

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE YACIMIENTOS
MEDIANTE LA CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES EN
EL CAMPO ORITUPANO-LEONA, ESTADOS
ANZOÁTEGUI Y MONAGAS, VENEZUELA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Bra. Flores R. Airam S.

Para optar al Título
de Ingeniera Geofísico

Caracas, enero 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE YACIMIENTOS MEDIANTE LA CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES EN EL CAMPO ORITUPANO LEONA, ESTADOS ANZOÁTEGUI Y MONAGAS, VENEZUELA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Cavada.
TUTOR INDUSTRIAL: MSc. Andrés Espeso.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Flores R. Airam S.
Para optar al Título
de Ingeniera Geofísico

Caracas, enero 2013

Caracas, Febrero del 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachillera Airam S. Flores Rivero, titulado:

**“CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE YACIMIENTOS MEDIANTE
LA CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES EN EL CAMPO
ORITUPANO-LEONA, ESTADOS ANZOÁTEGUI Y MONAGAS,
VENEZUELA.”**

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

Prof. Vincenzo De Lisa S.
Jurado

Prof. Juan José Infante
Jurado

Prof. José Cavada
Tutor Académico

MSc. Andrés Espeso
Tutor Industrial

DEDICATORIA

*Este trabajo y mi carrera están dedicados a María Rivero,
quien fue mi madre y mi amiga,
te debo todo lo que soy,
aunque ya no estés junto a mí
siempre te tendré presente.*

Te amo Mamá.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios.

A la Universidad Central de Venezuela, porque en ella me forme como profesional y como persona, los años cursados durante la carrera no fueron años fáciles sin embargo en la universidad tuve la oportunidad de compartir con un tan variado universo de personas, de hechos, de sucesos y realidades... que me enseñaron a mantener el ánimo en alto y hacer frente a todas las situaciones difíciles que se me presentaron, por eso agradezco nuevamente a la UCV y a todo lo que la integra.

A mi tutor industrial Andrés Espeso, por su colaboración y asesoría, por la confianza puesta en mí, por sus palabras de apoyo y el impulso dado antes y durante este trabajo. Por compartir su visión y experiencias, y sobre todo por darme la oportunidad a mí y a mis compañeros de realizar nuestros Trabajos Especiales de Grado, ¡muchas gracias profe!

A mi tutor académico José Cavada, por aceptar participar, por todas sus correcciones. Por tocar y abrir puertas que nos ayudaron a formarnos y que nos permitieron tener contacto con la industria, por toda su receptividad y por convertirse en el pilar del departamento de geofísica durante mi paso por ella.

Me siento muy afortunada de haber contado con la asesoría adicional de la ingeniera Ann Mezones, a la cual le agradezco enormemente sus consejos y aportes en este trabajo.

A Sasha Barh, por todo el tiempo dedicado, colaboración y apoyo técnico.

Al grupo de profesionales de INTEVEP, integrantes de la gerencia EYEX, en especial aquellos que me ayudaron de manera personal y técnica durante el desarrollo de este trabajo.

Al profesor Luis Chacón, por mostrarme que podemos ser personas integrales, por darle importancia a la formación del estudiante dentro y fuera de las aulas, por confiar en los estudiantes, por apostar a sus ideas y apoyarlas.

A todos los profesores de los que tuve la oportunidad de aprender en la escuela de Geología, Minas y Geofísica.

A mi amigo Arturo Rivero, por darme apoyo en los momentos difíciles, por ser un verdadero amigo, por tu compañía y consejos en momentos buenos y malos, gracias por siempre estar presente.

A Maholy, por todas las veces que me acompañaste, me escuchaste y me aconsejaste, por ser mi amiga siempre.

A la Lic. Morella y a los pasantes de la biblioteca de la escuela, en especial a Ángel, gracias por todos los momentos compartidos.

A todos mis amigos de la universidad, con los que compartí a diario horas de estudios, de distracción, de ocio y de colas en el comedor, aquellos que considero mis amigos: Ingemar, Angelvis, Jofrank, Shira, Said, Simón, Cesar “Wachu”, Andrea Meaño, Atilio, Karla, Pedro, Jorge “Porti”, Luisely, Roberto, Jorge García, Nestor, Carlos González, Robersy, Ignacio, Mariano, Leonardo, Rafael, Miguel, Cinthia, Naylet y Alvaro.

A mi hermana María de los Ángeles, gracias por llegar a nuestras vidas, por ser mi amiga y cómplice, te adoro con toda mi alma.

A Joan Sebastian, por hacerme tan feliz y sacarme siempre una sonrisa.

A mi abuela Ligia por ser mi amiga, por confiar en mí, por ayudarme tanto y por convertirse en mi segunda mamá.

A mis tías, muy especialmente a Luisa y Luis Gustavo por abrirme la puertas de su casa y darme su cariño incondicional, a Lucy, Xiomara, Gladys y Carlina por siempre estar pendiente de mí, por quererme tanto y apoyarme en todo.

A la Sra. Beatriz, al Sr. Chicho, Dalymer y Mau por demostrarme tanto cariño, por preocuparse por mí y hacerme sentir parte de su familia, mil gracias.

Por último a la persona más importante de mi vida, mi compañero, mi mejor amigo y mi novio, José Zavala, gracias por todo, es especial por toda la ayuda que me diste para la realización de este trabajo, gracias a ti está culminado, este logro es nuestro. Te amo mío.

Flores R. Airam S.

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE YACIMIENTOS MEDIANTE LA CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES EN EL CAMPO ORITUPANO LEONA, ESTADOS ANZOÁTEGUI Y MONAGAS, VENEZUELA

Tutor académico: Prof. José Cavada. Tutor industrial: MSc. Andrés Espeso.
Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela
de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2013, pág.

Palabras clave: facies sísmicas, redes neuronales y análisis de atributos.

Resumen: El área de Oritupano-Leona se localiza entre los estados Anzoátegui y Monagas, localizada en la provincia geológica de la cuenca oriental de Venezuela específicamente en la subcuenca de Maturín. En él se encuentran 23 campos petroleros, distribuidos en 8 conjuntos o unidades geográficas, la sección productiva en el área tiene un espesor promedio de 2500 pies, el objetivo del estudio es la formación Oficina; en la actualidad el campo está considerado como un campo maduro que ha sido perforado por unos 800 pozos. El presente trabajo se desarrolla en dos fases, una principal de interpretación de datos sísmicos y una segunda fase donde se aplican técnicas de clasificación de facies sísmicas con el fin de identificar nuevas zonas de interés. En la primera fase se realizó la reinterpretación de 5 horizontes: Basamento, Aq 1, Bur 3, Bur 4 y Oficina, la validación de los patrones estructurales, el modelo de velocidades y mapas en tiempo y profundidad de las distintas superficies. La interpretación de los horizontes se efectuó con el software Seisworks de Landmark y el volumen de velocidades se generó con Gocad de Paradigm. Posterior a la fase de interpretación se aplicó la metodología de clasificación de facies sísmicas en mapas, usando la tecnología de las redes neuronales que representa una rama de la inteligencia artificial, utilizada en la industria para el reconocimiento de patrones de trazas sísmicas a través de procesos de aprendizaje supervisados y no supervisados, por medio de los algoritmos de mapas auto-organizativos y aprendizaje de cuantificación vectorial de Kohonen, los mismos se basan en la sensibilidad de las trazas sísmicas a cambios litológicos y presencia de fluidos. La clasificación y análisis se aplicó a la secuencia Bur 3 debido al hallazgo de 4 canales dentro de la misma. Con el fin poder ofrecer más información sobre los geocuerpos encontrados, se generaron cortes de cada una de las superficies. La clasificación de los mapas de sismofacies se desarrolló con la aplicación Stratimagic de Paradigm, usando como dato de entrada la secuencia Bur 3 y las cuatro superficies correspondientes a cada geocuerpo. En la búsqueda de otro método de clasificación de facies se aplicaron técnicas multi-atributos de

agrupamiento jerárquico, que no es más que otro de los procedimientos usados para clasificar facies sísmicas, desarrolladas también con la aplicación Stratimagic de Paradigm. En los mapas de clasificación de facies sísmicas mediante el uso de redes neuronales se evidencia que: a) el mapa regional de facies sísmicas con el método no supervisado presenta una tendencia general asociada a los cambios laterales de las trazas influenciados principalmente por lineamientos estructurales, b) en el mapa generado con el método de aprendizaje supervisado se pudo identificar cuatro zonas con características sísmicas similares que satisfacen la tendencia general con que se ha venido explotando el potencial de producción y por último c) se reconoció la geometría externa que define a 4 canales de ambientes fluvio continentales presentes en la sección Bur 3, esto resalta la alta sensibilidad del método a las de las variaciones estratigráficas laterales. Por su parte en los bloques de facies generados a partir de las cuatro superficies correspondientes a cada canal, usando la metodología de agrupamiento jerárquico de atributos o “clasificación jerárquica” fue posible: a) distinguir la tendencia litológica presente en los depósitos de canal, b) las secciones de los bloques analizados dieron información de la proporción y distribución vertical de las facies sísmicas asociadas al patrón de depositación secuencial de los canales fluviales. Se concluye que el utilizar distintas metodologías de clasificación de facies sísmicas (clasificación neuronal y jerárquica) sobre los mismos datos sirve como complemento en la interpretación predictiva basada en técnicas no convencionales que se han venido desarrollando para la caracterización sísmica de yacimiento, adicionalmente permiten delinear la geometría externa y la arquitectura interna de los geocuerpos reconocidos en las secciones sísmicas. En este trabajo se demuestra que los métodos neuronales y jerárquicos son herramientas útiles para la clasificación de facies sísmicas en el campo ya que reflejan eficientemente las variaciones laterales y verticales de trazas sísmicas, que permiten reconocer zonas que ofrecen posibilidades de desarrollo en campos maduros como el campo Oritupano-Leona, el cual actualmente se encontraba sin expectativas de producción.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	3

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO	7
2.1 GENERALIDADES	7
2.2 EVOLUCIÓN GEODINÁMICA Y TECTÓNICA.....	8
2.2.1 <i>Fase pre-rift (Paleozoico)</i>	8
2.2.2 <i>Fase de rift y deriva (Jurásico Superior y Cretácico Inferior)</i>	9
2.2.3 <i>Fase de margen pasivo (Cretácico y Paleógeno)</i>	9
2.2.4 <i>Fase de colisión oblicua (Oligoceno-Mioceno Medio -Presente)</i>	9
2.3 LA SUBCUENCA DE MATURÍN	12
2.4 MARCO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL.....	13
2.4.1 <i>Megasecuencia de pre-“rift”</i>	13
2.4.2 <i>Megasecuencia “rift”</i>	14
2.4.3 <i>Megasecuencia de margen pasivo</i>	14
2.4.4 <i>Megasecuencia de colisión oblicua</i>	15
2.5 GEOLOGÍA LOCAL.....	17
2.5.1 <i>Estratigrafía local</i>	17
2.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL	21

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO	24
3.1 ATRIBUTOS SÍSMICOS	24
3.1.1 <i>Clasificación</i>	24
3.2 ANÁLISIS MULTI-ATRIBUTOS.....	27
3.2.1 <i>Análisis de la componente principal</i>	27
3.2.2 <i>Agrupamiento jerárquico</i>	28
3.3 CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES.....	30

3.4	REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	31
3.4.1	<i>Modelo de una red neuronal.....</i>	33
3.4.2	<i>Clasificación de las redes neuronales.....</i>	34
3.4.3	<i>Algoritmo de aprendizaje.....</i>	36
3.4.4	<i>Aprendizaje competitivo.....</i>	37
3.4.5	<i>Teuvo Kohonen.....</i>	37
3.5	LÍMITES DE SECUENCIAS.....	40
3.6	AMBIENTES SEDIMENTARIOS.....	40
3.6.1	<i>Ambiente costero.....</i>	41
3.6.2	<i>Ambientes fluvio-continetales.....</i>	43

CAPÍTULO IV

	METODOLOGÍA.....	46
4.1	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN.....	46
4.1.1	<i>Revisión bibliográfica.....</i>	46
4.1.2	<i>Revisión de los datos disponibles.....</i>	47
4.2	CÁLCULO DE LA CALIBRACIÓN SÍSMICA.....	49
4.2.1	<i>Sismograma sintético.....</i>	50
4.2.2	<i>Resolución sísmica vertical.....</i>	57
4.2.3	<i>Interpretación de horizontes.....</i>	59
4.3	GENERACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDADES.....	61
4.3.1	<i>Modelo de velocidades.....</i>	61
4.3.2	<i>Conversión tiempo-profundidad.....</i>	62
4.4	CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES.....	62
4.4.1	<i>Definición del intervalo para los mapas de facies.....</i>	62
4.4.2	<i>Análisis de mapas de facies sísmicas.....</i>	68
4.4.3	<i>Control de calidad.....</i>	68
4.4.4	<i>Análisis de facies sísmicas no supervisado.....</i>	70
4.4.5	<i>Análisis de facies sísmicas supervisadas.....</i>	70
4.5	ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS.....	71
4.5.1	<i>Cálculo de atributos sísmicos.....</i>	71
4.5.2	<i>Definición del intervalo para los bloques sísmicos.....</i>	71
4.5.3	<i>Análisis multi-atributos.....</i>	72

CAPÍTULO V

	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
5.1	INTERPRETACIÓN SÍSMICA Y RECONOCIMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	76
5.2	MODELO DE VELOCIDADES.....	82
5.3	CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES.....	89
5.4	ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS.....	112

CAPÍTULO IV

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
6.1	CONCLUSIONES.....	133
6.2	RECOMENDACIONES.....	135
	BIBLIOGRAFÍA.....	136

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 Mapa de ubicación geográfica, Oritupano.....	4
Figura 1.2 Área de estudio.	4

CAPÍTULO II

Figura 2.1 Mapa de ubicación de las cuencas sedimentarias en Venezuela.	7
Figura 2.2 Cronología tectónica del este de Venezuela.....	8
Figura 2.3 Configuración tectónica de la cuenca Oriental de Venezuela y localización de los principales campos petroleros, y la unidad Oritupano.	10
Figura 2.4 Cuadro de correlación N-S muestra las formaciones presentes en la cuenca Oriental de Venezuela	13
Figura 2.5 Columna estratigráfica de Oritupano-Leona.	17
Figura 2.6 Sección productiva del Mioceno (Bur 4-Bur 3).....	20
Figura 2.7 Mapa estructural regional.....	22
Figura 2.8 Pliegues de naturaleza extensional en el bloque Oritupano-Leona.	23

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Esquema de la aplicación ACP.....	28
Figura 3.2 Árbol de agrupamiento o dendograma y sus niveles.....	29
Figura 3.3 Distancia euclídea.....	30
Figura 3.4 Diagrama básico de una red neuronal.....	32
Figura 3.5 Diagrama de una red neuronal con más de una capa.	32
Figura 3.6 Diagrama de una red neuronal.	33
Figura 3.7 Algoritmos de aprendizaje.....	36
Figura 3.8 Arquitectura del modelo de SOM.....	38
Figura 3.9 Ambientes sedimentarios en un perfil de playa.....	41
Figura 3.10 Modelo paleogeográfico para el Oligoceno superior-Mioceno medio.....	41
Figura 3.11 Ambiente fluvial, estructura de un canal meandriforme.....	43
Figura 3.12 Tipos de corrientes de un canal meandriforme.	44

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 Área de estudio	47
Figura 4.2 Sección horizontal en tiempo o time slice del cubo sísmico pstm32.....	47
Figura 4.3 Gráfico tiempo-profundidad.	49
Figura 4.4 Distribución de los pozos calibrados en el polígono de estudio.	50
Figura 4.5 Ondícula extraída de la sísmica para el pozo P1.....	52
Figura 4.6 Ondícula teórica del tipo trapezoidal para el P6.....	53
Figura 4.7 Sintético del P6 con ondícula teórica tipo trapezoidal.....	54
Figura 4.8 Sintético del P8 con ondícula teórica tipo trapezoidal.....	55
Figura 4.9 Sección con los intervalos Oficina, Bur 4-Bur 3 y Aq 1.	57
Figura 4.10 Panel de una línea correspondiente al intervalo Oficina.....	58
Figura 4.11 Panel de una línea correspondiente al intervalo Bur 4-Bur 3.....	58
Figura 4.12 Panel de una línea correspondiente al intervalo Aq 1.....	58
Figura 4.13 Mallado en tiempo del horizonte Aq 1.....	60
Figura 4.14 Mapa en tiempo del horizonte Aq 1 interpolado	60
Figura 4.15 Pozos cargados en tiempo y calibrados con el horizonte Bur 3.....	61
Figura 4.16 Pozos cargados con sus respectivas curvas de velocidad.....	62
Figura 4.17 Sección horizontal o horizon slice a partir del horizonte Bur 4.....	63
Figura 4.18 Sección sísmica crossline y mapa con el intervalo de los horizontes Bur 4 y Bur 3	64
Figura 4.19 Sección horizontal o horizon slice de Bur 4 con los cuatro bloques que representan los geocuerpos encontrados	65
Figura 4.20 Sección sísmicas crossline y cortes de los polígonos: bloques I-II-III-IV	67

Figura 4.21 Sección sísmicas crossline y cortes de los polígonos: bloques I-II-III-IV	67
Figura 4.22 Neuronas y curva acumulativa generada de la clasificación de 8 clases.....	69
Figura 4.23 Mapa de correlación	69
Figura 4.24 Neuronas, curva acumulativa y curva comparativa.	71
Figura 4.25 Multi bloques 3D	72
Figura 4.26 Gráfico de análisis ACP	73
Figura 4.27 Tabla de análisis ACP.....	73
Figura 4.28 Gráfico cruzado	75
Figura 4.29 Sección de un bloque de atributos incorporado en un inline del volumen original	75

CAPÍTULO V

Figura 5.1 Cubo de coherencia	77
Figura 5.2 Sección sísmica interpretada, que corresponde al área central del bloque	78
Figura 5.3 Sección sísmica interpretada, que corresponde al área occidental del bloque.....	78
Figura 5.4 Sección sísmica inline con los horizontes interpretados en orden ascendente. Topes: Basamento, Aq 1, Bur 3, Bur 4 y Oficina.....	80
Figura 5.5 Histogramas de frecuencias de las velocidades del modelo	83
Figura 5.6 Modelo de velocidades promedio.....	83
Figura 5.7 Modelo de velocidades promedio, visto desde el sureste.....	84
Figura 5.8 Mapa en profundidad y tiempo de la superficie Aq 1	86
Figura 5.9 Mapa en profundidad y tiempo de la superficie Bur 3	87
Figura 5.10 Mapa en profundidad y tiempo de la superficie Bur 4.	88
Figura 5.11 Mapa en profundidad y tiempo de la superficie Oficina	89
Figura 5.12 Mapa de localización de los 20 pozos en el área de estudio.	91
Figura 5.13 Mapa de facies sísmicas de 8 clases para la secuencias Bur 3	91
Figura 5.14 Neuronas y curva acumulativa del mapa con 8 clases.	92
Figura 5.15 Mapa de correlación	93
Figura 5.16 Mapa con 8 clases donde se muestra la tendencia general de explotación del campo.	94
Figura 5.17 Pozos ubicados en el bloque elevado de las fallas antitéticas.....	95
Figura 5.18 Pozos ubicados en el bloque deprimido de las fallas sintéticas.	96
Figura 5.19 Secuencia SO-NE de registros gamma ray en el intervalo correspondiente a la sección Bur 3.	98
Figura 5.20 Mapa de facies con 8 clases re-procesado bajo el método supervisado.	100
Figura 5.21 Neuronas, curva acumulativa y curva comparativa para la traza modelo del mapa de 8 clases.	101
Figura 5.22 Mapa de facies supervisado y no supervisado de 8 clases.	102
Figura 5.23 Mapa de facies supervisado donde la traza modelo se encuentra resaltada en color blanco con interpretación de dos zonas asociadas a la misma.	103
Figura 5.24 Mapa de facies supervisado de la traza modelo se encuentra resaltada en color blanco con interpretación de dos zonas asociadas a las clases 1-2-3.....	104
Figura 5.25 Bloque con 7 facies para el canal I.....	105
Figura 5.26 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal I).....	106
Figura 5.27 Bloque con 7 facies para el canal II	107
Figura 5.28 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal II).	108
Figura 5.29 Bloque con 7 facies para el canal III.....	109
Figura 5.30 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal III).....	109
Figura 5.31 Bloque con 6 facies para el canal IV.....	110
Figura 5.32 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal IV).....	111
Figura 5.33 Bloques de atributos correspondientes al canal I.	113
Figura 5.34 Gráfico de análisis ACP	114
Figura 5.35 Tabla de análisis ACP.....	114
Figura 5.36 Gráfico cruzado	115
Figura 5.37 Sección del bloque canal I en dirección inline.....	116
Figura 5.38 Bloque canal I incorporado en una sección inline del volumen original.....	116
Figura 5.39 Sección del bloque canal I en dirección crossline.....	117

Figura 5.40 Bloque canal I incorporado en una sección crossline del volumen original.....	117
Figura 5.41 Bloques de atributos correspondientes al canal II.....	118
Figura 5.42 Gráfico de análisis ACP	119
Figura 5.43 Tabla de análisis ACP.....	119
Figura 5.44 Gráfico cruzado	120
Figura 5.45 Sección del bloque canal II en dirección inline	120
Figura 5.46 Bloque canal II incorporado en una sección inline del volumen original	121
Figura 5.47 Sección del bloque canal II en dirección crossline	121
Figura 5.48 Bloque canal II incorporado en una sección crossline del volumen original	122
Figura 5.49 Bloques de atributos correspondientes al canal III.	123
Figura 5.50 Gráfico de análisis ACP	124
Figura 5.51 Tabla de análisis ACP.....	124
Figura 5.52 Gráfico cruzado	125
Figura 5.53 Sección del bloque canal III en dirección inline.....	125
Figura 5.54 Bloque canal III incorporado en una sección inline del volumen original	126
Figura 5.55 Sección del bloque canal III en dirección crossline.....	127
Figura 5.56 Bloque canal III incorporado en una sección crossline del volumen original	127
Figura 5.57 Bloques de atributos correspondientes al canal IV.	128
Figura 5.58 Gráfico de análisis ACP	129
Figura 5.59 Tabla de análisis ACP.....	129
Figura 5.60 Gráfico cruzado	130
Figura 5.61 Sección del bloque canal IV en dirección inline.....	130
Figura 5.62 Bloque canal IV incorporado en una sección inline del volumen original.....	131
Figura 5.63 Sección del bloque canal IV en dirección crossline.....	131
Figura 5.64 Bloque canal IV incorporado en una sección crossline del volumen original.....	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Listado de las funciones de activación más comunes.....	34
Tabla 1.2 Ambientes sedimentarios y facies reconocidas.	42
Tabla 1.3 Tabla que representa los pozos usados en la calibración sísmica	48
Tabla 1.4 Pozos con sus respectivas ondículas y parámetros de calibración.	56
Tabla 1.5 Resolución sísmica vertical a partir de velocidades interválicas	59
Tabla 1.6 Horizontes interpretados con su respectivo valor de amplitud.	59
Tabla 1.7 Polígonos de facies con su correspondiente valor para tope y base.....	66
Tabla 1.8 Valores estadísticos correspondientes a las velocidades del modelo	83
Tabla 1.9 Datos de producción de pozos	90
Tabla 1.10 Pozos con mayor producción acumulada del área de estudio.....	100

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El área de Oritupano-Leona que se encuentra entre los estados Anzoátegui y Monagas, fue descubierta en el año 1938 con la perforación del pozo LM-1X. Desde su descubrimiento hasta la fecha ha sido desarrollada por distintas compañías, la Unidad Oritupano-Leona fue asignada en concesión por Corpoven, S.A. Filial de Petróleos de Venezuela al Consorcio Pérez Companc-Norcen-Corod, posteriormente Petrobras Energía de Venezuela. En la actualidad se opera bajo la modalidad de Empresa Mixta entre PDVSA y Petrobras.

El campo Oritupano-Leona constituye un campo maduro que ha sido perforado por unos 800 pozos, los cuales, a la fecha acumulan alrededor de 520 MMBbbls. Cuenta con una producción de 17.6 mbd de petróleo pesado (para el año 2008), donde las areniscas de la formación Oficina representan la principal roca yacimiento.

El estudio y desarrollo de campos productores en los que se cuentan con un considerable número de pozos perforados ha acentuado la búsqueda de técnicas que permitan estimar nuevas zonas de interés, estableciendo una integración y relación entre registros de pozos y los datos sísmicos, con el objetivo de continuar con la caracterización del yacimiento. Existen varias técnicas que permiten establecer esta integración, entre las que destacan los métodos de clasificación de facies sísmicas, que aportan información del yacimiento a bajo costo y con una inversión baja de tiempo de cómputo. La clasificación de facies sísmicas o sismofacies es de gran utilidad para identificar prospectos en un área de estudio siguiendo un patrón de búsqueda basada en la información de zonas conocidas, con características litológicas e historia de producción. Además, los patrones sísmicos identificados podrían contribuir a extrapolar propiedades de yacimientos en zonas con poca información disponible.

El presente trabajo plantea el análisis de facies sísmicas usando la tecnología de las redes neuronales que representa una rama de la inteligencia artificial, utilizada para el reconocimiento de patrones a través de procesos de aprendizaje por medio de los algoritmos de mapas auto-organizativos y aprendizaje de cuantificación

vectorial de Kohonen, para identificar las características discriminantes de los objetos y luego hacer asociaciones con otros objetos de naturaleza similar. La clasificación de sismofacies se desarrollará con la aplicación *Stratimagic* de *Paradigm* que usa como datos de entrada la información del volumen sísmico, (interpretación del horizonte de interés), basándose en la sensibilidad de las ondas sísmicas a cambios litológicos y presencia de fluidos. Esta técnica permite una evaluación rápida de un gran volumen de datos, además de definir estructuras estratigráficas altamente prospectivas. En la búsqueda de complementar los resultados de facies sísmicas se aplicarán técnicas de análisis multi-atributos que permitan resaltar zonas de interés.

A partir de la clasificación de sismofacies mediante el uso de redes neuronales, complementado por los análisis multi-atributos y técnicas de integración de datos, se pretende mejorar el entendimiento de la distribución espacial de los geocuerpos presentes en el campo con el fin de obtener una mejor comprensión de la unidad Oritupano-Leona.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo general*

- Proporcionar como herramienta predictiva la clasificación de sismofacies en la caracterización sísmica de yacimientos e identificación de nuevos prospectos en el campo Oritupano-Leona.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Interpretar los reflectores sísmicos correspondientes a los marcadores más importantes del campo Oritupano-Leona.
- Reconocer y validar elementos estructurales del campo Oritupano-Leona.
- Analizar la relación entre la clasificación de sismofacies y las propiedades de yacimientos, por medio de la aplicación de redes neuronales.
- Comparar y relacionar los mapas de sismofacies con los bloques multi-atributos, establecer su relación con las propiedades de yacimientos.
- Identificar zonas prospectivas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El objetivo principal de esta investigación plantea el análisis de facies sísmicas con el fin de obtener una imagen de las variaciones laterales de las formaciones de estudio, utilizando la forma de la traza, esta información es integrada con los bloques de atributos calculados. La metodología propuesta se basa en la tecnología de las redes neuronales que es una rama de la inteligencia artificial, que se ha venido usando en el reconocimiento de patrones a través de procesos de aprendizaje, para identificar las características discriminantes de los objetos y luego hacer asociaciones con otros objetos de naturaleza similar. La finalidad de la investigación está fundamentada en el reconocimiento de patrones que permitan la estimación aproximada de eventos que puedan ser relacionados con aspectos litológicos y estratigráficos. Este tipo de estudio contribuirá con la extrapolación de las propiedades a zonas a menos desarrolladas y permitirá conocer más el área y proponer nuevos prospectos.

1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área Oritupano-Leona abarca la zona centro sur de los estados Anzoátegui y Monagas, está ubicada en la provincia geológica de la cuenca Oriental de Venezuela específicamente en el flanco sur de la cuenca, subcuenca de Maturín, limitada al norte por la serranía del Interior y el corrimiento de Anaco, al sur por la faja del Orinoco y el escudo de Guayana (figura 1.1). La unidad Oritupano-Leona se encuentra en el Área Mayor de Oficina, caracterizada por una serie de homoclinales fallados de orientación E-O, que albergan importantes reservas de hidrocarburos.

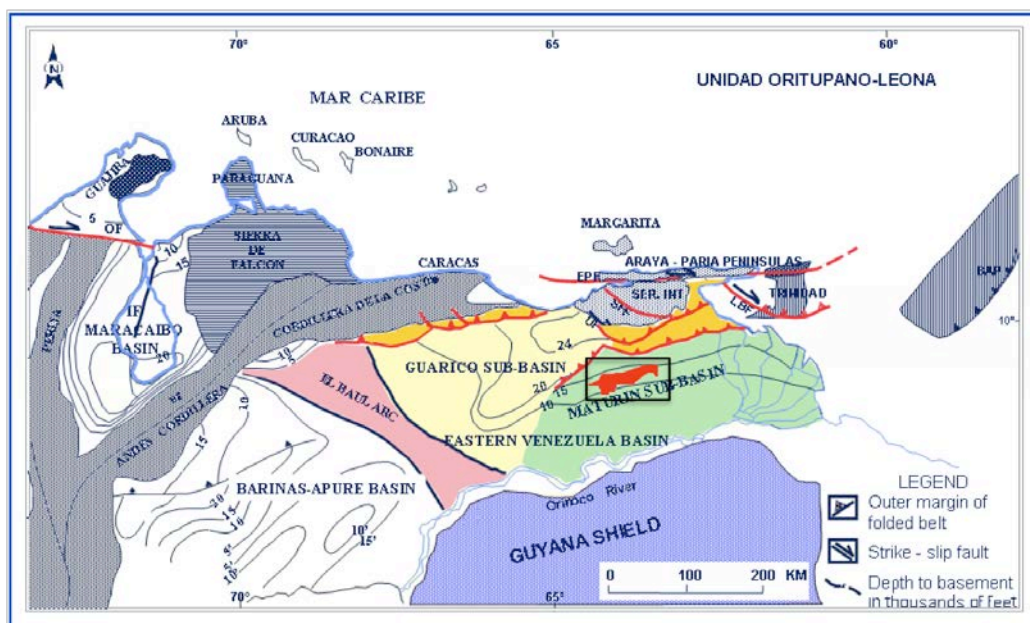


Figura 1.1 Mapa de ubicación geográfica, Oritupano. Tomado del Informe de Memoria Descriptiva, Unidad de Explotación del Campo Oritupano-Leona (no publicado).

La superficie total de la concesión es de 2111 km², mientras que el límite de la sísmica de la unidad Oritupano-Leona es de 672 km², el área de estudio corresponde a 416 km², su escogencia se basó en objetivos litológicos.

En la figura 1.2 se muestra los límites de la concesión (línea rosada) y los de la sísmica (línea negra).

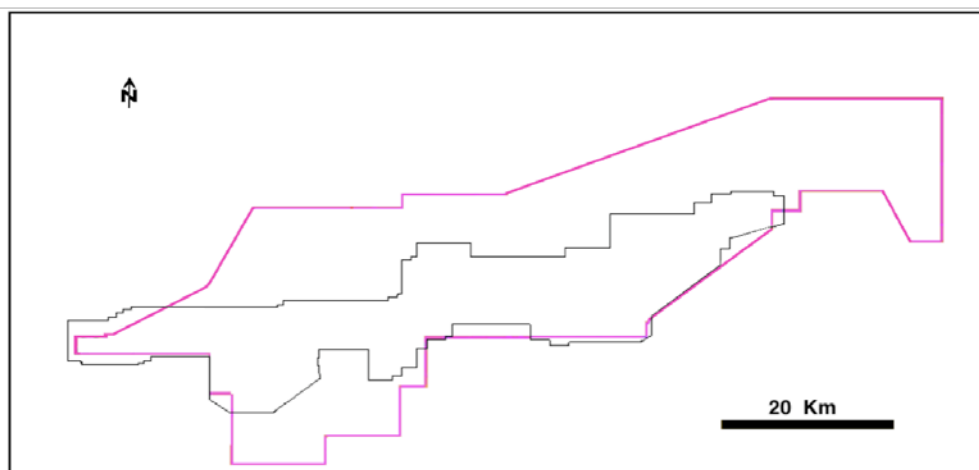


Figura 1.2 Área de estudio. La línea rosada indica los límites de la concesión y la línea negra los límites con datos sísmicos.

La unidad Oritupano-Leona cuenta con 23 campos petroleros (figura 1.3) integrados en ocho conjuntos o unidad, distribuidos entre los estados Anzoátegui

y Monagas; los principales campos que se encuentra dentro del área de estudio son:

- **Oritupano A**
- **Oritupano B**
- **Oritupano C**
- **Oritupano D**
- **Leona**

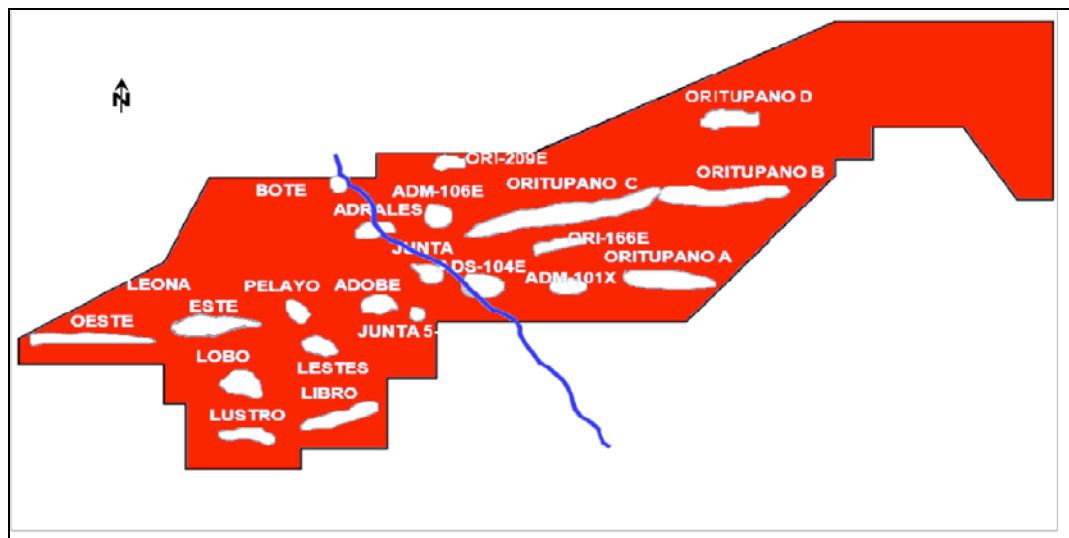


Figura 1.3 Mapa de la unidad Oritupano-Leona donde se identifican los principales campos que se encuentra dentro del área de estudio.

Parámetros de adquisición y procesamiento:

Datos sísmicos: Oritupano Leona es un proyecto de reprocesamiento 3D. Fue adquirido e iniciado por Schlumberger, Sureco de Venezuela en septiembre de 1994 y finalizado en agosto de 1995 por la Compañía Pérez Companc. El estudio está ubicado en los estados de Anzoátegui y Monagas cerca del pueblo de Oritupano. El estudio consiste de 71 líneas de disparo y 190 líneas de receptor que cubren un total de 672 kilómetros cuadrados.

Datos generales de adquisición

Contratista: Schlumberger Geco Prakla.

Fecha: 1994-1995.

Número de PTs + PVs: 6.179 (explosivos) + 26.888 (vibros) = 33.067.

Área aproximada: 70 km (E-O) x 7 km (N-S) ~ 672 km².

Parámetros de adquisición:

Tipo de estudio: 3D

Tipo de fuente: dinamita-vibroseis.

Intervalo de muestreo: 2 ms .

Longitud de registro: 4 s .

Formato de grabación: SEG-D.

Número de líneas fuentes: 71 líneas fuentes (1980.3 km) E-O.

Número de líneas receptoras: 190 líneas receptoras (1651.44 km) N-S.

Procesamiento:

Veritas 1999, migración post-apilamiento en tiempo a 32 bits.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 GENERALIDADES

La cuenca Oriental de Venezuela constituye gran parte de la región nororiental de Venezuela, está limitada al norte con el cinturón de plegamiento de la serranía del Interior y por la falla El Pilar, al sur por el río Orinoco y el borde septentrional del cratón de Guayana, al oeste por el levantamiento de El Baúl y al este con el sur de Trinidad y el océano Atlántico (figura 2.1).

La depresión topográfica y estructural es de aproximadamente 800 km de longitud y 200 km de ancho conformando un área total de aproximadamente 165.000 km², que se extiende a través de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, Delta Amacuro y parte de Sucre, prolongándose hasta Trinidad por el golfo de Paria (Goncalves, 2006). A pesar de los extensos estudios realizados en el área con fines de exploración, hasta el momento no existe una determinación precisa del espesor de los sedimentos de la cuenca (Giraldo, *et al.*, s.f.).

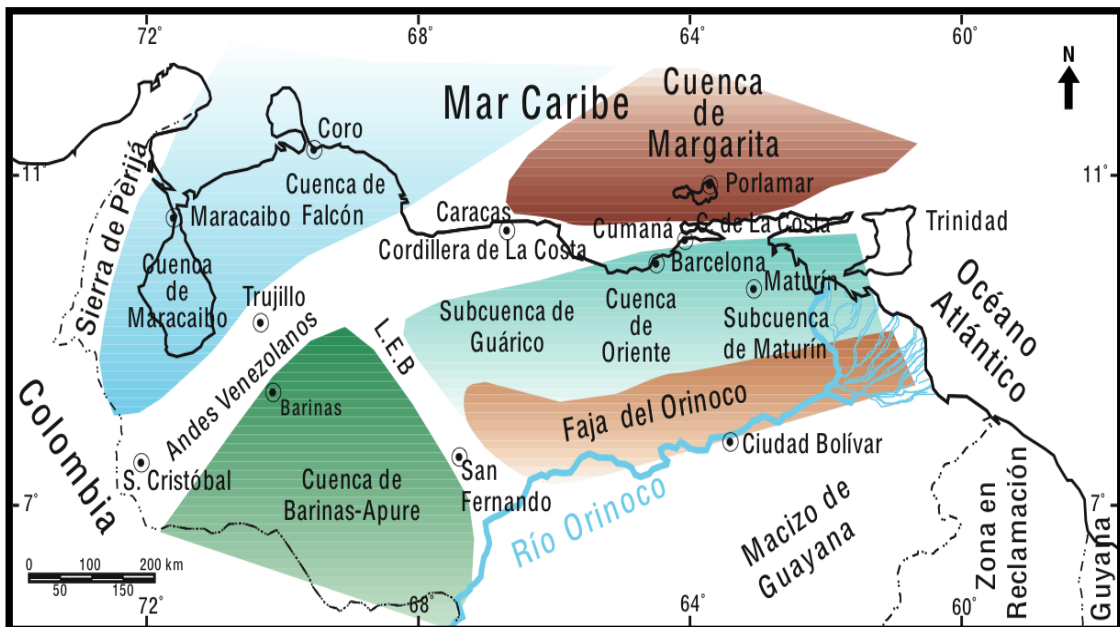


Figura 2.1 Mapa de ubicación de las cuencas sedimentarias en Venezuela, en verde la cuenca Barinas- Apure. L.E.B.= Lineamiento de El Baúl. Tomado del Wec (1997).

La cuenca Oriental ha sufrido varios episodios de complejas interacciones que involucran la ruptura de Pangea, la deriva de la placa Suramericana y el

emplazamiento de la placa Caribe (González de Juana, *et al.*, 1980), este último de extrema importancia, debido a que el movimiento diacrónico de dicha placa en dirección oeste-este, ocasionó la mayor cantidad de estructuras involucradas en la zona, y se considera como el agente de mayor importancia para desencadenar un número de esfuerzos compresivos y distensivos que producen fallamiento y cabalgamiento, así como también afectan el acomodo de los volúmenes de material depositados en un ambiente predominantemente marino, que se antepone al relleno total de la cuenca por sedimentos de origen más fluvial.

2.2 EVOLUCIÓN GEODINÁMICA Y TECTÓNICA

La evolución geodinámica de la cuenca Oriental de Venezuela es dividida por Parnaud, *et al.*, (1995) en cuatro fases a partir del Paleozoico, figura 2.2:

EDAD		Tiempo (Ma)	Actividad Tectónica
CUATERNARIO	Holoceno	0	MARGEN ACTIVO
	Pleistoceno	1,6	
	Plioceno	5,3	
	Superior	11,2	
	Medio	16,6	
	Inferior	23,7	MARGEN PASIVO
	Oligoceno	36,6	
	Eoceno	57,8	
	Paleoceno	66,5	
	Superior	96	RIFT
	Inferior	144	
	Jurásico	245	PRE-RIFT
	Paleozoico	570	
	Precámbrico		

Figura 2.2 Cronología tectónica del este de Venezuela. Tomado y modificado de Jácome et al., (2003).

2.2.1 Fase pre-rift (Paleozoico)

Las rocas que han sido identificadas en este período esta asociadas a formaciones de areniscas de grano fino a grueso ligeramente calcáreas (formación Hato Viejo), intercaladas con conglomerados y lutitas (formación Carrizal), que posiblemente

fueron depositados en un ambiente de continental a marino costero a nerítico con bajo nivel de energía (Talwani, 2002).

Las rocas de esta edad no forman parte del sistema petrolero de la cuenca Oriental de Venezuela y se asocian al interior del súper-continente Pangea (Erlich y Barrett, 1992).

2.2.2 Fase de rift y deriva (Jurásico Superior y Cretácico Inferior)

Durante la apertura de la placa de Norte América producida por la separación del súper continente Gondwana, se formó el Atlántico Norte y afectó el margen norte de Suramérica. Dicha separación fue diacrónica, ocurrió primero en Norteamérica y luego en Suramérica de norte a sur (Talwani, 2002).

En esta fase se desarrollan estructuras en graben (graben de Espino-San Fernando), está representada por lutitas rojas con intrusiones basálticas depositadas en un ambiente continental; se encuentra descrita por la depositación de la formación La Quinta en el graben de Espino, al occidente de la subcuenca (Parnaud, *et al.*, 1995).

2.2.3 Fase de margen pasivo (Cretácico y Paleógeno)

Comprende entre los período del Jurásico Superior o Cretácico Inferior hasta el Eoceno, se caracteriza por la subsidencia del margen pasivo de América del Sur. La sedimentación fue de origen marino con alto contenido de materia orgánica y espesas unidades carbonáticas (Delgado, s.f.).

Durante esta fase se distinguen tres eventos transgresivos mayores (Turonense, Paleoceno-Eoceno y Oligoceno), que se desarrollan de norte a sur y que son coincidentes con elevaciones globales del nivel del mar (Parnaud *et al.*, 1995).

Las rocas distintivas de esta etapa en el Oriente de Venezuela son las formaciones Querecual y San Antonio. A medida que evoluciona la cuenca se convertirán en la roca madre de toda la región (Delgado, s.f.).

2.2.4 Fase de colisión oblicua (Oligoceno-Mioceno Medio -Presente)

Comienza a finales del Oligoceno-Mioceno Medio y está determinada por la colisión oblicua de la placa del Caribe contra la placa de Suramérica.

En esta etapa, se desarrolla un fuerte régimen compresivo-transpresivo, la colisión migra progresivamente hacia el este, durante el Oligoceno tardío - Mioceno

temprano originando el levantamiento de la serranía del Interior y la transformación de la cuenca de margen pasivo en una cuenca tipo antepaís.

La migración trajo como consecuencia la división de la cuenca de Venezuela Oriental en tres áreas: de sur a norte, la plataforma estable, desde Cerro Negro hasta Oritupano (figura 2.3), la zona ante-fosa (*foredeep*), desde Acema-Casma hasta Pirital y por último la zona de sobrecorrimiento, ubicada al norte de la falla de Pirital (Parnaud *et al.*, 1995).

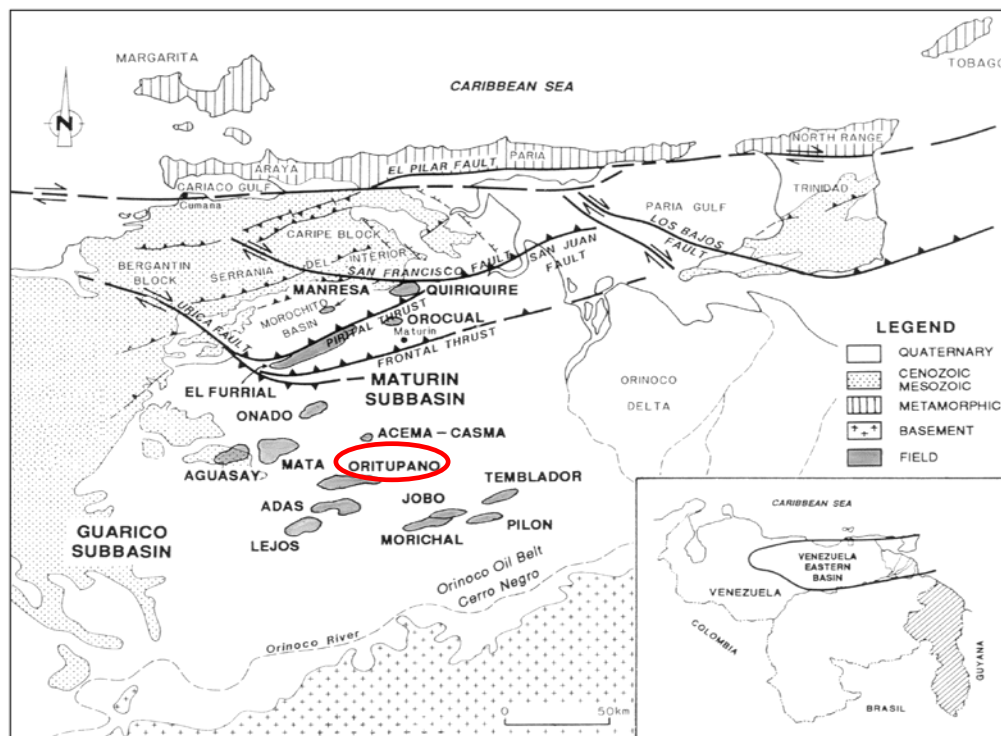


Figura 2.3 Configuración tectónica de la cuenca Oriental de Venezuela y localización de los principales campos petroleros, y la unidad Oritupano. Tomado y modificado de Parnaud *et al.*, (1995).

La sedimentación progresa de marino profunda a deltaica y marino somera, están representados por las formaciones Oficina y Merecure, las cuales a su vez constituyen los yacimientos más importantes del Oligoceno-Mioceno, constituyendo las principales rocas recipientes y rocas madres locales. Hacia el este, la sedimentación de ambientes profundos está representada por la formación Capiricual y las turbiditas de la formación Carapita (Yoris y Ostos, 1997).

Al noreste, la subcuenca de Maturín se rellena con facies cada vez más someras: formaciones Uchirito y Quiamare. En el extremo sur, las lutitas de la formación

Freites suprayacen a la formación Oficina. En conclusión, mientras los ambientes marinos continuaron retrocediendo hacia el este, se depositan los ambientes fluvio-deltaicos de la formación La Pica y los molásicos pliocenos representados por las formaciones Las Piedras y Quiriquire, finalizando con las terrazas pleistocenas de la formación Mesa y aluviones recientes (Yoris y Ostos, 1997).

La inversión de fallas, la carga flexural y su interacción con la sedimentación genera abundantes trampas tanto estructurales como estratigráficas (James, 2000a).

Durante el Plioceno-Pleistoceno, la transpresión disminuye al sur, conformándose un régimen enteramente distensivo. Hacia el este y hasta el presente, la deformación continua, motivada al movimiento transcurrente-dextral de la falla de El Pilar (James, 2000a). Cabe resaltar que esta fase es, sin lugar a dudas, la más importante para los sistemas petrolíferos de la cuenca Oriental de Venezuela puesto que las fallas inversas de bajo ángulo asociadas al sobrecorrimento causaron carga litosférica y la formación de la cuenca, resultando en el soterramiento de rocas madres de edad Cretácico e incluso más antiguas (Parnaud et al 1995; Summa 2003).

A partir de esta evolución geodinámica la cuenca puede ser dividida en bloques (de acuerdo a objetivos petroleros). Arnstein *et al.*, (1985), proponen una división de la cuenca en tres bloques: el primero el bloque cortical occidental, que corresponde a la cuenca de Guárico; el segundo el bloque cortical oriental, que corresponde al borde septentrional de la subcuenca de Maturín; y el tercero el bloque cortical meridional que es el borde sur de la subcuenca de Maturín. Esta división está basada en los límites que introducen la zona de falla de Urica y la falla inversa de Anaco. Sin embargo, operacionalmente es más usual dividir la cuenca en dos subcuencas, la subcuenca de Guárico y la subcuenca de Maturín; en Di Croce *et al.*, (1999) están divididas por el sistema de falla de Urica y en el sur separadas por los anticlinales del sistema de falla de Anaco y las estructuras asociadas a la inversión. Según Erlich y Barrett (1992), las subcuencas de Guárico y Maturín se encuentran separadas por el arco de Urica; el cual se mantiene activo desde el Mioceno (González de Juana *et al.*, 1980; en Erlich y Barrett, 1992).

2.3 LA SUBCUENCA DE MATURÍN

La sub-cuenca de Maturín es una cuenca asimétrica, de forma alargada, de rumbo ONE, que se extiende hacia la isla de Trinidad. Dicha cuenca y la cuenca oriental de Venezuela con su continuación costa afuera constituyen una cuenca antepaís neógena superimpuesta a un margen pasivo Mesozoico-Paleógeno. La base de la cuenca está constituida por una discordancia regional que trunca en dirección norte-sur a la sección Cretácico inferior a Oligoceno, la cual corresponde a la secuencia de margen pasivo continental sobre la que se acuñan los sedimentos siliciclásticos neógenos (Di Croce *et al.*, 1999).

Durante el Paleozoico la cuenca de Maturín estuvo apoyada sobre el borde estable de cratón de Guayana, por esta razón la evolución de la cuenca es relativamente simple, se reconocen transgresiones y regresiones extensas provocadas por suaves movimientos de levantamiento y hundimiento del borde (González de Juana, *et al.*, 1980).

La configuración estructural de la cuenca puede dividirse en tres provincias tectónicas una provincia compresional, al norte, en la serranía del Interior; el frente de deformación en el piedemonte y una provincia extensional, que se localiza al sur (Aymard, *et al.*, 1990, en Parnaud *et al.*, 1995).

El estilo estructural de las dos primeras provincias es netamente compresivo, se extienden desde la falla El Pilar hasta el eje principal de la cuenca. Los sistemas de fallas son transcurrentes dextrales: El Pilar, Urica, San Francisco y Los Bajos. Incluyen la serranía del Interior, caracterizada por un cinturón plegado con vergencia hacia el sureste, con pliegues de corrimientos orientados aproximadamente en la dirección N 70° E.

La tercera provincia, se extiende desde el eje de la cuenca y el macizo Guayanés. Dicha provincia extensional caracterizada por un estilo estructural distensivo, con fallas normales de dirección N 60° E, principalmente al sur, y fallas de rumbo-deslizante, hacia el norte. Hung (1997), reseña que el margen sur del *foreland* se caracteriza por fallas normales, que atraviesan el basamento ígneo-metamórfico del Precámbrico, las cuales conforman las principales trampas de hidrocarburos del área.

2.4 MARCO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL

Según Parnaud *et al.* (1995), de acuerdo a la información obtenida de pozos, la cuenca puede dividirse en cuatro megasecuencias sedimentarias asociadas a la cuenca antepaís: megasecuencia pre-“rift”, megasecuencia “rift”, megasecuencia de margen pasivo y megasecuencia de colisión oblicua. Todas estas fueron desarrolladas desde el Paleozoico, en un proceso de “rifting”, hasta el Cenozoico relacionadas a un evento transpresivo en el borde norte de Suramérica, (figura 2.4).

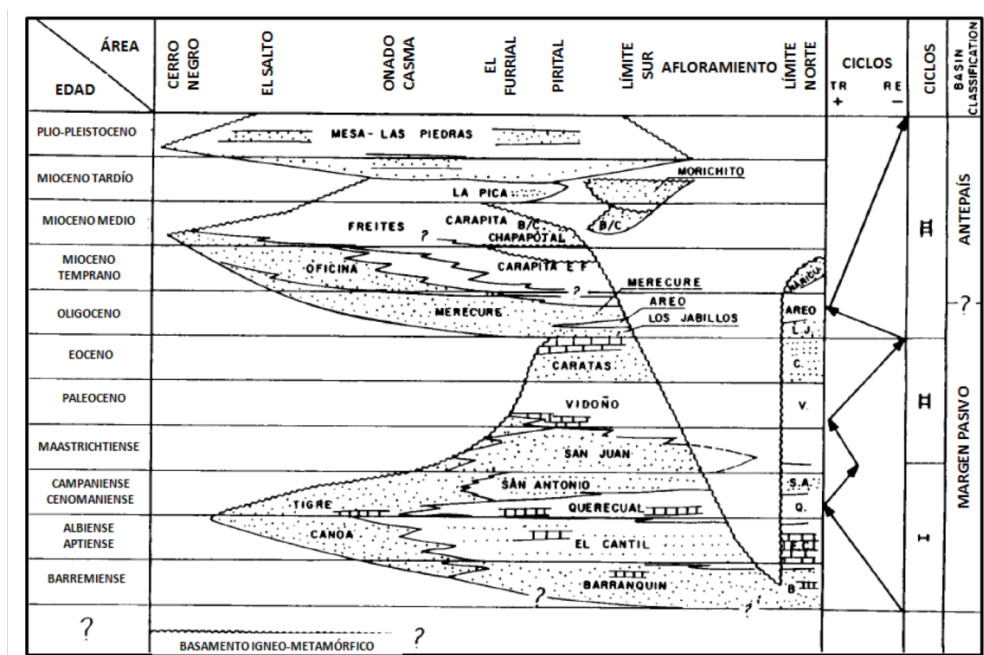


Figura 2.4 Cuadro de correlación N-S muestra las formaciones presentes en la cuenca Oriental de Venezuela. Tomado de Parnaud et al., (1995).

2.4.1 Megasecuencia de pre-“rift”

La megasecuencia de pre-“rift” corresponde a la sedimentación que ocurrió durante el Paleozoico. Di Croce *et al.*, (1999) identifica mediante perfiles sísmicos el tope del basamento cristalino perteneciente a esta fase mediante la profundización de los reflectores y con el contraste de impedancia acústica entre el basamento cristalino y la secuencia sedimentaria suprayacente. Parnaud *et al.*, (1995) identifican las formaciones Hato Viejo y Carrizal en la subcuenca de Guárico, que fueron depositadas en ambiente marino nerítico a costero. En perforaciones se han identificado dichas formaciones como areniscas de grano fino a grueso, ligeramente calcáreas e intercaladas con lutitas verdes y

conglomerados. A esta secuencia se le estiman espesores de 3.000 a 5.000 m (Di Croce *et al.*, 1999). La edad de la formación Carrizal es Devónico-Carbonífero Temprano.

2.4.2 Megasecuencia “rift”

La megasecuencia de separación se desarrolla durante el Jurásico tardío-Cretácico temprano y es identificada en la formación La Quinta al oeste de la subcuenca de Maturín en el graben de Espino.

La formación La Quinta fue depositada en un ambiente continental, compuesta por lutitas rojas con sills basálticos (Hedberg, 1950 en Parnaud, *et al.*, (1995). Los flujos basálticos según Di Croce *et al.*, (1995) suprayacen a sedimentos clásticos carboníferos y a la formación Carrizal. Estas capas rojas constituyen la sección antigua de la secuencia autóctona del norte de Suramérica y parecen estar presentes sobre una amplia zona del noroeste de Suramérica (Eva, *et al.*, 1989).

Esta megasecuencia alcanza espesores de cerca de 3600 m y puede ser reconocida sísmicamente en semigrábenes (Parnaud, *et al.*, 1995).

2.4.3 Megasecuencia de margen pasivo

La megasecuencia de margen pasivo abarca las rocas del Cretácico–Paleógeno, puede incluir sedimentos principalmente de clásticos y carbonatos (Di Croce *et al.*, 1999). Durante la sedimentación de esta megasecuencia, el margen norte de Suramérica subsidió lo suficiente como para permitir la acumulación de 3 a 4 km de sedimentos, principalmente clásticos marinos, aunque en la sección del Cretácico temprano existen varios espesores de carbonatos (Erlich y Barrett, 1992).

Parnaud *et al.*, (1995) mencionan que en el Oriente de Venezuela, dicha megasecuencia de edad Cretácico-Paleógeno está caracterizada por tres fases transgresivas principales que culminan en el Turoniense, Paleoceno-Eoceno temprano, y Oligoceno respectivamente.

El inicio del primer evento transgresivo comienza con la depositación de las areniscas basales de la formación Barranquín (figura 2.4). El máximo avance transgresivo está marcado por los depósitos carbonáticos (N-S), puede

reconocerse en las líneas sísmicas como la secuencia intermedia en el Cretácico (Van der Osten, 1957 en Parnaud *et al.*, 1995).

Yoris y Ostos (1997) sugieren que en el oriente venezolano el Cretácico temprano está representado por la sedimentación del grupo Sucre. Dicho grupo evidencia el margen pasivo generado. Los mismos autores, dicen que al final del Albiense, ocurre la transgresión marina que coincide con la transgresión marina mundial del Cretácico tardío, y se depositan las formaciones Querecual (figura 2.4), Mucaria y San Antonio en oriente y las formaciones Navay y La Luna en occidente; muy conocidas por la gran importancia que tienen Querecual, La Luna y Navay como rocas madre. El máximo transgresivo se encuentra entre el Turoniense y el Campaniense. En el oriente de Venezuela la sedimentación del Cretácico tardío finaliza con unidades regresivas respecto a los ambientes más profundos de la roca madre, y se manifiesta en el flanco sur de la cuenca Oriental con las formaciones Canoa y El Tigre del grupo Temblador (figura 2.4).

El segundo evento transgresivo ocurre durante el Paleoceno-Eoceno. Yoris y Ostos (1997) mencionan que el oriente de Venezuela no tuvo influencia del frente de deformación del Caribe durante el Paleoceno-Eoceno, por lo que se acumularon los sedimentos finos de talud continental de la formación Vidoño.

El tercer evento de transgresión se inicia al comienzo del Oligoceno con la depositación de las areniscas basales de la formación Merecure (principal yacimiento del área Furrial) de ambiente continental en la parte sur de la cuenca (área de Cerro Negro) y ambiente de plataforma interior en la parte norte de la cuenca (afloramientos de la serranía del Interior). Está compuesta principalmente de una alternancia de areniscas de grano fino a grueso y lutitas (Parnaud *et al.*, 1995).

La formación Merecure más al sur, cambia de facies hacia el norte a las formaciones Areo de edad Oligoceno superior según Di Croce *et al.*, (1999) y Carapita de edad Mioceno inferior-medio (edad para la que ya el margen activo está vigente) y se les asigna un ambiente de plataforma exterior, (figura 2.4).

2.4.4 Megasecuencia de colisión oblicua

La colisión de la placa del Caribe contra la placa de Suramérica dio fin a la megasecuencia de margen pasivo, convirtiendo a la cuenca Oriental a una cuenca

antepaís, según (Di Croce *et al.*, 1999) ocurre específicamente en el Oligoceno superior. Como consecuencia del choque tiene lugar la transcurencia de orientación aproximada E-O (Burke, *et al.*, 1984).

Según Di Croce *et al.*, (1999) esta fase puede definirse como una fase de foredeep (antefosa), asociado al cinturón plegado por transpresión y que posee aportes de sedimentos provenientes de tres direcciones: de oeste a este en el cinturón alóctono de la Cordillera de la Costa, sedimentos provenientes del sur desde el escudo de Guayana y un aporte de sedimentos desde el N-NE dado por el levantamiento de la serranía del Interior.

Yoris y Ostos (1997) indican que el final del Eoceno y el Oligoceno está representado en la serranía del Interior por las formaciones Los Jabillos (clásticos arenosos de ambientes diversos), Areo (clásticos finos) y parte de Naricual (clásticos arenosos de ambientes fluvio costeros y marinos someros), mientras más al sur continúa el diacronismo con el aporte de sedimentos esencialmente del cratón, caracterizados por la formación Merecure en el subsuelo de la subcuenca de Maturín.

Las formaciones Oficina y Merecure, presentan rasgos de sedimentación en ambientes transicionales deltaicos, que pasan lateralmente hacia el este a formaciones más profundas como Carapita (turbidítica) y Capiricual. En el sur de la cuenca Oriental la formación Merecure se encuentra comúnmente discordante sobre el grupo Temblador, y subyacente a la formación Oficina. En el Mioceno, en el flanco sur de la cuenca la formación Freitas suprayace a la formación Oficina, constituye los sedimentos de los ciclos deltaicos de la formación La Pica y los sedimentos molásicos post antepaís del Plioceno de las formaciones Las Piedras y Quiriquiri que subyacen a la formación La Mesa y a los sedimentos aluviones, Yoris y Ostos (1997) (figura 2.4).

El movimiento de rumbo-deslizante transpresional es más antiguo en el oeste de Venezuela, posiblemente de edad Eoceno Temprano a Medio, y más joven en el este, en el oriente venezolano y norte de Trinidad con edad Oligoceno a Mioceno Medio. La deformación a todo lo largo del norte de Venezuela ha continuado hasta el presente, probablemente como resultado del movimiento relativo hacia el este de la placa Caribe respecto a la placa Suramericana (Alviarez y Rojas, 2007).

2.5 GEOLOGÍA LOCAL

2.5.1 Estratigrafía local

La columna estratigráfica en el área de la unidad Oritupano-Leona va desde el Jurásico hasta el Pleistoceno (figura 2.5), la descripción de las unidades se presenta a continuación:

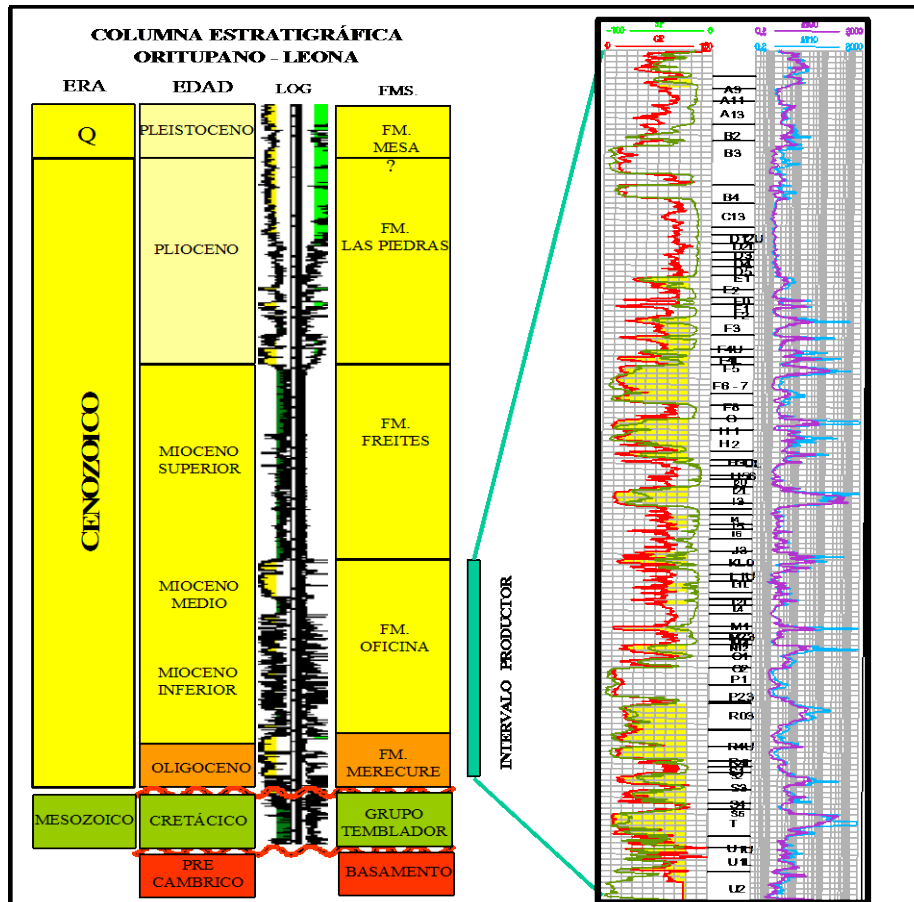


Figura 2.5 Columna estratigráfica de Oritupano-Leona. Tomado del Informe de Memoria Descriptiva, Unidad de Explotación, del Campo Oritupano-Leona (no publicado)).

Basamento (Precámbrico)

Aflora al sur, en el escudo de Guayana, está constituido por rocas meta-ígneas y meta-sedimentarias, las facies varían de anfibolitas a granulitas. En el subsuelo, buza suavemente al N-NE, pasando por debajo del cinturón plegado de la serranía del Interior Oriental (Porras, 2003).

Formaciones Hato Viejo y Carrizal (Paleozoico)

Hacia el suroeste del Edo. Anzoátegui, en el área de Zuata, se ha perforado rocas de edad Devónico Superior a Carbonífero Inferior, las cuales han sido designadas con los nombres de formación Carrizal y formación Hato Viejo (González de Juana, *et al.*, 1980).

Estas unidades son consideradas transicionales entre sí y comprenden sedimentos de ambientes deltáicos y de planicies costeras escasamente conocidos. Estas unidades se depositaron hacia la parte norte de la cuenca, fuera de los límites del área de estudio, (Arellano, 2006).

Grupo Temblador (Cretácico)

Está conformado por las formaciones Canoa y Tigre, siendo más antigua la formación Canoa de edad Campaniense y la formación Tigre corresponde a Maestrichiense, se encuentran descansando suprayacente al basamento.

La formación La Canoa, está compuesta por sedimentos continentales, como conglomerados y areniscas conglomeráticas. La formación Tigre se compone de areniscas y calizas de origen marino somero.

En el Cretácico tardío, Hedberg (1950) postula que se produjo un sutil levantamiento del Escudo Guayanés con la consecuente retirada de los mares y comienza un proceso erosivo que culmina en el Eoceno e incluso el Oligoceno temprano, ocasionando un distintivo hiato en la cuenca.

Formación Merecure (Oligoceno - Mioceno Inferior)

En el contacto de la formación Merecure con el grupo Temblador no se observa discordancia angular, ya que la posición de ambas formaciones es subparalela, a pesar del bien definido hiato que las separa, González de Juana *et al.*, (1980).

La formación Merecure alcanza espesores que van de 600 pies a 1500 pies, profundizándose de sur a noreste.

Está compuesta por paquetes de arenas superpuestas separadas por intercalaciones muy delgadas de lutitas. Estudios sedimentológicos asocian la formación Merecure a canales fluviales distributarios de influencia mareal depositados sobre una planicie aluvial a deltaica costera (Porras, 2003).

Formación Oficina (Mioceno Temprano a Mioceno Medio)

La formación Oficina presenta mayor espesor en los campos localizados al oeste mientras que hacia el norte y noreste, su espesor disminuye. Las diferencias de espesor encontrados en sus patrones de apilamiento y en la relación arena/lutita se le atribuye a variaciones en el espacio de acomodación y a posiciones distintas de los campos dentro de la plataforma.

Está conformada por intercalaciones de areniscas grises claras, de grano fino a grueso; limolitas y lutitas gris oscuro a marrones. Es común en la secuencia la presencia de delgados lignitos cuya frecuencia aumenta con la profundidad y algunos niveles carbonáticos, especialmente hacia la sección superior.

Su ambiente de depositación se interpreta como una planicie deltaica-costera a fluvial dominada por olas y mareas.

La formación Oficina puede ser subdividida de manera informal en tres secciones, superior, media e inferior, (Memoria Descriptiva. Unidad de Explotación, 2008):

- La sección inferior: (*Aquitaniense-Burdigaliense*) se encuentra comprendida entre la lutita K y el tope de la formación Mercure. Representa la unidad más profunda del sistema. Se diferencian dos ambientes: en la base, predominan los canales distributarios fluviales y en menor proporción, los canales de marea. Las arenas son masivas y de grandes espesores se encuentran comunicadas entre sí por efectos erosivos, cortando otros canales o barras de desembocadura. Estos cuerpos presentan una influencia fluvio continental. En esta sección entre Bur 4 y Bur 3, se encuentra el objetivo del estudio (figura 2.6).
- La sección media: (*Burdigaliense-Langhianense*) comprende entre el tope de las arenas E y el marcador K. Representa un período de avance marino hacia el continente, muestra menores espesores de arenas, la presencia de los lignitos se hace más continua, indicativo de un ambiente más restringido, de influencia marina marcada por la acción del oleaje y las mareas.
- La sección superior: (*Serravaliense-Tortoriense*) se halla comprendida entre el tope de la formación Oficina y el tope de las arenas E. Está constituida por areniscas espesas y lutitas depositadas en un ambiente marino somero.

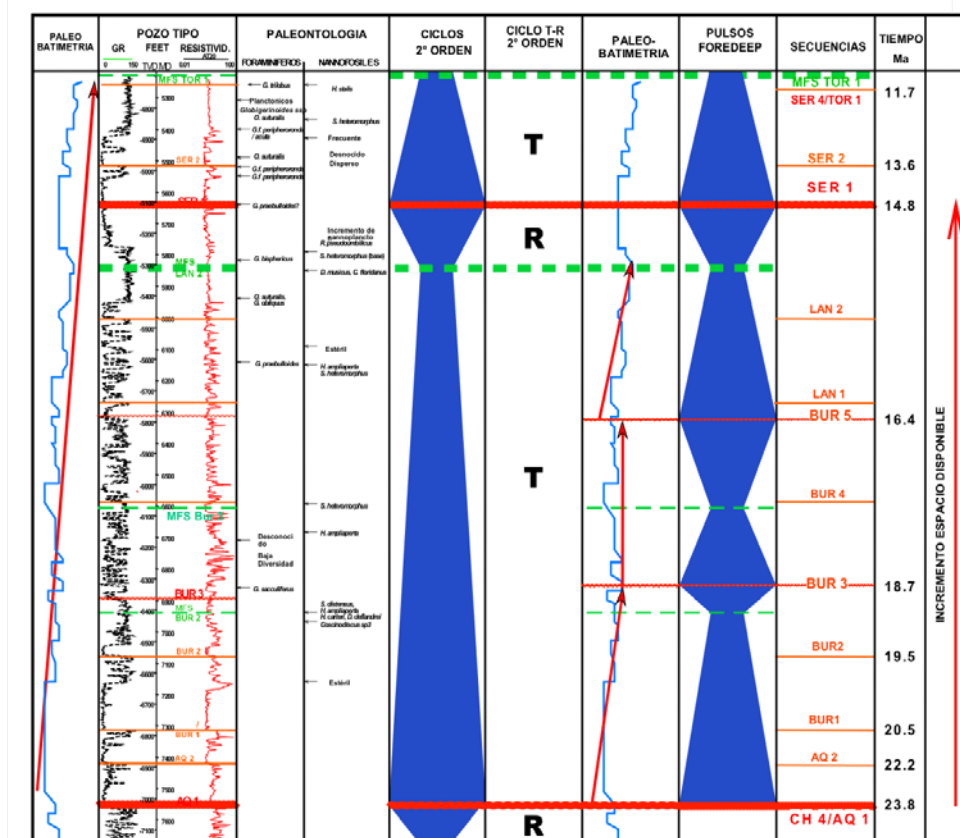


Figura 2.6 Sección productiva del Mioceno (Bur 4-Bur 3), se diferencian límites de secuencia de tercer orden. Tomado de Abreu et al., (2001), en Porras, (2003).

Formación Freites (Mioceno Superior-Plioceno Inferior)

La formación Freites está caracterizada por arcillas y lutitas verdes a gris verdoso, fósiles y fosilíferas. Presenta distintivos desarrollos de arenas, algunas glauconíticas, especialmente hacia la base de la unidad, cuyo origen sea posiblemente turbidítico o de frente de talud.

Formación Las Piedras (Plioceno Inferior-Pleistoceno)

El contacto sobre la formación Freites con la formación Las Piedras es gradacional; está conformada por sedimentos finos, mal consolidados donde se incluyen areniscas y limolitas, arcillitas solubles y lutitas poco compactadas. Su ambiente depositacional se infiere fluvial a marino somero, bajo condiciones estuarinas (Hedberg, 1950).

Formación Mesa (Pleistoceno)

La formación Mesa, de edad Pleistoceno, suprayace en forma concordante y transicional a la formación Las Piedras; consiste en areniscas, conglomerados, limolitas y arcilitas de ambiente continental fluvio-deltáico.

2.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

El área de estudio se ubica sobre el flanco sur de la cuenca Oriental, representada por una provincia tectónica extensional, asociado a fallamiento normal.

La unidad Oritupano-Leona no muestra mayor deformación, su buzamiento regional es cercano a los 4° y se encuentra interrumpido por un complejo sistema de fallas normales discontinuas, las cuales presentan geometrías planas y generalmente buzan 45° (Porrás, 2003).

En el área, se han diferenciado tres sistemas de fallas principales, cuya orientación preferencial NE-SO, NO-SE y O-E (Hedberg, 1950). El primer sistema de fallas es paralelo al eje (*hinge*) sur de la cuenca y refleja el levantamiento flexural del basamento, mientras que el segundo es el esfuerzo extensional resultante del movimiento de rumbo dextral, a lo largo del límite de las placas del Caribe y Suramérica (James, 1990). Todos los sistemas controlan el entrapamiento de hidrocarburos (figura 2.7).

El sistema de fallas NE-SO, muestra buzamiento sintético y planos buzantes al noroeste. Sus lineamientos regionales de carácter sin-sedimentario afectando a casi toda la columna sedimentaria incluyendo el basamento. Se asocian las fallas Guara-Leona y Junta-Merey a este sistema; estuvieron activas durante el Mioceno Superior-Medio, en el Plioceno se registra la máxima deformación y desplazamiento. Su origen lo representa el resultado del levantamiento flexural del basamento durante el Oligoceno-Mioceno, cuando la cuenca se desplazó del oeste al este (Erlich y Barrett, 1992).

La falla de Guara-Leona alcanza una extensión superior a los 40 km (figura 2.7). Su salto disminuye de sur a norte y es interceptada por una serie de fallas oblicuas de rumbo y buzamiento variable. La falla de Junta-Merey cruza diagonalmente la unidad Oritupano-Leona. Es un sistema de fallas segmentadas y superpuestas, y en *relay*, de más de 20 km. La zona de superposición entre ambos segmentos está

afectada por fallamiento normal masivo y desarrollo de pliegues transversales (Porrás, 2003).

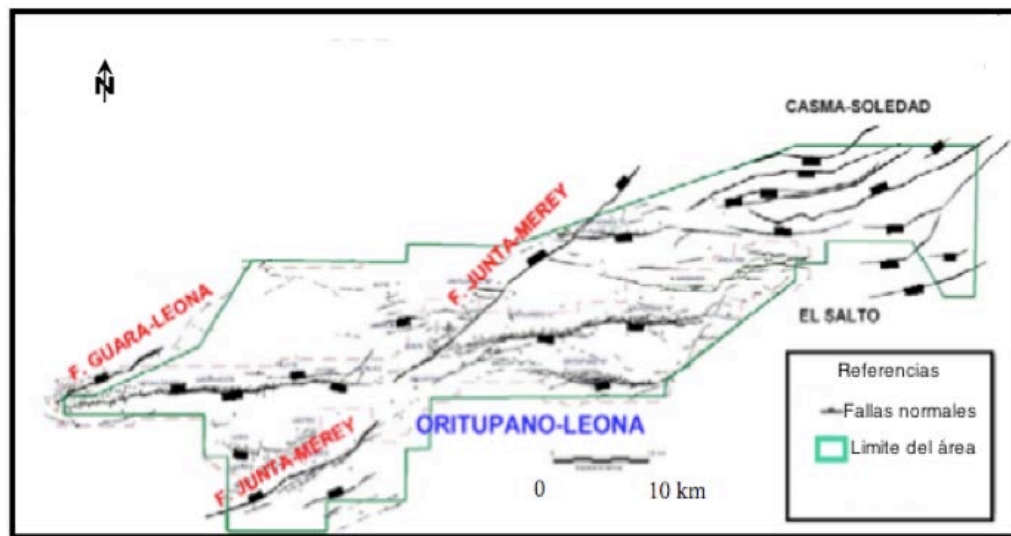


Figura 2.7 Mapa estructural regional. Se muestran los principales sistemas de fallas, donde se distinguen los tres patrones preferenciales de fallas NE-SO, NO-SE y O-E. Tomado y modificado de Porrás, (2003).

El sistema de fallas NO-SE buza indiferentemente al norte o sur. Lo conforma un sistema de fallas oblicuas que pueden derivarse de las fallas principales o bien interceptarlas. Su origen se asocia a la reactivación de los esfuerzos de dirección sur del límite de placas o a relajación isostática de estos esfuerzos durante su migración al este (Erlich y Barrett, 1992). Las fallas pequeñas presentan patrones en “relay” (Munro, 1982).

El sistema de fallas de rumbo O-E presenta buzamiento antitético o sintético cuyo ángulo promedia los 45°. Su origen se postula como resultado del flexuramiento de la cuenca (Hedberg 1950). Este sistema de fallas puede ser trazado a lo largo de grandes extensiones y es producto del crecimiento de fallas superpuestas conectadas a través de sistemas de rampas. Muestra patrones en “dogleg”, típicos de fallamiento normal, (Porrás, 2003).

En la zona de estudio se encuentra otro elemento estructural de gran importancia, como lo son los pliegues asociados a las fallas normales. Son de carácter distensivo se presentan en las secciones superior y media miocénica. Son particularmente visibles en el área de Oritupano-Leona; son responsables de las acumulaciones de hidrocarburos en la zona.

Porras (2003) reconoce y realiza una detallada interpretación sísmica 3D donde se distinguen distintos tipos de pliegues en la zona: a) pliegues de arrastre combinados, normales e inversos, b) pliegues de arrastre inversos, c) pliegues longitudinales normales, d) pliegues compuestos y e) pliegues transversales, (figura 2.8).

El mismo autor describe una franja discontinua y estrecha de pliegues de arrastre inversos, de más de 10 km de longitud, en el lado deprimido de la falla de Leona. Este sistema de pliegues, longitudinales y paralelos a la falla, ha proporcionado los elementos estructurales para la acumulación de hidrocarburos. También se han observado pliegues menores y sutiles deformaciones en zonas de superposición de fallas (overlapping), en rampas y zonas de transferencia, (ob.cit.).

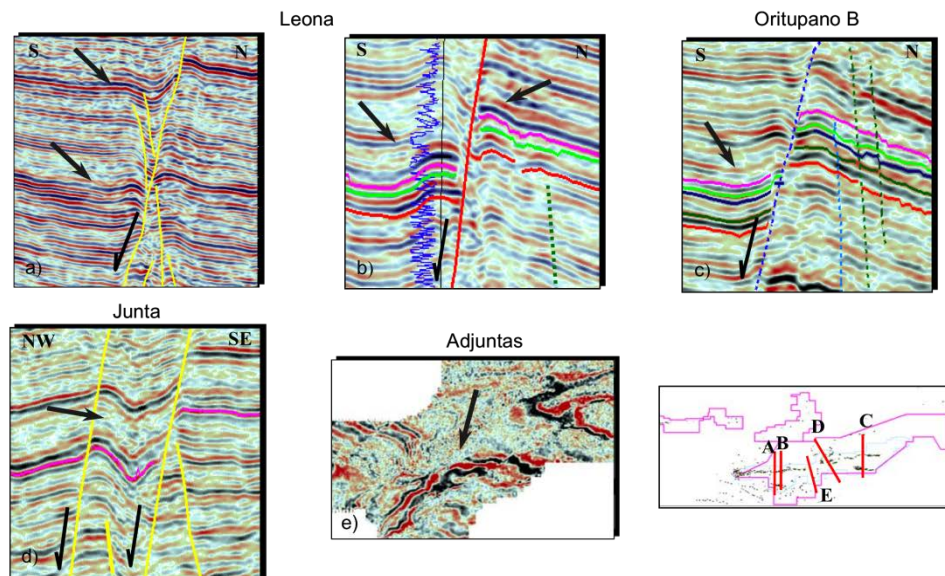


Figura 2.8 Pliegues de naturaleza extensional en el bloque Oritupano-Leona. a) Pliegues de arrastre, combinados, normales e inversos, b) pliegues de arrastre inversos, c) pliegues longitudinales normales, d) pliegues compuestos y e) pliegues transversales. Tomado y modificado de Porras (2003).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 ATRIBUTOS SÍSMICOS

Los atributos sísmicos pueden definirse como medidas específicas de características geométricas, cinemáticas, dinámicas o estáticas calculados o derivados a partir de los datos sísmicos, Chen y Sydney (1997). Presentan información a través de los parámetros fundamentales de las ondas, como amplitud, frecuencia, fase, polaridad y atenuación. Pueden ser tomados en un instante de tiempo o en una ventana específica de tiempo, para una traza, una serie de trazas o una superficie interpretada.

Los atributos sirven de ayuda visual, al realzar o cuantificar rasgos de interés para la interpretación. Un buen atributo sísmico es aquel que es directamente sensible a los rasgos geológicos deseados o propiedades de yacimientos de interés, o permite definir el ambiente de depositación y contexto estructural, y que además brinda la capacidad de inferir características y propiedades de interés (Brown, 2001).

3.1.1 Clasificación

Barnes y Roche (1997) desarrollaron una clasificación de atributos de traza sísmica compleja dependiendo de la relación entre los diferentes atributos y los datos sísmicos. Comúnmente se les denomina atributos instantáneos.

A continuación se describen los atributos sísmicos usados en la presente investigación:

Los atributos de la traza sísmica compleja

El análisis de la traza sísmica analítica se basa en la transformada de Hilbert. Esta transformada nos permite obtener la parte imaginaria de la traza sísmica compleja a partir de la parte real u observada.

También conocidos como atributos instantáneos, los atributos de la traza sísmica son calculados muestra a muestra, es decir, que son transformadas de la traza de entrada de tal manera que producen otra “salida” con el mismo número de muestras de la traza “entrada”, para así obtener un vector de valores que representan ciertas características asociadas al atributo que se está calculando.

Proporcionan información sobre acumulaciones de fluidos, litología, canales y cambios en la secuencia estratigráfica entre otros.

El cálculo de atributos se puede efectuar sobre secciones sísmicas 2D, en volúmenes sísmicos, sobre superficies interpretadas o entre sus intervalos. Todos son procesos de rápida respuesta y que habilitan diferentes posibilidades de despliegue y por ende de correlación. Los siguientes atributos de este tipo calculados en este trabajo son:

Envolvente de la señal

La envolvente de la señal sísmica, es un buen indicador para observar los paquetes de amplitudes positivas. A menudo resalta las principales características de la sísmica; la envolvente representa la energía instantánea de la señal y es proporcional a su magnitud para el coeficiente de reflexión. Resalta discontinuidades, cambios en la litología, fallas, cambios en la depositación y límites de secuencia.

Fase instantánea

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 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.

Este es un atributo que no depende de la fuerza de la reflexión, lo que con frecuencia hace que eventos débilmente apreciables se hagan identificables, particularmente eventos de características sedimentarias y tectónicas. También ayuda a distinguir fallamiento tenue y eventos buzantes.

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

- Buen indicador de continuidad lateral.
- Como la fase es independiente de la amplitud instantánea, detalla la continuidad de eventos, haciendo más visibles los eventos débiles.
- Buen visualizador de patrones estratigráficos, indicador de discontinuidades.
- Se utiliza para el cálculo de la frecuencia instantánea y la aceleración.

Frecuencia instantánea

Es la derivada en tiempo de la fase instantánea, y al igual que ésta es característica para un punto. Puede cambiar drástica y abruptamente, lo cual ayuda a identificar cambios repentinos en el carácter, pero es también a veces difícil de interpretar. La frecuencia evalúa a veces, la caracterización continua o semicontinua de la reflexiones y puede ser una herramienta útil en la correlación. Las variaciones en las interferencias cercanas a la reflexión, como los bordes de contacto agua-petróleo, tienden a cambiar la frecuencia instantánea. La acumulación de hidrocarburos suele asociarse con bajas frecuencias. El desarrollo de fracturas en rocas dúctiles está también asociado a bajas frecuencias (Tanner, 1994).

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

- Indicador de capas delgadas.
- Indicador de continuidad lateral
- Posible indicador de hidrocarburos a través de anomalías de baja frecuencia.
- Indicador de zonas de fracturas.

Frecuencia RMS

Frecuencia RMS se calcula, muestra por muestra, calculando en primer lugar la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los espectros de amplitud encontrados en la ventana de análisis.

Frecuencia dominante

Es similar a la frecuencia instantánea pero proviene de la frecuencia RMS del espectro de amplitud de la ondícula sísmica. Combinado con frecuencia instantánea y ancho de banda instantáneo caracteriza el tiempo que varían las propiedades de los datos sísmicos, específicamente la amplitud máxima.

Impedancia acústica

Este atributo es calculado con la integración de la traza sísmica original y un filtro de corte bajo. El filtro de corte bajo se aplica para eliminar ruido y reflexiones múltiples (si el valor del filtro de corte bajo es cero, entonces no se aplica).

En este proceso se supone que se tiene una ondícula de banda ancha y fase cero. Basado en estas suposiciones, la traza sísmica representa la serie de reflectividad

de banda limitada. Por lo tanto, integrar la traza de fase cero estima el registro de impedancia acústica natural de banda limitada. Como es de banda limitada, la impedancia no tendrá magnitudes absolutas y la sección apilada es usualmente la reflectividad con offset cero, por lo que es llamada impedancia acústica relativa (Linares, 2012). Es un indicador de los cambios de impedancia, en un sentido relativo, este atributo refleja contrastes de propiedades físicas, altos contrastes indican posibles límites de secuencias y superficies de inconformidad.

Adicionalmente se calculó un atributo geométrico:

Los atributos geométricos son también usados para interpretación estratigráfica puesto que definen eventos característicos y sus relaciones espaciales, y pueden ser usados para cuantificar características que directamente asistan en el reconocimiento de patrones deposicionales, y la litología relacionada.

Discontinuidad

La discontinuidad es un atributo geométrico que mide las variaciones laterales en los datos. El atributo de discontinuidad está diseñado para enfatizar eventos discontinuos tales como fallas.

3.2 ANÁLISIS MULTI-ATRIBUTOS

3.2.1 Análisis de la componente principal

El análisis de la componente principal ACP (en inglés Principal Component Analysis o PCA) es una técnica estadística de síntesis de la información o reducción de datos. El objetivo del algoritmo es el de analizar p-variables (correlacionadas) de una matriz de datos, donde se realiza una transformación de las variables originales en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas, mediante una rotación ortogonal, que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos, en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (primera componente principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Estas quedarán expresadas como combinación lineal de las originales, y se expresan en orden decreciente de importancia en cuanto a explicar la incidencia de cada componente principal en la descripción del problema.

El objetivo principal del análisis es averiguar cuantas variables, m , de entre las p , ($m < p$), explican mejor la variabilidad de los datos representados por las variables originales. Si ello es posible, se puede afirmar que la dimensionalidad del problema es menor que p . Por ejemplo, si algunas de las variables originales están fuertemente correlacionadas con otras se pueden “agrupar” en una única variable (componente principal) expresada como combinación lineal de aquellas, y de esta manera se reduce la dimensión del problema. Así pues, el ACP analiza y transforma un conjunto de variables correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas, donde la importancia de estas últimas vienen determinadas por la parte de varianza asociadas a ellas, (figura 3.1).

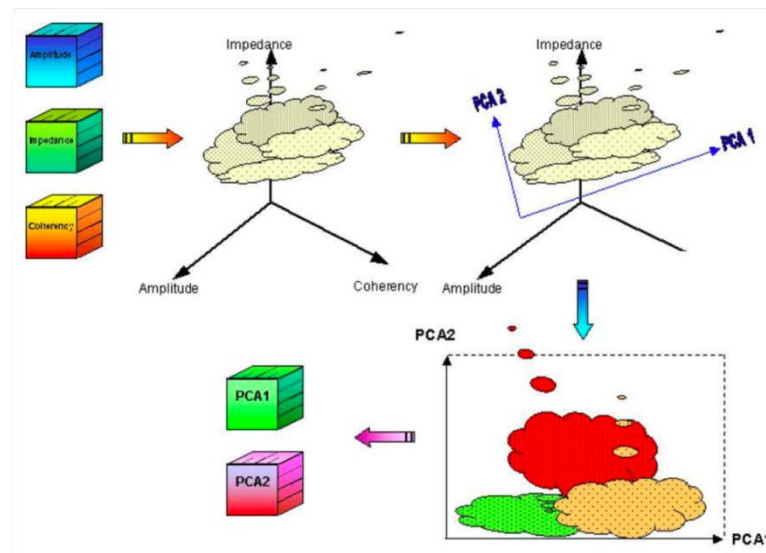


Figura 3.1 Esquema de la aplicación ACP donde los bloques representan los datos de entrada: los volúmenes de atributos y las flechas corresponden a las direcciones de las componentes principales. Tomado del manual de *Stratimagic*.

3.2.2 Agrupamiento jerárquico

El objetivo del análisis de agrupamiento, visto como procedimiento de clasificación, es determinar grupos dentro de una muestra multivariada que tengan algún grado de asociación o similitud entre los miembros de cada grupo y, simultáneamente, los miembros de distintos grupos presenten bajo grado de asociatividad o similaridad. El resultado del análisis de agrupamiento es poder dar notoriedad a las similitudes entre los datos.

La metodología aplicada está basada en la aglomeración de datos, donde se comienza con tantos grupos como individuos; cada uno de éstos constituye un

grupo inicial. A medida que transcurren las etapas del proceso se van formando nuevos grupos por unión de dos individuos, de un individuo con un grupo previo, o de dos grupos anteriores entre los que exista la menor distancia. La representación gráfica de estas etapas de formación de grupos, a modo de árbol invertido, se denomina dendograma figura 3.2.

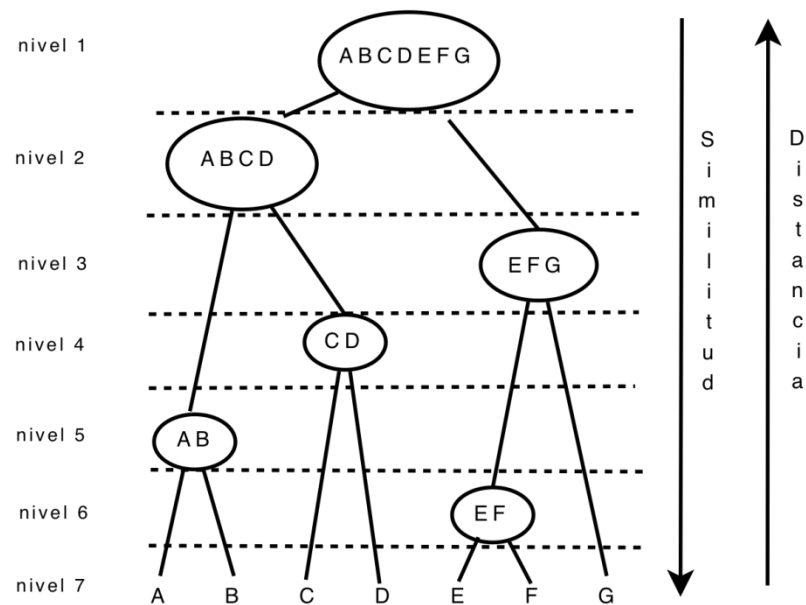


Figura 3.2 Árbol de agrupamiento o dendograma y sus niveles. Tomado de Ramírez (2008).

La proximidad expresa la semejanza que existe entre individuos o variables. Es decir, es el grado de asociación que existe entre ellos. Las proximidades pueden medir la distancia o la similitud (similaridad) entre individuos o variables. El valor que se obtiene en una medida de distancia es tanto mayor cuanto más alejados están los individuos o puntos entre los que se mide. En las similitudes, al contrario de las distancias, el valor que se obtiene es tanto mayor cuanto más próximos están los elementos considerados.

Definición de la medida de distancia y similitud usada:

La distancia euclídea: simplemente es la distancia de una línea recta (como se define la línea recta en la geometría euclídea) entre dos puntos en un diagrama de constelación (Aldas y Uriel, 2006). En la figura 3.3 se muestra un ejemplo de la distancia euclídea:

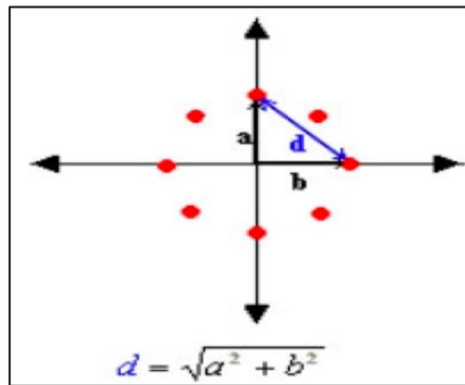


Figura 3.3 Distancia euclídea. Tomado de Aldas y Uriel (2006).

Se tendrá entonces que la máxima distancia euclídea en un esquema está dado por la máxima distancia entre dos puntos. La distancia euclídea no tiene en cuenta la dispersión de las variables y las relaciones existentes entre ellas (Aldas y Uriel, 2006).

3.3 CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES

La clasificación de facies es el proceso por medio del cual se identifican patrones característicos de un conjunto de rocas (características físicas, químicas y biológicas) los que permiten establecer relaciones entre ellos diferenciándolos de rocas adyacentes (Scheriff, 2002).

La clasificación de sismofacies se ha convertido en una técnica que se utiliza en la interpretación de volúmenes 3D de datos sísmicos Coléou *et al.*, (2003). Su aplicación consiste en caracterizar las propiedades físicas de un yacimiento utilizando mapas de facies sísmicas que intenta representar las distintas tendencias características en el área de interés, Fournier and Derain (1995), Saggaf *et al.*, (2003).

Las sismofacies originalmente están definidas cualitativamente, pero es posible describir objetivamente los factores que afectan a la traza sísmica, Mitchum *et al.*, (1977). El objetivo consiste en identificar los distintos grupos que representan la variación de las trazas sísmicas (que corresponden a la amplitud, la fase, y las variaciones de frecuencia entre las trazas y la variación lateral de estas propiedades dentro de un intervalo en los datos sísmicos), en la que se puede considerar que cada clase representa variabilidad de la litología, las propiedades de la roca y el contenido de fluido en los estratos.

El método utilizado en este estudio para la realizar el reconocimiento de los patrones de trazas sísmicas, está basado en los procesos de inteligencia artificial de las redes neuronales, el cual es una técnica que permite una evaluación rápida, cuyo dato de entrada es un volumen de datos sísmicos.

3.4 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Los estudios de investigación en torno a las redes neuronales artificiales (RNA) o neuroredes, están motivados en modelar el procesamiento de la información de los sistemas nerviosos biológicos. Especialmente, el del cerebro humano, cuyo funcionamiento es completamente distinto al de un computador. El cerebro humano corresponde al de un sistema altamente *complejo, no-lineal y paralelo*, que realiza combinaciones simultáneas de al menos dos de las siguientes funciones: aprendizaje, memorización, generalización o abstracción de características esenciales. En cambio, los computadores comunes son de tipo *secuencial*, es decir, realizan sólo una operación a la vez. En este sentido, una RNA es un procesador de información, de distribución altamente paralela, constituido por muchas unidades sencillas de procesamiento llamadas neuronas.

Las RNA se caracterizan principalmente por:

- Tener una inclinación natural a adquirir el conocimiento a través de la experiencia, el cual es almacenado, al igual que en el cerebro, en el peso relativo de las conexiones interneuronales o pesos sinápticos.
- Tienen una altísima plasticidad y gran adaptabilidad, son capaces de cambiar dinámicamente junto con el medio.
- Estar combinadas en estructuras denominadas capas. Una red neuronal artificial está compuesta por un conjunto de capas. De esta manera, la información se encuentra distribuida a lo largo de las sinapsis de la red, dándole a este sistema cierta tolerancia a fallos.
- Tener un comportamiento altamente no-lineal, lo que les permite procesar información procedente de otros fenómenos no-lineales.

La primera neurona artificial (figura 3.4) fue concebida por W. McCulloch y W. Pitts de la universidad de Chicago en 1943. Propusieron un modelo binario cuyo estado es 1 (activo) ó 0 (inactivo). La red calcula la suma de sus entradas (que son salidas de las neuronas artificiales a las que está conectada) con el valor de cada

entrada modulado por la eficacia sináptica correspondiente, y toma una decisión comparando esta suma con un cierto nivel o umbral (U) ya prefijado. Si la suma es superior al umbral, la neurona se activa (1); en caso contrario se mantiene inactiva (0). Por lo tanto, todas las neuronas participan simultáneamente. En general se utiliza una función de activación $Y=F(S)$ para activar una neurona artificial, las N neuronas x_i están enviando señales de entradas, que son los valores numéricos de “algo” y los valores w_{ij} representan los pesos sinápticos de las interconexiones entre las dos neuronas. Esta función de activación puede tener distintas formas y características. Normalmente (0,1) son los valores para la función sigmoideal ó (-1,1) para la función tangente hiperbólica. El utilizar funciones de activación no lineales tiene la ventaja de poder normalizar el valor de S para dar una salida Y dentro de un rango prefijado e independiente del valor de S , (Gómez *et al.*, s.f.).

La elección de la función de activación en las neuronas de la capa de salida dependerá del tipo de tarea impuesto. En tareas de clasificación, las neuronas normalmente toman la función de activación sigmoideal.

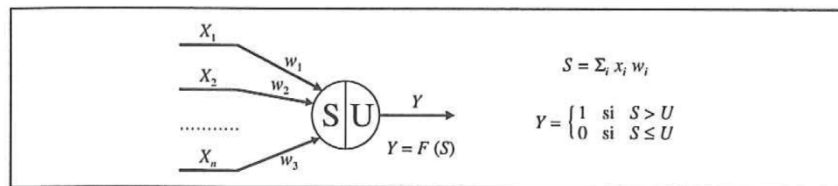


Figura 3.4 Diagrama básico de una red neuronal. Tomado de Gómez *et al.*, (s.f.).

La red neuronal más simple consta de una única capa o nivel, pudiendo estar formada por tantas como se desee y en donde las salidas de una capa están conectadas a las entradas de la siguiente, figura 3.5.

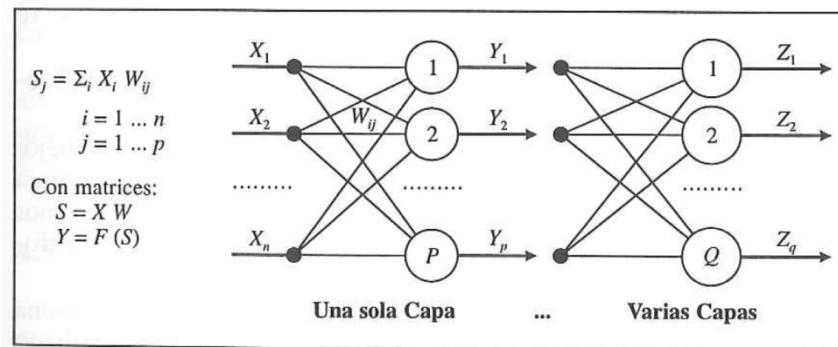


Figura 3.5 Diagrama de una red neuronal con más de una capa. Tomado de Gómez *et al.*, (s.f.).

Tres elementos principales componen a una red neuronal

- (a) Topología: este término representa a la organización de la red, número de capas y como se conectan estas entre sí.
- (b) Aprendizaje: se basa en los distintos algoritmos que procesan la información en la red.
- (c) Recuperación: como esta información almacenada en la red puede recuperarse

3.4.1 Modelo de una red neuronal

Hay cuatro elementos básicos que componen la topología del modelo neural, representados en la figura 3.6.

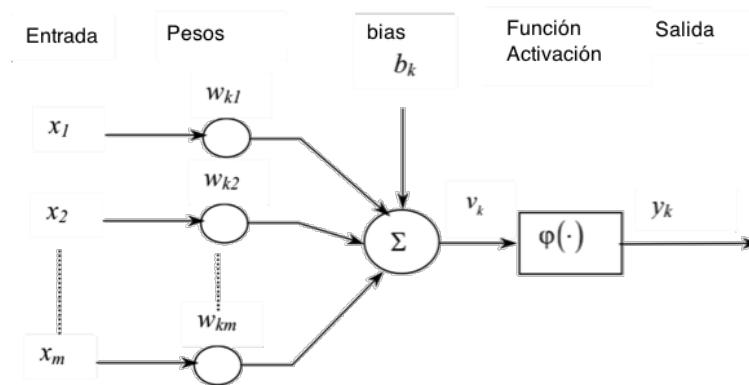


Figura 3.6 Diagrama de una red neuronal. Tomado de Haykin, (1999).

- (a) Un conjunto de conexiones, pesos o sinapsis que determinan el comportamiento de la neurona. Estas conexiones pueden presentar un estado activo o inactivo.
- (b) Un sumador de señales de entrada, se encarga de sumar todas las entradas multiplicadas por los pesos sinápticos.
- (c) Una función de activación que se encarga de limitar la amplitud de la salida de una neurona. La función de activación también se conoce como función limitante ya que se encarga de limitar el rango de amplitud permisible de la señal de salida a un valor finito.
- (d) Un umbral exterior que determina el umbral por encima del cual la neurona se activa.

La representación matemática de la figura 3.6 se basa en las siguientes ecuaciones:

$$y_k = \varphi(u_k + b) \quad \text{Ec. 1}$$

donde

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j \quad \text{Ec. 2}$$

donde $x_1, x_2, x_3 \dots x_m$ es el vector de entrada de sinapsis m , conectada a una neurona k es multiplicada por un peso sináptico $w_1, w_2, w_3 \dots w_{kj}$, el primer subíndice (k) se refiere a la neurona y el segundo se refiere al fin de la entrada de la sinapsis (j : número de iteraciones), u_k es la salida del combinador lineal, b_k es el valor externo (bias) que se aplica para cambiar la posición de la función de activación independiente de la señal de entrada, φ es conocida como función de activación y y_k es la señal de salida de la neurona.

La función de salida proporciona el valor de salida de la neurona, en base al estado de activación de la neurona.

$$v_k = u_k + b_k \quad \text{Ec. 3}$$

Entre los modelos de función activación (φ) más comunes están los presentados en la siguiente tabla:

Tabla 1.1 Listado de las funciones de activación más comunes. Tomado de Bertona, (2005).

Función	Formula	Rango
Identidad	$y = x$	$[-\infty, \infty]$
Escalón	$y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[0, 1]$
	$y = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$[-1, 1]$
Lineal a tramos	$y = \begin{cases} x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ +1 & \text{si } x > 1 \\ -1 & \text{si } x < -1 \end{cases}$	$[-1, 1]$
Sigmoidea	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$[0, 1]$
	$y = \tanh(x)$	$[-1, 1]$
Sinusoidal	$y = \text{Sen}(\omega \cdot x + \varphi)$	$[-1, 1]$

3.4.2 Clasificación de las redes neuronales

Una clasificación de las redes neurales propuesta por Lippmann (1987) define que las redes pueden dividirse en redes neuronales supervisadas y no supervisadas.

Bose y Liang (1996) resumen que las redes neuronales no sólo tienen estructuras diferentes o topología diferente; también se distinguen unas de otros por su forma de aprender (algoritmo de aprendizaje), este último involucra la manera en la que realizan los cálculos y las características de los componentes.

Aprendizaje: sin duda una propiedad importante de las redes neuronales es su capacidad de aprender a partir de los datos de entrada. El aprendizaje ha sido un tema central para los investigadores de las redes neuronales. Se trata de un proceso en el cual las RNA se adaptan a la sinapsis, para que la red pueda responder de un modo distinto a los estímulos del medio. Recordando que son los pesos sinápticos los encargados de categorizar la información adquirida.

El tipo de aprendizaje en las redes neuronales se determina por los cambios en los patrones de entrada. Típicamente, los procesos de aprendizaje en las redes neuronales se dividen en dos grupos: aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado.

Aprendizaje no supervisado

El entrenamiento de la red trabaja solo con vectores de entrada. El algoritmo modifica los pesos de modo que las salidas sean consistentes, es decir que a entradas muy parecidas la red compute la misma salida. El proceso extrae características abstrayendo las propiedades colectivas subyacentes del conjunto de entrenamiento, agrupando por similitud (clases), a cada una de las entradas.

Aprendizaje supervisado

Es un proceso donde el ajuste de pesos se hace referencia a la captura de un patrón específico. Se presentan dos vectores (entrada y salida deseada), la salida computada por la red se compara con la salida deseada, y los pesos de la red se modifican en el sentido de reducir el error cometido, se repite iterativamente, hasta que la diferencia entre la respuesta deseada y la respuesta de la red sea aceptablemente pequeña.

3.4.3 Algoritmo de aprendizaje

Su función es modificar los pesos sinápticos de la red en una manera ordenada para lograr el diseño deseado. De acuerdo con el criterio adoptado los algoritmos se pueden clasificar en cuatro tipos, Xu y Wunsch (2005) coinciden en que pueden describirse de la siguiente manera:

- Los modelos de partición, que tratan de descomponer el conjunto de datos directamente en un conjunto de clases.
- Modelos probabilísticos, que intentan estimar los parámetros probabilísticos con la finalidad de agruparlos.
- Los modelos jerárquicos, que proceden sucesivamente combinando las distintas clases entre sí.
- Modelos competitivos, que son similares a los modelos de partición excepto que la adaptación de las clases se define por el análisis de la interconexión que se va a realizar.

Las redes usadas en este estudio se basan en el entrenamiento supervisado y no supervisado, que pertenecen a los modelos competitivos, específicamente en los mapas auto-organizativos que introdujo Teuvo Kohonen (figura 3.7).

Algoritmos de aprendizaje más conocidos				
Paradigma	Regla de aprendizaje	Arquitectura	Algoritmo de aprendizaje	Tareas
Supervisado	Corrección del error	Perceptrón o perceptrón multicapa	Algoritmos de aprendizaje perceptrón, retropropagación del error, ADALINE, MADALINE	Clasificación de patrones, aproximación de funciones, predicción, control, ...
		Elman y Jordan recurrentes	Retropropagación del error	Síntesis de series temporales
	Boltzmann	Recurrente	Algoritmo de aprendizaje Boltzmann	Clasificación de patrones
		Competitivo	LVQ	Categorización intra-clase, compresión de datos
		Red ART	ARTMap	Clasificación de patrones, categorización intra-clase
No supervisado	Corrección del error	Red de Hopfield	Aprendizaje de memoria asociativa	Memoria asociativa
		Multicapa sin realimentación	Proyección de Sannon	Análisis de datos
	Competitiva	Competitiva	VQ	Categorización, compresión de datos
		SOM	Kohonen SOM	Categorización, análisis de datos
Por refuerzo	Hebbian	Redes ART	ART1, ART2	Categorización
		Multicapa sin realimentación	Análisis lineal de discriminante	Análisis de datos, clasificación de patrones
		Sin realimentación o competitiva	Análisis de componentes principales	Análisis de datos, compresión de datos

Figura 3.7 Algoritmos de aprendizaje. Tomado de Bose y Liang (1996).

3.4.4 *Aprendizaje competitivo*

El objetivo del aprendizaje competitivo es crear una regla de aprendizaje que pueda ser aplicada a una topología de modo que asigne las neuronas a diferentes áreas del espacio de entrada, caracterizando los datos que se introducen a la red.

En el aprendizaje competitivo las neuronas reciben idéntica información de entrada, pero las unidades de salida compiten entre sí para ser la que se active como respuesta de una entrada determinada. Se pretende que cuando se presente a la red un patrón de entrada, sólo una de las neuronas de salida (o un grupo de vecinas) se active. Por tanto, las neuronas compiten por activarse, quedando finalmente una como neurona vencedora y anuladas el resto, se clasifican valores similares en la misma categoría y, por tanto, deben activar la misma neurona de salida, las clases o categorías las proporciona el usuario.

El algoritmo utilizado tiene como fin la agrupación de datos en celdas. La idea es encontrar la mejor agrupación de N puntos en K celdas de modo que la distancia sea mínima, entre los puntos semejantes.

El método competitivo se muestra como un método rápido de organización automática de los recursos de la red y ha demostrado su alta efectividad en la práctica.

3.4.5 *Teuvo Kohonen*

En 1982 Teuvo Kohonen presenta un modelo de red neuronal competitiva (Kohonen, 1995) con capacidad para formar mapas de características a través de una organización matricial de neuronas artificiales. El modelo presenta dos variantes denominadas SOM o mapas auto organizativos (Self Organizing Map) y LVQ o aprendizaje de cuantificación vectorial (Learning Vector Quantization). La diferencia fundamental radica en el tipo de aprendizaje utilizado. Mientras que el algoritmo LVQ es supervisado, el modelo SOM no requiere el conocimiento de los datos de salida.

Los vectores de entrada a la red pueden ser de diferentes dimensiones, siendo en el caso de LVQ de una dimensión, y en el caso de SOM bidimensionales o incluso tridimensionales.

El modelo SOM trata de establecer una correspondencia entre los datos de entrada y un espacio bidimensional de salida, de modo que ante datos con características

comunes se activen neuronas situadas en zonas próximas de la capa de salida, se clasifican de manera iterativa valores similares en la misma categoría, por lo tanto, deben activar la misma neurona de salida.

Un modelo *SOM* está compuesto por dos capas de neuronas. La capa de entrada (formada por N neuronas, una por cada variable de entrada) se encarga de recibir y transmitir a la capa de salida la información procedente del exterior. La capa de salida (formada por M neuronas) es la encargada de procesar la información y formar el mapa de rasgos (figura 3.8).

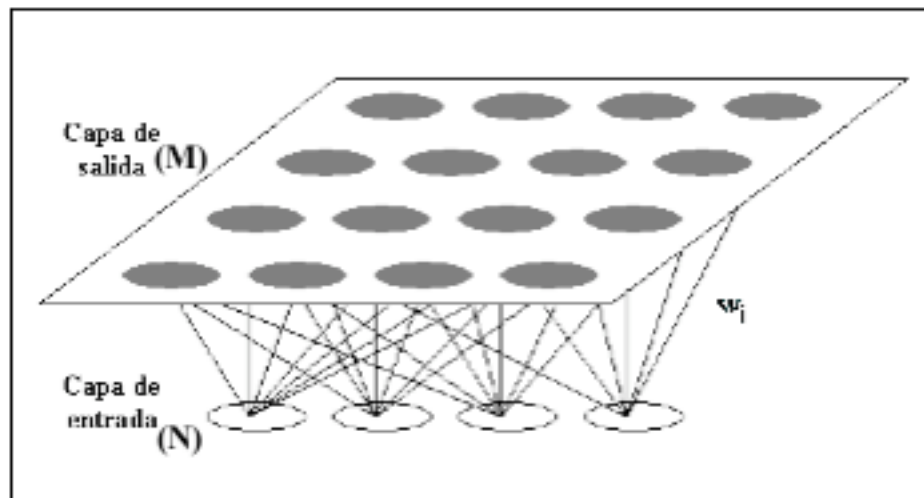


Figura 3.8 Arquitectura del modelo de SOM. Tomado de Montaña, (2002).

De forma simplificada, el proceso de aprendizaje se desarrolla de la siguiente manera:

Una vez presentado y procesado un vector de entrada (x_m), se establece a partir de una medida de similitud, la neurona vencedora, esto es, la neurona de salida cuyo vector de pesos es el más parecido respecto al vector de entrada (j), a continuación, el vector de pesos asociado a la neurona vencedora (w_j) se modifica de manera que se parezca un poco más al vector de entrada, de este modo, ante el mismo patrón de entrada, dicha neurona responderá en el futuro todavía con más intensidad. El proceso se repite para un conjunto de patrones de entrada los cuales son presentados a la red, de forma que al final los diferentes vectores de pesos se adaptan con uno o varios patrones de entrada y, por tanto, con dominios específicos del espacio de entrada. Si dicho espacio está dividido en grupos, cada

neurona se especializará en uno de ellos, y la operación esencial de la red se podrá interpretar como un análisis de clases.

El efecto de la regla de aprendizaje no es otro que acercar de forma iterativa el vector de pesos de la neurona de mayor actividad (ganadora) al vector de entrada.

La descripción de aprendizaje del modelo SOM también tiene su expresión matemática, teniendo en cuenta que cuando se presenta un patrón de entrenamiento, se debe identificar la neurona de salida vencedora, esto es, la neurona cuyo vector de pesos sea el más parecido al patrón presentado. Un criterio de similitud muy utilizado es la distancia euclídea que viene dado por la siguiente expresión:

$$\min \|X_p - W_j\| = \min \sum_{i=1}^N (x_{pi} - w_{ji}) \quad \text{Ec. 4}$$

X_p : $x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pN}$ y el vector de pesos W_j : $w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jN}$ de las conexiones entre cada una de las neuronas de entrada y la neurona de salida j .

De acuerdo con este criterio, dos vectores serán más similares cuanto menor sea su distancia.

LVQ es una técnica de aprendizaje supervisado. El algoritmo de esta red consiste en determinar el patrón más cercano, según una medida de similitud al patrón de entrada.

Un vector de entrada x es tomado aleatoriamente del espacio de entradas. Si las clases del vector x y la del w asociado coinciden, entonces el vector w es movido en la dirección de x . Por la otra parte, si las clases son diferentes, el vector w es alejado de x .

$$w^* = w^* + \alpha(x - w^*) \quad \text{Ec. 5}$$

si la clase(x) igual a la clase (w^*)

$$w^* = w^* - \alpha(x - w^*) \quad \text{Ec. 6}$$

si la clase(x) siendo diferente de clase (w^*)

Siendo w los pesos de la neurona vencedora y x el vector de entrada

Con este reajuste, acercamos el vector w al vector x , en el futuro un patrón parecido al vector de entrada se asignará al mismo vector de pesos.

Las influencias laterales se suelen representar por una gaussiana: mientras más cercana más influencia, si la distancia es muy grande, la influencia llega a ser despreciable.

3.5 LÍMITES DE SECUENCIAS

Son intervalos de tiempo geológico durante los cuales se produce a escala global, un ascenso y descenso del nivel medio del mar.

Vail *et al.*, (1977) estableció la jerarquía de 6 órdenes de ciclos eustáticos, cuya duración es de la siguiente forma:

- Primer orden (megaciclo) $> 50\text{Ma}$
- Segundo orden (superciclo): $3 - 50\text{Ma}$
- Tercer orden (ciclo): $0.5 - 3\text{Ma}$
- Cuarto orden (paraciclo): $0.08 - 0.5\text{Ma}$
- Quinto orden (paraciclo): $0.03 - 0.08\text{Ma}$
- Sexto orden (paraciclos): $0.01 - 0.03\text{Ma}$

Las secuencias identificadas e interpretadas en el área corresponden a las de tercer orden.

3.6 AMBIENTES SEDIMENTARIOS

Los ambientes sedimentarios se clasifican en:

- ☐ Ambientes continentales: fluvial, lacústico y eólico.
- ☐ Ambientes transicionales: deltaicos y costeros.
- ☐ Ambientes marinos: plataforma, arrecifal, canales submarinos y abanicos.

Según Porras (2003) la secuencia Bur 3 está referenciada en ambientes depositacionales de tipo transicional que varían entre frente costero inferior y transicional-costa afuera (figura 3.9).

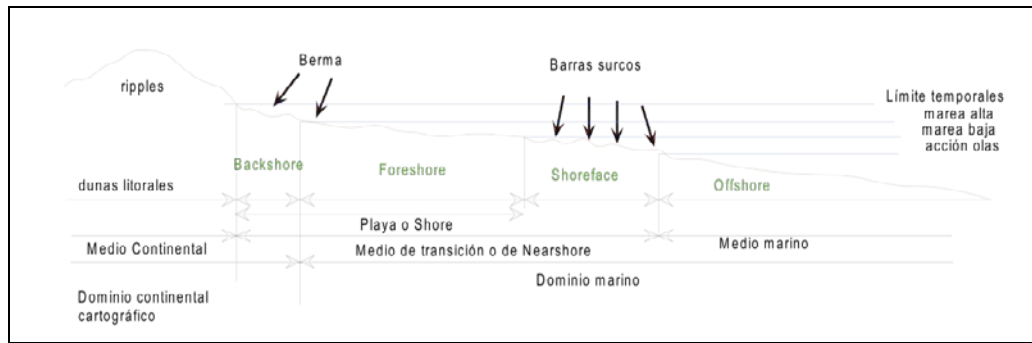


Figura 3.9 Ambientes sedimentarios en un perfil de playa, donde se observan el frente costero inferior o *shortface* y *offshore*. Tomado de Corrales et al., (1977).

3.6.1 Ambiente costero

La costa es una zona ancha que está sujeta a transformaciones rápidas y profundas, fuertemente influenciada por las transgresiones y regresiones marinas. Frente costero inferior o *shortface*: corresponde a una zona de transición en cuanto a la granulometría de los sedimentos. Dos tipos de estructuras sedimentarias son características en esta zona los ripples de olas con las crestas alineadas a la costa, y las bioturbaciones, (figura 3.10)

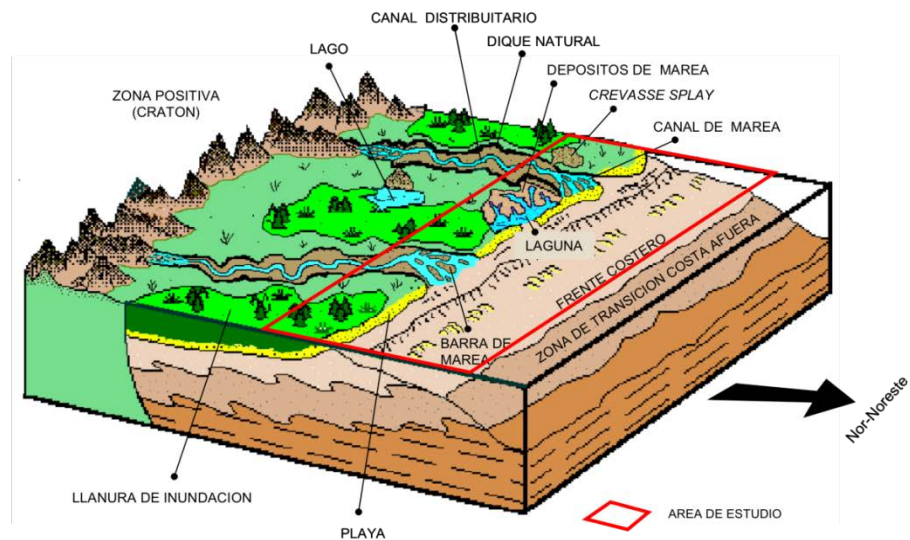


Figura 3.10 Modelo paleogeográfico para el Oligoceno superior-Mioceno medio, donde se muestran los ambientes deposicionales predominantes en la unidad Oritupano-Leona. Tomado de Porras, (2003).

Zonas de transición-costa afuera también llamado *offshore*: aquí las arenas son depositadas y re trabajadas. Se crean estructuras sedimentarias exclusivas, como

las estratificaciones cruzadas, las cuales se forman como resultado de los flujos combinados, que es la acción de las olas y de una corriente.

De acuerdo a estudios de núcleos, se identifican barras de marea y discretos canales de marea y distribuitarios, perfiles pedogénicos y lignitos dentro de la secuencia. Se han reconocido ambientes lacustrinos a lagunares muy localizados, con sus depósitos asociados de *crevasse splay* (abanicos de desembalse) y paludales. Las arenas presentan estratificación planar o cruzada, bioturbación y pueden estar superpuestas presentando patrones de apilamientos variables, como corresponde en sistemas complejos de barras y canales de marea (Porras, 2003) representados en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Ambientes sedimentarios y facies reconocidas. Tomada y modificada de Porras (2003).

Litofacies	Estructuras Sedimentarias	Características
Barras de marea	Laminaciones de bajo ángulo y cruzada, planar, raramente paralela, mud drapes y bioturbación	Litofacies arenosas, grano creciente hacia arriba, limpias, depositación bajo condiciones de régimen de flujo superior a inferior, alta frecuencia de mud drapes
Canales de marea	Arenas con laminación de bajo ángulo, planar y cruzada, estructuras de derrumbe, masivas o no estructuradas, bioturbación.	Litofacies arenosas, espesor entre 0.5 y 30 pies, bases erosivas, lags indicativos de incisión, depositación bajo condiciones de régimen de flujo inferior, ambientes salobre, presencia de mud drapes.
Perfiles pedogénicos	Arcillitas y areniscas moteadas con restos de raíces, laminación de bajo ángulo, mud drapes, estructuras pedogénicas, algo de bioturbación.	Restos de raíces carbonáceas, espesor máximo de 5 pies, moldes de pellets de siderita, procesos pedogénicos, presencia de arcillitas expansivas.
Depósitos lacustrinos	Bien definida laminación paralela a subparalela en limonitas y arcillitas.	Raros y esporádicos, predominan litofacies de grano fino sin bioturbación, espesor entre 1 a 15 pies concreciones sideríticas paralelas, color oscuro, ricas en materia orgánica.
Crevasse splay	Arenas y arcillas laminadas, estratificación ondulada, localmente de bajo ángulo, bioturbación, mud drapes.	Litofacies arenosas y fina, perfil grano creciente o decreciente de barras y canales a pequeña escala, espesor entre 2.4 y 4.2 pies, sedimentación de bajo régimen de flujo e influencia marina, siderita.
Canales distribuitarios	Estratificación planar y cruzada de alto ángulo, intraclásticos, estructuras de derrumbe y colapso.	Predominio de litofacies arenosas gruesas, espesor entre 2.4 y 13 pies, incisión y espesor mayor que canales de influencia mareal, ninguna influencia marina, sin bioturbación ni mud drapes, sedimentación fluvial.

En el presente estudio también se identificaron cuerpos asociados con ambientes fluvio-continetales.

3.6.2 Ambientes fluvio-continetales

El ambiente está definido por la acción y energía del agua y por el conjunto de erosión, transporte y sedimentación.

Los principales estilos de canales fluviales comúnmente conocidos son: canales rectilíneos, canales anastomosados, canales entrelazados y canales meándricos; este último se relaciona con las evidencias reconocidas en el intervalo sísmico correspondiente a la secuencia Bur 3.

Canales meándricos: su característica principal es su alta sinuosidad. Se presentan en zonas con baja pendiente con moderada carga de sedimentos; existe una relación entre el ancho y la longitud del canal y el radio de curvatura, las variaciones son el producto de los cambios de velocidad y de la competencia de la corriente en diferentes sitios de la superficie de la barra, (figura 3.11 y figura 3.12).

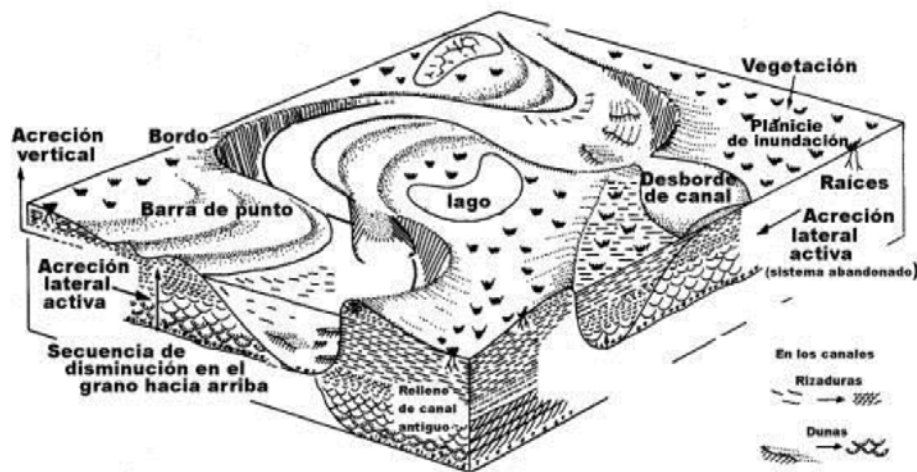


Figura 3.11 Ambiente fluvial, estructura de un canal meandriforme. Tomado de Tesi, (2011).

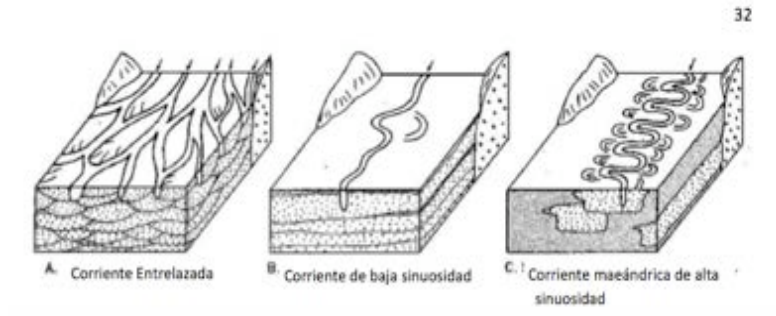


Figura 3.12 A. corriente entrelazada, B. corriente de baja sinuosidad, C. corriente meándrica de alta sinuosidad. Tomado de Tesi, (2011).

Características de los canales meandriformes

- El rasgo sedimentológico principal de estos canales es la acumulación de arena bajo la forma de barras en el lado convexo de los meandros.
- Los principales depósitos son: barra de meandro, dique natural, abanico de rotura y llanura de inundación, por lo tanto, su crecimiento es lateral y están constituidas de arena con poca grava.
 - o Llanura o planicie de inundación: es una zona plana ubicada a ambos lados del río, la cual puede tener una anchura que va desde pocos metros hasta decenas de kilómetros, dependiendo de la magnitud del canal fluvial. Esta llanura o planicie de inundación es cubierta por las aguas durante las crecidas del río, el cual lleva hasta esas zonas sedimento fino en suspensión, donde éste es depositado por decantación para formar intervalos de acumulaciones de lodo cuando el movimiento del agua se desacelera o se detiene. Está constituida por lodos con hojas y raíces con delgadas laminaciones de arena fina, producto de las inundaciones periódicas de los ríos.
 - o Dique natural: el agua que por inundación desborda al canal, deposita poco a poco arena fina, y lodo en los márgenes del río, dando lugar a la formación de un dique natural. El dique natural es un cuerpo sedimentario alargado y de poco relieve topográfico; de dimensiones reducidas y constituido por materiales muy finos (arena fina, limo y arcilla). Junto a las lutitas de llanura de inundación estabilizan el curso de los canales. La sedimentación de

material fino en la llanura aluvial puede ser interrumpida por la depositación de material arenoso aportado por el río cuando se produce la ruptura de un dique natural.

- o Abanico de rotura: en este caso se forma un abanico de rotura, el cual constituye un cuerpo arenoso cuyo espesor, de pocos metros, disminuye gradualmente hasta desaparecer a medida que se aleja del canal fluvial. Se producen cuando el río aumenta su velocidad (inundación) y rompe el dique, depositando lóbulos de arena sobre la llanura de inundación. Tienen espesores de 1 a 2 metros pero su extensión puede ser de varios kilómetros de ancho. Están compuesto de arena fina a media, con estratificación paralela y rizaduras. Generalmente son grano decrecientes, pasando en su parte distal a arcillas y lodos que se interdigitan con la llanura de inundación. Los abanicos de rotura forman yacimientos de poca calidad debido a su poco espesor.

- Forman secuencias grano decreciente.
- La base es erosiva, recubierta por guijarros o clastos de arcilla, sobre la cual se encuentra arena media a gruesa con estratificación cruzada, ésta se hace más fina al tope donde presenta rizaduras y laminación paralela con arcillas.
- Los depósitos de barras de meandros forman yacimientos de buenos a excelentes.

Los depósitos terrestres identificados por Porras (2003), se asocian a marismas, perfiles pedogénicos y a canales distributarios fluviales, de *crevasse splay* y lacustrinos, (tabla 1.2).

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló en tres etapas fundamentales, la primera consistió en la calibración sísmica-pozo, en donde se interpretó los horizontes de interés. La segunda etapa fue la construcción del modelo de velocidades, con el cual se realizó la conversión tiempo profundidad del cubo sísmico, y por último la tercera etapa, se basó en el análisis de atributos sísmicos por medio del análisis de componentes principales junto a la clasificación de sismofacies sísmicas con el uso de redes neuronales. Posteriormente se seleccionaron los mapas de sismofacies y se identificaron posibles zonas prospectivas.

4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Antes de comenzar a trabajar con los datos se hizo una recopilación de información bibliográfica (geológica y estratigráfica) de la zona de estudio y una revisión de los datos disponibles en el proyecto.

4.1.1 Revisión bibliográfica

De acuerdo a las revisiones de las interpretaciones anteriores y el reconocimiento en el área de estudio, se identificaron fallas y estructuras mayores, que contribuyeron en el entendimiento del estilo estructural del área de estudio y su relación dentro de un contexto regional.

El modelo estratigráfico local derivado de las interpretaciones realizadas en el área (Porras, 2003) donde se definen superficies estratigráficas, límites de secuencias de hasta 3er orden, discordancias, terminaciones y formas sismo-estratigráficas de interés, sirvieron para la identificación e interpretación de los horizontes en las líneas sísmicas, en donde se tomó en consideración estudios bioestratigráficos de alta resolución y análisis de ambientes depositacionales efectuados sobre núcleos y muestras de canal de pozos del área (Época, 1999; IGIS, 2001), que sirvieron para la definición de litofacies y ambientes asociados en este trabajo.

4.1.2 Revisión de los datos disponibles

Sísmica

El polígono de estudio tiene un área de 416 km² (de 672 km²) de un volumen sísmico 3D con migración en tiempo post apilamiento (post-stack time migration) sin post procesos a 32 bites (pstm32), procesado en el año 1998 por la empresa Veritas. La figura 4.1 muestra los límites del estudio enmarcado dentro de los límites de la concesión.

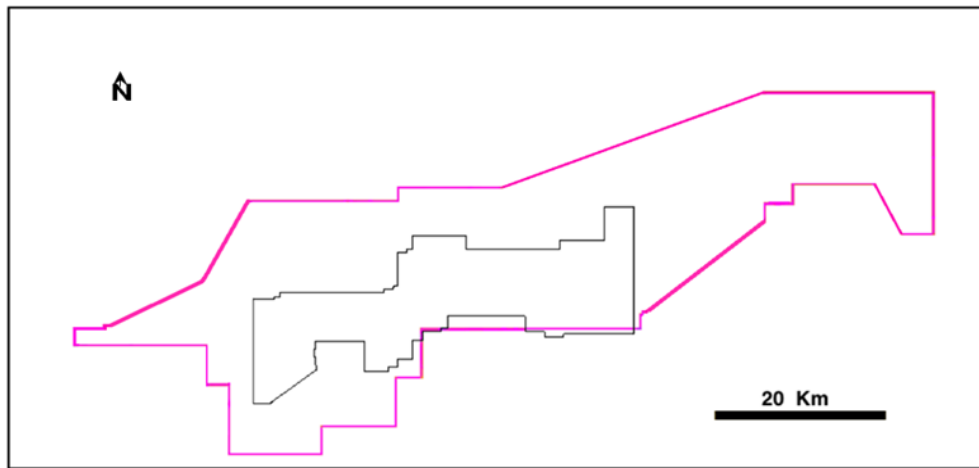


Figura 4.1 Área de estudio. La línea rosada indica los límites de la concesión y la línea negra los límites de estudio para este trabajo.

El cubo sísmico fue cargado en la suite *OpenWorks* de *Landmark* (figura 4.2).

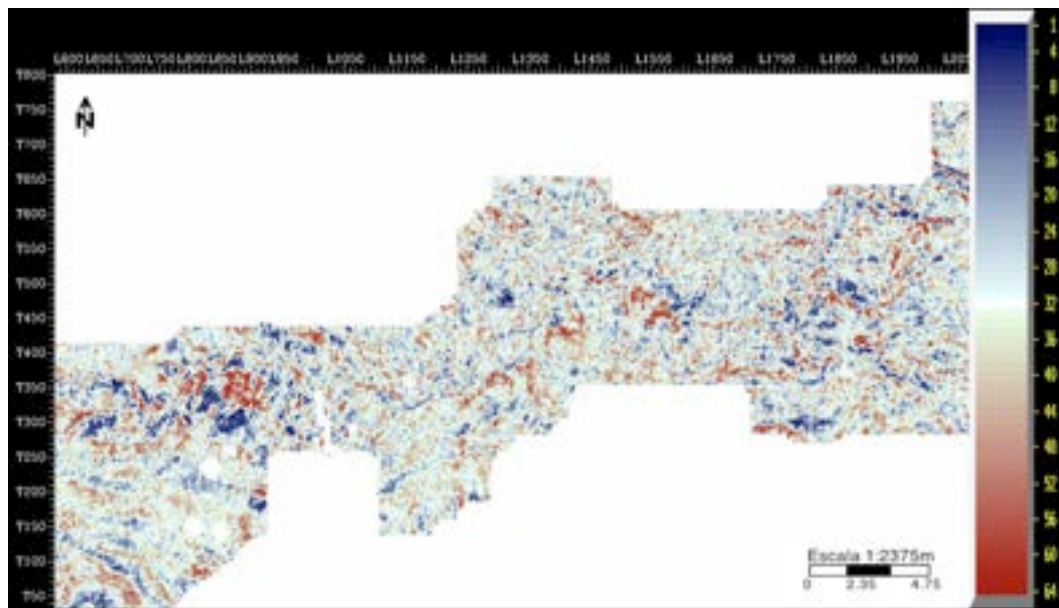


Figura 4.2 Sección horizontal en tiempo o time slice del cubo sísmico pstm32 con migración en tiempo post apilamiento, la escala muestra las variaciones de amplitud, el color azul representa valores bajos de amplitud y el color rojo representa amplitudes altas.

Datos de pozos

Se realizó la revisión de una lista de 279 pozos, en el estudio fueron seleccionadas dos combinaciones de pozos de acuerdo a la necesidad de las etapas desarrolladas.

- Calibración sísmica: se procedió a realizar un inventario de los registros (tabla 1.3). En esta etapa se usaron 9 pozos, la mayoría de los pozos seleccionados contaban con curvas DT (sónico onda P), RHOB (densidad) y TZ proveniente del checkshot excepto P2 y P3 que no poseían curvas de densidad.

Para los pozos P2 y P3 fue necesario aplicar la ecuación de Gardner, para el cálculo del seudo registro de densidad.

Relación de Gardner: el método más utilizado para obtener densidades a partir de información acústica es la ecuación de Gardner *et al.*, (1974). No hay necesidad de introducir otra variable de entrada más que la velocidad. La ecuación tiene la forma de una ley de potencias:

$$Dn = V_p^{0,25} \times 10^{-0,51} \quad \text{Ec. 7}$$

Dn: Densidad, g/cm³
Vp: Velocidad, pies/s

Los coeficientes 0,25 y -0,51
son exponentes empíricos

Tabla 1.3 Tabla que representa los pozos usados en la calibración sísmica. Registros: CALP: caliper; BS: bit size; GR: gamma ray; DT: sónico onda P; RHOB: densidad; CS: check shot; RD: resistividad profunda; RT: resistividad somera.

Pozos	CALP	BS	GR	DT	RHOB	CS	RD	RT
P1	x	x	x	x	x	x		
P2			x	x		x		
P3	x	x	x	x	x	x		
P4	x		x	x	x	x		
P5	x		x	x	x	x		
P6	x		x	x	x	x		
P7	x		x	x		x	x	
P8	x		x	x	x	x		
P9				x	x	x		

Control de calidad de los tiros de verificación (CS-check shot): se procedió a graficar los registros CS de los 9 pozos y compararlos entre sí, la coherencia de estos datos es muy importante a la hora de ajustar la sísmica con los datos de pozo.

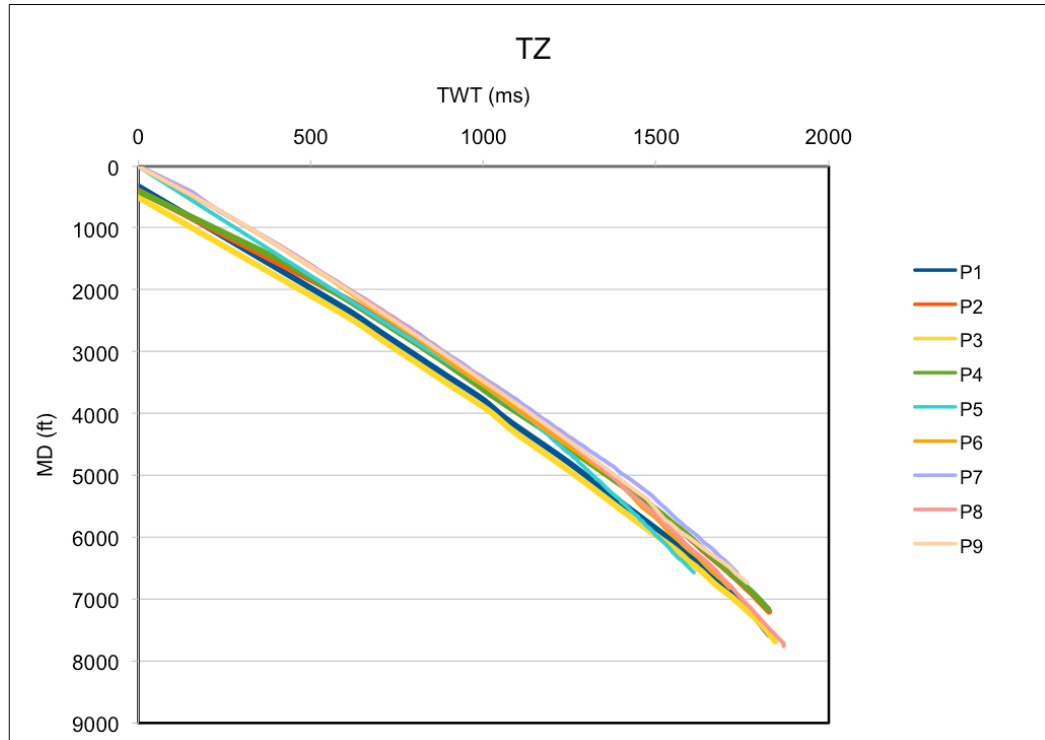


Figura 4.3 Gráfico tiempo-profundidad.

En la figura 4.3 se observan 9 curvas correspondientes a los pozos utilizados en la calibración, los valores son coherentes, se aprecia como al aumentar la profundidad (MD) también aumenta el tiempo doble de viaje (TWT).

- Modelo de velocidades: se hicieron revisiones de las TZ generadas por los pozos calibrados y de los valores de profundidad de cada uno de los toques de interés geológico (por pozo).
- Clasificación de sismofacies: en esta etapa se trabajó con datos de producción de 30 pozos, dicha información fue facilitada por Petrooritupano.

4.2 CÁLCULO DE LA CALIBRACIÓN SÍSMICA

La calibración sísmica se realizó en la aplicación *Syntool* de *OpenWorks* en donde se generaron los sismogramas sintéticos para cada uno de los 9 pozos (figura 4.4),

y se calibraron con la sísmica de superficie, dicho proceso busca correlacionar correctamente los topos estratigráficos de la sísmica de pozo (dato duro) con la sísmica de superficie.

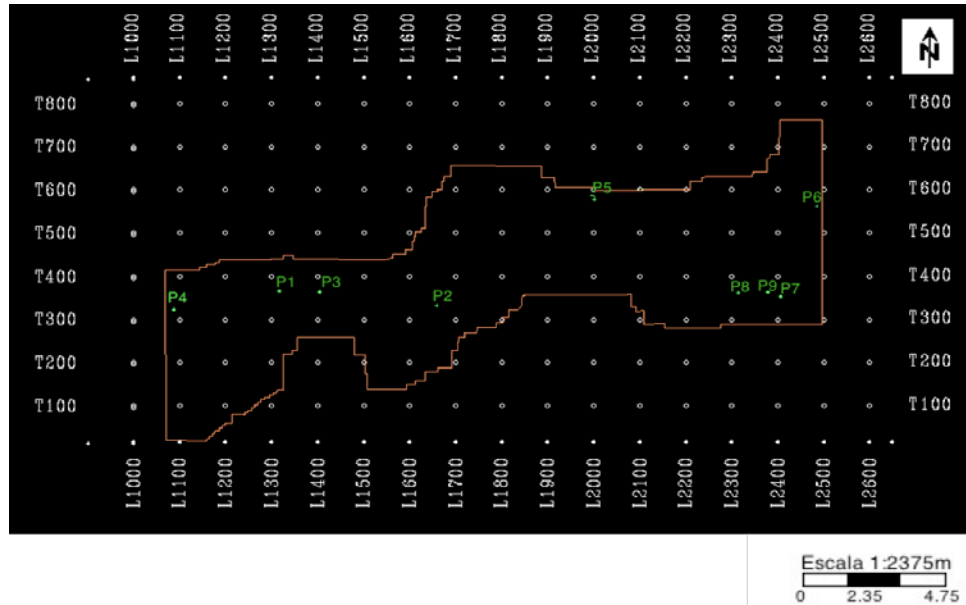


Figura 4.4 Distribución de los pozos calibrados en el polígono de estudio.

4.2.1 Sismograma sintético

En este paso se calcula la impedancia, la serie de reflectividad y un sismograma sintético a partir de los registros sónico y densidad; producto de la convolución de la serie de reflectividad con la ondícula (teórica o extraída del VSP o sísmica de superficie) y refiriéndola al datum sísmico.

Es necesario realizar la corrección del registro sónico, para evitar ruidos y distorsiones, producto de efectos de dispersión, condiciones del pozo, invasiones del lodo, entre otros. La corrección del registro sónico se realiza mediante la curva de deriva que proporciona la diferencia entre la curva de tiempo de los “checkshots” y del registro sónico.

Es importante tomar en cuenta que a partir del sintético se va obtener una nueva curva tiempo profundidad más refinada (TZ), la cual como explicaremos más adelante será parte de los datos de entrada para la construcción del modelo de velocidades.

El primer paso consiste en elegir el pozo a calibrar y cargar los registros de densidad (RHOB), sónico (DT) y la curva tiempo profundidad (TZ) relacionados

a éste, en el caso del pozo P2 y P7 se calculó un registro de pseudo densidad con la ecuación de Gardner (ec. 7).

A continuación la herramienta *Syntool* permite desplegar dichas pistas junto a:

- El registro sónico (DT) que es corregido por el checkshot mejorando la relación tiempo-profundidad.
- Registro de impedancia.
- Serie de reflectividad.
- Sismograma sintético sobre la sección sísmica.
- Diagramas de correlación entre el sintético y la sísmica.
- Además de otros registros como caliper, bite size y gamma ray.
- La visualización de todos estos paneles, ayudó a tener un mayor control de los resultados tomando en cuenta todas las variables presentes, que influyen en el resultado.

Posteriormente se realizaron para cada pozo pruebas de las ondículas variando los parámetros de cada una de ellas, con el fin de encontrar la que mejor ajustara. *Syntool* cuenta con la opción de autocorrelación de señales, que permite extraer de la sísmica una ondícula (wavelet extraction), con su correspondiente frecuencia dominante, generada a partir de varias correlaciones, con el valor predeterminado de 31 correlaciones y 10 trazas a cada lado de la traza central, en una ventana de correlación (longitud en ms).

Los sintéticos de los pozos P1, P3, P4 y P5 se generaron con ondículas extraídas de la sísmica, y desplazamiento en tiempo (shift) de entre -8 ms a -24 ms .

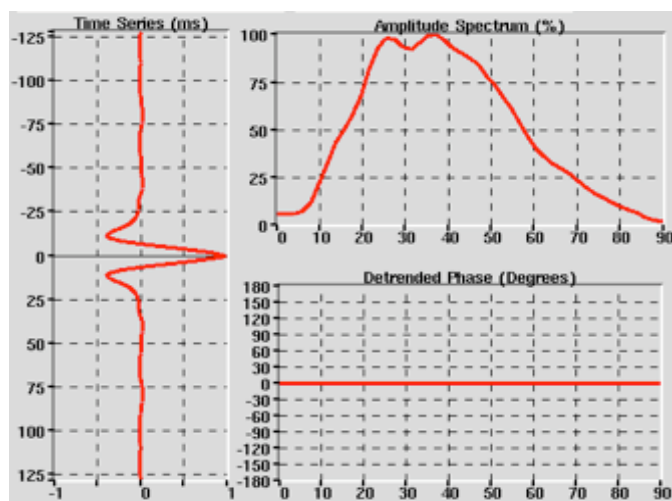


Figura 4.5 Ondícula extraída de la sísmica para el pozo P1. Se observa en el espectro de amplitud una ondícula con una forma bastante irregular, sugiriendo un contenido de ruido dentro de la misma, los valores máximos de amplitud corresponden a unas frecuencias de 27 Hz y 37 Hz .

En los pozos P2 y P7 se usó la combinación de dos ondículas extraídas de la sísmica, fue necesario ya que en las trazas cercanas al pozo, existían variaciones verticales de frecuencia. El pozo P2 presentó un decaimiento considerable de las frecuencias de tope (más somero) a base (más profundo); mientras que el pozo P7 presenta una zona intermedia de altas frecuencias, por lo tanto en este par de pozos una sola ondícula no satisface a toda la secuencia vertical de las trazas cercanas a los mismos, es por esto que es necesario un sintético que nos permita amarrar bien los objetivos a calibrar (topes geológicos). El procedimiento consiste en la extracción de ondículas en una determinada ventana de tiempo (ms) sobre los datos sísmicos, dicha ventana también representa la longitud de acción de la ondícula extraída. Para el pozo P2 la primera extracción fue realizada en una ventana de 700 ms entre 1100 ms - 1450 ms donde presentó una frecuencia dominante de 30 Hz y otra ventana de 500 ms entre 1452 ms - 2000 ms con una frecuencia dominante de 40 Hz . La combinación de estas dos ondículas da como resultado una final, que para P2 no necesitó ajuste en tiempo (shift). Se aplicó el mismo procedimiento en el pozo P7, agregando un intervalo más, en total se usaron tres ventanas de tiempo y tres cambios de ondículas, el ajuste fue muy bueno y tampoco necesitó desplazamiento en tiempo.

Para los pozos P6, P8 y P9 se generaron los sintéticos con ondículas teóricas tipo trapezoidal y Ricker, donde los rangos de frecuencias dominantes están entre 8 Hz

-18 Hz 40 Hz-60 Hz . Con un rango de desplazamientos en tiempo de 10 ms a 25 ms .

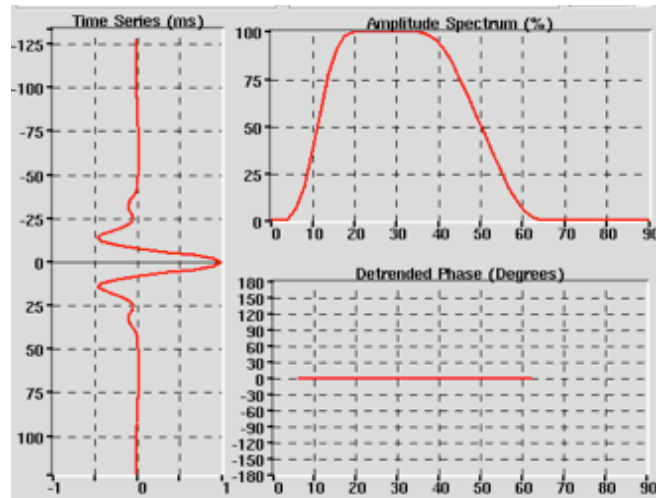


Figura 4.6 Ondícula teórica del tipo trapezoidal para el P6. Se observan en el espectro de amplitud valores de máximos en un rango de 20 Hz a 40 Hz de frecuencia. Se presenta una ondícula fase cero lineal.

Posteriormente los 9 sintéticos generados a partir del mejor ajuste de las ondículas calculadas, fueron comparados sobre la trazas sísmicas con el diagrama de correlación, en donde se observó si necesitaba o no un desplazamiento en tiempo (shift) que permitiera tener un mayor ajuste de los reflectores sísmicos con los topes geológicos desplegados (Oficina, Bur 4, Bur 3, Aq 1 y Basamento) en los sintéticos. Se considera una mejor correlación de las señales en la medida que la máxima amplitud de la señal coincida con el punto más alto de la envolvente de la misma, también indica si es necesario revertir la polaridad de la señal para que ésta pueda ajustarse mejor a los datos sísmicos.

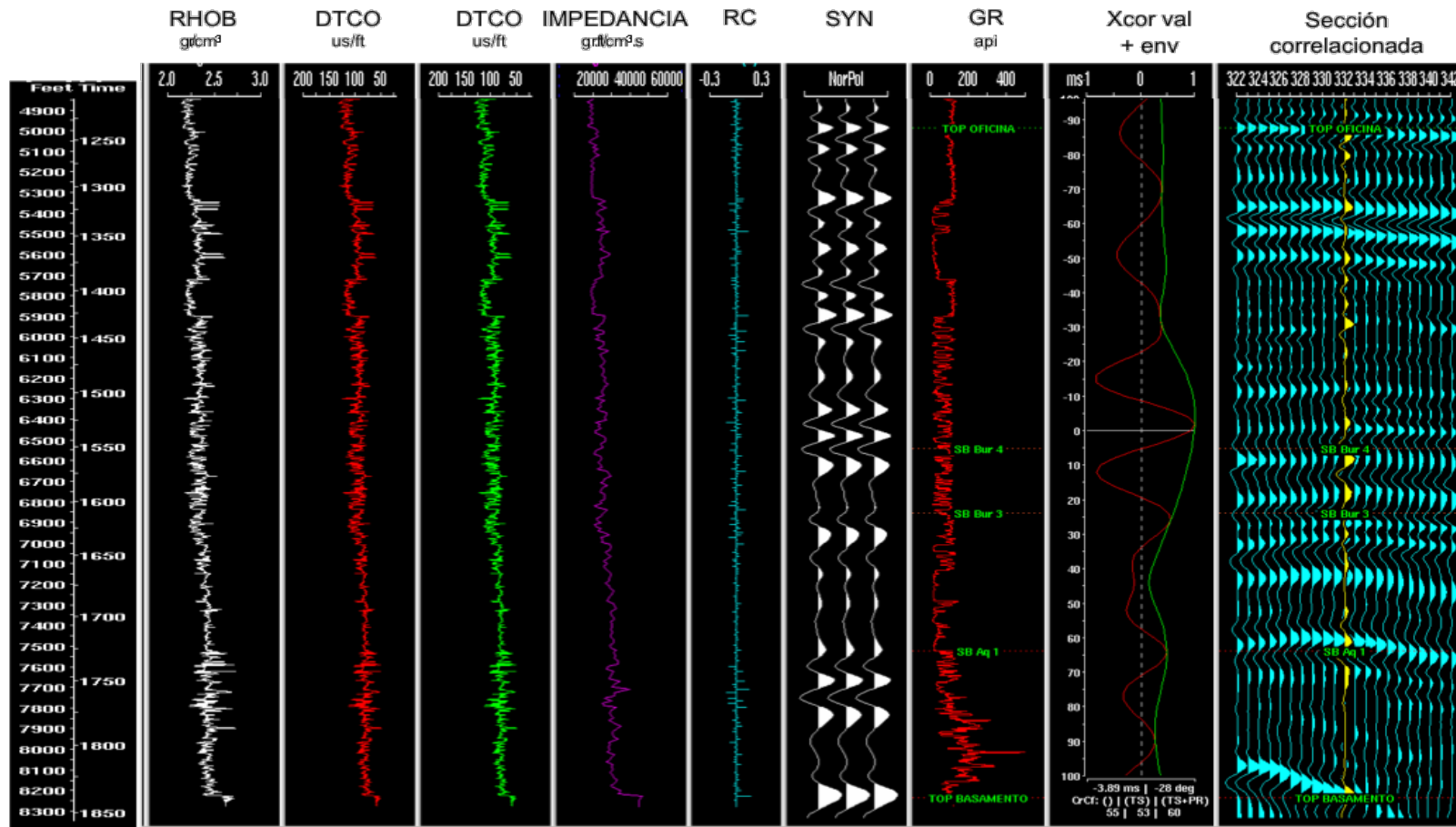


Figura 4.7 Sintético del P6 con ondícula teórica tipo trapezoidal y los registros de pozo de izquierda a derecha: densidad (RHOB), sónico (DT-rojo), registro sónico corregido por check shot (DT-verde), registro de impedancias acústicas, serie de reflectividad (RC), registro sintético (SYN), gamma ray (GR), el diagrama de correlación y la envolvente (Xcor+env), y la sección sísmica correlacionada con el sintético. En verde se indican los topes: Oficina, Bur 4, Bur 3, Aq 1 y Basamento.

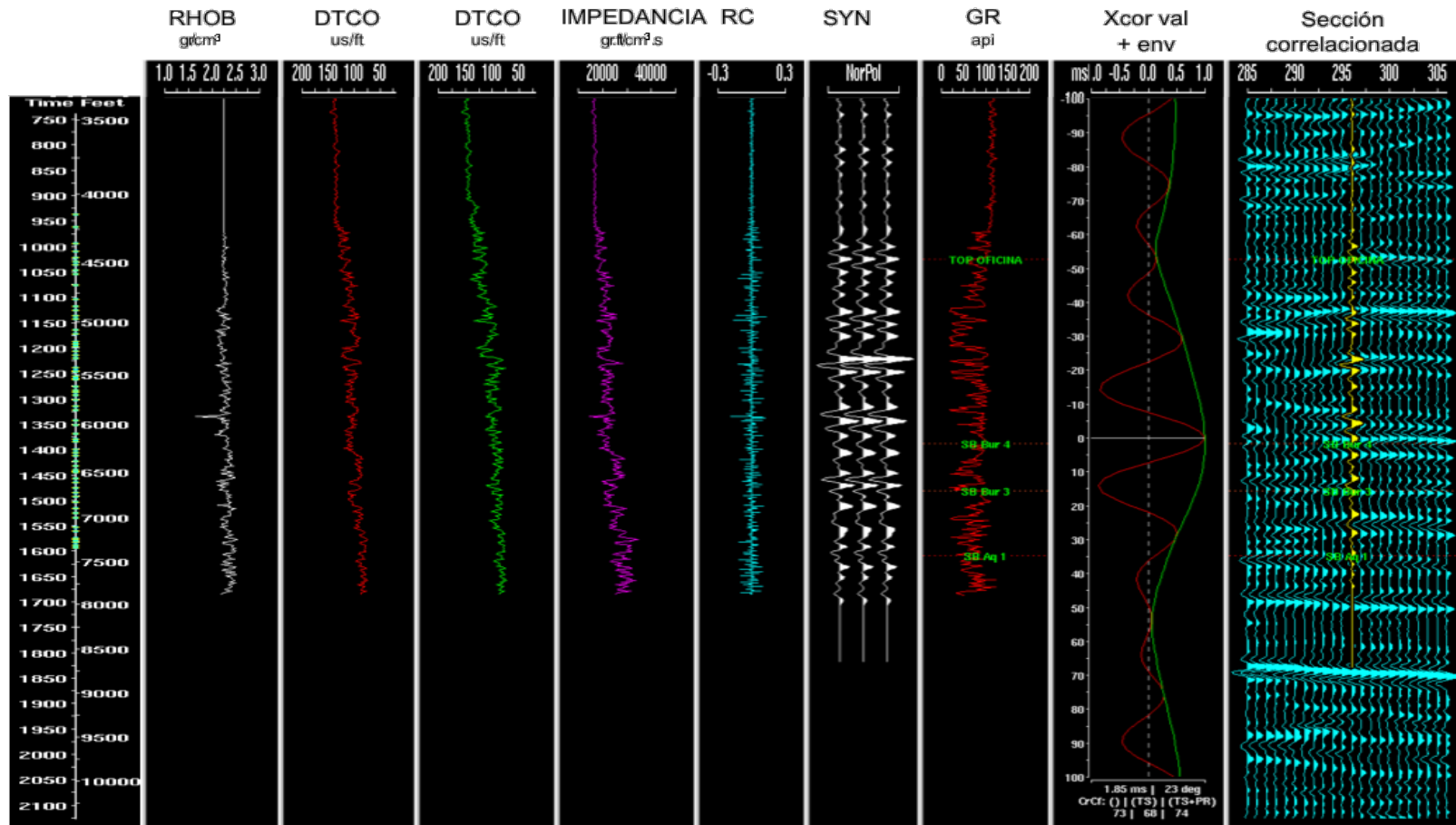


Figura 4.8 Sintético del P8 con ondícula teórica tipo trapezoidal y los registros de pozo de izquierda a derecha: densidad (RHOB), sísmico (DT-rojo), registro sísmico corregido por check shot (DT-verde), registro de impedancias acústicas, serie de reflectividad (RC), registro sintético (SYN), gamma ray (GR), el diagrama de correlación y la envolvente (Xcor+env), y la sección sísmica correlacionada con el sintético. En verde se indican los topes: Oficina, Bur 4, Bur 3 y Aq 1.

Tabla 1.4 Pozos con sus respectivas ondículas y parámetros de calibración.

Pozos	TIPO DE ONDÍCULA	FRECUENCIA DOMINANTE Hz	POLARIDAD	FASE	SHIFT Ms
P1	Extraídas de la sísmica	37	Normal	Cero	-8
P2	Combinación de dos ondículas extraídas de la sísmica	37	Normal	Cero	0
P3	Extraídas de la sísmica	35	Normal	Cero	-15
P4	Extraídas de la sísmica	35	Normal	Cero	-19
P5	Extraídas de la sísmica		Normal		-24
P6	Teóricas tipo trapezoidal	8-18-40-60	Normal	Cero	16
P7	Combinación de dos ondículas extraídas de la sísmica	30	Normal	Cero	0
P8	Teóricas tipo trapezoidal	8-20-40-60	Normal	Cero	-12
P9	Teóricas tipo Ricker	35	Normal	Mínima	-16

En la tabla anterior se observa como la mayoría de las ondículas usadas provienen de la extracción de la sísmica, esta decisión incrementa el nivel de confiabilidad de la calibración y la interpretación. En la mayoría de los casos se cuenta con ondículas fase cero, y para el P9 una ondícula Ricker fase mínima, las primeras son simétricas y su pico está ubicado en cero, son generadas en su mayoría por ondículas vibro sísmicas, mientras que las ondículas de fase mínima son asimetrías y se generan en su mayoría por explosivos, teniendo en cuenta que en la adquisición se usaron fuentes impulsivas y señales codificadas. En el caso del pozo P6 y P8 se ajustó el sintético mediante una ondícula teórica pero del tipo trapezoidal que matemáticamente es muy parecida a la forma de una Ricker.

4.2.2 Resolución sísmica vertical

Se refiere a la capacidad de distinguir dos eventos sísmicos cercanos que representan niveles de profundidad diferentes. La resolución vertical considera el espesor mínimo de una capa para que se puedan reconocer las reflexiones de su tope y su base.

Ésta depende de varios factores, tales como: ancho de banda, frecuencia principal, la fase y la amplitud. Para ello, es necesario calcular la velocidad en el intervalo de interés y su frecuencia dominante.

Se calculó la resolución sísmica vertical para los intervalos Oficina, Bur 4-Bur 3 y Aq 1, se definieron ventanas de tiempo para cada intervalo y con la aplicación *post-stack* de *OpenWorks* se escogieron cuatro líneas del proyecto, que se encontraban cerca de pozos, sobre éstas se calcularon los espectros de fase, amplitud y la frecuencia dominante para los distintos intervalos.

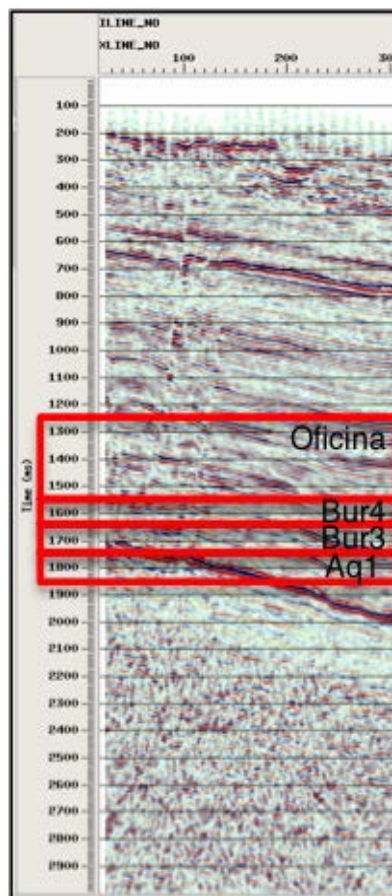


Figura 4.9 Sección con los intervalos Oficina, Bur 4-Bur 3 y Aq 1.

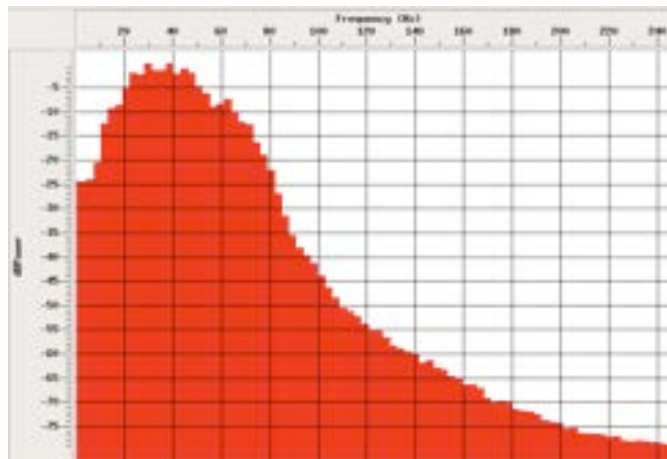


Figura 4.10 Panel de una línea en los intervalos 1250 ms-1560 ms correspondiente al intervalo Oficina. Presenta una frecuencia dominante de 35 Hz .

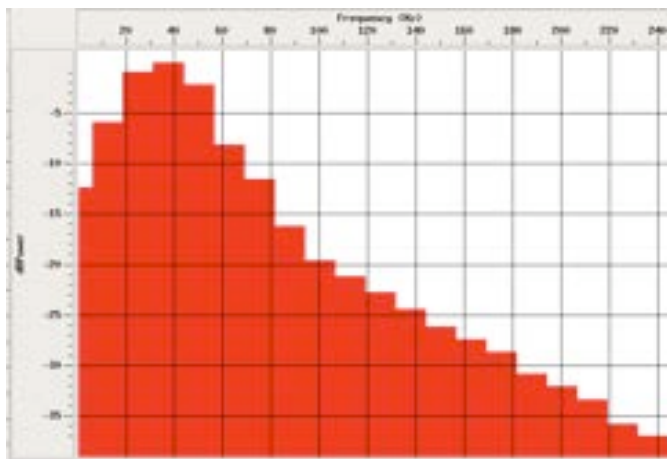


Figura 4.11 Panel de una línea en los intervalos 1560 ms-1640 ms correspondiente al intervalo Bur 4-Bur 3. Presenta una frecuencia dominante de 40 Hz .

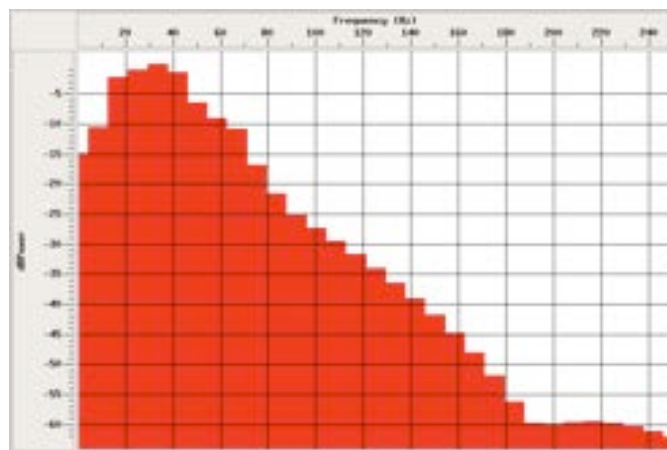


Figura 4.12 Panel de una línea en los intervalos 1640 ms-1843 ms correspondiente al intervalo Aq 1. Presenta una frecuencia dominante de 35 Hz .

Las velocidades intervállicas fueron calculadas a partir del registro sónico de los pozos P2, P4, P5 y P9.

La tabla 1.5 muestra los promedios de los valores calculados para las cuatro líneas representativas y sus pozos asociados, se observa como la resolución no presenta grandes variaciones.

$$R_{(resolución)} = \frac{V_{Int}}{f \times 4} \quad \text{Ec. 8}$$

f: Frecuencia
Vint: Velocidad intervállica.

Tabla 1.5 Resolución sísmica vertical a partir de velocidades intervállicas .

Pozos	INTERVALO (ms)	VELOCIDAD PROMEDIO (pies/s)	FRECUENCIA (Hz)	RESOLUCIÓN (ft)
Oficina	1250-1560	9939,47	35	70,99
Bur4 Bur3	1560-1640	10436,52	40	65,22
Aq1	1640-1843	12220,96	35	87,29

4.2.3 Interpretación de horizontes

La interpretación se llevó a cabo en la aplicación *Seisworks 3D* de *Landmark*, mediante los sismogramas sintéticos calculados a través de la calibración.

En la siguiente tabla se muestran los valores de amplitud del reflector interpretado para los 5 horizontes de interés.

Tabla 1.6 Horizontes interpretados con su respectivo valor de amplitud.

Topes	AMPLITUD
Oficina	Máximo
Bur 4	Máximo
Bur 3	Mínimo
Aq 1	Máximo
Basamento	Máximo

La interpretación de los horizontes se realizó con un mallado cada 10 líneas dirección norte-sur (inline), cada 10 trazas dirección este-oeste (crossline) y un mallado arbitrario de dos direcciones una NO-SE y otra NE-SO (figura 4.13).

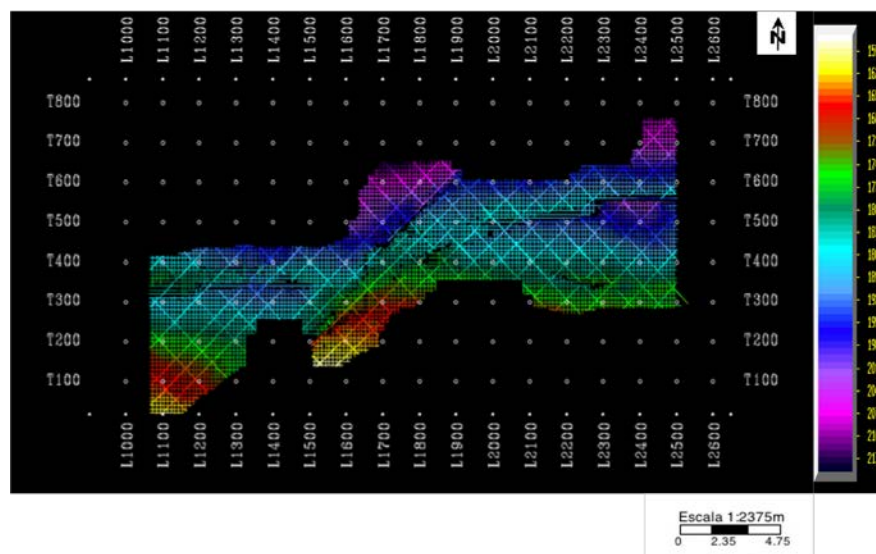


Figura 4.13 Mallado en tiempo del horizonte Aq 1, la escala muestra las variaciones en profundidad (ms) del intervalo los valores más brillantes (amarillo) corresponden a zonas someras y los valores más oscuros (morado) a zonas deprimidas.

Después de interpretados los horizontes según el mallado, se interpolaron usando la opción de *OpenWorks*: “ZAP!” en toda el área de estudio. El “ZAP!” es una opción de *Seiswork*, que permite interpolar y posteriormente suavizar todo el horizonte, la herramienta va rellendo con datos aquellas zonas en donde no se realizó interpretación manual, dando como resultado una imagen en tiempo, en la que se pueden distinguir zonas discontinuas (fallas), y que representa la profundización o somerización del horizonte a lo largo de toda el área en el dominio tiempo (figura 4.14).

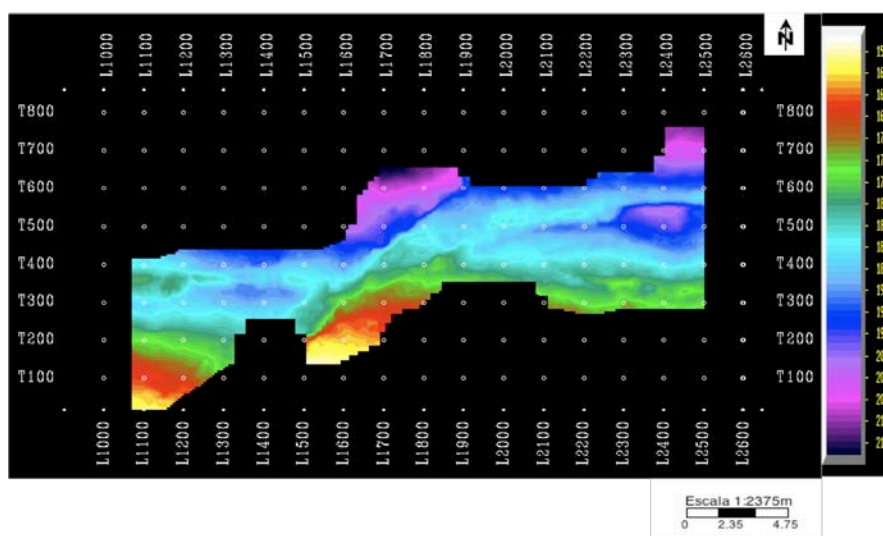


Figura 4.14 Mapa en tiempo del horizonte Aq 1 interpolado, la escala muestra las variaciones en profundidad (ms) del intervalo los valores más brillantes (amarillo) corresponden a zonas someras y los valores más oscuros (morado) a zonas deprimidas.

Por último se realizó un control de calidad a en las líneas sísmicas y de los mapas en tiempo, donde se observaron las tendencias de las isolíneas y se corrigieron aquellas zonas donde existían tendencias bruscas e incoherentes.

En esta etapa se reconocieron los principales patrones estructurales del área, para complementar la interpretación se generó un cubo de coherencia, esta herramienta sirvió para la identificar los sistemas principales de fallas del campo Oritupano-Leona.

4.3 GENERACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDADES

4.3.1 Modelo de velocidades

En esta etapa del trabajo se utilizó el programa *Gocad* versión 2.5.2 de *Paradigm*, en el cual se creó un proyecto donde fueron transferidos todos los datos anteriormente trabajados: horizontes, trayectorias de pozos, topes, curvas TZ y las velocidades intervállicas calculadas a partir de las TZ calibradas.

Inicialmente los pozos y topes geológicos cargados fueron transformados en el dominio tiempo, ya que originalmente se encontraban en el dominio de profundidad. Esta conversión se realiza con la finalidad de llevar todos los datos a un mismo dominio, ya que los horizontes fueron interpretados en tiempo. Se verificó que los topes en tiempo coincidieran con los horizontes interpretados (figura 4.15).

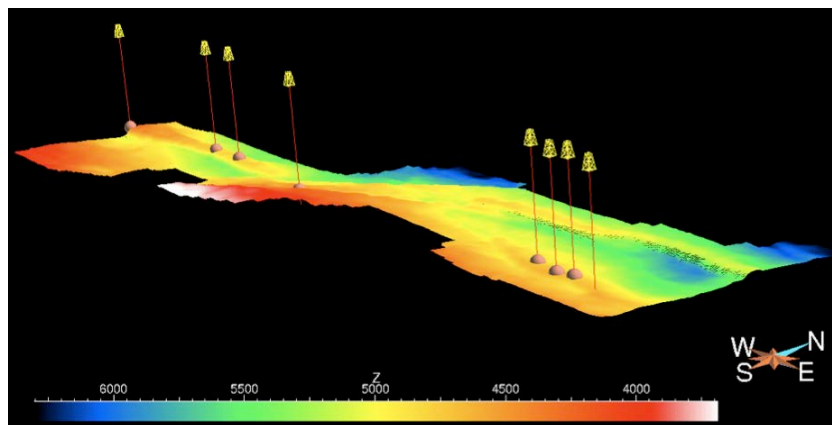


Figura 4.15 Pozos cargados en tiempo y calibrados con el horizonte Bur 3, la escala asocia los valores de profundidad en tiempo, de rojo-azul se incrementa proporcionalmente la profundidad.

A partir de los datos de las curvas TZ calibradas (Z: profundidad y TWT: tiempo doble de viaje), se construyeron curvas de velocidades promedios. Estas velocidades fueron desplegadas para visualizar la existencia de alguna inversión

de velocidades que pudiera afectar la propagación de las mismas (figura 4.16), también se realizó un control de la distribución de los datos a través de la visualización de las tablas, histogramas y gráficos que proporciona la aplicación.

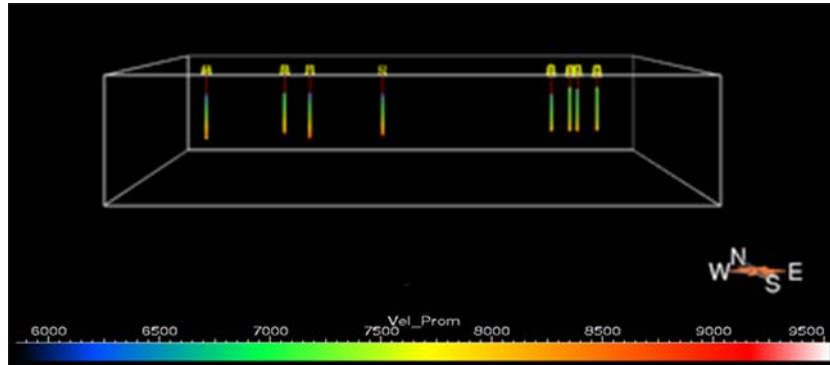


Figura 4.16 Pozos cargados con sus respectivas curvas de velocidad, la escala asocia los valores de velocidad promedio por pozo, de azul-rojo se incrementa proporcionalmente la velocidad.

Por último con la aplicación de interpolación *Multigrid*, se generó el modelo de velocidades que refleja las tendencias en los datos de pozos (dato duro) del área.

4.3.2 Conversión tiempo-profundidad

Obtenido el modelo de velocidades promedio, se procedió a realizar la conversión de tiempo (dominio en el cual son grabados los datos sísmicos) a profundidad (representaría la realidad de los datos).

Adicionalmente se generaron los distintos mapas de tiempo y profundidad correspondientes a cada uno de los horizontes interpretados.

4.4 CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES

Para esta última etapa se llevó toda la información del proyecto a *Stratimagic* de *Paradigm*. Es una herramienta nueva diseñada específicamente para el análisis de facies sísmicas. Se cargó el volumen sísmico 3D, los horizontes interpretados anteriormente y la lista de pozos. Los datos de entrada que requiere *Stratimagic* son el cubo sísmico y un intervalo de referencia.

4.4.1 Definición del intervalo para los mapas de facies

Para la creación del intervalo de estudio se utilizó la opción de visualización de secciones horizontales o horizon slices, en donde se extrajeron rebanadas para todos los horizontes interpretados. La sección en donde se observaron mayor cantidad de rasgos interesantes fue la generada a partir del horizonte Bur 4, para

una ventana en tiempo de 0 ms a 80 ms (figura 4.17). Esta herramienta proporcionó información de gran importancia al estudio, ya que permitió la detección y definición de cuatro geocuerpos estratigráficos con geometría asociada a canales, mientras que en la opción de sección horizontal en tiempo o time slice no fueron reconocibles dichos geocuerpos.

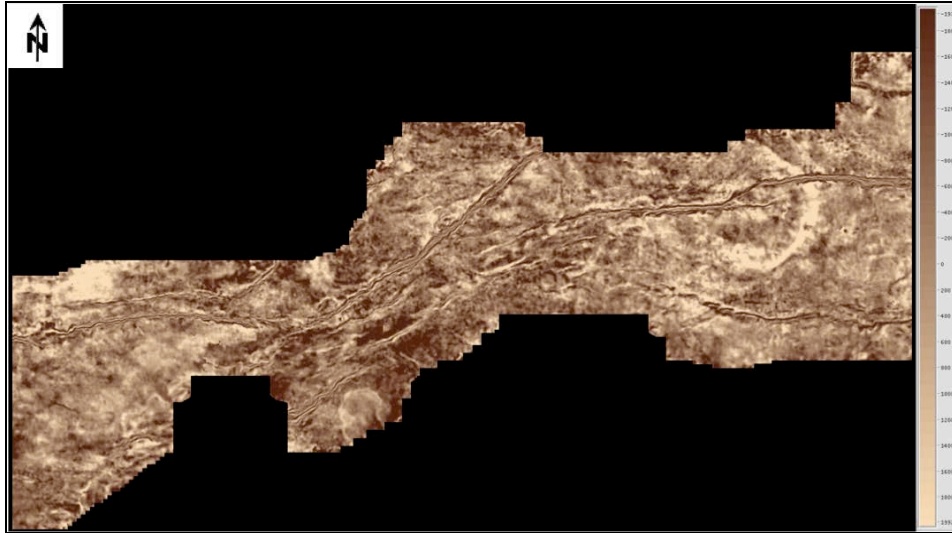


Figura 4.17 Sección horizontal o horizon slice a partir del horizonte Bur 4, la escala muestra las variaciones de amplitud, los valores asociados al color marrón oscuro representa amplitudes negativas y los valores asociados al color marrón claro amplitudes positivas.

El intervalo se generó con los horizontes Bur 4 como tope y Bur 3 para la base figura 4.18, que representa un espesor (no constante) de aproximadamente 100 ms, dicho intervalo fue escogido en base a los hallazgos de nuevas evidencias estratigráficas (canales) no reconocidas anteriormente en la unidad Oritupano-Leona.

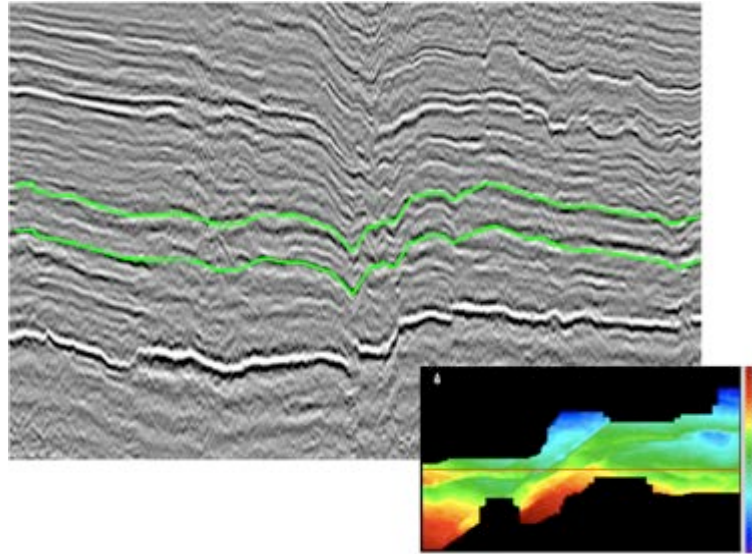


Figura 4.18 Sección sísmica crossline y mapa con el intervalo de los horizontes Bur 4 y Bur 3, la escala muestra las variaciones en profundidad (ms) del intervalo, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

Con el fin poder ofrecer más información sobre los geocuerpos encontrados a partir de las secciones o rebanadas del tope Bur 4, se crearon otros intervalos asociados a los cuatros canales reconocidos anteriormente.

Para la delimitación lateral se procedió a extraer a partir de la superficie del horizonte interpretado Bur 4 cortes de cuatro nuevas superficies (polígonos figura 4.19), que limitaron las zonas donde se encontraron los canales y otras cuatro que representaron directamente la geometría de los geocuerpos.

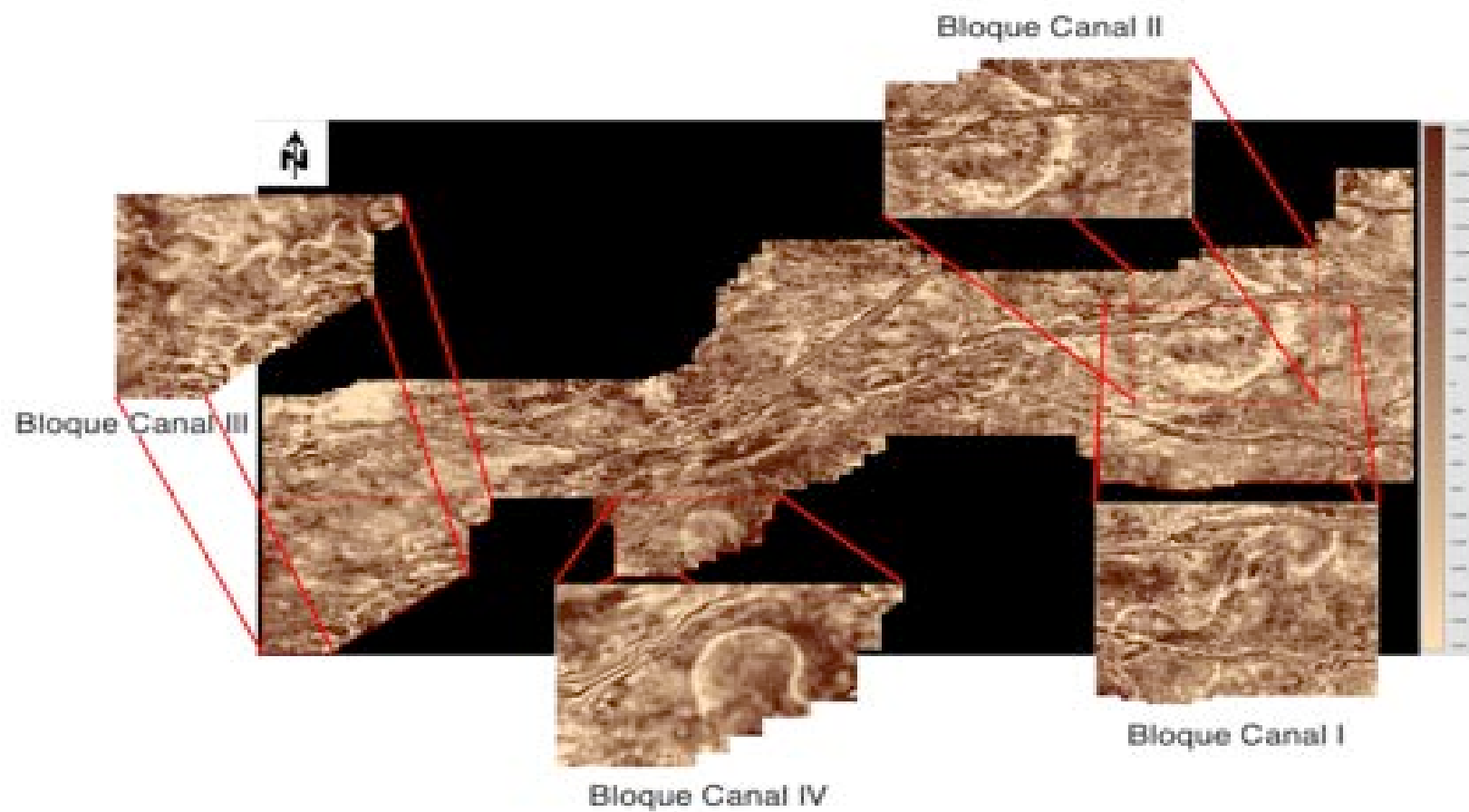


Figura 4.19 Sección horizontal o horizon slice de Bur 4 con los cuatro bloques que representan los geocuerpos encontrados, la escala muestra las variaciones de amplitud, los valores asociados al color marrón oscuro representa amplitudes negativas y los valores asociados al color marrón claro amplitudes positivas.

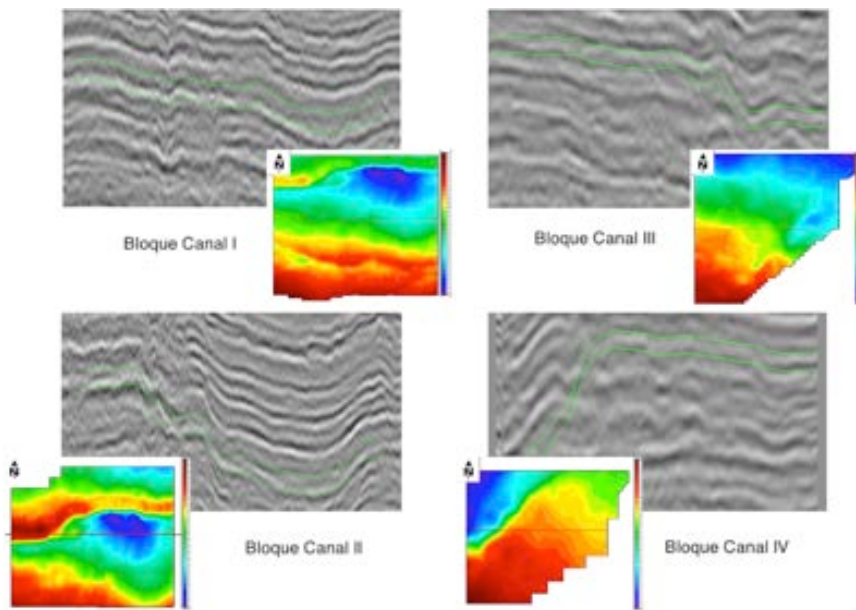
Las superficies (llamadas Canal I-II-III-IV) se generaron para ser comparadas con los bloques (I-II-III-IV) en las etapas de análisis de sismofacies y multiatributos, con el fin de tener una mejor ubicación espacial de los canales.

Posteriormente se establecieron los límites verticales donde estos canales son reconocibles, los canales se encuentran en diferentes niveles de profundidad en tiempo (ms) dentro de la sección Bur 4 y Bur 3 por esto se utilizó el horizonte Bur 4 como dato de referencia y tope de los intervalos. Para las ocho secciones se establecieron ventanas en tiempo de 20 ms que representan los espesores de los intervalos antes mencionados (tabla 1.7). El aislamiento de los canales se realizó con el fin de disminuir el ruido y la redundancia de datos presentes en el volumen sísmico.

Tabla 1.7 Polígonos de facies con su correspondiente valor para tope y base.

POLIGONOS	BASE	TOPE
Bloque y canal_I	38 ms	58 ms
Bloque y canal_II	36 ms	66 ms
Bloque y canal_III	40 ms	60 ms
Bloque y canal_IV	38 ms	58 ms

Las figura 4.20 y figura 4.21 representan los bloques y canales con los intervalos establecidos en la tabla anterior.



4.20 Sección sísmicas crossline con los intervalos de 20 ms (líneas verdes) y cortes de los polígonos: bloques I-II-III-IV, las escalas muestran las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

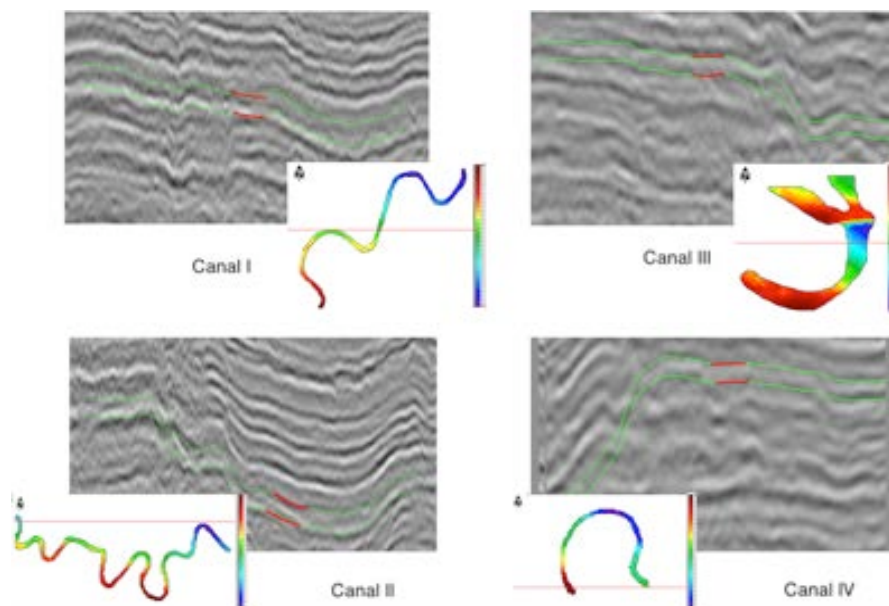


Figura 4.21 Sección sísmicas crossline con los intervalos de 20 ms (líneas verdes y rojas) de los cortes de los polígonos: bloques I-II-III-IV y sus derivados cortes de geometrías de los geocuerpos Canal I-II-III-IV, las escalas muestran las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

4.4.2 Análisis de mapas de facies sísmicas

Los mapas de facies sísmicas se generaron con la aplicación facies de *Stratimagic*. Un mapa de facies sísmica contiene el resultado de un proceso clasificación de facies basada en el reconocimiento de patrones de trazas sísmicas dentro de un intervalo de un volumen sísmico.

Adicionalmente al cubo sísmico y el intervalo de interés, el programa requiere la selección de un número de clases. El conjunto de clases o neuronas representa el número en la cual serán clasificados los diferentes patrones de las trazas sísmicas. En este estudio se realizaron una serie de pruebas donde se variaron los valores de las clases, se comenzó con 6 clases y se fue incrementando uno a uno hasta llegar a 11 clases, se observó que los cambios a partir de 10 clases no fueron significativos y los mapas contenían información redundante. En el módulo de *Facies* existen dos variables que pueden variarse, una es el número de iteraciones, que determina la frecuencia con que la red neuronal mejorará los procedimientos de clasificación de los datos en el conjunto de entrenamiento, el número de iteraciones afecta el tiempo requerido para el procesamiento, más iteraciones dan un resultado más fino va desde 1 hasta 100; y la segunda variable es el muestreo que se genera traza a traza y que van de 1:1 hasta 50:50 , los parámetros usados en cada una de las pruebas se realizaron con iteraciones: 100 y muestreo 1:1, ya que se intenta identificar eventos discretos tales como las características de los canales.

El análisis de los mapas se basó en la búsqueda de anomalías sísmicas que pueden ser asociadas con heterogeneidades litológicas (areniscas vs lutitas) o estratigráficas. Luego cada mapa fue comparado con la información de producción de los pozos, con el objetivo de establecer relaciones entre los pozos del área y las distintas clases, con el fin de asociar zonas probadas (dato duro) con zonas con poca información disponible.

4.4.3 Control de calidad

Para cada mapa de facies sísmicas se crea una paleta de colores que representa el número de clases o de neuronas con su respectivo patrón de traza asociado, las variaciones de los colores o neuronas de dicha paleta posee una representación

gráfica, una curva acumulativa que nos muestra de manera cualitativa el grado de similitud o variabilidad entre las neuronas (figura 4.22).

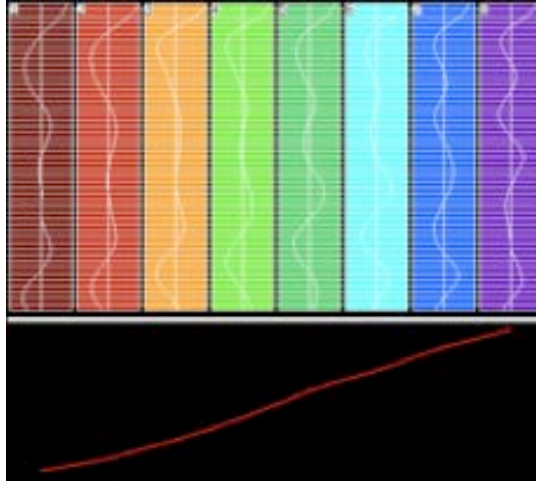


Figura 4.22 Neuronas y curva acumulativa generada de la clasificación de 8 clases.

El programa también genera un mapa de correlación, que representa la efectividad de la minimización de diferencias con los grupos predefinidos para la clasificación de los patrones de trazas sísmicas (figura 4.23).

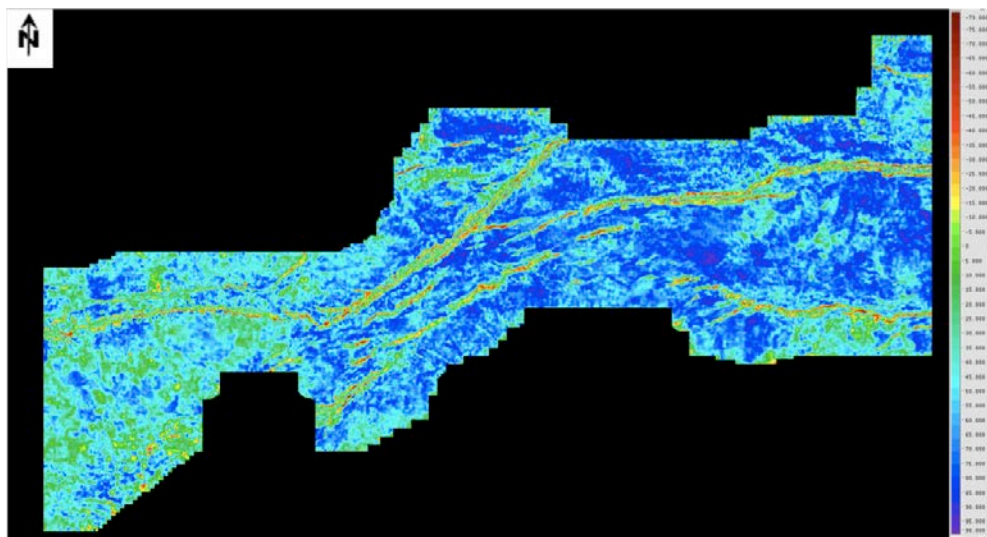


Figura 4.23 Mapa de correlación, donde los valores oscuros indican mayor correlación y los tonos más brillantes (verde y rojo) menor correlación.

Stratimagic ofrece dos métodos para aplicar la clasificación de facies sísmicas:

4.4.4 *Análisis de facies sísmicas no supervisado*

En donde el método *no supervisado* tiene como objetivo la detección de patrones de trazas sísmicas con características similares que son clasificadas en conjuntos de clases. En las clasificaciones no supervisadas, el número de clases debe ser especificado por el usuario.

4.4.5 *Análisis de facies sísmicas supervisadas*

Por su parte el método supervisado evalúa la relación de los datos con una traza predefinida, extraída directamente del pozo o ubicada cerca de localizaciones de pozos, donde se conozcan las características de producción del mismo.

Basado en la clasificación determinada con el método no supervisado el programa permite actualizar la clasificación pero ahora con una traza de entrada. Dicha traza que llamaremos “traza modelo” es asignada a una neurona, automáticamente se modifican las demás neuronas y es cuando se procede a realizar de nuevo el proceso de clasificación.

Nuevamente, el objetivo es la clasificación de facies, la variante recae en que el programa reconocerá y agrupará en una neurona solo aquellas trazas semejantes a la “traza modelo”.

Es posible observar la diferencia acumulada que posee la “traza modelo” con respecto a las demás trazas sísmicas ya clasificadas mediante una curva adicional, esta curva comparativa (curva de color verde), se presenta en el mismo panel de la curva acumulativa (figura 4.24).

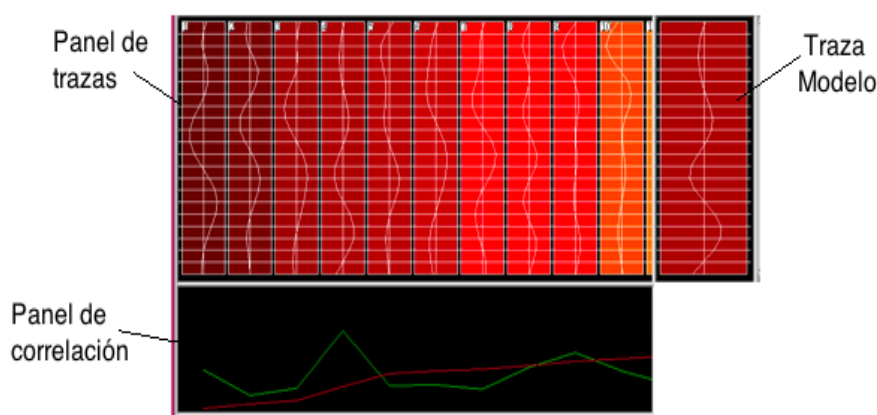


Figura 4.24 Neuronas, curva acumulativa (curva roja) y curva comparativa (curva verde) para la traza modelo.

4.5 ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS

4.5.1 Cálculo de atributos sísmicos

A partir de un volumen de amplitud sísmica, apilado y migrado en tiempo se extrajeron subgrupos de datos que representan alguna cualidad o comportamiento en particular del volumen sísmico. Se generaron 7 cubos de distintos atributos sísmicos por medio del programa *Stratimagic* de *Paradigm*. Las categorías de los atributos calculados fueron:

Atributos de la traza compleja:

- | | |
|---------------------------|------------------------|
| • Envoltente de la señal. | • Frecuencia RMS. |
| • Fase instantánea. | • Impedancia acústica. |
| • Frecuencia instantánea. | |
| • Frecuencia dominante. | |

Atributos de discontinuidad:

- Discontinuidad.

El programa ofrece la opción de integración de los datos de los atributos en conjuntos, que permitan resaltar las propiedades de las zonas de interés minimizando la información redundante.

4.5.2 Definición del intervalo para los bloques sísmicos

Previo al análisis de atributos es necesario establecer el intervalo de referencia en donde se enfocarán los procedimientos posteriores. *SeisFacies* de *Stratimagic* ofrece la oportunidad de realizar un análisis sobre muestras en mapas o bloques sísmicos. En esta aplicación se consideraron las 4 secciones calculadas

anteriormente (bloques I-II-III-IV) y sus correspondientes espesores en tiempo (ms) (tabla 1.7), como nuevos bloques sísmicos que serán usados como dato de entrada para el análisis de multi-atributos.

4.5.3 Análisis multi-atributos

La clasificación de múlti-atributos se realizó con *SeisFacies*, usando la influencia de los distintos volúmenes de atributos sísmicos, dentro de los intervalos para cada canal.

El análisis de bloques se realiza en un espacio tridimensional (x,y,t) de variación, cuyo resultado es otro espacio tridimensional de puntos en el espacio, (figura 4.25).

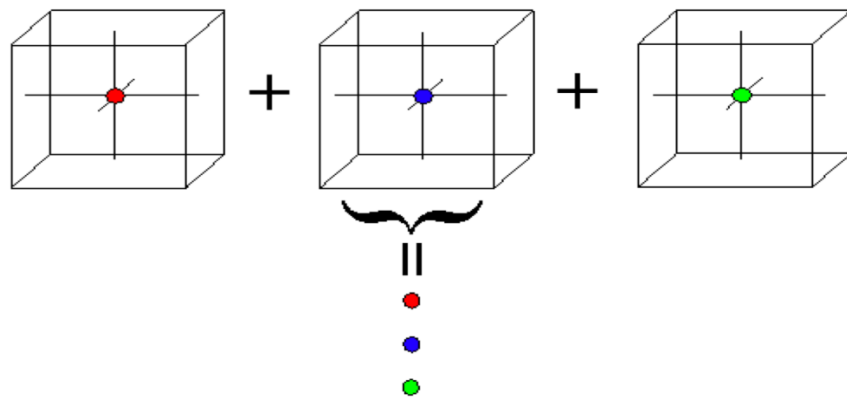


Figura 4.25 Multi bloques 3D. Tomado del manual de *Stratimagic*.

La integración de la información apartada por el conjunto de atributos se realizó con el uso de dos técnicas de análisis de datos: análisis de componente principal (ACP) y los métodos jerárquicos.

Análisis ACP

El análisis de componentes principales se usó con el fin de comparar el conjunto de atributos entre si y a la vez obtener uno o varios vectores que representen la tendencia principal del conjunto de datos. Para el caso del análisis multi-atributos el programa creará tantas componentes como atributos se tengan.

Una vez aplicada la técnica, se generó un gráfico para observar la cantidad de información que posee cada atributo con respecto al total. El gráfico (figura 4.26) asigna al eje “y” los valores propios o autovalores (eigenvalues) y en el eje “x” las

componentes. Cuando el valor propio es menor a 1, la componente ya no es representativa de la información contenida y puede descartarse ya que constituirían una fuente de ruido para los datos, más que una ayuda en el análisis.

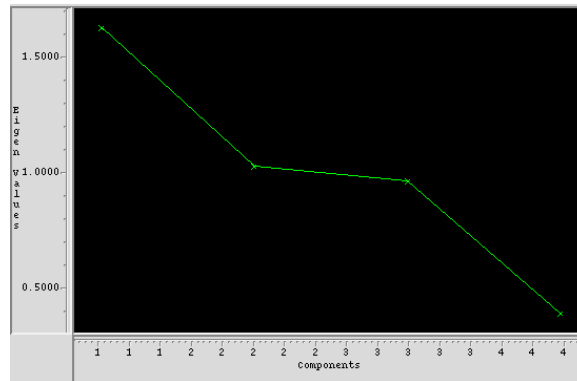


Figura 4.26 Gráfico de análisis ACP, el punto de flexión en un punto de corte y representa el límite de las componentes que deben usarse, para este caso 2 componentes.

Gracias a este análisis se puede introducir el número de componentes que se utilizará para la proyección con el método jerárquico.

Este gráfico también posee una representación numérica, donde están representados los valores propios, contribuciones individuales y acumuladas. La figura 4.27 muestra un ejemplo donde los primeros 4 componentes que poseen valores propios mayores a 1, representan el 69% de contribución del conjunto de datos global.

EigenValues and Cumulated Inertia				
		eigenvalues	contributions	cumulated
1	component-1	1.871403	23.392535	23.392535
2	component-2	1.485742	18.571773	41.964309
3	component-3	1.146232	14.327904	56.292213
4	component-4	1.079014	13.487673	69.779886
5	component-5	0.879996	10.999954	80.779840
6	component-6	0.643607	8.045089	88.824928
7	component-7	0.583570	7.294631	96.119559
8	component-8	0.310435	3.880441	100.000000

Figura 4.27 Tabla de análisis ACP, muestra los valores propios, las contribuciones individuales y acumuladas con respecto a todas las muestras.

Agrupamiento de atributos

Es una técnica multi-atributo cuya metodología de clasificación jerárquica realiza una agrupación de un conjunto de atributos de entrada. Es una técnica en

crecimiento, está desempeñando un papel vital en los flujos de trabajo de interpretación dentro la industria.

El procedimiento requiere de ciertos parámetros:

1. La determinación de un número de clases y componentes principales:

representa la variación de las características para cada atributo en el espacio, cada clase relacionada a un color, trata de describir su asociación a cada punto en el espacio (x,y,t). Para la determinación de este número no hay una regla fija, y fue necesario probar diferentes clases para ver el efecto de cada cálculo en el bloque final. En el manual de *Stratimagic* se sugiere trabajar con un número de clases que sea menor al doble del número de muestras del intervalo, y se recomienda tener en cuenta que el aumento del número de clases será difícil de manejar a nivel de interpretación.

El rango de clases probados fue desde 4 a 12, en donde la clase escogida para cada bloque representa coherentemente la división entre grupos, disminuyendo la dispersión y el solapamiento entre las clases o grupos.

El promedio de las componentes utilizadas en la clasificación por bloque, fue de 2 componentes, estimadas a partir del análisis de ACP.

2. El parámetro de discriminación:

Corresponden a los valores de los atributos basados en el cálculo de la distancia euclídea. Se utiliza para generar las secciones de los bloques.

3. Los valores de muestreo:

El tamaño del conjunto de entrenamiento es controlado por la relación de muestreo (como en el neuronal).

El control de calidad de los datos se hace utilizando un visor de gráficos cruzados que representan la distribución de las clases con respecto a los atributos (figura 4.28).

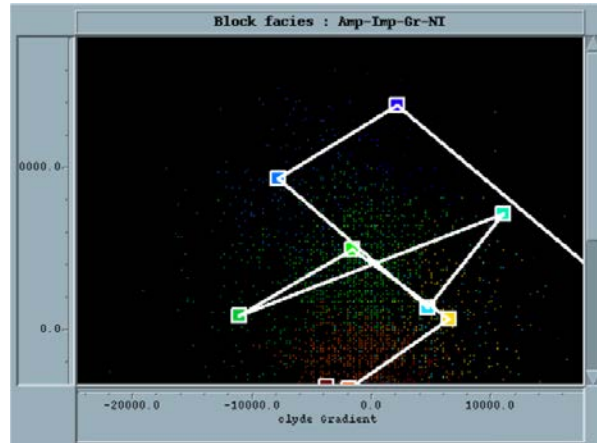


Figura 4.28 Gráfico cruzado que muestra la distribución de grupos entre dos atributos, definidos por sus centros de gravedad, los colores representan las distintas clases escogidas.

Al final se pueden observar los resultados de la clasificación, arrastrando e incorporando sobre una sección sísmica distintas secciones de los bloques de atributos con la clasificación establecida (figura 4.29).

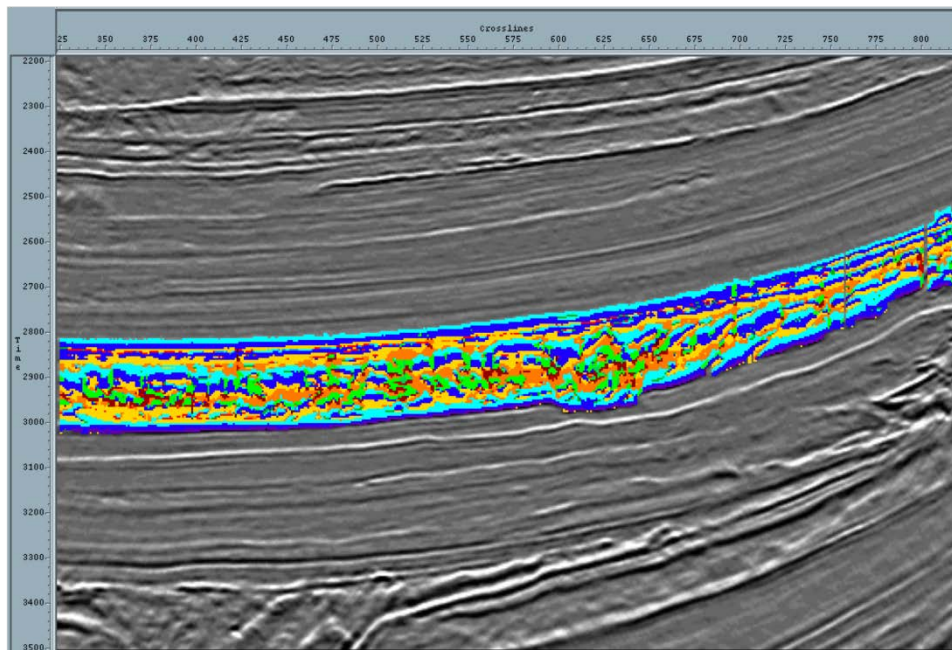


Figura 4.29 Sección de un bloque de atributos incorporado en un inline del volumen original, los colores dentro de la sección del bloque corresponden al número de clases determinado por el usuario.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 INTERPRETACIÓN SÍSMICA Y RECONOCIMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Una vez reconocidos los patrones de interés correlacionables con los 9 pozos, se procedió a identificar la continuidad de las secuencias en las secciones sísmicas, durante este proceso también se reconocieron elementos estructurales. Con el fin de realizar un análisis coherente de la interpretación sísmica, es necesario realizar una revisión de los principales rasgos estructurales que son influyentes en el área del estudio.

Desde el punto de vista tectónico, el área de estudio se enmarca al norte de la placa Sudamericana y dentro de la cuenca Oriental de Venezuela. El bloque Oritupano-Leona se ubica en una posición intermedia en el flanco sur de la cuenca Oriental, subcuenca de Maturín. El flanco sur de la cuenca Oriental de Venezuela representa una provincia tectónica extensional, con fallamiento normal asociado, buza ligeramente al norte-noreste y lo limita, al norte, el cinturón plegado de la serranía del Interior. Constituye la zona de plataforma del *foreland* (*foredeep*) identificado en la cuenca (Parnaud et al., 1995), sobre esta plataforma se ubica el área de estudio.

En Oritupano-Leona se reconocen dos eventos distensivos principales; el primero de ellos involucra al basamento y a los sedimentos depositados a principios del Mioceno inferior. El segundo, que afecta a los sedimentos del Mioceno (formaciones. Merecure, Oficina y Freites) y Plioceno (formación Las Piedras) y que, generalmente involucra al basamento, es el más importante ya que durante su desarrollo se crearon las principales trampas para los hidrocarburos. Este segundo evento distensivo consiste de tres sistemas principales de fallas normales y pliegues asociados (figura 5.1):

En el área, se han diferenciado tres sistemas principales de fallas, las cuales persiguen una orientación preferencial *NE-SO*, *NO-SE* y *O-E* (Hedberg, 1950) (figura 5.1).

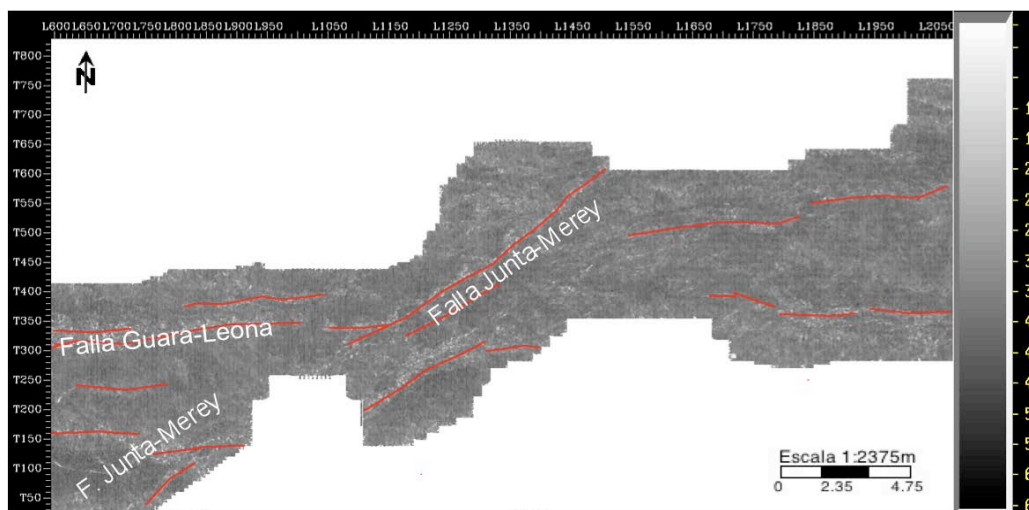


Figura 5.1 Cubo de coherencia que muestra los sistemas principales de fallas del campo Oritupano-Leona, las líneas rojas están sobre zonas de baja coherencia (valores más claros), debido a la discontinuidad de los reflectores causadas por la presencia de fallas.

El sistema de fallas *NE-SO* es paralelo al eje (*hinge*) sur de la cuenca y refleja el levantamiento flexural del basamento, mientras que el sistema *NO-SE* es el esfuerzo extensional resultante del movimiento de rumbo dextral, a lo largo del límite de las placas del Caribe y Sudamérica (James, 1990). Hasta ahora todos los sistemas controlan el entrapamiento de hidrocarburos. El bloque se localiza entre dos grandes fallas sintéticas de rumbo *NE-SO*, entre las fallas de Guara-Leona, al oeste, y la falla de Junta-Merey al centro. Las fallas pueden ser antitéticas o sintéticas respecto a la pendiente o buzamiento regional. El sistema de fallas *NE-SO* presenta buzamiento sintético, con planos buzantes al noroeste. En general, corresponden a lineamientos regionales, son de carácter sinsedimentario y afectan casi toda la columna estratigráfica incluyendo el basamento. Su origen se postula como resultado del levantamiento flexural del basamento durante el Oligoceno-Mioceno, cuando la cuenca se desplazó del oeste al este (Erlich y Barrett, 1992). Las fallas de Guara-Leona y Junta-Merey corresponden a este sistema.

La falla Junta-Merey cruza diagonalmente la unidad Oritupano-Leona. Es un sistema de fallas segmentada en dos partes paralelas y superpuestas, en *relay*. La zona de superposición entre ambos segmentos está afectada por fallamiento normal masivo y desarrollo de pliegues transversales. Sus desplazamientos pueden en algunos casos alcanzar los 1400 pies. Estuvieron activas durante el Mioceno superior-medio y particularmente durante el Plioceno, donde se registra

la máxima deformación y desplazamiento (figura 5.2).

La falla de Guara-Leona alcanza una extensión superior a los 40 km . Su salto disminuye de sur a norte y es interceptada por una compleja serie de fallas oblicuas de rumbo y buzamiento variable (figura 5.3).

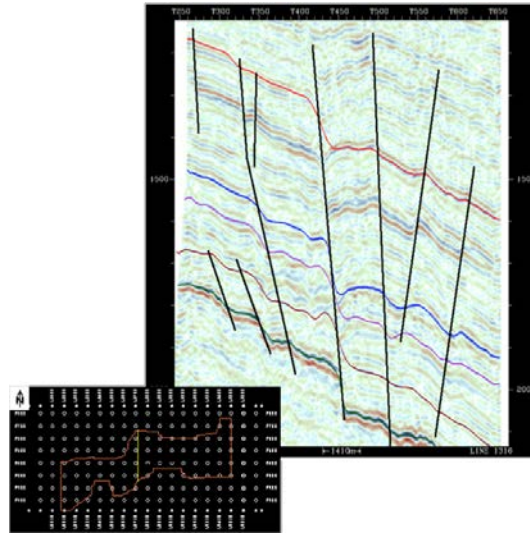


Figura 5.2 Sección sísmica interpretada, que corresponde al área central del bloque donde se evidencia un conjunto de fallas normales asociadas al sistema principal de fallas NO-SE Junta-Merey.

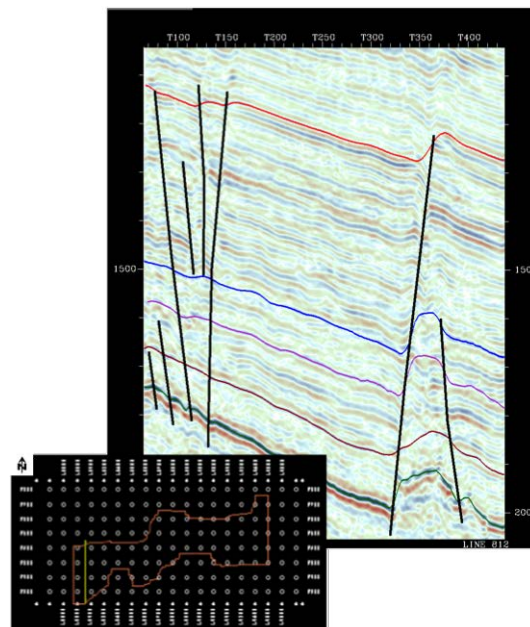


Figura 5.3 Sección sísmica interpretada, que corresponde al área occidental del bloque donde se evidencia un conjunto de fallas normales asociadas al sistema principal de fallas NO-SE Guara-Leona.

El sistema de fallas *NO-SE* puede indistintamente buzarse al norte o sur. Es el de menor magnitud de todos. Este sistema de fallas oblicuas puede derivarse de, o

truncar las fallas principales. Su origen se asocia a la reactivación de los esfuerzos de dirección sur del límite de placas o a relajación isostática de estos esfuerzos durante su migración al este (Erlich y Barrett, 1992). Las fallas pequeñas presentan patrones en *relay* (Munro, 1982).

El sistema de fallas de rumbo oeste-este presenta buzamiento antitético o sintético cuyo ángulo promedia los 45°. Su origen se postula como resultado del flexuramiento de la cuenca (Hedberg, 1950). Este sistema de fallas puede ser trazado a lo largo de grandes extensiones y es producto del crecimiento de fallas superpuestas conectadas a través de sistemas de rampas.

Los principales campos se encuentran alineados sobre el lado levantado del sistema de fallas.

Hacia el sector central, con la sísmica 3D, se ha interpretado la existencia de un sistema de fallas normales casi verticales, de desplazamiento entre 25 y 60 pies, buzamiento al norte, sintético y ligeramente paralelas a la falla principal, las cuales conjuntamente con ésta, conforman una estructura en *horst*, en la cual se ha comprobado la ocurrencia de hidrocarburos.

Otro elemento estructural de importancia lo representan pliegues asociados a las fallas normales, de naturaleza distensiva y ocurren en las secciones superior y media de la secuencia miocénica, son particularmente visibles en las áreas de Leona y son responsables de las acumulaciones de hidrocarburos de los campos en esta zona.

Se han identificado pliegues de arrastre longitudinales, tanto normales como inversos, pliegues combinados y complejos sistemas asociados a segmentación de fallas, zonas de transferencia y de *relay* (Porras, 2003).

Porras (2003) reconocen una franja discontinua y estrecha de pliegues de arrastre inversos, de más de 10 km de longitud, en el lado deprimido de la falla principal de Leona. Este sistema de pliegues, longitudinales y paralelos a la falla, ha proporcionado los elementos estructurales para la acumulación de hidrocarburos en el citado campo. Pliegues menores y sutiles deformaciones se han observado en zonas de superposición (*overlapping*) de fallas, en rampas y zonas de transferencia.

La interpretación sísmica de los horizontes corresponde con las unidades productoras de la formación Oficina (figura 5.4). Esta unidad se encuentra integrada por una alternancia de areniscas, limolitas, lutitas, arcilitas y capas de lignito, de edades comprendidas entre Mioceno inferior a medio. En el campo Oritupano-Leona, dicha formación Oficina representa la secuencia de mayor interés desde el punto de vista de prospección de hidrocarburos.

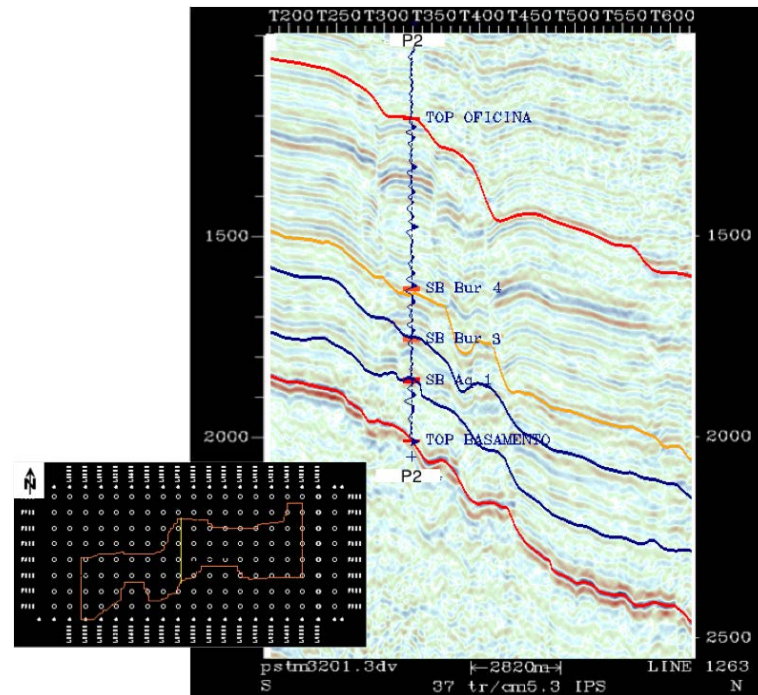


Figura 5.4 Sección sísmica inline con los horizontes interpretados en orden ascendente. Topes: Basamento, Aq 1, Bur 3, Bur 4 y Oficina, correlacionados a través del sintético del pozo P2.

Durante la interpretación se observó que la continuidad de los reflectores de las cinco secuencias presentan una configuración paralela a sub-paralela en la mayoría del área interpretada, también se presentó contrastes o desigualdades en los patrones de depositación; el paralelismo puede deberse a periodos de estabilidad en la depositación y las divergencias corresponden a un ambiente con fuerte influencia fluvial deltáica y ambientes marino someros. Estudios de correlación estratigráfica realizados en Oritupano-Leona, han confirmado que a pesar de los cambios de facies, los paquetes de arena son relativamente fáciles de correlacionar. Este carácter indica que, las múltiples parasecuencias de la formación Oficina se depositaron sobre una superficie de escasa pendiente extensamente afectada por un evento transgresivo mayor, con oscilaciones

menores de gran amplitud que reflejan un balance entre la tasa de sedimentación y la tasa de subsidencia.

En cuanto al contenido de amplitud y frecuencias de la sísmica, presentaron un comportamiento normal, el contenido de frecuencias para las secuencias más someras era bastante alto, alrededor de los 30 Hz y 40 Hz mientras que en zonas más profundas o cercanas a zonas de fallas los valores de frecuencias disminuyeron alrededor de 10 Hz a 15 Hz donde se registraron valores de frecuencia dominante entre los 20 Hz y 25 Hz aproximadamente. En general los horizontes seleccionados para ser interpretados presentaron amplitudes relativamente altas y bastante continuas lateralmente, siendo indicativo de contrastes litológicos asociados a variaciones de densidades y velocidades.

La complejidad en la interpretación estuvo asociada aquellas zonas donde diversos factores atenúan la señal sísmica, unos están relacionados con la ondícula (frecuencia, fase y amplitud) y otros a los factores geológicos (cercanía a zonas de fallas y tipo de litologías).

El tope **Basamento** del Pre-Cámbrico fue el reflector de mayor energía presente en la secuencia, a partir de este tope se amarraron los sintéticos en la etapa de calibración sísmica. La secuencia se definió en la interpretación como un reflector fuerte, profundo y continuo. Estudios previos de pozos indican la presencia de rocas ígneas de carácter básico.

La superficie **Aq 1** representa el límite entre el Oligoceno y Mioceno inferior, correspondiente a la formación Merecure, la misma está constituida por areniscas intercaladas con delgadas capas de lutitas. Contiene la sección comprendida entre las arenas U1 y las arenas K - L0. La falta de continuidad de los reflectores para este tope dificultó la correlación sísmica-pozo. El espesor de la secuencia crece hacia el oeste, lo cual pudiera estar vinculado al desarrollo de fallas sin sedimentarias como es el caso de las fallas de Guara y Junta-Merey. Para esta formación se interpreta un ambiente continental fluvial de alta energía que parece gradar a un ambiente transicional deltáico.

El tope **Bur 3** se limita por las superficies Bur 2 y Bur 3, en la base y tope, respectivamente, ambas de edad Burdigaliense. La secuencia se caracteriza por una depositación que se profundiza y avanza progresivamente hacia el norte y

noreste. Los depósitos asociados son relativamente más lutíticos, con predominio de depósitos transgresivos. El ambiente depositacional se interpreta entre transicional costa afuera a frente costero.

El tope **Bur 4** se limita en la base por el límite de secuencia Bur 3 y en el tope por el límite de secuencia Bur 4, de edades Burdigaliense. La secuencia muestra un progresivo aumento en el espesor en sentido este-oeste, su patrón de apilamiento ha sido interpretado como agradacional, especialmente hacia el centro del área. Hacia el oeste, la secuencia gana espesor, con una disminución en la cantidad de arenas y un mayor contenido lutítico. De acuerdo a estudios de núcleos, se identifican barras de marea y discretos canales de marea y distributarios, perfiles pedogénicos y lignitos dentro de la secuencia. Se han reconocido ambientes lacustrinos a lagunares muy localizados, con sus depósitos asociados de crevasse splay y paludales. Las arenas presentan estratificación planar o cruzada, bioturbación y pueden estar superpuestas presentando patrones de apilamientos variables, como corresponde en sistemas complejos de barras y canales de marea. Se ha determinado para la secuencia, ambientes depositacionales que varían entre frente costero inferior y transicional-costa afuera. Las secuencias **Bur 3** y **Bur 4** comprenden las arenas K-L0 a B.

Tope Oficina la superficie Tope Oficina marca el límite entre el Mioceno medio y el Mioceno superior y coincide con el contacto de la formación Freitas (base). La superficie interpretada muestra un aumento del espesor en el centro del área, que se incrementa progresivamente en dirección noreste, presumiblemente asociado al desarrollo de ambientes depositacionales más profundos. Giffuni *et al.*, (2000) refieren que el gran espesor observado al norte del área está relacionado al desarrollo de fallas lístricas sin sedimentarias. La secuencia es esencialmente lutítica, con pocas intercalaciones de cuerpos arenosos, abarca desde las arenas B a las arenas A0.

5.2 MODELO DE VELOCIDADES

En esta etapa se calcularon las velocidades promedio a partir de información de velocidades de pozos (check shot) con el fin de conocer la velocidad de propagación para cada una de las regiones delimitadas por los horizontes interpretados.

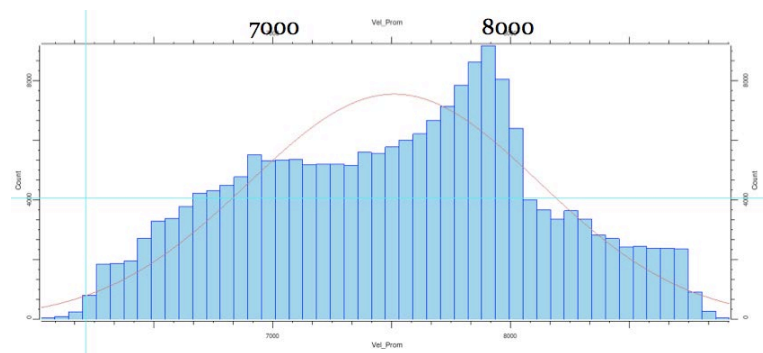


Figura 5.5 Histogramas de frecuencias de las velocidades del modelo.

Tabla 1.8 Valores estadísticos correspondientes a las velocidades del modelo.

Muestras	199800
Valor máximo	8919 pies/s
Valor mínimo	6026 pies/s
Mediana	7556,71 pies/s
Desviación estándar	612
Varianza	374684

La distribución de los valores de velocidad en figura 5.5 presentan una distribución normal, los valores mínimos poseen una baja frecuencia, los valores cercanos a la mediana poseen un rango de frecuencias por encima de 55 % con valores entre 6670 pies/s y 8000 pies/s, mientras que el otro 45 % con frecuencias medias está representada por rangos entre 6416 pies/s a 6670 pies/s y de 8000 pies/s a 80749 pies/s .

La desviación estándar de los datos está asociada con la variabilidad de los datos que poseen los pozos.

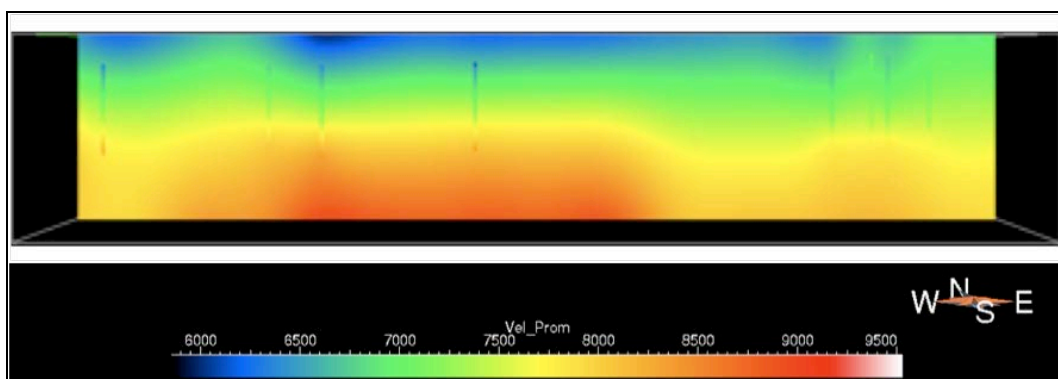


Figura 5.6 Modelo de velocidades promedio (pies/s), la escala asocia los valores de velocidad promedio por pozo, de azul-rojo se incrementa proporcionalmente la velocidad.

El modelo de velocidades (figura 5.6) muestra un aumento gradual de los valores que se incrementa con la profundidad como es de esperarse de acuerdo con el principio de compactación.

En el modelo se observan los contrastes de las velocidad, es importante tener en cuenta que estos contrastes podrían estar asociados a factores locales, ya que las velocidades de pozo responden a variaciones de litologías producto de cambios de propiedades físicas como la porosidad, la temperatura, el contenido de fluido, grado de compactación y las densidades.

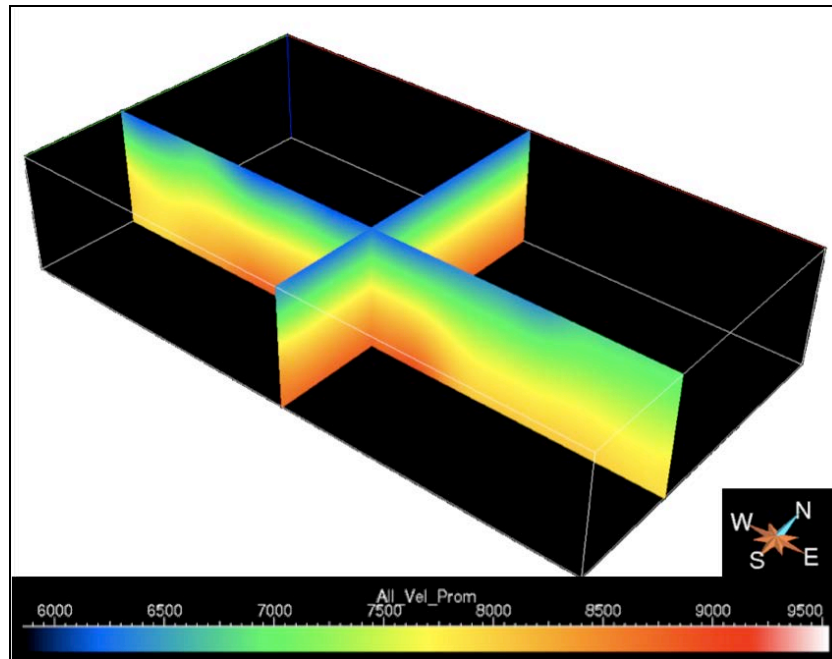


Figura 5.7 Modelo de velocidades promedio (pies/s), visto desde el sureste, donde se observan los contrastes de velocidades y la continuidad de las interfases, la escala asocia los valores de velocidad promedio por pozo, de azul-rojo se incrementa proporcionalmente la velocidad.

Interpretando el modelo de velocidades de manera ascendente, es posible observar como la interfase más profunda separa una zona de baja velocidad de una de alta velocidad. El cambio de velocidades, donde se evidencia una disminución gradual de la velocidad comienza desde los 8600 pies/s a los 8100 pies/s, correspondientes a los colores rojo al naranja. Las regiones representadas por el color naranja y amarillo, reconocibles en el extremo izquierdo del modelo y hacia la zona más occidental del mismo, presentan velocidades entre 7600 pies/s y 8000 pies/s . Tomando en cuenta que esta secuencia representa el límite entre el basamento y la superficie Aq 1, los contrastes de velocidades podrían asociarse a que la continuidad del basamento puede estar afectada por el fallamiento normal, de

presumible edad Jurásica y relacionada a la fase de lifting que sufrió la cuenca. Según Hedberg (1950) el basamento constituye una antigua superficie de erosión y meteorización sobre la cual se depositaron los sedimentos cretácicos.

La región posterior, representada en el modelo por el color verde, correspondiente a la formación Oficina, presenta valores de velocidad continuas, entre 6800 pies/s y 7150 pies/s . En esta región se observa como disminuye el espesor promedio, pero de manera asimétrica, mantiene el paralelismo con respecto a la interfase anterior, también se observa un engrosamiento hacia arriba. Al igual que la secuencia anterior las influencia de las subsidencias y aumentos del espesor de la secuencia pueden estar asociados al sistema de fallas principales. La litología de los pozos correspondiente a este intervalo está caracterizada por la presencia de cuerpos arenosos, masivos con delgadas capas de lutitas.

Por último la sección más somera del modelo está representada por el color azul, esta interfase aunque muestra un espesor relativamente constante se encuentra truncada por la sección infrayacente. Posee velocidades entre 5800 pies/s y 6200 pies/s y está asociada a la sección superior de la formación Oficina y el contacto con la formación Freites. Los estudios estratigráficos describen que en el campo los depósitos arenosos son menos masivos y se encuentran intercalados por lutitas de aceptable espesor y continuidad.

Mapas en tiempo y profundidad de la superficie Aq 1

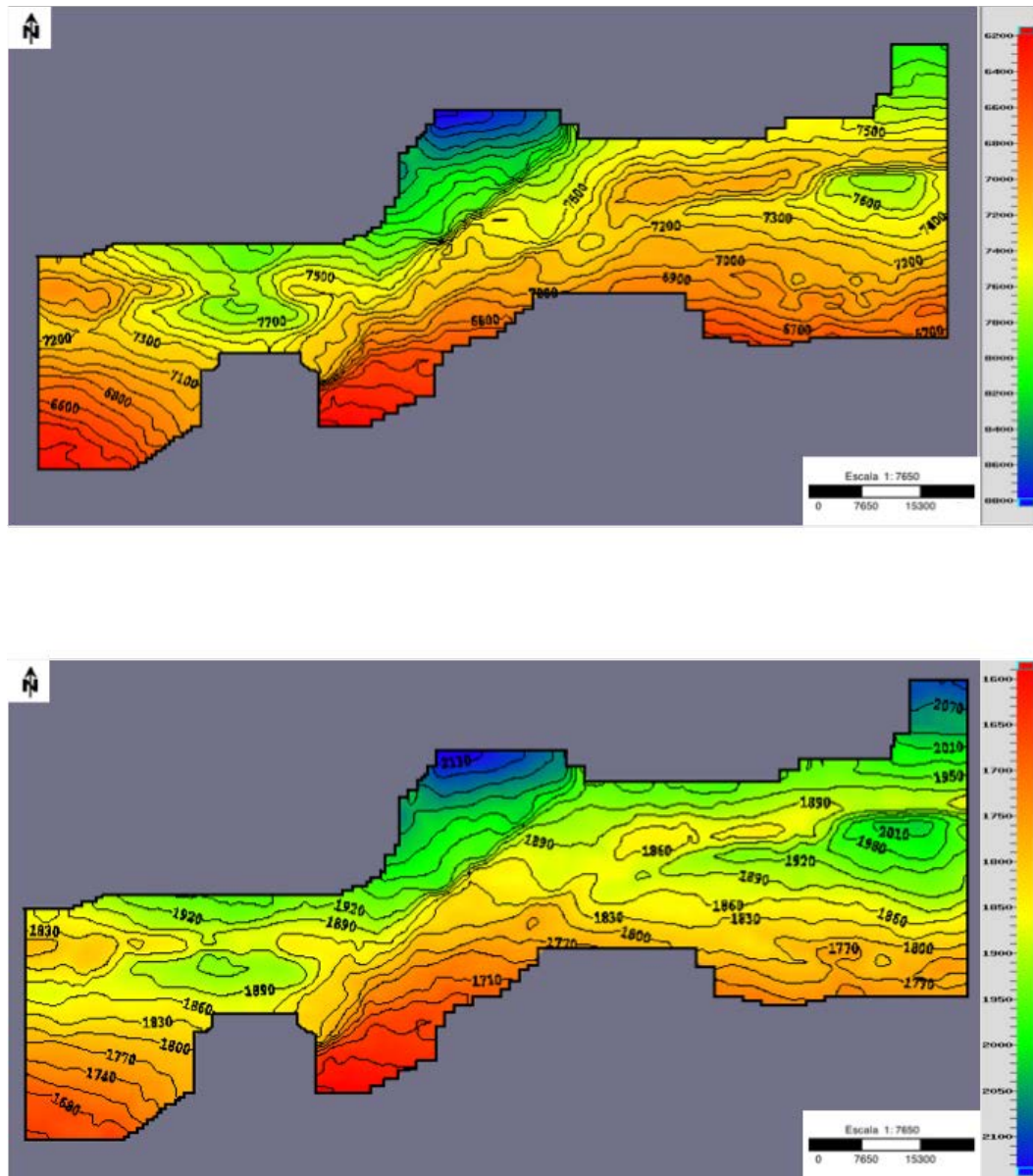


Figura 5.8 Mapa en profundidad pies (arriba) y tiempo ms (abajo) de la superficie Aq 1, ambas escalas representan los valores mínimos con el color rojo y los máximos con el color azul.

La superficie Aq 1 presenta valores en profundidad desde 6400 pies a 8500 pies la secuencia presenta los valores más someros al sur oeste y los más profundos al noreste, en el mapa de profundidad se observan cierres en las curvas de nivel que respetan la influencia de los principales sistemas de fallas con sentido NE-SO y este oeste (en la región oriental del bloque). El mapa en tiempo posee valores desde 1680 ms hasta 2100 ms, el comportamiento es similar al de profundidad, se observan los bloques deprimidos asociados a los trenes de fallas normales con un

mínimo de 8000 pies y 2010 ms rodeadas por altos estructurales de 7400 pies y 1800 ms .

Mapas en tiempo y profundidad de la superficie Bur 3

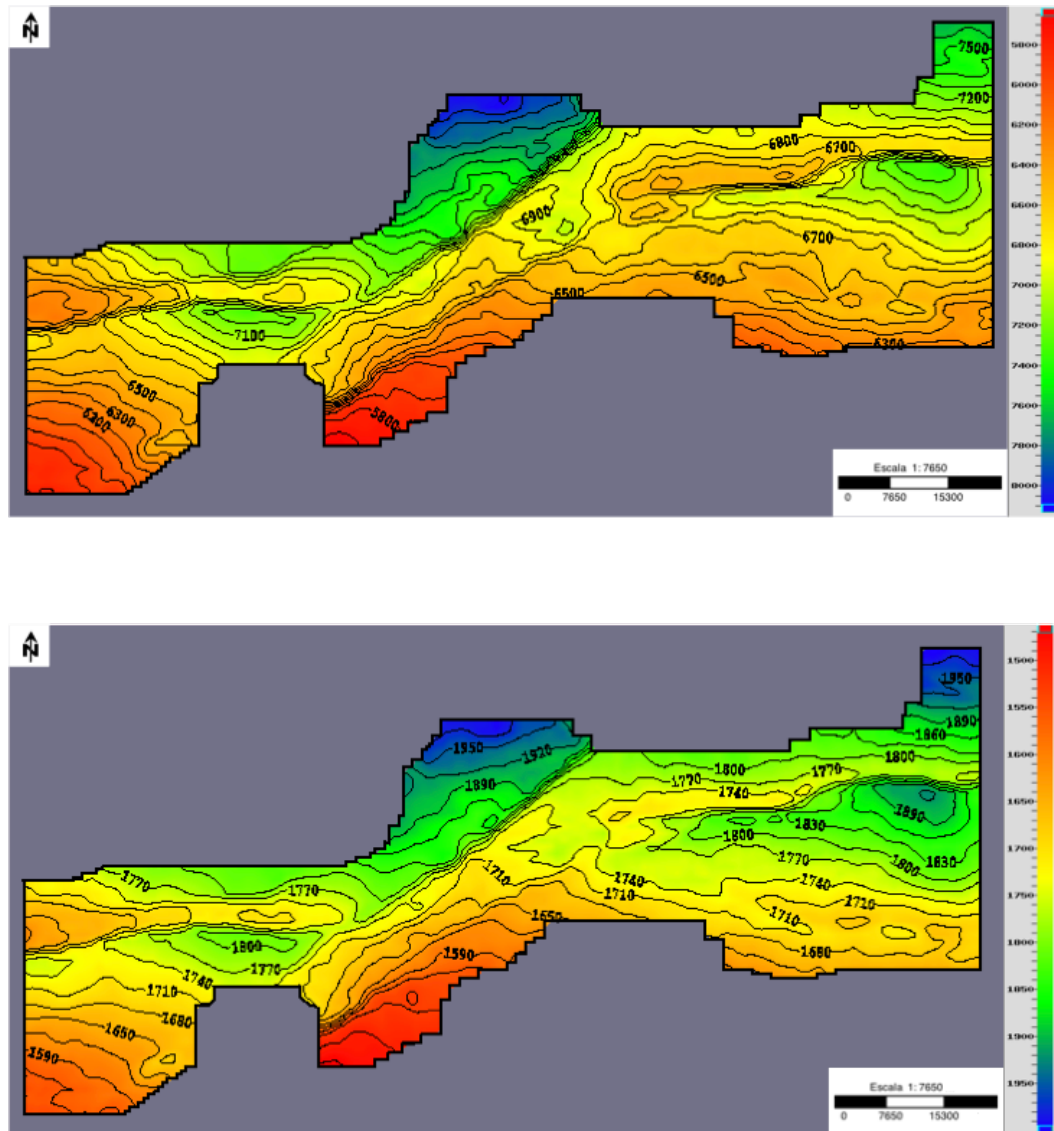


Figura 5.9 Mapa en profundidad pies (arriba) y tiempo ms (abajo) de la superficie Bur 3, ambas escalas representan los valores mínimos con el color rojo y los máximos con el color azul.

La superficie Bur 3 presenta valores 1590 ms a 1980 ms , donde las zonas más profundas continúan manteniéndose. Los valores de profundidad para la superficie Bur 3 van desde 6000 pies a 8000 pies, comparado con el horizonte anterior se observa el aumento de la influencia de los sistemas de fallas. En el mapa se observan las tendencias de las zonas de fallas en donde los valores para el bloque

deprimido van desde 7200 pies a 7400 pies y para el bloque levantado van desde 6800 pies a 6000 pies.

Mapas en tiempo y profundidad de la superficie Bur 4

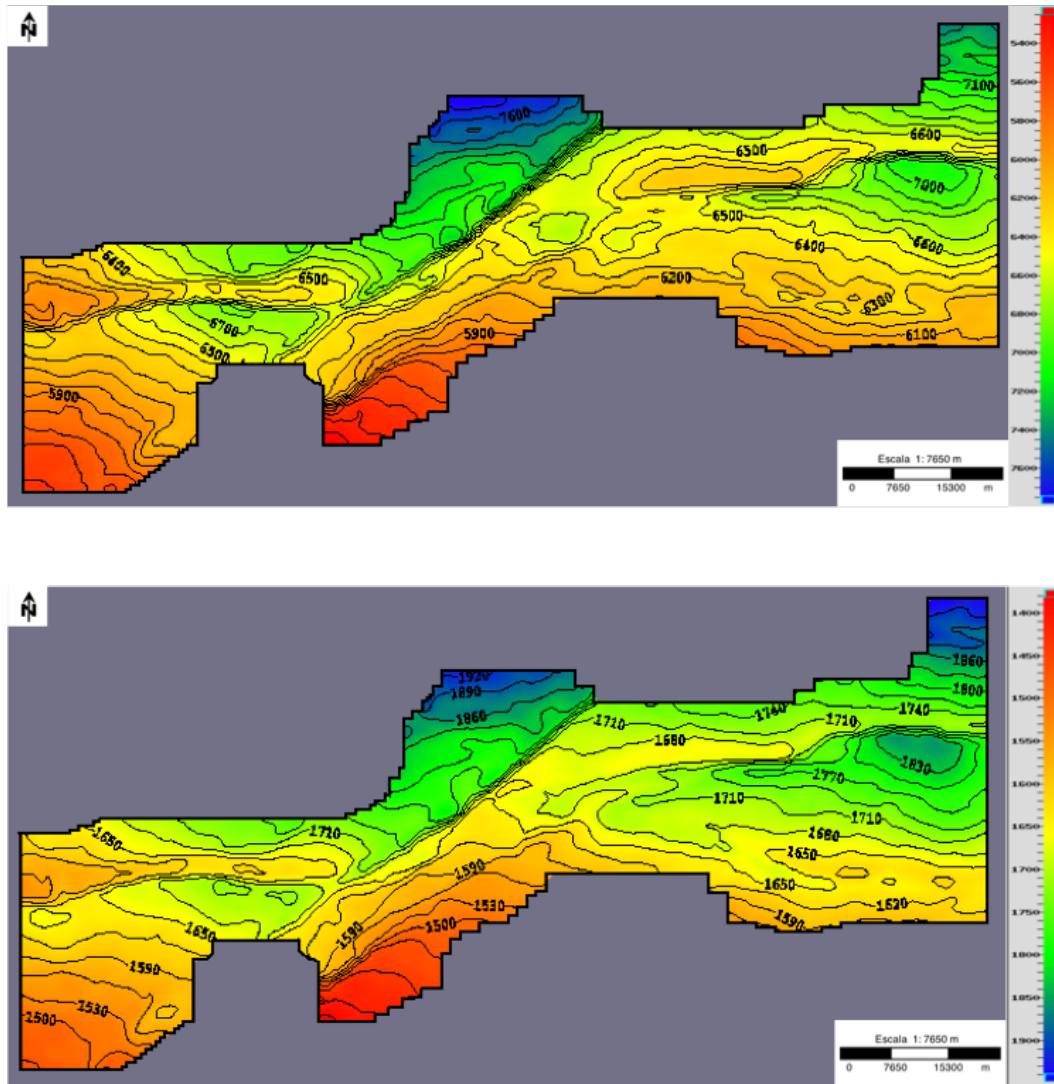


Figura 5.10 Mapa en profundidad pies (arriba) y tiempo ms (abajo) de la superficie Bur 4, ambas escalas representan los valores mínimos con el color rojo y los máximos con el color azul.

La superficie Bur 4 está comprendida entre valores de 1500 ms a 1860 ms, la tendencia de las fallas se hacen más marcadas, se observa las depresiones de los bloques deprimidos con respecto a los bloques levantados en las fallas Junta-Merey, Guara-Leona y las secciones de fallas en la parte más oriental del mapa, donde los valores de los bloques deprimidos va de 6700 pies a 7100 pies y para los bloques levantados de 6000 pies a 6500 pies.

Mapas en tiempo y profundidad de la superficie Oficina

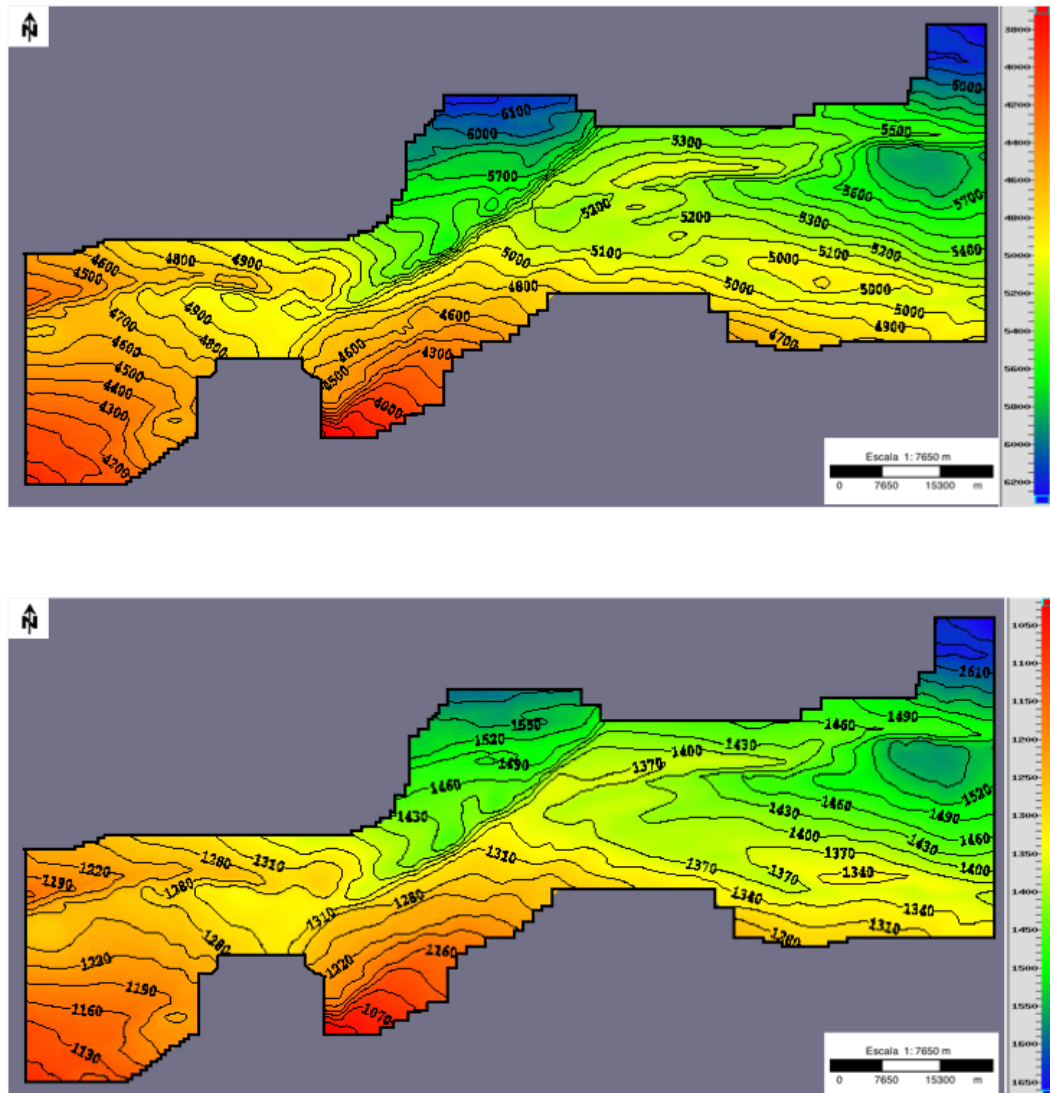


Figura 5.11 Mapa en profundidad pies (arriba) y tiempo ms (abajo) de la superficie Oficina, ambas escalas representan los valores mínimos con el color rojo y los máximos con el color azul.

El mapa de la superficie Oficina presenta valores de tiempo entre 1130 ms a 1610 ms, los valores de tiempo se encuentra sectorizados con la misma tendencia que en los tres mapas anteriores, controlados por la influencia de las fallas en la zona, para este mapa dicha influencia disminuye en la parte oriental y occidental. Los valores de profundidad en las zonas deprimidas cercanas a las zonas de fallas van de 5300 pies a 5600 pies y en las zonas elevadas de 4600 pies a 5000 pies.

5.3 CLASIFICACIÓN DE SISMOFACIES

Los mapas calculados se realizaron con el fin de representar a partir de la distribución espacial de clases de facies, un mapa cuyas clases pudiera asociar o

separar de la mejor manera posible a las distintas tendencias laterales de las trazas sísmicas, de acuerdo a la similitud entre las mismas. Recordando que las facies sísmicas pueden representar las tendencias estratigráficas que de otra manera son difíciles de detectar, asociando las trazas con valores de productividad de pozos la aplicación ayuda a identificar litologías similares con posible potencial de hidrocarburo, lo que permite sugerir nuevas zonas prospectivas para la perforación.

Método no supervisado

En principio se buscó el mapa de facies que mejor resaltara las tendencias, litológicas y estratigráficas de los distintos geocuerpos reconocidos, que además fuera consistente con los valores de producción de los 20 pozos disponibles para este estudio, los cuales se encuentran espacialmente distribuidos en toda el área (tabla 1.9 y figura 5.12).

Tabla 1.9 Datos de producción de pozos, con la producción específica y los valores acumulados.

POZOS	Buen productor	Mal productor	Agua	Petróleo	Gas	Prod. acumulada (MBIs)
P1	x			x		1448
P2	x			x		257
P3		x		x		150
P4		x		x		91
P5	x			x		1253
P6	x			x	x	1097
P7	x			x		1661
P8	x			x		1216
P9	x			x		2746
P10	x			x		963
P11	x			x		473
P12	x			x		521
P13	x			x		207
P14	x			x		295
P15		x		x		134
P16	x			x		1353
P17	x			x		2791
P18	x			x		1099
P19	x			x		204
P20	x			x		954

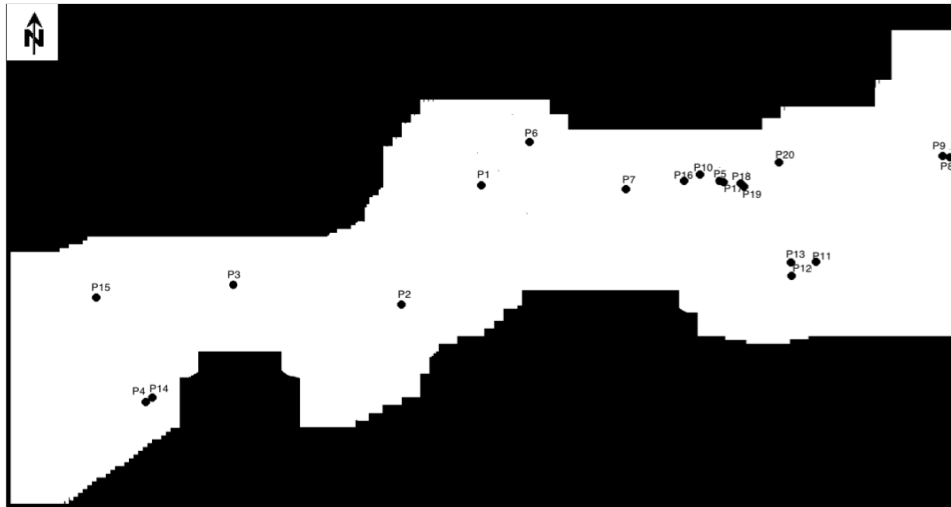


Figura 5.12 Mapa de localización de los 20 pozos en el área de estudio.

El mapa de facies con 8 clases es el que mejor representa el intervalo de la secuencia Bur 3, limitada en el tope por Bur 4 y en la base por Bur 3 (figura 5.13).

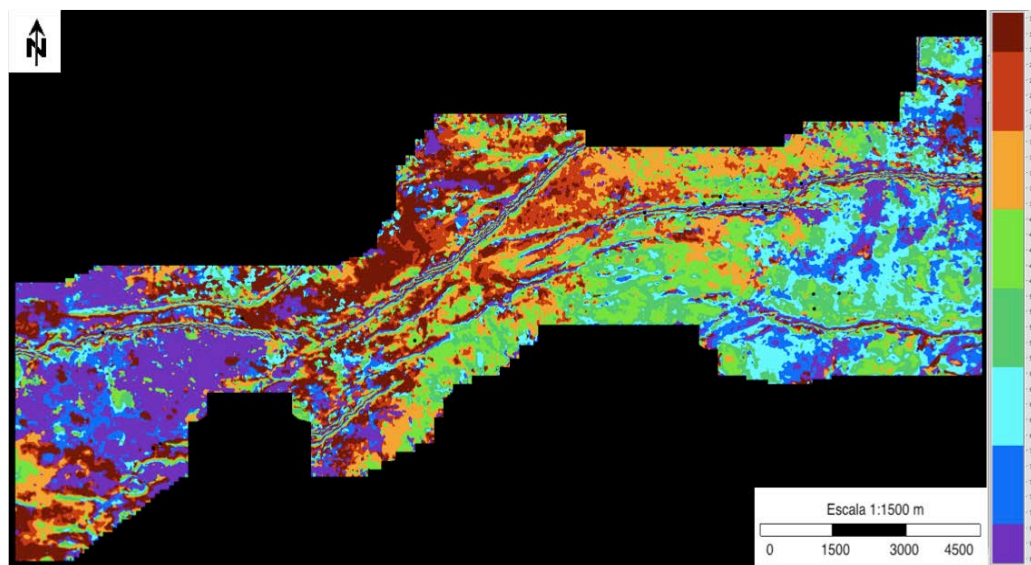


Figura 5.13 Mapa de facies sísmicas de 8 clases para la secuencias Bur 3, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: naranja, 4: verde claro, 5: verde, 6: azul claro, 7: azul y 8: morado.

Una vez seleccionado el mapa de facies se realiza un control de calidad de los datos mediante la visualización de las neuronas (figura 5.14) y el mapa de correlación (figura 5.15).

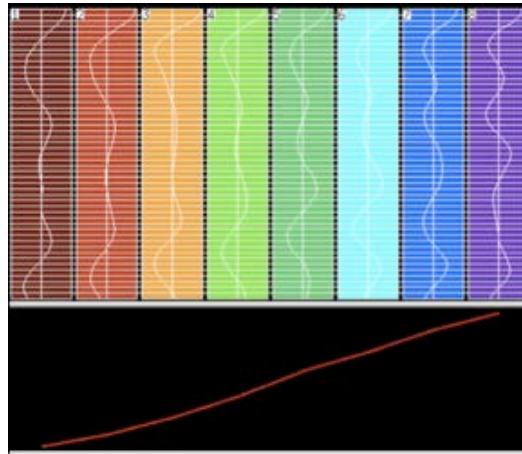


Figura 5.14 Neuronas y curva acumulativa del mapa con 8 clases.

La curva acumulativa de las neuronas correspondientes a la clasificación con 8 clases muestra una tendencia general lineal donde se observan tres pequeños quiebres, estas pequeñas inflexiones indican un grado de similitud entre las neuronas vecinas. Las asociaciones pueden subdividirse en tres grupos, comenzando de izquierda a derecha con la neuronas 8 y 7 de color morado y azul, seguido por las correspondientes 6 y 5 de colores azul claro y verde, por último las neuronas 4, 3, 2 y 1 con sus respectivos colores verde claro, naranja, rojo y marrón. Ya que la curva es bastante lineal, ésta indica que el grado de variabilidad en la clasificación de trazas entre neuronas es bajo, por lo tanto el número de clases contribuye positivamente a la representación de las diferentes trazas sísmicas en el intervalo de estudio.

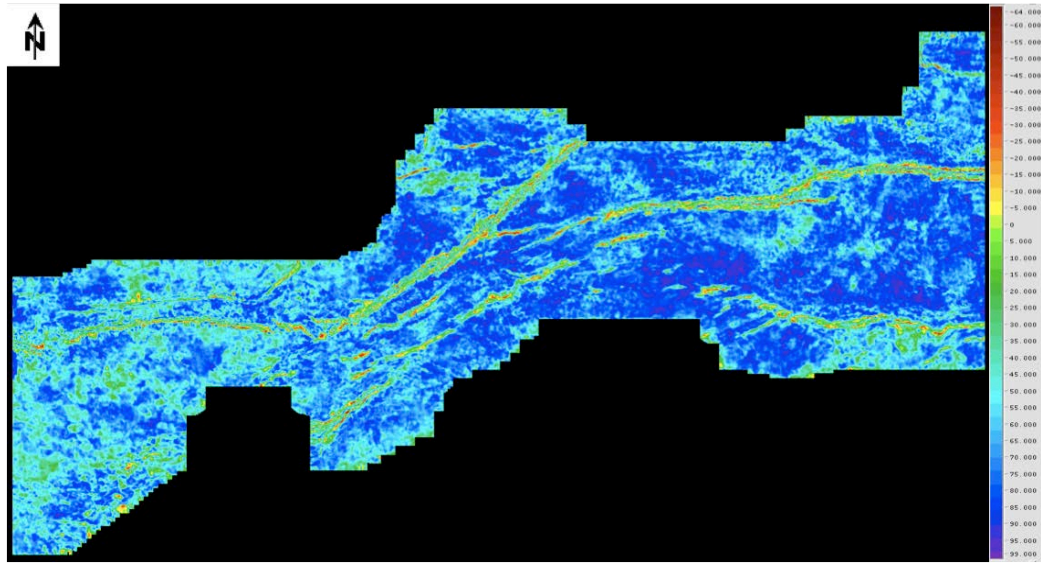


Figura 5.15 Mapa de correlación, relacionado al mapa de facies de 8 clases, donde los valores oscuros indican mayor correlación y los tonos más brillantes (verde y rojo) menor correlación.

La escala del mapa de correlación está dividida en valores positivos y negativos, donde los primeros están asociados a los colores verdes, azul, y morado, mientras que los segundos están representados por los colores naranja y rojo donde el valor central es 0 y lo representa en color amarillo.

El mapa presenta valores predominantes (azul oscuro) pertenecientes a la escala de rangos positivos, la tendencia general está asociada a un 80 % de grado de correlación, una alta correlación representa un alta relación entre los datos (trazas) y la clasificación (clases) en grupos de los mismos, por lo tanto una disminución de la incertidumbre en toda el área. También se distinguen algunas zonas donde se observa la disminución de la correlación, que van de 10 % a 30 % estas zonas se observan hacia el suroeste de mapa y en los límites de fallas.

El análisis del mapa de facies se realizó relacionando las tendencias correspondientes a los cuatro grandes patrones que se asocian a la variabilidad de las trazas sísmicas, como lo son los contrastes litológicos, presencia de rasgos estratigráficos, evidencias estructurales y acumulación de hidrocarburos.

A continuación se presenta el orden del análisis de acuerdo a las tendencias identificadas de mayor predominio en el área: análisis estructural y la relación con los datos de producción, contrastes litológicos y estratigráficos.

Análisis

La tendencia observada en el mapa puede asociarse a cambios laterales de las trazas influenciadas principalmente por lineamientos estructurales, donde es posible segmentar en sentido este-oeste los bloques de las principales fallas.

Se observa como los patrones de facies 1, 2, 3 y 4 (en orden predominante), poseen un estilo diagonal NE-SO, también están presentes en el extremo sur-oeste y son relacionables con los patrones de la zona intermedia del mapa, la presente distribución claramente puede ser vinculada con las falla Junta-Merey.

El siguiente patrón de trazas identificado corresponde a las facies 8 y 7 (en orden predominante), también posee una tendencia buzante al noroeste, concordante con el sistema de fallas Guara-Leona.

Hacia la región oriental del mapa, los patrones de facies 6, 5, 7 y 8 (en orden predominante), no están tan bien definidos como los anteriores. Estructuralmente en esta zona predominan dos sistemas de fallas de rumbo NO-SE y oeste-este, el primero es derivado de las fallas principales mientras que el segundo es producto del crecimiento de fallas superpuestas. Una variante observada en esta zona, es la presencia de rasgos de uno de los canales, ubicado en la parte superior de este sector, la facies que lo representa es la facies 8 de color morado.

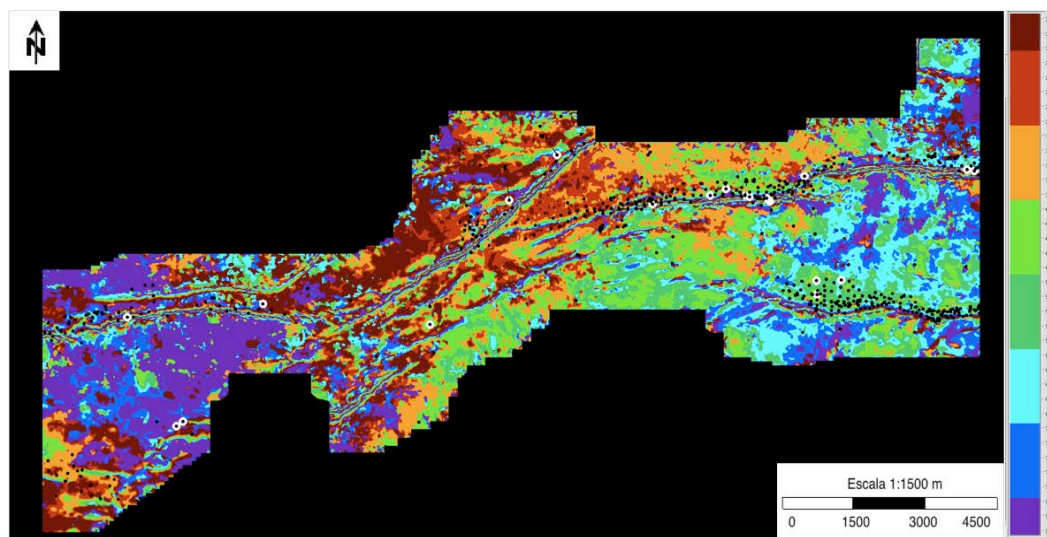


Figura 5.16 Mapa con 8 clases donde se muestra la tendencia general de explotación del campo, (localización de los pozos de una de las listas del proyecto, señalados con una cruz blanca se resaltan los 20 pozos disponibles).

La ubicación de los pozos (figura 5.16) muestra como se ha venido explotando el potencial de producción en el área, los dos sistemas principales de fallas normales conforman una importante barrera para la migración de hidrocarburos buzamiento arriba, mediante la yuxtaposición de rocas sello que controlan las acumulaciones de hidrocarburos. En general las trampas presentan cierre estructural contra los planos de falla, y son reconocidos dos estilos principales de entrapamiento: el primero relacionados con las fallas antitéticas (en el bloque levantado) y el segundo definido por un sistema de fallas sintéticas (en el bloque deprimido).

La magnitud de los saltos de las fallas antitéticas favorece la posibilidad de sello en un mayor número de yacimientos. Por lo general este tipo de trampas se encuentra limitadas hacia el norte por fallas sintéticas conformando bloques elevados. Las trampas de este tipo son las de mayor potencial y las que caracterizan la gran mayoría de los campos importantes dentro del bloque. En el campo, 17 de los 20 pozos considerados en este estudio (P3, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P15, P16, P17, P18, P19 y P20) fueron perforados en el bloque elevado de las mencionadas fallas, en promedio la producción acumulada de estos pozos es de 1048,33 MBls. Las zonas cercanas a éstas no son fáciles de analizar, ya que solo algunos de estos pozos se ubican sobre una sola clase, esto se debe a que la clasificación en zonas discontinuas es poco clara y muestra un incremento en las combinaciones de colores correspondientes a un número de clases (figura 5.17).

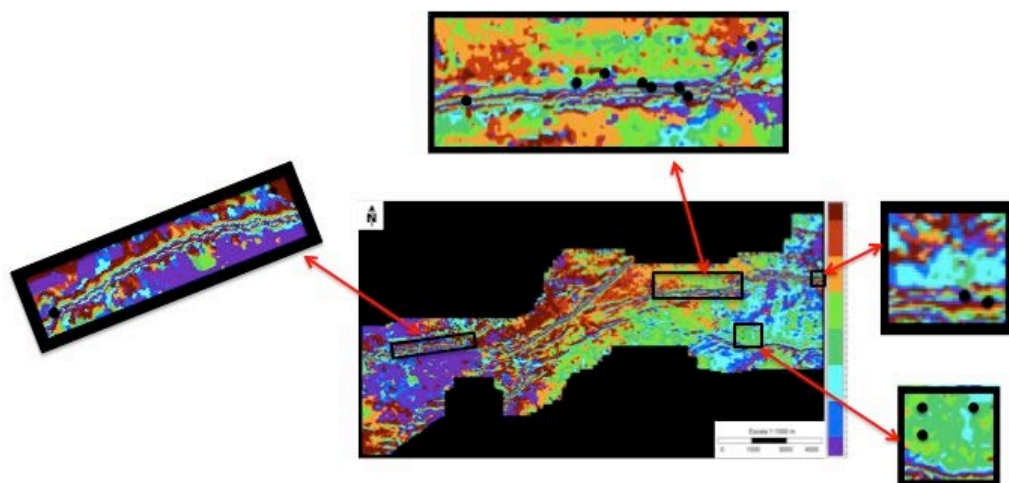


Figura 5.17 Pozos 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19 y 20 ubicados en el bloque elevado de las fallas antitéticas.

Por su parte las fallas sintéticas, generan en los bloques deprimidos pliegues de tipo longitudinal o de arrastre donde también se han identificado acumulaciones menores. Se identificaron 5 pozos en estas zonas, los pozos P1 y P6 están ubicados en la región central, paralelamente a la falla que cruza en forma diagonal el campo, el pozo P2 se encuentra ubicado en la región central del campo, sobre la clase 4 (facie verde claro) y los pozos P4 y P14 se encuentran en la región sur oeste del campo pertenecen a la facie 8 que corresponden al color morado (figura 5.18).

Relacionando a los pozos con valores de producción tenemos que el promedio de la producción acumulada de los pozos es bastante bajo de 637 MBIs, por lo tanto dichos pozos son considerados de bajos a malos productores.

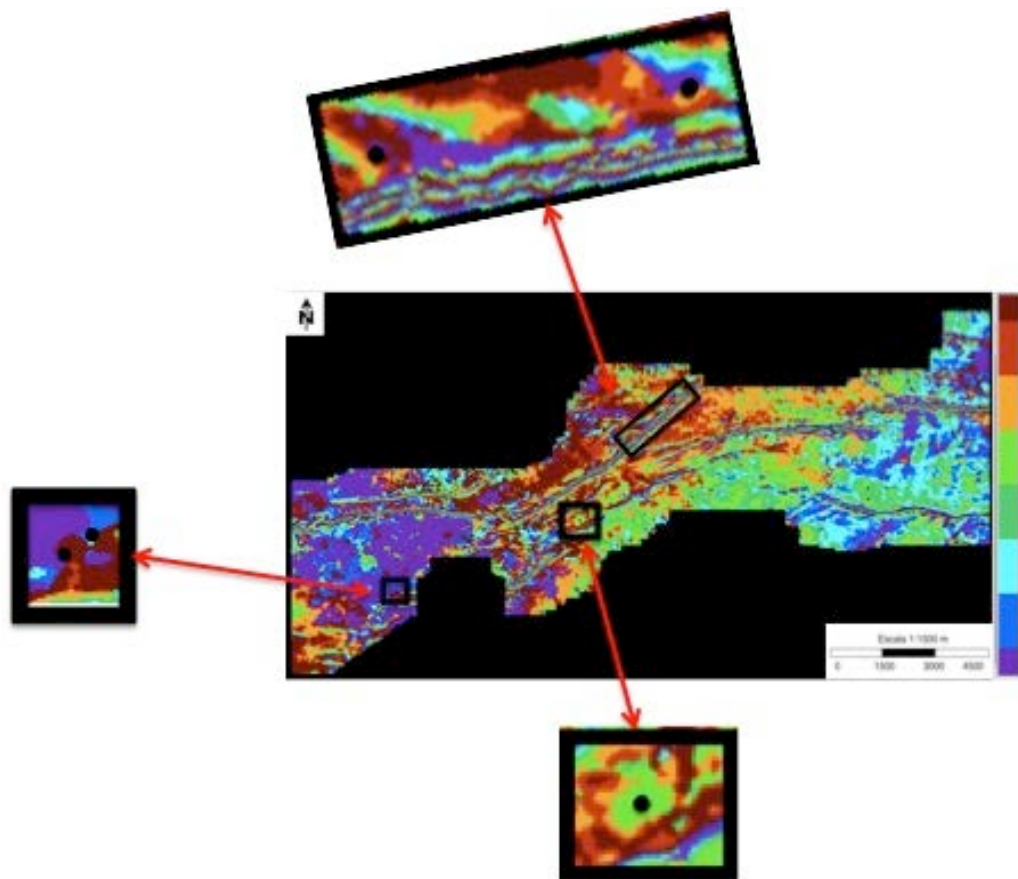


Figura 5.18 Pozos 1, 2, 4, 6 y 14 ubicados en el bloque deprimido de las fallas sintéticas.

Otro aspecto a resaltar, es que en la gran mayoría de los yacimientos presentes en el área Oritupano-Leona, el límite estructura abajo está representada por la presencia de contactos agua-petróleo donde el acuífero es activo y genera un avance del frente de agua a medida que se explotan los yacimientos. Es común ver

en estos yacimientos, que lateralmente existen límites de roca por variación lateral de facies de arena a lutita (Memoria Descriptiva, “Unidad de Explotación”, 2008). Estudios sedimentológicos en la sección Bur 3 indican que al oeste, la secuencia gana espesor, con una disminución en la cantidad de arenas y un mayor contenido lutítico. El patrón de apilamientos y la existencia de cuerpos lutíticos espesos sugieren una mayor influencia marina. Datos de núcleos, identifican barras de marea y discretos canales de marea y distributarios. Las arenas pueden estar superpuestas, bioturbadas y presentar patrones de apilamiento variables, como corresponde en complejos sistemas de barras y canales de marea.

Se realizó una revisión de los registros gamma ray y resistividad en el intervalo de la sección Bur 3. Se seleccionaron 4 pozos representativos a lo largo de la sección (P4, P2, P7 y P9), (figura 5.19) se ubicaron en una sección dentro del intervalo de estudio, con el fin de poder comparar la tendencia de los rasgos litológicos entre los mismos y evaluar la posibilidad de asociarla a la tendencia general del mapa.

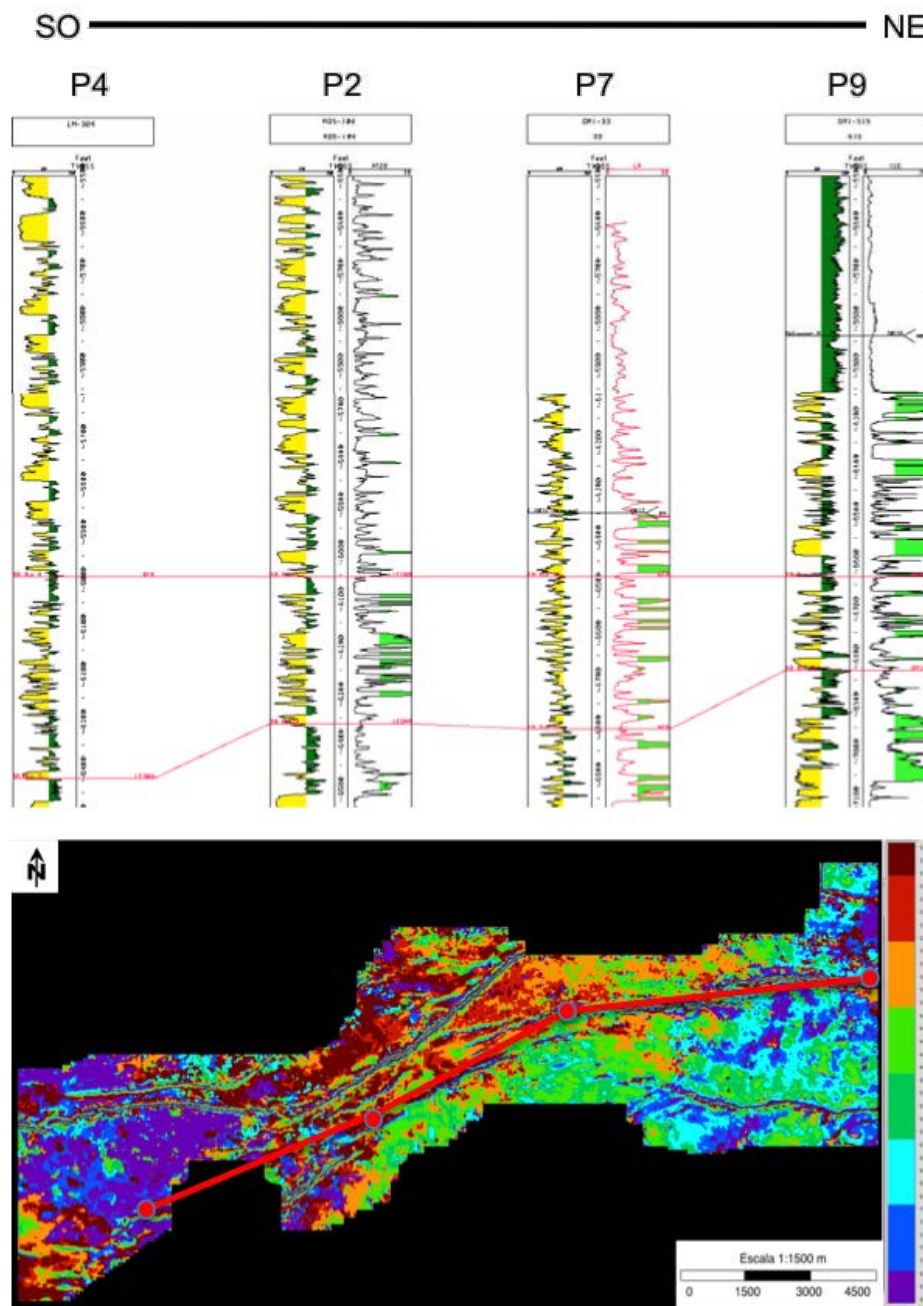


Figura 5.19 Secuencia SO-NE de registros gamma ray en el intervalo correspondiente a la sección Bur 3.

Se puede observar como la secuencia presenta un progresivo aumento en el espesor en sentido este-oeste. La secuencia presenta una relación intercalada de arenas y lutitas. Los cuerpos arenosos son más delgados, discontinuos y menos frecuentes mientras que el contenido lutítico aumenta, como puede verse en los registros de los pozos P7, P2 Y P4 ubicados más al oeste del área.

Como se mencionó anteriormente la ubicación de los pozos es más predominante en las zonas de fallas, lo que dificulta el reconocimiento de las clases para los mismos, esta limitante influyó negativamente al tratar de identificar una tendencia litológica en el mapa. Puesto que los pozos representan los datos duros a correlacionar con los datos sísmicos, para este estudio no solo es necesario poder identificar coherentemente una clase asociada a los mismos también se requiere integrar la mayor cantidad de información disponible, con el fin de realizar un análisis más representativo del área.

De los cuatros canales, presentes en la sección Bur 3 asociados a los cuatro geocuerpos identificados anteriormente, solo uno pudo ser reconocido en el mapa regional de facies, esto puede estar asociado a que los demás canales están representados en secciones internas donde las reflexiones están llegando un poco más tarde dentro de la escala en tiempo para la secuencia. El análisis en la ventana del intervalo está afectando a los valores de amplitud correspondientes a los tres canales restantes.

Método supervisado

La escogencia de un pozo cuya traza asociada, pudiera ser utilizado como patrón de búsqueda o traza modelo dentro del mapa de facies, se basó en que éste fuese buen productor, con valores de producción acumulada altos y que además pudiera distinguirse la facie de clasificación correspondiente al mismo.

Como pudo observarse durante el análisis del método no supervisado, los pozos ubicados en la región asociada a las trampas antitéticas del bloque levantado, presentan los valores más altos de producción acumulada de todo el área de estudio (tabla 1.10).

Tabla 1.10 Pozos con mayor producción acumulada del área de estudio.

POZOS	Buen productor	Mal productor	Agua	Petróleo	Gas	Prod. acumulada (MBls)
P1	x			x		1448
P5	x			x		1253
P6	x			x	x	1097
P7	x			x		1661
P8	x			x		1216
P9	x			x		2746
P16	x			x		1353
P17	x			x		2791
P18	x			x		1099

De los 8 pozos tomados en cuenta para el análisis se escogió el P17, que presenta valores de producción acumula de 2791 MBls, el mismo también fue relacionado con una de las facies sísmicas presente en este bloque, la misma corresponde a la facie 5 de color verde oscuro (figura 5.20).

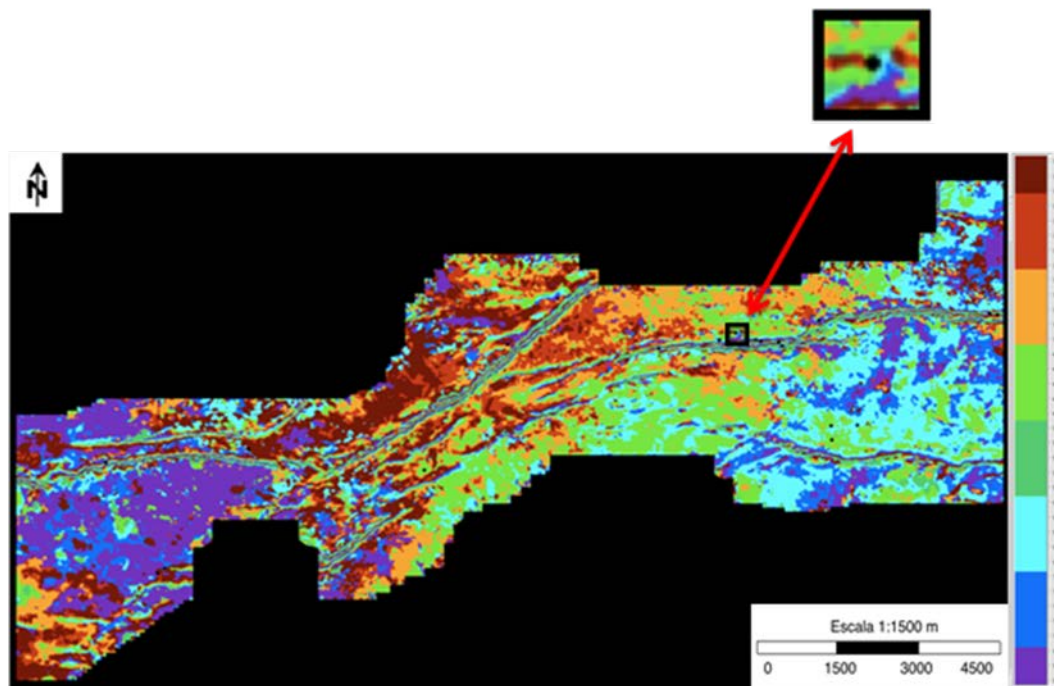


Figura 5.20 Mapa de facies con 8 clases re-procesado bajo el método supervisado, usando como dato de entrada la información del pozo P17 asociado a la clase número 5 de color verde oscuro.

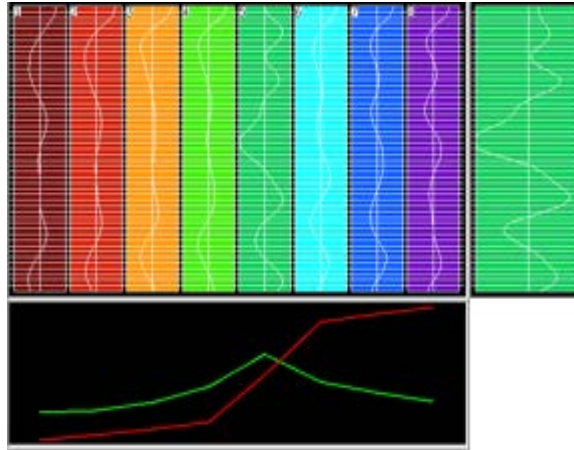


Figura 5.21 Neuronas, curva acumulativa (curva roja) y curva comparativa (curva verde) para la traza modelo del mapa de 8 clases.

En la figura 5.21 es posible observar la traza modelo del pozo P17, y las curvas acumulativas (curva roja) y comparativa (curva de color verde). La curva acumulativa presenta tres quiebres bastante abruptos, el primero asocia a las neuronas del 1 al 4, el segundo a la neurona correspondiente a la traza modelo y el último a las neuronas 6, 7 y 8, estos quiebres reflejan la variabilidad de las trazas con respecto a la traza modelo, indicando que sus diferencias son bastante grandes, esto es notable al observar los patrones de las distintas neuronas. La segunda curva de color verde indica la diferencia acumulada de la traza del pozo P17 con respecto a las otras curvas. El contraste observado de la traza modelo en relación a los otros patrones de trazas es motivado a que en principio cuando el algoritmo realizó la identificación bajo el método no supervisado las mismas reflejaron las tendencias presentes en la zona de manera no redundante, por lo tanto la traza del pozo P17 (traza modelo) no está asociada con ninguna de las 7 neuronas restantes del mapa supervisado.

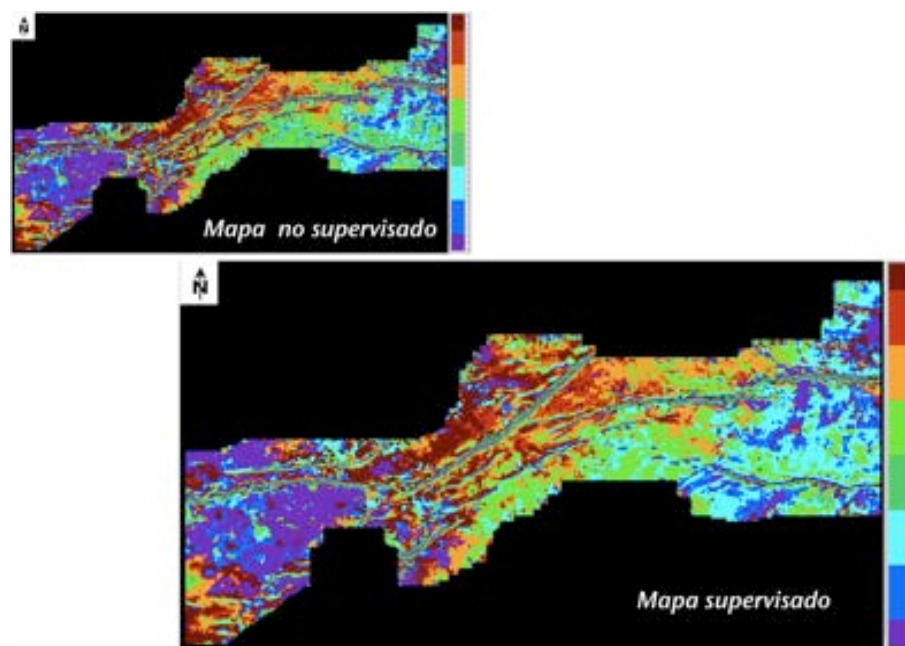


Figura 5.22 Mapa de facies supervisado y no supervisado de 8 clases.

Comparando los mapas supervisados con el obtenido con el método no supervisado figura 5.22, puede observarse que las tendencias generales también se observan en el nuevo mapa. Las diferencias entre los mapas están asociadas directamente a las zonas donde se ubicaba (en el mapa no supervisado) la clase 5 y que ahora está representada por la traza modelo. Las zonas correspondientes a la traza modelo, están mejor delineadas y los contrastes de éstas con respecto a las otras clases son más claros, las otras clases ya no están interrumpiendo tan abruptamente las regiones de la clase de color verde oscuro.

Los valores de producción acumulada cercanos a los del pozo P17, se encuentran concentrados en una región específica influenciada por el mismo evento estructural. Una segunda asociación de esta clase se observa en dirección sureste, correspondiente a los pozos P11, P12 y P13, cuyos valores de producción son bastante contrastantes debido a los contactos agua-petróleo (en el yacimiento) de esa zona. Otros patrones relacionados a esta clase son reconfirmados. En la figura 5.23 se muestra la tendencia general de los pozos explotados en el campo junto a la clase de la traza modelo (P17) resaltada con el color blanco, en el mapa se identifican dos zonas asociadas a la clase 5 y que además son paralelas a segmentos de fallas en donde si el patrón estructural (bloque levantado) coincide

con el de las zonas con buena producción de hidrocarburos entonces la facie 5 podría estar identificando zonas prospectivas.

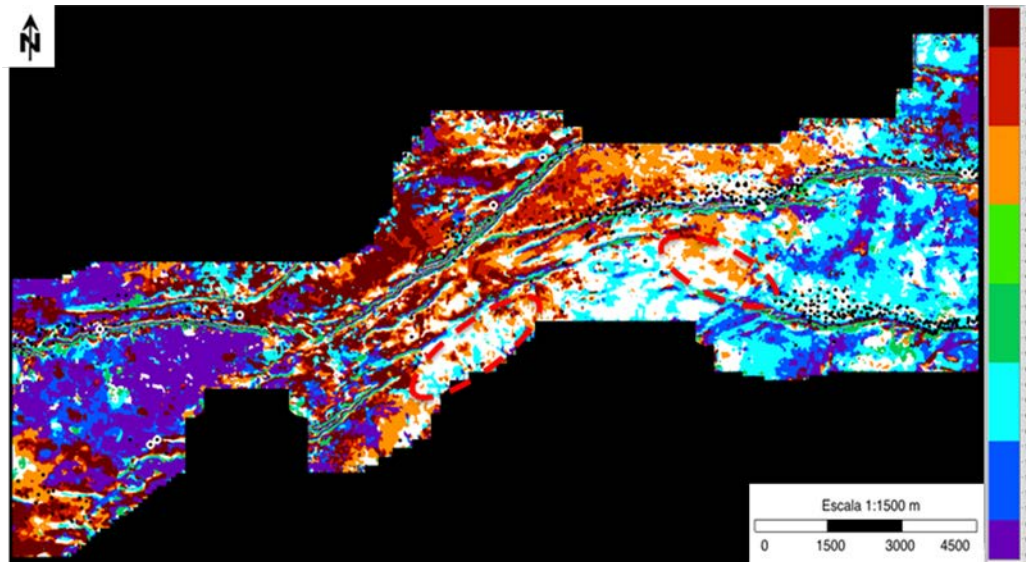


Figura 5.23 Mapa de facies supervisado donde la clase (5) de la traza modelo (P17) se encuentra resaltada en color blanco con interpretación de dos zonas asociadas a la misma.

En el mapa anterior resaltan la continuidad y predominio de las clases 1, 2 y 3 en el bloque levantado de las falla del centro este del campo, asociando estas facies a el sistema de trampas estructurales que caracteriza al campo e infiriendo que la gran cantidad de pozos perforados en las zonas representadas por estas facies es debido a la presencia de un mayor porcentaje de acumulación de hidrocarburos. En el campo se observa la prolongación lateral de las clases 1, 2 y 3, las mismas comparadas con zonas posiblemente productivas indican que la respuesta de la traza a factores litológicos o presencia de fluidos se repite. En el mapa de la figura 5.24 se observan resaltadas dos zonas donde existe continuidad de zonas productivas en estas zonas se recomienda aplicar otros estudios con el fin de cuantificar la relación de estas tendencias.

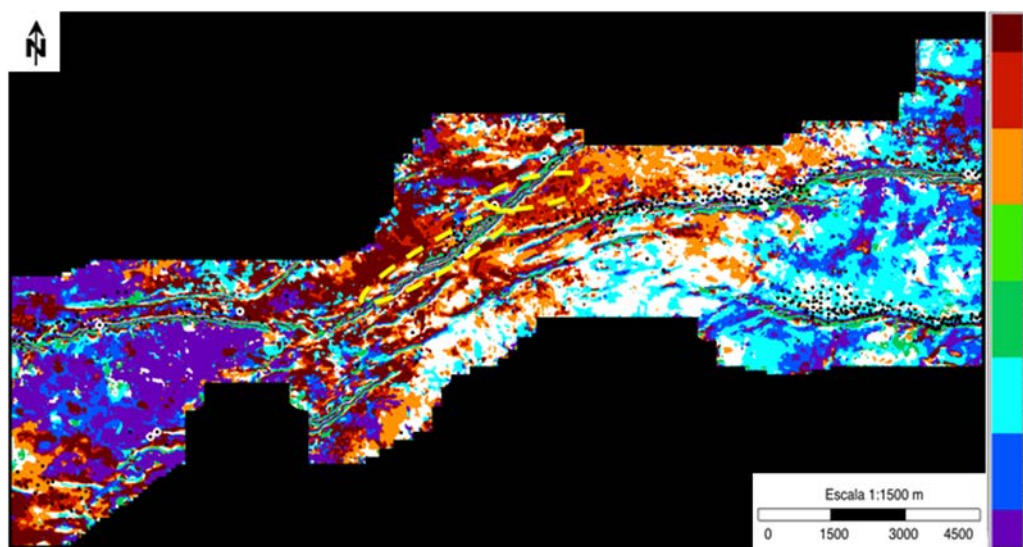


Figura 5.24 Mapa de facies supervisado donde la clase (5) de la traza modelo (P17) se encuentra resaltada en color blanco con interpretación de dos zonas asociadas a las clases 1-2-3.

Adicionalmente se calcularon mapas de facies para las superficies de los distintos bloques correspondientes a los canales reconocidos anteriormente.

Bloque canal I

El mapa más representativo después de realizar prueba con diferentes clases, fue el de 7 clases (figura 5.25).

El mapa de facies permite distinguir un canal meandriforme con dirección SO-NE (diagonal) encajado entre dos fallas semiparalelas con dirección este-oeste, la segunda falla lo corta verticalmente. El canal tiene una longitud (eje) de 11,82 km, compuesto por cuatro arcos sucesivos de longitud de 2,6 km a 4 km, con un radio de curvatura de entre 1,6 km a 2,3 km, y una anchura de cauce de 0,247 km. La dirección (local) de transporte es SO-NE, los sedimentos se depositaron en el Mioceno inferior (Burdigaliense), en un ambiente fluvial meandriforme de mediana a baja energía.

El canal I está representado por las facies 1, 2 y 3 (de color marrón, rojo y amarillo), las mismas delínean la heterogeneidad lateral del geocuerpo dentro del intervalo (paralelo) de estudio, en las barras de meandro se observa la combinación de las clases 3 y 4 (amarillo y verde). Estas clases están delineando semicircularmente las zonas de los canales abandonados, estas zonas pueden estar rellenas por arenas de grano medio a fino y lutitas en más o menos la misma

proporción. Son comunes los sedimentos de grano grueso (mal escogidos) en la base de los canales donde las condiciones de porosidad pueden ser favorables para la acumulación de hidrocarburos mientras que los sedimentos de grano fino se encuentran como relleno final (sellos) de canal y en la planicie de inundación. Las secuencias en regiones como éstas presentan tendencias grano decreciente hacia el tope (formas de campana en registros sp y gamma ray) y forman atractivos yacimientos con trampas de tipo estratigráfica.

Como se sabe las zonas más próximas a las fallas tienen asociados los pozos con mejor producción, los mismos tienen una combinación de facies rojas, amarillas y verdes. En la parte superior del mapa se observan dos segmentos de falla con dirección este-oeste, en esta zona caen los pozos P5-P17, P18-19 y P20, este último es el único que podemos asociar con una clase en específico (clase 2). Al sureste en el bloque levantado de la falla (con dirección este-oeste) pasando por ORI-A se encuentran los pozos: P11 asociado a la facie azul, P12 asociado a la facie morada y por último P13 correspondiente a la facie marrón, estos pozos presentan producción baja de petróleo y alta de agua.

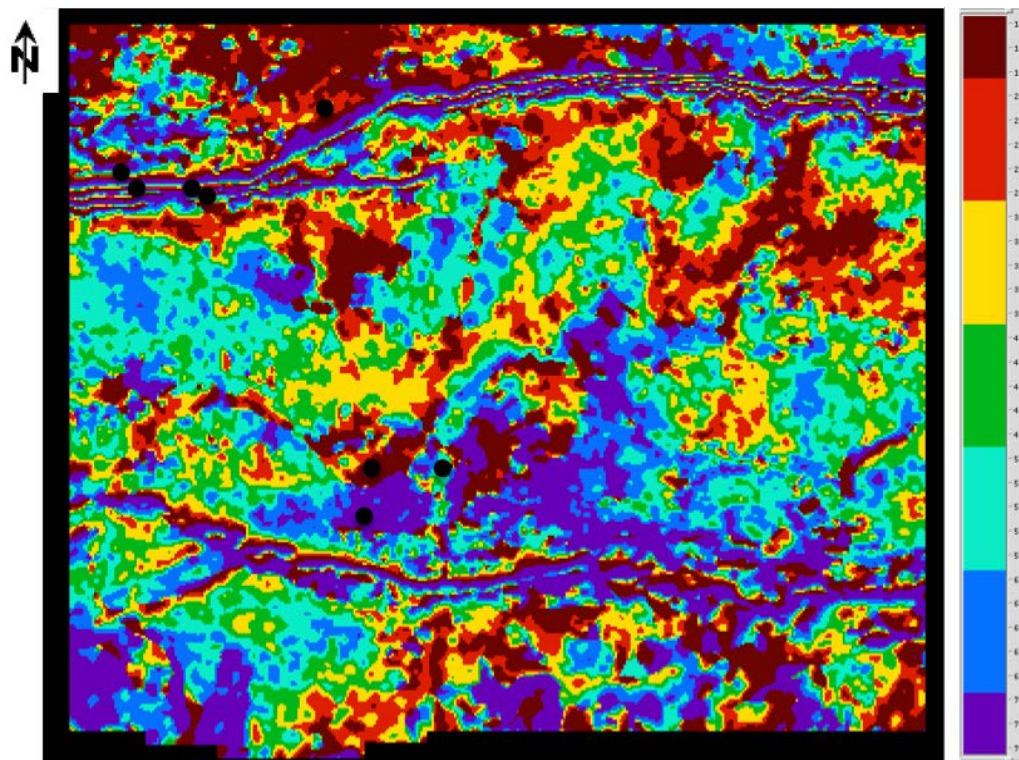


Figura 5.25 Bloque con 7 facies para el canal I, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: amarillo, 4: verde, 5: azul claro, 6: azul y 7: morado.

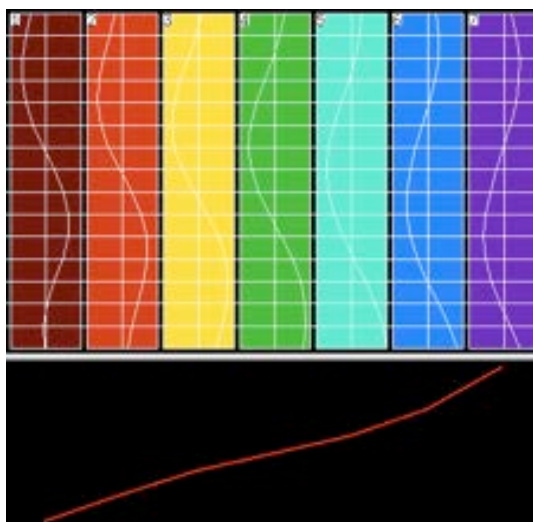


Figura 5.26 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal I).

Las trazas sísmicas son de tipo subparalelo, semicontinuas, de baja a media amplitud, la curva acumulativa muestra tres inflexiones de las cuales la primera agrupa a 3 facies (roja, naranja, amarilla), estas trazas están delineando el canal. La segunda inflexión corresponde al par de trazas vecinas (verde y azul claro) y el último grupo conformado por las clases 6 y 7 (azul y morado).

Bloque canal II

Para el bloque II las facies que mejor destacaban los rasgos estratigráficos después de realizar varias pruebas, fue el de 7 clases (figura 5.27).

En este mapa se distingue un meandro abandonado, que ocurre por el crecimiento de una barra de canal hasta que bloquea al flujo y éste tiende a desviarse. Atribuido a un ambiente fluvial con dirección (local) norte-sur, correspondiente al Mioceno inferior (Burdigaliense). De longitud (eje) de 4,3 km, un radio de curvatura de 4,3 km y con una anchura de cauce de 1,372 km a 0,434 km .

Las 3 primeras facies representan al meandro (marrón, rojo y amarillo), en este mapa se observan rasgos del canal I (con las mismas clases que las del meandro), visto aisladamente puede confundirse con una zona de abanico de rotura pero comparando con el bloque anterior se observa que estos rasgos estratigráficos representan la interrupción entre dos canales de morfologías y direcciones diferentes, que puede deberse a que en un periodo existió un caudal principal que sufrió desbordamientos donde inundó toda la llanura y originó cambios en las

corrientes dividiéndolas en flujos secundarios debido a la influencia de factores tectónicos, evolutivos, granulométricos o incluso medioambientales como la variación de la vegetación y el clima. El meandro se muestra bifurcado al norte, en donde el arco interno muestra como la corriente va erosionando y a causa de la pérdida de energía va separándose transversalmente a la misma, ocasionando un desvío del canal al arco más externo. La zona de barra de meandro está representada en mayor proporción por las facies 5 y 6 (color azul y azul claro), se observa como por encima de la falla las facies cambian, podría decirse que el patrón estructural (falla este oeste) afectó la depositación de sedimentos en el lado interno del meandro.

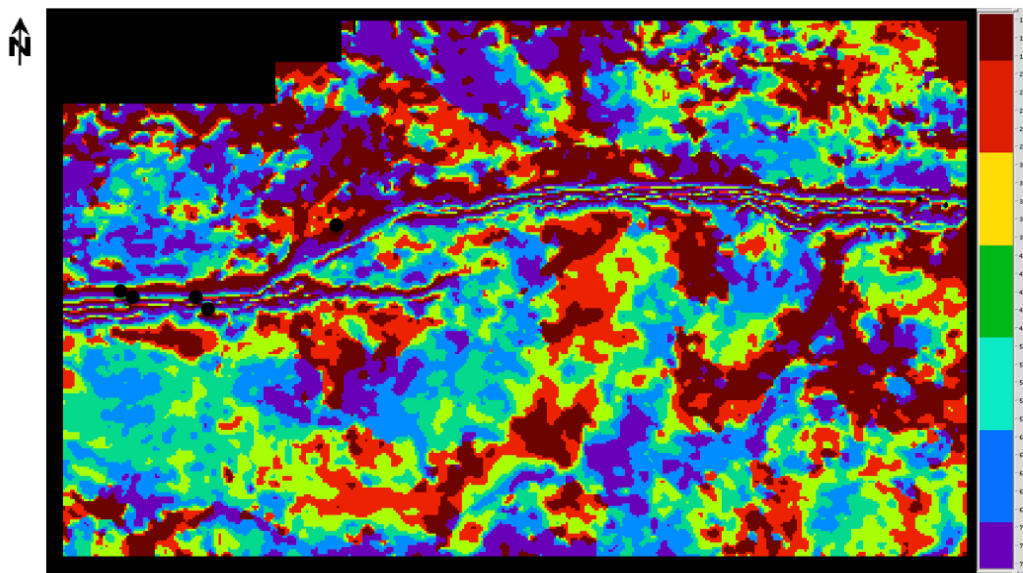


Figura 5.27 Bloque con 7 facies para el canal II, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: amarillo, 4: verde, 5: azul claro, 6: azul y 7: morado.

En el panel de facies se observa como la curva acumulativa tiene un comportamiento lineal con dos quiebres de izquierda a derecha, entre las 3 primeras neuronas (marrón y roja y amarilla) estas clases son las que resaltan la geometría del canal, el segundo tramo para las clases 4 y 5 (verde y azul claro) las facies que representan los depósitos de barra de canal y un último quiebre que corresponde a las últimas clases (azul oscuro y morado).

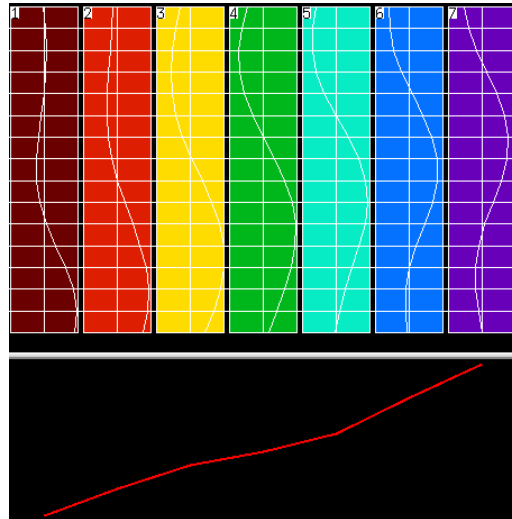


Figura 5.28 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal II).

Bloque canal III

Para el bloque del canal III el mapa de facies más representativo fue el de 7 clases (figura 5.29).

En el mapa se observa un canal meandriforme con alta sinuosidad correspondiente a un ambiente fluvial donde la tasa de depositación corresponde al Mioceno inferior (Burdigaliense), con dirección (local) este oeste, con una longitud (eje) de 7,7 km, de longitud promedio (entre los 9 arcos) de 0,909 km, un radio de curvatura (promedio) de 0,610 km y una anchura de cauce de 0,123 km .

El canal está caracterizado por las tres primeras facies (marrón, rojo y amarillo), la zona de barra de meandros por las clases 3 y 4 (amarillo y verde), se observa el aspecto circular que conservan la mayoría de los meandros, en donde los lóbulos son bastantes simétricos y el canal presenta uniformidad direccional. El canal presenta depósitos de desbordamiento de sedimentos, asociados a períodos de crecidas del río donde material fino fue depositado a los márgenes de los lóbulos del canal, estos depósitos están asociados a las mismas facies presentes en el canal (1, 2 y 3).

Los pozos P4 y P14 caen en la clase morada, como se mencionó en el análisis regional la producción de petróleo asociada a los mismos no es buena, estos pozos aunque están próximos a la zona de barra no están asociados a las clases que representan los depósitos de los arcos meandriformes.

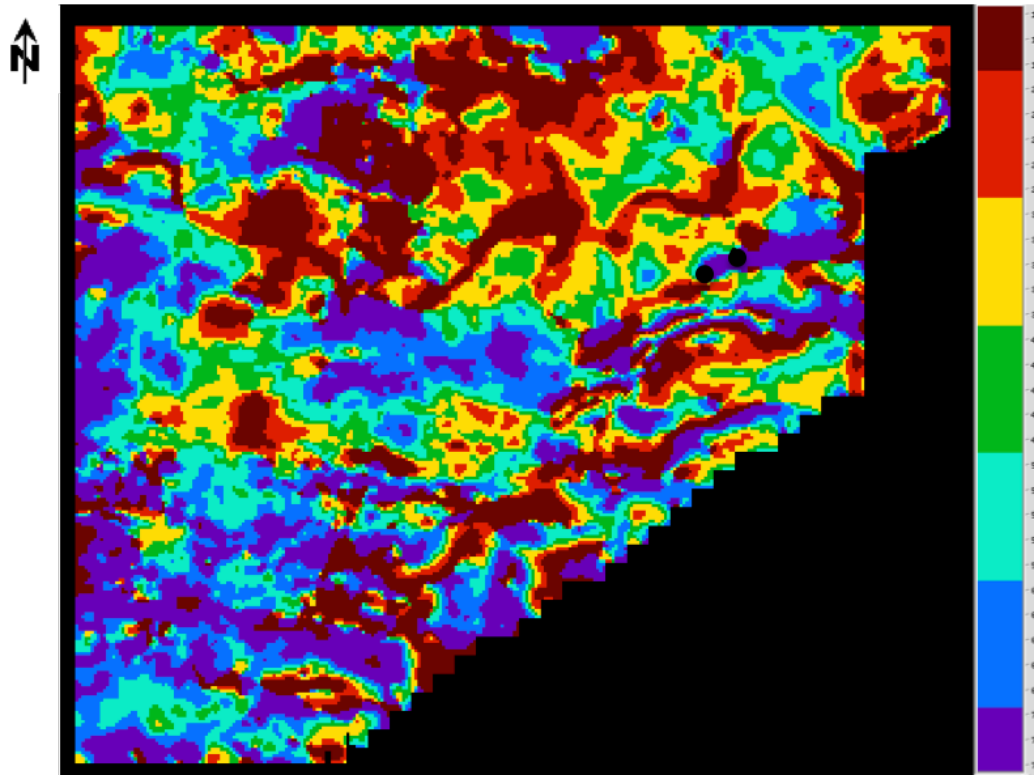


Figura 5.29 Bloque con 7 facies para el canal III, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: amarillo, 4: verde, 5: azul claro, 6: azul y 7: morado.

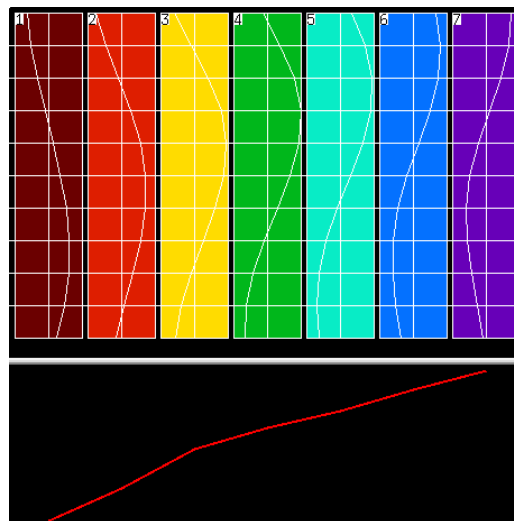


Figura 5.30 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal III).

En el panel de facies se observa como la curva acumulativa tiene cambio de pendiente entre las 3 primeras trazas (marrón, roja y amarilla) y las 4 vecinas (verde, azul claro, azul oscuro y morado), en donde las tres primeras son las que resaltan los rasgos estratigráficos del canal meandriforme.

Bloque canal IV

El mapa de 6 facies fue el más representativo para el bloque del canal IV (figura 5.31).

En el mapa se observa un meandro abandonado de ambiente fluvial que al igual que los otros canales corresponde al Mioceno inferior (Burdigaliense), con influencia (local) en dirección este oeste longitud de 1,5 km, con un radio de curvatura de 1,5 km y una anchura de cauce de 0,103 km .

En este bloque se observa una falla con dirección NE-SO, el meandro abandonado se encuentra en el bloque levantado de la falla, está representado por la sexta facie (morada). En la zona cóncava correspondiente a la barra de meandro, las facies presentes en orden predominante son la 4 (verde), la 5 (azul claro) y con menor presencia la 3 (verde claro). Con referencia al mapa donde se muestra la tendencia general de los pozos inferimos que esta zona no ha sido explorada.

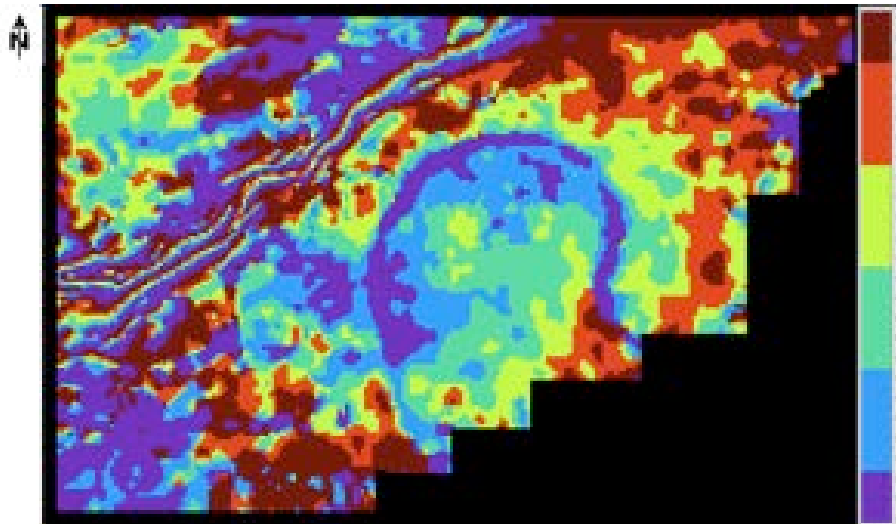


Figura 5.31 Bloque con 6 facies para el canal IV, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: verde claro, 4: verde, 5: azul y 6: morado.

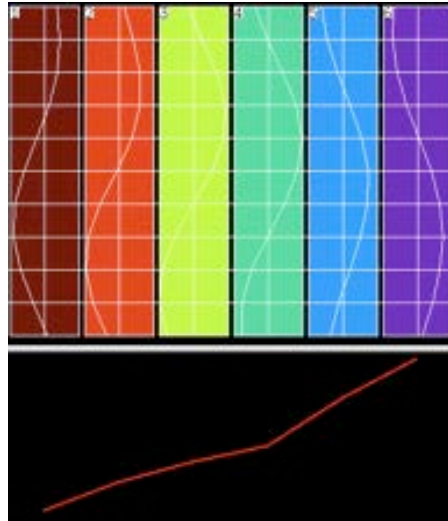


Figura 5.32 Neuronas y curva acumulativa del bloque de facies (canal IV).

Se observa en el panel de facies el comportamiento de la curva acumulativa, la misma presenta un inflexión que divide las trazas en dos grupos, el primero constituido por clases 1, 2, 3 y 4 (marrón, rojo, verde claro y verde) y un segundo grupo con las clases 5 y 6 (azul y morado), estas inflexiones muestran las variaciones laterales de la trazas dentro del intervalo de estudio.

En cada mapa de facies correspondiente a cada uno de los bloques de canal (I-II-III-IV) han sido reconocidos los rasgos de los canales, su geomorfología y dirección de depositación. Porras (2003) determinó para la secuencia Bur 3 “ambientes depositacionales que varían entre frente costero inferior y transicional-costal afuera”, pero la identificación de estos canales meandriformes tan bien preservados y con buena continuidad lateral ha permitido asociar esta secuencia a un nuevo ambiente de depositación: fluvio continental, dominando por ríos de alta sinuosidad. Estos canales representan una red fluvial meandriforme en donde la transición de las direcciones desde el Mioceno inferior hasta el presente muestran relación, si tomamos en cuenta la limitación de las trayectorias analizadas dentro del sector de estudio y las comparamos con los afluentes actuales notamos que los ríos activos muestran formas parecidas y atraviesan zonas próximas a la zona de estudio pero que al observarse ciertas extensiones de los mismos de manera aislada puede decirse que la transición del flujo posee cursos de agua (direcciones) locales claramente diferenciadas con respecto a los predominantes en toda la trayectoria y que solo pueden ser reconocibles regionalmente.

Para este período la cuenca es rellenada de sedimentos provenientes de tres fuentes principales: una al norte, en la serranía del Interior Oriental; otra ubicada al sur, en el cratón de Guayana y otra al oeste, en el cinturón alóctono de la cordillera de la Costa. Erlich y Barrett (1992) refieren que para el Mioceno temprano, la transpresión y compresión entre las placas del Caribe y Suramérica provocó el sobrecorrimento y levantamiento de la serranía del Interior y subsidencia flexural de la subcuenca de Maturín, favoreciendo la depositación de una espesa secuencia de sedimentos clásticos.

Los depósitos de origen fluvial identificados en los mapas de facies son: barras de meandro, rellenos de canal abandonado y depósitos de desbordamiento, constituidos por dos canales activos, dos canales abandonados y subambientes próximos.

Comparando los mapas de facies notamos que los rasgos de los canales I, II y III en los mapas están siendo resaltados con 3 clases y las barras de meandro son identificadas con 2 clases, mientras que el canal IV está delineado por una sola clase y en la zona cóncava del meandro por 3 clases. Asociando las respuestas de las facies en los canales y en las barras de meandro con la litología presente en este tipo de geometría estratigráfica donde la influencia de los sedimentos dentro de secuencia vertical se caracteriza por arenas en forma masiva con delgadas intercalaciones de lutita y constituyen los contrastes laterales resaltan: a) las facies de canal que corresponden a una superposición de secuencia de canal, con conglomerados y arenas, en una sección vertical mostrarían estructuras de afinamiento de granos hacia el tope mientras la base de estos cuerpos es erosiva y b) la litología característica atribuida a las barras de meandros son arenas media a gruesa con estratificación cruzada en la base con afinamiento de granos en sección vertical y además rizaduras y estratificación avanzada, hasta llegar al tope con una secuencia de lutitas y areniscas de grano fino que es continua en los diques, abanicos de rotura y llanuras de inundación.

5.4 ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS

Los atributos calculados para el cubo pstm 32 se visualizaron dentro de los límites de las mismas ventanas verticales definidas para los bloques I, II, III y IV. Se seleccionaron los atributos más representativos (por bloque) para generar el

volumen de facies sísmicas, primero se realizó una reducción de los datos utilizando análisis de componentes principales (ACP), con el fin de mejorar el resultado y por último se realizó la clasificación multiatributo a través del método jerárquico estableciendo el número de clases más adecuado con el fin de resaltar en las secciones sísmicas cambios estratigráficos y ambientes sedimentarios reconocibles en los cambios de facies.

Bloque canal I

Para este bloque se utilizaron cuatro atributos: impedancia acústica, envolvente de la señal, fase instantánea y frecuencia RMS ya que los mismos resaltaron los rasgos estratigráficos del canal I (figura 5.33).

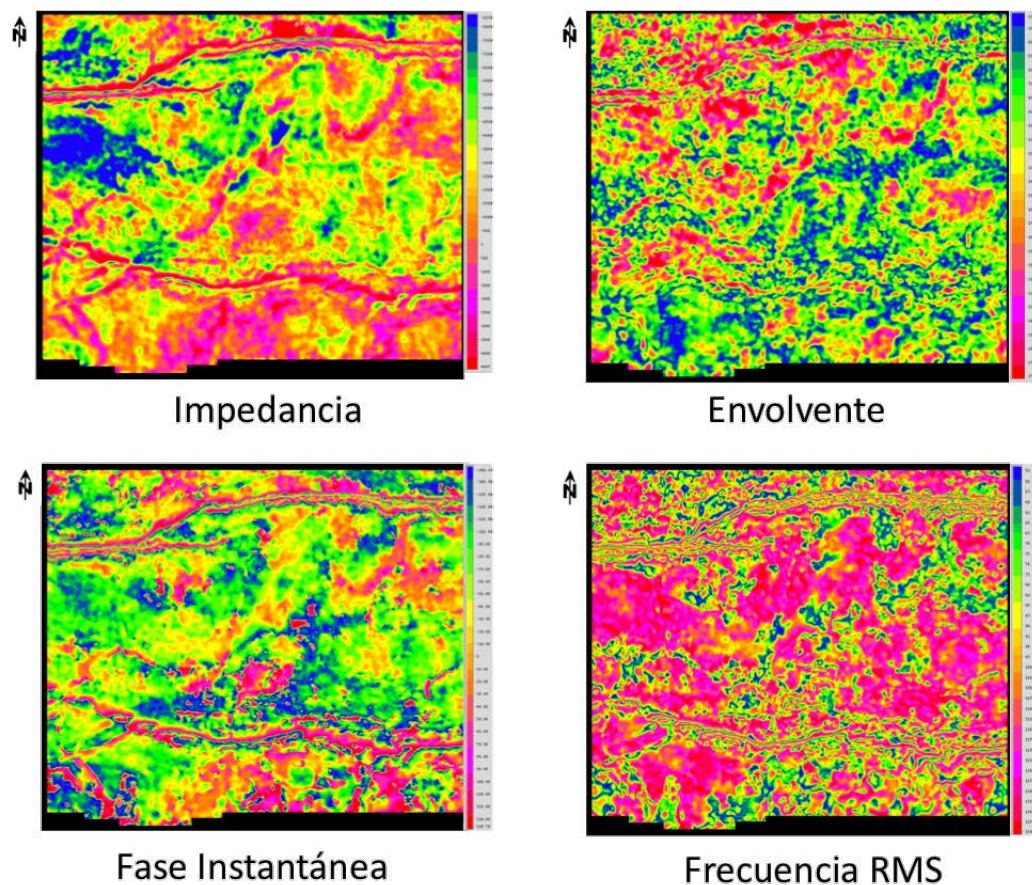


Figura 5.33 Bloques de atributos correspondientes al canal I.

Clasificación por ACP

La técnica de análisis de la componente principal genera un gráfico (figura 5.34) donde se puede observar que las 2 primeras componentes son mayores a 1 por lo tanto las mismas representan más señal que ruido, las mismas se usaron para la

clasificación del volumen de atributos, en cuanto a su representación numérica en la figura 5.35 se muestra el aporte combinado de las mismas, la componente 1 contribuye un 46,89%, la componente 2 un 33,19% y la combinación de ambas representa el 80,08%, este porcentaje justifica la mayor parte de la varianza de las variables originales donde la reducción del ruido ayudará a mejorar el reconocimiento aislado de los geocuerpos.

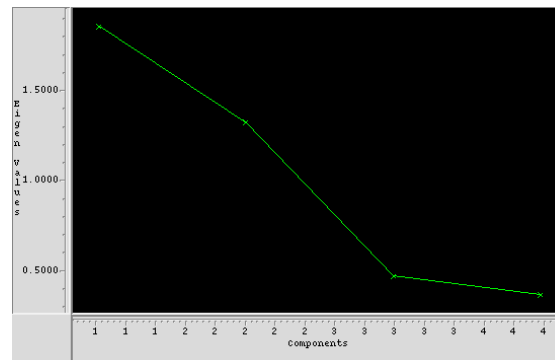


Figura 5.34 Gráfico de análisis ACP, muestra que para el bloque canal I deben usarse 2 componentes.

		eigenvalues	contributions	cumulated
1	component-1	1.875730	46.893241	46.893241
2	component-2	1.327814	33.195347	80.088588
3	component-3	0.451447	11.286177	91.374765
4	component-4	0.345009	8.625235	100.000000

Figura 5.35 Tabla de análisis ACP, muestra los valores propios, las contribuciones individuales y acumuladas con respecto a todas las muestras.

Método jerárquico

Gráfico cruzado

El gráfico cruzado (figura 5.36) muestra los colores de cada una de las 6 facies, en el eje “y” se encuentran los valores correspondientes a la frecuencia RMS y en el eje “x” los valores correspondientes a la impedancia acústica. En donde los contrastes entre las facies 2, 3 y 6 de colores rojo, verde y morada junto a sus respectivos centros, son las facies más representativas que describen con mayor eficacia los datos de los volúmenes de entrada.

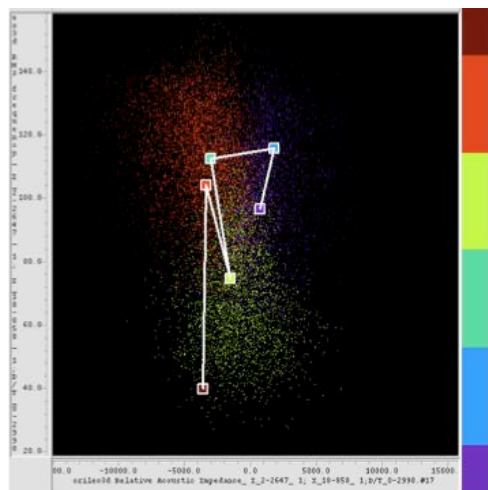


Figura 5.36 Gráfico cruzado de los 6 grupos definidos por sus centros de gravedad, entre la impedancia acústica y la frecuencia RMS, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: verde claro, 4: verde, 5: azul, 6: morado.

Debido a que la impedancia es una función de la densidad y la velocidad y estos parámetros dependen de la porosidad, litología, tipo de fluido y saturaciones dentro de las rocas, resulta de utilidad para predecir cambios contrastes entre límites de secuencia.

Secciones

Los ríos meandriformes pueden transportar una amplia gama de sedimentos, desde gravas hasta lodos, usando la relación descrita por Schumm (1981) entre la morfología del canal y el tipo de carga que transporta, podemos describir al canal I como un canal de alta sinuosidad dentro del grupo de canales más estrechos y profundos con carga en suspensión que transportan menos del 3% del total de la carga como carga tractiva.

En la figura 5.37 se muestra un corte del bloque de facies para el canal I junto con las 6 clases escogidas, dicho bloque se colocó sobre una sección de la sísmica (figura 5.38). En círculos rojos se resalta una anomalía donde se observa un corte lateral del depósito, ocupado por las facies de color verde claro y morado (facie 3 y 6), que por encontrarse en la zona de carga de fondo del canal podría asociarse con secuencia granodecreciente cuya granulometría de grano grueso usualmente está conformada por arenas y en algunos casos gravas.

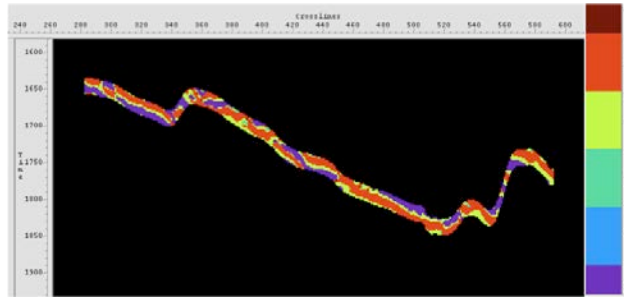


Figura 5.37 Sección del bloque canal I en dirección inline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: verde claro, 4: verde, 5: azul, 6: morado.

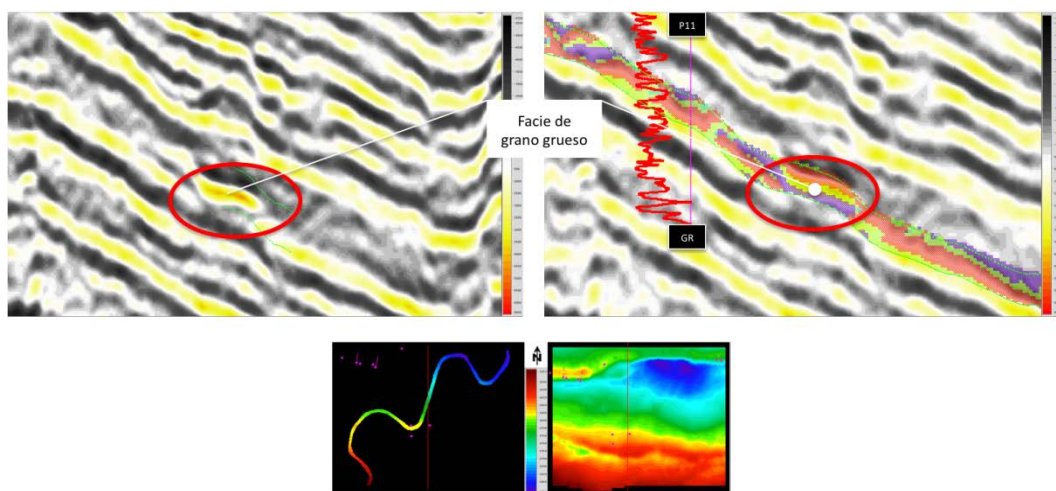


Figura 5.38 Bloque canal I incorporado en una sección inline del volumen original. Las escalas en las secciones sísmicas asocian a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestran las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

En la vista crossline (figura 5.40) se compara el bloque de facies con los registros gamma ray de los pozos P13 y P11, en él se observa que la facie roja cae en la zona lutítica, y la facie morada en la asociada a litología arenosa. Esta sección podría estar ubicada sobre la secuencia vertical litológica donde predomina alternancia de arenas y lutitas ya que al observar las facies notamos que no son continuas y la misma podría corresponder a la depositación durante el abandono progresivo del canal.

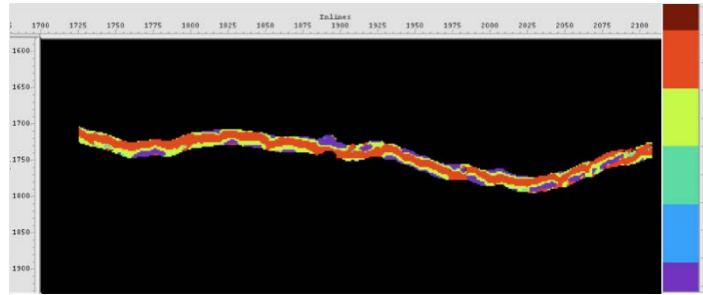


Figura 5.39 Sección del bloque canal I en dirección crossline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: verde claro, 4: verde, 5: azul, 6: morado.

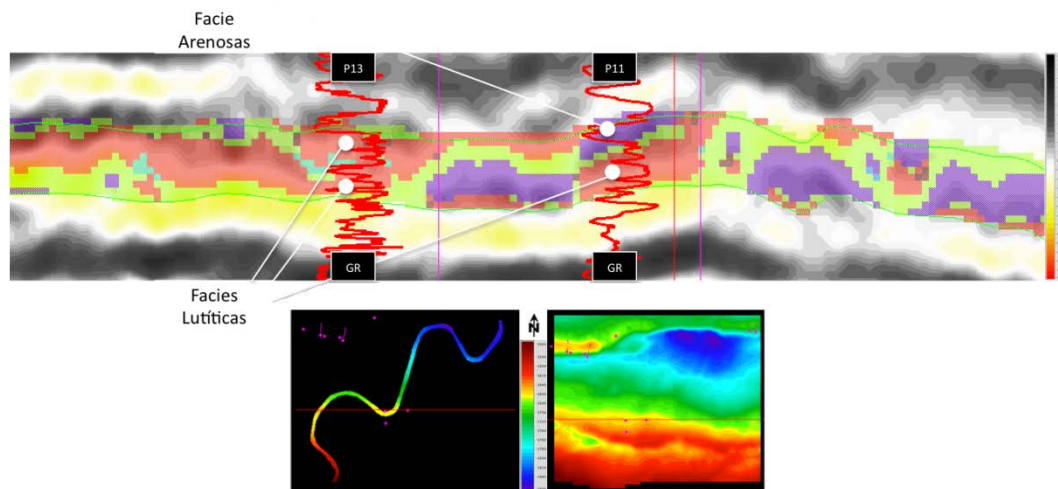


Figura 5.40 Bloque canal I incorporado en una sección crossline del volumen original. La escala en la sección sísmica asocia a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestran las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

Bloque canal II

En este bloque también se utilizaron cuatro atributos: frecuencia dominante, envolvente de la señal, impedancia acústica y fase instantánea (figura 5.41).

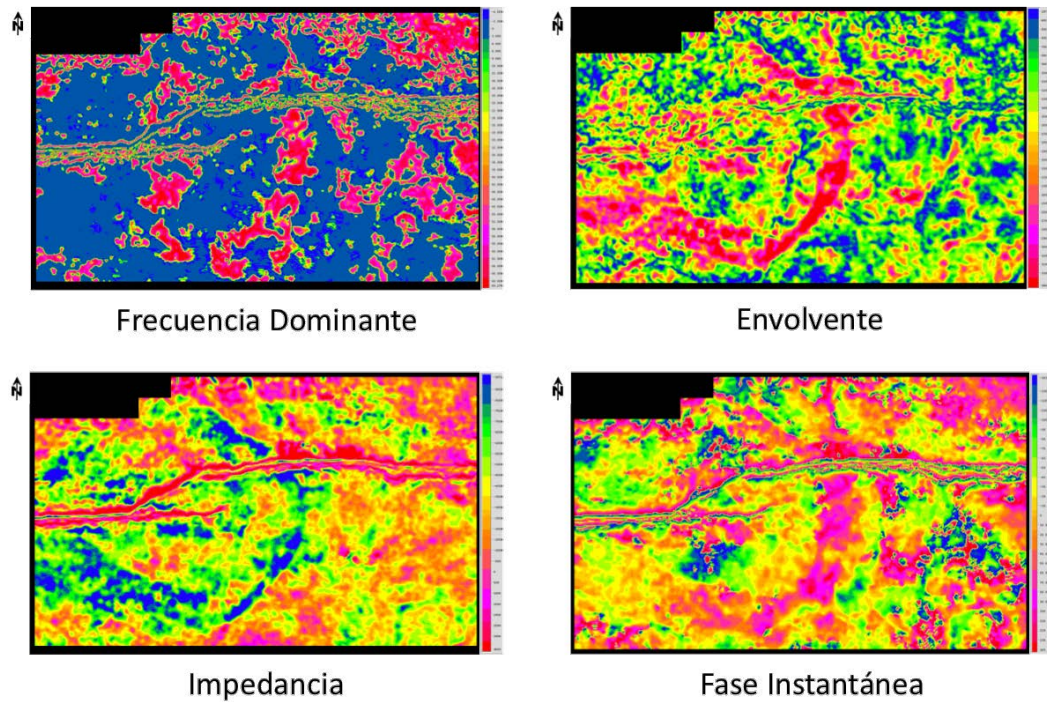


Figura 5.41 Bloques de atributos correspondientes al canal II.

Clasificación por ACP

La herramienta analítica sirvió para determinar que las 2 primeras componentes mayores a 1 (figura 5.42), proporcionan la información necesaria en procesos posteriores ya que la contribución acumulada de las mismas es de un 66,66% en donde la primera componente aporta 41% y la segunda 25,66% (figura 5.43). La discriminación de las otras componentes se hace con el fin de intentar disminuir el ruido con poca pérdida de la información original.

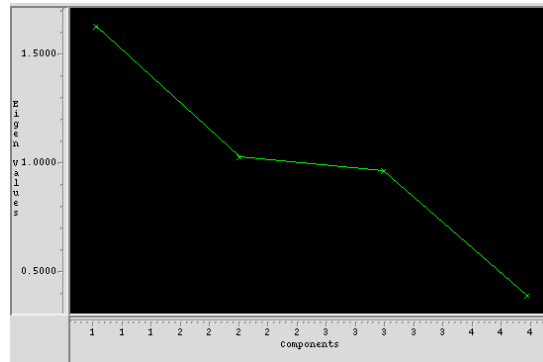


Figura 5.42 Gráfico de análisis ACP, muestra que para el bloque canal II deben usarse 2 componentes.

		eigenvalues	contributions	cumulated
1	component-1	1.640270	41.006742	41.006742
2	component-2	1.026468	25.661689	66.668430
3	component-3	0.960482	24.012039	90.680469
4	component-4	0.372781	9.319531	100.000000

Figura 5.43 Tabla de análisis ACP, muestra los valores propios, las contribuciones individuales y acumuladas con respecto a todas las muestras.

Gráfico cruzado

El gráfico cruzado (figura 5.44) muestra los colores de cada una de las 6 facies, en el eje “y” se encuentra los valores correspondientes a la envolvente de la señal y en el eje “x” los valores correspondientes a la impedancia acústica. El gráfico representa la distribución de las facies que definen el volumen para el canal II, en donde las facies 4, 3 y 1 son las más representativas.

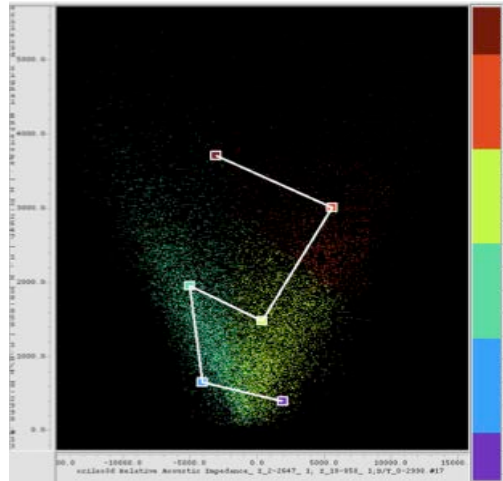


Figura 5.44 Gráfico cruzado de los 6 grupos definidos por sus centros de gravedad, entre la impedancia acústica y la envolvente de la señal, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: verde claro, 4: verde, 5: azul, 6: morado.

La envolvente de la señal es sensible a cambios en la impedancia acústica y por lo tanto a contrastes de litología, de porosidad y presencia de hidrocarburos en capas delgadas.

Secciones

En la figura 5.46 se observa la sección sísmica en dirección inline del bloque de facie correspondiente al canal II en donde se resalta una anomalía de amplitud y una inflexión en el reflector que la contiene, la misma la representa la facie roja y al igual que en el bloque anterior por su disposición dentro del intervalo del canal se infiere que podría estar correspondiendo a los sedimentos de la carga de fondo.

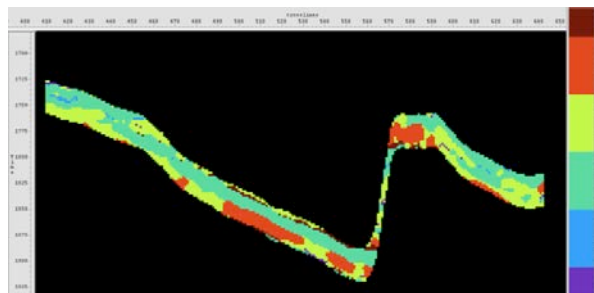


Figura 5.45 Sección del bloque canal II en dirección inline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: verde claro, 4: verde, 5: azul, 6: morado.

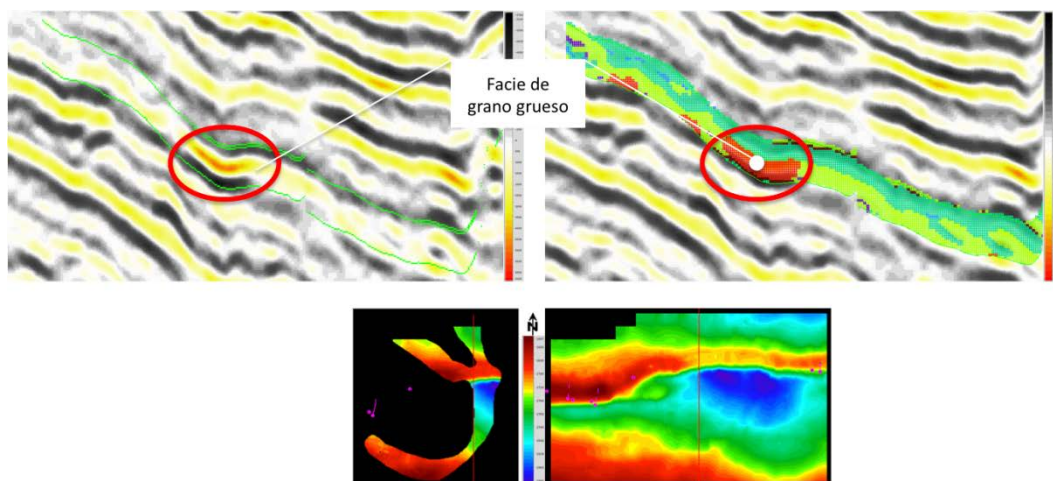


Figura 5.46 Bloque canal II incorporado en una sección inline del volumen original. Las escalas en las secciones sísmicas asocian a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestran las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

En la dirección crossline (figura 5.48) se observa otra anomalía con inflexión del reflector en la parte más baja del depósito de canal; en ambos bloques destacan el predominio de la clase amarilla y verde, si tanto en la sección inline como en la crossline asociamos la facie roja a carga de fondo entonces las dominantes serían las facies que se depositaron posterior a las de grano grueso, dichos sedimentos en suspensión (constituidos por arena fina, limo y arcilla) se depositaron en las barras de meandros en forma de tapones de arcilla posterior al estrangulamiento. En el canal II, la facie más profunda (facie roja) gana volumen y la relación entre las mismas en algunos sectores del bloque aumenta. Según los grupos propuestos por Schumm (1981) podríamos asociar la carga del canal II con un sistema de carga mixta, caracterizados por canales más anchos, de profundidad intermedia, con un transporte de entre 3% y 11% del total como carga tractiva.

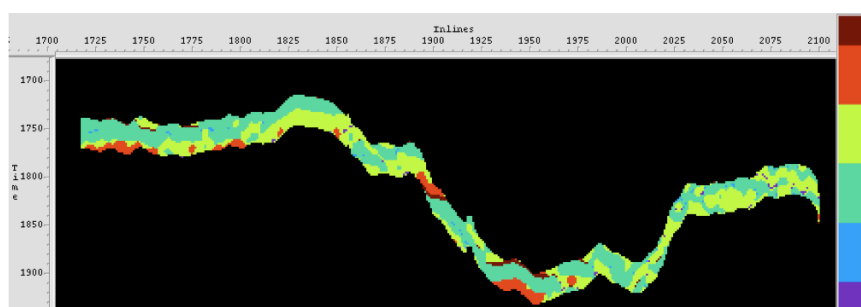


Figura 5.47 Sección del bloque canal II en dirección crossline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: verde claro, 4: verde, 5: azul, 6: morado.

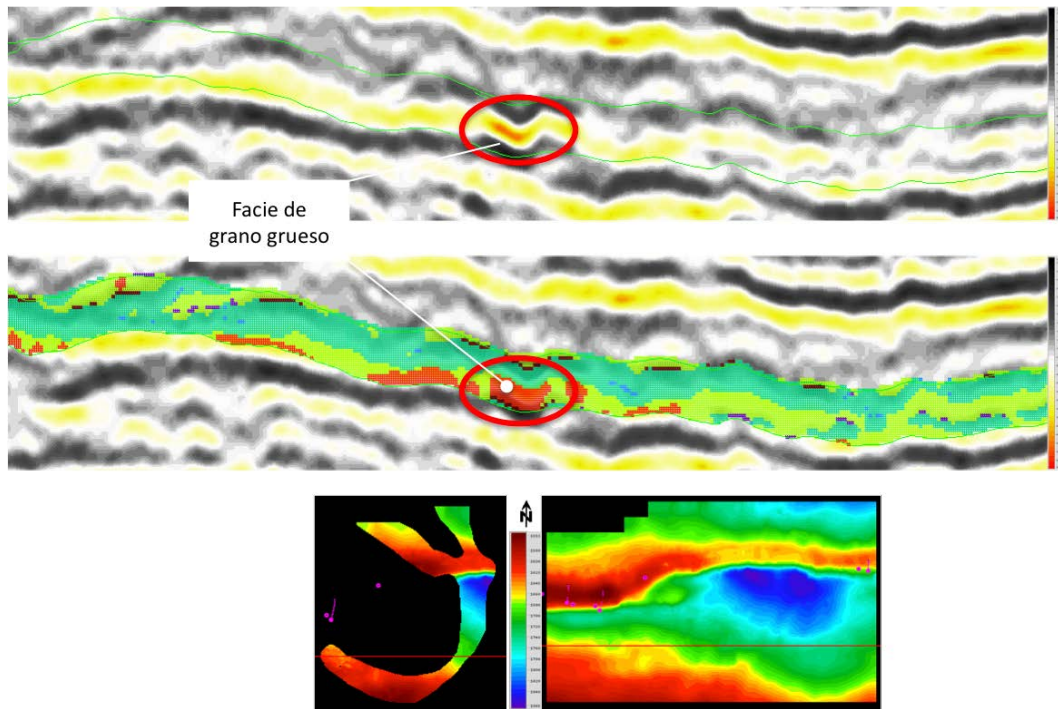


Figura 5.48 Bloque canal II incorporado en una sección crossline del volumen original. Las escalas en las secciones sísmicas asocian a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestran las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

Bloque canal III

Los atributos más representativos en este bloque fueron: frecuencia dominante, envolvente de la señal, impedancia acústica, fase instantánea y frecuencia RMS (figura 5.49).

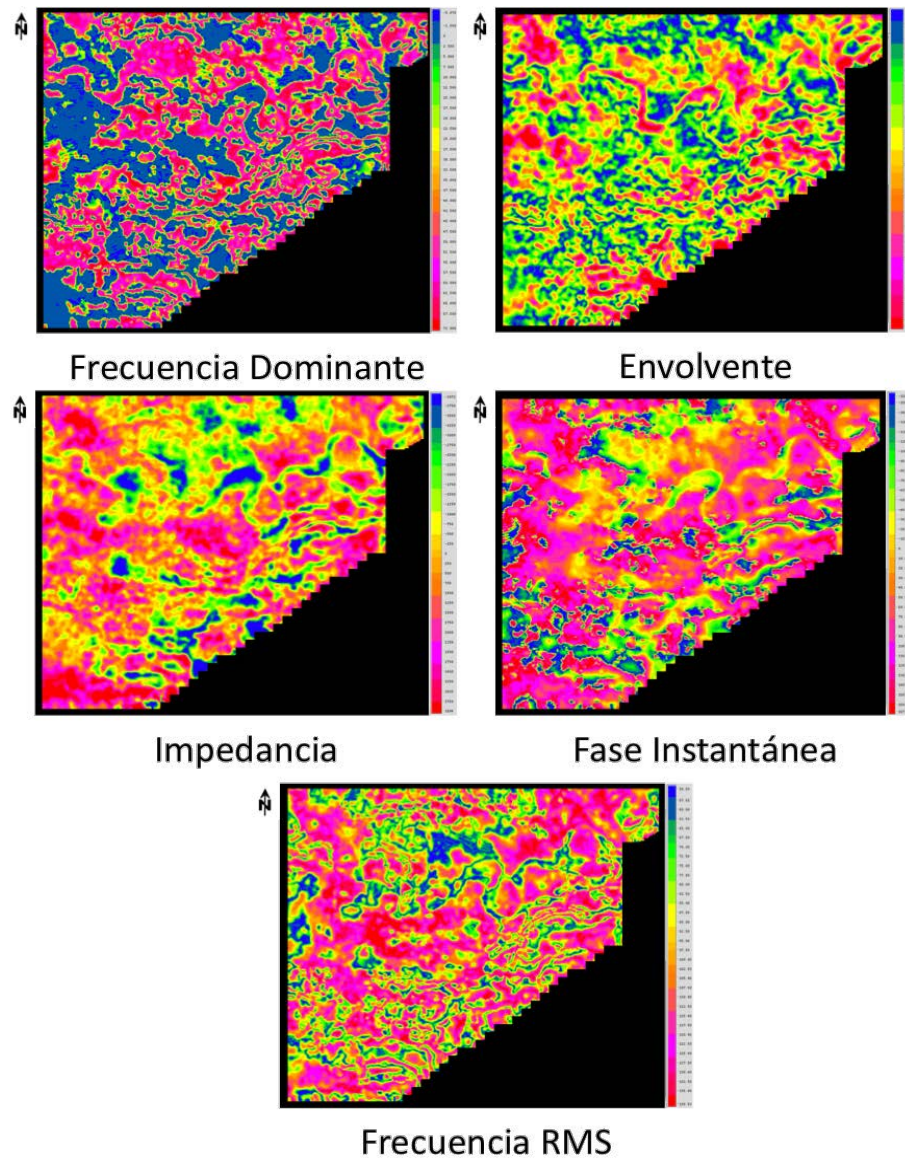


Figura 5.49 Bloques de atributos correspondientes al canal III.

Clasificación por ACP

La reducción de componentes principales muestra que las 2 primeras componentes obtenidas como combinaciones lineales de las variables originales tienen autovalores mayores a 1 (figura 5.50) y explican en un 67,14% la

variabilidad, la primera componente aporta un 35,37% y la segunda un 31,77% (figura 5.51).

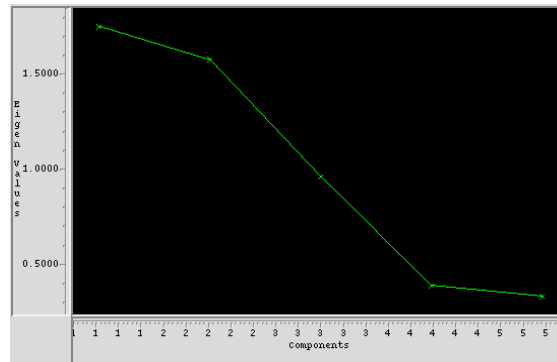


Figura 5.50 Gráfico de análisis ACP, muestra que para el bloque canal III deben usarse 2 componentes.

		eigenvalues	contributions	cumulated
1	component-1	1.768625	35.372502	35.372502
2	component-2	1.588521	31.770425	67.142928
3	component-3	0.961211	19.224222	86.367150
4	component-4	0.370611	7.412221	93.779371
5	component-5	0.311031	6.220629	100.000000

Figura 5.51 Tabla de análisis ACP, muestra los valores propios, las contribuciones individuales y acumuladas con respecto a todas las muestras.

Gráfico cruzado

El gráfico cruzado (figura 5.52) muestra los colores de cada una de las 8 facies, en el eje “y” se encuentra los valores correspondientes a la frecuencia RMS y en el eje “x” los valores correspondientes a la impedancia acústica. Al aumentar el número de clases aumenta la dispersión de los datos dentro de la distribución para cada facie, es por esto que en el gráfico se observan un solapamiento de centros mayor al de los gráficos anteriores, la escogencia de clases para el bloque del canal III (8 clases) se basó en que al experimentar con números de clases menores aumentaba la dificultad de la interpretación ya que no se definían secuencias consecutivas entre capas en las secciones correspondientes. Las facies más representativas son la 4, 6 y 3 de colores verde claro azul y naranja.

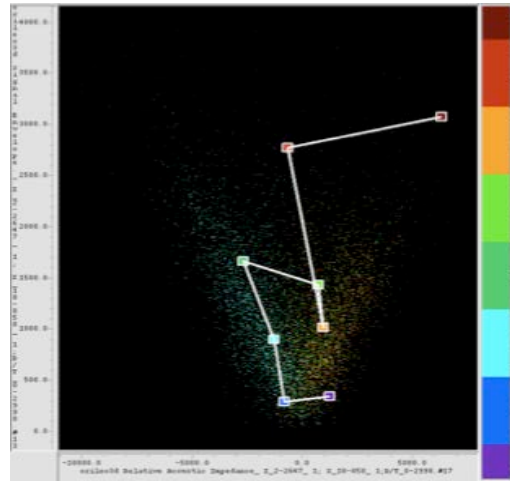


Figura 5.52 Gráfico cruzado de los 8 grupos definidos por sus centros de gravedad, entre la impedancia acústica y la frecuencia RMS, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: naranja, 4: verde claro, 5: verde, 6: azul claro, 7: azul oscuro, 8: morado.

Secciones

Para el bloque del canal III en dirección inline (figura 5.53 y figura 5.54) se observa como las facies en orden ascendente corresponde en primer lugar a la de color naranja, facie bastante continua, suprayacente a ésta se depositan paralelamente la facie verde claro, la facie azul y la facie menos continua: la facie verde oscuro; aislando a la facie o facies con carga de fondo basado en el principio de que se encuentra a mayor profundidad, nos resalta en primer lugar a la facie naranja y quizás hasta la facie posterior la facie verde claro.

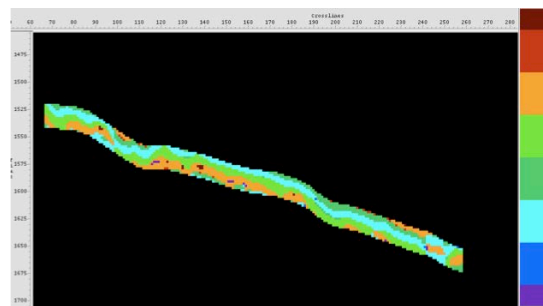


Figura 5.53 Sección del bloque canal III en dirección inline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: naranja, 4: verde claro, 5: verde, 6: azul claro, 7: azul oscuro, 8: morado.

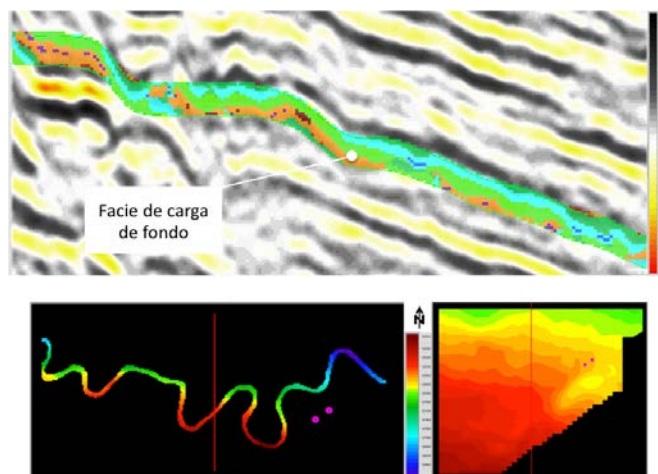


Figura 5.54 Bloque canal III incorporado en una sección inline del volumen original. La escala en la sección sísmica asocia a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestran las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

En la dirección crossline (figura 5.55 y figura 5.56) se observa invertida la secuencia vertical que en teoría debería corresponder a una depositación granodecreciente, pero al contrario la zona próxima al pozo P14 presenta una secuencia donde la depositación de sedimentos finos se observa en la base del bloque representada por las facies naranja y verde claro y por encima de estas se observa la facie azul en la cual el registro gamma ray tiene una respuesta que puede asociarse con litología arenosa. Como se mencionó en el análisis del mapa de facies calculado por medio de los métodos neuronales (figura 5.29), los pozos P4 y P14 caen en una clase (morada) que no está asociada a las clases que representan los depósitos de los arcos meandriformes, pero al observar el comportamiento de las facies para la sección del bloque, y la uniformidad en las otras zonas de barras de meandro, se propone una interpretación alternativa que contradice la secuencia clásica propuesta por Walker (1979): la sección del bloque de facies cercana al pozo P14 se encuentra colindante tanto a la zona cóncava como a la zona convexa (de ambos lados) de dos de los arcos sucesivos del canal, este fenómeno pudiera ser el responsable de la depositación de la carga transportada en suspensión (arena fina, limo y arcilla) en la zona de carga de fondo producto de los choques entre material de depósito y el de alta descarga.

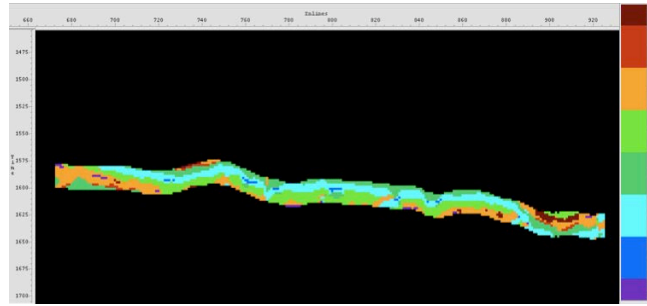


Figura 5.55 Sección del bloque canal III en dirección crossline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: rojo, 3: naranja, 4: verde claro, 5: verde, 6: azul claro, 7: azul oscuro, 8: morado.

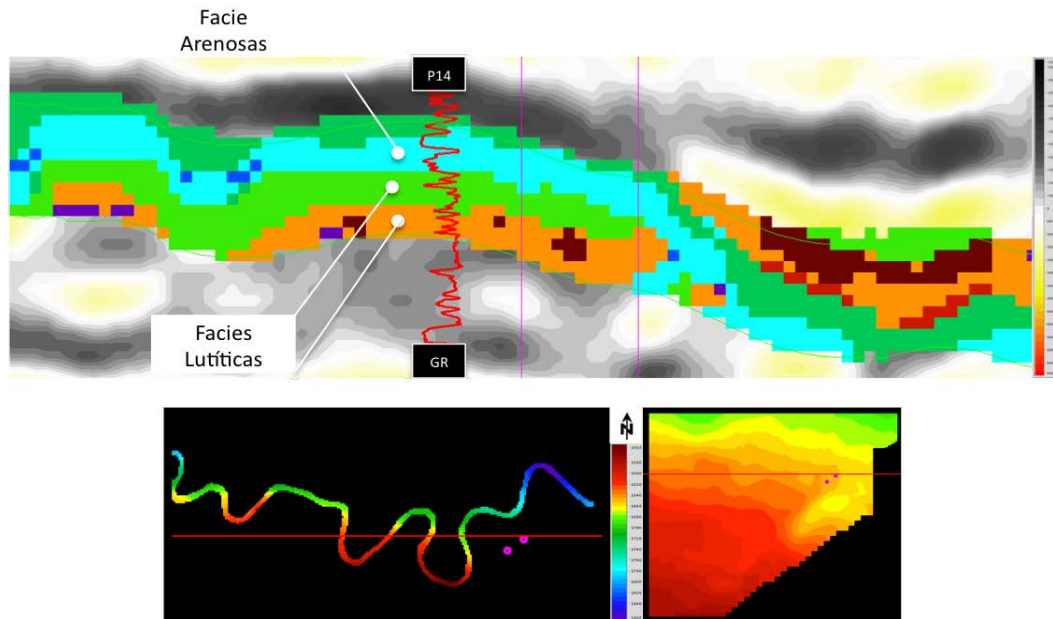


Figura 5.56 Bloque canal III incorporado en una sección crossline del volumen original. La escala en la sección sísmica asocia a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestra las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

Bloque canal IV

En el bloque IV se seleccionaron los atributos: frecuencia dominante, impedancia acústica, fase instantánea y frecuencia RMS (figura 5.57).

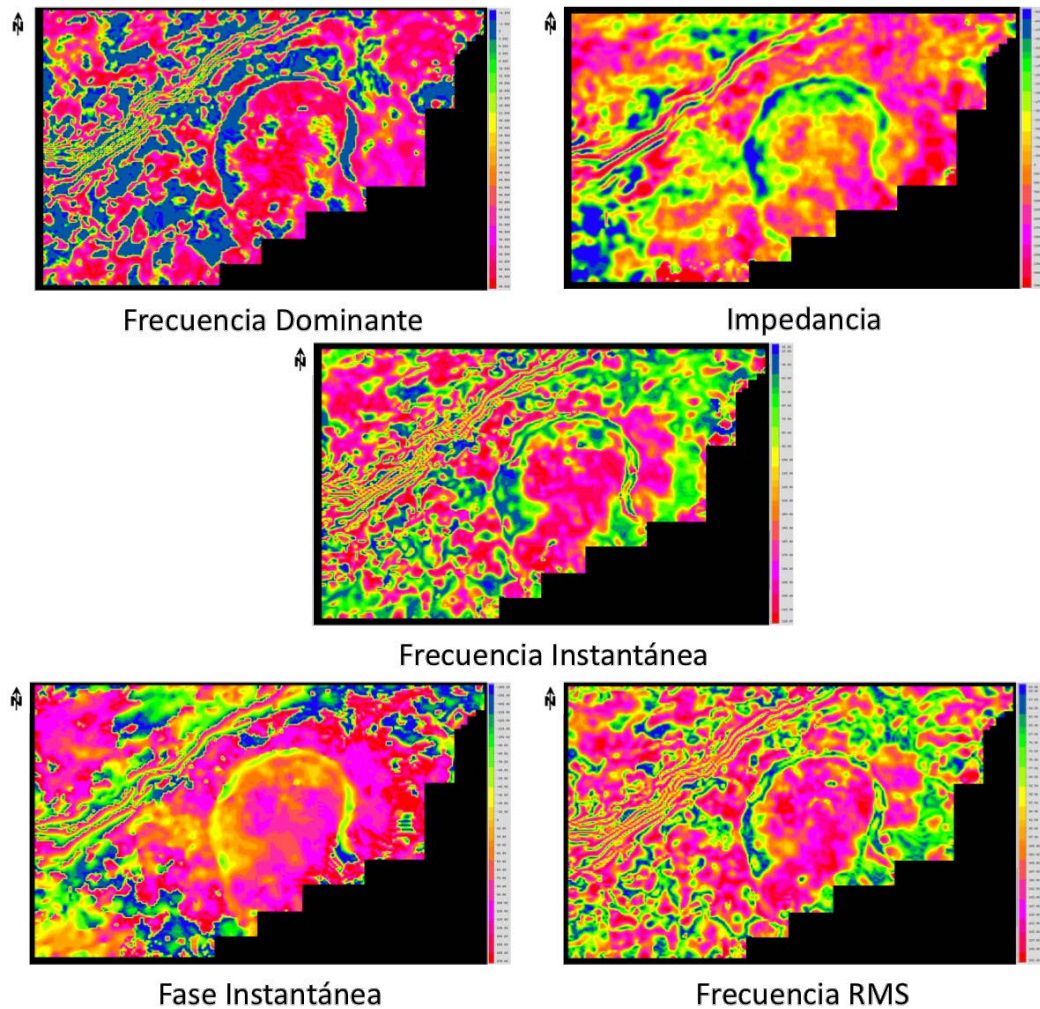


Figura 5.57 Bloques de atributos correspondientes al canal IV.

Clasificación por ACP

Esta técnica permitió identificar a las componentes que explican la mayor parte de la variabilidad total contenida en los datos, reduciendo la dimensión a 2 componentes con autovalores mayores a 1 (figura 5.58), en donde la combinación del aporte es de 75,36% distribuido en un 43% para la primera y un 32,36% para la segunda (figura 5.59).

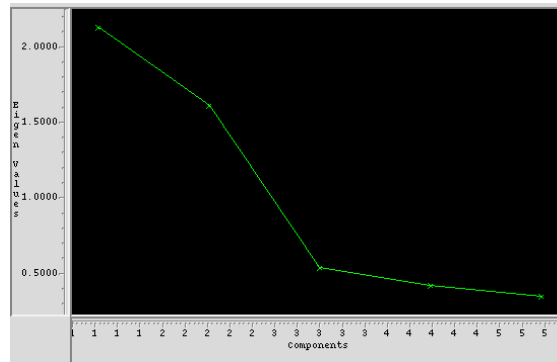


Figura 5.58 Gráfico de análisis ACP, muestra que para el bloque canal IV deben usarse 2 componentes.

		eigenvalues	contributions	cumulated
1	component-1	2.150184	43.003682	43.003682
2	component-2	1.618083	32.361655	75.365337
3	component-3	0.514765	10.295298	85.660635
4	component-4	0.396563	7.931263	93.591898
5	component-5	0.320405	6.408102	100.000000

Figura 5.59 Tabla de análisis ACP, muestra los valores propios, las contribuciones individuales y acumuladas con respecto a todas las muestras.

Gráfico cruzado

El gráfico cruzado (figura 5.60) muestra los colores de cada una de las 4 facies, en el eje “y” se encuentran los valores correspondientes a la frecuencia RMS y en el eje “x” los valores correspondientes a la impedancia acústica. Para el bloque IV un número mayor de facies representaba redundancia de los datos en la clasificación, en el gráfico se observa que las clases más representativas son la 3 de color verde, la 2 de color amarillo y la 1 de color marrón.

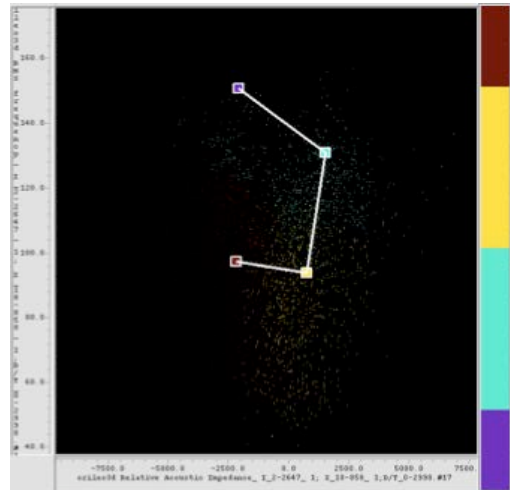


Figura 5.60 Gráfico cruzado de los 4 grupos definidos por sus centros de gravedad, entre la impedancia acústica y la frecuencia RMS, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: amarillo, 3: verde, 4: morado.

Secciones

Para el análisis del bloque de facies del canal IV no se contaban con ningún pozo cercano y no destacan rasgos en la sección sísmica, el reconocimiento de las facies se asocia con el tipo de carga transportada, donde se reconocen en la sección inline (figura 5.61 y figura 5.62) las facies verde y amarilla como la carga de fondo y por encima de éstas una de color marrón que correspondería a la de facies de transporte en suspensión, clasificándolo en los grupos propuestos por Schumm (1981) como un canal con carga en suspensión, de acuerdo a la relación de alta sinuosidad y baja anchura del caudal.

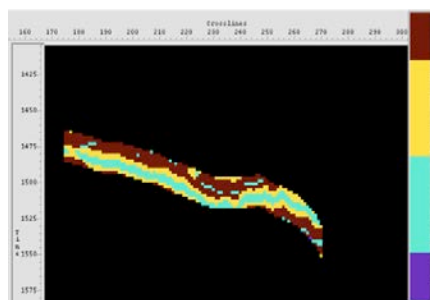


Figura 5.61 Sección del bloque canal IV en dirección inline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: amarillo, 3: verde, 4: morado.

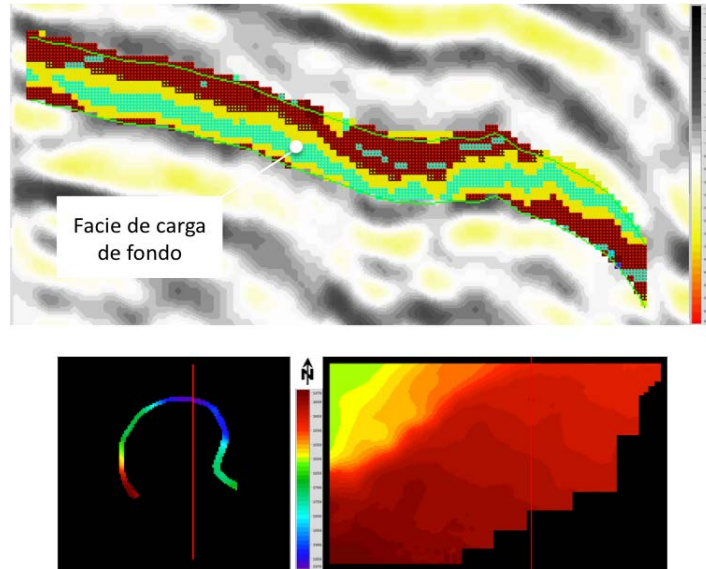


Figura 5.62 Bloque canal IV incorporado en una sección inline del volumen original. La escala en la sección sísmica asocia a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestra las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

En la sección con dirección crossline (figura 5.63 y figura 5.64) se observa la morfología y las dimensiones de las facies. Las facies verde y amarillo se encuentran interconectadas, ocupan la parte baja del bloque, presentan alta continuidad horizontal que podría corresponder a la presencia de cuerpos arenosos tabulares seguida hacia la parte más alta por la facie de color marrón, también continua, posiblemente cubierta por limos y arcillas, según la secuencia de litofacies, típica, granodecreciente, propuesta por Walker (1979).

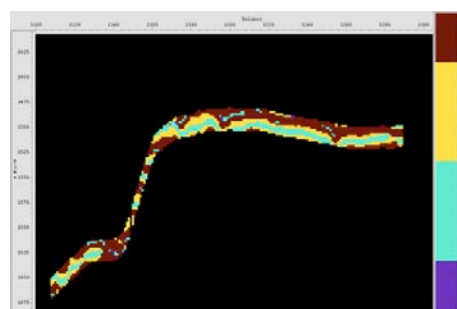


Figura 5.63 Sección del bloque canal IV en dirección crossline, cada clase está asociada a un color y un número, en orden ascendente 1: marrón, 2: amarillo, 3: verde, 4: morado.

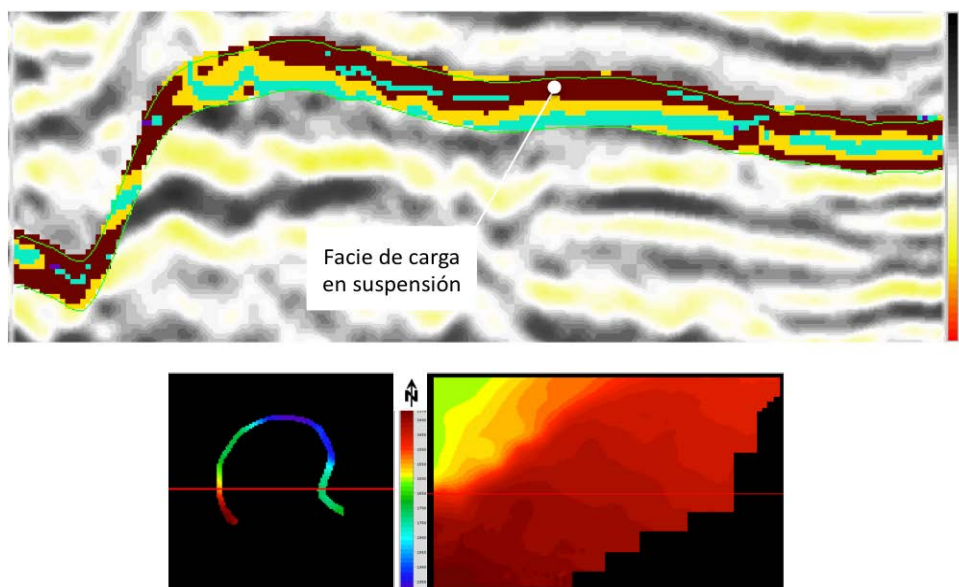


Figura 5.64 Bloque canal IV incorporado en una sección crossline del volumen original. La escala en la sección sísmica asocia a las trazas de polaridad positiva con el color rojo y las de polaridad negativa con el color negro; mientras que la escala de los mapas muestra las variaciones en profundidad (ms) de los intervalos, los valores más oscuros (rojo) corresponden a zonas someras y los valores más claros (azul) a zonas deprimidas.

La configuración de las facies sísmicas generadas a partir del agrupamiento jerárquico de atributos en los intervalos de los sistemas meandriformes, comparados con registros gamma ray nos indican que en dos de los canales (canales I y II) encontramos el patrón secuencial simple (propuesta por Walker, 1979) y que en el canal III se observa una alteración del mismo que puede deberse a rasgos particulares de los procesos inherentes del sistema fluvial.

El análisis de las secciones de los bloques de facies con el uso de múltiples volúmenes de atributos, aumenta la información disponible para la clasificación de facies, permitiendo analizar detalladamente los contrastes litológicos, proporción, espesor y continuidad de capas de la arquitectura interna del cuerpo del depósito, la finalidad de combinar atributos sísmicos en un único volumen es identificar las facies contrastantes en unidades delgadas dentro del intervalo de estudio.

La interpretación de facies en el intervalo de los bloques para los cuatro canales en las secciones sísmicas se realizó asociando y comparando la arquitectura estratigráfica de dichos canales con los modelos de clasificación, deposición y sedimentación fluvial descritos por Schumm (1981) y Walker (1979).

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El mapa regional de 8 clases de la sección Bur 3, correspondiente a la formación Oficina del Mioceno temprano, presenta una tendencia general asociada a los cambios laterales de las trazas influenciados principalmente por lineamientos estructurales, donde fue posible segmentar concordantemente las facies sísmicas en sentido este-oeste con los bloques de las principales fallas de la zona, responsables del sistema de entrapamiento de hidrocarburos de alta productividad.
- La principal diferencia entre los enfoques de aprendizaje supervisado y no supervisado de las redes neuronales se basan en los conocimientos previos del área y los datos disponibles. Usando como referencia los datos de producción de un pozo representativo como dato de entrada se pudo identificar cuatro zonas con características sísmicas similares que satisfacen la tendencia general con que se ha venido explotando el potencial de producción, basado en la componente estructural del campo.
- Dentro de la secuencia Bur 3 se han reconocido rasgos estratigráficos que representan una red fluvial meandriforme. Su geomorfología indica que el ambiente de depositación para esta sección tiene influencia fluvio continental, dominando por ríos de alta sinuosidad.
- En los mapas de clasificación de facies sísmicas, mediante el uso de redes neuronales se reconoció la geometría externa que define a los 4 canales fluviales, debido a la alta sensibilidad del método a las variaciones estratigráficas laterales en los intervalos de 20 ms paralelos al horizonte Bur 4.
- La metodología multi-atributos basada en agrupamiento jerárquico de atributos sísmicos, permitió distinguir la tendencia litológica presente en los depósitos de canal. Las secciones de los bloques analizados dieron información de la proporción y distribución vertical de las facies sísmicas asociadas al patrón de depositación secuencial de los canales fluviales.

- El utilizar distintas metodologías de clasificación de facies sísmicas (clasificación neuronal y jerárquica) sobre los mismos datos sirvió como complemento en la interpretación predictiva basada en técnicas no convencionales que se han venido desarrollado para la caracterización sísmica de yacimientos, adicionalmente permitió delinear la geometría externa y la arquitectura interna de los geocuerpos encontrados. Dichas técnicas presentan flexibilidad en los siguientes aspectos: no tienen limitaciones sobre número de clases, ya que es un proceso iterativo que debe ser ajustado por el intérprete, pueden ser utilizadas en particiones o volúmenes sísmicos 3D, el método jerárquico no condiciona el número ni tipo de atributos como dato de entrada, y en general los procesos de clasificación se realizan en un tiempo corto de cómputo lo que agiliza la evaluación y comparación entre múltiples pruebas.
- En este trabajo se demuestra que los métodos neuronales y jerárquicos son herramientas útiles para la clasificación de facies sísmicas en el campo ya que reflejan eficientemente las variaciones laterales y verticales de las trazas sísmicas, que permiten reconocer zonas que ofrecen posibilidades de desarrollo en campos maduros como el campo Oritupano-Leona, el cual actualmente se encontraba sin expectativas de producción.

6.2 RECOMENDACIONES

- Probar nuevamente el método de entrenamiento supervisado usando pozos de alta producción que estén ubicados en zonas menos discontinuas es decir menos próximos a las zonas de fallas.
- Actualizar los estudios estratigráficos-secuenciales específicamente en la secuencia inferior de la formación Oficina correspondiente al Mioceno temprano, ya que nuevas evidencias en los datos sísmicos indican que los ambientes continentales específicamente los fluviales meandriformes poseen una importante influencia en dicha unidad del sistema.
- Realizar los estudios petrofísicos pertinentes con el fin de cuantificar las propiedades de la roca y fluidos en los depósitos de canales fluviales.
- Comparar los mapas de sismofacies realizados en este estudio con mapas de electrofacies, con el fin de verificar la asociación de las respuestas de las facies sísmicas con las facies geológicas.

BIBLIOGRAFÍA

Abreu V., Savini R., Azalgará C., Picarelli A., Grosso S. y Vallejo E. (2001). Sequence stratigraphic evolution of the Miocene of Eastern Venezuela Basin: Interplay of Eustatic Cycles and Foredeep Tectonics, 2001 AAPG Annual Meeting Abstracts, Denver, Colorado, AAPG Bulletin, (V. 85, No. 13).

Aldas, J. y Uriel, E. (2006). Análisis multivariante aplicado: Aplicaciones al marketing, investigación de mercados, economía, dirección de empresas y turismo. Publicado por Thomson, España. 531 p.

Alviarez G. y Rojas F., (2007). Modelo sedimentológico de la secuencia Cretácica en el campo el Furrial, de la sub cuenca oriental de Venezuela al norte del estado Monagas. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Arellano R., (2006). Integración de datos sísmicos y de pozos para la generación de un modelo estático de las arenas p-r-s del campo Oritupano c, Monagas-Venezuela. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas. Venezuela.

Arnstein R., Cabrera E., Russomanno F. y Sanchez H., (1985). Revisión estratigráfica de la cuenca Oriental de Venezuela. Mem, VI Congr. Geol. Venez., Caracas, Soc. Venez. Geol. (1): 41-69 p.

Aymard R., Pimentel L., Eitz P., Lopez P., Chaouch A., Navarro J., Mijares J. y Pereira J., (1990). Geological Integration and Evaluation of Northern Monagas, Eastern Venezuelan Basin. The Geological Society.

Barnes, D. y Roche B., (1997). A behavior-analytic approach to behavioral reflexivity. Psychological Record, 47, 543-572.

Bertona L., (2005). Entrenamiento de redes neuronales basado en algoritmos evolutivos. Trabajo de Grado en ingeniería informática. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

Bose N. y Liang P., (1996). Neural network fundamentals with graphs, algorithms, and applications. McGraw-Hill, Inc.

Brown A., (2001). Understanding Seismic Attributes. Geophysics , 66 (1), 47-48

Burke K., Cooper C., Dewey J., Mann P. y Pindell J., (1984). Caribbean tectonics and relative plate motions. En: Bonini, Hargraves R. y R. Shagam, eds, The Caribbean South American plate boundary and regional tectonics; Geological Society of America Memoirs 162. 31-63 pp.

Chen Q. y Sydney S., (1997). Seismic Attribute Technology for reservoir forecasting and monitoring. Houston, Texas: Western Atlas International Inc.

Coléou T., Poupon M. y Azbel K., (2003). Interpreter's Corner Unsupervised seismic facies classification: A review and comparison of techniques and implementation: The Leading Edge, 22, 942-953.

Corrales I., Rosell J., Sanches de la Torre L., Vera J. y Vilas L., (1977). Estratigrafía. Ed. Rueda, 718 pp.

Delgado J., (s.f.). Caracterización Geológica y Geofísica de la Formación Escandalosa pertenecientes al Campo Borburata, Sub-Cuenca Barinas”. Trabajo Especial de Grado, no publicado. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Di Croce B.; Bally A. y Vail, P., (1999). Sequence stratigraphy of the eastern Venezuelan Sedimentary Basins of the World. Caribbean Basins, vol. 4, Chapter 16. 419-428, 435-451, 455-468, 471-476 p.

Erlich y Barrett (1992). "Petroleum Geology of the eastern Venezuela foreland basin" Memoria 55: 341-362.

Epoca, (1999). A Biostratigraphic Appraisal of Selected Sections from Four Wells in the Oritupano-Leona Area: LG-113, ADS-104, ORI-75 and ORI-347, Reporte Interno Pérez Companc, 29 p.

Eva A.; Burke K. y Mann P., (1989). Four-phase Tectonostratigraphic of the Southern Caribbean. Marine and Petroleum Geology, vol. 6, 9-21 p.

Fournier F. y Derain, J., (1995). A statistical methodology for deriving reservoir properties from seismic data: Geophysics, 60, 1437-1450.

Gardner G., Gardner, L. y Gregory A., (1974). Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps: Geophysics, 39, 770-780.

Giffuni G., González C. y Brink G., (2000). Estratigrafía Secuencial del Neógeno en Monagas Central, Cuenca de Maturín, Venezuela, Memorias X Congreso Venezolano de Geofísica, versión digital.

Giraldo C., Schmitz M., Arminio J., Audemard F. y Martins A., (s.f.). Un transecto La Blanquilla-cratón guayanés, Venezuela oriental: modelos corticales. Funvisis, página web de archivos pdf:
www.funvisis.gob.ve/archivos/pdf/giraldo.pdf

Gómez F., Fernández M., López M. y Díaz M., (s.f.). Aprendizaje con redes neuronales artificiales. Universidad de Castilla. La Mancha.

Goncalves W., (2006). Inversión gravimétrica 3-D de la Subcuenca de Maturín. Trabajo de Grado, Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

González de Juana C., Iturralde J. y Picard X., (1980). Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas. Primera Edición. Ediciones Foninves, Caracas, Venezuela, 2 tomos, 1031 p.

Haykin, S., (1999). Neural networks: a comprehensive fundation. (2nd ed.) Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

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

Hung E., (1997). Foredeep and thrust belt interpretation of the Maturín Sub-Basin, Eastern Venezuela Basin, MA Thesis, Rice University, 125 p.

IGIS, International Geologic Integrated Solutions C.A. (2001). A Sedimentological and Sequence Stratigraphic Assesment of the Oficina Formation cored in 13 wells from the Oritupano-Leona area, Eastern Venezuela, Reporte Interno Pérez Companc, 52 p., 27 tablas y figuras.

Jácome M., Kusznir N., Audemard F. y Flint, S. (2003a). Tectono-stratigraphic evolution of the Maturin foreland basin: Eastern Venezuela. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 79 ():735-749.

James K. (1990). The Venezuelan hydrocarbon habitat, in Brooks J., Classic Petroleum Provinces, Geological Society Special Publication, (No. 50), 9-35.

James K., (2000a). The Venezuelan Hydrocarbon Habitat, Part 1: Tectonics, Structure, Paleogeography and Source Rocks. Journal of Petroleum Geology, vol. 23 (1): 5-53 p.

James K., (2000b). The Venezuelan Hydrocarbon Habitat, Part 2: Hydrocarbon Occurrences and Generated-Accumulated Volumes. *Journal of Petroleum Geology*, vol. 23(2): 133-164 p.

Kohonen T., (1995). Self-organization and associative memory. 2ª Edición, Springer Verlag, Berlín.

Linares L., (2012). Caracterización mediante atributos sísmicos y registros de pozo de las arenas de los miembros Jobo y Morichal de la zona este del campo Temblador. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Lippmann R., (1987). An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine*, 4-22.

McCulloch W. y Pitts, W., (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 7:115 - 133.

Memoria Descriptiva. Unidad de Explotación, (2008), Campo Oritupano-Leona. Trabajo no publicado. Petrooritupano: Medina G.

Mitchum R. Vail R. y Thompson S., (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration*. (C.E. Payton, Ed.), Amer. Assoc Petrol. Geol. Memoir 26:53-62.

Montaño M., (2002). Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de datos. Tesis doctoral de psicología. Universitat de les illes Balears. Mallorca, España.

Munro S. (1982). Geophysical report on the reinterpretation and integration of seismic data in Corpoven acreage in Eastern Venezuela from Anaco thrust to Temblador. Reporte Interno, 25 p.

Ostos M., (1990). Evolución tectónica del margen sur-central del Caribe basados en datos geoquímicos. *Geos*, Caracas, 30, 1-294 p.

Parnaud F., Gou Y., Pascual J., Capello C., Truskowski I. y Passalacqua H. (1995). *Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuela Basin. Petroleum basin of South America*, AAPG Memoir. 62 p.

Porras J., (2003). Estratigrafía secuencial del Oligo-Mioceno, bloques Oritupano-Leona y Mata-Acema, área mayor de Oficina, cuenca Oriental de Venezuela, Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Ramírez M., (2008). Agrupamiento conceptual jerárquico basado en distancias. Tesis de master. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.

Saggaf M., Toksöz M. y Marhoon, M., (2003). Seismic facies classification and identification by competitive neural networks. *Geophysics*, 68, 1984-1999

Scheriff R., (2002). *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics*. Cuarta edición, Society of exploration Geophysics, Tulsa.

Schumm (1981). Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. In Ethridge, F.G. and R. M. Flores (Eds.), *Recent and ancient nonmarine depositional environments: models for exploration*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 31: 19-29.

Summa, (2003). Hydrocarbon system of northeastern Venezuela-Plate through molecular scale analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin. *Marine and Petroleum Geology* (20): 323-349 p.

Talwani M., (2002) *The Orinoco Heavy Oil Belt In Venezuela*. The James A. Baker III Institute For Public Policy Of Rice University. Energy Study: Latin America.

Tanner, J., (1994). Introduction: Growth in height as a mirror of the standard of living. In: Komlos, J. (Ed.) Stature, Living Standards, and Economic Development. Chicago-London: The University of Chicago Press.

Tesi M., (2011). Análisis estratigráfico integrado con atributos sísmicos en la formación Patchawarra, cuenca Cooper, Australia. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas. Venezuela.

Vail P., Mitchum R. y Thompson S., (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4: global cycles of relative changes of sea level. Mem. Am. Assoc. Pet. Geol. 26,83–97.

Van Der Osten E., (1957). "A Fauna from the Lower Cretaceous Barranquín Formation of Venezuela". Jour. Paleont.,31(3): 571-594 p.

Walker (1979). Facies Models. Geoscience Canada, Reprint series, I.

Wec (1997) Schlumberger. Evaluación de pozos. Venezuela.

Xu, R., y Wunsch, D. (2005). Survey of clustering algorithms. IEEE Trans. Neural Netw., 16, 645–678.

Yoris F. y Ostos M., (1997). WEC, Evaluación de Pozos. Schlumberger, Surencó S.A., Caracas, Venezuela.

s. a. (1999). Neural Network and Its Application in IR Qin He Graduate School of Library and Information Science University of Illinois at Urbana-Champaign.