito de la onda que aporta la información sobre espesores de los estratos. En el eje X se muestra el parámetro espesor, el cual es lineal, refiriéndose al ancho de los estratos. Esta figura representa la capacidad que tiene la onda de representar espesores mayores al espesor límite de resolución. Esta capacidad tiene una cota llamada límite de resolución. Por otro lado al analizar un gráfico de amplitud de reflexión vs. espesor, la relación de amplitud respecto al cambio de espesor es constante para espesores mayores al espesor límite de resolución; por debajo de este límite, el comportamiento es decreciente y lineal hasta llegar a cero, el valor máximo de amplitud se corresponde al del espesor límite (Regueiro, 2007).

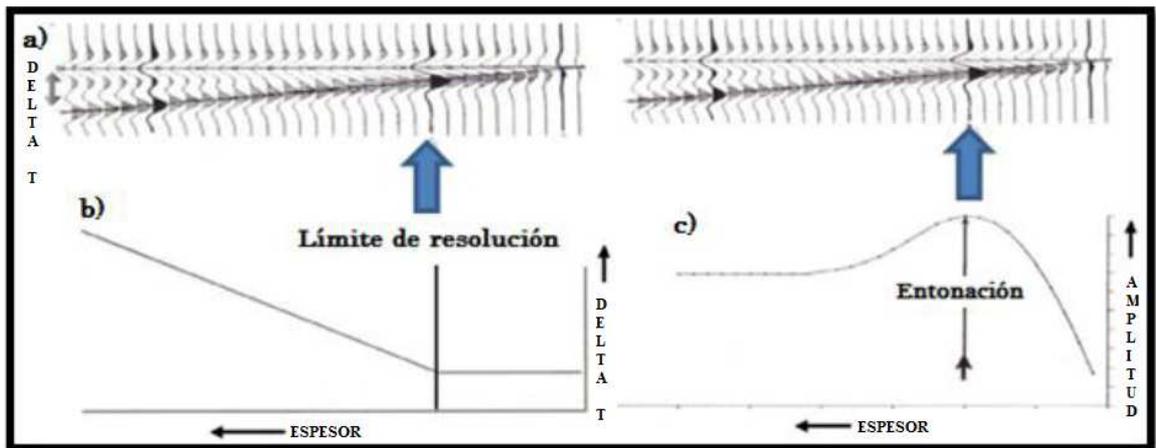


Figura 3. 5. Modelo de cuña que explica la resolución sísmica vertical y el efecto de entonación en capas delgadas. a) Sismograma sintético de un modelo de capa que se acuña; b) Sensibilidad de delta T vs. espesor; y c) de la amplitud vs. espesor, para el modelo de cuña presentado. (Modificado de Regueiro, 2007).

El límite de resolución depende del parámetro $\lambda/4$ que expresa cuantitativamente el mínimo espesor que la sísmica puede resolver (Ecuación 2). A su vez, la resolución sísmica vertical está relacionada con los parámetros fundamentales del modelo convolucional: la velocidad de propagación en el material (componente geológico) y con el contenido de frecuencia o ancho de banda de la ondícula (componente sísmico) (Regueiro, 2007).

$$\text{Resolución vertical} = \text{Velocidad Interválica} / (\text{Frecuencia dominante} * 4) \quad \text{Ecuación 2}$$

3.3 ATRIBUTOS SÍSMICOS

Un atributo sísmico es cualquier medida de datos sísmicos que puede ayudar a mejorar o cuantificar visualmente caracteres o formas de interés interpretativo. Además nos proporciona información en relación a las características de las ondas (amplitud, frecuencia, tiempo de transito, atenuación que detectan los geófonos al interactuar con el subsuelo). Los atributos son generalmente utilizados para la caracterización de yacimientos, específicamente en la estimación de propiedades y en la discriminación de litologías y contenido de fluidos. La principal utilidad consiste en correlacionar la información geológica y petrofísica analizada en un pozo con la brindada por los atributos y así darle seguimiento de estos eventos a anomalías en todo el campo; entonces pudiera servir de

ayuda al intérprete para delinear fallas, determinar presencia de hidrocarburos, estimar espesor de estratos, etc (Sheriff, 2001).

Generalmente, los atributos sísmicos son representados en tiempo más que en profundidad. Esto es debido a que la precisión en la ubicación de los reflectores es mayor, puesto que no se emplean conversiones que pudieran arrastrar errores, lo cual implica mayor exactitud en los resultados provenientes de la interpretación (Sheriff, 2001).

3.3.1 Clasificación de los atributos sísmicos

Según sus características computacionales y datos de entrada, existen atributos con datos pre-apilados y aquellos derivados de datos post-apilamiento, estos últimos migrados o no en tiempo. Por lo general, los atributos post-apilamiento son los mejores para observar grandes cantidades de datos sísmicos en la investigación inicial, al momento de enfocarse en un objetivo se puede proceder a usar datos pre-apilados (Taner, 2000).

Según el contenido de información y tipo de proceso (Taner, 2000), los atributos se clasifican en:

Atributos instantáneos: Realiza un cálculo muestra por muestra, representando variaciones instantáneas de varios parámetros. Se pueden determinar a través de trazas complejas.

Atributos de ondículas: son atributos instantáneos que calculan el pico de la envolvente de la traza, tiene relación directa con la Transformada de Fourier de la ondícula en la venticidad del pico de la envolvente. Entre estos se mencionan también los atributos interválicos, multitrazas y acimutales.

Según su relación con la geología (Taner, 2000), los atributos se clasifican en:

Atributos Físicos: son los relacionados con cualidades y cantidades físicas. La magnitud de la traza envolvente es proporcional al contraste de impedancia acústica, frecuencias relacionadas con el espesor de capas, dispersión y absorción de ondas. Las velocidades instantáneas y promedios están relacionadas directamente con las propiedades de rocas. Estos atributos se usan para la clasificación litológica y caracterización de yacimientos.

Atributos geométricos: son los que describen la relación espacial y temporal de cualquier otro atributo. Estos atributos contribuyen a definir las características del evento y sus relaciones espaciales, cuantificar estructuras que ayuden al reconocimiento de patrones depositacionales, y litologías asociadas.

Según otros tipos (Taner, 2000), los atributos se clasifican en:

Atributos reflectivos: son los correspondientes a las características de las interfaces. Todos los atributos instantáneos y de ondícula se pueden incluir en esta categoría. Atributos pre-apilamiento, como AVO también se incluyen, ya que estudian la reflectividad de una interface en función del ángulo.

Atributos transmisivos: se relacionan con las características de una capa entre dos interfaces. Dentro de esta categoría se encuentran, velocidades interválicas, RMS y promedio, absorción y dispersión.

Los atributos que se aplicaran en el siguiente trabajo serán los siguientes:

3.3.2 Descomposición espectral

En la exploración sísmica, la descomposición espectral se refiere a cualquier método que produce un análisis continuo tiempo-frecuencia de la traza sísmica (Castagna y Shengjie, 2006). De forma más específica es un método que descompone la señal sísmica en sus componentes de frecuencia constituyentes (Hall y Trouillot, 2004). Este análisis se ha aplicado, entre otros, para la determinación de espesor de capas, visualización estratigráfica o determinación directa de hidrocarburos. Las trazas sísmicas individuales en el dominio del tiempo se transforman en sus componentes de amplitud y fase en el dominio de la frecuencia.

La importancia que cobra el uso de la descomposición espectral en la interpretación sísmica, radica en que las reflexiones sísmicas asociadas a capas geológicas tienen características específicas en sus espectros de amplitud y fase que permite una mejor visualización de rasgos estratigráficos y estructurales del área en estudio (Marfurt y Chopra, 2007).

Además la descomposición espectral es un método de análisis de data sísmica que se basa en los conceptos de Fourier de que una función repetida puede construirse a través de la suma de un número infinito de ondículas de mono-frecuencias, cada una con sus propios valores de amplitud y fase (Figura 3.6). Para un intérprete sísmico, este método es un filtro de la data con una serie de ondículas de mono-frecuencia las cuales cubren el espectro usable útil de la data sísmica. Los resultados se presentan como secciones de horizontes, tiempo y estratos a través de superficies sísmicas en tres dimensiones (Marfurt y Blumentritt, 2007).

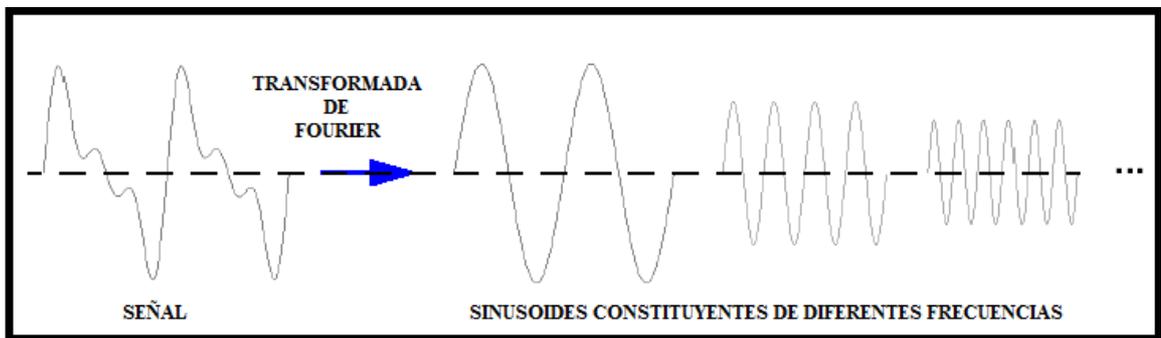


Figura 3. 6. Descomposición de una señal en ondas de la transformada de Fourier

Transformada de la ondícula continua (Morlet)

Los métodos basados en la “ondícula” es un tipo especial de transformada de Fourier que representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita (denominada óndula madre). La efectividad de este método depende fuertemente de la ondícula seleccionada como base (Figura 3.7). Entre estos métodos se podrían mencionar la transformada continua de ondículas, la cual escala la ondícula base y luego la convolusiona con una señal a través de una ventana de diferentes dimensiones; la transformada discreta de ondículas que se caracteriza por usar dos ventanas, una de altas y otra de bajas frecuencias que permiten alcanzar niveles deseados de descomposición a través de un proceso cíclico entre las dos ventanas; y la descomposición por búsqueda por ajuste, mejora la limitada resolución temporal y mantiene la alta precisión de los métodos de su tipo por medio de la búsqueda del mejor ajuste entre la composición lineal de ondículas básicas de un diccionario y la señal (Marfurt y Chopra, 2007).

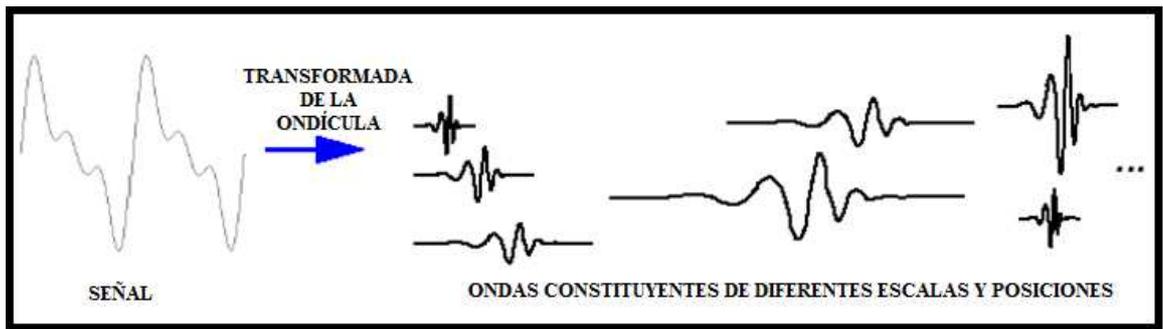


Figura 3. 7. Descomposición de una señal en ondas de la transformada de la ondícula (Morlet).

La función ventana $w(t)$, que por lo general es usada para este método de descomposición es una típica Gaussiana de la forma (Ecuación 3):

$$w(k\Delta t) \equiv w_k = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \exp \left[\frac{-(k\Delta t)^2}{2\sigma^2} \right]; \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde σ define la anchura de la ondícula. Para el caso de la transformada de ondícula de Morlet, $\sigma = 1/f_c$, donde f_c es la frecuencia central a ser analizada (Mafurt y Chopra, 2007).

Para frecuencias altas, estas ondículas tienen una ventana corta en tiempo, sin embargo el espectro de frecuencia es mucho más ancho, es decir hay más contribución de amplitud a otras frecuencias.

Este método puede ser utilizado con potencialidad para detectar sombras causadas por hidrocarburos y para identificar estructuras estratigráficas sutiles para la caracterización de yacimientos (Sinha et al., 2005).

3.3.3 Coherencia

La coherencia es una medida de similitud entre las formas de ondas o trazas. Una onda sísmica es el resultado de la convolución de una ondícula sísmica con la geología del subsuelo. Esta respuesta cambia en términos de amplitud, frecuencia y fase dependiendo de los contrastes de impedancia acústica y el espesor de las capas sobre y debajo de un límite reflectivo. El atributo de coherencia mide estos cambios entre trazas vecinas de forma tal que determina que tan coherente o no es un evento (Figura 3.8). Geológicamente, alta coherencia sísmica de las ondas indica continuidad lateral de litologías, por otra parte

cambios abruptos en la forma de onda pueden indicar fallas o fracturas en los sedimentos (Marfurt y Chopra, 2007).

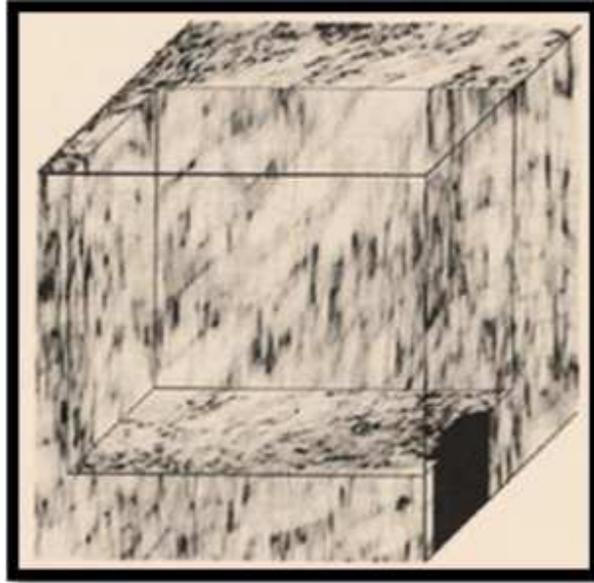


Figura 3. 8. Cubo de coherencia. (Tomado de Marfurt y Chopra 2007).

3.3.4 Similitud

Cuando se desea interpretar fallas y rasgos estructurales a partir de un cubo sísmico 3D se tiende a trabajar más a lo largo de cortes en tiempo o “*time slices*” que a lo largo de las secciones verticales sísmicas. Esto se debe a que en los primeros resulta más fácil la detección de aquellos rasgos estructurales y estratigráficos, así como también porque permite tener idea respecto a la extensión y geometría de cualquiera de estos rasgos (Bahorich y Farmer, 1995).

El cálculo de similitud de un cubo 3D está basado en que cada punto de interés, se realizan correlaciones con cada una de las trazas que tiene inmediatamente vecinas. De esta forma el coeficiente de similitud en un punto sería el promedio de cada uno de los coeficientes obtenidos para todas las correlaciones de la trazas con sus vecinas (Bahorich y Farmer, 1995).

Ahora bien, si se considera una pequeña región de trazas sísmicas que es cortada por una superficie de falla, es de esperar que las características de la señal difieran entre trazas

vecinas de dicha región; por tal razón, los valores de los coeficientes de similitud tienden a cero. Si por lo contrario se considera una región bastante homogénea sin ningún rasgo estructural, es de esperar una mayor similitud. A partir de estas consideraciones el atributo de similitud resulta una muy buena herramienta para la detección de cualquier discontinuidad (Bahorich y Farmer, 1995).

3.3.5 Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert es útil en el cálculo de los atributos instantáneos en una serie de tiempo, sobre todo la amplitud y frecuencia. La amplitud instantánea es la amplitud de la transformada de Hilbert compleja, la frecuencia instantánea es la velocidad de variación del ángulo de fase instantánea. Para una senoide pura, la amplitud y la frecuencia instantánea son constantes. La fase instantánea; sin embargo, es un diente de sierra, lo que refleja la forma en que el ángulo de fase local varía linealmente en un solo ciclo (Claerbout, 1976).

La interpretación geológica de datos sísmicos se hace comúnmente mediante el análisis de los patrones de la amplitud sísmica, fase y frecuencia en el mapa y de la vista de las secciones en el área a prospectar. Aunque muchos atributos sísmicos se han utilizado para enfatizar los objetivos geológicos y definir la roca crítica y las propiedades del fluido, estos tres simples atributos de amplitud, fase y frecuencia siguen siendo el pilar de la interpretación geológica de los datos sísmicos. Cualquier procedimiento que extrae y muestra alguno de estos parámetros sísmicos de una manera conveniente y comprensible es una herramienta de interpretación muy valiosa.

Fase Instantánea (“Instantaneous Phase”)

La fase instantánea es definida como la fase de la traza compleja; describe el ángulo entre la traza y su transformada de Hilbert para un tiempo dado. La ecuación 4 se presenta el cálculo de la fase instantánea:

$$Ph(x, t) = \arctan\left[\frac{g(x, t)}{f(x, t)}\right]$$

Ecuación 4

La fase instantánea es una medida de la continuidad de eventos en una sección sísmica, ya que es independiente de la amplitud instantánea. Su valor es siempre un número entre -180° y $+180^\circ$. La tasa temporal de cambio de la fase instantánea es la frecuencia instantánea (Figura 3.9).

Los principales usos de la fase instantánea en la interpretación son:

- Mejor indicador de continuidad lateral.
- Como la fase es independiente de la amplitud instantánea, detalla la continuidad de eventos, haciendo más visibles los eventos débiles.
- Puede detectar y calibrar efectos de entonamiento de capa delgada.
- Como no tiene información de la amplitud, todos los eventos son representados.
- Muestran rasgos depositacionales tales como acuñaientos (“*pinchouts*”), discordancias angulares, canales, abanicos, geometría depositacional interna, zonas de engrosamiento y adelgazamiento, “*onlap*”, límites de secuencia, difracciones, y la interferencia de eventos con diferentes características de buzamiento.

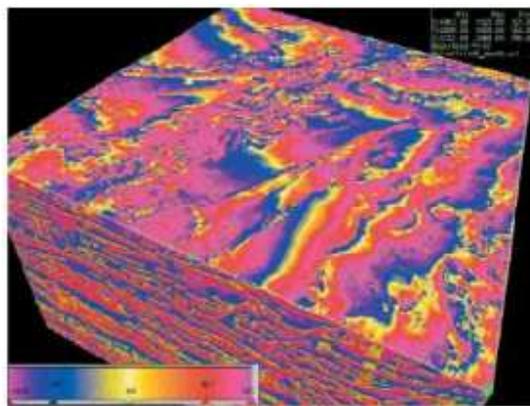


Figura 3. 9. Atributo de fase instantánea.

Frecuencia Instantánea (“Instantaneous Frequency”)

Puede proveer información acerca de la frecuencia característica de los eventos, efectos de absorción, fracturamiento y espesores depositacionales. La superposición de reflexiones individuales puede llegar a producir un modelo de frecuencia que caracteriza a la reflexión

compuesta, y su carácter cambiara gradualmente así como la litología o el espesor en la secuencia de estratos. Los acñamientos y bordes de interfaces de fluidos (agua-petróleo), tienden a cambiar de frecuencia instantánea de manera más rápida. Un cambio de frecuencias bajas se observa comúnmente en reflexiones de horizontes con gas, puesto que las acumulaciones de hidrocarburos condensados tienden a atenuar las altas frecuencias.

En la ecuación 5 se presenta el cálculo de la frecuencia instantánea:

$$Freq(x, t) = \frac{\partial [Ph(x, t)]}{\partial(t)}$$

Ecuación 5

Como la función de fase esta multievaluada con saltos de 2π , la frecuencia instantánea es actualmente calculada como la derivada de la función arco tangente (Ecuación 6), lo que evita las discontinuidades de 2π :

$$Freq(x, t) = \frac{\partial \arctan[g(x, t)/f(x, t)]}{\partial(t)} = \frac{[f(x, t).dg/dt - g(x, t).df/dt]}{[f^2(x, t) + g^2(x, t)]}$$

Ecuación 6

La fase instantánea representa a la fase del vector resultante de movimientos armónicos individuales simples. Mientras vectores individuales pueden rotar en sentido horario, el resultante puede en algunos casos formar un patrón de tipo cardioide y aparecer girando en la dirección contraria. Esto es interpretado como el efecto de interferencia de dos ondículas muy próximas. Esto también causa ruido de interferencia en zonas de baja amplitud. Debido a estos cambios, la frecuencia instantánea tendrá magnitudes y fluctuaciones inusuales.

Como la frecuencia instantánea esta influenciada por el espesor de la capa, es el mejor método para observarlas sin mucha interferencia. Esto es logrado al usar diferentes trazas adyacentes para formar una salida consistente. Ha sido mostrado que la frecuencia instantánea calculada como el tiempo derivado de la fase instantánea se refiere el centroide del espectro de potencia de la ondícula sísmica.

Impedancia acústica relativa (“Relative Acoustic Impedance”)

Es calculado por integración continua de la traza sísmica original con la subsecuente aplicación como filtro de corte bajo. Asume que la data sísmica ha sido procesada para tener el mínimo de ruido y de contaminación por múltiples y contiene una ondícula de fase cero. Basados en esto la traza sísmica representa la banda limitada por la serie de reflectividad. Como es un límite de banda la impedancia no tendrá magnitud absoluta y las secciones apiladas serán de la reflectividad del cero offset, por lo tanto es llamado impedancia acústica relativa. El calculo es una simple integración seguida de un filtro paso bajo, sin ninguna inversión exhaustiva. Refleja contraste de propiedades físicas, por lo tanto es un atributo físico utilizado efectivamente en muchos procedimientos de calibración. En base a esta suposición, la traza sísmica representa la serie de banda de reflectividad limitada, que puede expresarse mediante la ecuación 7:

$$f(t) = \frac{1}{2} \Delta \ln(\rho v)$$

Ecuación 7

Donde el logaritmo neperiano de la impedancia acústica (ρv) se cálcula mediante la ecuación 8:

$$\ln(\rho v) = 2 \cdot \int_{t=0}^{t=T} f(T) dt$$

Ecuación 8

Este atributo puede ser utilizado para:

- Mostrar límites de bandas aparentes del contraste de impedancia acústico.
- Se relaciona a la porosidad.
- Altos contrastes indican posibles límites de secuencias.
- Indicar superficies de disconformidades.
- Indicar discontinuidades.

Q Instantáneo (“Instantaneous Q”)

Está basado en la sugerencia de Barnes (1922) de que el factor de calidad de $Q(t)$ instantáneo puede ser definido por la ecuación 7:

$$q(t) = -\pi \cdot \text{freq}(t) / \text{decay}(t)$$

Ecuación 9

Donde decay(t) es la tasa de decaimiento instantáneo. El cual es definido como la derivada de la envolvente instantánea dividida entre la envolvente. Excepto por el factor de decaimiento decay(t) es similar al ancho de banda instantáneo. Este cálculo de Q es la variación de la longitud de onda corta del valor Q; por lo tanto da un valor relativo. Es un atributo transmisivo, similar a las velocidades interválicas e instantánea. También es un atributo físico con una fuerte relación con la porosidad, permeabilidad y fractura.

Este atributo puede ser utilizado para:

- Indicar la variación local del factor Q similar al cálculo de la impedancia acústica relativa para la traza sísmica.
- Indicar contenido de fluido al dividir la presión contra la sección de la onda de corte del factor Q
- Indicar absorción relativa característica de las capas
- Es un atributo transmisivo; sus diversos componentes de longitudes de onda pueden ser estimados en una manera similar a la velocidad promedio y a los procedimientos de inversión de velocidad.

Traza envolvente (“Trace Envelope”)

Este atributo se refiere a la envolvente de la señal sísmica. Tiene una apariencia de baja frecuencia y sólo contiene amplitudes positivas. La envolvente representa la energía instantánea de la señal y es proporcional en su magnitud al coeficiente de reflexión. Este atributo sirve para resaltar discontinuidades, cambios en litología, fallas, cambios en la depositación, efecto de entonación, y límites de secuencias.

La envolvente es un atributo físico que puede ser utilizado para discriminar algunas características como puntos brillantes, posible acumulación de gas, secuencias de contactos, incorfomidades, cambios grandes en litología, cambios laterales indicando fallas, variaciones de porosidad, entre otros.

Representa la energía total instantánea del complejo de trazas independiente de la fase y es calculado como el modulo de trazas complejas:

$$E(t) = \sqrt{[f^2(t) + g^2(t)]}$$

Ecuación 10

Donde t varía aproximadamente entre 0 y la amplitud máxima de las trazas. La envolvente se relaciona directamente al contraste de impedancia acústica. Puede representar la interface de contraste individual o, mejor aún, la respuesta combinada de diferentes interfaces. Depende del ancho de banda de la sísmica.

3.3.6 Atributos geométricos

El análisis de los atributos geométricos es utilizado para aumentar la relevancia estructural y estratigráfica de un yacimiento correlacionando similitudes entre diferentes muestras de trazas sísmicas, también identificando orientaciones de mapas, densidad de fractura, continuidad lateral de reflectores, además es un excelente detector de bordes de estructuras (Strecker, 2004).

Estos atributos son:

Buzamiento instantáneo (“Instantaneous Dip”)

Calcula la derivada espacial de la fase instantánea de las direcciones del “*inline*” y el “*crossline*”, otorgando dos componentes de la fase actual del vector de buzamiento: su máxima dirección de buzamiento y su azimut. La longitud de este vector da la máxima fase de buzamiento. El buzamiento es calculado fase por fase. Este cálculo es válido para buzamientos por encima de 180 grados de diferencia de fase (exclusivamente). Buzamientos actuales más allá de eso producirán un resultado con “*aliasing*”; y por lo tanto serán errados. En esos casos el escaneo del buzamiento con un gran número de trazas se vuelve necesario. Como nota, cuando secciones migradas en tiempo son usadas, es altamente recomendado que el espaciado de las trazas de la imagen sean diseñados para eliminar cualquier caso de problemas de “*aliasing*”.

Varianza de similitud (“Similarity Variance”)

Representa la diferencia entre una similitud suavizada y su valor local, lo que es equivalente a un filtrado paso alto de similitud.

Este atributo puede ser utilizado para:

- Indicar anomalías locales con respecto a un fondo promedio suavizado.

3.4 AMENAZA GEOLÓGICA

Entre los procesos a considerar como amenazas geológicas en el medio marino, pueden destacarse la inestabilidad en el sedimento originada por carga sedimentaria, tormentas, olas, terremotos o accidentes tectónicos; procesos erosivos debidos a corrientes, y la existencia de sedimentos de baja capacidad portante y que en ocasiones pueden contener gas (Ayala, 1987).

A partir de la sísmica de reflexión, pueden identificarse determinadas características del fondo que sugieren condiciones de inestabilidad: presencia de topografía irregular posiblemente debida a deslizamientos superficiales, desplazamientos en el fondo debidos a fallas, diapiros (domo o pliegue anticlinal cuyas rocas suprayacentes han sido deformados por la intrusión en los mismos de un material menos denso y de consistencia plástica) y delimitación de áreas donde existan importantes acumulaciones de gas próximas a la superficie (Ayala, 1987).

Bennet. W (1994), propone una lista que clasifica las posibles amenazas geológicas que pudieran encontrarse al momento de realizar perforaciones costa afuera utilizando plataformas de perforación de tipo “*Jack up*”, basado en experiencias previas en las que plataformas de este tipo han fallado y se ha estudiado su causa, además sugiere el método de investigación necesario para estudiar la presencia de amenazas geológicas. Dicha clasificación se presenta a continuación en la tabla 3.1:

Tabla 3. 1. Posibles amenazas para plataforma tipo “*Jack-up*” y método de investigación para su evaluación. (Tomada de “*Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-Up Units*” de la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos en su boletín técnico 5-5ª, 2002).

Amenaza	Método de evaluación
Problemas de instalación	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio batimétrico.
Falla por Punzonamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de sísmica somero. • Toma de muestras del suelo y otros análisis geotécnicos.
Falla de fundaciones por cargas excepcionales de tormentas	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de sísmica somero. • Toma de muestras de suelo y otros análisis geotécnicos.
Falla por deslizamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de sísmica somero • Toma de muestras de suelo y otros análisis geotécnicos.
Socavación del fondo marino	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio batimétrico. • Toma de muestras de la superficie del fondo marino y mediciones de corrientes a este nivel.
Inestabilidad del fondo marino (“<i>mudslides</i>”, “<i>seabed slides</i>”)	<ul style="list-style-type: none"> • Sonar de barrido lateral y estudio de sísmica somero. • Toma de muestras del suelo y otros análisis geotécnicos.
Acumulaciones de gas someras	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de sísmica multicanal con análisis de atributos.
Fallas geológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de sísmica somero. • Estudio de sísmica multicanal.
Objetos sumergidos (tuberías, barcos hundidos, escombros)	<ul style="list-style-type: none"> • Sonar de barrido lateral. • Inspección realizada por buzos.
Depresiones locales, arrecifes, rocas	<ul style="list-style-type: none"> • Sonar de barrido lateral. • Inspección realizada por buzos.
Bases atrapadas en lodo	<ul style="list-style-type: none"> • Datos geotécnicos.
Huellas dejadas por otros Jack-up (“<i>foot prints</i>”)	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar actividades previas en la zona.

La figura 3.10 muestra un gráfico estadístico de las causas que han producido fallas en las instalaciones de “*Jack up*” estudiadas por Dier, A., Carrol, B. y Abolfathi, S., (2004).

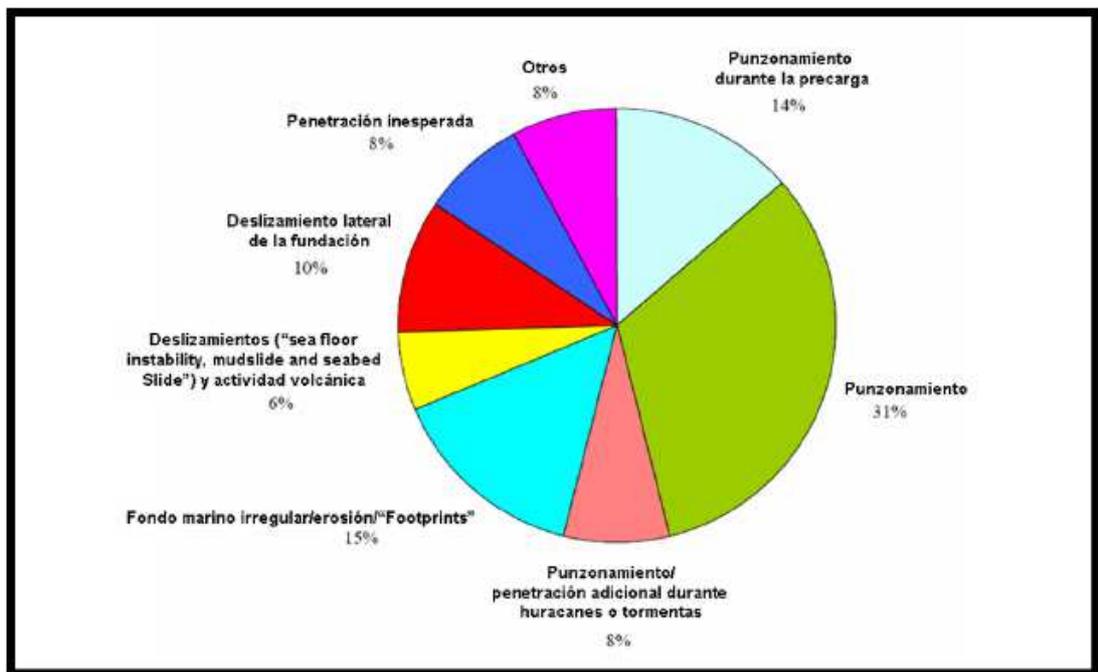


Figura 3. 10. Gráfico estadístico de fallas en plataformas tipo “Jack-up”. (Tomado de Dier, A., Carrol, B. y Abolfathi, S., 2004).

En el gráfico de la figura se advierte que la falla por punzonamiento es la más frecuente y constituye alrededor del 53% de los casos. A continuación se describe en que consiste este tipo de falla además de algunos de los más comunes y más importantes según Dier, A., Carrol, B. y Abolfathi, S., (2004):

3.4.1 Falla por punzonamiento

Después del asentamiento inicial de las bases de la plataforma en el lecho marino y la precarga de éstas, a menos que se trate de arcilla muy dura o arena, el “spudcan” (Figura 3.11) penetrará la superficie del suelo. Esta penetración seguirá mientras que la operación de precarga continúe hasta alcanzar el equilibrio entre capacidad de suelo y la carga impuesta.

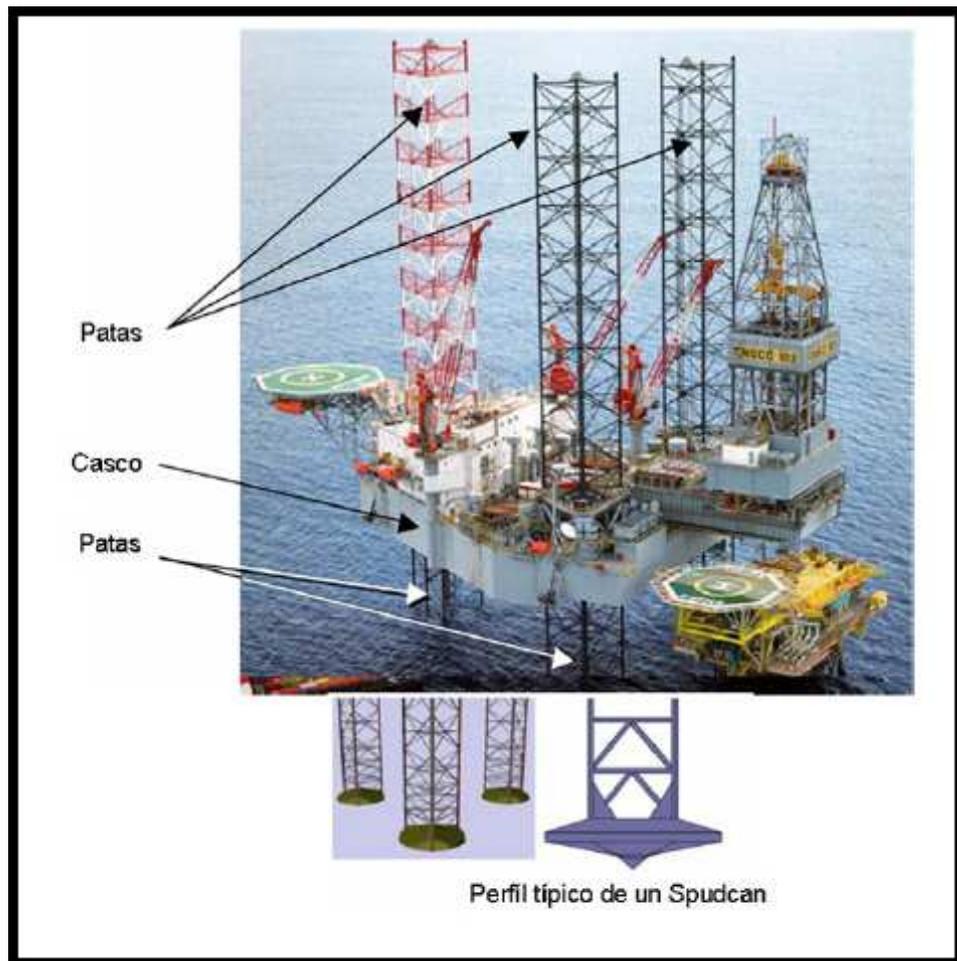


Figura 3. 11. Partes más importantes de una plataforma auto elevadiza tipo “Jack up” y visualización del “spudcan”. (Tomado de Diego Moreno, 2010).

Por lo general las profundidades de penetración depende del material encontrado en el fondo y subfondo marino, para suelos arenosos la penetración es baja, pero en las arcillas blandas, tales como las del delta del Mississippi, la profundidad de penetración se han registrado hasta 55 m. En condiciones normales se esperaría que la resistencia del suelo aumente con la profundidad, permitiendo que las bases de las plataformas autoelevadizas (“jack-up”) se estabilicen; sin embargo, existen casos donde se encuentran estratos de alta resistencia relativa que suprayacen estratos menos resistentes, esto genera que el perfil de capacidad de carga del suelo presente una zona de inestabilidad en donde se genera la falla por punzonamiento.

La falla por punzonamiento se genera cuando el perfil de capacidad de carga tiene un incremento puntual como consecuencia de un estrato de mayor resistencia relativa que sea subyacente por suelos de menor resistencia. La figura 3.12, muestra a la izquierda dos perfiles de capacidad de carga que ejemplifican los casos en los que podría ocurrir esta falla (línea continua y línea punteada), y a la derecha muestra un ejemplo de falla por punzonamiento en un caso en el que la carga aumentó producto de una tormenta, donde V_p representa la carga a la cual el “*spudcan*” se estabilizó y V_s la carga adicional producida por la tormenta provocando un aumento considerable en la profundidad de la plataforma autoelevadiza. La figura 3.13 muestra una fotografía de una plataforma luego de la ocurrencia de falla por punzonamiento.

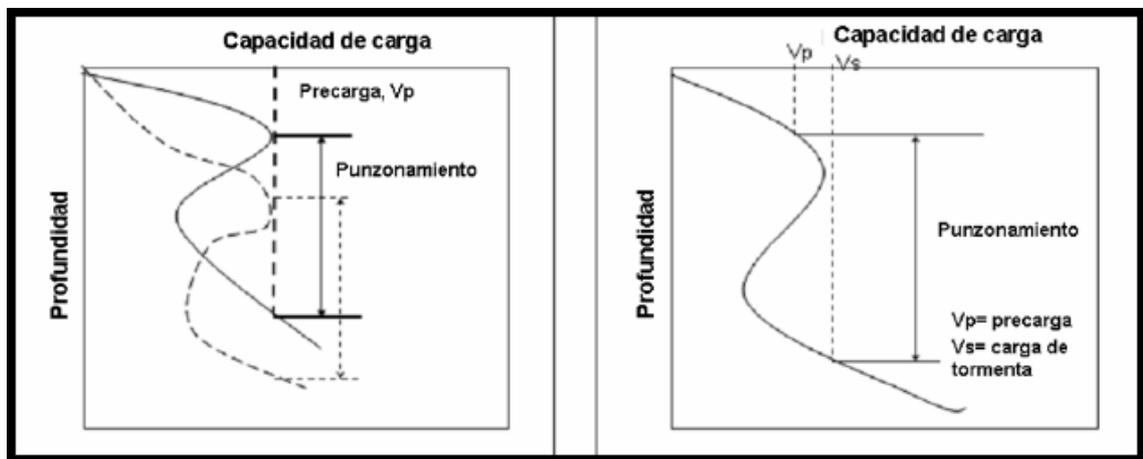


Figura 3. 12. Gráficos de capacidad de carga vs. Profundidad que presentan potencial de falla por punzonamiento. (Tomado de Dier, A., Carrol, B. y Abolfathi, S., 2004).

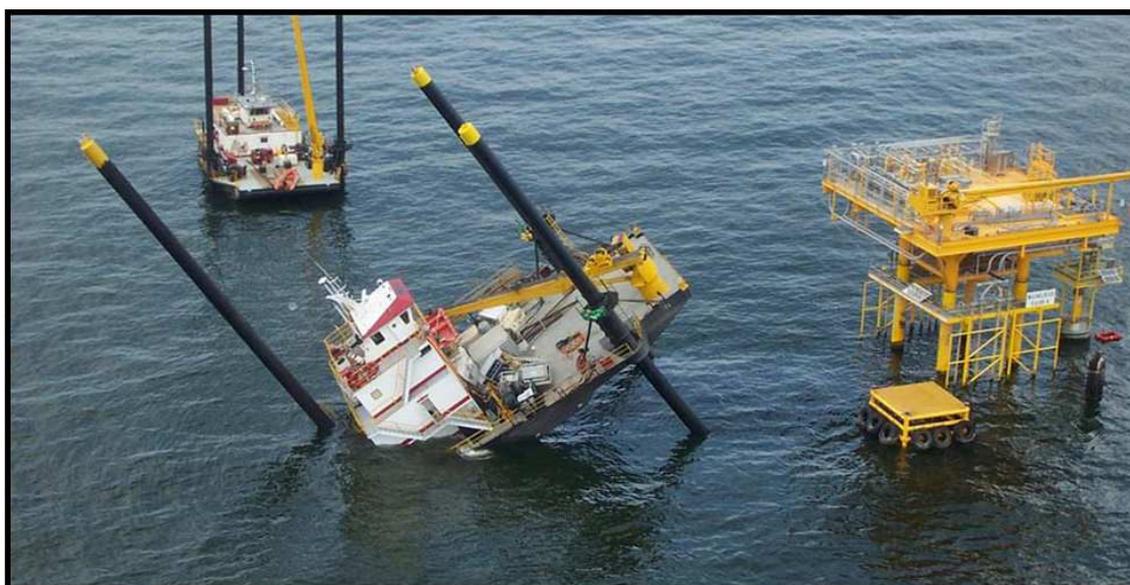


Figura 3. 13. Daños generados a una plataforma tipo “Jack-up” como consecuencia del desnivel abrupto causado por una falla por punzonamiento. (Tomado de Ocean travellers, hydrographyc center, s/f).

3.4.2 Falla por deslizamiento

Los “spudcan” podrían moverse horizontalmente en caso de no existir suficiente resistencia lateral cuando la carga en esta dirección aumenta, normalmente por causas ambientales. Este deslizamiento podría resultar en la falla por completo de la plataforma ya que la carga es redistribuida sobre otras bases que se sobrecargan y son empujadas a mayores profundidades bajo esfuerzos combinados. Estas fallas suelen ocurrir principalmente sobre fondos arenosos donde la penetración del “spudcan” es mínima. En las arcillas, la penetración es mayor por lo que es improbable que ocurran este tipo de fallas. También es conveniente destacar que esto puede ocurrir durante la instalación sobre todo si se encuentra “foot-prints” de plataformas previas.

3.4.3 Socavación del fondo marino

Se trata de la remoción de los sedimentos del fondo marino por corrientes y oleaje. Esto puede ocurrir por procesos geológicos naturales o puede ser causado por componentes de las estructuras que interrumpen el régimen natural de las corrientes por encima del fondo marino, ocasionando la disminución de la capacidad portante del suelo y aumentando el riesgo de punzonamiento.

3.4.4 Inestabilidad del fondo marino (“*mudslides, seabed slides*”)

Esto puede ser causado por diversos factores que interactúan o actúan independientemente. Las fallas más comunes son movimientos de masa a gran escala conocidos como “*mudslides*” y “*seafloor failure*” que son desplazamientos de tierra a nivel del fondo y subfondo marino a través de planos de debilidad, y pueden provocar esfuerzos verticales y horizontales significativos sobre las bases del “*jack-up*” así como reducir la capacidad portante del suelo.

Estos fenómenos suelen ser causados por presión de oleaje, que en casos de ser significativa en niveles cercanos al fondo marino lo hace susceptible incluso en pendientes suaves. También terremotos pueden inducir este tipo de fallas en pendientes que, bajo condiciones normales son estables. Otras causas podrían ser el propio peso del suelo, hidratos, acumulaciones de gas somero, fallas geológicas entre otros procesos geológicos.

3.4.5 Huellas dejadas por otros “*Jack Up*” (“*foot prints*”)

La zona donde se desea fundar la estructura puede haber estado ocupada por otra estructura similar, dejando depresiones cuyas dimensiones y profundidad van a depender de la penetración que hayan tenido las bases de esa estructura y el tipo de “*spudcan*” que hayan utilizado.

El suelo perturbado por la estructura previa podría ocasionar la penetración diferencial de cada una de las bases del “*Jack-up*”, además la cercanía de estas depresiones a las bases podrían causar el deslizamiento de las mismas hacia las depresiones, causando daños severos la estructura.

3.4.6 Acumulaciones de gas someras

Generalmente están formadas de gas biogénico o petrogénico en el agua intersticial de los suelos poco profundos. In situ, el gas podría ser gaseoso o enlazados con agua para formar un sólido, conocido como hidrato (dependiendo de las condiciones presión y temperatura).

Estas acumulaciones de gas podrían provocar comportamientos impredecibles en las fundaciones debido a depresiones en el fondo marino provocadas por acumulaciones debajo

del “*spundcan*”, por otro lado reducen la capacidad de carga del suelo y representan una amenaza para los estudios geotécnicos y perforaciones someras que podrían resultar en explosiones. Además, la migración hacia la superficie de estos gases durante la perforación a través de las paredes del hoyo podría causar licuefacción del suelo con resultados catastróficos.

3.4.7 Objetos sumergidos

Existen una gran variedad de objetos que podrían conseguirse en el fondo marino y que podrían interferir con la ubicación de la plataforma, entre ellos podemos nombrar: tuberías, naufragios, anclas, cables, objetos arrojados (de plataformas adyacentes por ejemplo), artillería y rocas transportadas por glaciares.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

A continuación se explicará la metodología de trabajo necesaria para alcanzar cada uno de los objetivos específicos planteados en el presente trabajo de investigación.

4.1 BASE DE DATOS

El levantamiento del área de estudio comprende una superficie costa fuera de Venezuela de 610.22 km², dentro del cual, es objetivo para la ejecución de este trabajo, un subvolumen sísmico de 50 km². El levantamiento se diseñó con 102 líneas de navegación, con un promedio de longitud de línea de 22.424 km y tamaño de bin de 25 metros x 6.25 metros, (luego, para la migración pre-apilado y post apilado en tiempo, se cambio a 25 metros x 12.5 metros) con orientación 80° / 260° (Figura 4.1) (Tricon Geophysics Venezuela C.A., 2008).

En cuanto al procesamiento de estos datos sísmicos, se realizó primeramente una conversión a fase cero utilizando la ondícula registrada, así mismo, fueron aplicados filtros atenuadores de ruido aleatorio (DSWELL) y filtros SRME para atenuación de múltiples. Cabe destacar, que para este procesamiento, el objetivo estaba enfocado en obtener una imagen sísmica en tiempo adecuada para realizar una interpretación estructural y estratigráfica geológicamente coherente, en una ventana de tiempo sísmico comprendida entre 1,5 y 3,7 segundos. Por tanto, la secuencia de procesamiento aplicada pudo haber afectado la calidad del dato fuera del rango de tiempo antes mencionado (Tricon Geophysics Venezuela C.A., 2008).

Por otro lado, en el área se observa que la morfología del fondo marino es plana y la profundidad promedio registrada por la ecosonda fue 24,64 m, mientras que la pendiente general (tomada perpendicular a la orientación de las líneas batimétricas) es 0,16%. Se reportaron profundidades mínimas de 22,0 m por debajo del nivel medio del mar hacia el sur del área y máximas de 25,8 m por debajo del nivel medio del mar hacia el noreste. En la localización del pozo exploratorio PTUCV_1, la profundidad del fondo marino es de 24,2 m (GEOHIDRA, 2009).

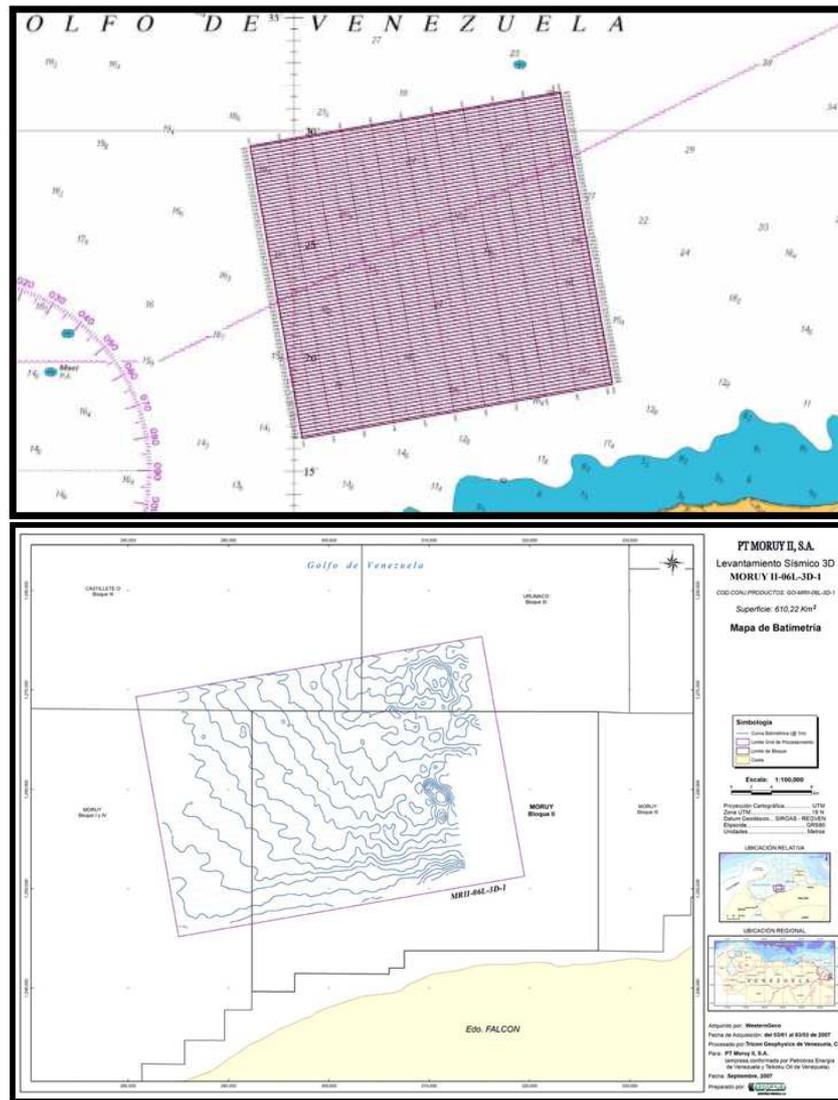


Figura 4. 1. Preplot de inlines y crosslines del proyecto Moruy II en la parte superior y mapa batimétrico en la parte inferior. (Tomado de Tricon Geophysics Venezuela C.A., 2008).

4.2 METODOLOGÍA APLICADA AL ESTUDIO

Para lograr los objetivos propuestos se realizó el trabajo en dos partes. La primera se orientó hacia la interpretación sísmo-estratigráfica, generación de volúmenes y estimación de atributos para mejorar la visualización de rasgos estratigráficos y estructurales del área en estudio; mientras que la segunda parte se concentró en caracterizar la sección somera comparando los datos sísmicos 2D de alta resolución con los datos sísmicos 3D y correlacionando estos datos con el estudio de amenaza geológica convencional. A

continuación se presentará un esquema de la metodología aplicada a este estudio. (Figura 4.2).

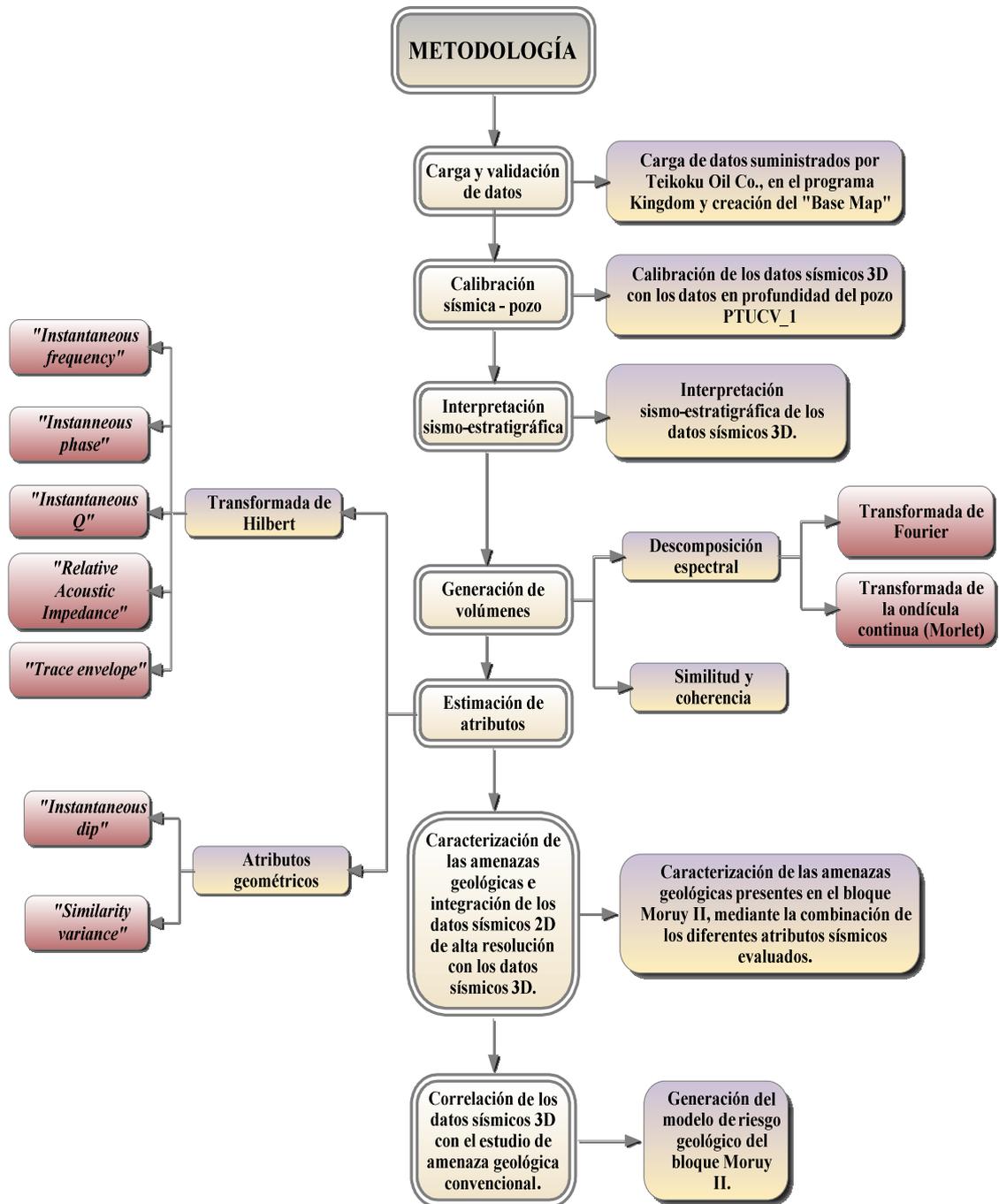


Figura 4. 2. Esquema de metodología aplicada al estudio.

4.2.1 Carga y validación de datos

En esta etapa, se realizó un control de calidad de la siguiente manera:

Visualización de los datos sísmicos 3D y el pozo PTUCV_1

Durante esta etapa se cargaron los datos sísmicos 3D “*post-stack*”, en formato .SEGY, y el pozo PTUCV_1 en formato .LAS suministrados por Teikoku Oil Co., en el programa KINGDOM. En el “*header*” de los archivos .SEGY se encuentra la información del número de trazas, las coordenadas, el bin y la velocidad de remplazo, ya que son necesarios para cargar los datos.

Se verificó que los archivos se cargaron correctamente mediante la visualización de la geometría de la sísmica (50 km²) en el “*Base Map*”, “*inline*”, “*croosline*” y la aplicación “*VuPAK*”, además de que los datos se presentaran en el tiempo y ubicación correcta (“*inline*” de 1500 a 1800 con un incremento de 1, “*croosline*” de 6220 a 7300 con un incremento de 2, tiempo de 0ms a 1500ms, espaciamiento de 12.5 metros, tiempo de muestreo de 0,004 segundos y orientación de N10°O) (Figuras 4.3 y 4.4).

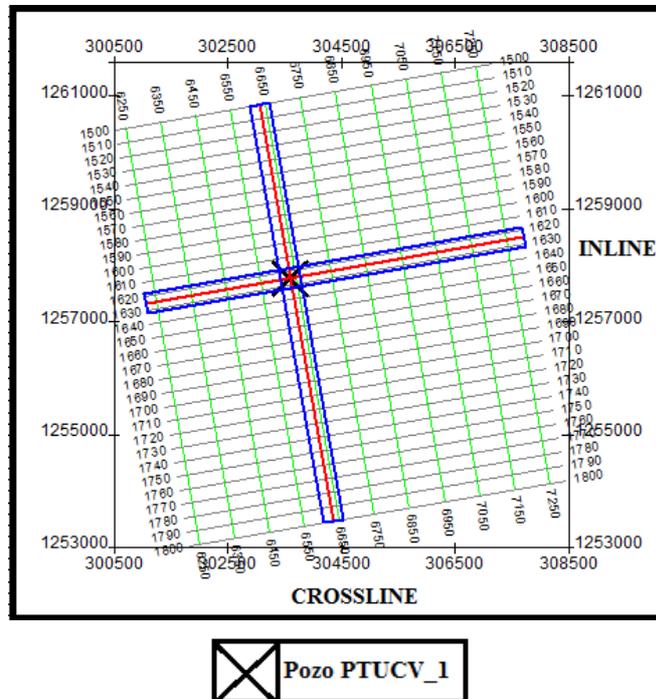


Figura 4. 3. Creación del “*Base Map*” y validación de datos.

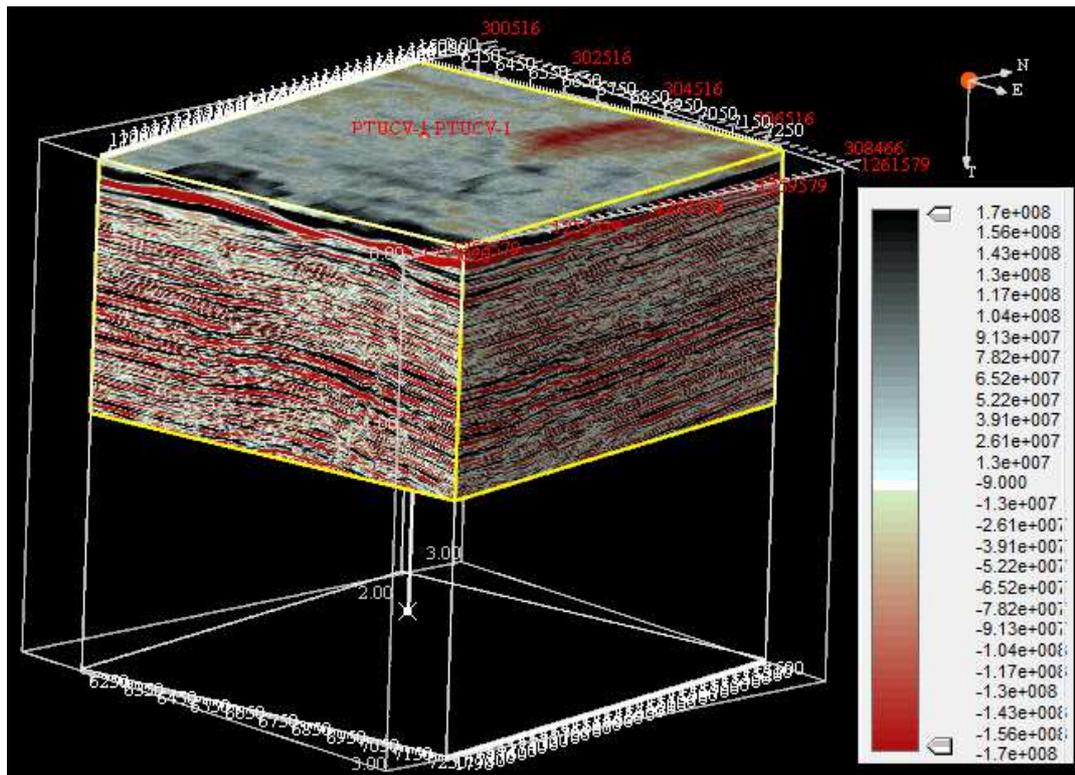


Figura 4. 4. Visualización 3D del “Base Map”.

Datos del pozo PTUCV_1

Para este estudio se suministró un pozo dentro del área llamado PTUCV_1, en formato .LAS, el cual posee un total de 27 registros (DEPT, BS, CHAM, DTCO, EFCF, ETC1, ETC2, ETC3, GR_EDTC, HDAR, HDIF, HDMI, HDMX, ITT, OSDV, RD1, RD2, RD3, RD4, RD5, RLA1, RLA2, RLA3, RLA4, RLA5, SP y SPHI). Para este pozo se generó una tabla utilizando los registros suministrados con sus respectivos parámetros de perforación en el momento de la adquisición del mismo, para así tener un mayor control de calidad de la base de datos y así poder realizar el sismograma sintético y su respectiva calibración con los datos sísmicos (Figura 4.5).

Se identificó que los registros eran continuos y que no hubo cambio de mecha, así mismo se identificaron zonas donde se presentaron valores anómalos.

Se visualizó la combinación de varios registros como Gamma Ray-Caliper-Bit Size, todos los registros de resistividad RLA, porosidad sónica, delta T compresional y la

interpretación petrofísica. Los primeros registros se utilizaron para evaluar las condiciones del hoyo y conocer los contrastes litológicos presentes.

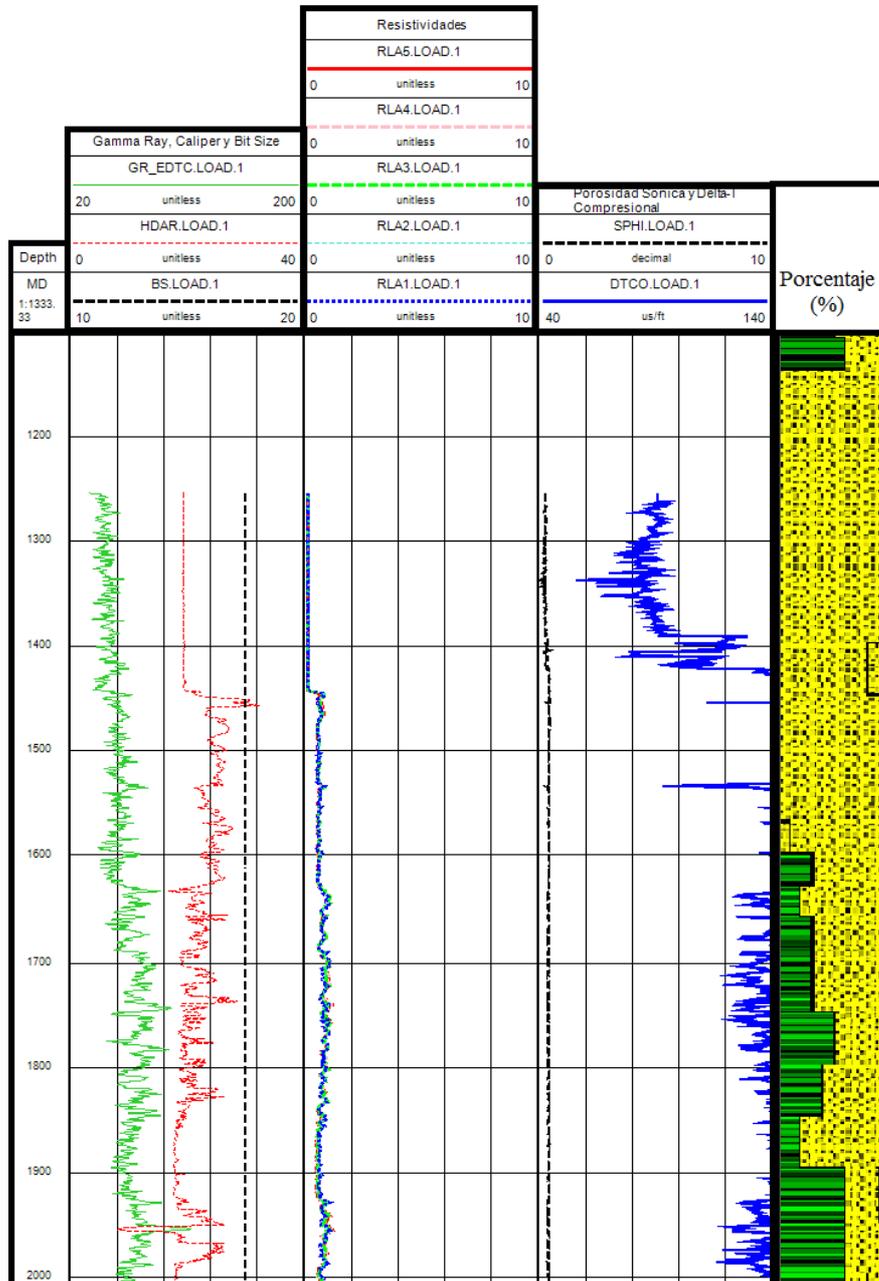


Figura 4. 5. Despliegue de los registros del pozo para la zona de estudio.

- **Control de Calidad de los Registros del Pozo**

Los registros del proveen información sobre las propiedades de roca en un punto; también permiten dar sentido geológico a la sísmica. Por ello se debe aplicar un control de calidad a dichos registros para así garantizar la no propagación de errores y la buena calidad del estudio a realizar.

En esta etapa, se desplegó sobre la sísmica el pozo, a partir de la curva TZ proveniente de los registros sísmicos del pozo. Asimismo, dichas curvas permitieron generar un primer enlace entre el dato duro (datos del pozo) con los datos sísmicos que se encuentran en tiempo doble de tránsito (TWT).

La curva T-Z es construida a partir de los VSP y “*Checkshot*”; esta permite obtener los datos de velocidades, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio del espacio (profundidad en pies). En general las herramientas de pozos comienzan a medir las profundidades a partir del momento que la herramienta comienza a descender por el hoyo y es denominada profundidad medida “*Messure Depth*” (MD) y está tomada a partir de la mesa rotaria “*Kelly Bush*” (KB), también se debe tomar en cuenta el nivel de desviación del pozo si la hay, ya que esto puede dar como resultado mediciones de profundidad erradas, si el pozo es vertical la profundidad medida debe ser igual a la profundidad vertical “*Vertical Depth*” (TVD).

A diferencia del pozo, la sísmica está medida a partir del datum sísmico, en este caso el nivel medio del mar (NMM) “*Seismic Reference Datum*” (SRD), debido a estas diferencias se deben llevar los datos del pozo al mismo nivel de referencia de la sísmica. Del mismo modo, las mediciones de tiempo, deben ser transformadas a tiempo doble de tránsito para que puedan ser trabajadas en conjunto con los datos sísmicos.

Seguidamente se realizó una revisión de la tabla T-Z cargada para el pozo desplegando los registros, para corroborar que fueron cargados correctamente, tomando en cuenta los parámetros expuestos anteriormente. Los gráficos observados presentan un comportamiento muy similar y acorde con las tendencias esperadas, es decir, se observa un aumento de los tiempos a medida que aumentan las profundidades y los valores mayores de tiempo doble de tránsito oscilan entre los 376,6 ms y 2547 ms (Figura 4.6).

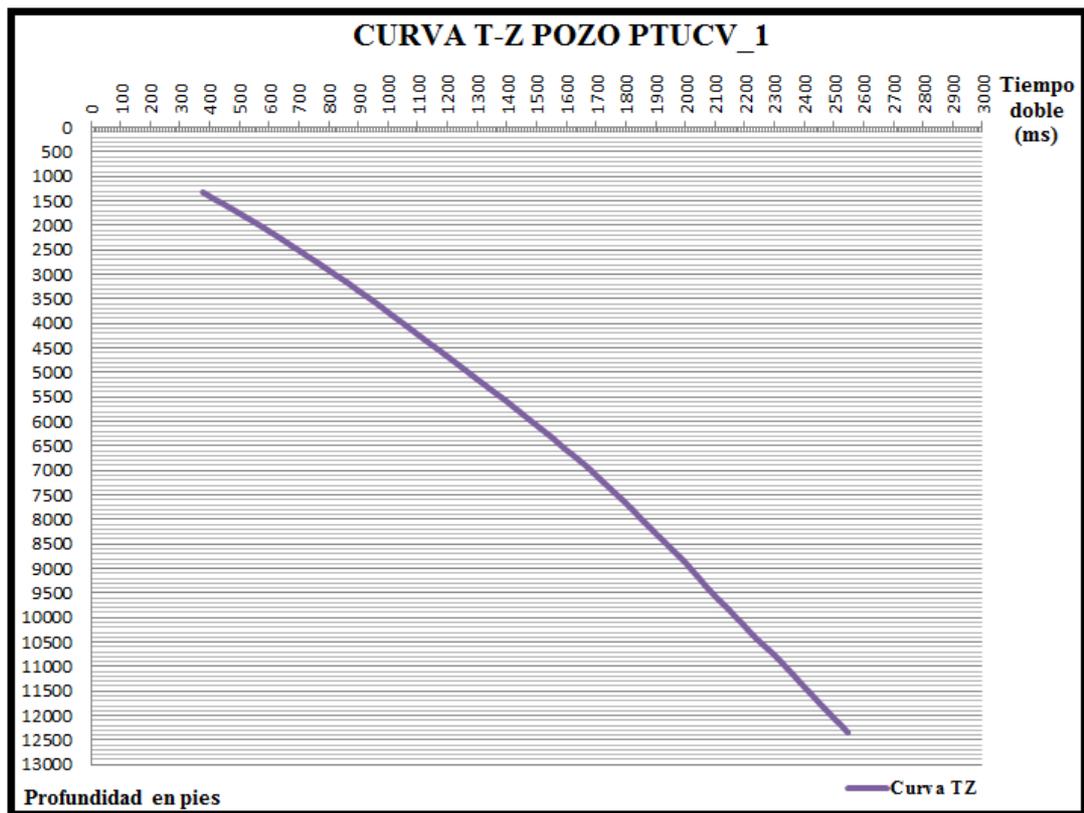


Figura 4. 6. Grafica Tiempo-Profundidad del pozo PTUCV_1 realizado en Excel.

4.2.2 Calibración Sísmica – Pozo

En este proceso se realizó la calibración de los datos sísmicos 3D con los datos en profundidad del pozo PTUCV_1. Se identificaron los toques de interés mediante el análisis de los registros de Gamma Ray, Caliper, Densidad, Porosidad y Porosidad de Neutrón. Con esto se elaboró el reescalamiento del registro de pozo para llevar los datos del dominio del tiempo a profundidad, por medio de la curva T-Z. Se generó un registro de impedancias acústicas para posteriormente convolucionarlo con una ondícula creada a partir de los datos sísmicos.

Generación del Sismograma Sintético

Esta etapa, previa a la interpretación sísmica, se generaron trazas sísmicas artificiales provenientes de la información adquirida de los registros de pozos (dato duro) que fueron posteriormente comparadas con las trazas provenientes de la sísmica para calibrar esta

última. Para ello es necesario que dichas trazas artificiales sean lo más parecidas a la sísmica y se adapten a ella en función de identificar los mejores reflectores que se encuentran relacionados con contrastes importantes de velocidades. Una vez hecho esto, se tendrá identificado los horizontes de interés, los cuales deben ser seguidos e interpretados a lo largo de todas las líneas sísmicas 3D.

Para la generación del sismograma sintético es necesario seguir una serie de pasos. Primero se llevan los registros del pozo de profundidad a tiempo usando la curva tiempo-profundidad. Luego partiendo de los registros sísmico y de densidad, se obtienen los registros de impedancia acústica, que no es más que la multiplicación de los mismos (en el caso de este trabajo, la densidad se determinó a partir del registro sísmico por medio de la ecuación de Gardner). En primera instancia, con estos datos de entrada el programa genera automáticamente un registro de impedancias acústicas, la serie de reflectividad y un sismograma sintético calculado a partir de la convolución entre la serie de reflectividad y una ondícula predeterminada.

El siguiente paso es la creación de una ondícula, para la cual se utilizó la extracción de la misma de los datos sísmicos (Figura 4.7). Esta se escogió cercana al pozo, con un radio de 500 metros y se seleccionó el tiempo total de la sísmica (de 0 ms a 1500 ms).

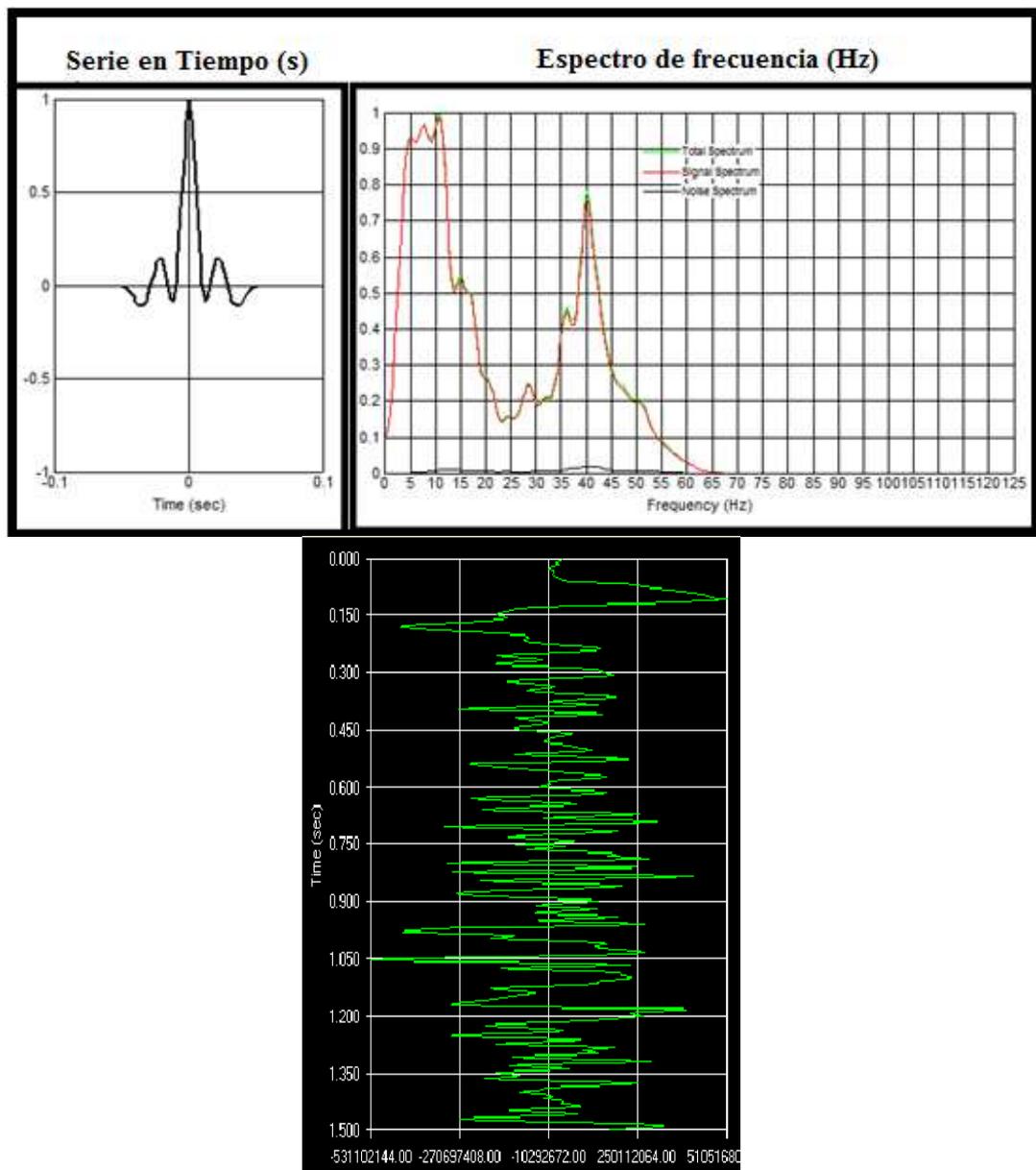


Figura 4. 7. Ondícula extraída de la sísmica desde 0 ms a 1500 ms para el pozo PTUCV_1. Se observa en el espectro de frecuencia una ondícula con una forma bastante irregular, sugiriendo un contenido de ruido dentro de la misma o la interferencia de algún cuerpo a nivel profundo, el valor máximo de amplitud se corresponde con una frecuencia de 12Hz.

El último paso para la generación del sismograma sintético es la aplicación de un “*shift*” o desplazamiento vertical del sismograma sintético hasta lograr un buen amarre con la sísmica (Henry, 2000). Sin embargo, esta fase debe efectuarse con sumo cuidado dado que,

al realizar este ajuste, se están modificando los valores de la curva tiempo-profundidad pudiendo ocasionar incongruencias (Figura 4.8).

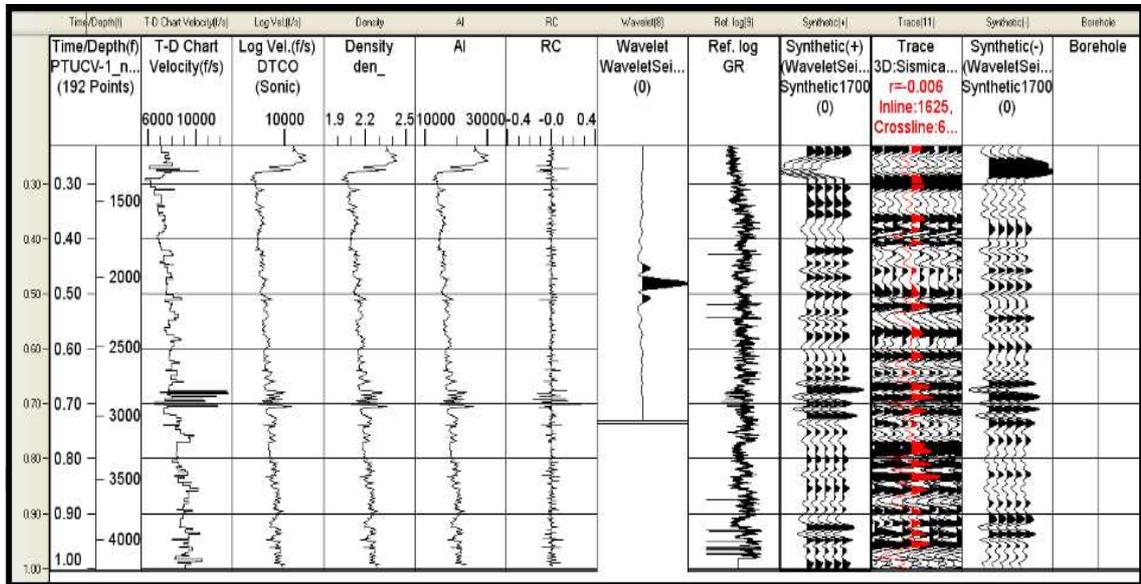


Figura 4. 8. Sismograma Sintético Calibrado.

La visualización de todos estos paneles en la construcción del sintético, ayudó a tener un mayor control de los resultados tomando en cuenta todas las variables presentes, que pueden influir considerablemente en el resultado final (Figura 4.9).

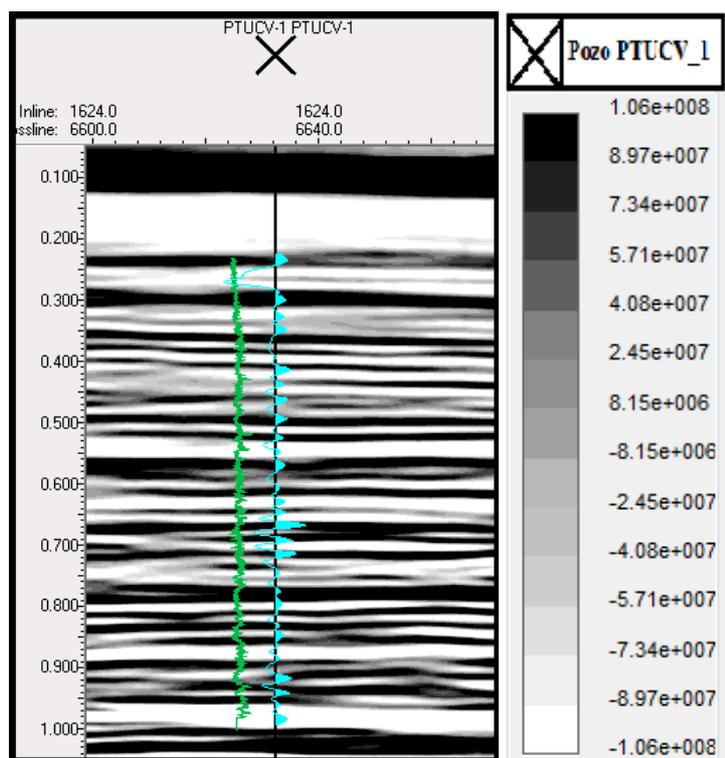


Figura 4. 9. Sismograma Sintético representado en color azul sobre la sísmica junto con el despliegue del registro de Gamma Ray (GR) representado en color verde.

4.2.3 Interpretación sísmo-estratigráfica

Para esta etapa el criterio utilizado en la selección de los horizontes se basó en la continuidad de la respuesta acústica tomando en cuenta los reflectores que delimitan paquetes litológicos-estratigráficos en el área de estudio.

Siguiendo con lo anterior, para la calibración o validación se consideraron aquellas zonas en donde coinciden las respuestas de amplitudes positivas de los datos sísmicos 3D y el comportamiento de los registros del pozo PTUCV_1. De esta forma se consiguió un amarre en cuatro zonas, correspondientes al pozo para la creación de los horizontes de interés (Figura 4.10).

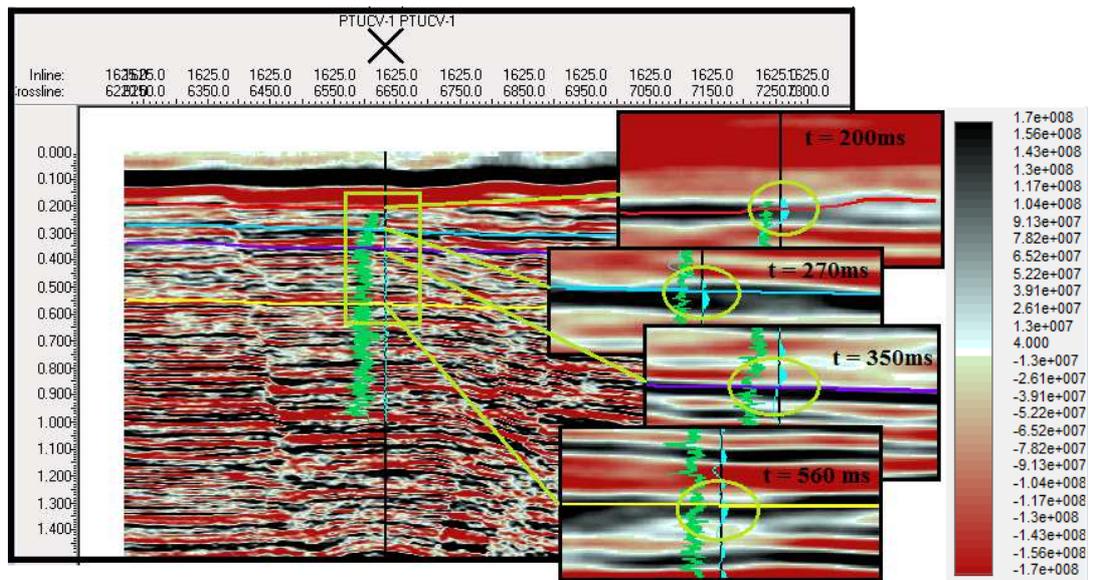


Figura 4. 10. “*Inline*” 1625, volumen PSTM representando el pozo PTUCV_1 y el sismograma sintético con los distintos puntos de calibración.

Dado los contrastes de impedancia en la geología de la zona, se diferencian a nivel somero cuatro reflectores principales que se observan a lo largo de toda la secuencia.

Las figuras 4.11 y 4.12 muestran las interpretaciones correspondientes en el “*inline*” 1625 y “*crossline*” 6632. Se colocaron las semillas siguiendo la continuidad de los reflectores cada 5 “*inline*” y 10 “*crossline*” a partir de la localización del pozo.

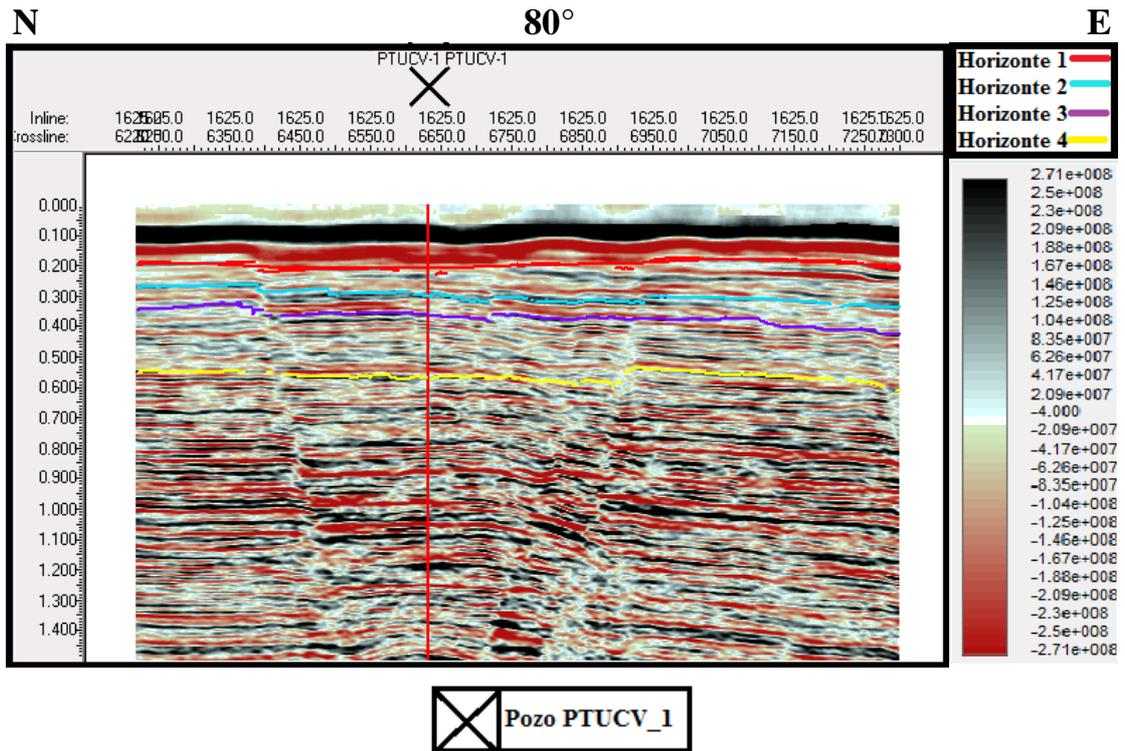


Figura 4. 11. "Inline" 1625 con los horizontes interpretados.

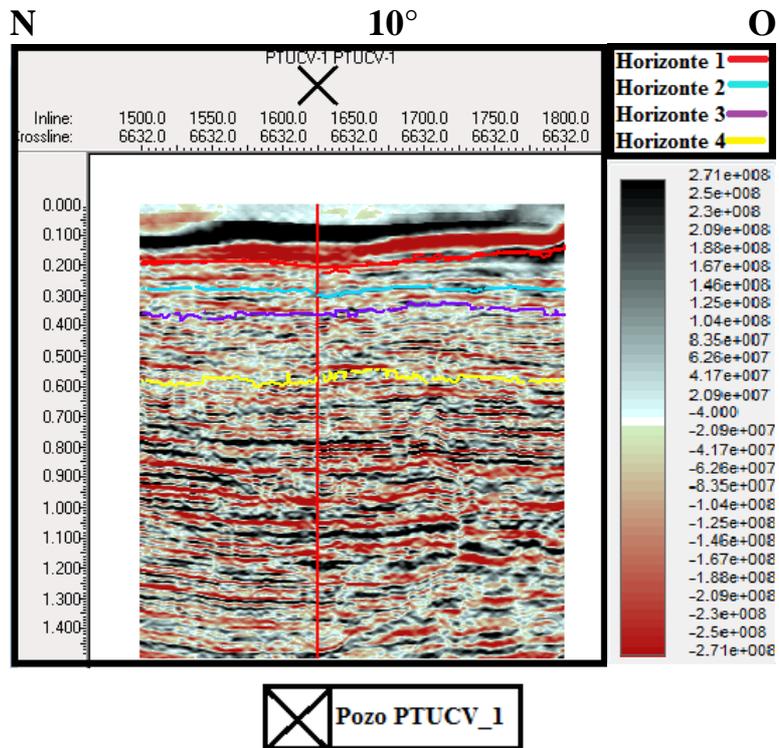


Figura 4. 12. "Crossline" 6632 con los horizontes interpretados.

Para realizar esta interpretación con mayor detalle, se utilizó la herramienta del “Wiggle” el cual permite la visualización de las trazas y la continuidad de los reflectores positivos (Figura 4.13).

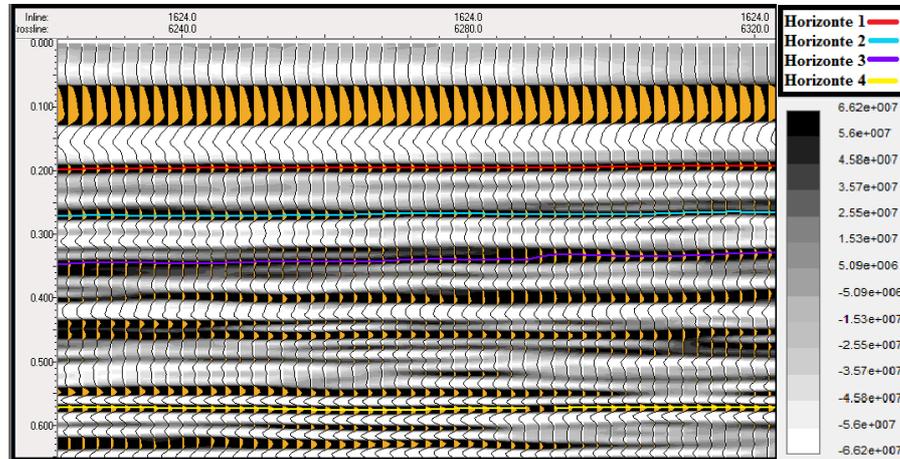


Figura 4. 13. Horizontes interpretados mediante la herramienta “Wiggle” resaltado en color amarillo.

Al realizar la identificación de las posibles facies litológicas y asociarlos a los horizontes, se procedió con la interpretación de las fallas y para ello se utilizó un cubo de atributo de coherencia sísmica que resaltó las fallas presentes en la zona (Figura 4.14). Luego se creó el polígono de falla. (Figura 4.15).

Se interpretaron 4 horizontes en total cuyas características se resumen a continuación en la tabla 4.1:

Tabla 4. 1. Tabla de ubicación de horizontes en tiempo.

Horizontes	TWT (ms)
H1	200
H2	270
H3	350
H4	560

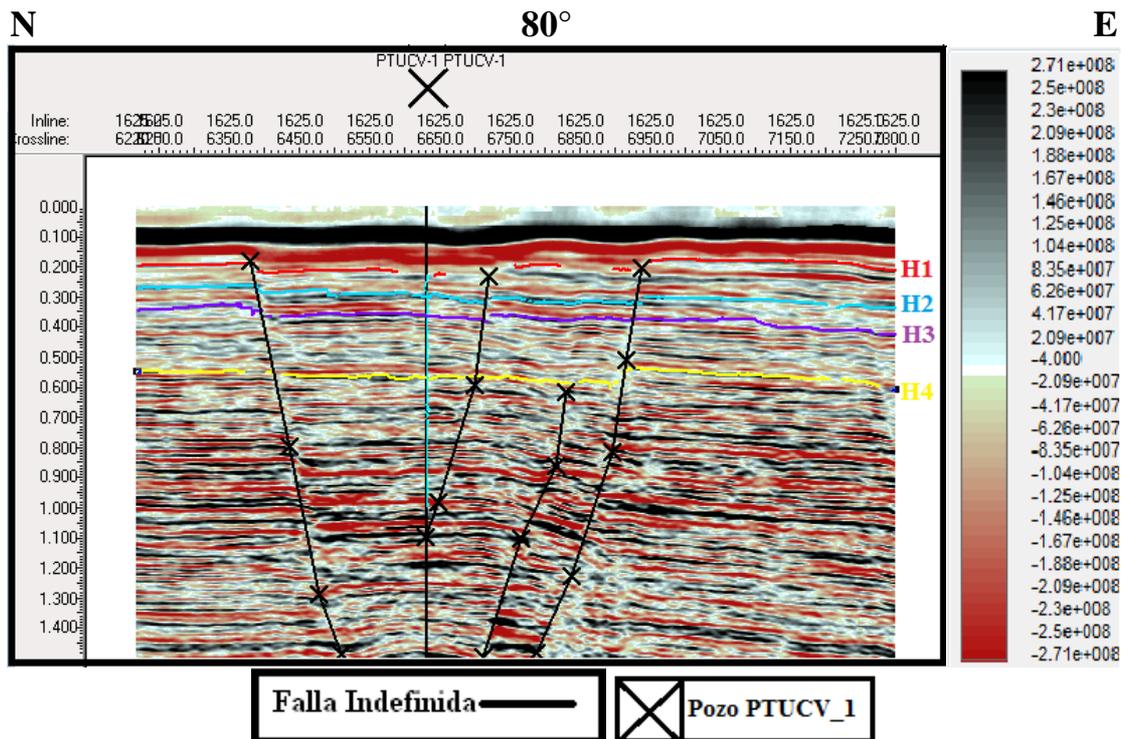


Figura 4. 14. Interpretación de las fallas de forma indefinida en el "Inline" 1625.

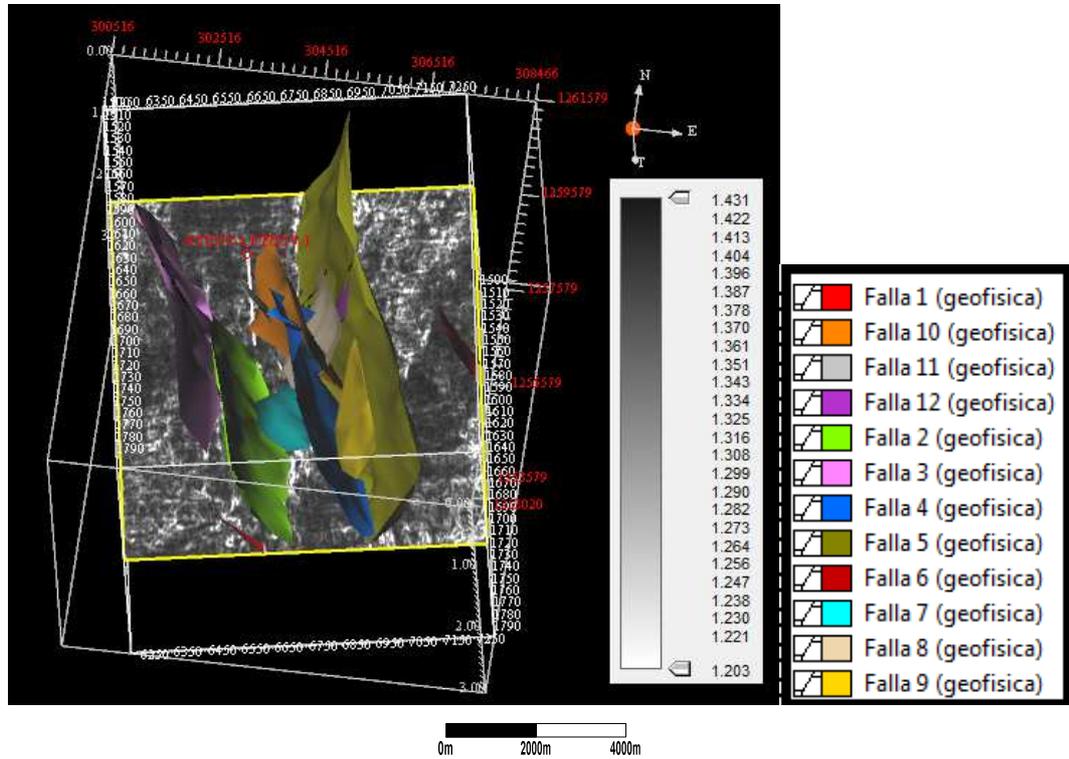


Figura 4. 15. Asignación de fallas y creación de polígono.

Finalizada la creación de los polígonos de fallas, se procedió a la elaboración de mapas de horizontes utilizando “mínima curvatura” como método de interpolación ya que presenta la superficie de los horizontes con mejor calidad. (Figura 4.16).

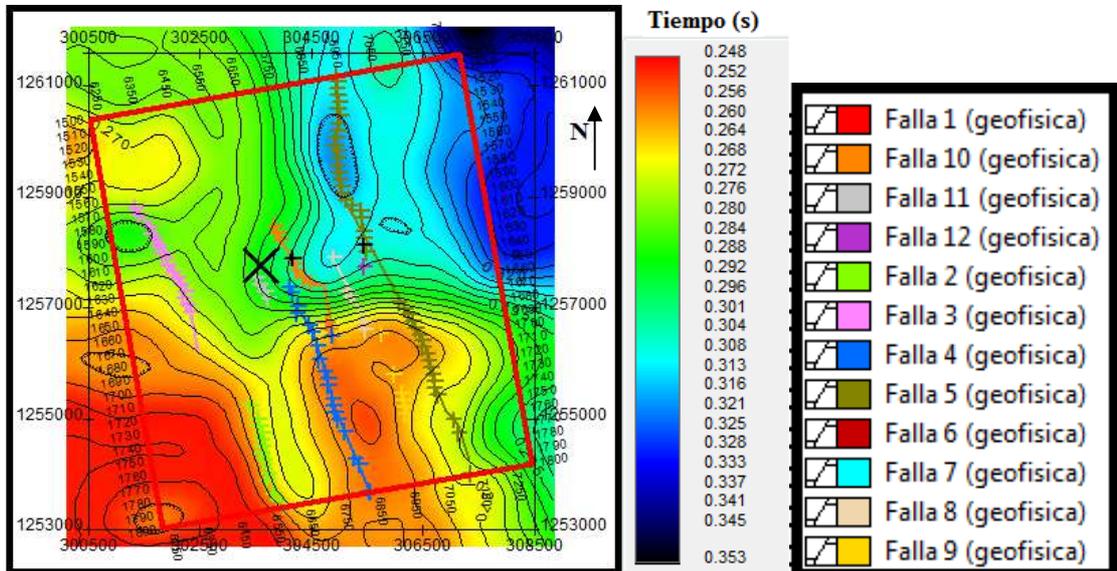


Figura 4. 16. Creación de la superficie de los horizontes en tiempo.

Cálculo de la resolución vertical

Para el cálculo de la resolución vertical se utilizaron los horizontes interpretados, y para ello se determinó la velocidad del intervalo de interés y su frecuencia dominante.

La velocidad interválica para todo el paquete interpretado es de 6363 pies/s (1939,44 m/s).

El cálculo de la frecuencia dominante utilizó los horizontes ya definidos, los cuales se encuentran entre 0,200 s y 0,560 s y se especificaron tres ventanas de longitudes diferentes (70ms, 80ms y 210ms), las cuales son: 0,200 – 0,270 s, 0,270 – 0,350 s y 0,350 – 0,560 s. Luego se escogió la línea más representativa y cercana al pozo para calcular el espectro de amplitud, se seleccionaron los parámetros de la ventana de acuerdo a los tiempos previamente establecidos. Una vez calculado el espectro de amplitud se identificaron las frecuencias dominantes (figuras 4.17, 4.18 y 4.19) de la sísmica para dichas ventanas de tiempo, y con la velocidad interválica suministrada, se procedió a calcular la resolución vertical, mediante la ecuación 2:

Resolución vertical = Velocidad Interválica / (Frecuencia dominante*4) Ecuación 2

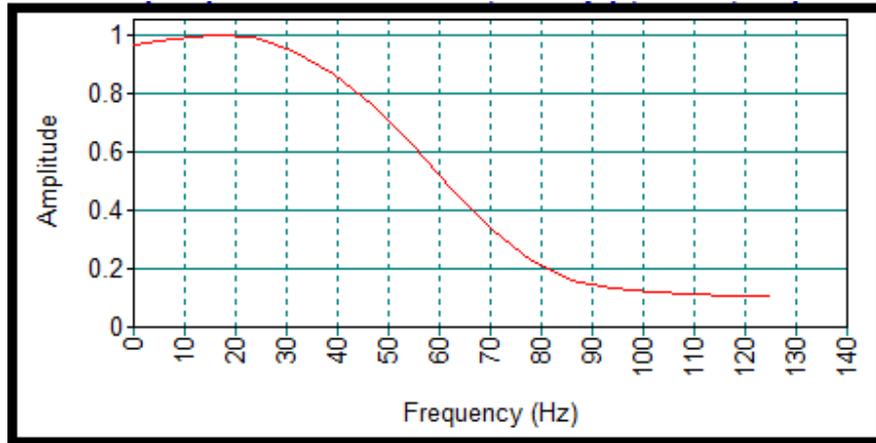


Figura 4. 17. Espectro de frecuencia en el intervalo de 0,200 s – 0,270 s. Frecuencia dominante de 20 Hz.

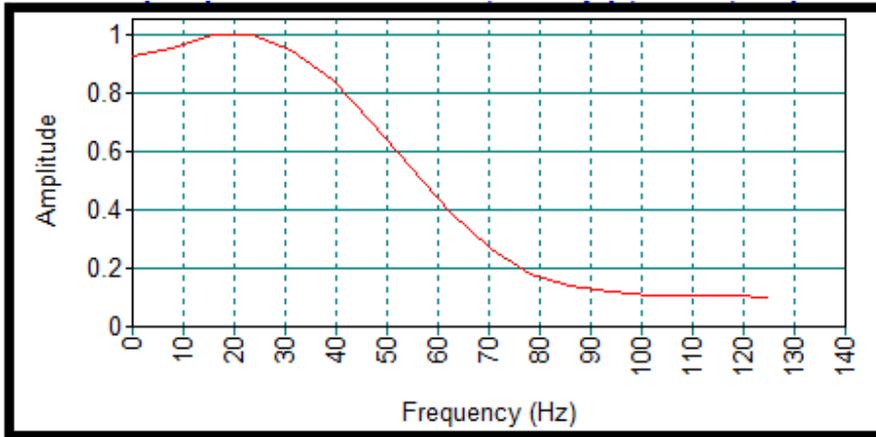


Figura 4. 18. Espectro de frecuencia en el intervalo de 0,270 s – 0,350 s. Frecuencia dominante de 20 Hz.

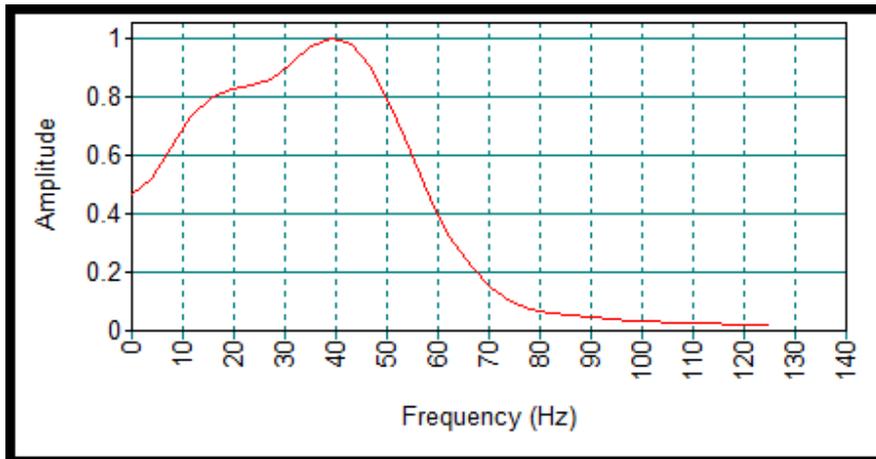


Figura 4. 19. Espectro de frecuencia en el intervalo de 0,350 s – 0,560 s. Frecuencia dominante de 40 Hz.

Para este trabajo se muestran frecuencias dominantes de 20 y 40Hz, correspondiente al intervalo de tiempo entre 0,200 s y 0,560 s. Para dichos valores la resolución vertical de se encuentra en el orden de los 79,53 pies (24,24 m) y 39,76 pies (12,12 m).

4.2.4 Generación de volúmenes y estimación de atributos

Con el objetivo de caracterizar el riesgo geológico a nivel somero, se utilizaron técnicas multiatributos. Con este método se busca integrar la información aportada por distintos atributos para resaltar zonas de interés. (Michelena et al, 1998).

Extracción de atributos sísmicos

Para esta etapa se generaron 27 mapas de atributos divididos de la siguiente manera:

- 48 mapas de atributos de descomposición espectral, entre 8 Hz y 50 Hz, de los cuales solo se tomaron 20 mapas con las frecuencias más resaltantes entre 8 Hz y 14.3 Hz (10 de transformada de Fourier y 10 de transformada de Morlet).
- 5 atributos de transformada de Hilbert.
- 2 atributos geométricos.

Luego se desplegaron los horizontes aplicando del atributo RGB (“red”, “green” y “blue”), el cual resalta las amplitudes positivas combinando las frecuencias de 10, 12 y 14,3 Hz.

Seguidamente se creó el volumen de similitud y coherencia para la distinción de fallas y discontinuidades y por último se crearon los diferentes mapas de atributo de Hilbert y geométrico para luego compararlo con el mapa más representativo de los atributos de descomposición espectral (Figura 4.20):

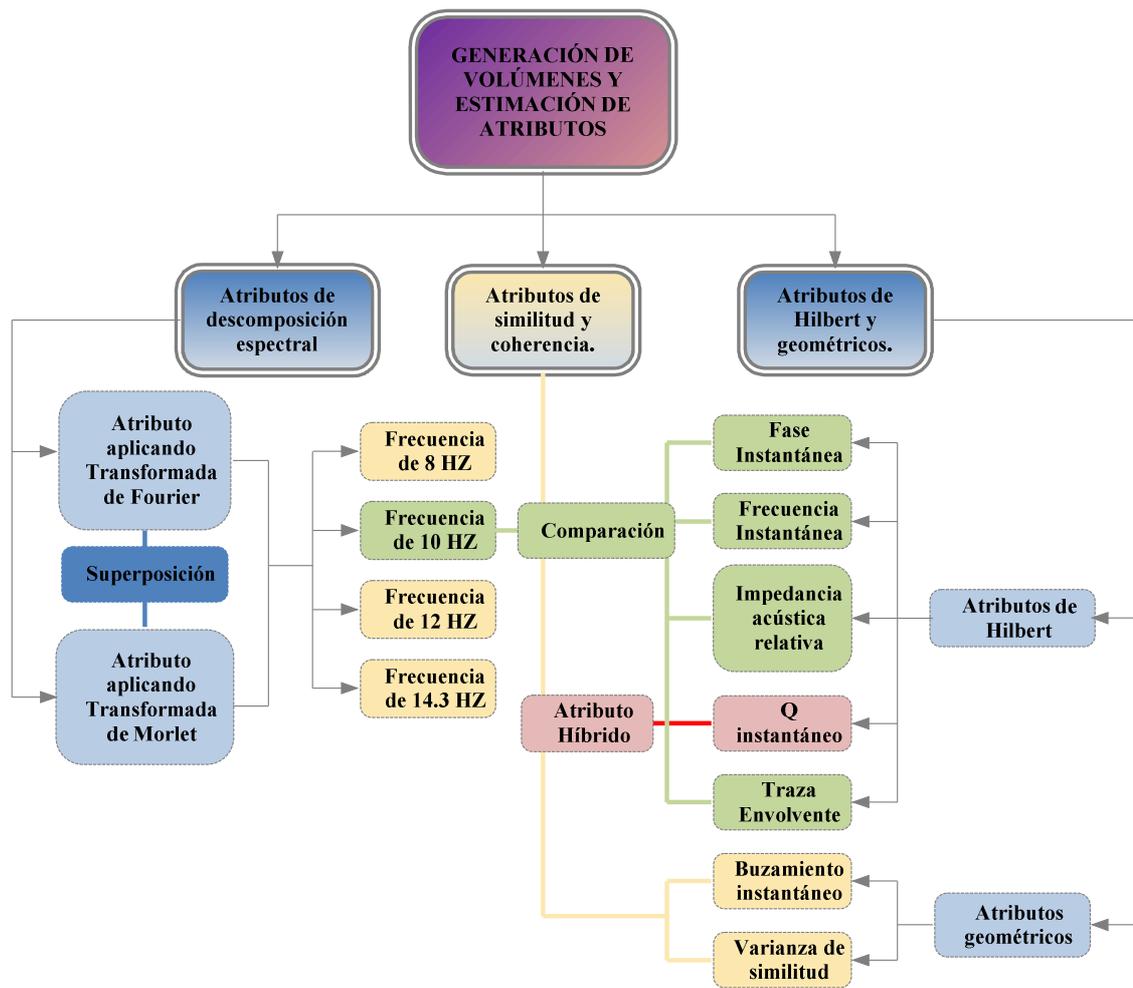


Figura 4. 20. Esquema de la generación de volúmenes y estimación de atributos.

Atributos de descomposición espectral

Durante este proceso se generaron volúmenes de descomposición espectral (20 mapas de amplitudes), sobre los datos sísmicos 3D mediante la comparación de la transformada de Fourier y de la transformada de la ondícula continua (Morlet).

Los parámetros para realizar estos volúmenes de descomposición espectral se determinaron estudiando el espectro de frecuencia en una ventana temporal entre 0.200 a 0.560 s (Figura 4.21) del volumen sísmico de amplitud PSTM, para definir el intervalo de frecuencias interesantes, es decir, el intervalo de frecuencias para el cual la contribución de amplitudes es apreciable y no es debida sólo al ruido.

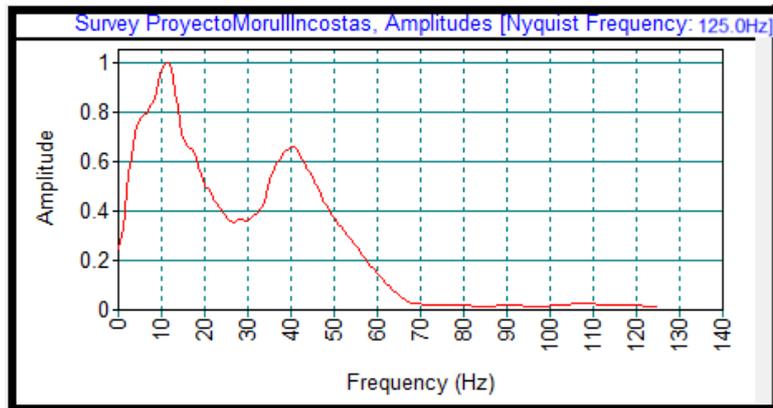


Figura 4. 21. Espectro de frecuencia del volumen sísmicos PSTM para una ventana temporal entre 0.200 y 0.560 s. La mayor contribución de energía ocurre a los 10Hz.

Del espectro de amplitud de la sísmica se pudo definir que el contenido de frecuencias importantes se encuentra entre 8 y 50 Hz. De esta manera se procedió a extraer los volúmenes de descomposición espectral para las frecuencias centradas en 8 Hz, 10 Hz, 12 Hz, 14.3 Hz, 17.1 Hz, 20.4 Hz y 24.5 Hz. De estas solo se tomaron las primeras cuatro como las principales ya que discriminan las estructuras presentes de mejor manera; el resto de los mapas (35 Hz, 41.8 Hz y 50 Hz) no lograron diferenciar ninguna estructura ni anomalía de amplitud.

Se tomó como frecuencia de corte los valores entre 8 Hz y 80 Hz y de longitud de ventana el valor de 0.04 segundos (Figura 4.22).

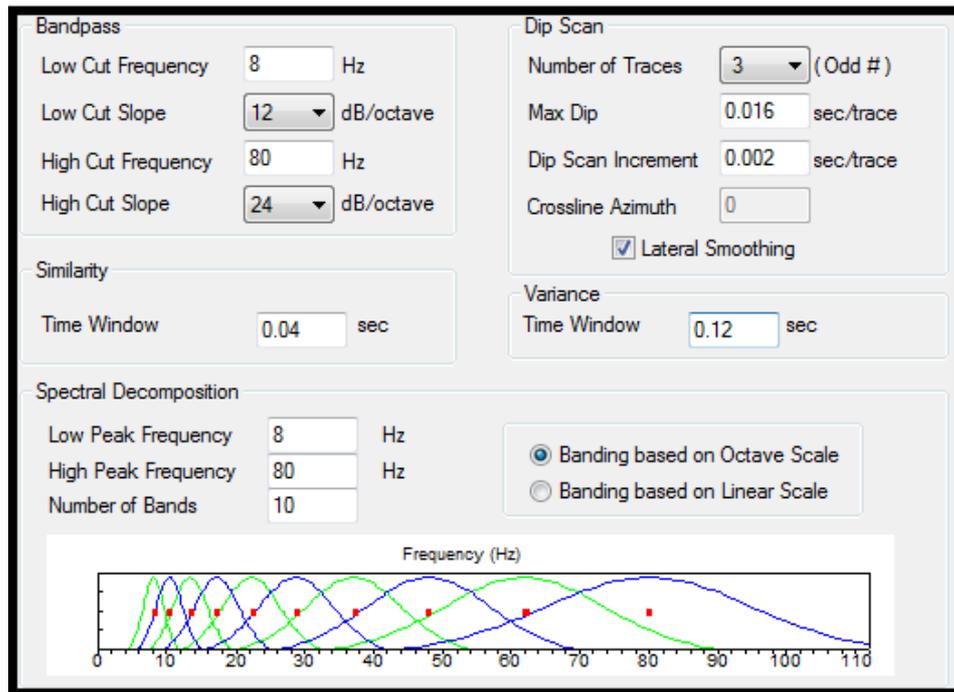


Figura 4. 22. Parámetros para generar los volúmenes de descomposición espectral.

La importancia que cobra el uso de la descomposición espectral en la interpretación sísmica, radica en que las reflexiones sísmicas asociadas a capas geológicas tienen características específicas en sus espectros de amplitud y fase que permite una mejor visualización de rasgos estratigráficos y estructurales del área en estudio.

Atributos de similitud y coherencia.

Durante este proceso se generaron volúmenes de similitud y coherencia, para resaltar cualquier discontinuidad, identificando fallas y rasgos estructurales.

Atributos de Hilbert y geométricos

La estimación de atributos basados en la transformada de Hilbert (“*Instantaneous frequency*”, “*Instantaneous phase*”, “*Instantaneous Q*”, “*Relative Acoustic Impedance*” y “*Trace envelope*”), atributos geométricos (“*Instantaneous dip*” y “*Similarity Variance*”) de los datos sísmicos 3D, suministraron información acerca de las características de la frecuencia dominante que pueden ser asociados a efectos de absorción de saturación de gas

o fractura, también indicaron cambios de litología o estratigrafía, aportando información sobre los contrastes de impedancia, discontinuidades y límites asociados a cambios significativos en el nivel del mar o ambientes depositacionales.

Los parámetros para realizar estos atributos (Figura 4.23) se determinaron estudiando el espectro de frecuencia de toda la sísmica (Figura 4.21). De igual manera se tomó como frecuencia de corte los valores entre 8Hz y 80Hz y longitud de ventana de 0.1 segundos.

Section	Parameter	Value	Unit
Bandpass	Low Cut Frequency	8	Hz
	Low Cut Slope	12	dB/octave
	High Cut Frequency	80	Hz
	High Cut Slope	24	dB/octave
Similarity	Time Window	0.1	sec
	Variance Time Window	0.3	sec
Spectral Decomposition	Low Peak Frequency	8	Hz
	High Peak Frequency	80	Hz
	Number of Bands	10	
Dip Scan	Number of Traces	3	(Odd #)
	Max Dip	0.016	sec/trace
Dip Scan	Dip Scan Increment	0.002	sec/trace
	Crossline Azimuth	0	
Dip Scan	<input checked="" type="checkbox"/> Lateral Smoothing		
	<input checked="" type="radio"/> Banding based on Octave Scale		
Dip Scan	<input type="radio"/> Banding based on Linear Scale		

Figura 4. 23. Parámetros para generar los atributos de Hilbert y geométricos

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS, INTEGRACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS 2D DE ALTA RESOLUCIÓN CON LOS DATOS SÍSMICOS 3D Y CORRELACIÓN DE ESTOS DATOS CON EL ESTUDIO DE AMENAZA GEOLÓGICA CONVENCIONAL

En esta etapa de la metodología se evalúan los riesgos geológicos actuales o posibles, del Bloque Moruy II en Golfo de Venezuela, como resultado de la actividad sísmica, las tasas de sedimentación de los ríos aledaños, gas somero potencialmente presurizado, volcanes de lodo, fallas activas, sedimentos a presión y otras posibles causas de la inestabilidad del suelo marino, publicados en trabajos anteriores de interpretación geológica disponible de la zona o inferidos de los datos existentes.

Para ello se combinaron los distintos atributos sísmicos evaluados y se integraron los datos sísmicos 2D de alta resolución con los datos sísmicos 3D.

4.3.1 Conversión de horizontes de tiempo a profundidad

Se utilizaron las velocidades (RMS) suministradas para llevar los horizontes de tiempo a profundidad. Estas velocidades fueron organizadas por coordenadas en pares de velocidad y tiempo doble de viaje.

Luego se calculan los isócronos restando cada horizonte con su inmediato horizonte suprayacente para obtener el tiempo doble en cada paquete estratigráfico. Estos tiempos al ser multiplicados por una velocidad promedio permiten obtener isópacos (Figura 4.24).

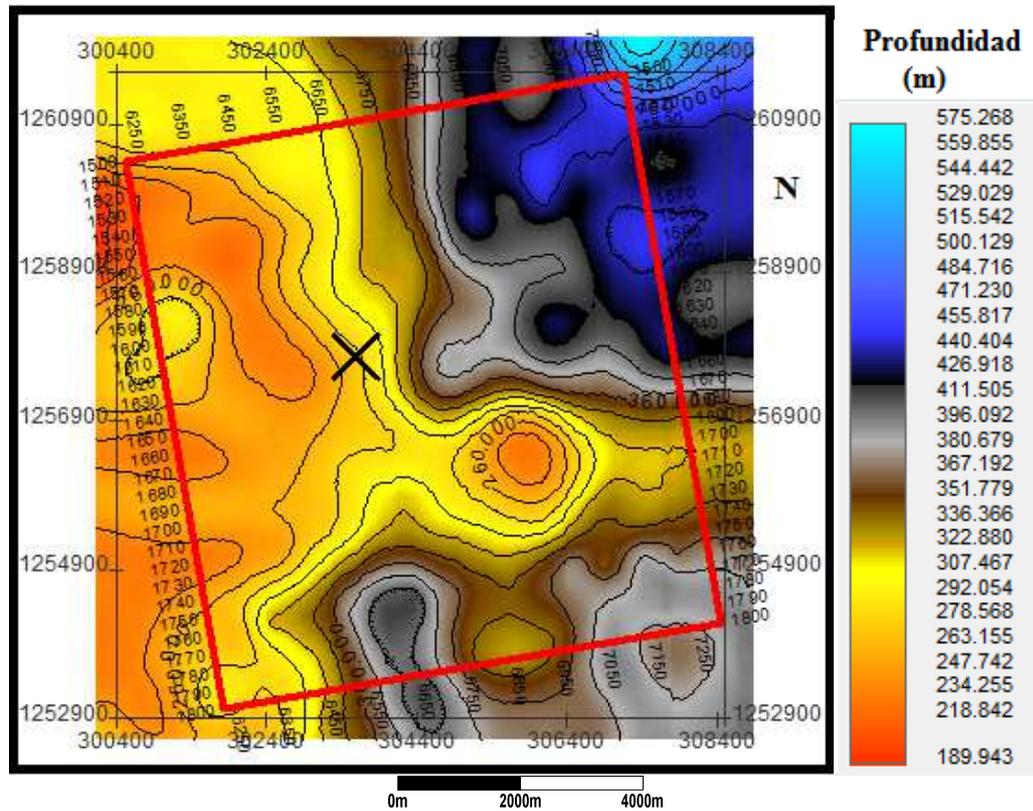


Figura 4. 24. Mapa Isópaco entre el horizonte 1 y el horizonte 2.

Al tener los isópacos se procedió a sumar la batimetría referida al Nivel Medio Local del Mar (N.M.L) con el mapa isópaco de la primera unidad sísmica (H0-H1) obteniendo el mapa estructural del horizonte H1. Para los siguientes horizontes se sumó el isópaco de la

siguiente unida sísmica con el estructural del horizonte anteriormente calculado. Este proceso se repitió hasta llegar al último horizonte interpretado.

4.3.2 Correlación de los datos sísmicos 3D con el estudio de amenaza geológica convencional

Para llevar a cabo la correlación fue tomada en cuenta la interpretación sísmo-estratigráfica obtenida de los datos sísmicos 3D junto con la interpretación de los datos sísmicos 2D de alta resolución con la intención de unificar estos resultados y relacionarlos con las interfaces litológicas observadas en los diferentes atributos.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los productos más resaltantes obtenidos a lo largo del estudio de la zona.

5.1 INTERPRETACIÓN SISMO-ESTRATIGRÁFICA DE LOS DATOS SÍSMICOS 3D

En esta etapa se identificaron fallas, comportamiento de reflexiones a nivel de contenido de frecuencias y continuidad. Para realizar la interpretación sismo-estratigráfica y los diferentes análisis geofísicos obtenidos durante este trabajo es importante tener un conocimiento previo de la geología regional y local del área así como de las limitaciones que pueda presentar la sísmica.

La información geofísica adquirida permite darle continuidad lateral al perfil estratigráfico obtenido y, de esta manera determinar la disposición areal de los sedimentos e inferir el sistema de depositación del área.

Siguiendo con lo anterior, Audemard (1996) determina que la activación tectónica en Falcón centro-occidental es de edad Pleistocenos Tardío a Holoceno Temprano. Además en el área de estudio corresponde a una secuencia de ambiente costero a continental reflejando ambientes marino somero y fluvial deltaico (Figura 5.1).

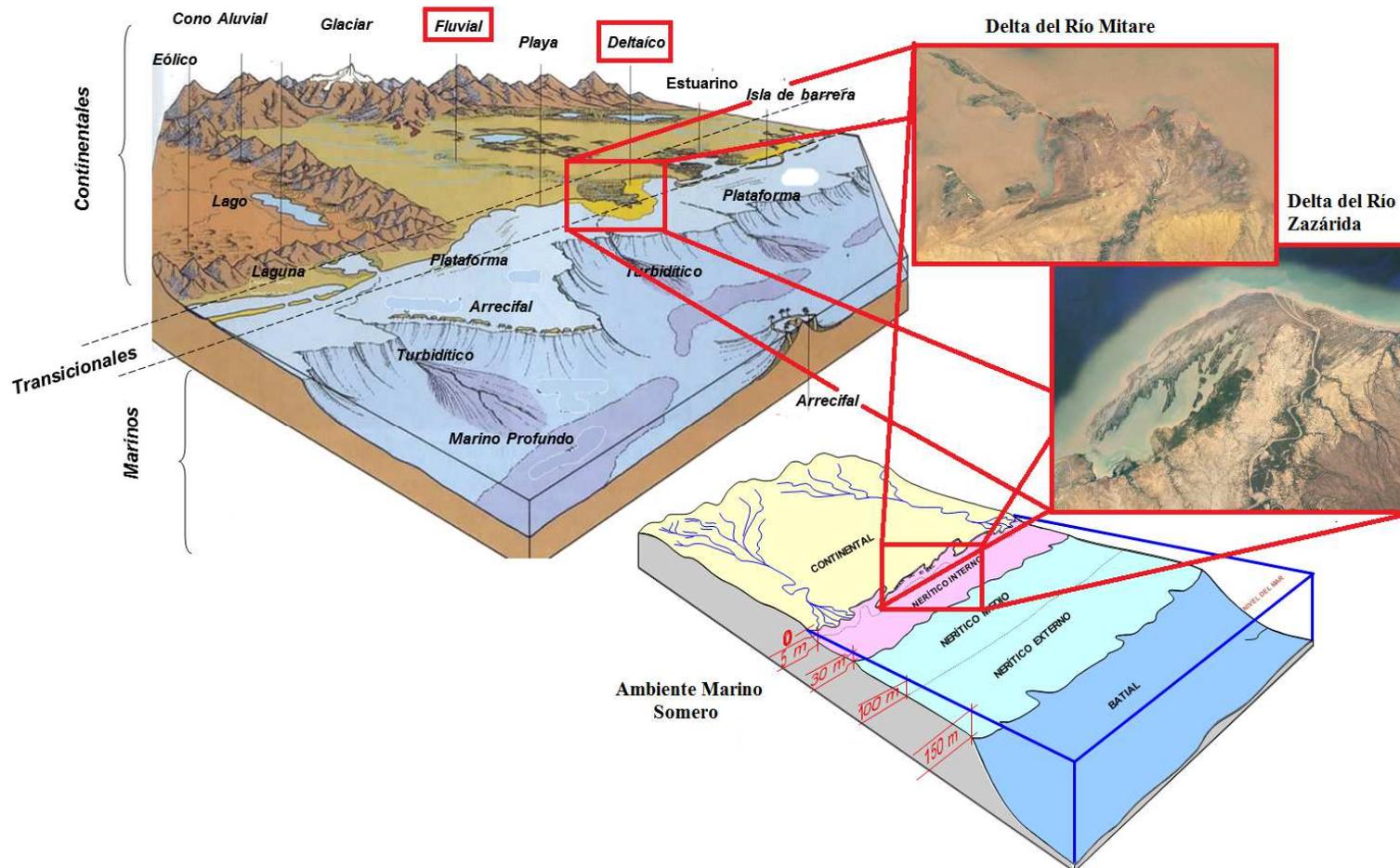


Figura 5. 1. Secuencia de ambiente costero a continental, reflejando ambientes marino somero y fluvial deltaico presentes en el área de estudio. (Tomado y modificado de las clases de estratigrafía y sedimentación de Rojas, A., 2009).

El marco estructural que se maneja dentro del área está caracterizado, principalmente, por una tectónica activa del tipo extensional, ya que las estructuras principales que se encuentran presentes dentro del área de estudio son fallas normales planares y en algunos casos rotacionales, como son las fallas lítricas. Dentro de las estructuras más resaltantes se encuentran grábenes, semi-grábenes, “horst” y pliegues tipo “roll-over” asociados directamente a las fallas lítricas.

En la figura 5.2 se observa un tren de fallas principales que presentan un rumbo preferencial en dirección NO-SE.

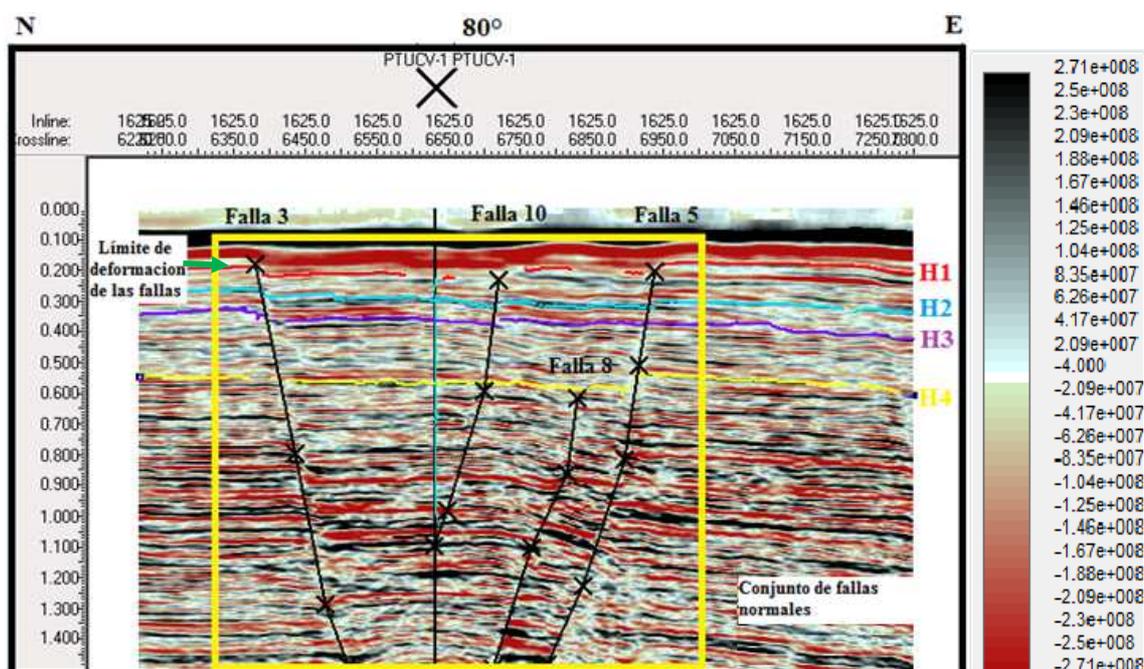


Figura 5. 2. “Inline” 1625 con los horizontes y fallas interpretados, en el cual se destacan el conjunto de fallas normales, evidenciando los procesos extensivos en el área.

Se puede apreciar en la figura anterior que arroja una respuesta sísmica fuerte en los “inlines”. Esta secuencia consiste en reflectores paralelos y semi-continuos, ubicados a una profundidad de aproximadamente 213.36, 274.32, 365.76 y 594.36 metros respectivamente, que se localizan dentro de la Formación Urumaco.

A nivel de contenido de amplitudes, en la sísmica se observan reflectores que permanecen continuos a lo largo de toda el área, dichos reflectores no responden a edades

cronoestratigráficas, ya que el área se puede encontrar dentro de una secuencia estratigráfica regional.

Los reflectores de los cuatro horizontes interpretados en tiempo se caracterizan por poseer en su mayoría amplitudes positivas y presentar discontinuidades, que pueden ser atribuidas a cambios en las propiedades físicas de las rocas o presencia de canales y fluidos. Adicionalmente se puede observar un buzamiento generalizado hacia el NE (Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7).

Los mapas de horizontes se colocaron del más profundo al más somero para estudiar la evolución geológica del área.

El horizonte 4 (Figura 5.3) muestra valores en tiempo entre 0.528 y 0.631 s, el horizonte 3 (Figura 5.4) muestra valores entre 0.291 y 0.451 s, el horizonte 2 (Figura 5.5) muestra valores entre 0.248 y 0.353 s y por último el horizonte 1 (Figura 5.6) presenta valores entre 0.139 y 0.212 s, además de observarse las fallas bien diferenciadas y marcadas en todo el horizonte.

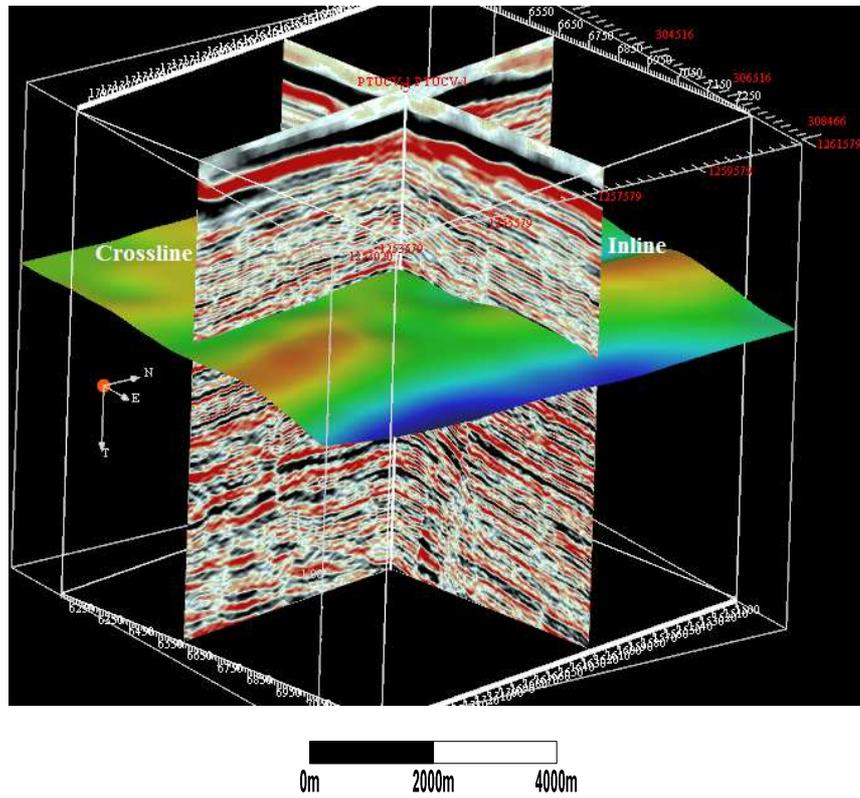
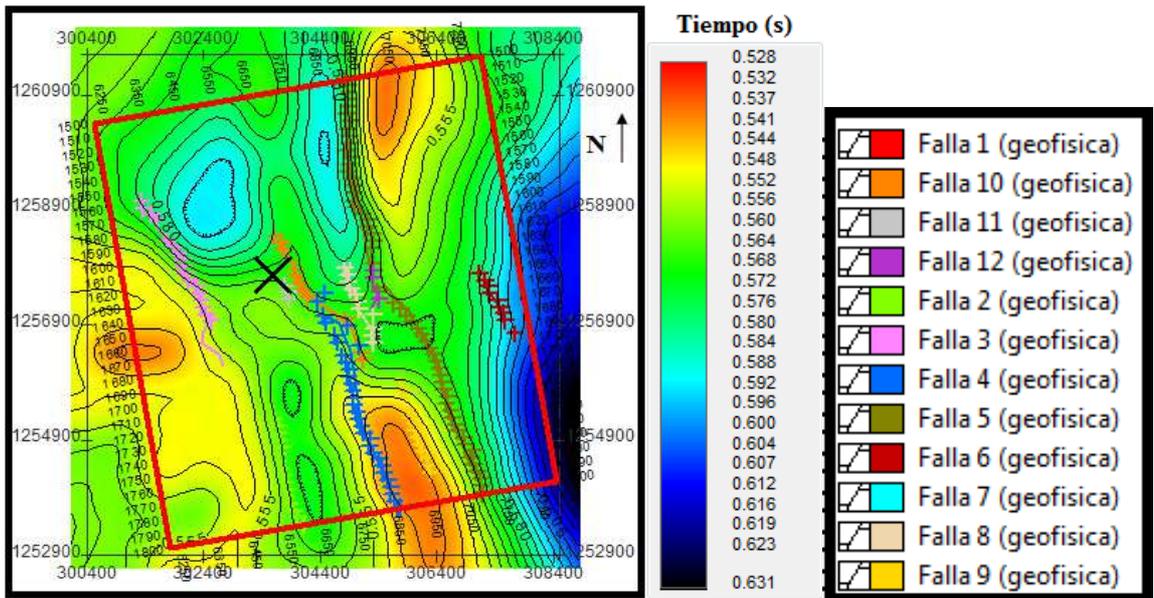


Figura 5. 3. Mapa en tiempo del horizonte 4 a 0.560 s.

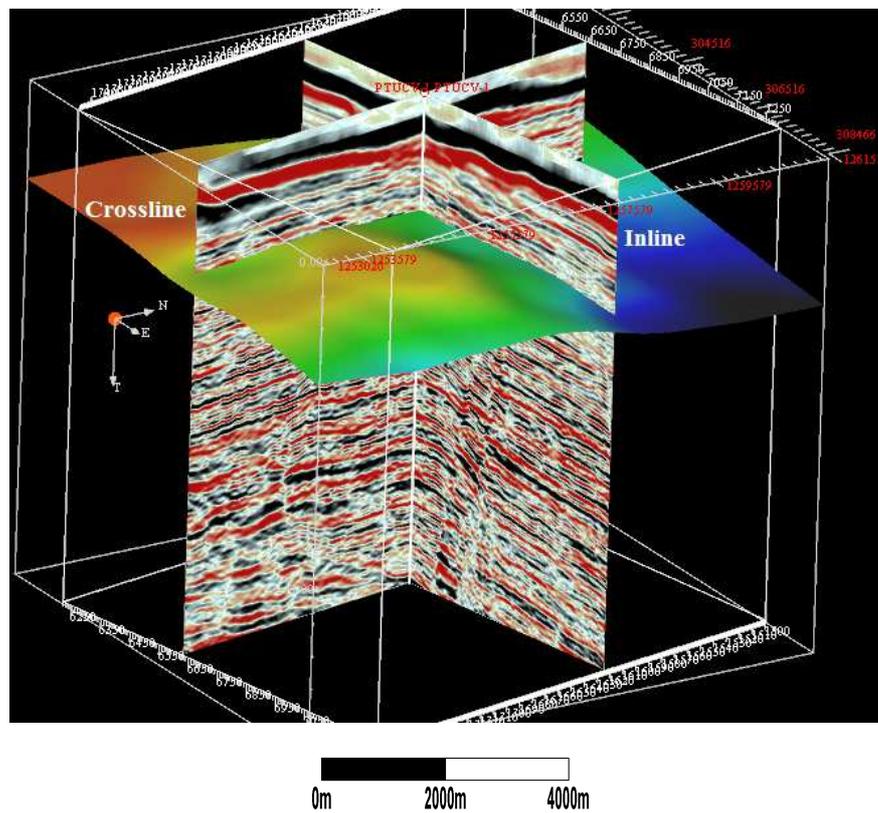
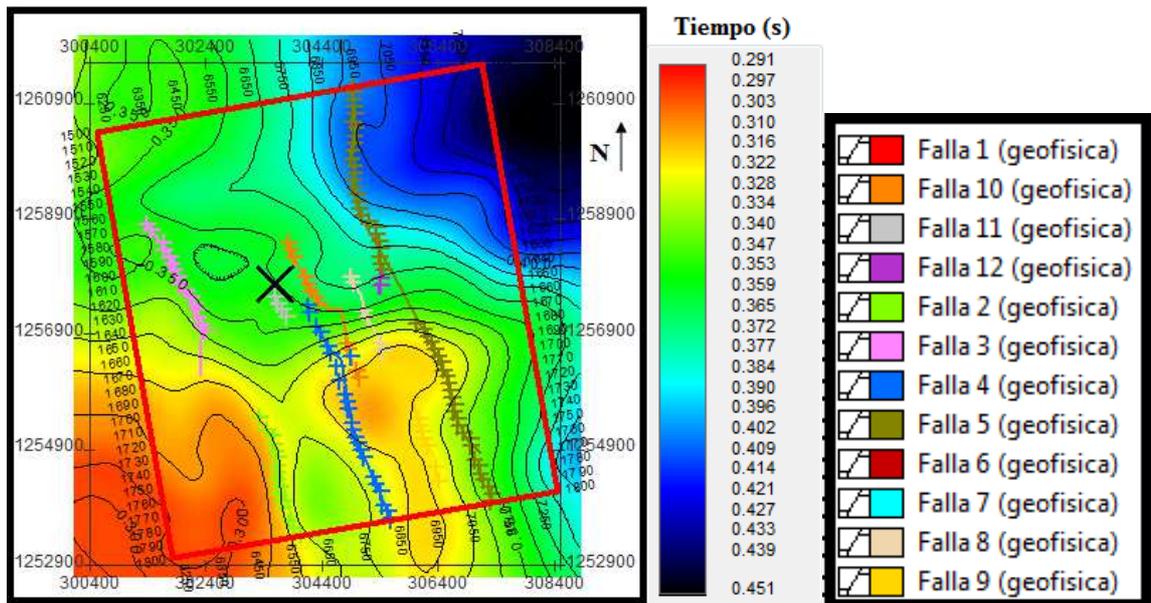


Figura 5. 4. Mapa en tiempo del horizonte 3 a 0.350 s.

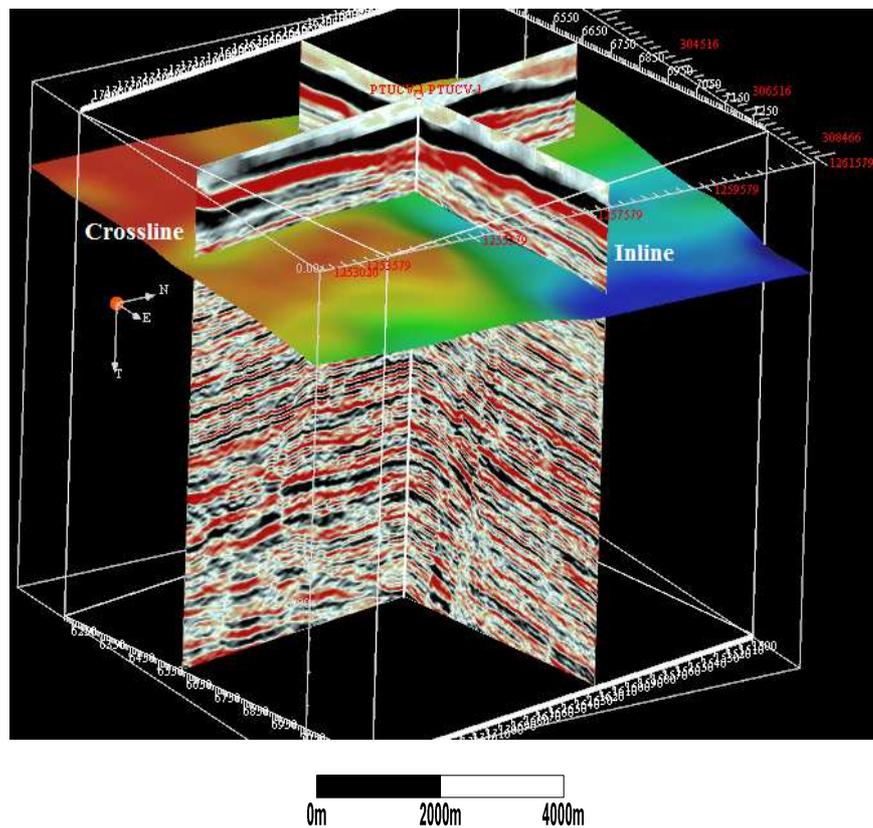
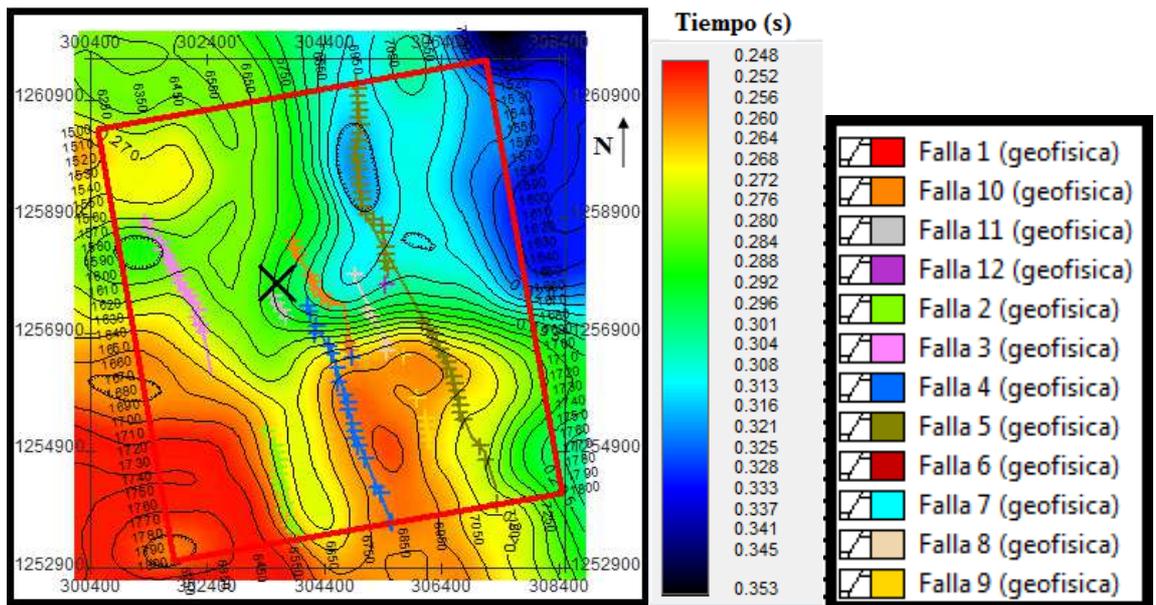


Figura 5. 5. Mapa en tiempo del horizonte 2 a 0.270 s.

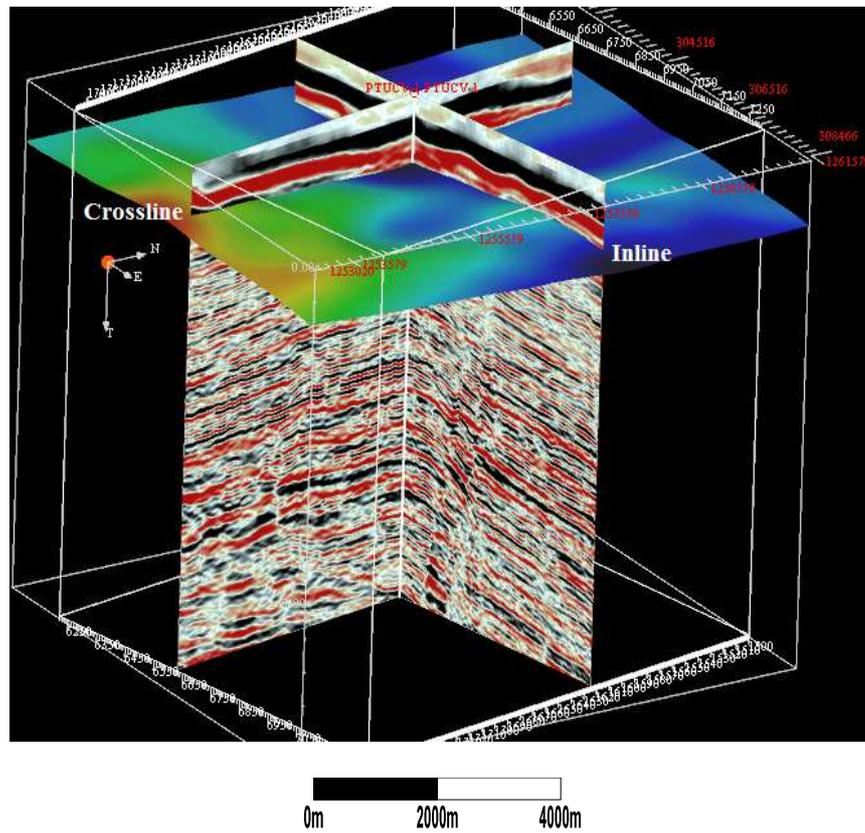
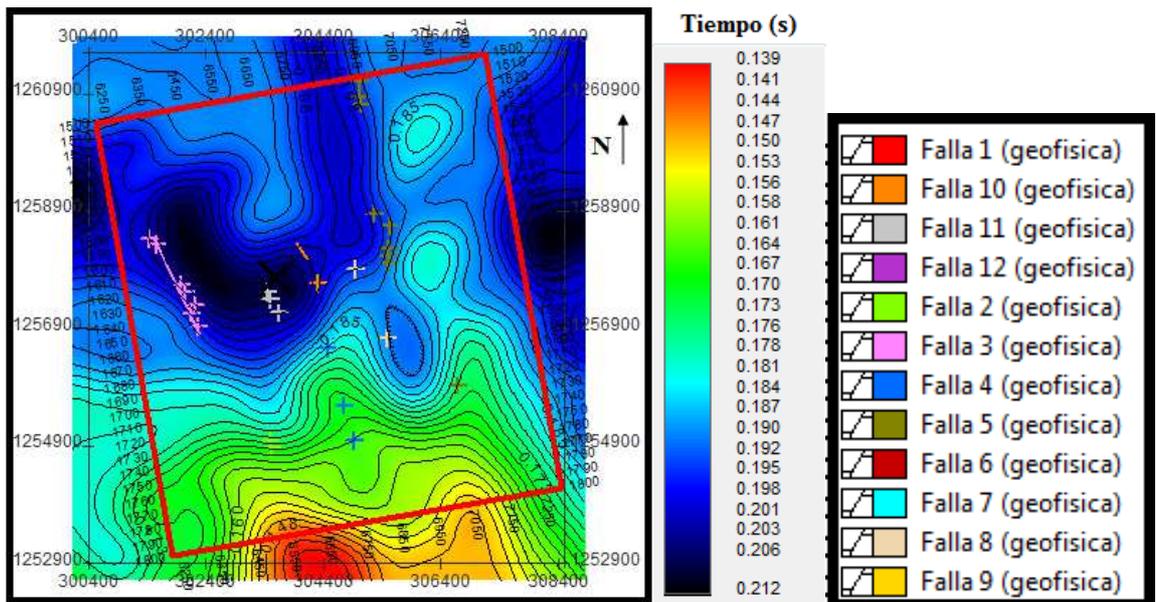


Figura 5. 6. Mapa en tiempo del horizonte 1 a 0.200 s.

La zona interpretada se caracteriza por la presencia de fallas, (12 en total) con una orientación preferencial en dirección NO-SE y movimiento aparente normal (Figura 5.7).

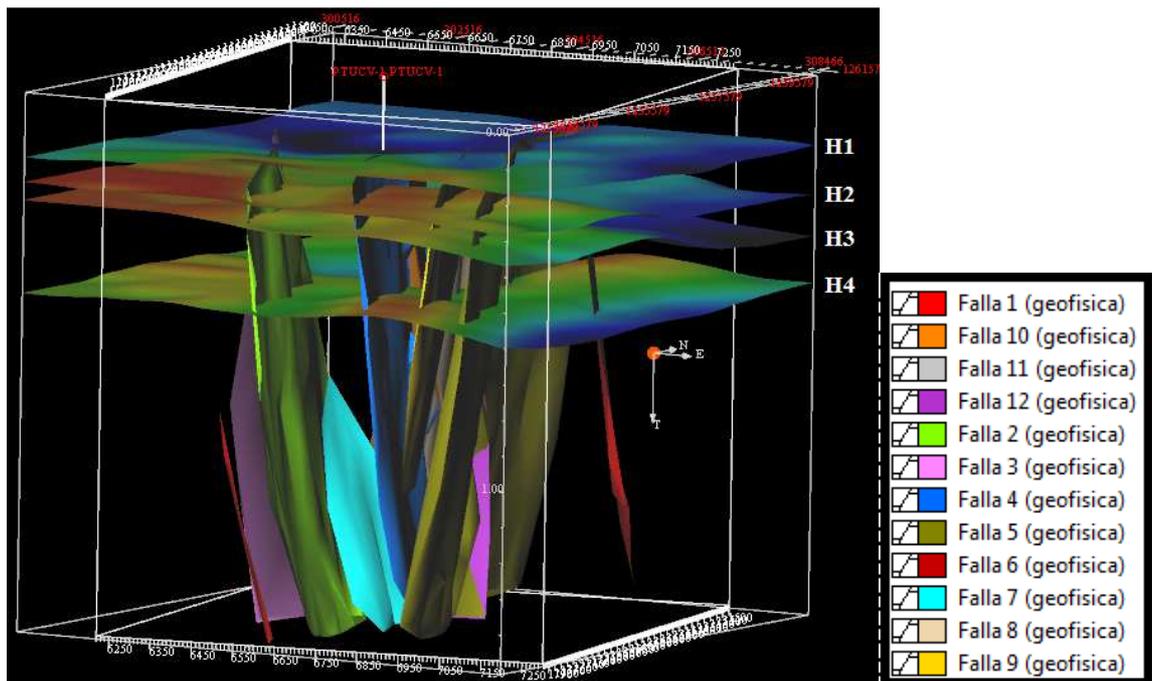


Figura 5. 7. Visualización 3D de los horizontes y fallas interpretadas.

5.2 GENERACIÓN DE VOLÚMENES Y ESTIMACIÓN DE ATRIBUTOS

5.2.1 Atributos de descomposición espectral

En esta sección se presentan los resultados más importantes aplicando los atributos basados en la transformada de Fourier y Morlet sobre cada horizonte interpretado generando 20 mapas con las frecuencias mas relevantes espectral (8 Hz, 10 Hz, 12 Hz y 14.3 Hz) siguiendo el análisis.

Estas amplitudes van perdiendo resolución en las frecuencias de 8, 12 y 14.3 Hz (ver Figuras Anexos 1.1, 1.2 y 1.3) , por esta razón solo se presenta el mapa a 10 Hz, siendo esta la más característica, siguiendo el análisis espectral aplicado, donde se presento mayor amplitud.

La resolución sísmica vertical asociada a estos horizontes es de 79,53 pies (24,24 m) y 39,76 pies (12,12 m), por lo que para aquellos espesores por debajo del límite de resolución se podrá observar efecto de entonación.

El análisis de los volúmenes de frecuencias se realiza tomando en cuenta las respuestas de máxima energía asociadas a amplitudes altas y diversas anomalías que presentan características estratigráficas.

En la figura 5.8 se observa una anomalía de amplitud alta hacia la zona somera del área (horizonte 1) y luego se observa hacia zonas mas profundas (por debajo del horizonte 4). Estas anomalías pueden responder a cambios estructurales o a presencia de arenas con posibles fluidos (gas biogénico).

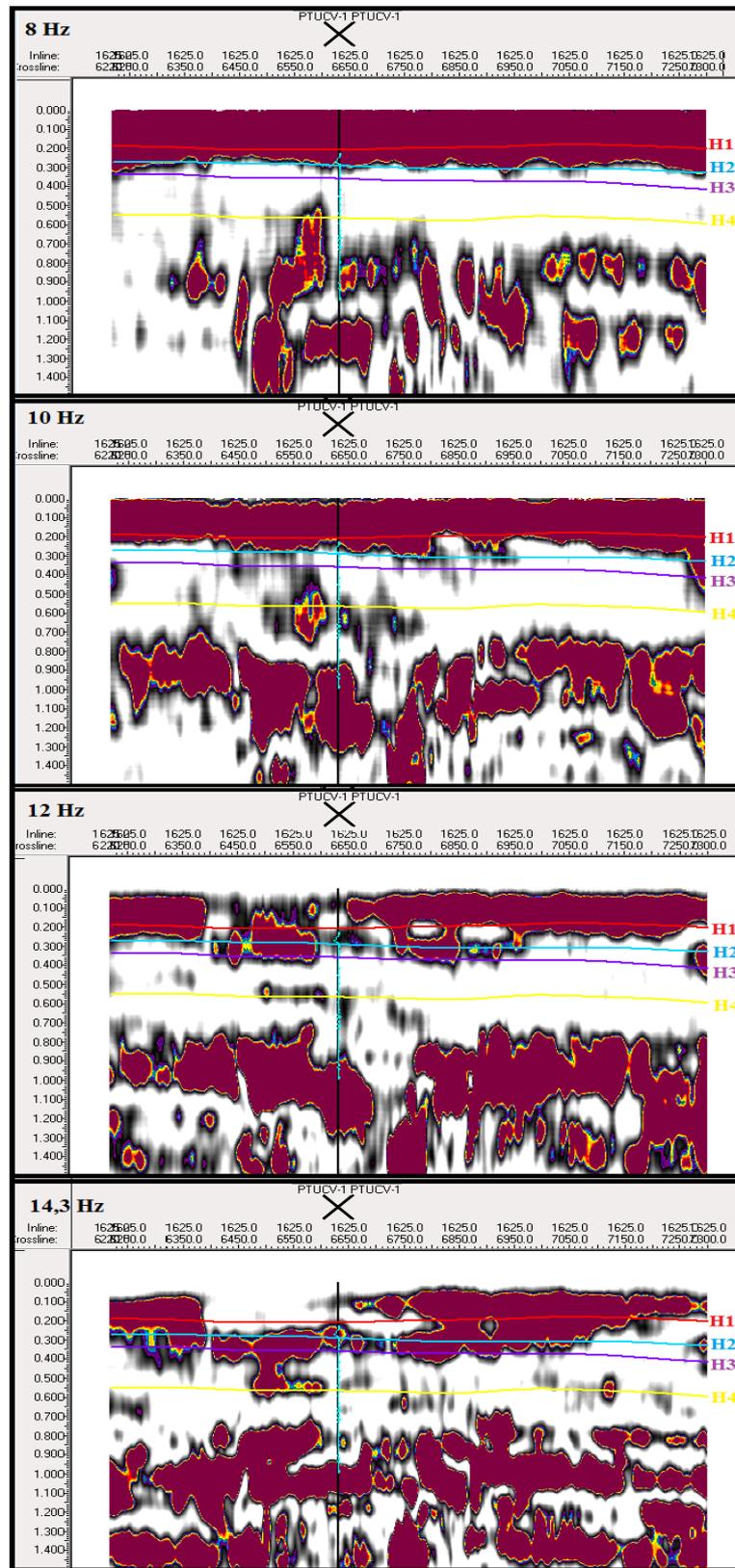


Figura 5. 8. Atributo de descomposición espectral para las frecuencias de 8, 10, 12 y 14,3 Hz.

Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 4 (horizonte más profundo a 0,560 s o 594,36 m)

En el mapa de atributos (Figura 5.9), utilizando la superposición de las transformadas de Fourier y Morlet, no se observan anomalías resaltantes, solo se presentan amplitudes bajas, característico de zonas que pueden absorber la energía y cambiar las amplitudes de altas a bajas; estas son causadas por la atenuación de energía de altas frecuencias y la zona se podría encontrar por debajo de una anomalía de alta amplitud asociado con posibles acumulaciones de gas (de origen biogénico para el área de estudio).

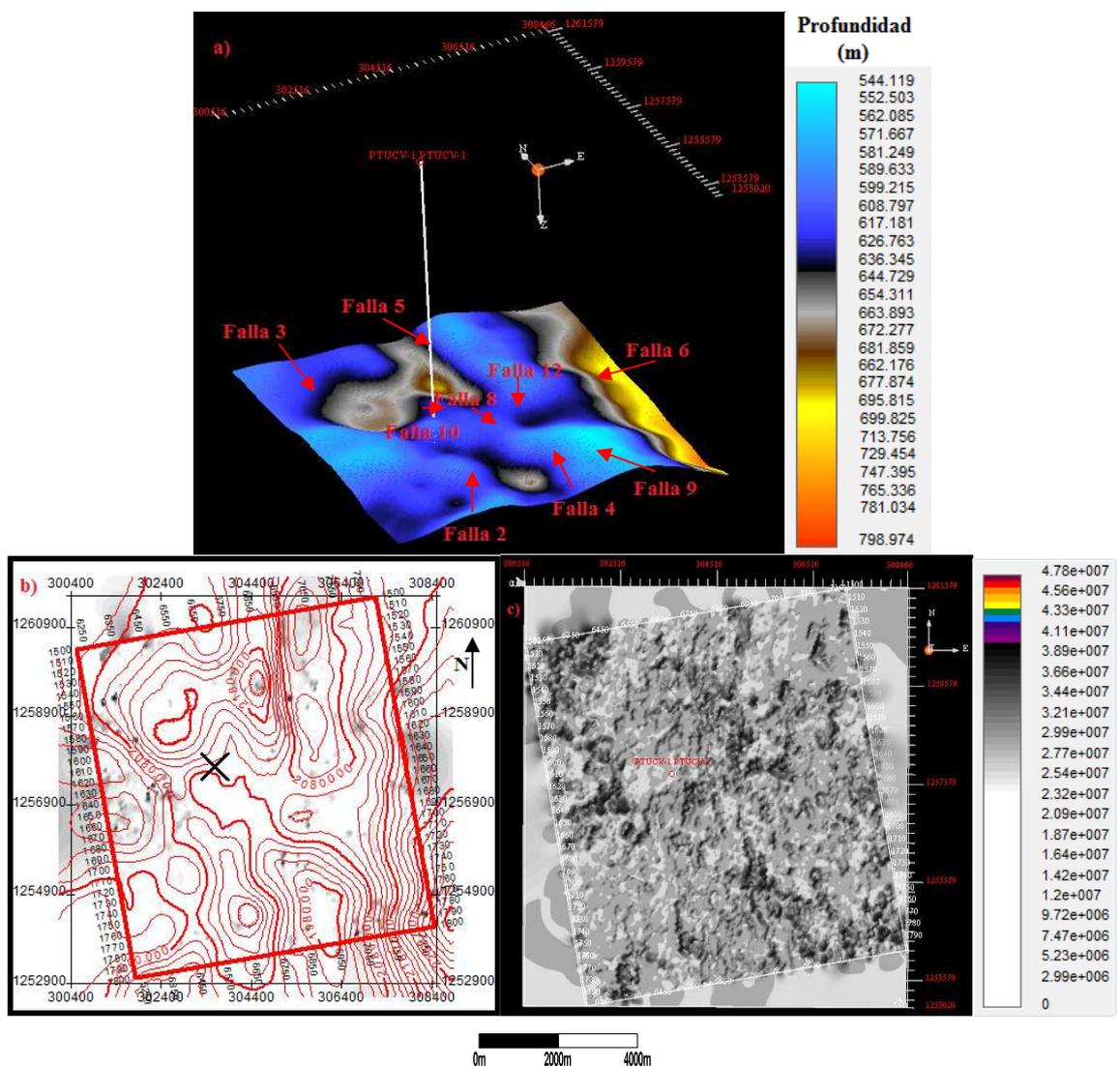


Figura 5.9. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 4. a) Mapa estructural del horizonte 4. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.

Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 3 (0,350 s o 365,76 m)

En la figura 5.10 se observa una alineación de cuerpos de amplitudes altas que pasan por el pozo, siguen la orientación de la estructura presente y que son afectadas por las fallas 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11 y 12. Este cuerpo espectral responde únicamente a las variaciones de las estructuras presentes y no representa una anomalía causada por presencia de gas biogénico.

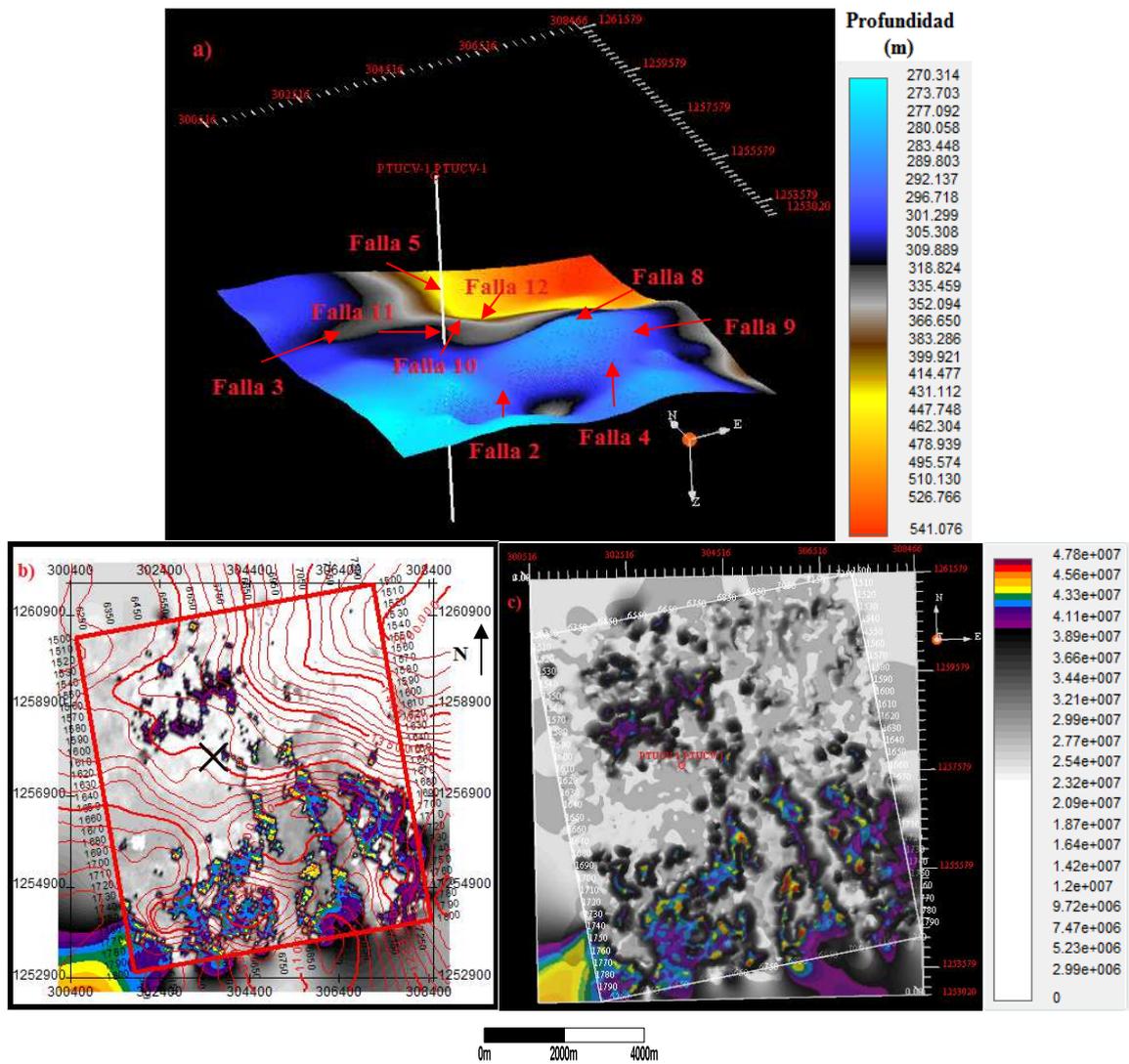


Figura 5. 10. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 3. a) Mapa estructural del horizonte 3. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.

Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 2 (0,270 s o 274,32 m)

En la figura 5.11 se observa una alineación de cuerpos de amplitudes altas que pasan por el pozo y que se ubican en la mayoría del área de estudio. Estas siguen la estructura a nivel somero y son afectadas por las fallas 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11 y 12. Este cuerpo espectral, que representa un mayor espesor, responde únicamente a variaciones de las estructuras presentes y no representa una anomalía causada por presencia de gas biogénico.

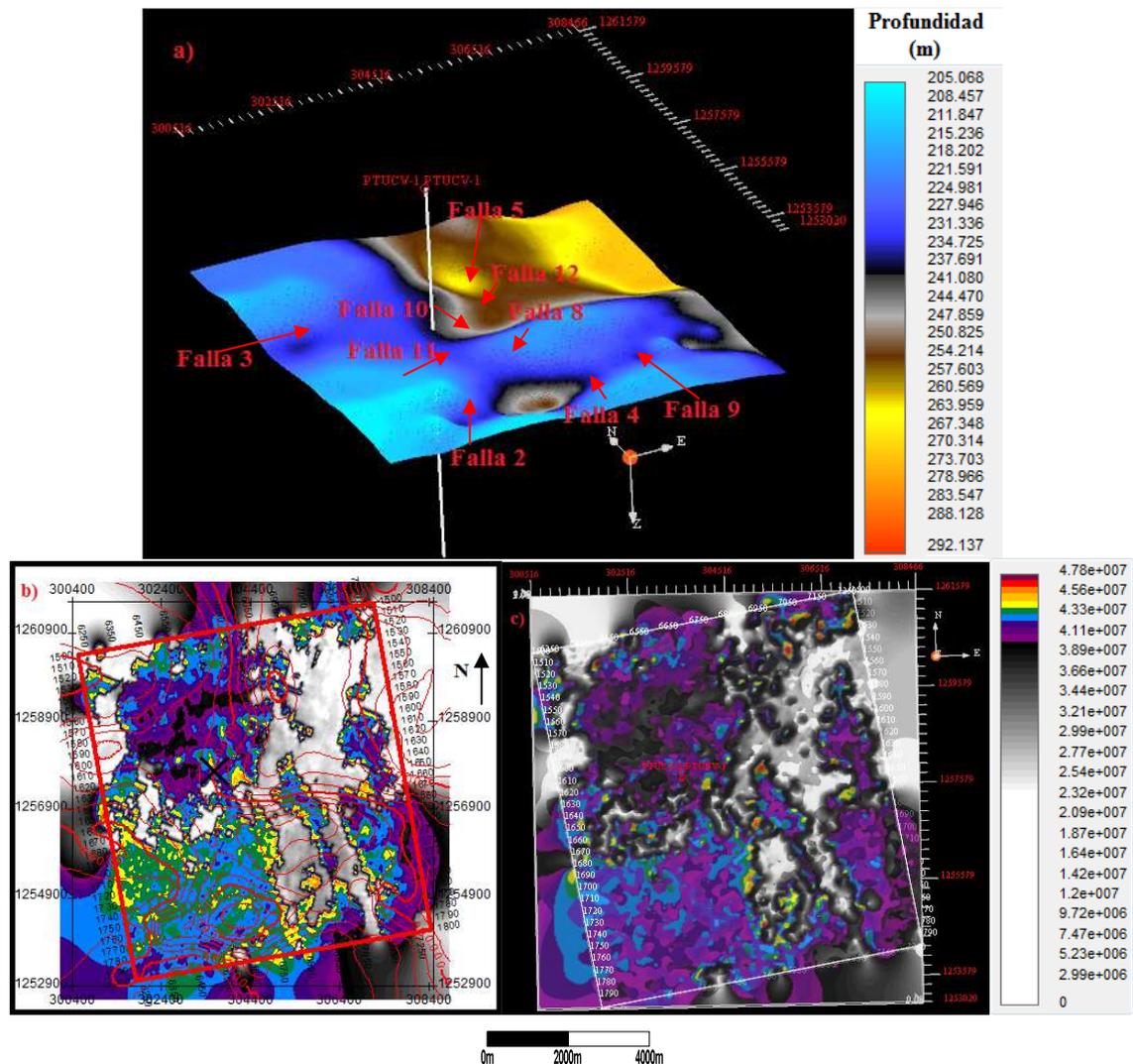


Figura 5. 11. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 2. a) Mapa estructural del horizonte 2. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.

Aplicación de las transformadas de Fourier y Morlet con una frecuencia de 10Hz para el Horizonte 1 (0,200 s o 213,36 m)

Según el estudio de descomposición espectral (transformada de Fourier y Morlet) se presenta en la figura 5.12, una anomalía de amplitudes altas con una tendencia que por lo general se asocia a canales o paleocanales, que tiene una orientación hacia el noreste, siguiendo la alineación de la Falla 5, Falla 10 y que posee ciertas características estratigráficas. Esta anomalía, (que podría considerarse como un conjunto de canales con sus llanuras de inundación), mide aproximadamente 1825,13 m de ancho y 6732, 17 m de largo.

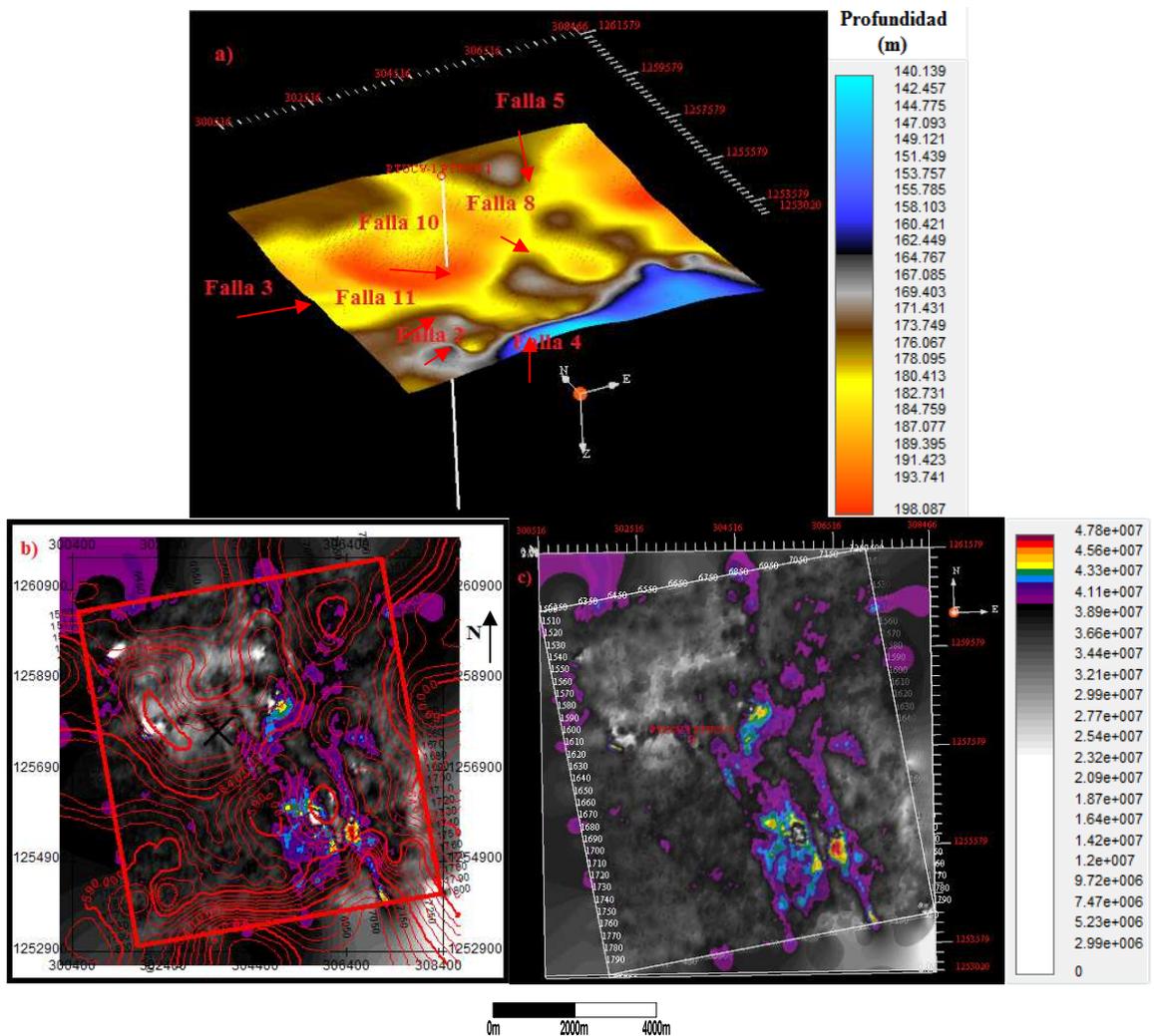


Figura 5. 12. Mapa de superposición de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 1. a) Mapa estructural del horizonte 1. b) Visualización del atributo de descomposición espectral con los contornos del mapa estructural. c) Superposición de la transformada de Fourier y Morlet a 10Hz.

Se pueden observar que los cuerpos con anomalías identificadas, cuando se asocian a cada mapa cambian de extensión lateral a medida que cambia la frecuencia. Si el contenido de frecuencia es mayor, las estructuras más delgadas serán entonadas y se identificarán como amplitudes altas; si el contenido de frecuencia es bajo, las estructuras estratigráficas más gruesas son las que se resaltarán (Partika, L y Garossino, P., 2003).

La anomalía de amplitud correspondiente al mapa de frecuencias de 10 Hz se asocia con un cuerpo más grueso que lo que se encuentra a su alrededor. Esto también se aprecia al comparar los mapas de frecuencia de 8, 12 y 14.3 Hz, en donde los valores anómalos mayores a frecuencias altas se disponen alrededor del área de forma más extensa y dominante. Un aspecto a observar es que el carácter anómalo de estas zonas desaparece en las frecuencias de 35, 41.8 y 50 Hz lo que nos da seguridad de inferir que las anomalías identificadas están asociadas a cambios de impedancia elástica claros y no a efectos de entonación de capas delgadas (Kidd, Montilla y Pomonti, 2007); de existir efectos de entonación, la anomalía aun se observaría a este rango de frecuencia (Sinha *et al.*, 2005).

Descomposición espectral y aplicación de multiatributos

En esta sección se presentan los resultados de la superposición de los volúmenes de descomposición espectral para las frecuencias de 10, 12 y 14,3 Hz. Se utilizó la técnica de color RGB, en donde con el rojo se resaltan las anomalías positivas del cubo de 10 Hz, con el color verde las del cubo de 12 Hz y con el color azul las del cubo de 14,3 Hz; las curvas de opacidad fueron modificadas para resaltar las amplitudes positivas más altas. De esta forma se puede evaluar el comportamiento y relación extensional de las respuestas de estos atributos.

En la figura 5.13 se presenta el horizonte 4 compuesto por las amplitudes resaltadas. Se observa una superposición de las amplitudes anómalas de los tres volúmenes en toda el área sin definición exacta de un cuerpo.

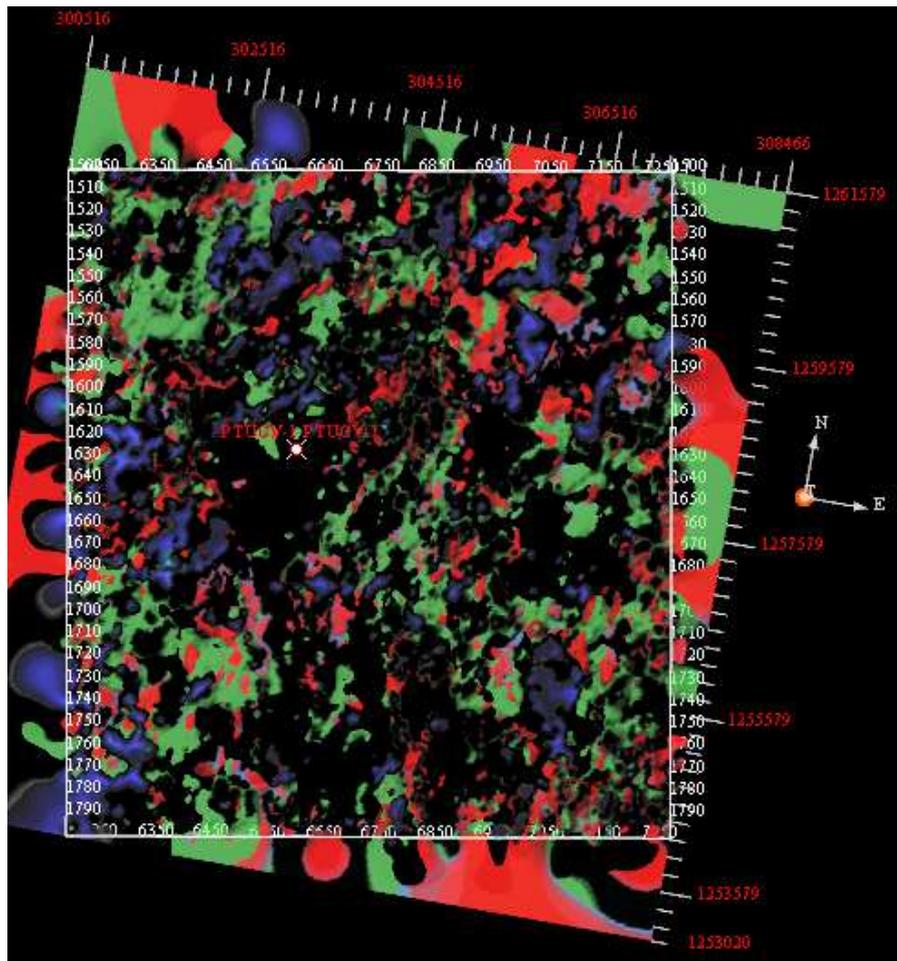


Figura 5. 13. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 4.

En la figura 5.14 se presenta el horizonte 3 compuesto de las amplitudes resaltadas. Se observan dos geofomas resaltados con un círculo amarillo, que presenta características estratigráficas de amplitudes anómalas positivas hacia el sureste y suroeste del área.

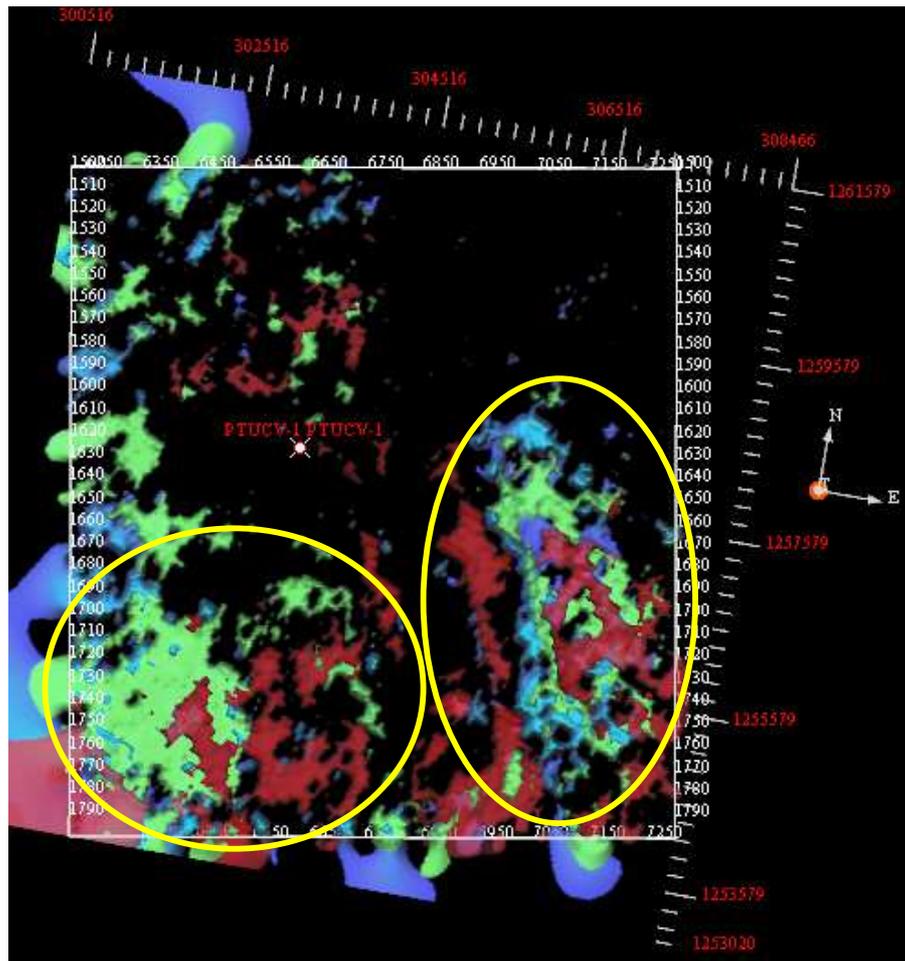


Figura 5. 14. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 3, donde se observan dos geoformas resaltados con un círculo amarillo.

En la figura 5.15 se presenta el horizonte 2 compuesto por las amplitudes resaltadas. Se observan tres geoformas resaltadas con un círculo amarillo, ubicadas al suroeste, sureste y noroeste del área y que presentan características estratigráficas. Las frecuencias de 10 y 12 Hz tienen una extensión mayor que la frecuencia de 14,3 Hz a lo largo de la zona de estudio. Esto puede ser producto de la variación de espesor temporal de las capas en el área, en donde la zonas con amplitudes a frecuencias más bajas podrían tener espesores mayores que aquellas a mayores frecuencias (Partika, L y Garossino, P., 2003).

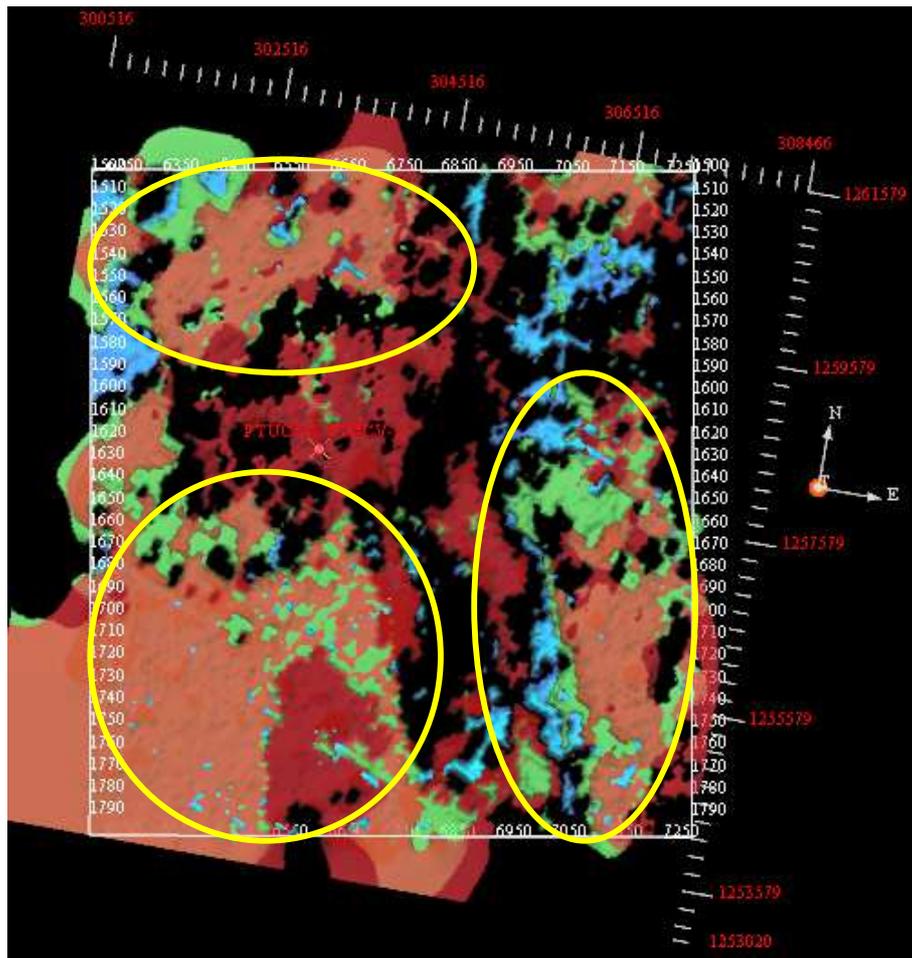


Figura 5. 15. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 2, donde se observan tres geoformas resaltados con un círculo amarillo.

En la figura 5.16 se presenta el horizonte 1 (siendo este el más somero) compuesto por las amplitudes resaltadas. Se observa una geoforma resaltado con un círculo amarillo, que sigue una orientación N-S en el área de estudio y presenta características estratigráficas. Las frecuencias de 12 y 14,3 Hz tienen una extensión mayor que la frecuencia de 10 Hz. Esto puede ser producto de la variación de espesor temporal de las capas en el área (Partika, L y Garossino, P. 2003).

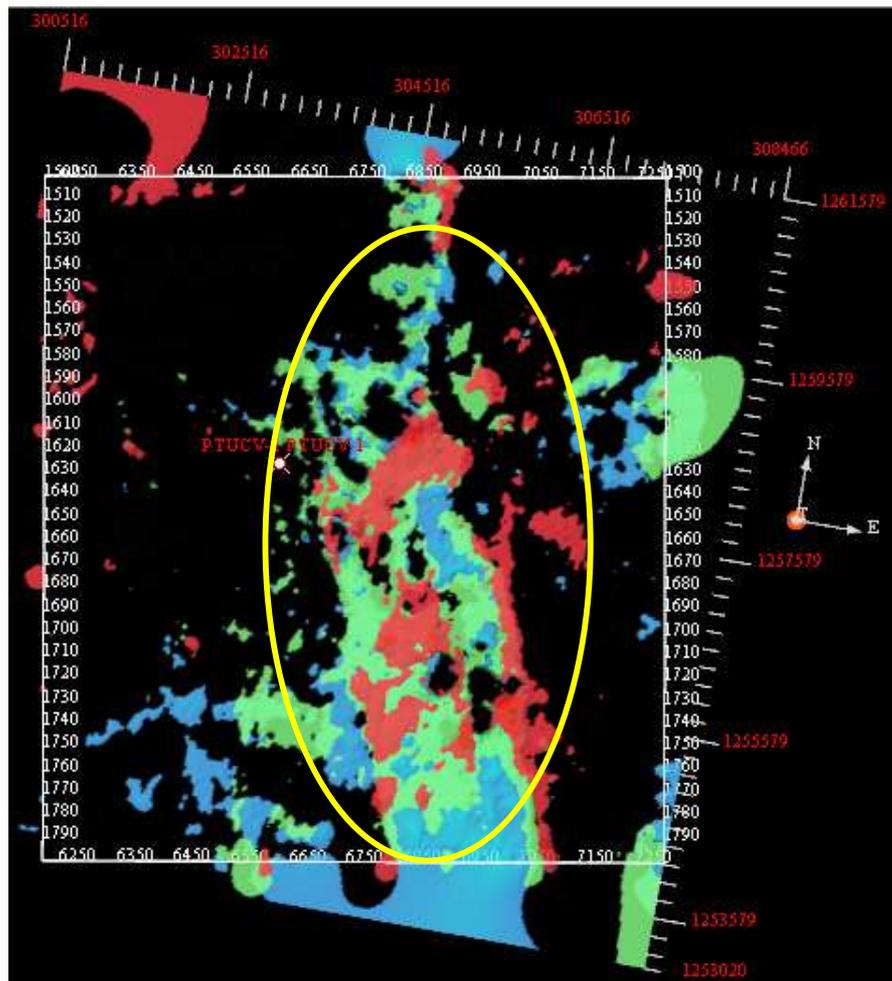


Figura 5. 16. Atributo RGB de los volúmenes a 10, 12 y 14,3 Hz aplicado al horizonte 1, donde se observa una geoforma resaltado con un círculo amarillo.

5.2.2 Generación de volúmenes de atributos de similitud y coherencia

Para facilitar la interpretación de las fallas se hizo el uso del atributo de similitud, coherencia sísmica y atributos geométricos, a través del cual se pueden realizar cortes en tiempo (Figura 5.17) para identificar las fallas existentes. Con esta herramienta se logró corroborar la ubicación de algunas fallas que ya habían sido identificadas previamente en la sísmica, para un reconocimiento de 12 fallas en total, siendo en su mayoría transcurrentes normales.

Atributos de Varianza de Similitud y Buzamiento instantáneo

En la figura 5.18 se puede apreciar como el atributo de varianza de similitud define muy bien las fallas presentes en la zona de estudio mostrando amplitudes altas alrededor de ellas. También se puede observar que tres de ellas atraviesan el horizonte 1 y que una de ellas pasa por el pozo aproximadamente a los 1050 ms. Estas fallas podrían ser vía de escape hacia la superficie de algún fluido (gas biogénico) que pudiera encontrarse a niveles mas profundos donde estas se intensifican.

Siguiendo con lo anterior, el atributo de buzamiento instantáneo (Figura 5.19) identifica las discontinuidades presentes en el área y al poseer mayor resolución resuelve mejor la sísmica. Según con lo observado anteriormente, se presentan con amplitudes mayores ciertas discontinuidades que siguen la tendencia de las fallas, esto podría corroborar la vía de escape de los posibles fluidos (gas biogénico) atrapados en zonas profundas que pueden migrar hacia la superficie. También se observa que estas fallas presentan poco o ningún salto estructural hacia la zonas mas someras del área.

Las fallas 1, 2, 3, 4, 6, 7, y 11 buzanan hacia el este y las fallas 5, 8, 9, 10 y 12 buzanan al oeste del área de estudio, todas se comportan en su mayoría con movimiento transcurrente normal, siguiendo una orientación preferencial aproximadamente NO-SE.

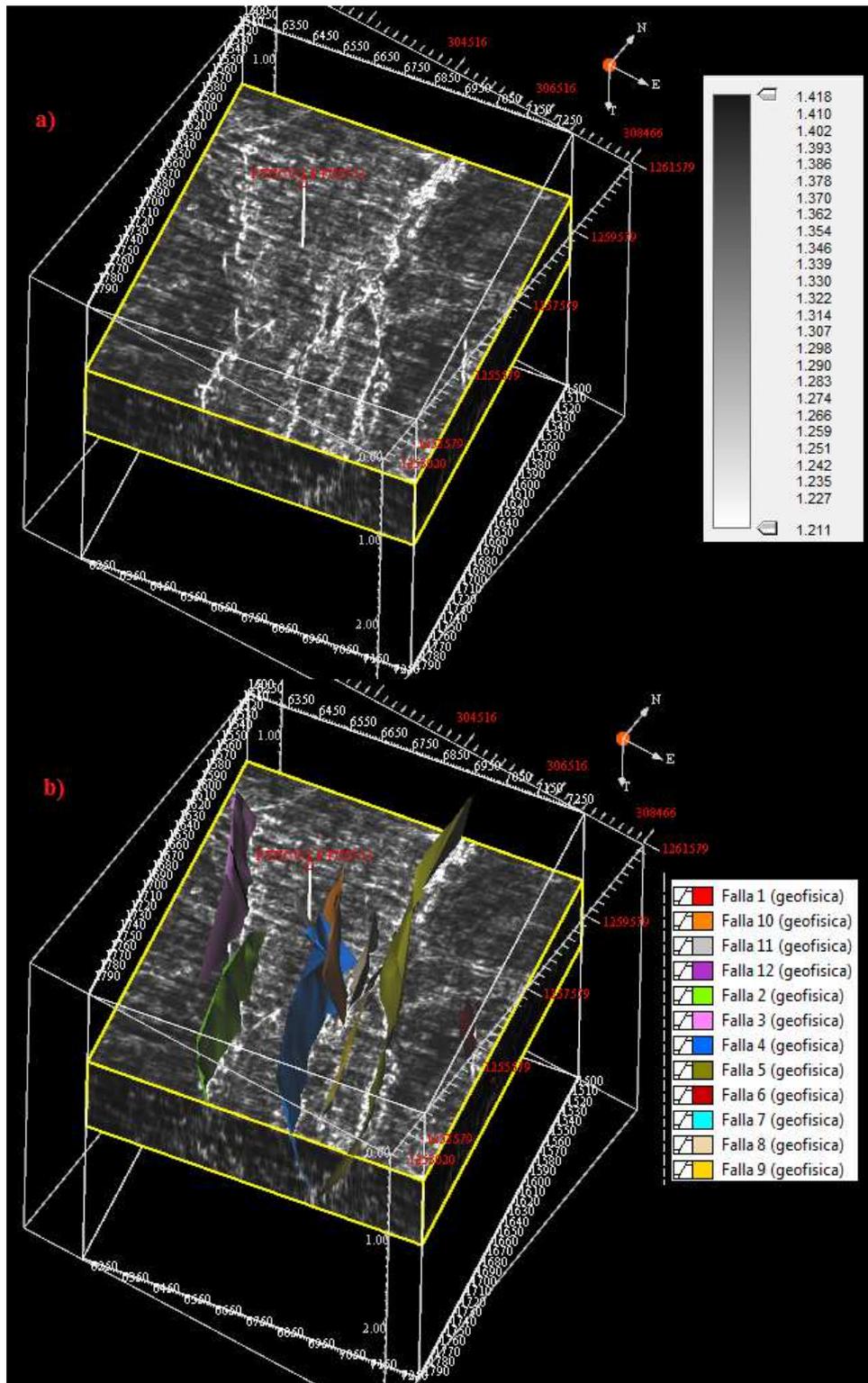


Figura 5. 17. Cubo de Similitud y coherencia sísmica. Las líneas blancas representan valores mínimos debido a la continuidad de los reflectores causada por la presencia de fallas.

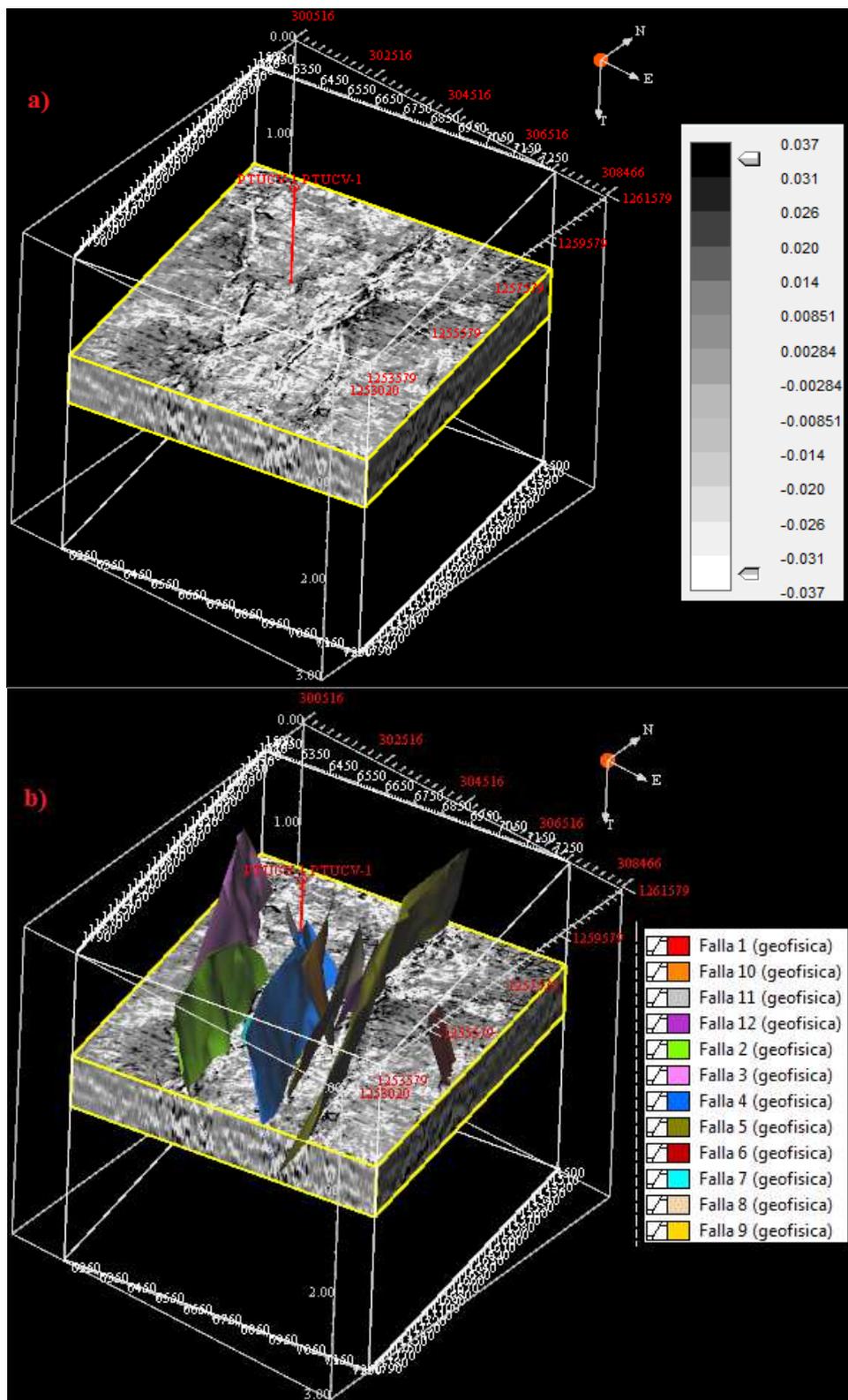


Figura 5. 18. Atributo de Varianza de similitud donde se definen muy bien las fallas presentes en el área. a) Atributo visualizando las fallas con amplitudes altas y b) atributo identificando las fallas.

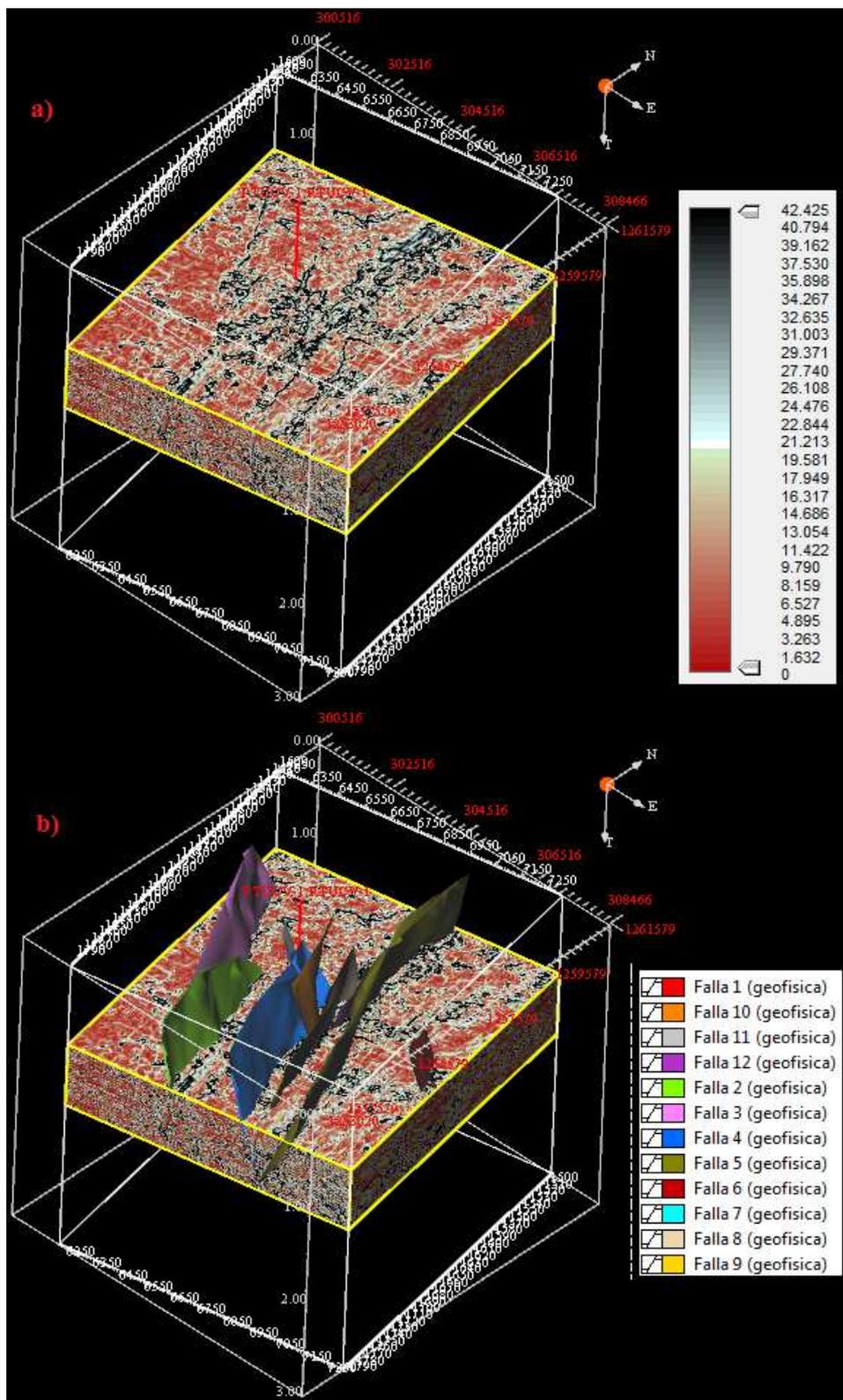


Figura 5. 19. Atributo de Buzamiento instantáneo. a) Atributo visualizando las fallas con amplitudes altas y b) atributo identificando las fallas y los saltos estructurales.

5.2.3 Integración de atributos

Antes de realizar la comparación entre los volúmenes generados por descomposición espectral y la correlación de parámetros petrofísicos con los atributos basados en la Transformada Hilbert y atributos geométricos para identificar cambios litológicos o la presencia de fluidos (gas biogénico), es importante definir las facies litológicas y realizar gráficos cruzados de atributos (“*crossplots*”) utilizando la información del pozo PTUCV_1, para así ver los perfiles que tienen influencia sobre las propiedades físicas de las rocas.

Definición de litologías

Con los registros del pozo PTUCV_1 y la evaluación petrofísica se encontró la existencia de 5 litologías bien definidas; arenas de grano grueso, areniscas de grano medio a fino, lutitas, caliza y lignitos.

Se puede observar que la litología predominante de la Formación Urumaco son las arenas de grano medio a fino, lutitas y materia orgánica vegetal, en parte proveniente de un sistema fluvial que desemboca en laguna. Las facies de lutitas son la segunda en presentarse en la formación indicando una reducción en el aporte de sedimentos respecto al miembro inferior, mientras que el miembro superior es de carácter regresivo, con un aumento en el aporte de sedimentos y el desarrollo de una llanura fluvial en el sector occidental del área.

En la figura 5.20 se muestran los registros de rayos gamma (GR), Sónico (DTCO), potencial espontáneo (SP), fracción de arcilla y fracción de arena, así como una descripción litológica producto de la utilización de los criterios de clasificación. De esta manera, entre 900 y 1150 pies, se puede apreciar un paquete de 250 pies (76.2 m) conformado por 70% de arenas gruesas a grano medio, bioclástica con algunas trazas de mica, yeso, fragmentos fósiles de vertebrados y un 30% de lutitas, lo que indica una porosidad regular presente en esta área del pozo.

Entre 1150 y 1600 pies (paquete de 450 pies) la litología predominante es de 100% arenas de grano medio a fino con moderada consolidación, bien escogidas, con fragmentos de fósiles, carbón y mica abundante.

Para las profundidades entre 1600 y 2400 pies (paquete de 800 pies) predomina una litología de un 60% de lutitas variables, generalmente de color gris, frecuentemente limosa, intercalada con delgadas areniscas con costras de oxidación y niveles carbonosos. Las lutitas moderadas rojas o marrones, portadoras de vertebrados, son más escasas y delgadas. El otro 40 % esta compuesto de intercalaciones de arenas de grano medio a fino, con presencia de trazas de mica, pirita, carbón y glauconita.

Siguiendo con lo anterior, se presenta una litología de 70% de arenas de grano medio a fino y un 30% de lutitas moderadas rojas portadoras de restos de vertebrados variados: reptiles, mamíferos y peces, así como coprolitos y madera; a profundidades de 2400 a 2900 pies (paquete de 500 pies).

Las calizas presentes varían de areniscas conchíferas hasta calizas coquinoides consolidadas arenosas, frecuentemente bioturbadas, con concreciones ferruginosas y costras ferruginosas en el tope de las capas y representan el 30% a una profundidad de 2190 pies. Además se presentan areniscas de grano fino a medio, friables, masivas, de contacto basal erosivo, a veces con material conglomerático y clastos de arcilla en la base y costra de oxidación en el tope; bioturbadas, con poca extensión lateral y generalmente asociadas a capas carbonosas a una profundidad entre 2910 y 3050 pies (paquete de 860 pies). Otro tipo es de grano fino, en capas inferiores a 3 m de espesor, laminadas o con estratificación paralela, gruesas costras de oxidación en el tope y contactos abruptos.

Por último se observa un paquete de 1250 pies compuesto por 85% de lutitas, las más comunes y de mayores espesores individuales son de color gris, macizas, de fractura concoidea, muy escasamente microfossilíferas, a veces limolíticas y ocasionalmente portadoras de madera fósil. Las segundas son de color marrón, laminadas, extremadamente ricas en material vegetal finamente fragmentado, a veces carbonosa.

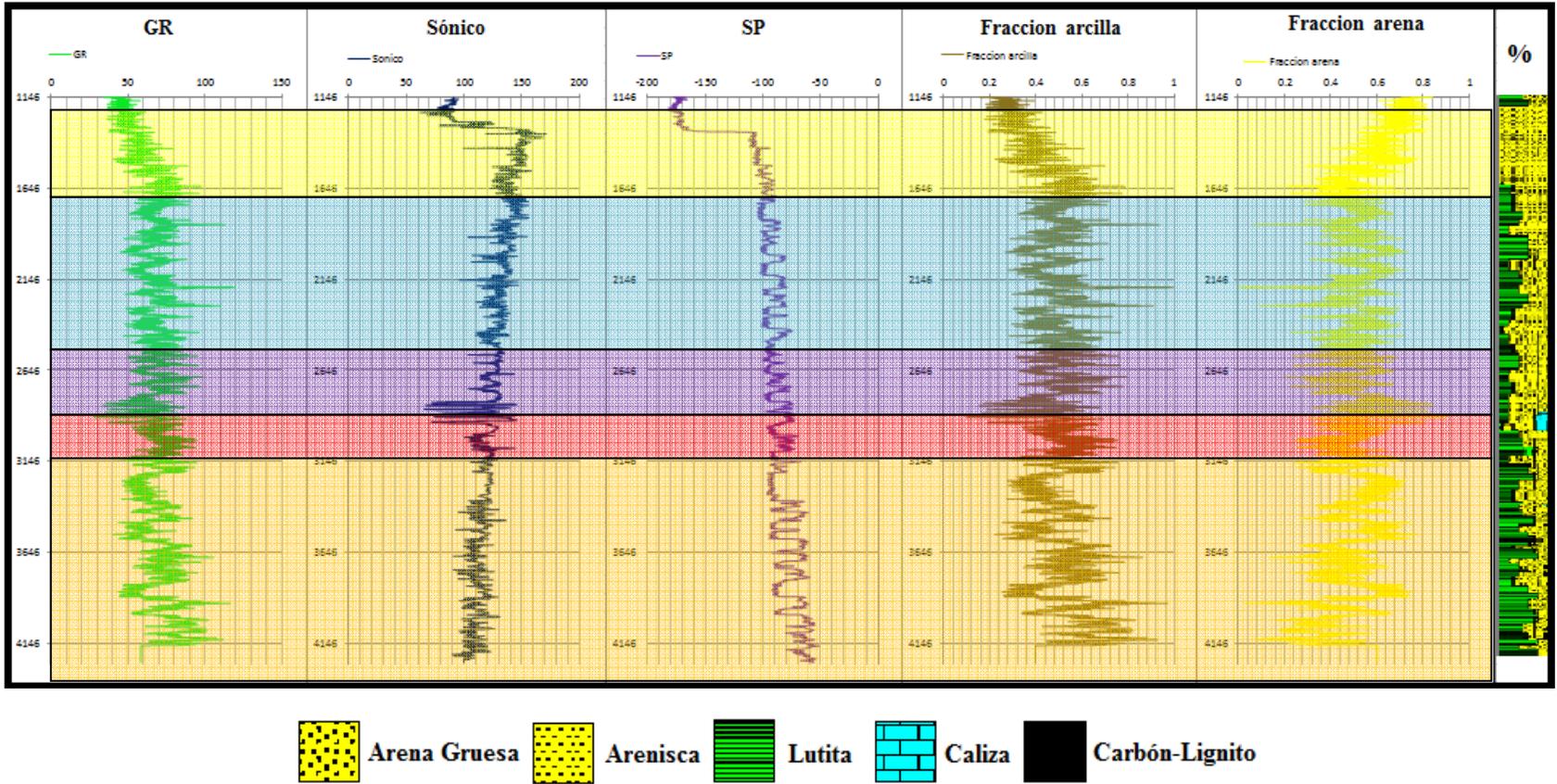


Figura 5. 20. Descripción litológica presente en el área de estudio. La zona amarilla representa un paquete de arenas de grano medio de 137.025 m, la zona azul representa un paquete de 243.84 m de lutitas variadas y arenas, la zona moradas representa un paquete de 152.4 m de arena y lutita, la zona roja representa un paquete de arenas, lutitas y caliza de 262.12 m y la zona naranja representa un paquete de 381 m de lutitas y arenas.

Gráficos cruzados de atributos (Crossplots)

Para identificar cambios litológicos o la presencia de fluidos (agua, petróleo y gas), es importante realizar un estudio de factibilidad utilizando la información del pozo, para así ver los perfiles que tienen influencia sobre la impedancia acústica.

En la figura 5.21 se puede observar que los menores valores de impedancia acústica y gamma ray corresponden a arenas con fluido, mayores valores de gamma ray corresponden a lutitas y los mayores valores de impedancia acústica y menores valores de gamma ray corresponden a arenas con poco contenido de lutita o presencia de caliza. Estas lutitas y arenas con posible fluido se encuentran a profundidades entre 1500 y 4000 pies.

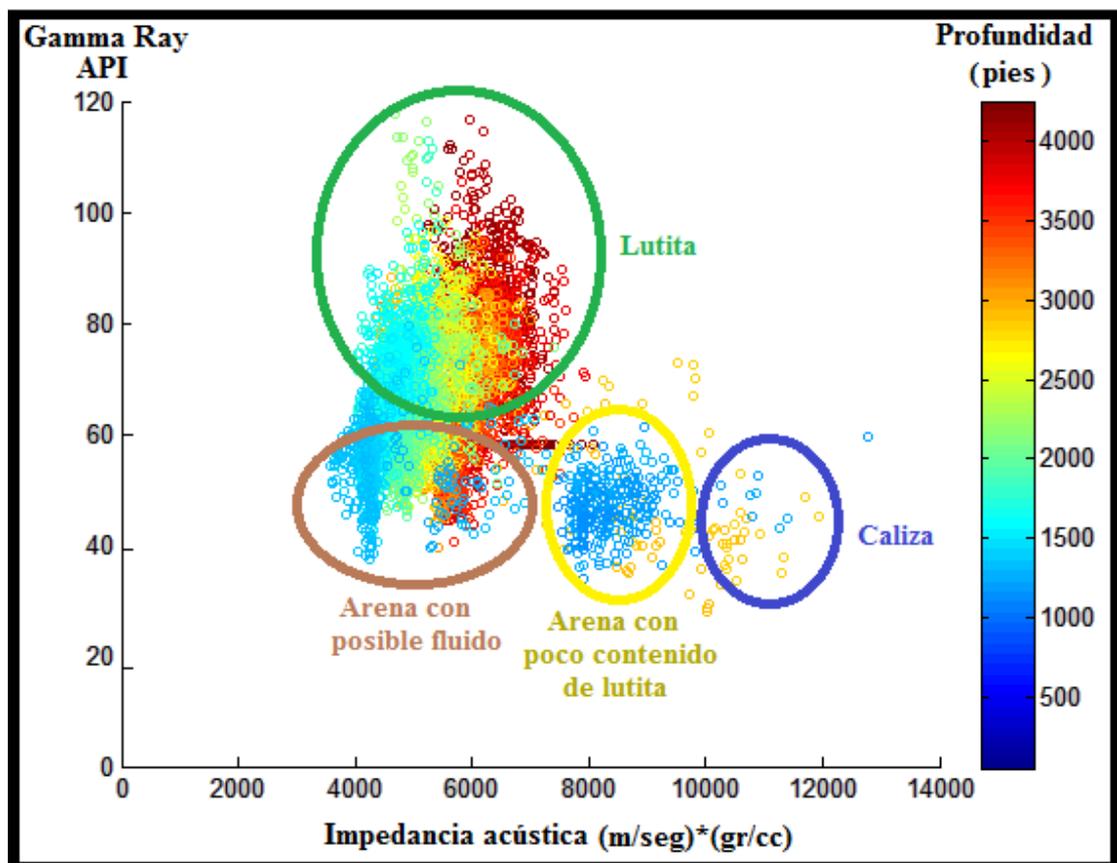


Figura 5. 21. Gráfico cruzado Impedancia acústica vs. Gamma ray.

En la figura 5.22 se puede observar, con menores valores de impedancia acústica, un mayor contenido de lutita y, con valores mayores de impedancia acústica, menor contenido de lutita (posibles arenas).

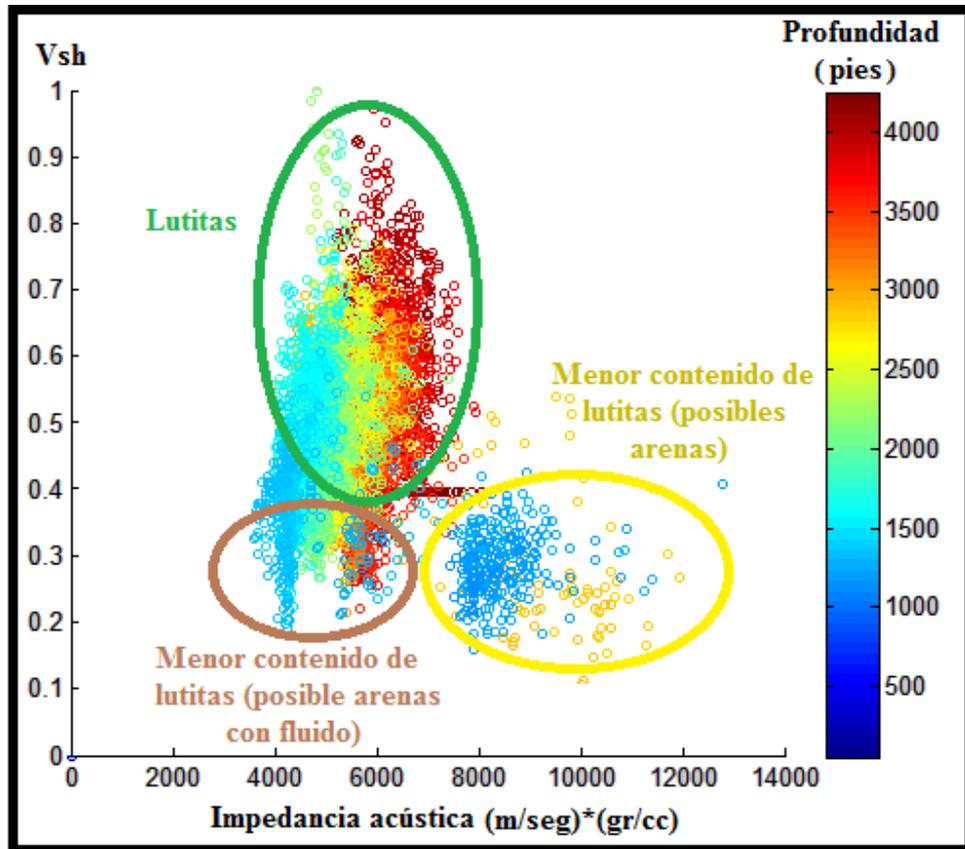


Figura 5. 22. Gráfico cruzado de Impedancia acústica vs. Vsh.

Se puede observar en la figura 5.23 un contenido de lutitas con densidades entre 2.1 y 2.3 gr/cc, areniscas entre 1.9 y 2.1 gr/cc y arenas con fluidos entre 2.3 y 2.6 gr/cc.

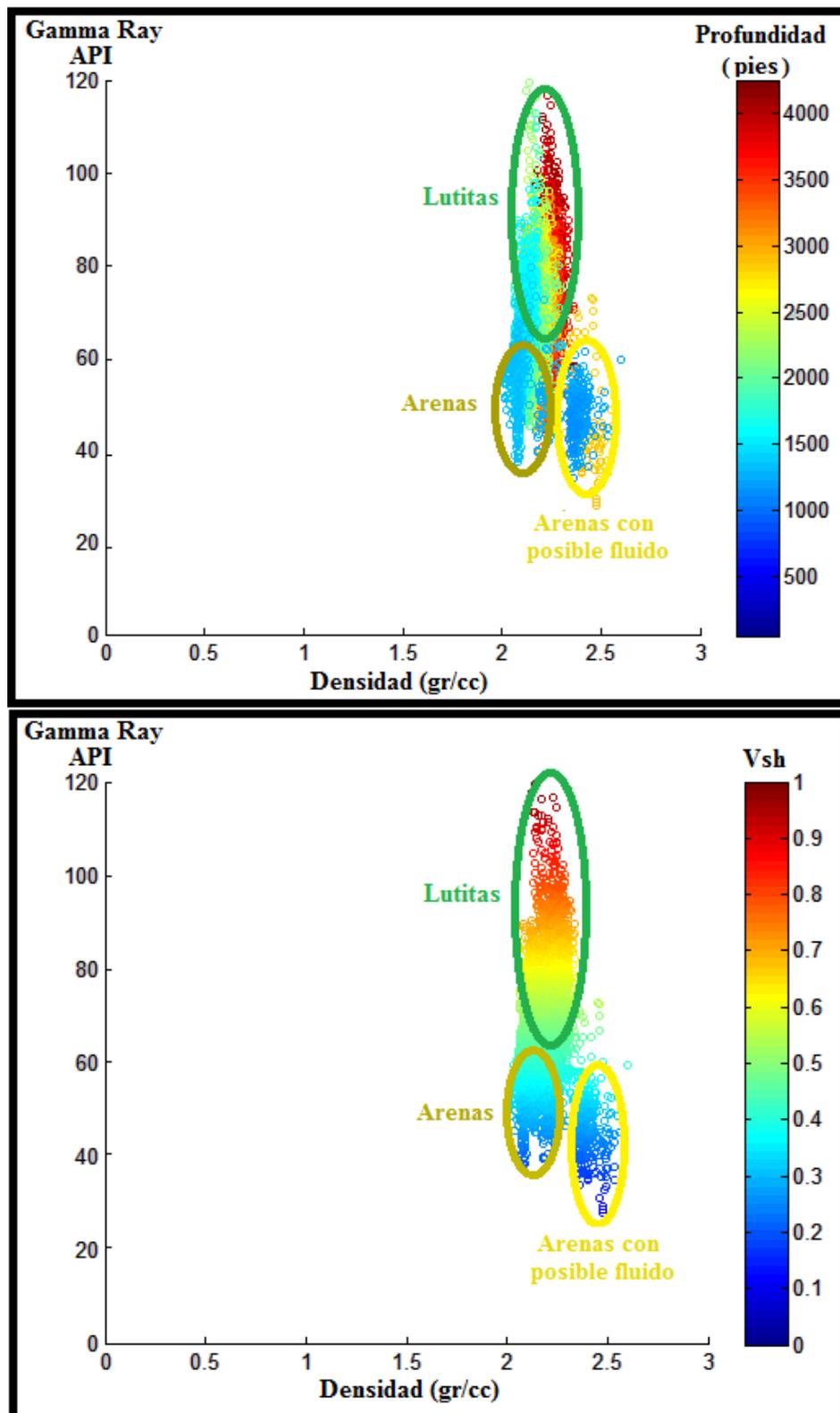


Figura 5. 23. Gráficos cruzados de Densidad vs. Gamma ray.

En la figura 5.24 se presentan los despliegues de los registros de gamma ray y sónico junto con la descripción litológica, amarrados a la sísmica.

Se observa que hacia el horizonte 4 (0.560 s) se presenta un paquete de lutitas variadas de rojas a marrones y arena de grano fino, en el horizonte 3 (0.350 s) se observa un paquete de arena de grano grueso a medio, el horizonte 2 (0.270 s) presenta mayor contenido de arenas de grano medio y de lutita y por último en el horizonte 1 (0.200 s) se presenta una litología de grano medio y lutita.

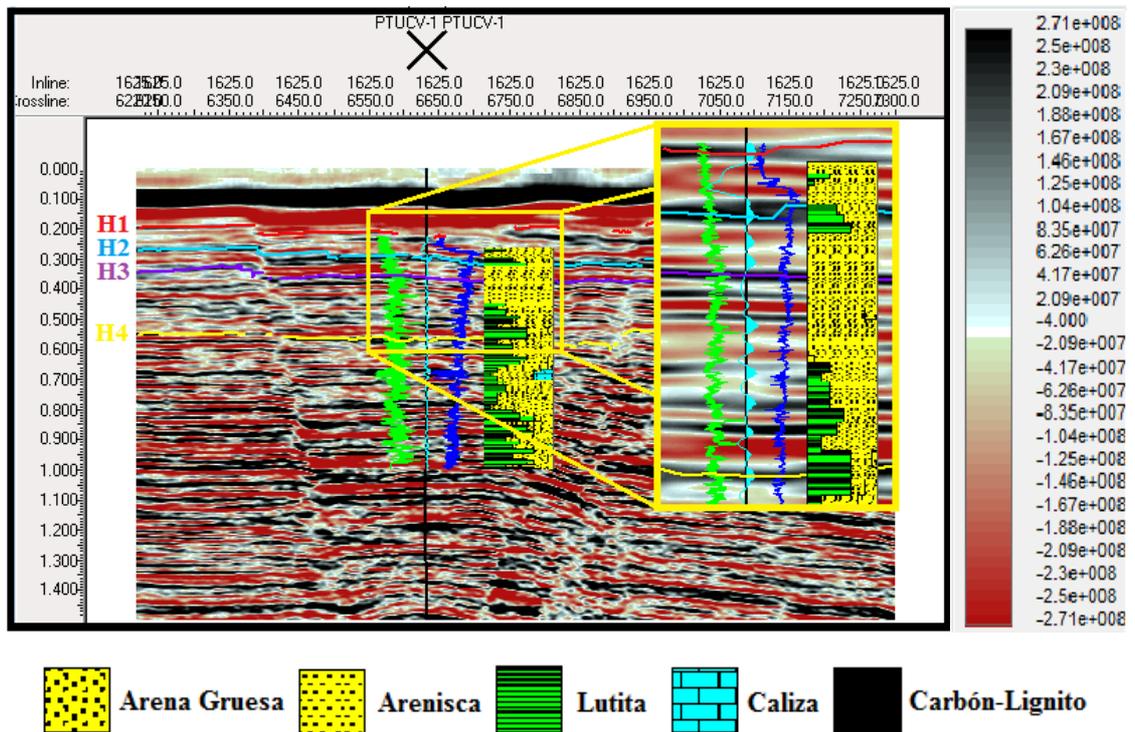


Figura 5. 24. Descripción litológica amarrada a la sísmica.

Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert y atributos geométricos

Esta etapa se basa en correlacionar el comportamiento de los parámetros físicos de las rocas con las tendencias observadas en mapas de atributos sísmicos. Para esto, se seleccionaron 5 mapas: Atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz (figura 5.25.a), fase instantánea (figura 5.25.b), frecuencia instantánea (figura 5.25.c), impedancia acústica relativa (figura 5.25.d) y envolvente de la traza (figura 5.25.e), para el horizonte 4. Se puede observar cómo responden las propiedades petrofísicas con los distintos atributos.

En el mapa del horizonte 4 aplicando el atributo de fase instantánea (Figura 5.25.b), se observan unos altos y bajos estructurales que se deben a la presencia de varias fallas en la zona, siendo de menores valores las que representa rasgos depositacionales tales como posibles canales y zona de adelgazamiento conformado por capas de arenas de grano fino y/o lutitas.

Se puede apreciar que para el mapa aplicando el atributo de frecuencia instantánea (Figura 5.25.c) los máximos valores se asocian a una interfaz fuerte o capas de arenas de grano fino con alto espesor y/o capas delgadas de lutitas y los valores mínimos se asocian a capas de arenas delgadas que podrían contener algún fluido (gas biogénico) acumulados a los lados de estos altos estructurales. Estas se presentan en los altos estructurales observados en el mapa de fase instantánea.

Siguiendo con lo anterior, el mapa aplicando el atributo de impedancia acústica relativa (Figura 5.25.d) resalta con amplitudes máximas los altos estructurales observados anteriormente, que según con el estudio de los registros y facies litológicas del pozo, están asociados a capas de arenas de granos finos con contenido de lutita y posible presencia de fluido (gas biogénico). Para el mapa de envolvente de la traza (Figura 5.21.e), el cual esta relacionado con la impedancia acústica relativa resalta, con altas amplitudes, los altos estructurales característico de capas de arenas de grano fino y lutitas con posible fluido (gas biogénico).

En el mapa de descomposición espectral (Figura 5.25.a) no se observa ninguna anomalía resaltante, esto quizás se deba a que las capas de arenas finas y lutitas con posible contenido de fluido (gas biogénico) son muy delgadas y no poseen amplitudes significativas.

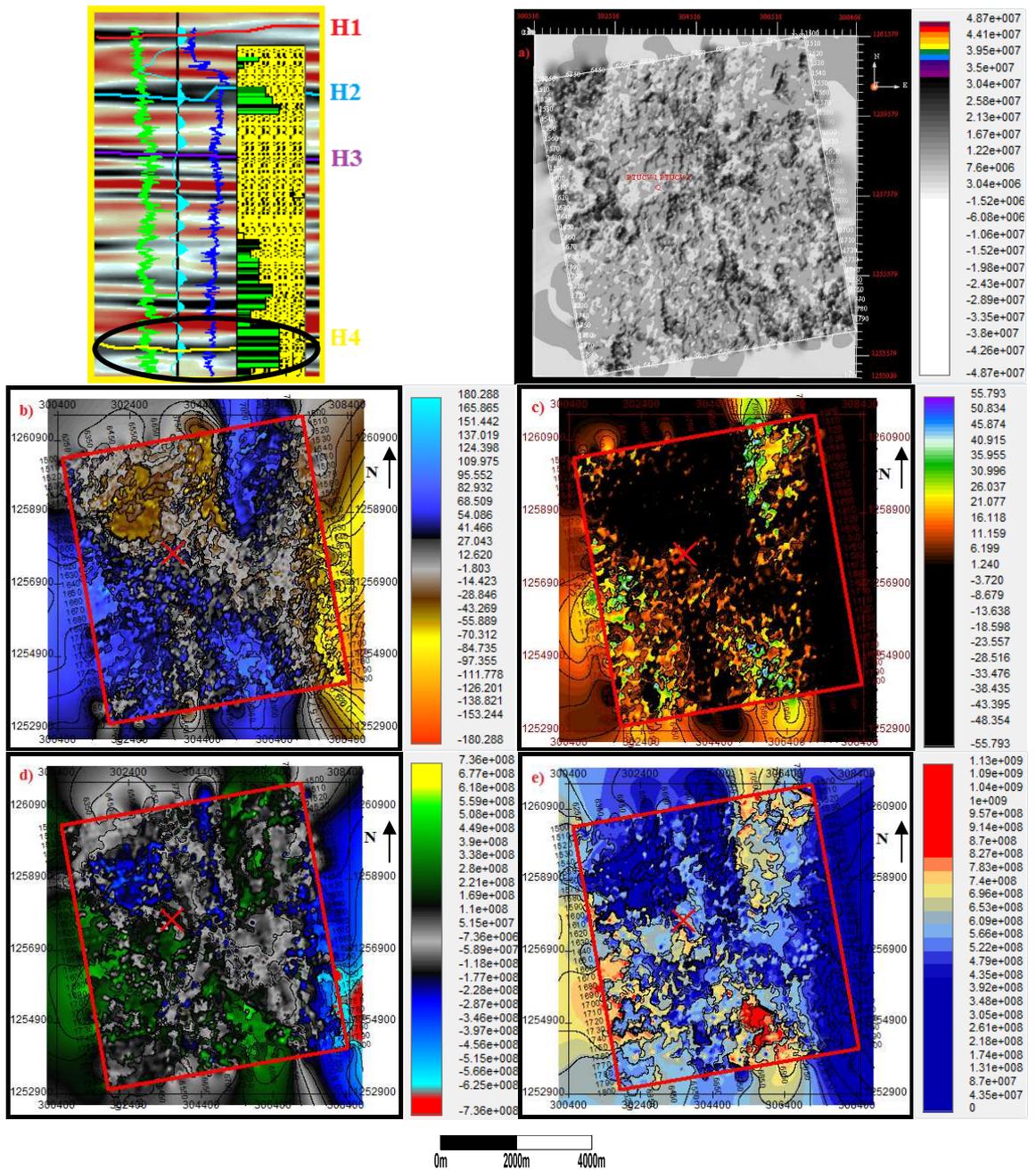


Figura 5. 25. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert para el horizonte 4. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d) Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.

En el mapa del horizonte 3, aplicando el atributo de fase instantánea (Figura 5.26.b), se observa hacia el noreste con valores menores el límite de dos secuencias, que presentan rasgos depositacionales tales como posibles canales, y hacia el suroeste se distinguen con valores mayores zonas de adelgazamiento conformados por capas de arenas de grano fino y/o lutitas.

Según con lo observado en el pozo se puede apreciar que para el mapa aplicando el atributo de frecuencia instantánea (Figura 5.26.c) los máximos valores, los cuales se encuentran localizados al sur y noroeste del área, se asocian a una interfaz fuerte o capas de arenas de grano medio con altos espesores y lutitas con posible presencia de fluido (gas biogénico) y los valores menores se asocian a capas de arenas delgadas que podrían contener algún fluido (gas biogénico).

Siguiendo con lo anterior, el mapa de impedancia acústica relativa (Figura 5.26.d) resalta con amplitudes altas un cambio litológico, que según con el estudio de los registros y facies litológicas del pozo, está asociado a capas de arenas de granos finos con alto espesor y contenido de lutita con posible presencia de fluido (gas biogénico). Para el mapa de envolvente de la traza (Figura 5.26) se resalta, con amplitudes altas, un contraste litológico hacia el suroeste del área característico de capas de arenas de grano fino y lutitas con posible fluido.

En el mapa de descomposición espectral (Figura 5.26.a) se presentan anomalías siguiendo una tendencia estructural asociado a un canal, corroborado por los diversos mapas de atributos.

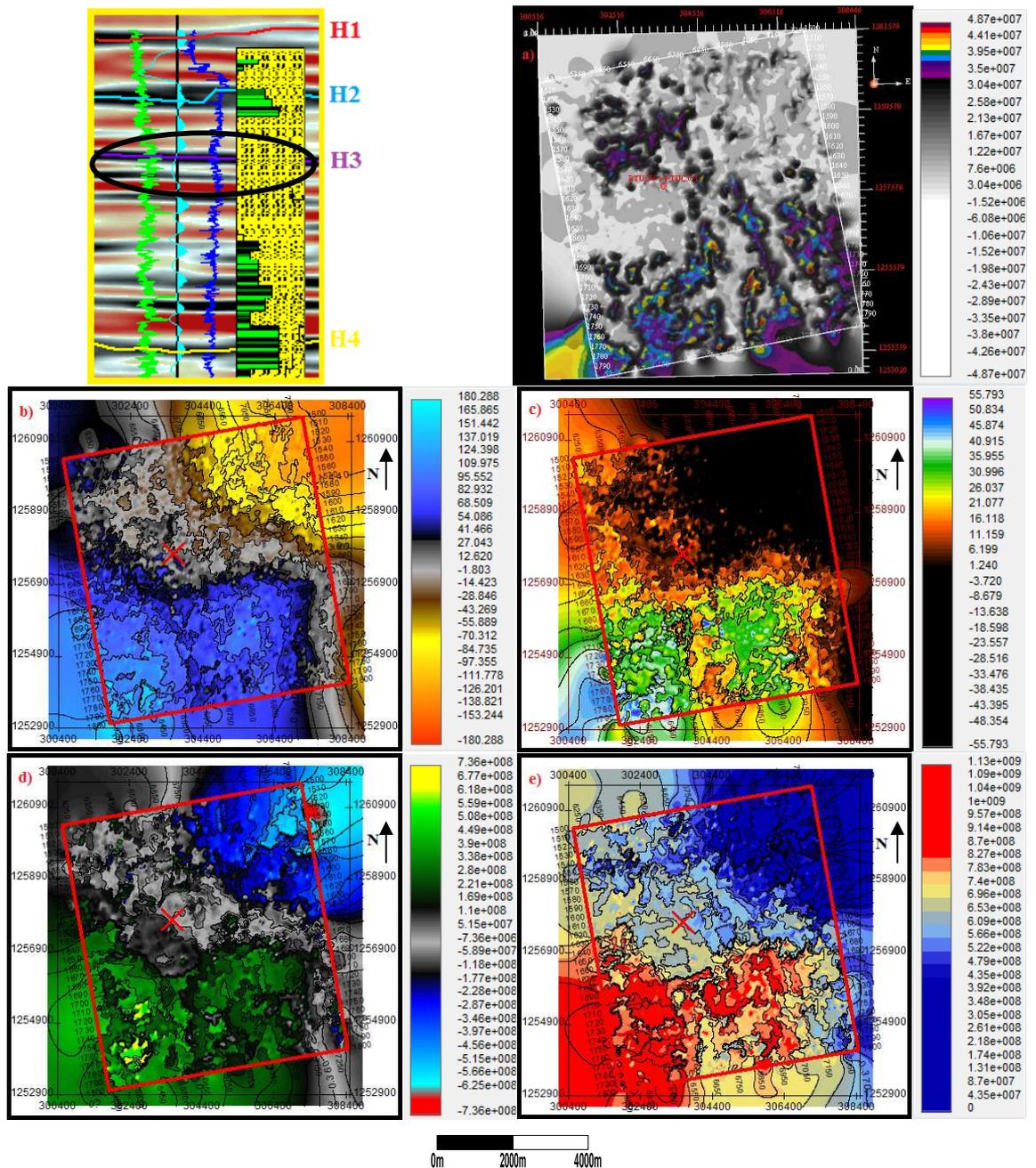


Figura 5. 26. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert para el horizonte 3. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d) Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.

En el mapa del horizonte 2, aplicando el atributo de frecuencia instantánea (Figura 5.27.c) de igual manera los máximos valores se asocian a una interfaz fuerte o capas de arenas gruesas con alto espesor y lutitas con posible presencia de fluido (gas biogénico), estos se localizan al noroeste y sur del área, y los valores mínimo se asocian a capas de arenas que podrían contener algún fluido (gas biogénico) siendo estas de menor acumulación en el área.

Siguiendo con lo anterior el mapa de impedancia acústica relativa (Figura 5.27.d) resalta, con amplitudes altas en la mayoría del área, presencia de arenas de grano medio con alto espesor y posible contenido de fluido (gas biogénico), además presenta capas delgadas de lutitas. Para el mapa de envolvente de la traza (Figura 5.27.e), el cual esta relacionado con la impedancia acústica relativa, resalta con amplitudes altas hacia el noroeste y sur del área un contraste litológico, característico de capas de arenas de grano medio y lutitas con posible gas biogénico.

En el mapa aplicando el atributo de fase instantánea (Figura 5.27.b), se observa el límite de dos secuencias. Hacia el noreste se observa, con valores mínimos, un buzamiento y hacia el noroeste y sur del área se presentan máximos valores asociados con altos estructurales o zonas de engrosamiento.

El mapa de descomposición espectral (Figura 5.27.a) refleja una llanura de inundación de gran tamaño y es corroborado con los demás mapas de atributos.

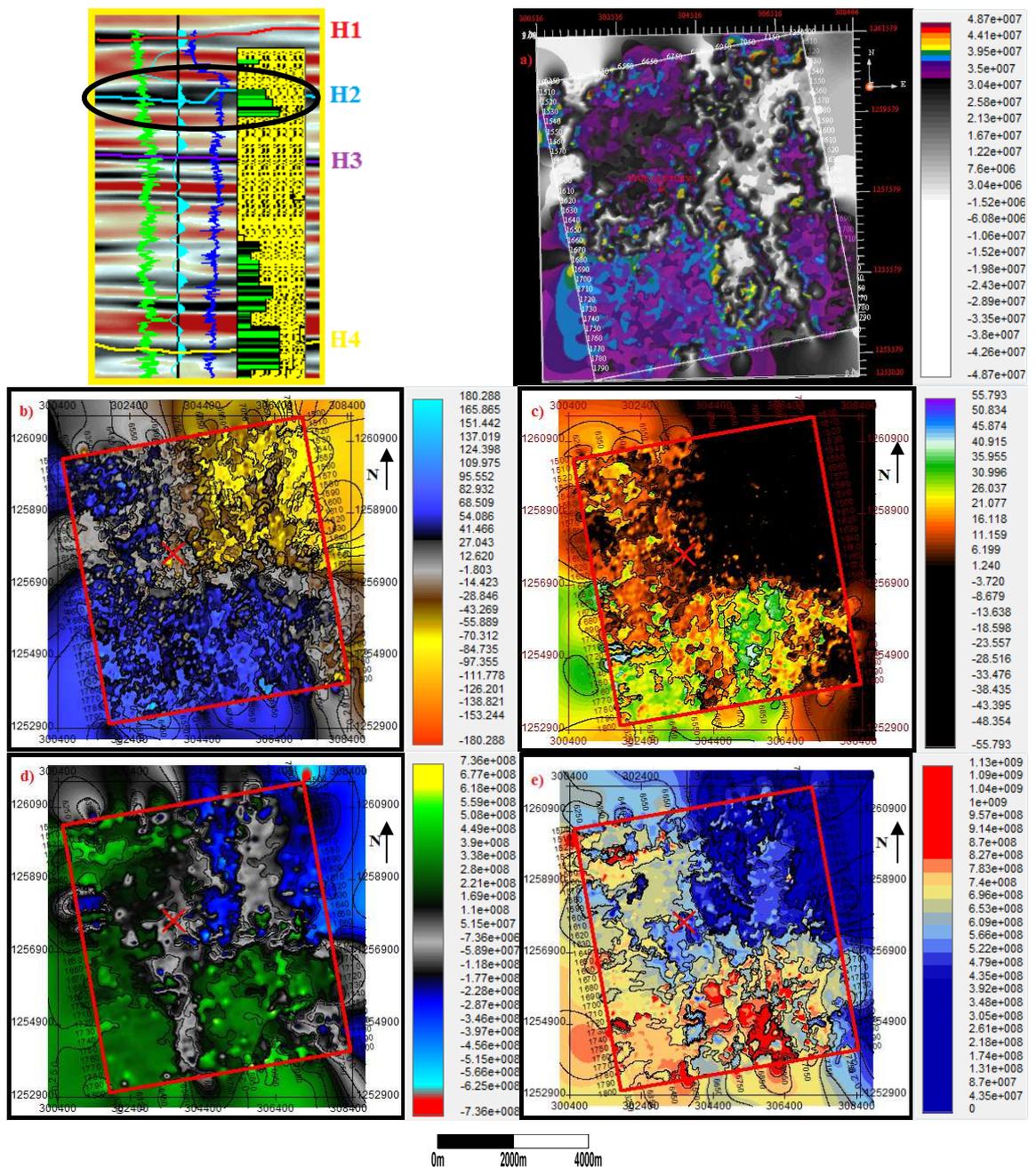


Figura 5. 27. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert para el horizonte 2. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert para el horizonte 2. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d) Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.

Según con lo observado en los registros del pozo y “*crossplots*” se puede apreciar que para el mapa de frecuencia instantánea (Figura 5.28.c) los máximos valores se asocian a una interfaz fuerte o capas gruesas de arenas de grano fino y/o lutitas compactas con posible presencia de fluido (gas biogénico) y que se localizan al sur del área. Por su parte los valores mínimos se asocian a capas de arenas que podrían contener algún fluido (gas biogénico).

Siguiendo con lo anterior, el mapa de impedancia acústica relativa (Figura 5.28.d) resalta, con amplitudes altas, un cambio litológico que está asociado a capas de arenas de grano grueso con gran espesor y contenido de lutita compactada con posible presencia de fluido (gas biogénico) y se asocia con amplitudes bajas a capas de arenas con bajo espesor y posible contenido de fluido (gas biogénico). Para el mapa de envolvente de la traza (Figura 5.28.e), el cual está relacionado con la impedancia acústica relativa, resalta con amplitudes altas, un contraste litológico hacia el sur del área, característico de capas de arenas de grano grueso y lutitas.

En la figura 5.28.b, se puede observar con el mapa de fase instantánea el límite de dos secuencias, hacia el norte, con valores menores, presenta rasgos depositacionales tales como canal, zona de adelgazamiento y un buzamiento, el cual constituye la mayoría del área, y hacia el sur, con valores mayores, se distinguen zonas de engrosamiento tipo arenas de grano grueso y/o lutitas.

El mapa de descomposición espectral (Figura 5.28.a) refleja varios canales con sus llanuras de inundación siguiendo la alineación de las fallas 5 y 10 y es corroborado con los diversos mapas de atributos.

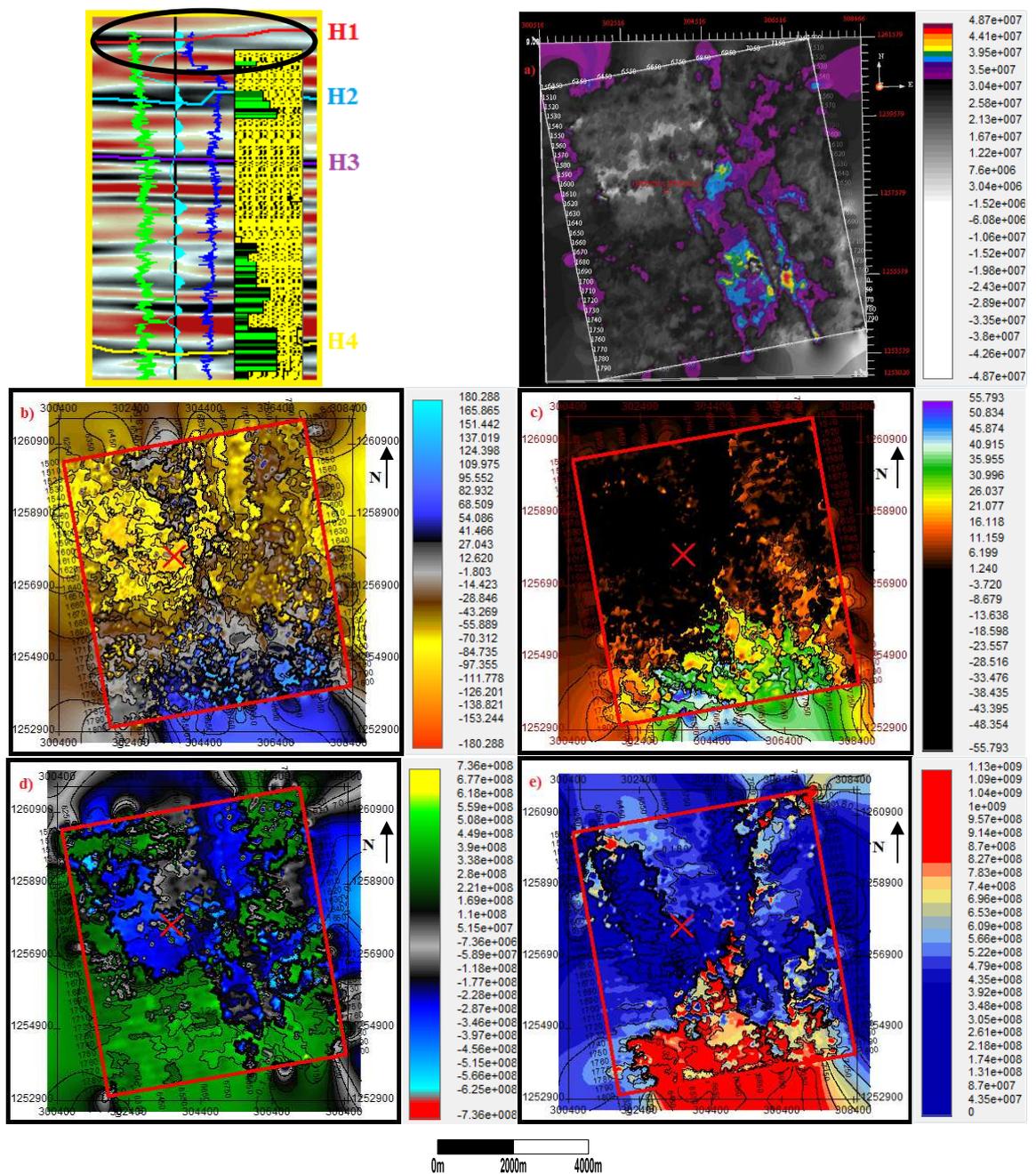


Figura 5. 28. Correlación de los parámetros físicos de las rocas con atributos basados en la Transformada Hilbert para el horizonte 1. a) Mapa de atributo de descomposición espectral a una frecuencia de 10 Hz junto con cuatro atributos aplicando la transformada de Hilbert. b) Mapa de atributo de fase instantánea. c) Mapa de atributo de frecuencia instantánea. d) Mapa de atributo de impedancia acústica relativa. e) Mapa de atributo de envolvente de la traza.

Atributo híbrido

Es un atributo combinado de la transformada de Hilbert y geométricos. Dentro de sus valores presentan la composición de ciertos parámetros interpretados individualmente con anterioridad.

Este atributo es:

- **Atributo de Q instantáneo (“Instantaneous Q”)**

Este atributo indica la calidad de roca, por esta razón esta asociado a porosidad, permeabilidad y fracturas.

Los valores mayores representan capas de arenas de grano medio a fino con buena porosidad y posible gas biogénico y los valores menores representan capas de lutitas variables (Figura 5.29).

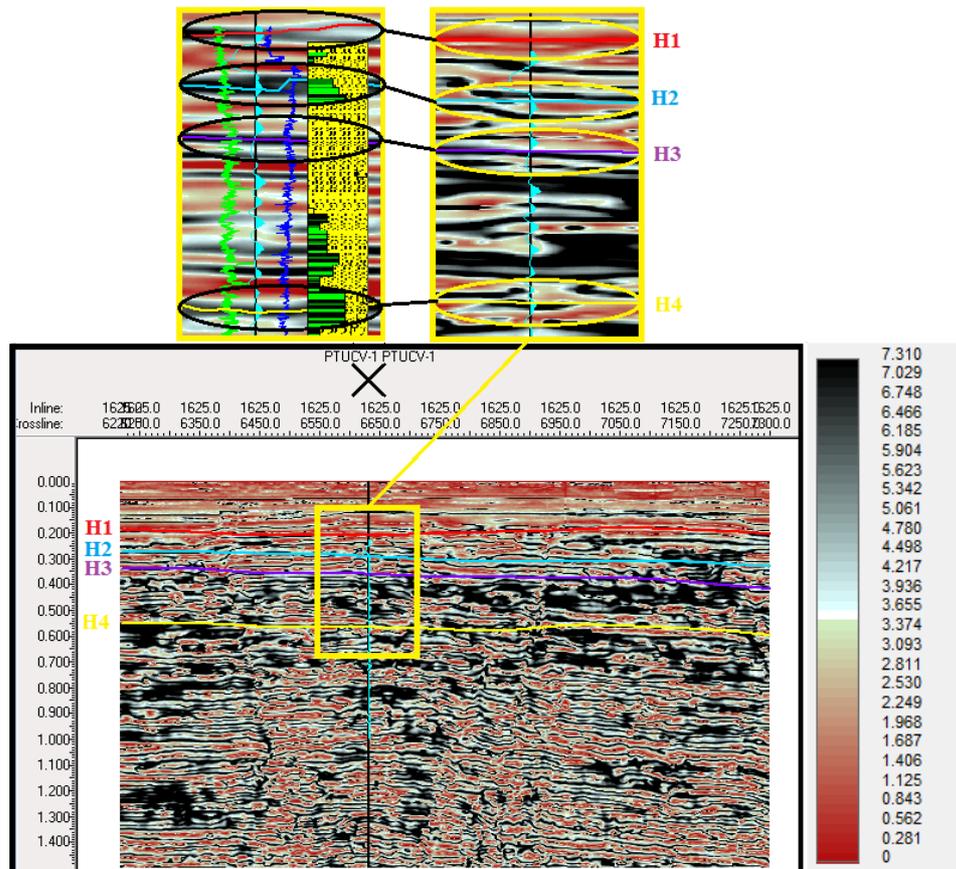


Figura 5. 29. Atributo de Q instantáneo resaltando calidad de roca asociado a porosidad, permeabilidad y fractura.

Las descripciones litológicas, respuesta de los registros del pozo amarrados a la sísmica y el comportamiento de las propiedades de los atributos podrían indicar un ambiente transicional costero a continental reflejando ambientes marino somero y fluvial deltaico dominado por olas formando una protuberancia costera progradante, parecido al ambiente encontrado en el río Mitare (Figura 5.30).

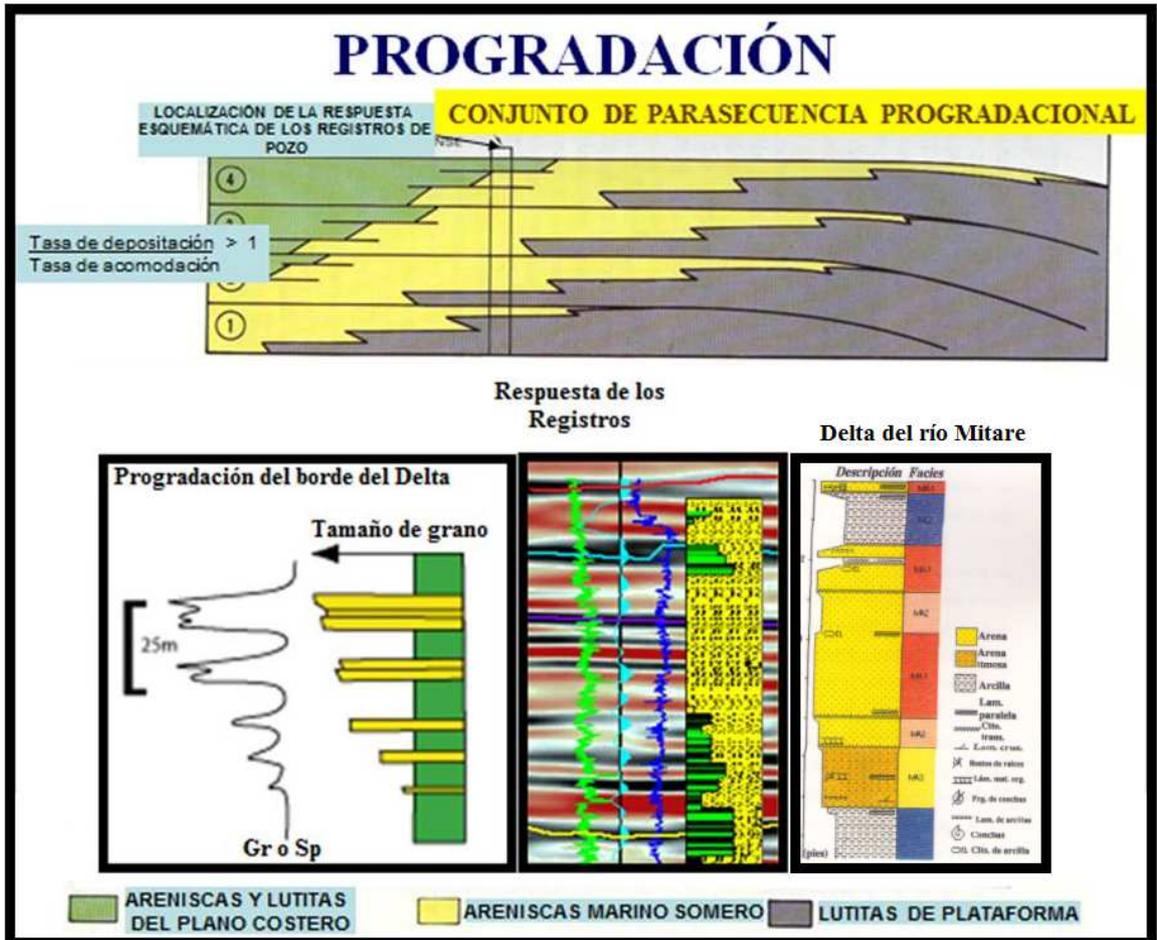


Figura 5. 30. Amarre de la descripción litológica y los registros del pozo PTUCV_1 con los datos sísmicos 3D, mostrando un ambiente transicional de progradación. (Tomado de las clases de estratigrafía y sedimentación de Rojas, A., 2009).

Siguiendo con esto, se podría decir que los horizontes 3 y 4 representan una zona de barra de desembocadura, que se caracteriza por un ambiente marginal y próximo costero,

desarrollándose además lagunas y bahías, semiprotegidas por barreras litorales, en un régimen principalmente transgresivo.

Luego, para los horizontes 1 y 2, se podría decir que representan una zona de ambiente fluvial deltaico de carácter regresivo, con un aumento en el aporte de sedimentos y desarrollo de una llanura fluvial.

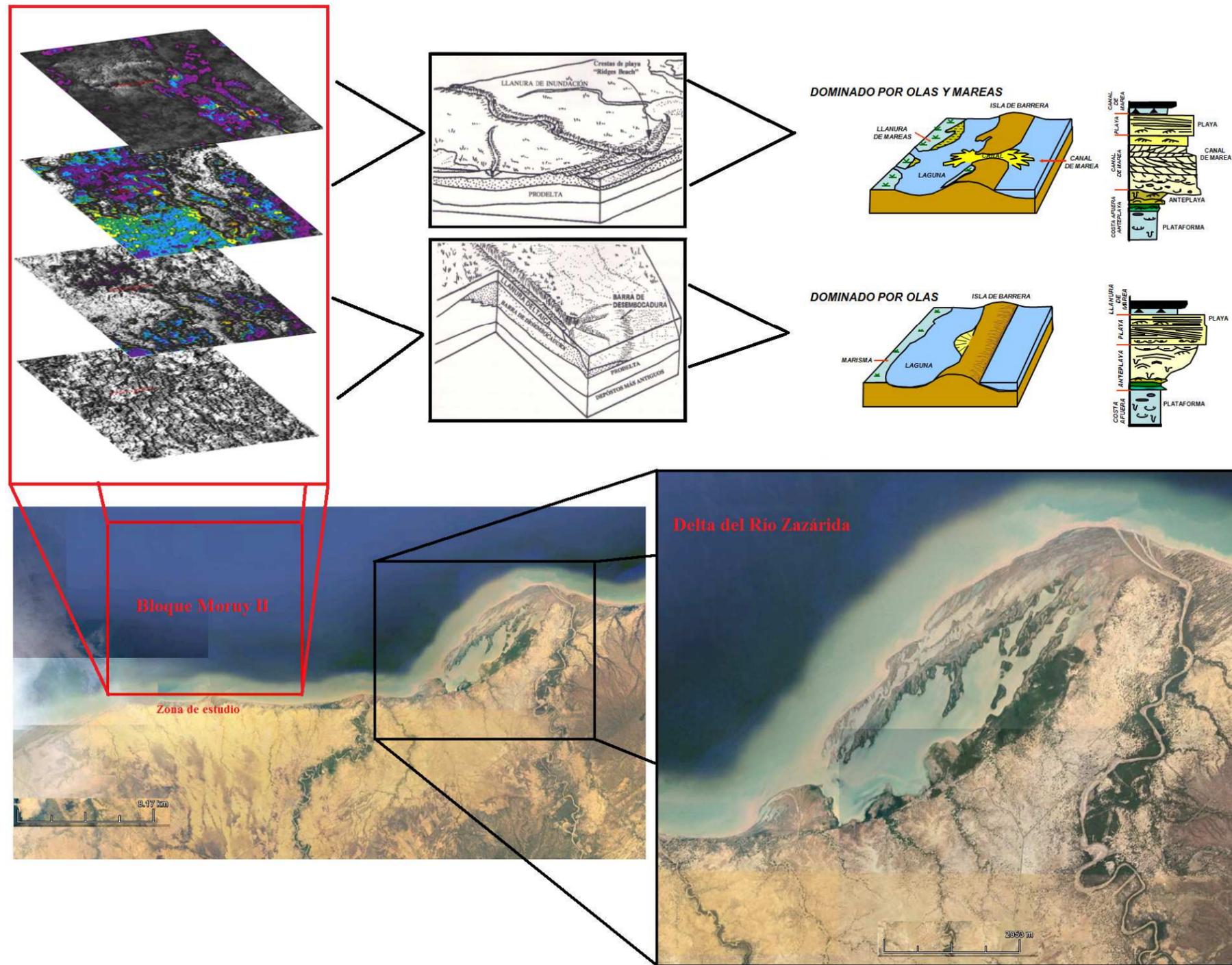


Figura 5. 31. Secuencia de los datos sísmicos 3D y facies ambientales asociadas. (Tomado de las clases de estratigrafía y sedimentación de Rojas, A., 2009 y de Google Earth, 2012).

5.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS, INTEGRACIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS 2D DE ALTA RESOLUCIÓN CON LOS DATOS SÍSMICOS 3D Y CORRELACIÓN DE ESTOS DATOS CON EL ESTUDIO DE AMENAZA GEOLÓGICA CONVENCIONAL

Las amenazas geológicas para los sistemas marinos someros pueden ser descritos como locales y las condiciones del suelo que tienen un potencial y una cierta probabilidad de desarrollar problemas de ingeniería que conducen a los sucesos de error, causando pérdidas de vida o la inversión (WS Atkins Consultants Ltd, 2004).

En esta sección se evaluarán las amenazas geológicas presentes en un área de 50 Km², pero debido al tipo de datos utilizados (sísmica 3D convencional), no podrán ser estudiados a menos de 100 metros por la resolución de la misma.

5.3.1 Identificación de amenazas geológicas

Se presentará la evaluación de las amenazas geológicas actuales o posibles del Bloque Moruy II en el Golfo de Venezuela como el resultado de la actividad sísmica, las tasas de sedimentación de los ríos aledaños (Mitaré, Zazárida, Lagarto, Capatárida, etc), posible gas somero, volcanes de lodo, tubos de gas, fallas activas, sedimentos a presión y otras posibles causas de inestabilidad del suelo marino, publicados en trabajos anteriores o inferidos de los datos existentes (Figura 5.32).

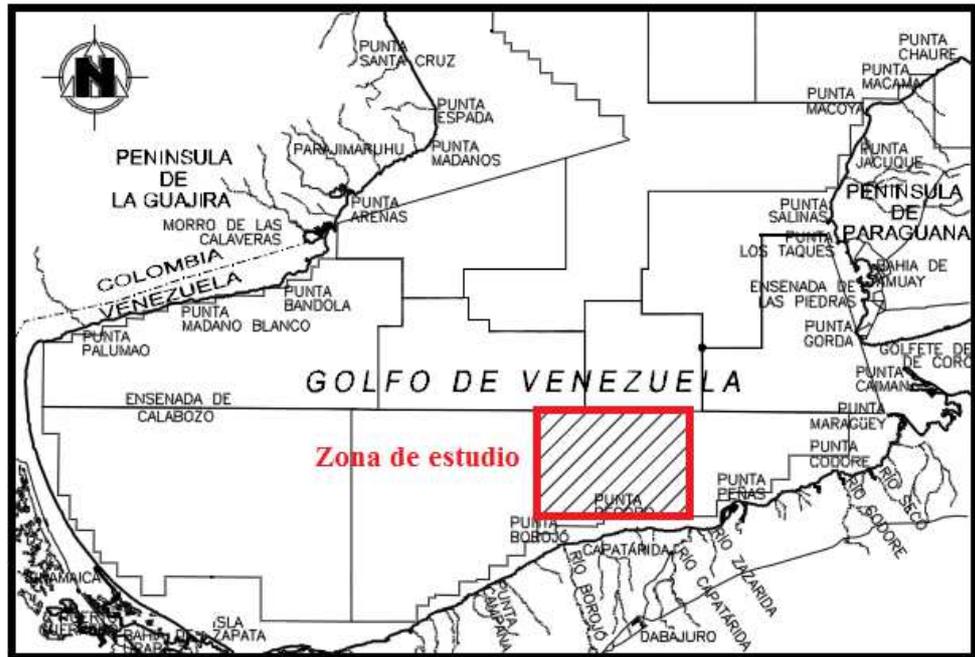


Figura 5. 32. Ubicación del área de estudio y de los ríos aledaños.

Inestabilidad del suelo marino como amenaza de origen geológico

La inestabilidad del suelo marino es considerada una amenaza geológica debido a su potencial de dañar las instalaciones localizadas en zonas de inestabilidad y en zonas bajas del talud, tomando en cuenta la naturaleza y el estado del sedimento del fondo marino y de los mecanismos de fallas asociados.

No hay evidencia dentro de la zona de estudio para sugerir que la inestabilidad del fondo marino o de laderas que tengan potencial de dañar las instalaciones que se puedan colocar en la zona o que debe ser considerada como un problema significativo de riesgo geológico. Además se descarta la posibilidad de inestabilidad por movimiento de masa, tales como deslizamientos.

Para el análisis de estabilidad del fondo marino se utilizó la interpretación del horizonte correspondiente al fondo marino, en conjunto con la batimetría del área de estudio. Éste muestra que la variación de profundidades es de 1 m en 2km, indicando que la pendiente regional es de 0.10% (Figura 5.33). También se observa un buzamiento generalizado hacia el noreste.

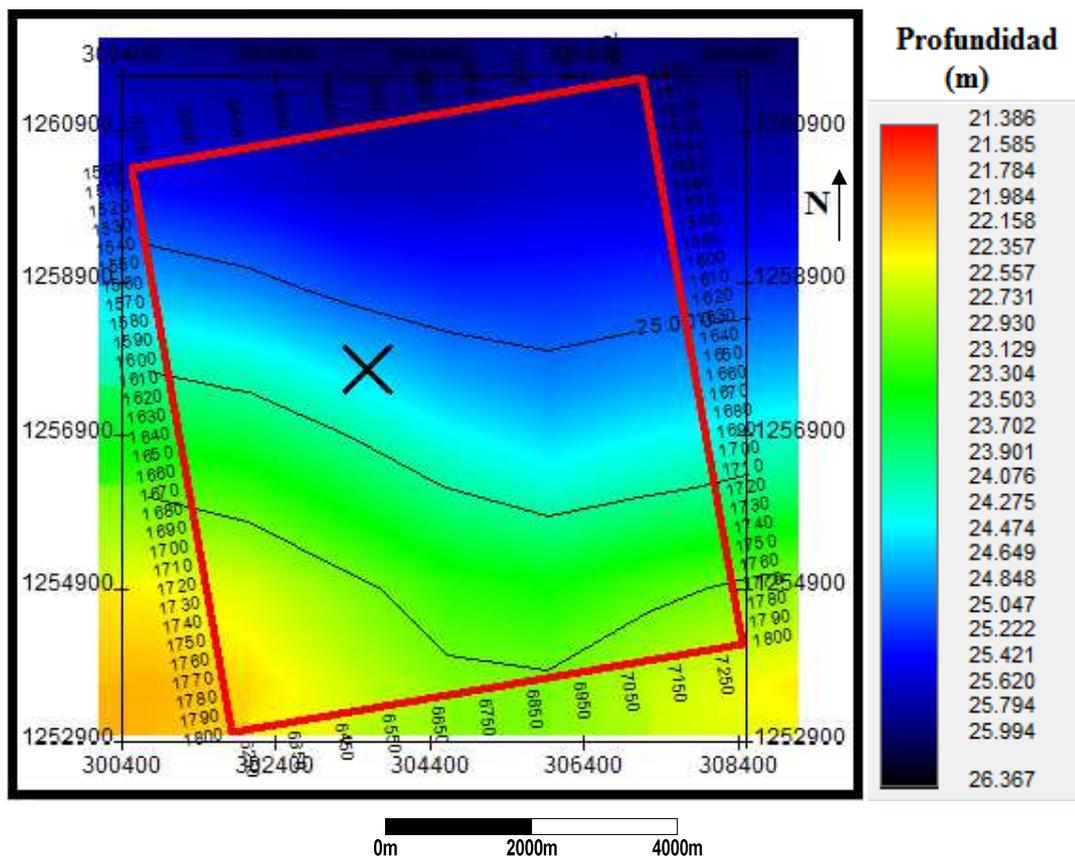


Figura 5. 33. Mapa batimétrico del área de estudio.

La figura 5.34 muestra los espesores de las capas de sedimentos recientes depositados que se caracterizan por lutitas variadas y arenas de grano fino. Presenta, hacia el sur, espesores que van desde 88 m hasta 104 m, siendo esta los depósitos a nivel somero y hacia el norte se observan espesores entre 112 m y 133 m, siendo estos los más profundos,

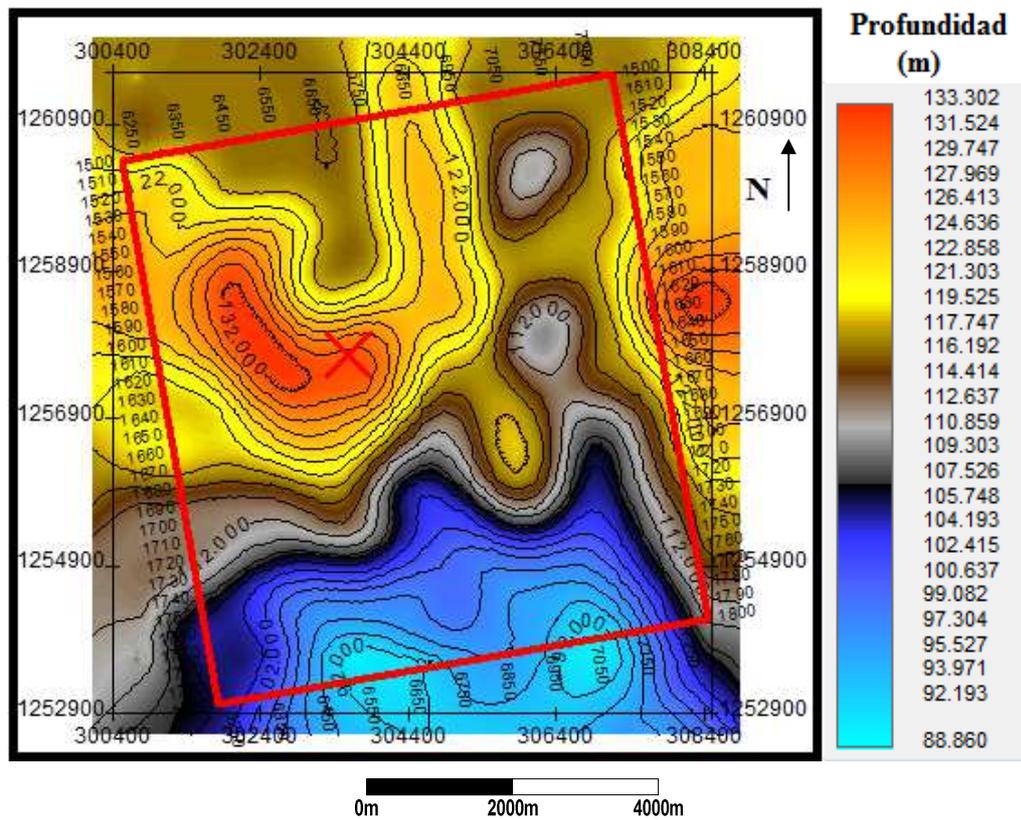


Figura 5. 34. Mapa isópaco entre la batimetría y el horizonte 1.

En la figura 5.35 se observan profundidades que van desde 140 m hasta 198 m. las profundidades menores se encuentran hacia el sur y las mayores hacia el noreste del área de estudio.

Este mapa resultante de la suma del mapa batimétrico (Figura 5.33) y el mapa isópaco (Figura 5.34) resalta las Fallas 3, 5 y 10 y, además se aprecia una estructura anticlinal entre las Fallas 3 y 10.

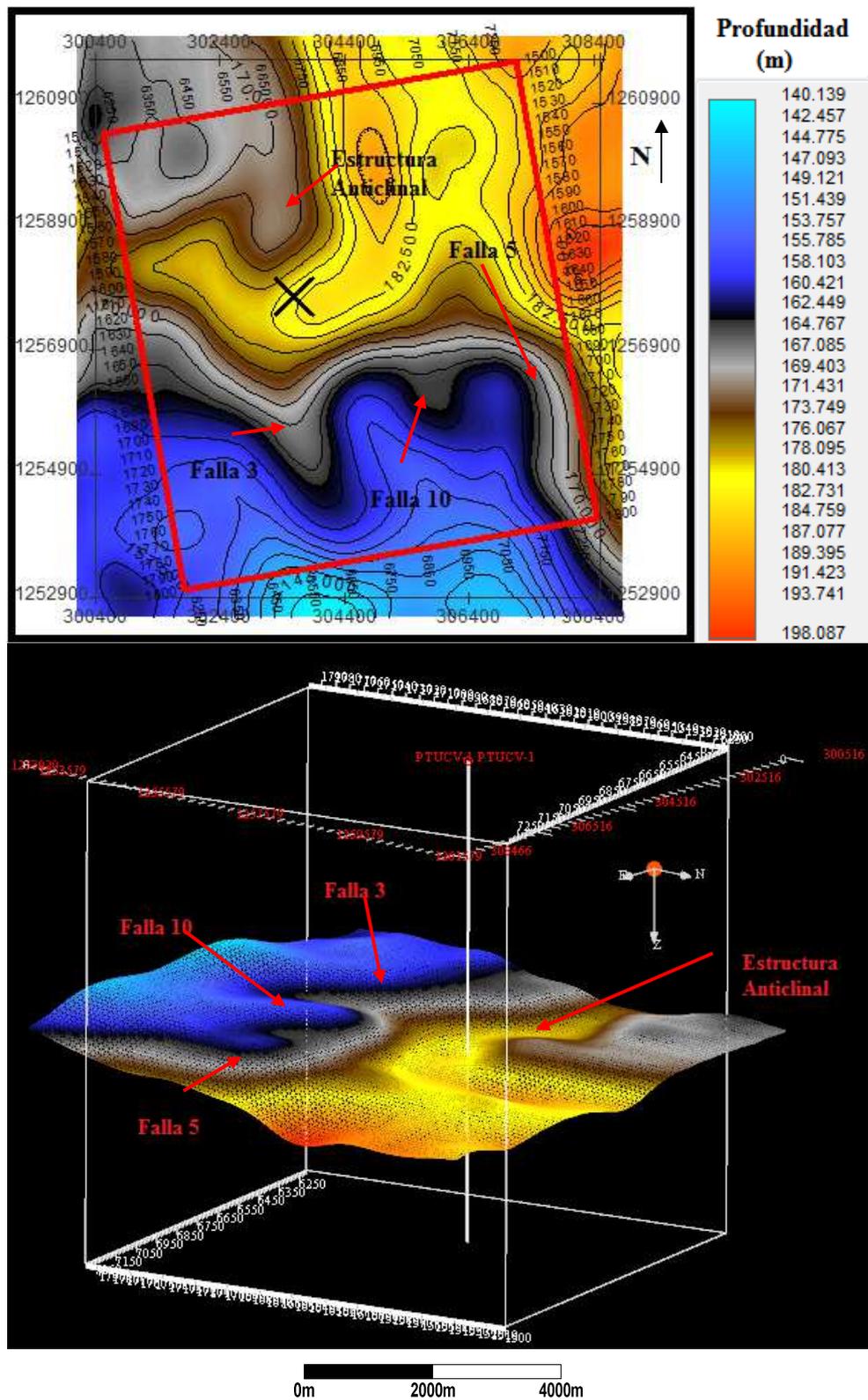


Figura 5. 35. Mapa estructural del horizonte 1.

Causas y mecanismos desencadenantes de inestabilidad del fondo marino en el bloque Moruy II

Según Audemard (1997), el bloque Moruy II está ubicado en una región que está actualmente sometida a un tensor de esfuerzo horizontal máximo con dirección NNO-SSE a NS y un esfuerzo mínimo horizontal en dirección ENE-OSO, el cual es responsable de la cinemática y de la actividad tectónica de diversos rasgos estructurales que afectan los depósitos plio-cuaternarios de la zona.

Además, el Bloque Moruy II se encuentra en la zona aledaña de los deltas del río Zazárida y Lagarto, el cual está caracterizado por ser un ambiente transicional costero a continental reflejando ambientes marino somero y fluvial deltaico.

Sin embargo, el ambiente tectónico y la morfología del fondo marino presentes en el bloque Moruy II no denota que se pueda presentar un problema de riesgo geológico. Estos posibles mecanismos de activación se describen en las siguientes secciones.

- **Amenaza sísmica**

El área de estudio se encuentra ubicada entre la zona sísmica 2 y 3 (nivel intermedio a bajo) de acuerdo con la norma venezolana “Edificaciones Sismorresistente” COVENIN 1756-2001.

Además presenta la forma espectral tipo S2 y S3 con factor de corrección $\varphi=0,80$ y $\varphi=0,70$ respectivamente, de acuerdo con los criterios de la norma COVENIN-1756/2001.

Siguiendo con esto, la norma PDVSA JA-221, sobre “Diseño Sismoresistente de Instalaciones Industriales” especifica que para el área de estudio se presenta un “Grado de Riesgo” A, ya que la instalación se considera de naturaleza temporal, las pérdidas económicas estarían limitadas y el daño ambiental será despreciable.

La amenaza sísmica para Venezuela, en términos de la aceleración máxima en roca, es de un período de retorno de 475 años. La probabilidad P de que la aceleración del terreno exceda el valor a, en un horizonte de t años, se encuentra ligada a la probabilidad anual de excedencia P1, por la ecuación 11:

$$P = 1 - (1 - P_1)^t$$

Ecuación 11

Cuando se trata de instalaciones de servicio temporal, menos de tres años, que clasifican dentro del grupo A se permite un valor no mayor que $P_1 = 1/200 = 5 \times 10^{-3}$, la cual equivale aproximadamente a 200 años de período de retorno. Ya que la zona de estudio se encuentra en un período medio de retorno de 475 años, se tomara $P_1 = 1/500 = 2 \times 10^{-3}$ que equivale a un período de retorno de aproximadamente 500 años. El valor de P para esta zona es de 0,61.

A fines del diseño y verificación de instalaciones, se deben utilizar mapas de amenazas sísmicas centrados en la zona de estudio, el cual presenta un coeficiente de aceleración horizontal máxima del terreno entre 0,15 y 0,20g y de aceleración vertical entre 0,10 y 0,14g, respectivamente. En dichos mapas se deben leer los valores de a^* (Figura 5.36) y γ (Figura 5.37) correspondientes al sitio de interés.

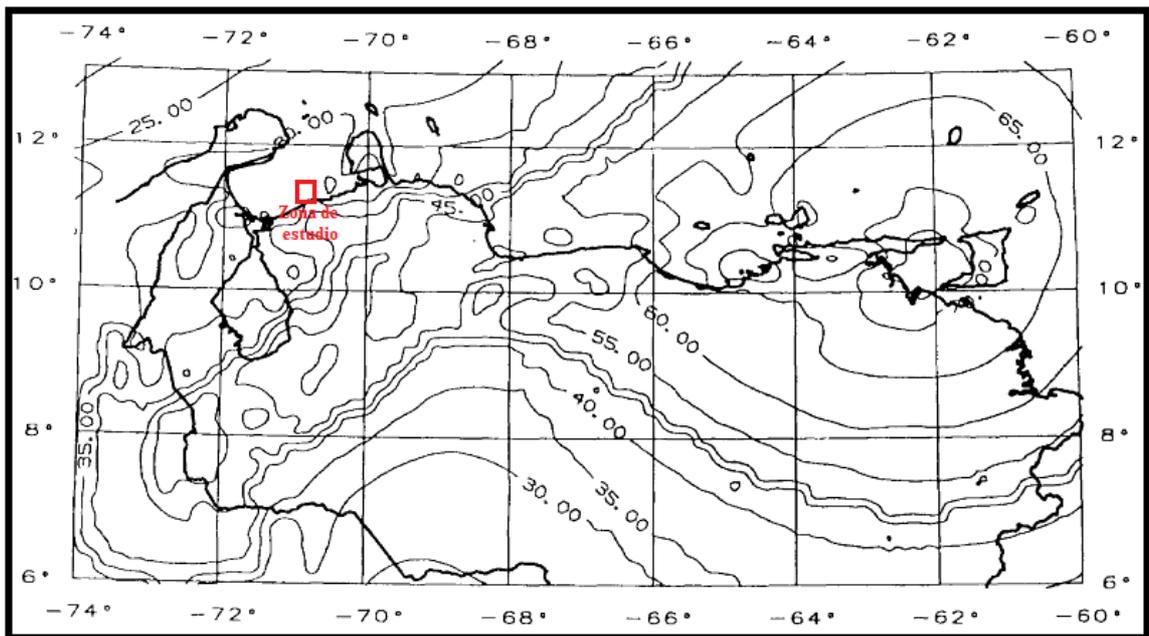


Figura 5. 36. Mapa de amenaza sísmica mostrando los valores de a^* . (Tomado de PDVSA JA-221, sobre “Diseño sísmoresistente de instalaciones industriales”).

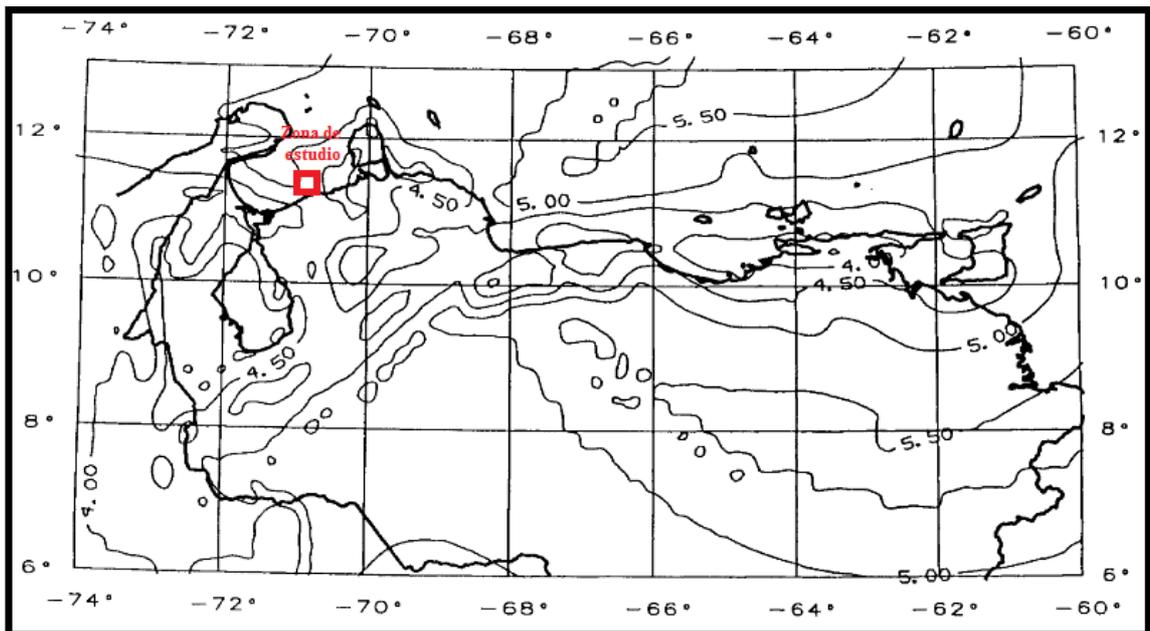


Figura 5. 37. Mapa de amenaza sísmica mostrando los valores de γ . (Tomado de PDVSA JA-221, sobre “Diseño sismoresistente de instalaciones industriales”).

Según la norma de PDVSA JA-221 se determina la probabilidad total P (Ecuación 11), con la ecuación 12:

$$P = 1 - (e^{-t}) * ((a/a^*)^{-\gamma}) \quad \text{Ecuación 12}$$

donde a es la aceleración máxima del terreno; γ la pendiente de la regresión lineal, obtenido del mapa de amenaza sísmica (Figura 5.37), el cual tiene un valor para la zona de estudio de 4,50; a^* es el valor de referencia obtenido del mapa de amenaza sísmica (Figura 5.36) el cual tiene un valor para la zona de estudio de 35 cm/s^2 . De esta manera, la ecuación 12 se puede describir como la ecuación 13:

$$a = a^* ((-\ln(1-P)/t)^{-1/\gamma}) \quad \text{Ecuación 13}$$

Según con esto, la máxima aceleración del terreno tiene un valor de $139,23 \text{ cm/s}^2$ equivalente a $0,14g$, valor que se encuentra por debajo para la zona sísmica S2 y S3 en la norma COVENIN-1756/2001.

Estos datos indican que el área es sísmicamente activa y que los eventos sísmicos que pueden llegar a producirse se deben considerar los posibles mecanismos de activación de la inestabilidad del suelo marino. También es importante tener en cuenta que la acumulación de deformaciones por corte debido a una carga cíclica de los terremotos induce el exceso de presión de poros sobre hidrostática existente o ya existente exceso de presión de poro. En este último caso, cualquier exceso de presión de poro se reduce la intensidad necesaria para disparar un deslizamiento submarino.

- **Fallas activas y reactivación de fallas**

Dentro del área de estudio se observaron doce fallas con movimiento aparente transcurrente normal, todas con rumbo NO-SE aproximadamente (Figuras 5.17, 5.18 y 5.19).

La falla denominada Falla 5 se encuentra a unos 1971.03 m al este del pozo PTUCV_1 y buza hacia el oeste. Por su parte, la Falla 3 se encuentra a unos 1527.47 m al oeste del pozo y de la Falla 5, con buzamiento hacia el este. Ambas fallas pareciera ligeramente activa, debido a la deformación plegada de los reflectores encontrados a 213,36 m por debajo del fondo marino, sin embargo, esta actividad no es reciente por la falta de expresión superficial de la misma (Figura 5.2).

En profundidad, el pozo PTUCV_1 intersecta al plano de la Falla 10, a unos 1,050 s (aproximadamente a 1219,2 m por debajo del fondo marino) (Figura 5.2).

En definitiva, para la zona del pozo PTUCV_1, la presencia de fallas o reactivación de estas estructuras no representa ningún riesgo somero para la perforación ni la puesta en sitio del “*Jack up*”.

- **Erosión del fondo marino**

Como se dijo en la sección anterior, el aporte de sedimentos de los ríos aledaños, sugieren un ambiente deltaico dominado por olas, encontrándose en la zona capas de arena arcillosa muy suelta a nivel superficial, describiendo además que el fondo marino es plano y que la reflectividad es uniforme (Figura 5.33). Todos estos elementos indican que el fondo marino no está siendo afectado por procesos erosivos recientes.

- **Pendientes de las laderas empinadas**

En el bloque Moruy II, el fondo marino tiene una pendiente de 1:2 (aproximadamente 0,10%), lo que no presenta ningún riesgo de desencadenar movimientos de masa, tales como deslizamientos.

- **Litología del suelo marino**

Los canales del fondo marino pueden suponer un riesgo geológico potencial en la medida en que son rellenadas, esto se ha evidenciado con la presencia de paleocanales y fallas en la zona, que pueden generar la discontinuidad de los horizontes de sellado y que se asocia con cambios abruptos en la litología de los sedimentos que lo rodean, esto puede conducir a cambios significativos en las propiedades de ingeniería del fondo marino (WS Atkins Consultants Ltd., 2004). Sin embargo, a nivel somero no se observan estas discontinuidades, suponiendo que no representa un riesgo inmediato.

- **Aspectos relacionados a presiones de gas y/o fluidos**

- **Gas biogénico y termogénico**

La presencia de gas superficial debe ser considerada un factor importante como un riesgo geológico para la perforación de pozos y desarrollo del campo, debido al riesgo de explosiones generadas por la liberación de gas a presión contenido en acumulaciones someras ("*pockmarks*").

Las concentraciones de posibles acumulaciones de gas se encuentran generalmente en la proximidad de las fallas las cuales pueden ser de origen termogénico, generado en profundidad y que le proporcionan una vía de escape hacia la superficie, provocando una acumulación a nivel somero (WS Atkins Consultants Ltd., 2004).

En el área de estudio no se observan evidencias concretas de posibles acumulaciones de gas biogénico o termogénico a nivel superficial que puedan ocasionar riesgo inmediato y que reduzcan la resistencia al suelo, provocando la inestabilidad del fondo marino y los movimientos de masa de activación (Figura 5.2).

- **Flujo de aguas superficiales**

El flujo de agua superficial se define como un flujo cortante, en gran medida unidireccional, turbulento y que se producen en una capa confinada de profundidad. Pueden afectar la estabilidad del fondo marino, ya que éstas perturban la estabilidad de las pendientes en aguas de profundidades relativamente someras, es decir, menores a 150 metros. A esas profundidades, un flujo de gran tamaño induce una variación de la presión ejercida por la columna de agua sobre el fondo marino, produciendo así un momento de perturbación e incremento de los esfuerzos cortantes (WS Atkins Consultants Ltd., 2004).

Los pequeños cambios de presión a estas profundidades relativamente someras, con acumulación de sedimentos no consolidados, con porosidades altas y bajas tensiones, pueden ocasionar que el flujo de agua colapse las estructuras presentes en la superficie (WesternGeco, 2003).

No se observaron problemas de flujo de aguas poco profundas, en la zona de estudio. Sin embargo, las condiciones, que parecen favorables para su formación están presentes, de modo que se debe enfatizar en una evaluación detallada de sedimentos sobrepresurizados, y la ubicación de cuerpos clásticos propensos a sufrir cambios (Gardline, 2005).

Evaluación de amenaza para la puesta del “Jack up”

La evaluación de los riesgos para el posicionamiento del “Jack up” y perforación en el Bloque Moruy II se llevo a cabo mediante la evaluación y prevención para riesgos de fundación tomada de “*Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-Up Units*” de la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos en su boletín técnico 5-5ª de Enero 2002.

Tabla 5. 1. Evaluación de posibles amenazas para plataforma tipo “Jack-up”. (Tomado de “Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-Up Units” de la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos en su boletín técnico 5-5ª, 2002).

Amenaza	Método de evaluación
Problemas de instalación	Los estudios de batimetría de la zona no detectaron obstáculos en el fondo marino que representen amenazas para la instalación y operaciones en el área.
Falla por Punzonamiento	Los estudios no presentaron amenaza de punzonamiento en el área.
Falla de fundaciones por cargas excepcionales de tormentas	No se posee información del flujo de agua y corrientes de la zona de estudio. Sin embargo, las características en los alrededores del pozo PTUCV_1 (la pendiente del fondo marino de 0,10% y la presencia de una arcilla limosa muy compacta por debajo de 1 m de profundidad), indican que el suelo del fondo marino no es sensible a los efectos del oleaje.
Falla por deslizamiento	Debido a la poca pendiente determinada en la interpretación del horizonte correspondiente al fondo marino, en conjunto con la batimetría del área de estudio, no se observa ningún tipo de amenaza por deslizamiento.
Inestabilidad del fondo marino (“mudslides”, “seabed slides”)	En el levantamiento geofísico no se evidencian estructuras que puedan causar inestabilidad del fondo marino.
Acumulaciones de gas someras	Los estudios sísmicos 3D y el mapa batimétrico no indican presencia de gas superficial en las zonas aledañas al pozo PTUCV_1
Fallas geológicas	Por medio del estudio de los datos sísmicos 3D se determinó que en la zona donde está ubicado el pozo PTUCV_1 no existe amenaza superficial para la instalación por la presencia de fallas activas o inactivas. Se debe tomar en consideración que la Falla 10, intercepta al pozo a una profundidad de 1,050 s (aproximadamente a 1219,2 m por debajo del fondo marino). Sin embargo es un aspecto a considerar para el desarrollo seguro de las actividades de perforación.
Objetos sumergidos (tuberías, barcos hundidos, escombros)	No se observaron objetos que puedan afectar la instalación ni exploración del área.
Depresiones locales, arrecifes, rocas	Los registros geofísicos indican que el fondo marino es una superficie plana y uniforme, que no presenta pendientes pronunciadas, montículos, arrecifes o afloramiento de rocas.
Huellas dejadas por otros Jack-up (“foot prints”)	No se observan ninguna depresión que pueda inferir con la puesta de un “Jack up” previo.

5.3.2 Correlación de los datos sísmicos 3D con el estudio de amenaza geológica convencional

La sísmica 2D de alta resolución se adquiere, rutinariamente, para la evaluación de riesgo a nivel somero y obtención de los permisos para la perforación, pero estos datos por lo general solo son utilizados para este propósito. Los datos sísmicos 3D, sin embargo, poseen un volumen de datos con mayor información, que son utilizados para prospección, pero carecen de resolución para identificar cuerpos de interés a nivel somero con el detalle requerido (Figura 5.38).

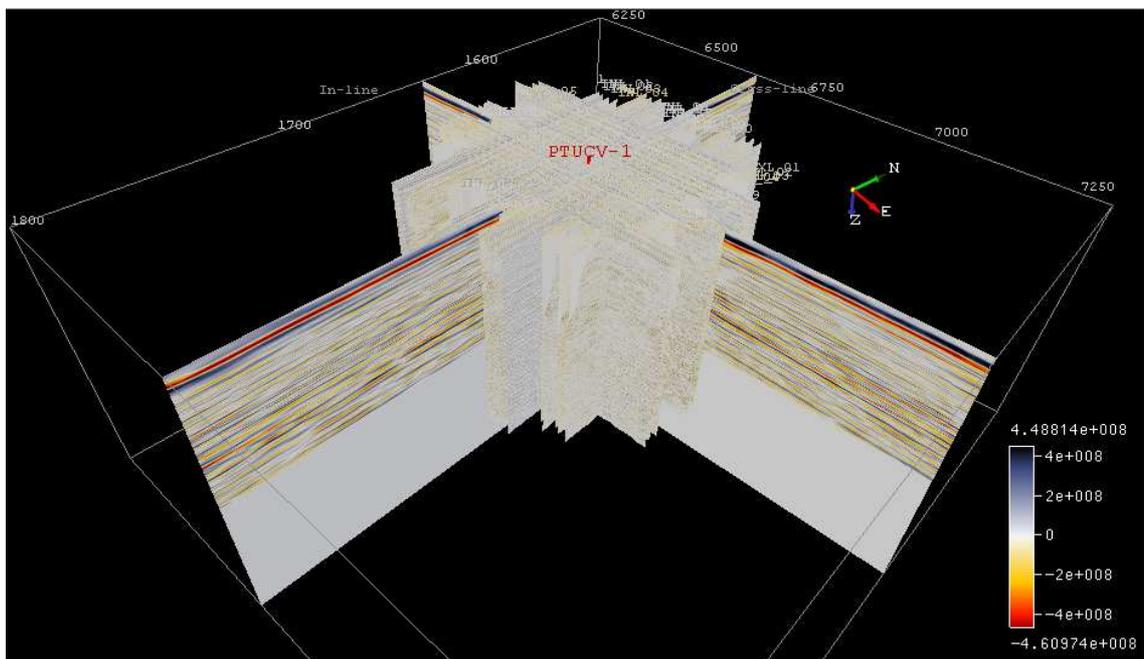


Figura 5. 38. Despliegue de los datos sísmicos 3D y 2D de alta resolución del área de estudio.

La medida de resolución de los datos sísmicos 3D y 2D de alta resolución está dada por el límite de la separabilidad entre los reflectores sísmicos. Para el estudio de los datos sísmicos 3D este límite de resolución es de 79.520 pies (24.4 m) con una frecuencia de 20 Hz y una velocidad de 6363 pies/s (1939,44 m/s), mientras que para los datos sísmicos 2D es de 41,01 pies (12,5 m) con una frecuencia de 98 Hz, para reflexiones someras.

La litología observada en el área, como las lutitas variadas, se ven a menudo, en los datos sísmicos 3D, como continua, moderada y de gran amplitud, también se puede observar

reflectores entrelazados que marcan importantes límites estratigráficos. Las discontinuidades en los horizontes (como las causadas por fallas, depresiones o canales) se pueden apreciar en los horizontes de manera continua.

Con los datos sísmicos 3D también se pueden obtener imágenes de amplitudes que representan montículos asociados con la expulsión de fluidos, y las amplitudes observadas en el lecho marino mostrarían el desplazamiento de los fluido a lo largo de montículos o fallas. Si se presentan montículos activos en el suelo marino pueden indicar que los sedimentos circundantes están en el proceso de sobrepresiones de ventilación.

Otros tipos de datos de alta resolución geofísicas tales como el sonar de barrido lateral o los perfiladores de fondo tipo “*Pinger*” y “*Spaker*”, pueden ayudar a determinar si la sobrepresión de los fluidos se han desplazado en el fondo marino a lo largo de fallas o filtraciones en la geología ocurridas anteriormente o en el presente. El registro tipo “*Pinger*” también puede filtrar la imagen, pero la calidad de los registros disminuyen al aumentar la profundidad del agua y la irregularidad del fondo marino.

En la figura 5.39, se observa que, en el mapa batimétrico de los datos sísmicos 3D junto al mapa batimétrico de los datos sísmicos 2D de alta resolución y el mosaico de sonar de barrido lateral (Interpretación de Izquierdo, 2010), el fondo marino presenta una reflectividad relativa baja y uniforme, la cual se asocia a sedimentos blandos y sin expresiones morfológicas importantes o abruptas.

Al comparar estos resultados se observa que los pequeños detalles al norte y al sureste del área guardan relación con altos en la superficie del fondo marino presentes en los mapas estructurales del área.

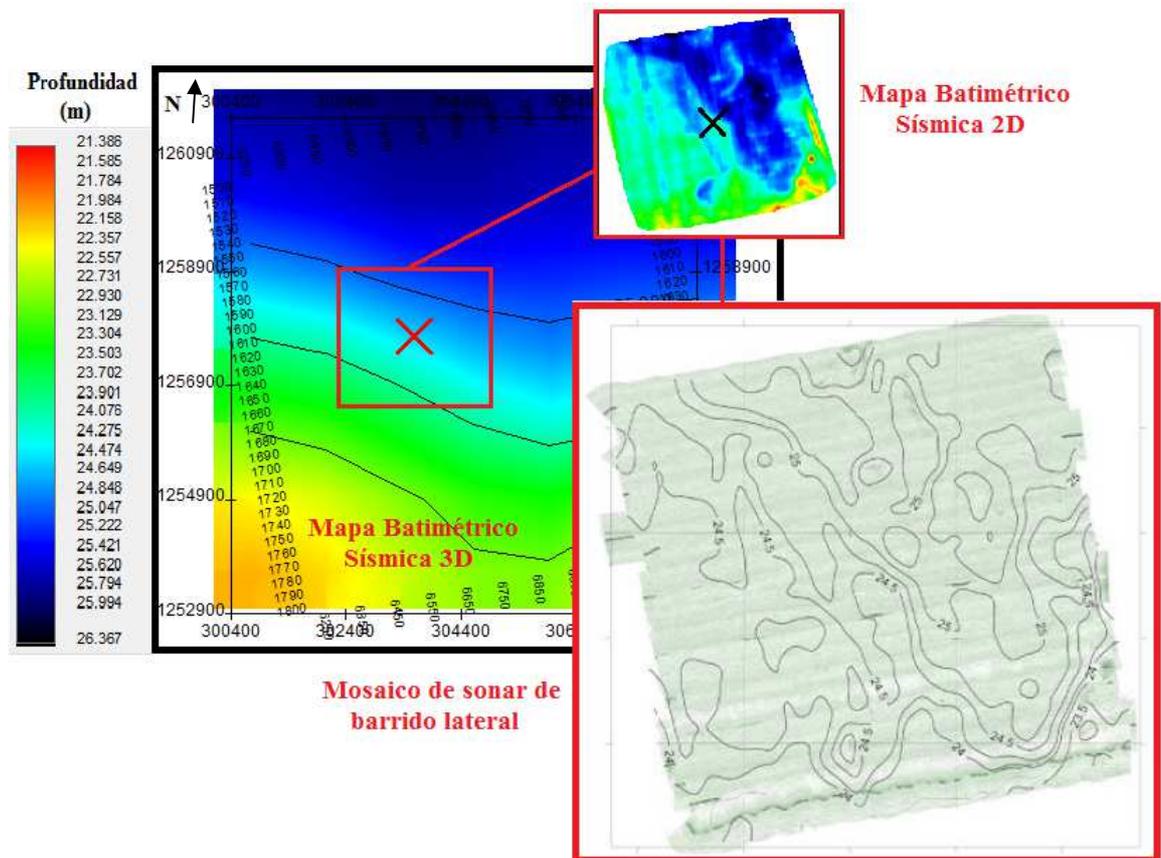


Figura 5. 39. Mapa batimétrico de los datos sísmicos 3D junto al mapa batimétrico de los datos sísmicos 2D y el mosaico de sonar de barrido lateral con el contorno de la batimetría monohaz.

El alcance máximo del perfilador de fondo tipo “Pinger” es de 25 metros por debajo del fondo marino, donde aparece el múltiple. El horizonte H1 representa el límite de los sedimentos recientemente depositados, por encima de este los sedimentos presentan una estratificación subparalela a este horizonte. Por debajo del horizonte H1 no se evidencia una respuesta sísmica importante para ser interpretada (Izquierdo, 2010).

En la figura 5.40 se muestran las líneas centrales del perfilador de fondo tipo “Pinger” interpretadas para los datos sísmicos 2D (“inline” y “crossline” 13), en donde se observa un paleocanal, que se mantiene persistente en el tiempo. Este paleocanal, ubicado al este del pozo, alcanza unos 20 metros de espesor total de relleno y un cauce aproximado de 120 m (Izquierdo, 2010).

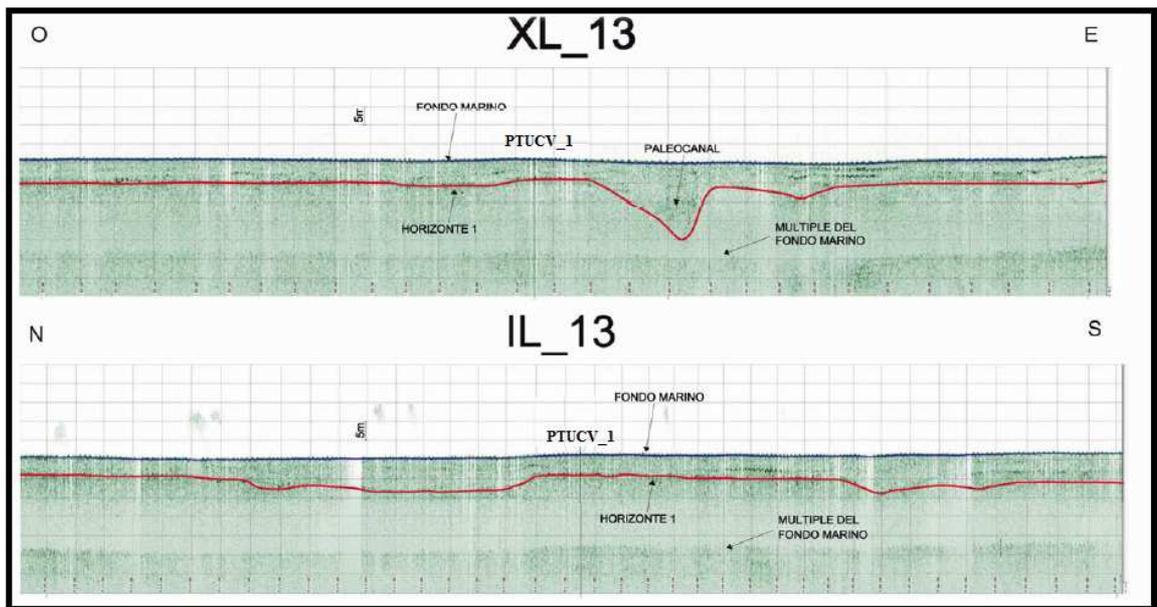


Figura 5. 40. Registro de perfilador de fondo somero donde se observan las características de la zona de estudio. (Tomado de Izquierdo, 2010).

En la figura 5.41 se muestra la utilidad de la interpretación de la sísmica 2D de alta resolución y la sísmica 3D para predecir y evitar, los riesgos geológicos asociados a acumulaciones de gas a nivel somero. Debido a la poca información obtenida solo con el pozo PTUCV_1, los posibles riesgos tuvieron que ser inferidas en las cercanías de este solamente con los datos sísmicos.

Según Izquierdo (2010), se presentan 5 horizontes a nivel somero en los datos sísmicos 2D. H0 (Fondo Marino) a 0.024 s, H1 a 0.049 s, H2 a 0.078 s, H3 a 0.103 s y H4 a 0.177 s. Siguiendo con esto, el H1, de los datos sísmicos 3D, se observa a 0.200 s, indicando que no se posee una mejor resolución para interpretar con la misma calidad presentado en los datos sísmicos 2D.

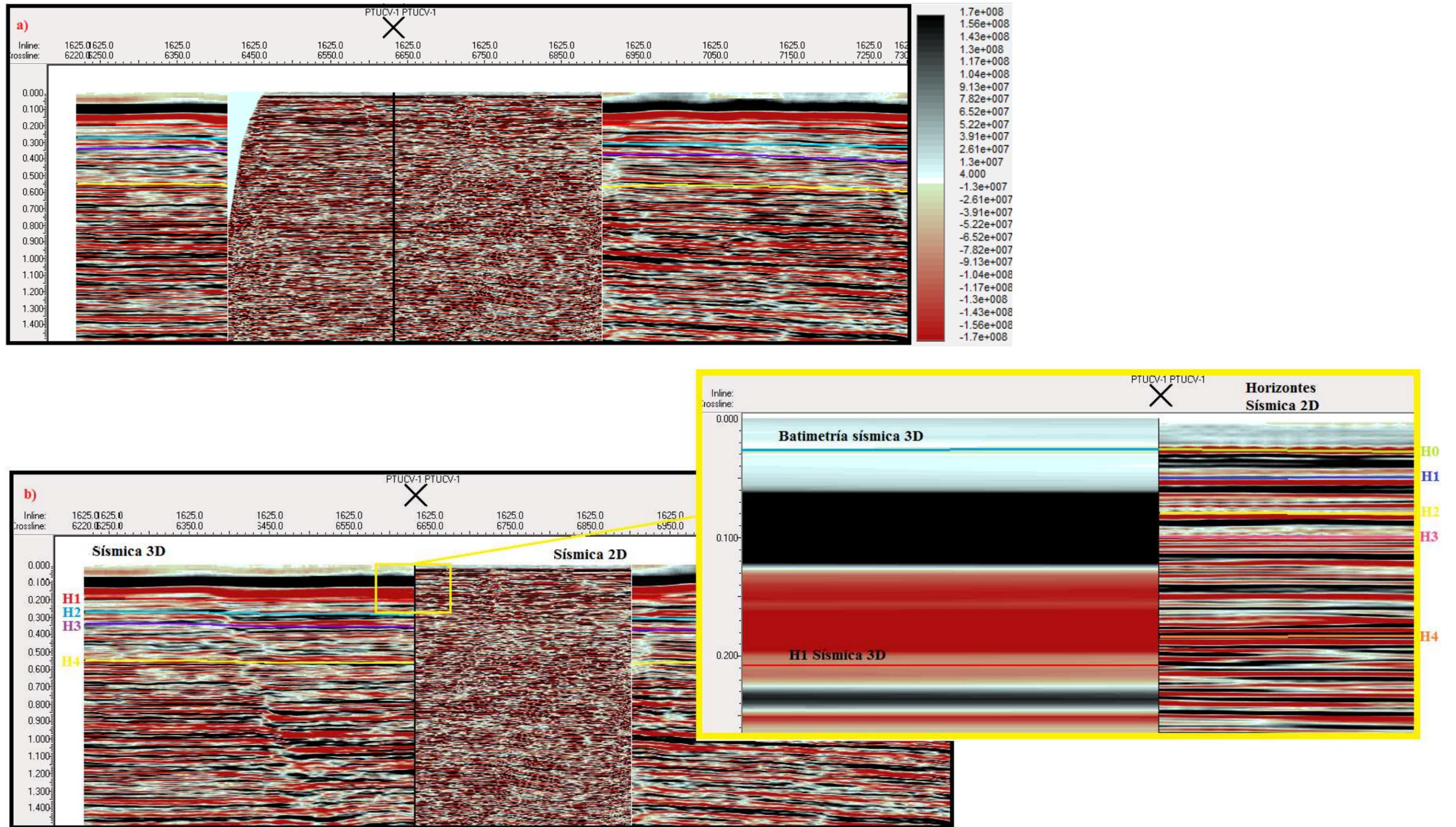


Figura 5. 41. Interpretación de los datos sísmicos 3D con los datos sísmicos 2D de alta resolución. a) Superposición del “inline” 1625 de los datos sísmicos 3D con el “crossline” 13 de los datos sísmicos 2D de alta resolución. b) Visualización de los horizontes interpretados de la sísmica 2D de alta resolución junto con la interpretación del horizonte 1 de los datos sísmicos 3D.

Según Izquierdo (2010), los horizontes interpretados en los datos sísmicos 2D de alta resolución describen lo siguiente:

La superficie del fondo marino (horizonte H0), el cual se encuentra a 0.024 s, es plana y uniforme con variaciones. Se puede observar una leve depresión hacia el noreste del área de estudio. Las profundidades van desde los 22,4 m hasta los 25,6 m, estos valores son consistentes con lo reportado por la batimetría monohaz (Figura 5.40). Las mayores profundidades se encuentran al noreste del área de estudio y no se observan fallas que afecten al fondo marino.

El horizonte 1 (H1), el cual se encuentra a 0.049 s, presenta una mayor amplitud en comparación con los estratos suprayacentes. Las profundidades de este horizonte van desde los 40 hasta 49.5 metros. Las zonas de mayor profundidad se encuentran en las zonas cercanas a las fallas y en el paleocanal al este de la ubicación del pozo PTUCV_1. A 260 metros al este de la ubicación del pozo se evidencia la presencia de un paleocanal de orientación aproximada S-N. A su vez se observa una falla normal F2 con un rumbo aproximado de N 30 O y buzamiento hacia el este ubicada 250 metros al oeste del pozo y otra falla normal F1 ubicada 680 metros al este de la ubicación del pozo con un rumbo paralelo a la falla F2 y buzamiento hacia el oeste. Las fallas F1 y F2 no cruzan la ubicación del pozo en este horizonte.

El horizonte 2 (H2), el cual se encuentra a 0,078 s, posee profundidades que van desde 61,0 hasta 75,0 metros, la zona menos profunda se encuentra al sur del área de estudio y al igual que en el horizonte H1 las zonas de mayor profundidad se encuentran en el paleocanal y cercanas a las fallas F1 y F2 como se puede apreciar en la Figura 5.12.

Se interpretaron las fallas F1 y F2 y al igual que en el Horizonte H1 éstas no cruzan la localización del pozo. Se observa que entre las fallas se forma una estructura anticlinal con el mismo rumbo que las fallas debido a los esfuerzos compresivos causados entre ellas. En este horizonte aún se observan evidencias del paleocanal observado en el horizonte H1.

En el horizonte 3 (H3), el cual se encuentra a 0.103 s, posee profundidades que van desde 81 hasta 103 metros. Las menores profundidades se encuentran en la zona sur-suroeste del área de estudio y las mayores profundidades se encuentran cercanas a la falla F1.

En este horizonte se interpretan las fallas F1 y F2 las cuales no cruzan la localización del pozo. Se aprecia mejor la estructura anticlinal entre las dos fallas. Al sureste, a 600 metros del pozo PTUCV_1 se observa una falla F3 que es paralela a las fallas F1 y F2 y buza hacia el este.

El horizonte 4 (H4), el cual se encuentra a 0.177 s (siendo el más cercano al horizonte 1 interpretado en los datos sísmicos 3D), posee unas profundidades que van desde los 136,0 m hasta los 178,0 m. Como se observa en la Figura 5.43c se interpretó la falla F3 al sureste que genera una estructura levantada en dirección hacia la falla F2 lo que además se puede corroborar en la figura 5.42a y b donde se aprecia las mismas fallas y estructura (Mapa estructural del horizonte 1, de los datos sísmicos 3D).

Ambos datos sísmicos no evidencian riesgos por presencia de acumulaciones de gas a nivel somero, deslizamientos, volcanes de lodo, etc (Figura 5.42).

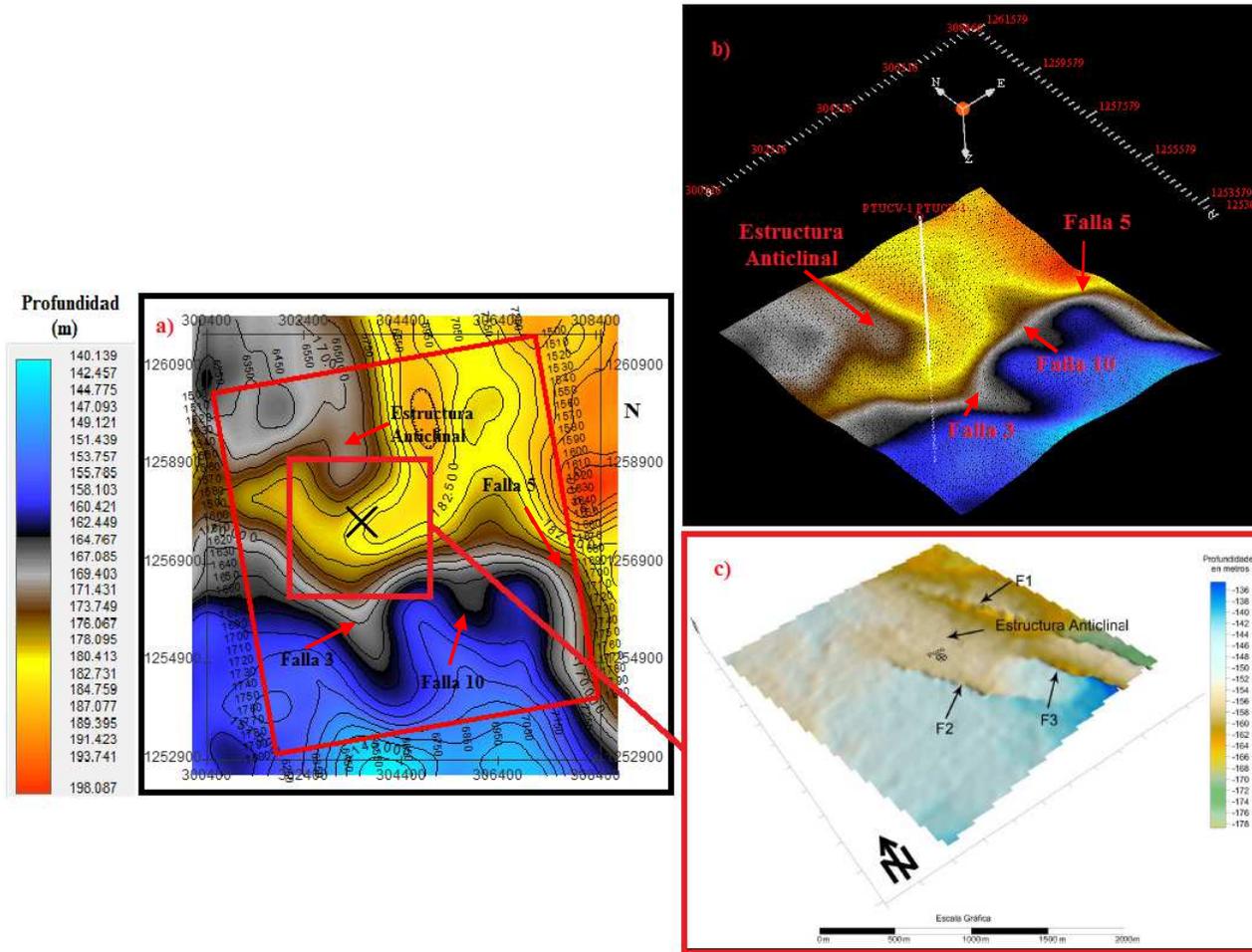


Figura 5. 42. Mapa estructural en profundidad del área de estudio. a) Mapa estructural en profundidad para el horizonte 1 de los datos sísmicos 3D. b) Visualización 3D del mapa estructural en profundidad para el horizonte 1. c) Mapa estructural en profundidad del horizonte H4 de los datos sísmicos 2D de alta resolución.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a la interpretación sísmica realizada, al análisis de atributos y a la evaluación de riesgo geológico a nivel somero se concluye que:

La aplicación de los atributos de descomposición espectral, a diferentes frecuencias, demostró que las anomalías responden a características estratigráficas controladas por rasgos estructurales presentes en el área.

De acuerdo al estudio de las propiedades físicas de las rocas y datos sísmicos, la zona podría representar un ambiente transicional costero a continental reflejando ambientes marino somero y fluvial deltaico dominado por olas. La litología presente va desde arenas de grano fino a grueso hasta lutitas variadas de grises hacia el nivel somero hasta rojas hacia niveles más profundos.

Los atributos basados en la transformada de Hilbert aplicados a los datos sísmicos 3D mostraron que pudiera haber presencia de fluido (gas biogénico), sin embargo los pocos datos o estudios suministrados del área no son suficientes para asegurar o descartar la presencia de dicho fluido y que este pueda presentar un riesgo a nivel somero.

Los atributos de coherencia, similitud y geométricos aplicados a los datos sísmicos 3D indicaron la existencia de 12 fallas con desplazamiento transcurrente normal. Sin embargo no se evidencian fallas geológicas a nivel somero que puedan ocasionar riesgo a las estructuras o a la perforación.

El estudio integrado de los atributos permitió definir diferentes cuerpos asociados a canales, tipos de depositación encontrados en la zona (arenas y/o lutitas) y estructuras estratigráficas.

El fondo marino presentó una pendiente aproximada de 0,10%, lo que indica que no existe evidencia de posible riesgo para la colocación de estructuras tipo “*Jack up*”, asociado a deslizamientos.

El valor de 0,14g obtenido con el análisis de amenaza sísmica según las normas COVENIN-1756/2001 se encuentra por debajo para la zona sísmica S2 y S3.

Debido a que el contenido de frecuencia en el primer segundo de datos, es fuertemente afectado por una secuencia de procesamiento sísmico que estuvo enfocada en una ventana de tiempo entre 1,5 y 3,7 segundos, estos datos sísmicos 3D no son factibles para la evaluación de amenazas geológicas a nivel somero (<100 metros de profundidad). Sin embargo, con una buena calidad de datos sísmicos 3D, se puede mejorar significativamente la interpretación de lo observado en la litología y la evaluación de riesgo en las secciones someras.

Se recomienda realizar estudios geofísicos y geológicos regionales a nivel somero para definir los ambientes depositacionales y la historia geológicas del subsuelo de tal manera, que no solo puedan ser base para futuros estudios de amenaza somera en la zona, sino también para aquellos proyectos de desarrollo sustentable en la región, que son afectados por las condiciones geológicas actuales. En este caso, los detalles que ofrecen los datos sísmicos 2D de alta resolución proporcionan una optimización para la interpretación de los sedimentos estudiados a nivel somero.

Se recomienda el procesamiento de los datos sísmicos 3D enfocados en los primeros milisegundos para mejorar la calidad del dato y permitir la adecuada interpretación de los eventos a nivel somero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Advance Geoscience Inc, s-f Seismic Reflection Surveys
<http://www.advancedgeoscience.com/>.

Almazar R. (1998). *Campos Petrolíferos de Venezuela, Golfo de Venezuela*. Código Geológico de Venezuela PDVSA-INTEVEP. (1997). Recuperado en Octubre 18, 2011.

<http://www.pdvsa.com/lexico/camposp/cp060.htm>.

Audemard, F.A., y Giraldo, C., (1997). Desplazamientos dextrales a lo largo de la frontera meridional de la placa Caribe, Venezuela septentrional. *Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geología*. Tomo 1, p 101-108.

Audemard, F.A., (1995)a. *Evolution Geodynamique de la Façade Nord Sud-americaine: Nouveaux Ápports de l'Histoire Géologique du Bassin de Falcón, Venezuela*. XIV Caribbean geological Conference, Port of Spain, Trinidad.

Audemard, F.E., De Mena, J, (1985). Falcón Oriental, Nueva Interpretación Estructural. VI Congreso Geológico Venezolano, p 2317-2329.

Audemard, F.A. (1995)b. La cuenca Terciaria de Falcón, Venezuela Noroccidental: Síntesis estratigráfica, génesis e inversión tectónica. IX Congreso Latinoamericano de Geología.

Audemard, F.A., (1997). Tectónica Activa de la Región Septentrional de la Cuenca Invertida de Falcón, Venezuela Occidental. *Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geología*. Tomo I, p 93-100.

Audemard, F., Romero, G., Rendon, H. y Cano, V., (1999). Sismicidad, geotectónica y campo de esfuerzo al norte de Venezuela. *Funvisis*.

Audemard, F.A., (2001). *Quaternary tectonics and present stress tensor of the inverted northern Falcón Basin, northwestern Venezuela*. *Journal of Structural Geology* 23 (2001), p 431–453.

Audemard, F., Romero, G., Rendon, H. y Cano, V., (2005). *Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from fault-slip data and focal mechanism solutions*. Earth-Science Reviews 69, p 181–233.

Audemard, F.A., (1993). *Néotectonique, sismotectonique et aléa sismique du nord-ouest du Vénézuéla (système de failles d'Oca-Ancón)*. Tesis doctoral, Universidad de Montpellier II. 369 p.

Ayala, F.J. (Ed.) (1987). Riesgos Geológicos. Serie Geología Ambiental. Instituto Geológico y Minero de España. Curso de Riesgos Geológicos. IGME, Madrid, 333 pp.

Bennett, W. *Guideline for site specific assessment of mobile Jack-up units*. Society of Naval Architects and naval engineers. New Jersey.

Bacon M., Simm R. y Redshaw T. (2003). *3-D Seismic Interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bahorich, M y Farmer, S. (1995). *3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The Coherence cube*. The Leadings Edge, 1053-1058.

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

Blumentritt, C. (2008). *Highlight volume: reducing the burden in interpreting spectral decomposition data*. The Leading Edge. Pp. 330-333.

Boesi, T. y Goddard, D., (1991). *A new geologic model related to the distribution of hydrocarbon source rocks in the Falcón basin, northwestern Venezuela en Biddle K. T. (ed.), Active Margin Basins*. Memoria AAPG 52, Tulsa, OK, p 303-319.

Brown, A. (2001). “*Understanding Seismic Attributes*”, Geophysics, Vol 66 (1), pp 47-48.

Brown, A. (2003). “*Interpretation of three-dimensional seismic data*”. AAPG Memoir 42. SEG Investigations in Geophysics, No 9.

Catuneanu, O., Tucker, M., Abreu, V., Eriksson, P., Holbrook, J., Neal, J., Strasser, A., Fisher, W., Galloway, B., Gibling, M., Fielding, C., Posamentier, H. y Pratt, B. (2008).

Sequence Stratigraphy. SciTopics. Revisado Junio, 2011, from http://www.scitopics.com/Sequence_Stratigraphy.html

Cenieh. (2008). Geocronología del Plio-Pleistoceno. Coordinado por el Dr. José M. Parés. <http://www.cenieh.es>

Chelotti, L., Acosta, N. y Foster, M. (2009). Interpretación Sísmica de Reflexión. Chubut.

Claerbout, J.F. (1976). *Fundamentals of Geophysical Data Processing*. New York: McGraw-Hill, P 59-62.

Díaz de Gamero, M. L., (1977). Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno Inferior del centro de la Cuenca de Falcón, Venezuela. Escuela de Geología y Minas, Universidad Central de Venezuela, Caracas, GEOS, n. 22, p. 3-60.

Díaz de Gamero, M. L. (1985). Estratigrafía de Falcón Nororiental. VI Congreso Geológico Venezolano. Caracas, v. 1, p. 454-502.

Dier, A., Carrol, B., Abolfathi, S. *Guidelines for Jack-up rigs with particular reference to foundation integrity*. Platinum Blue House. Egham.

Funvisis, (2000). Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela. Escala 1:2.000.000 Proyección de Mercator; Un proyecto de cooperación entre el U.S. Geological Survey (USGS) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) con el apoyo do Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo S.A. (INTEVEP) y Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA).

Galloway, W., (1975). *Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional Systems*. En: Deltas, Models for Exploration. Broussard, M. et al., Houston Geological Society. 87-98 p.

Geohidra, (2008). Trabajos de Investigación Geotécnica y Geofísica para el Campo Urumaco I en el Golfo de Venezuela. Parte A: Geología y Sismicidad (Geohazards).

Geohidra, (2008). Trabajos de Investigación Geotécnica y Geofísica para el Campo Urumaco II en el Golfo de Venezuela. Parte A: Geología y Sismicidad (Geohazards).

González de Juana, C., Iturralde, J. y Picard, X, (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Ediciones FONINVES. Caracas, v.1, p.407 y v. 2, 624 p.

Gorney, (2007). Cronology of Cenozoic tectonic events in western Venezuela and the Leeward Antilles based on integration of offshore seismic reflection data and on-land geology.

Graf, C., (1969). Estratigrafía cuaternaria del noroeste de Venezuela. Asoc. Ven. Geol., Min. Y Petr., Bol. Inform., 12 (11): 393–416.

Guevara E, Nicklas L, Monsalve O y Ochoa R. (1977). *Evaluación del Potencial de Hidrocarburos y Recomendaciones de Exploración* (Golfo de Venezuela). Petróleos de Venezuela S.A Grupos Interfiliales de Exploración, Caracas Venezuela.

Hardage, B. A., Levey, R. A. (2006), *Pendleton, V., Simmons, J., and Edson, R., A 3D seismic case history evaluating fluviially deposited thin-bed reservoirs in a gas- producing property*: Geophysics 59 1650–1665

Incostas, (2008). Investigación Geofísica en los Bloques Urumaco I y II, Golfo de Venezuela. Informe Preliminar. Documento Número 1670-UI-TC-F-FA-IF-01 Rev. B.

Izquierdo, N. (2010). Estudio Geofísico Integrado para la Evaluación de Amenazas Geológicas en Perforaciones Costa Afuera en el Golfo de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Inédito. Caracas, Venezuela.

Jardine, R. y Chow, F. (2005). *Design Methods for Driven Piles in sands and clays*. Ed Thomas Telford. Imperial College Pile (ICP).

Kidd, G., Montilla, G. y Pomonti, K. (2007). “PDVSA Reporte Exploratorio del Proyecto PGP_Roblote”. Realizado por la empresa GDK Consulting para PDVSA.

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.

Macellari, C.E. (1995). *Cenozoic Sedimentation and Tectonics of the Southwestern Caribbean Pull-Apart Basin, Venezuela and Colombia*, in A.J. Tankard, R. Suarez S., and H.J. Welsink, *Petroleum Basins of South America: AAPG Memoir 62*, p 757-780.

Maraven (1985). *Geología y Potencial de Hidrocarburos en el Golfo de Venezuela*. Informe Técnico no Publicado. Maraven, S.A, Caracas, Venezuela.

Marfur, K. y Chopra, S. (2007). *Seismic Attributes for prospect identification and reservoir characterization*. SEG Geophysical developments series. N° 11, Tulsa, OK, USA.

Mendoza, V. (2005). *Geología de Venezuela: Tomo II. Cretácico, Terciario y Reciente en Venezuela*. Guía de Estudio de la Universidad de Oriente para la cátedra Geología de Venezuela. Inédito.

Ministerio de Minas e Hidrocarburos (1970). *Léxico Estratigráfico de Venezuela, 2da. Edición*. Bol. Geol., Publ. Esp. N° 4: 756 p.

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.

Mitchum, R.M, JR, Vail, P.R y Thomson, S. (1977). *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphic Analysis*. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir 26, *Seismic Stratigraphy applications to hydrocarbon exploration*.

Mitchum, R.M., JR, Vail, P.R. y Sangree, J.B. (1977). *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphy Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences*. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir 26, *Seismic Stratigraphy applications to hydrocarbon exploration*.

MMS NTL. (1998). *Guideline for Shallow Hazards Survey and Report requirements for OCS Developments Operations*. Mineral Management Service, US. 98-13

Muessig K., (1978). *The central Falcon igneous suite, Venezuela: Alkaline basalt intrusions of Oligocene-Miocene age*. *Geologie en Mijnbouw*, v.52(2), p 261-266.

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

Parkinson, R (2001), *High Resolution Site Survey*. Londres, Spon Press.

Parra, J. (2008). Experiencias en Exploración Geotécnica Costa Afuera en Venezuela. GEOHIDRA Consultores C.A. Conferencia 50 Aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia “Estado de la Práctica” en Honor a Gustavo Luís Pérez Guerra. Caracas, Venezuela.

Partika, L y Garossino, P. (2003). “*Spectral decomposition for seismic stratigraphic patterns*”. Adaptación realizada por los autores para internet de la columna “Geophysical Corner” de la AAPG Explorer.

PDVSA, 1999. “Especificación de Ingeniería JA-221. Diseño Sismorresistente de Instalaciones Industriales. Manual de Ingeniería de Diseño.” Vol 18-I. 1999.

Quintero, C., (2007). Estudio del espesor de la corteza y caracterización de sus posibles discontinuidades en la región noroccidental de Venezuela, a partir del análisis de funciones receptoras. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

Royo y Gómez, J., 1956. Quaternary in Venezuela. *Stratigraphical Lexico of Venezuela*. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, p. 728.

Sinha, S., Routh, P., Anno, P. y Castagna, J. (2005). “Spectral Decomposition of seismic data with continuous Wavelet Transform”.

Schlumberger, (1997). Evaluación de Pozos, WEC. Capítulo I: Geología de Venezuela, 46 p.

Sheriff R. (2001). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysics (SEG).

Stainforth, R. (1968). *Geology of the Gulf of Venezuela*. Creole Petroleum Corporation, Caracas.

Stone D. G (1994). *Designing Seismic Surveys in Two and Three Dimensions*. Tulsa: Society of Exploration Geophysics (SEG).

Strecker Uwe (2004). *Seismic Attribute Analysis in hydrothermal dolomite, Devonian Slave Point Formation, Northeast British Columbia, Canada*. SEG Annual Meeting, Denver.

Taner, M. T. (2001). *Seismic attributes*. CSEG Recorder, Houston, USA., 48-56.

Taner, M., Sheriff R. (1997) *Application of Amplitude, Frequency and other Attributes to Stratigraphic and Hydrocarbon Determination*. AAPG Memoir 26 Houston, Estados Unidos de América.

The Society of Naval Architects and Marine Engineers, (2002). *Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-Up Units*. Technical and Research Bulletin 5-5A, 493 p.

Tricart, J. y A. Millies-Lacroix, (1962). *Les terrasses quaternaires dans les Andes vénézuéliennes: Bulletin Societe Geologique de France*.

WS Atkins Consultants Ltd., (2004). *Risk implications in site characterization and analysis for offshore engineering and design*. Research Report 286 prepared by WS Atkins Consultants Ltd for the Health and Safety Executive.

ANEXOS

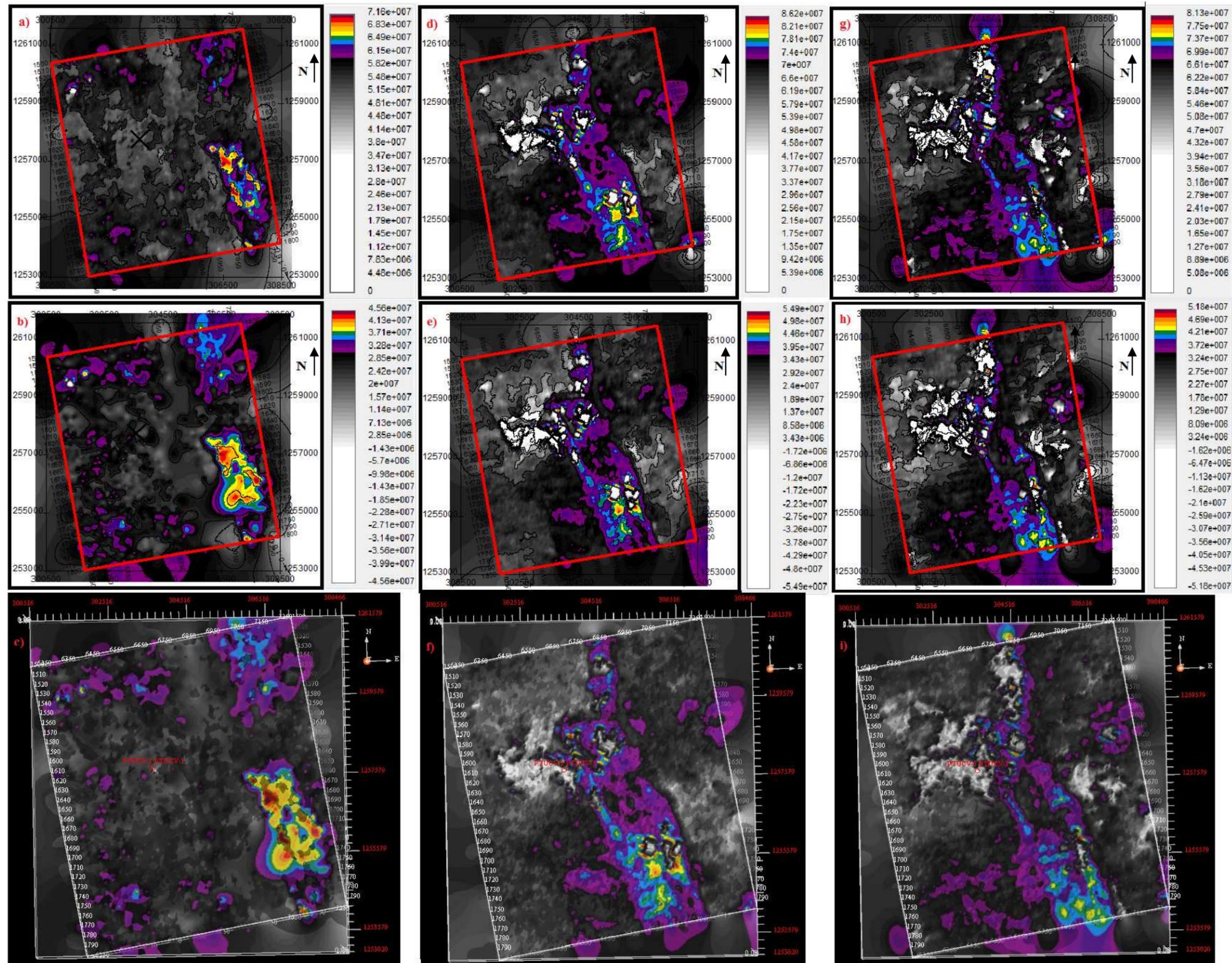


Figura Anexo 1.1. Mapas de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 1. a) Transformada de Fourier con una frecuencia de 8Hz. b) Transformada de Morlet con una frecuencia de 8Hz. c) Superposición de los atributos aplicados a 8Hz. d) Transformada de Fourier con una frecuencia de 12Hz. e) Transformada de Morlet con una frecuencia de 12Hz. f) Superposición de los atributos aplicados a 12Hz. g) Transformada de Fourier con una frecuencia de 14.3Hz. h) Transformada de Morlet con una frecuencia de 14.3Hz. i) Superposición de los atributos aplicados a 14.3Hz.

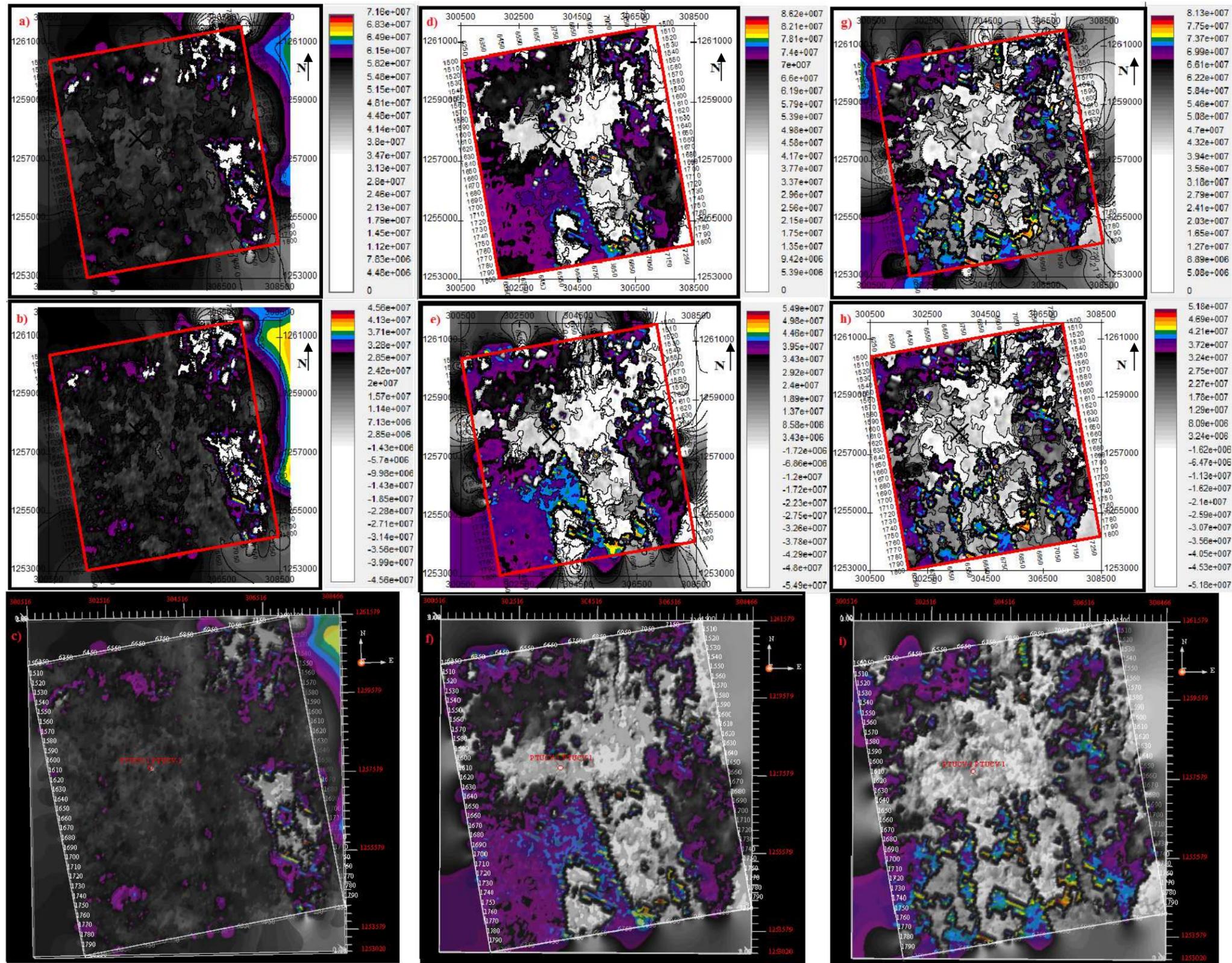


Figura Anexo 1.2. Mapas de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 2. a) Transformada de Fourier con una frecuencia de 8Hz. b) Transformada de Morlet con una frecuencia de 8Hz. c) Superposición de los atributos aplicados a 8Hz. d) Transformada de Fourier con una frecuencia de 12Hz. e) Transformada de Morlet con una frecuencia de 12Hz. f) Superposición de los atributos aplicados a 12Hz. g) Transformada de Fourier con una frecuencia de 14.3Hz. h) Transformada de Morlet con una frecuencia de 14.3Hz. i) Superposición de los atributos aplicados a 14.3Hz.

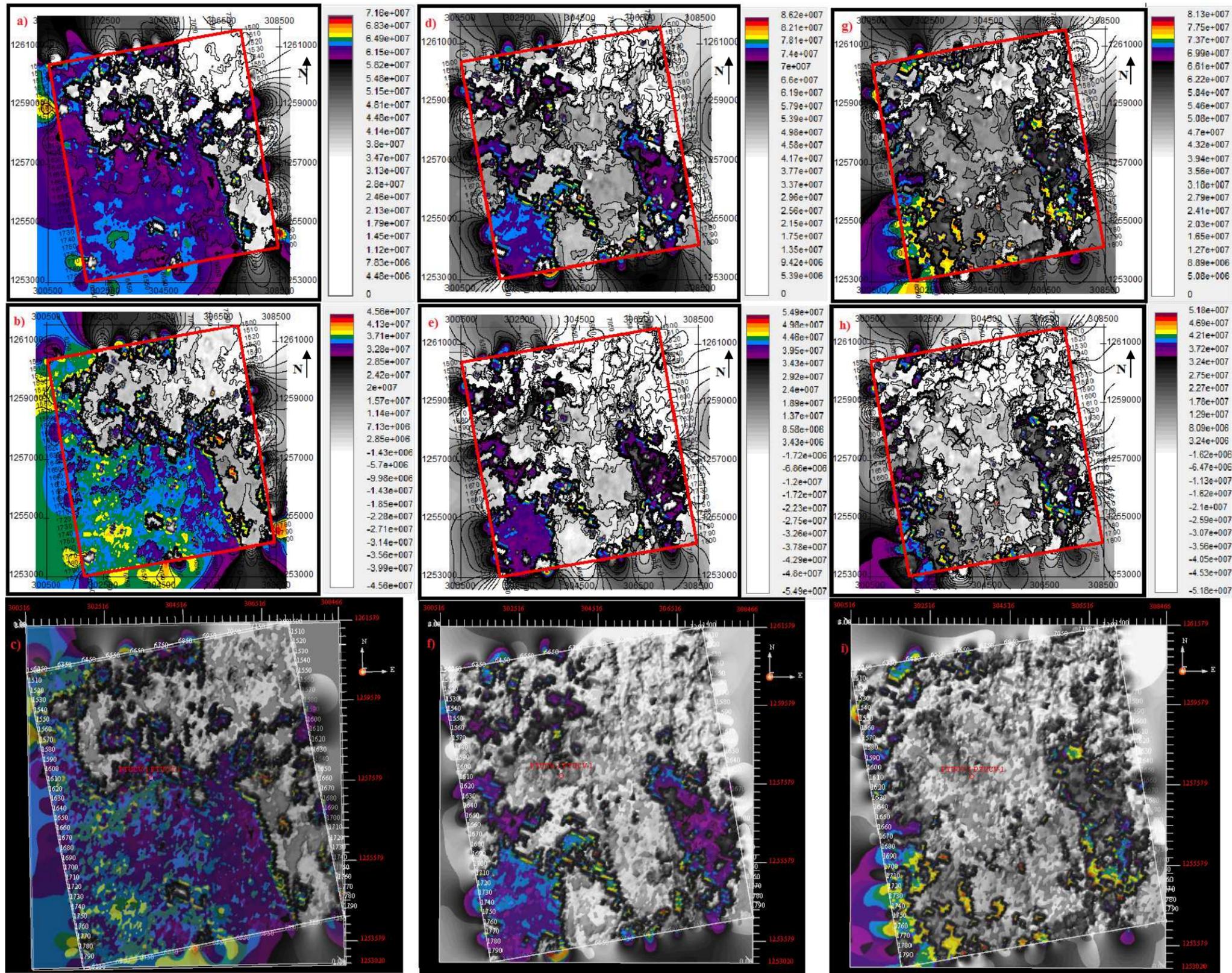


Figura Anexo 1.1. Mapas de atributos de descomposición espectral aplicados al horizonte 3. a) Transformada de Fourier con una frecuencia de 8Hz. b) Transformada de Morlet con una frecuencia de 8Hz. c) Superposición de los atributos aplicados a 8Hz. d) Transformada de Fourier con una frecuencia de 12Hz. e) Transformada de Morlet con una frecuencia de 12Hz. f) Superposición de los atributos aplicados a 12Hz. g) Transformada de Fourier con una frecuencia de 14.3Hz. h) Transformada de Morlet con una frecuencia de 14.3Hz. i) Superposición de los atributos aplicados a 14.3Hz.