

**GENERACIÓN DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE
GEOCUERPOS PARA LAS FORMACIONES MUGROSA Y ESMERALDAS,
CAMPO TENERIFE, CUENCA DEL VALLE MEDIO DE MAGDALENA,
COLOMBIA**

**JENNY PAOLA RAMIREZ VILLAMIZAR
DIANA CAROLINA SILVA GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2011

**GENERACIÓN DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE
GEOCUERPOS PARA LAS FORMACIONES MUGROSA Y ESMERALDAS,
CAMPO TENERIFE, CUENCA DEL VALLE MEDIO DE MAGDALENA,
COLOMBIA**

**JENNY PAOLA RAMIREZ VILLAMIZAR
DIANA CAROLINA SILVA GONZÁLEZ**

Proyecto De Grado Para Optar al Título De GEÓLOGO

Director

JOSE RICARDO SANDOVAL RUIZ

Geólogo

Codirectores

SAIT KHURAMA VELASQUEZ

M.Sc Geofísica

JERSON ÁNDRES GARCÍA MANTILLA

Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2011

DEDICATORIAS

*A Dios por bendecirme a lo largo de todo este camino y ser la luz
que ilumina cada día de mi vida.*

*A mi madre Ana por su apoyo, amor, comprensión y sacrificio que
me han hecho posible alcanzar uno de los triunfos más importantes
de mi vida.*

*A mi hermano Rafael por su apoyo incondicional, por su confianza,
sus buenos consejos que me motivaron para seguir adelante y no
perder nunca la fe.*

A mi hermana Johanna por su compañía, confianza y amistad.

A mi sobrinito Miguel por alegrarme los días.

*A mi amigo Edgar por estar conmigo en las buenas y en las malas,
por creer y confiar en mí.*

Jenny Paola Ramírez Villamizar

A por Diosito por iluminarme y llenarme de mil bendiciones.

*A mis padres por la oportunidad y en especial a mi mami Nubia
por su amor, esfuerzo y sacrificio que ha hecho posible este logro.*

*A mis hermanos Paulo, Aura, Juli, y Camilito porque son los mejores
y son mi motivación para seguir adelante.*

A mi Lunita hermosa por darle una nueva luz a mi familia.

*Al Oscar Olarte por su amor, paciencia, apoyo incondicional y
compañía durante mi carrera.*

A mi familia González por creer en mí y por su constante apoyo.

*A mis grandes amigas Karoll C, Eliana J, y Pimpí por los momentos
en esta etapa que jamás se repetirán.*

Diana Carolina Silva González

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación Petrosísmica UIS-ICP por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A nuestro director de proyecto José Ricardo Sandoval por su tiempo, sus aportes, asesorías y su interés en la realización de este proyecto.

A los geólogos Andrés García, Oscar Vera, Crispín Fonseca y Judy Estevez por tendernos siempre la mano, y disponer de su tiempo para enseñarnos y hacer de este trabajo de investigación una enriquecedora y grata experiencia.

A nuestros calificadores Ricardo Mier Umaña y Msc Jairo Torres, por cada uno de sus aportes para mejorar nuestro trabajo.

A nuestros amigos de la Universidad, Judy, Aura, Patico, Diego, José, Laurita, Yuly A, Paolita D, Adriana O, Cata, Paola F, Jaqui, y Elkin con quienes hemos recorrido este gran camino a la superación y el progreso gracias por hacer de esta etapa algo divertido y gratificante, se les quiere.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2. JUSTIFICACIÓN	23
3. ANTECEDENTES	24
4. OBJETIVOS	26
4.1 OBJETIVO GENERAL	26
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
5. GENERALIDADES	27
5.1 LOCALIZACIÓN	27
5.2 MARCO GEOLÓGICO	28
5.2.1 Marco Geológico Regional	28
5.2.2 Modelo Estratigráfico	29
5.2.2.1 Cretácico.	29
5.2.2.2 Terciario.	29
5.2.3 Geología Estructural	33
5.2.3.1 Fallas Normales.	34
5.2.3.2 Trampa Estructural.	34
6. MARCO TEÓRICO	35
6.1 DEPOSITOS FLUVIALES	35
6.1.1 Depósitos de Ríos Meándricos	36
6.1.1.1 Procesos de Depositación.	39
6.2 ATRIBUTOS SÍSMICOS	42
6.2.1 Atributo de Varianza	43
6.2.2 Atributo de Curvatura	44
6.2.3 Atributo de Buzamiento y Azimuth	46

7. METODOLOGÍA DE ESTUDIO	48
7.1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	48
7.2 DESCRIPCION DE NÚCLEOS	48
7.3 AMARRE ROCA – REGISTROS DE POZO	49
7.3.1 Electrofacies	54
7.4 CARACTERIZACION ESTRATIGRÁFICA	55
7.4.1 Correlación de Pozos	55
7.4.2 Registros Dipmeter	56
7.4.3 Patrones de Estacado / stacking patterns	57
7.4.4 Interpretación de Paleocorrientes	59
7.5 CARACTERIZACIÓN DE INFORMACIÓN SÍSMICA	60
7.5.1 Información Sísmica	60
7.5.2 Calibración Tiempo-Profundidad	61
7.5.3 Amarre Check Shot – VSP	62
7.5.4 Amarre Corridor Stack (Traza sísmica de pozo)	63
7.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL CUBO SÍSMICO	64
7.6.1 Interpretación de los Horizontes	64
7.6.2 Interpretación Estructural	68
7.7 ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS	70
7.7.1 Aplicación de Atributos Sísmicos de Superficie	70
7.8 GENERACIÓN DEL MODELO 3D	70
7.8.1 Generación de una Grilla Simple	71
7.8.3 Creación de Horizontes	72
7.8.4 Delimitación de Zonas	72
7.8.5 Delimitación de Capas (Layering)	73
7.8.6 Escalado de Registros de Pozo-Sísmica	74
7.8.7 Modelamiento a partir de Red Neuronal	79
8. ANALISIS DE RESULTADOS	80
8.1 ANÁLISIS DE NÚCLEOS	80
8.1.1 Definición de Ambiente de Depositación	82

8.1.1.1 Sub-Ambiente Floodplain /Llanura de inundación.	82
8.1.1.2 Sub-Ambiente de Canal.	83
8.1.1.3 Sub-Ambiente Crevasse Splay.	84
8.2 AMARRE ROCA – REGISTROS	85
8.2.1 Validación del Ajuste Roca-Registro	90
8.2.2 Definición Electrofacies	92
8.3 CORRELACIÓN ESTRATIGRAFÍA	93
8.3.1 Respuesta Dipmeter	93
8.3.2 Interpretación de Electrofacies	97
8.3.3 Identificación de Patrones de Estacado	99
8.3.4 Correlación de Pozos	100
8.3.4.1 Topes y Subzonas.	101
8.3.4.2 Espesor de Depósitos.	104
8.3.5 Variación de Direcciones de Paleocorrientes	105
8.4 CALIBRACIÓN DATOS SÍSMICOS A PARTIR DE CORRIDOR STACK	110
8.5 INTERPRETACIÓN SÍSMICA	113
8.5.1 Interpretación Estratigráfica	113
8.5.2 Visualización Atributos Sísmicos	117
8.5.2.1 Validación de los Atributos Sísmicos.	124
8.6 GENERACIÓN DEL MODELO	126
8.6.1 Modelamiento a partir de una Red Neuronal	126
8.6.2 Caracterización de Canales de Arena	128
8.6.2.1 Canales de la Formación Mugrosa Zona C.	129
8.6.2.2 Canales de la Formación Esmeraldas.	130
8.6.3 Oportunidades del Campo	132
8.6.3.1 Propuesta de Pozo.	132
9. CONCLUSIONES	134
10. RECOMENDACIONES	136
BIBLIOGRAFÍA	137
ANEXO	142

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización Campo Tenerife, cuenca VMM	27
Figura 2. Columna Estratigráfica generalizada del Valle Medio del Magdalena.	30
Figura 3. Mapa geológico y campos petrolíferos productores de la cuenca del Valle Medio de Magdalena.	34
Figura 4. Bloque diagrama de distribución de diferentes tipos de ambientes de depositación continental.	36
Figura 5. Ríos meándricos y llanura de inundación.	37
Figura 6. Migración lateral de un meandro a través del tiempo.	39
Figura 7. Características morfológicas de un sistema fluvial meándricos, mostrando los sitios principales de depósito y los productos generados.	40
Figura 8. Esquema del concepto de coherencia.	44
Figura 9. (a) Definición de curvatura en dos dimensiones., 2001.(b) definición de curvaturas en 3 dimensiones.	45
Figura 10. Matemáticamente, la nomenclatura sísmica utilizada para definir buzamientos de un reflector.	46
Figura 11. Valores de calibrado, tamaño de grano, porosidad y permeabilidad tomados de core y core plugs para una secuencia dominada por canales de arena y llanura de inundación característicos en el Pozo Tenerife-2.	52
Figura 12. Relación propuesta después de Sneider 1987 entre el tamaño de grano, el sorteado, la porosidad y la permeabilidad.	54
Figura 13. Electrofacies Aserradas Características en Campo Tenerife.	55
Figura 14. Ejemplo de la utilidad del registro dipmeter en la interpretación geológica entre pozos.	57
Figura 15. Patrones de estacado/ <i>Stacking Pattern</i> .	59

Figura 16. Imagen del área del volumen sísmico del campo Tenerife y ubicación pozos Tenerife 1, 2, 3.	61
Figura 17. Geometría de adquisición Pozo Tenerife 1 y 2.	62
Figura 18. Dirección de las líneas compuestas interpretadas.	65
Figura 19. Horizontes picados en tiempo.	67
Figura 20. Mapa de la superficie discordancia del Eoceno, que muestra la estructura anticlinal.	68
Figura 21. Líneas sísmicas interpretadas en dirección del buzamiento de las estructuras.	69
Figura 22. Vista 3D del modelo de fallas.	69
Figura 23. Esqueleto generado a partir de las superficies.	71
Figura 24. Visualización de los Horizontes en tiempo insertados en la grilla con tres de las fallas principales.	72
Figura 25. Delimitación de capas para cada zona.	73
Figura 26. Escalado de electrofacies	75
Figura 27. Grid poblado con atributo de varianza a la izquierda y vista en planta a la derecha	76
Figura 28. <i>Grid</i> poblado con atributo de D2 varianza o “Segunda derivada de la varianza”	77
Figura 29. <i>Grid</i> poblado con atributo de buzamiento.	77
Figura 30. <i>Grid</i> poblado con atributo de “Most curvature negative”	78
Figura 31. <i>Grid</i> poblado con atributo de “impedancia acústica relativa”	78
Figura 32. Núcleo pozo Tenerife-2, subambiente floodplain.	83
Figura 33. Núcleo pozo Tenerife-2, subambiente de canal.	84
Figura 34. Núcleo pozo Tenerife-2, subambiente Crevasse Splay	85
Figura 35. Amarre roca-registro y propiedades petrofísicas.	86
Figura 36. (A). Registros de pozo sónico, resistividad, potencial espontáneo. (B) núcleos de un intervalo de la Formación Mugrosa. Ambientes de depositación de canal, Arenisca de grano medio, granos redondeados, bien calibrados e impregnados de hidrocarburo.	87

Figura 37. (A) Registros de pozo sónico, resistividad, potencial espontáneo. (B) Núcleos de un intervalo de la Formación Mugrosa. Ambientes de depositación de Crevasse splay caracterizado por arenas finas y limos de desborde del canal.	88
Figura 38. (A) Registros de pozo sónico, resistividad, potencial espontáneo. (B) Núcleos de un intervalo de la Formación Mugrosa. Ambientes de depositación Floodplain (B3) Lodolita gris con laminación plana paralela, (B4) Arenisca de grano muy fino gris, granos redondeados y bien calibrada.	89
8.2.1 Validación del Ajuste Roca-Registro	90
Figura 39. <i>Crossplot</i> tamaño de grano contra registro de potencial espontáneo.	90
Figura 40. <i>Crossplot</i> Tamaño de grano contra Registro resistividad	91
Figura 41. <i>Crossplot</i> Calibrado contra Porosidad	91
Figura 42. Respuestas de electrofacies para el pozo Tenerife-2 (A). Depósitos de floodplain, (B). Canal, (C). Crevasse Splay, (D).Lago.	93
Figura 43. Interpretación de datos dipmeter para el pozo Tenerife-1.	94
Figura 44. Interpretación de datos dipmeter para el pozo Tenerife-2.	95
Figura 45. Interpretación de los datos dipmeter para el pozo Tenerife-3.	96
Figura 46. Electrofacies, registro SP y DT.	98
Figura 47. Patrones destacados para los pozos Tenerife 1, 2 y 3 en base a los registros SP, resistivo y DT respectivamente. Superficies de máxima inundación MFS, inundación FS y erosión ES.	99
Figura 48. Correlación de registros entre pozos (SP-Resistivo SN-DT).	100
Figura 49. Topes del pozo Tenerife-1 y dirección de paleocorrientes en cada intervalo.	106
Figura 50. Topes del pozo Tenerife-2 y dirección de paleocorrientes en cada intervalo	107
Figura 51. Topes del pozo Tenerife-3 y dirección de paleocorrientes en cada intervalo.	109

Figura 52. Amarre Tiempo-Profundidad VSP- <i>Check Shot</i> pozos Tenerife 1 y 2.	111
Figura 53. Amarre tiempo profundidad a partir del <i>Corridor Stack</i> , a la izquierda Tenerife 1 (shift 0.027ms), a la derecha Tenerife 2 (shift 0.055ms).	112
Figura 54. Horizontes interpretados. Línea compuesta.	113
Figura 55. Mapas en Tiempo para la discordancia del Eoceno, tope de esmeraldas, Mugrosa C finos y arenas	115
Figura 56. Mapas en tiempo de la Formacion Mugrosa B3 Y B2.	116
Figura 57. Mapas en tiempo de la Formacion Mugrosa B1	116
Figura 58. Time slice a 1693 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Mugrosa C; en este caso se muestra el resultado que arroja el atributo de varianza.	118
Figura 59. Time slice a 1693 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Esmeraldas.	119
Figura 60. Time slice a 2013 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Mugrosa C.	120
Figura 61. Time slice a 2013 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Esmeraldas.	120
Figura 62. Definición e interpretación de canales en el campo Tenerife utilizando los atributos de varianza en el time slice 2013.	121
Figura 63. Atributos de curvatura <i>most negative curvature</i> para la Formación Mugrosa C.	122
Figura 64. Atributos de dip para la Formación Mugrosa C.	123
Figura 65. Atributos de dip para la Formación Esmeraldas.	123
Figura 66. Time Slices que corresponden al atributo de energía, y la dirección de las paleocorrientes, Formación Mugrosa C	125
Figura 67. Time Slices que corresponden al atributo de energía, dirección de las paleocorrientes Formación Mugrosa MFS.	126

Figura 68. Probabilidad de ocurrencia de canales para la Formación Mugrosa C a partir de la red neuronal entrenada con set de atributos sobre grid de 25*25m.	127
Figura 69. Probabilidad de ocurrencia depósitos de llanura de inundación para la Fm. Mugrosa C a partir de la red neuronal entrenada con set de atributos sobre grid de 25*25m.	128
Figura 70. A la izquierda distribución de las tres electrofacies de canal, floodplain y Crevasse Splay en la zona de la Fm Mugrosa C. A la derecha distribución de los canales.	129
Figura 71. Modelo 3D de distribución de geocuerpos de arena para la Formación Mugrosa zona C.	130
Figura 72. A la izquierda distribución de las tres electrofacies de canal floodplain y Crevasse Splay en la zona de la Fm Esmeraldas. A la derecha distribución de Floodplain.	131
Figura 73. Modelo 3D de distribución de geocuerpos de arena para la Formación Esmeraldas.	131
Figura 74. Interpretación y distribución de canales al tope de la Formación Mugrosa C.	133
Figura 75. Distribución y conectividad de canales campo Tenerife.	133

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Intervalos corazonados, recuperados actualmente en la Litoteca Nacional.	49
Tabla 2. Inventario de los registros más utilizados, clasificados por pozo.	50
Tabla 3. Nomenclaturas propuestas para la generación de curvas pie a pie de tamaño de grano y calibrado a partir de corazones.	51
Tabla 4. Valores de tamaño de grano, porosidad, permeabilidad (K) y calibrado, obtenidas de las muestras de corazones pozo Tenerife-2.	51
Tabla 5. Topes de las Formaciones Campo Tenerife antiguos (Izquierda), recientes (Derecha). Los topes con color azul representan los de mayores cambios.	66
Tabla 6. Valores usados en la delimitación de capas para cada zona.	73
Tabla 7. Topes Formacionales a partir de registros dipmeter	97
Tabla 8. Espesores Niveles Formacionales	104
Tabla 9. Ajuste Check shot y VSP en los pozos Ten-1,2 y 3	111
Tabla 10. <i>Corridor stack</i> para pozos Tenerife 1 y 2	111
Tabla 11. Valores de tiempo para los horizontes interpretados	117

RESUMEN

TITULO: GENERACIÓN DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE GEOCUERPOS PARA LAS FORMACIONES MUGROSA Y ESMERALDAS, CAMPO TENERIFE, CUENCA DEL VALLE MEDIO DE MAGDALENA, COLOMBIA.

Autores: Ramírez Villamizar Jenny Paola
González Silva Diana Carolina **

Palabras claves: Sísmica 3D, Atributos sísmicos, Electrofacies, Paleocorrientes.

Este proyecto tiene como objetivo generar un modelo 3D de distribución espacial de canales de la Formación Mugrosa y Esmeraldas del campo Tenerife ubicado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Para ello se integro toda la información de núcleos, registros de pozo y sísmica 3D-3C proporcionada por ECOPETROL.

Partiendo del análisis de núcleos y amarre con los registros de pozo se identificaron electrofacies de canal, llanura de inundación y depósitos de desborde. Se correlacionaron los tres pozos del campo mediante la interpretación de registros dipmeter, patrones de estacado, electrofacies, con el fin de extraer la mayor cantidad de información concerniente a la ubicación de superficies estratigráficas en el área.

La interpretación sísmica se llevo a cabo a través del software PETREL de Schlumberger y sus distintos módulos. Primero se calibraron los datos sísmicos con la información suministrada para los pozos. A continuación se siguieron los horizontes de interés y a estos se les aplicaron atributos sísmicos de varianza, buzamiento, impedancia acústica relativa y mayor curvatura negativa, los cuales permitieron visualizar las tendencias de depositación de los canales en sentido Noreste-Suroeste, dichos atributos fueron validados mediante la definición de paleocorrientes.

Con los resultados obtenidos tanto en el modelo 3D como en el análisis de atributos sísmicos se lograron diferenciar los espesores de los canales de las Formaciones Mugrosa y Esmeraldas que correspondieron a 25 y 20 pies respectivamente. Finalmente se planteó una zona potencial hacia el centro del área de estudio en dirección Noreste-Suroeste que cumplió con buenas condiciones de distribución y conectividad de canales para proponer un posible pozo productor.

* Trabajo de grado Modalidad Investigación.

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Jose Ricardo Sandoval Codirector M. Sc Sait Khurama - Andrés García

ABSTRACT

TITLE: GENERATION OF A SPACIAL DISTRIBUTION MODE OF GEOBODIES FOR THE FORMATIONS IN MUGROSA AND ESMERALDAS, CAMPO TENERIFE, BASIN OF THE MIDDLE VALLEY OF MAGDALENA RIVER BASIN, COLOMBIA^{*}.

Authors: Ramírez Villamizar Jenny Paola
González Silva Diana Carolina ^{**}

Keywords: 3D seismic, seismic attributes, electrofacies, paleocurrents.

This project's main objective is to generate a 3D spatial distribution model of channels of the Formation Mugrosa and Esmeraldas of Camp Tenerife, located in the Magdalena basin. For this information was integrated all cores, well logs and 3D-3C seismic given by Ecopetrol.

From the analysis of cores and joints with the well registers, some aspects were found such as electrofacies of channel, floodplain, and crevasse splay. The three field wells were correlated by interpreting dipmeter registers, stacking patterns, electrofacies, in order to extract as much information regarding the location of stratigraphic surfaces in the area.

The seismic interpretation was carried out by using the software PETREL from the company Schlumberger and its different modules. First the seismic data was calibrated along the information given to the wells. Next, the interest's horizons were followed and they were applied to seismic attributes of variance, dip, relative acoustic impedance and most negative curvature, which allowed visualizing the deposit tendencies of the channels in the north-eastern-southwestern sense, those attributes were validated by defining paleocurrents.

With the obtained results, as in the 3D model as in the seismic attributes analysis, it was possible to establish differences between the thickness of the channels from Formations Mugrosa and Esmeraldas that where 25 and 20 feet respectively. Finally, it was establish a potential zone to the study area centre in the north-eastern-southwestern direction which accomplishes good conditions of distribution and connectivity of channels to propose a possible producing well.

^{*} Undergraduate project. Mode: research

^{**} Physical Chemistry Engineering Collage, School of Geology. Advisor, Jose Ricardo Sandoval Co M.Sc Sait Khurama - Andrés García.

INTRODUCCIÓN

La definición de un modelo 3D involucra el análisis corazonas, la definición de facies y asociaciones de facies y sus expresiones a nivel de registros de pozo, buscando el entendimiento de la dinámica de sedimentación por medio de diferentes técnicas de modelamiento sedimentológico; estos análisis integrados permiten entender cómo se disponen los cuerpos de arena verticalmente dentro de las secuencias de roca, llegando a proponer continuidades laterales a partir de posibles modelos de sedimentación por medio de correlaciones.

Basados en las condiciones geológicas del reservorio y la necesidad de explotación de sus reservas se propuso generar un modelo 3D con el objetivo de lograr entender la disposición de los cuerpos de arena dentro del yacimiento. La mayor parte del crudo producido en el Valle medio del Magdalena proviene de este tipo de depósitos, por lo que resultados favorables en este estudio genera expectativas de nuevas reservas en esta provincia petrolera

Las arenas de la Formación Mugrosa de edad oligoceno inferior y conocidas en la cuenca del Valle Medio de Magdalena (VMM) como Mugrosa zona C se constituyen como la principal roca almacenadora de hidrocarburos en el campo Tenerife. Este intervalo estratigráfico se caracteriza por presentar paquetes de areniscas gris verdosa y gris clara, ocasionalmente calcárea de 5 a 15 pies de espesor promedio con espesores máximos de hasta 30 pies intercaladas con arcillolitas gris clara y pardo amarillas de espesores variables; la disposición aleatoria de los cuerpos de arena dentro del yacimiento obedece a la naturaleza de su ambiente de depósito asociado a un ambiente fluvial de ríos meandriiformes que genera cuerpos aislados entre una matriz arcillosa.

Teniendo en cuenta los objetivos de exploración y desarrollo de ECOPEPETROL en sus campos del Valle Medio del Magdalena, se hace necesario desarrollar una metodología que contribuya en la caracterización del campo Tenerife mediante la generación de un modelo geológico basado en la integración de información sísmica 3D, atributos sísmicos, registros de pozo y núcleos. En este trabajo se muestra la aplicación de varios atributos sísmicos con los que se visualiza la distribución los cuerpos de arena de las Formaciones Mugrosa y Esmeraldas; ya que el reconocimiento de la geometría y distribución de estos cuerpos se constituye como el principal factor geológico a tener en cuenta en la planeación y manejo de cualquier plan de desarrollo en este tipo de reservorios.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entender cómo se disponen los cuerpos de arena dentro de las secuencias de roca en Campo Tenerife se constituye como uno de los principales factores geológicos a tener en cuenta en la exploración ya que el ambiente fluvial de ríos meándricos bajo el cual se deposita este campo presenta complejidad en cuanto a la preservación de los cuerpos de interés que hacen difícil su identificación.

Este trabajo se realizara con el propósito de resolver las siguientes preguntas y disminuir las incertidumbres asociadas a estas: 1- ¿Cuáles son las áreas de interés según la distribución espacial de los cuerpos de arena y la posición estructural de estos? 2 - ¿Qué espesores tienen los cuerpos objetivos? 3- ¿A qué profundidad se encuentran estos cuerpos objetivos?

La respuesta a estas tres preguntas permitirá en el caso puntual del campo Tenerife, identificar nuevos posibles prospectos en el área.

2. JUSTIFICACIÓN

El 95% de la producción de los campos presentes en la cuenca del Valle Medio del Magdalena provienen de las formaciones terciarias Esmeraldas - La Paz, Mugrosa y Colorado asociadas a reservorios estratigráficamente complejos de origen fluvial. En los últimos años Ecopetrol S.A ha venido adquiriendo sísmica 3D en sus principales campos localizados en esta cuenca, con el objetivo de definir mejor la forma de las estructuras y la distribución espacial de los cuerpos de arena con capacidad para almacenar hidrocarburos, lo cual es el principal factor geológico a tener en cuenta en la planeación y manejo de cualquier plan de explotación en este tipo de reservorios.

Disminuir este tipo de incertidumbres requiere del desarrollo de una metodología clara, que integre información de calidad de forma eficaz, de manera que permita resolver necesidades del negocio energético.

3. ANTECEDENTES

La historia de Campo Tenerife comienza durante los años 1968 y 1969 donde fueron perforados 3 pozos, de los cuales dos resultaron productores (Tenerife-1 y 2) y uno seco (Tenerife-3) que fue abandonado y taponado, el objetivo principal de la perforación de estos pozos fue comprobar la existencia de trampas estructurales, estratigráficas o mixtas al occidente del campo la Cira-Infantas y Aguas Blancas, con el objetivo exploratorio a las arenas de las Formación Mugrosa y La Paz, los pozos Tenerife-1 y 2 fueron completados como productores de la zona Mugrosa C inferior, en abril de 1968, los cuales fluyeron respectivamente 115 y 68 barriles de aceite por día.

Los primeros modelos estructurales y estratigráficos del área fueron basados en interpretación de líneas sísmicas 2D que cruzan el campo desarrollados en diferentes años: De Mares 1987, De Mares 1989, Tenerife 1976 y Viscaína 1963, caracterizadas por destacar en cierta parte el comportamiento estructural del campo Tenerife, evidenciando la presencia de fallas que permitían cierres en cercanías a los pozos 1 y 2 pero una estructura abierta hacia el pozo Tenerife 3, estas interpretaciones mostraban un entrampamiento de carácter inverso con una dirección de las estructuras principalmente hacia el NE-SW, siendo sin embargo estas trampas de tipo estructural-estratigráfico.

Durante el 2009 fue adquirido un volumen sísmico multicomponente 3D/3C; el programa sísmico 3D/3C abarco un área de 20 km², el diseño de la adquisición fue realizado por GEDCO siguiendo la metodología de Galbraith (2004). Mediante el uso de la información de la onda P, adquirida mediante dicho programa y procesada por Ecopetrol ICP con la compañía CGG Veritas, se interpreto desde el punto de vista estructural el volumen Tenerife 3D, el cual mostro interesantes

características y posibilidades para la ubicación de pozos *infill* y/o extensión areal y permitió descartar áreas donde no se muestra cierres de las estructuras.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Definir un modelo de distribución espacial de geocuerpos para las formaciones Mugrosa y Esmeraldas; integrando la información de corazones, registros de pozo, datos petrofísicos y sísmica 3D presente en el campo Tenerife.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los diferentes tipos de depósito que pueden encontrarse en ambientes fluviales, a partir de la descripción macroscópica del corazón del pozo Tenerife 2.
- Amarrar la respuesta de los registros de pozo con el núcleo del pozo Tenerife-2. (Amarre Roca – Registro).
- Generar un marco estratigráfico a partir de la identificación de patrones de estacado en Campo Tenerife.
- Amarrar la respuesta de los registros de pozo con la sísmica 3D, buscando reconocer la respuesta de la roca.
- Definir la distribución de las arenas de Campo Tenerife, a través de la aplicación de diferentes atributos sísmicos.
- Generar un modelo geológico 3D del yacimiento condicionando su poblamiento a la interpretación de atributos sísmicos.

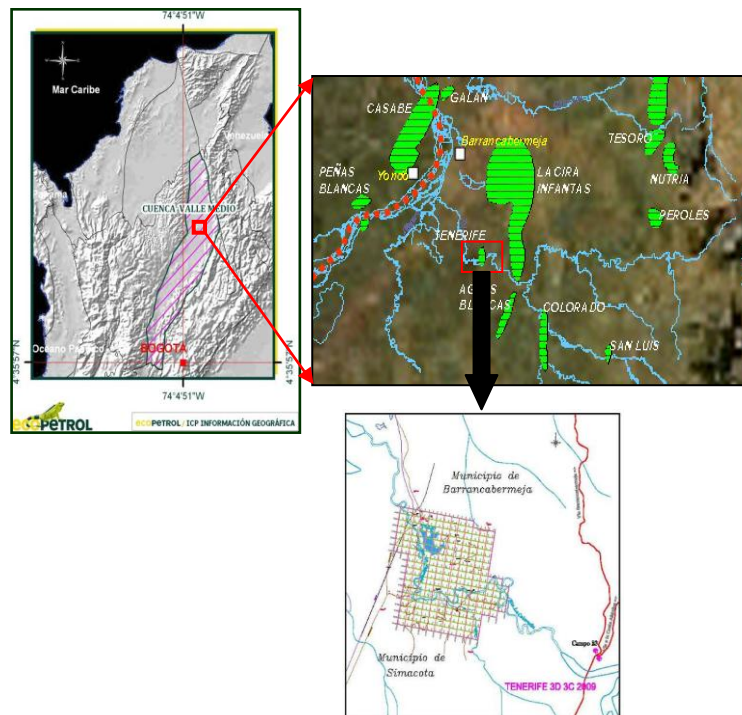
5. GENERALIDADES

5.1 LOCALIZACIÓN

El Valle Medio del Magdalena se caracteriza por ser una cuenca intracordillerana localizada entre las cordilleras oriental y central, está limitado geográficamente al norte por la Falla Bucaramanga-Santa Marta, al sur por la falla de Cambao. Cubre un área aproximada de 28300 km².

El área de interés corresponde al campo Tenerife (**Figura 1**) ubicado en la cuenca del valle medio del Magdalena, limitado al oriente por el campo La Cira-Infantas, al occidente por el municipio de Simacota. (Sandoval y Estévez, 2010).

Figura 1. Localización Campo Tenerife, cuenca VMM



Fuente: Informe técnico ICP., (Sandoval y Estévez, 2010).

5.2 MARCO GEOLÓGICO

Se Adquirió toda la información disponible para conocer y entender el Modelo Geológico del Área de Estudio, de la información suministrada por personal de Superintendencia de Yacimientos de Instituto Colombiano del Petróleo, de estudios anteriores, los cuales son citados en el marco de referencia consignado al final del estudio.

5.2.1 Marco Geológico Regional

El área de estudio se enmarca dentro de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), la cual es una depresión tectónica localizada entre las cordilleras Central y Oriental, se trata de una cuenca intracordillerana, basculada hacia el oriente, con tendencia anticlinal. Los sedimentos en el valle pueden alcanzar un espesor de 8500 m. La nomenclatura estratigráfica que normalmente se usa hacia el sector meridional del valle es la misma que la del Valle Superior del Magdalena, no obstante hacia la parte central y septentrional de la cuenca se presentan unidades estratigráficas bien diferenciadas de las del VMM (Mojica y Franco, 1990).

En la cuenca se han reconocido 3 secuencias mayores de depositación bien diferenciadas una ocurrida durante el Triásico-Jurásico depositada en ambientes continentales a marginales durante una tectónica de bloques extensionales y limitado por fallas subverticales (Etayo, 1993). La secuencia Cretáceo-Paleoceno depositada en una cuenca de antearco en la fase de subsidencia termal a condiciones marinas de plataforma las cuales cambiaron a transaccionales durante el Maestrichtiano y por último la secuencia post-Eoceno-Medio depositada una cuenca de antepaís hasta el Mioceno Medio e intramontana desde ese momento.

5.2.2 Modelo Estratigráfico

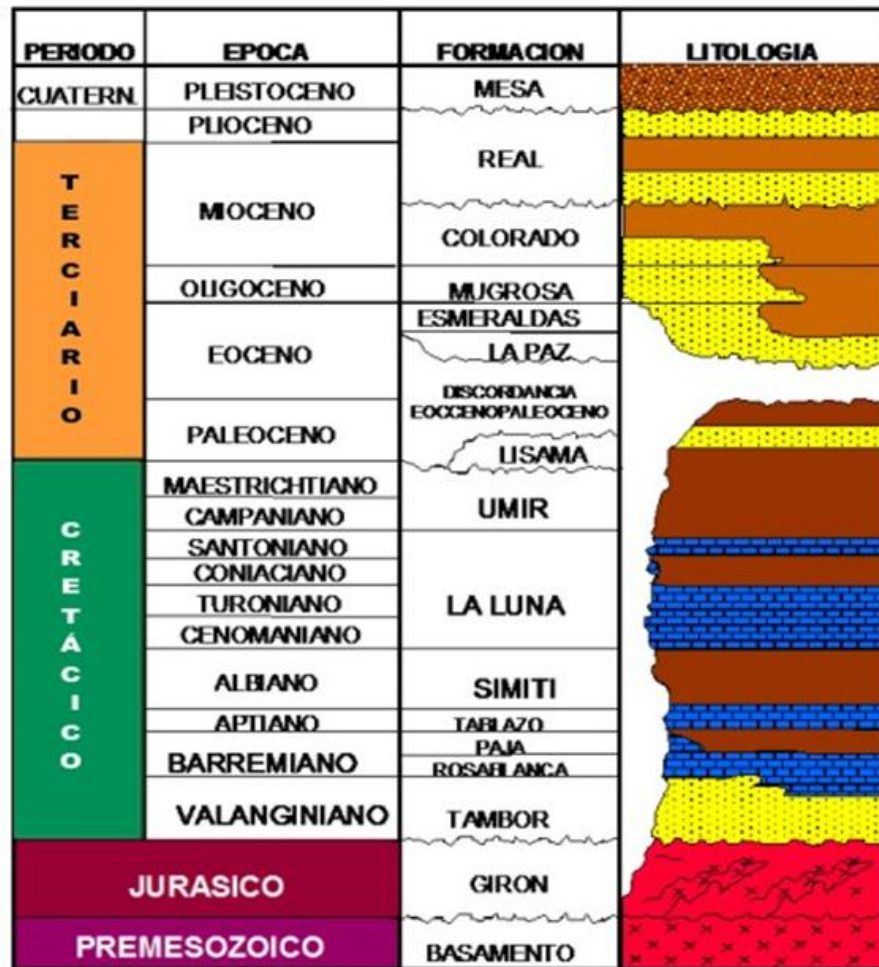
La secuencia estratigráfica del VMM fue primero descrita por (Morales, et al., 1958) y luego modificada por autores como (Etayo et al., 1968). La columna estratigráfica en el VMM abarca edades que van desde el Jurásico Tardío hasta el presente (Figura 2).

5.2.2.1 Cretácico. Esta secuencia se encuentra constituida por las Formaciones Tambor, Los santos, Cumbre, Rosa Blanca, Paja, Tablazo, Simiti, La luna, Umir y Lisama. Esta limitada en su base por la Discordancia del Jurásico y en su parte superior por la Discordancia del Eoceno Medio.

Debido a los alcances de este proyecto las unidades en estudio y específicamente las unidades productoras corresponden a unidades de edad Terciaria.

5.2.2.2 Terciario. Los sedimentos del terciario predominantemente de origen continental fueron depositados en una cuenca de antepaís (Dengo y Covey, 1993) (Cooper et al., 1995), finalmente y hasta la actualidad en una cuenca intermontana como parte de un cinturón deformado producto del levantamiento de las Cordilleras Central y Oriental, como respuesta a las colisiones de la Cordillera Occidental y el Arco de Panamá con el occidente y noroccidente de Colombia (Barrero, 1979, Dengo y Covey, 1993; Cooper et al., 1995).

Figura 2. Columna Estratigráfica generalizada del Valle Medio del Magdalena.



Fuente: (Sandoval y Estévez, 2010)

Las rocas del Terciario corresponden al intervalo Paleoceno al reciente. Las rocas del Paleoceno en el VMM corresponden a la denominada Formación Lisama la cual representa el cambio de condiciones marinas de la Formación Umir a deltaicas de la Formación Lisama y está representada por una secuencia de lodolitas y areniscas de grano fino a medio.

Para Barrero (1979) Los sedimentos clásticos finogranulares del Cretáceo Tardío al Paleoceno, representados en la cuenca por las Formaciones La Luna, Lisama y

Umir, fueron acumulados durante el ciclo transgresivo regresivo en una cuenca sometida a subsidencia térmica y levantada posteriormente por la acreción de la Cordillera occidental.

El límite superior de la Formación Lisama está marcado por la discordancia angular del Eoceno Medio, las unidades que descansan sobre esta discordancia son variables a través de todo el valle medio.

Entre el Eoceno Superior y el Reciente encontramos las siguientes unidades:

Estratigráficamente la secuencia del VMM ha sido subdividida desde el punto de vista regional y de producción, otros autores como (Suárez, 1996) utilizan un esquema cronoestratigráfico en donde las unidades deposicionales se encuentran limitadas por discordancias que son denominadas informalmente por el autor como “tectonosecuencias” debido a su relación con eventos tectónicos ocurridos durante esta época en la cuenca.

El Terciario en el campo Tenerife abarca unidades desde Paleoceno al reciente que de base a techo corresponden a las Formaciones Esmeraldas (Unidad E), La paz (Unidad D), Mugrosa (Unidades B y C), Colorado (Unidad A), Grupo Real y Grupo Mesa (Figura 2).

Para Suárez (1996), D y E corresponden a la tectonosecuencia 1 del Eoceno Superior que representa la primera depositación netamente continental en la cuenca después del Cretáceo. B y C corresponden a la tectonosecuencia 2 y la Unidad A pertenece a la tectonosecuencia 3 (Figura 2).

A continuación se hace una breve descripción de las formaciones del terciario que se encuentran en el registro sedimentario de los pozos en este campo. Las formaciones que lo componen de base a tope son:

Formación La Paz

La Formación La Paz está constituida por areniscas de grano grueso y conglomeráticas depositadas en sistemas fluviales trenzados (Suárez, 1996) a meándricos de baja sinuosidad. La edad de esta formación se estima Eoceno Tardío y su espesor puede alcanzar hasta los 2000' (Suárez, 1996). Las áreas fuente para la Formación la Paz fueron la Cordillera Central, el paleo-macizo de Santander y el paleo-alto de Sogamoso.

Formación Esmeraldas

La Formación Esmeraldas se encuentra suprayaciendo la Formación la Paz y abarca la mayor parte del Eoceno tardío, el espesor de esta unidad puede alcanzar unos 1500'. Litológicamente está constituida por espesos intervalos de lodolitas y limolitas oscuras con delgados mantos de carbón depositados en ríos meándricos (Rubiano, 1995), el límite de la Formación Esmeraldas esta dado por un nivel rico en moluscos de agua dulce y palinomorfos "horizonte Fosilífero Los Corros".

Formación Mugrosa

La Formación Mugrosa de edad Oligoceno a Mioceno Inferior, tiene un espesor que varía desde 1900' a 2400', está compuesta por intercalaciones de areniscas de grano fino y lodolitas varicoloreadas, acumuladas dentro de un ambiente de sistemas de ríos meándricos (Rubiano, 1995).

Esta Formación corresponde para Suárez (1996) a la denominada tectonosecuencia 2 cuyo tope está marcado por un nivel arcilloso rico en fósiles de agua dulce, restos de reptiles, peces y mamíferos que se conoce como el "Horizonte Fosilífero de Mugrosa".

Formación Colorado

La Formación Colorado de edad Mioceno Inferior a Mioceno Medio, presenta un espesor de hasta 3200' en el sector de los pozos Sogamoso-1 y El Dorado-1. Está constituido por una serie de lodolitas masivas con intercalaciones de areniscas de grano fino a grueso, de origen aparentemente fluvial, con presencia de barras puntuales y longitudinales (De La Cruz, 1988).

Esta secuencia corresponde a la llamada por Suárez (1996) tectonosecuencia 3 cuyo tope está marcado por la aparición de un nivel de lutitas carbonáceas y fosilíferas de edad Mioceno Medio, conocido como "La Cira Shale".

Esta tres Formaciones Esmeraldas, Mugrosa y Colorado nombradas anteriormente constituyen las principales rocas almacenadores de hidrocarburos en el Valle Medio del Magdalena, que han sido probados en diferentes campos a través de la cuenca.

Formación Real

La Formación Real fue depositada durante el Mioceno Medio a Superior y está constituida principalmente por conglomerados y areniscas de grano grueso con intercalaciones de arcillolitas varicoloreadas depositados en ambientes continentales.

5.2.3 Geología Estructural

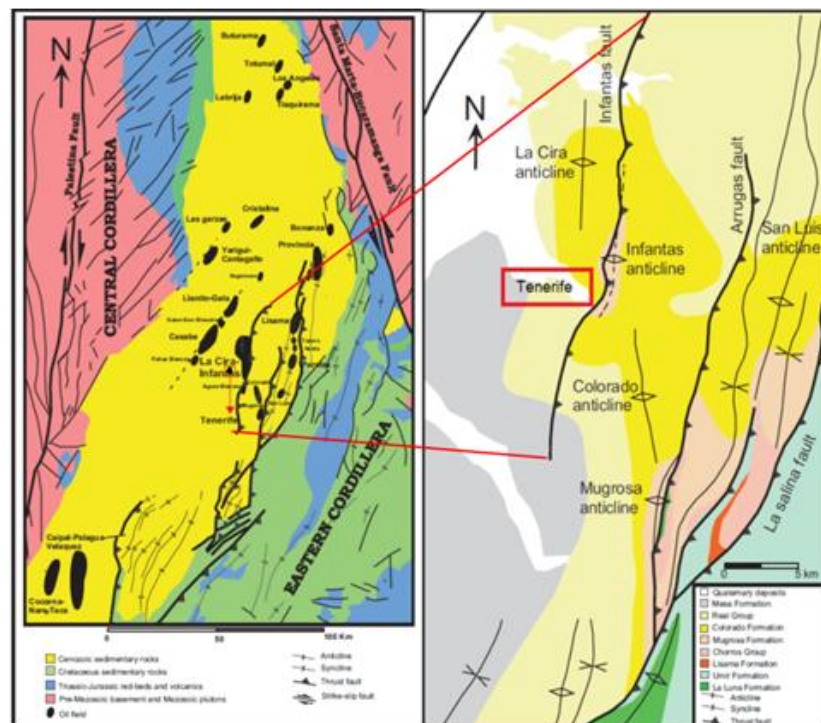
El campo Tenerife se caracteriza por una serie de heterogeneidades asociadas con eventos tectónicos del terciario temprano y tardío. Presenta un sistema de fallas normales con rumbo NE – SW, caracterizado por una estructural anticlinal asimétrica, con rumbos NW - SE en el flanco NW y con rumbo variable el flanco SW. Este campo se caracteriza por tener una componente extensiva reflejada en un graben tectónico delimitado por fallas normales. Hacia la parte del flanco

Occidental de la estructura la distribución de la magnitud de sus buzamientos decrece en sentido Norte a sur.

5.2.3.1 Fallas Normales. El campo en estudio se caracteriza por un conjunto de fallas normales de tipo longitudinal y oblicuo con vergencias SE y NW.

5.2.3.2 Trampa Estructural. Fallas de comportamiento normal de poco desplazamiento que permite el entrapamiento de hidrocarburos hacia el sector de Tenerife-2. A nivel del Terciario no se ha reportado ningún cierre importante hacia el sector del pozo Tenerife-3, lo cual explica este pozo como seco.

Figura 3. Mapa geológico y campos petrolíferos productores de la cuenca del Valle Medio de Magdalena.



Fuente: Gutiérrez, 2001

6. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos básicos descritos en el proyecto, como ambientes fluviales, registros de pozo, adquisición e interpretación sísmica y atributos sísmicos. Se describen los principios de cada atributo generado para el proyecto.

6.1 DEPOSITOS FLUVIALES

Los depósitos fluviales son sedimentos transportados y depositados por ríos en un ambiente continental (Figura 4). Hay varios tipos de depósitos fluviales derivados, en los que se incluyen (1) abanico aluvial, que son cuerpos sedimentarios en forma de abanico acumulados hacia la base de las montañas en las desembocaduras de los ríos; (2) abanicos deltaicos, también se forman en la base de las montañas, pero son depositados muy cerca de la línea de costa en aguas marinas; (3) depósitos de ríos trenzados, que se forman más allá de las bases las de montaña, donde la pendiente del terreno es relativamente inclinada; (4) depósitos de ríos meándricos, que se forman en las llanuras de inundación donde la pendiente del terreno es mucho más suave (Slatt, 2006).

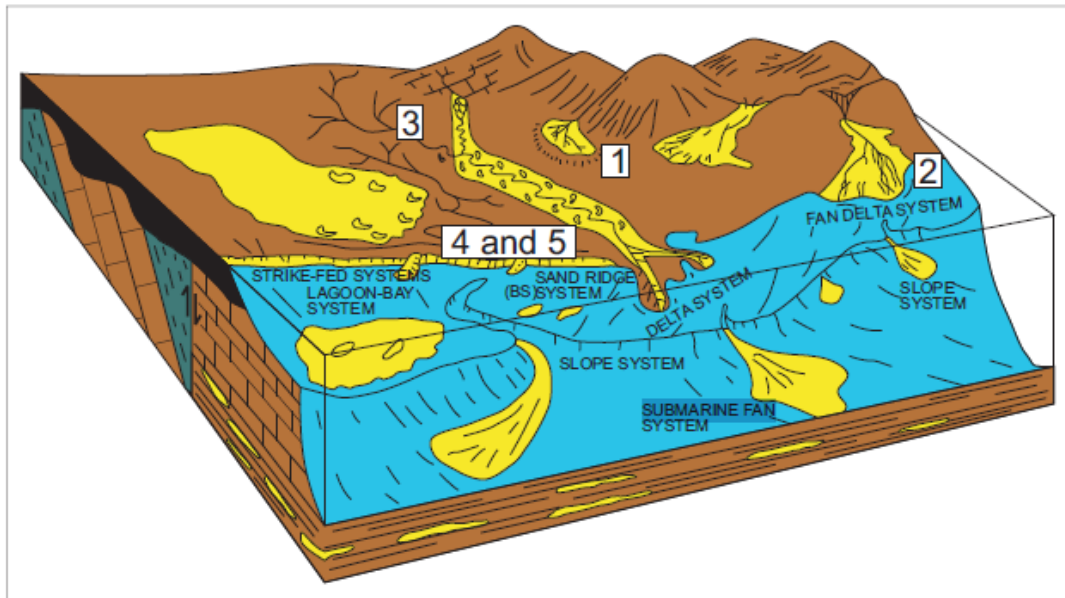
Cada uno de estos tipos de depósito expone un conjunto único de propiedades que lo distingue de los otros, en las que se incluye tamaño de grano, geometría de los cuerpos de arena, orientación, barreras de flujo entre otros. (Slatt, 2006)

Es importante comprender estas diferencias para la evaluación de reservorios del subsuelo, ya que estas afectan el flujo del fluido y finalmente el rendimiento del reservorio. No es suficiente con conocer que el reservorio es “fluvial”, sino

también conocer el tipo de reservorio fluvial y sus características definidas (Slatt, 2006).

Figura 4. Bloque diagrama de distribución de diferentes tipos de ambientes de depositación continental.

(1) Abanico aluvial, (2) Abanico deltaico, (3) Ríos trenzados y (4 y 5) Ríos meándricos incidentes o no incidentes.



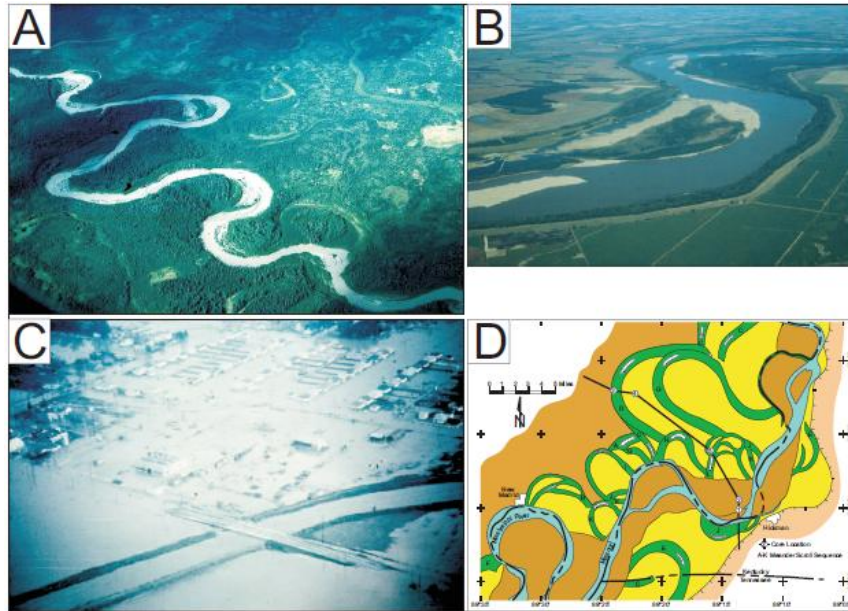
Fuente: Slatt, 2006.

6.1.1 Depósitos de Ríos Meándricos

Como su nombre lo indica, los ríos meándricos exhiben una tendencia longitudinal sinusoidal. Estos pueden formarse en cualquier valle incidente o directamente en la planicie de inundación (Posamentier, 1999). Para este sistema fluvial, el factor crítico en la incisión ocurre entre el gradiente de la corriente y su adyacente. Si el gradiente es más escarpado que el perfil aluvial asociado, la incisión de valle ocurre. Si el gradiente es más suave que el perfil aluvial, la incisión de valle no ocurre.

Figura 5. Ríos meándricos y llanura de inundación.

(A) Ríos meándricos y llanura de inundación. El cauce sinuoso abandonado cubierto por la vegetación en la llanura de inundación. (B) Point bars en una curva del meandro del río Mississippi. (C) Ríos inundados. Canal principal que destaca sus diques a ambos lados del cauce. (D) Mapa de un área de la corriente del sistema fluvial del río Mississippi. Muestra la complejidad de los depósitos de Point bars (amarillo/gris), el hecho de que ellos están separados por lodo y relleno de canales (verde/ gris oscuro). En la actualidad el canal activo se observa en azul. (Figuras (B) Y (D)).



Fuente: Slatt, 2006.

Los ríos meándricos ocurren típicamente en la parte baja de los sistemas de drenaje, donde el gradiente topográfico es bajo. En consecuencia, la energía de transporte y depósito es menor en un sistema de río meándricos que en un sistema de río trenzado, dando lugar a sedimentos de grano fino, siendo más frecuente en el sistema de ríos meándricos. Aunque un río meándrico puede parecer tranquilo durante la mayor parte del año (Figura 5A y B), durante la etapa de inundación el río es muy dinámico (Figura 5C). Grava y partículas de tamaño de arena son transportadas como carga de fondo mientras que la carga suspendida de grano

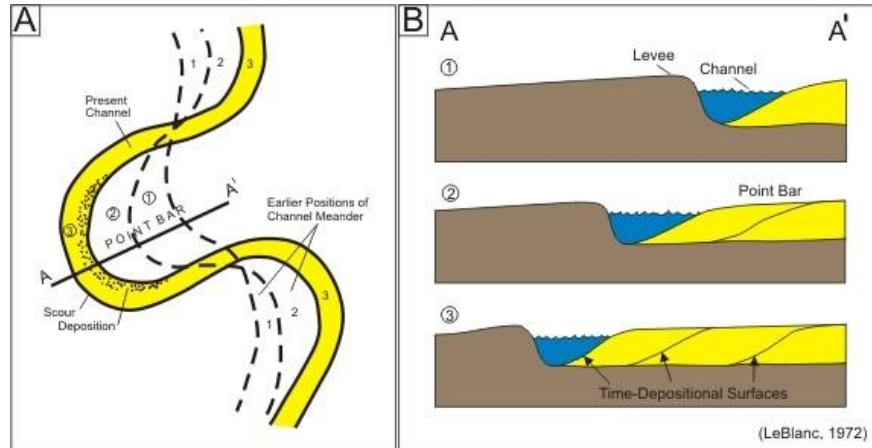
fino puede sobrepasar los márgenes del canal y se depositan en la llanura de inundación (Figura 5C). El río forma los meandros por una combinación de la erosión y la depositación en tiempos donde el flujo es de alta energía.

Con el tiempo, la parte cóncava del meandro pierde sedimentos y estos sedimentos se acumulan en las barras del meandro, el resultado final es la migración lateral del cuerpo de sedimentos a través de la llanura de inundación. (Figura 6)

Particularmente durante los flujos energéticos, el río puede atravesar barras del meandro y llanuras de inundación para formar un nuevo canal. Los canales viejos se convierten en inactivos y, finalmente, se rellenan de lodo y materia orgánica. Un sistema de ríos meándricos puede llegar a ser bastante complejo, conteniendo una serie de depósitos de barras de meandro truncados por depósitos de lodo que rellenan canales. Por lo general, el tamaño de grano disminuye hacia arriba desde la base hasta la parte superior de la barra de meandro, debido a la combinación de velocidades de flujo más bajo en la parte superior del perfil de los ríos.

Figura 6. Migración lateral de un meandro a través del tiempo.

(A) Vista en planta y (B) vista en sección transversal que ilustra el proceso. En la figura la migración es de derecha a izquierda.



Fuente: Slatt, 2006.

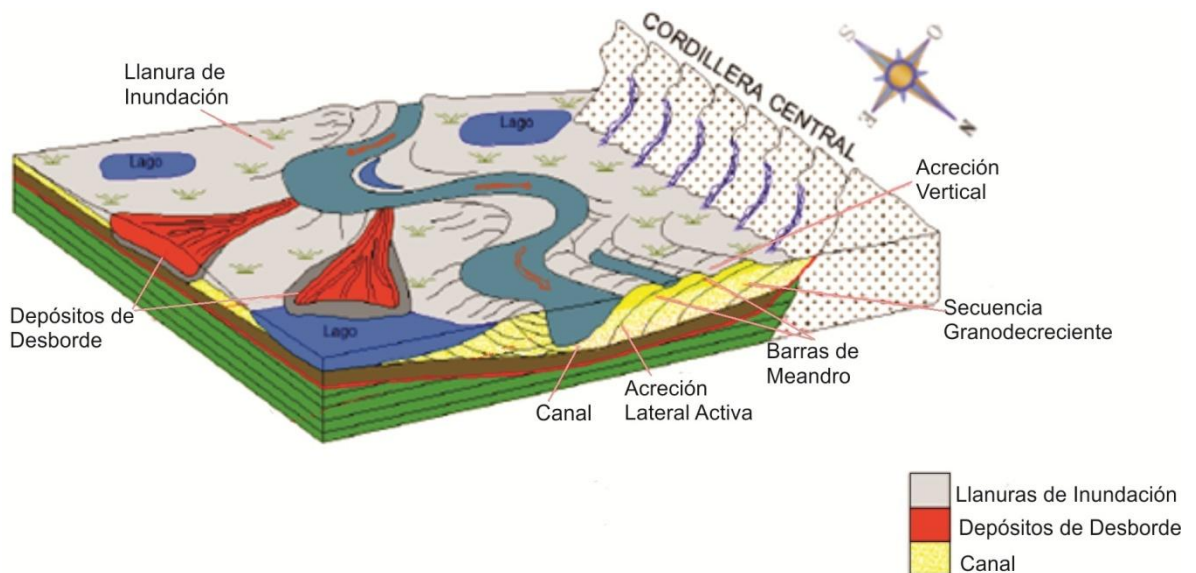
Estos son los procesos que tienen mayor importancia en la caracterización y rendimiento de reservorio. (1) Las acumulaciones de arena en las barras de meandros que forman el principal reservorio de un sistema de ríos meándricos. (2) Estas acumulaciones pueden ser altamente compartimentada como resultado del corte transversal, canales llenos de lodo. (3) Tendencia grano decreciente de los depósitos de barras de meandro, es decir, que también disminuye la permeabilidad hacia arriba, Por esta razón, una inyección de agua tenderá a ser más eficientes en la base, zonas de mayor permeabilidad como una arenisca de las barras del meandro y no dragar en las partes altas donde el grano es más fino.

6.1.1.1 Procesos de Deposición. Los principales elementos morfológicos de que consiste un sistema de ríos meándricos (Figura 7) son: (1) el canal principal, (2) las barras del meandro, (3) diques naturales (4) las planicies de inundación, (5) los lagos laterales, y (6) las áreas de desborde. Ya que en estos sistemas los sedimentos se acumulan debido a la acción del canal principal y de la inundación periódica de la planicie adyacente, los depósitos están asociados a estos elementos morfológicos:

Depósitos de Canal:

Son depósitos compuestos generalmente de material grueso que los ríos pueden mover o transportar durante los períodos de máxima competencia de las corrientes. Este material incluye gravas, troncos u otro material vegetal de grandes dimensiones, y lodo parcialmente consolidado que ha sido erosionado de las del canal. Tienden a ser depósitos de forma lenticular, en donde lo más característico es la imbricación de clastos que presentan.

Figura 7. Características morfológicas de un sistema fluvial meándricos, mostrando los sitios principales de depósito y los productos generados.



Fuente: Patiño y Vargas, 2010.

Depósitos Point Bars/Barra de Meandro:

Estos depósitos se generan en las partes interiores de las curvas del canal a partir de un flujo en espiral que se crea en dicho punto. Debido a este flujo, los granos más gruesos tienden a ser depositados en las partes basales de la barra, y los sedimentos finos en la parte superior, dando como resultado una secuencia de disminución de tamaño de grano hacia arriba de las barras del meandro. La estructura sedimentaria primaria más característica de los depósitos de barras de

meandro es la estratificación cruzada cóncava, tanto de pequeña como de gran escala.

Depósito Natural levee/ Diques Naturales:

Estos depósitos se desarrollan en la porción cóncava de la curva que delimitan los meandros. Son de mayor espesor y de grano más grueso cerca de los canales, y se hacen más finos a medida que avanzamos hacia la planicie de inundación. Arenas finas con estratificación horizontal y rizaduras de corriente, sobreyacidas por lodos laminados, son muy comunes en los depósitos de muro.

Depósitos Floodplain/ Planicies de Inundación:

Están constituidos por sedimentos finos depositados por suspensión a partir de las aguas que inundan la planicie adyacente al canal. Estos depósitos tienden a desarrollar poco espesor, y comúnmente contienen grandes cantidades de material vegetal; así mismo, presentan una bioturbación moderada.

Depósitos de *Crevasse Splay* /desborde:

Estos depósitos se generan cuando las aguas de la corriente principal logran romper los muros que la confinan. La sedimentación por tracción y suspensión ocurre rápidamente cuando el agua cargada, tanto con material grueso como fino, pierde su competencia en el transporte, dando como resultado depósitos gradados.

Depósitos de lago lateral:

Consisten de sedimentos finos, arcillas y lodo, que han sido introducidos a los lagos laterales durante las épocas de inundaciones. Son comúnmente laminados, y pueden llegar a presentar restos de plantas, así como ostrácodos y moluscos de agua dulce.

6.2 ATRIBUTOS SÍSMICOS

Los atributos son una medida de los datos sísmicos que ayudan a visualizar, cuantificar y realzar las características de interés en una interpretación. Un buen atributo sísmico corresponde al que es directamente sensible a los rasgos geológicos y/o propiedades de reservorio, permitiendo definir el ambiente estructural y deposicional que al mismo tiempo ayudan a inferir algún tipo de propiedad sobre los datos de interés. (Chopra, 2007).

Se pueden utilizar atributos sencillos o combinados para predecir litología, facies, porosidad, contenido de fluidos, etc. (Quilen, 2006). También pueden ser empleados en interpretación estratigráfica para definir geometrías internas de los estratos y sus terminaciones o para revelar patrones de fallas o fracturas (Valencia, 2010). Como una extensa generalización, los atributos derivados de tiempo proveen información estructural, los atributos derivados de amplitud proveen de información estratigráfica y de reservorio.

Uno de los objetivos de los atributos es que el intérprete capte experiencia en el reconocimiento de patrones cuantificando amplitudes y características morfológicas vistas en los datos sísmicos usando un conjunto de cálculos determinísticos realizados en un equipo. En sentido general los atributos sísmicos abarcan todas las cantidades derivadas de los datos sísmicos; por ello se considera que los atributos incluyen cantidades tales como velocidad de intervalo, inversión acústica, impedancia, predicción de la presión de poro, terminación de los reflectores, atributos de traza compleja y AVO.

Al asignarle el nombre de atributo a una cantidad que se basa en cálculos muy sofisticados como los mencionados anteriormente, es necesario reconocer que las estimaciones de alguna manera están contaminadas por errores y por lo tanto son

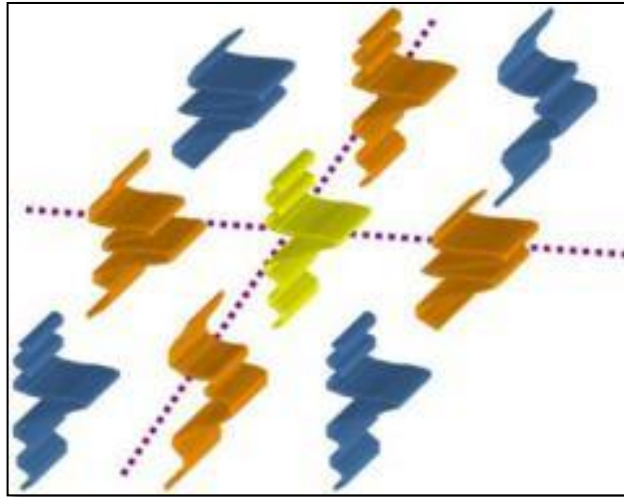
susceptibles a la calibración de datos de pozos a través de la geoestadística o de otras técnicas de integración de datos (Chopra, 2007).

Para este trabajo se presta principal interés a los atributos derivados del tiempo, que resalten características geométricas, estos se encargan de medir ya sea el grado de similitud entre trazas o la geometría generada entre reflectores. Con todo esto se logran reconocer los rasgos de discontinuidad, y curvatura de los geocuerpos. A continuación se describen algunos de los atributos geométricos utilizados:

6.2.1 Atributo de Varianza

La varianza es la medida de la variación local de la amplitud entre trazas adjuntas, lo que permite aislar bordes asociados a fallas y variaciones laterales de facies, esto significa que a medida que aumenta la varianza aumenta la discontinuidad, lo cual en el contexto geológico puede estar señalando la presencia de discontinuidades estructurales (fallas y fracturas) o estratigráficas (cambios laterales como canales fluviales, discordancias, etc.). En la Figura 8, se muestra esquemáticamente la forma en que trabajan los atributos de varianza; la traza de color amarillo mide el grado de no varianza o coherencia que tiene con respecto a las trazas que la rodean en dirección Inline y Crossline. El atributo de varianza hace parte de la familia de coherencia.

Figura 8. Esquema del concepto de coherencia.



Fuente: Chopra, 2010.

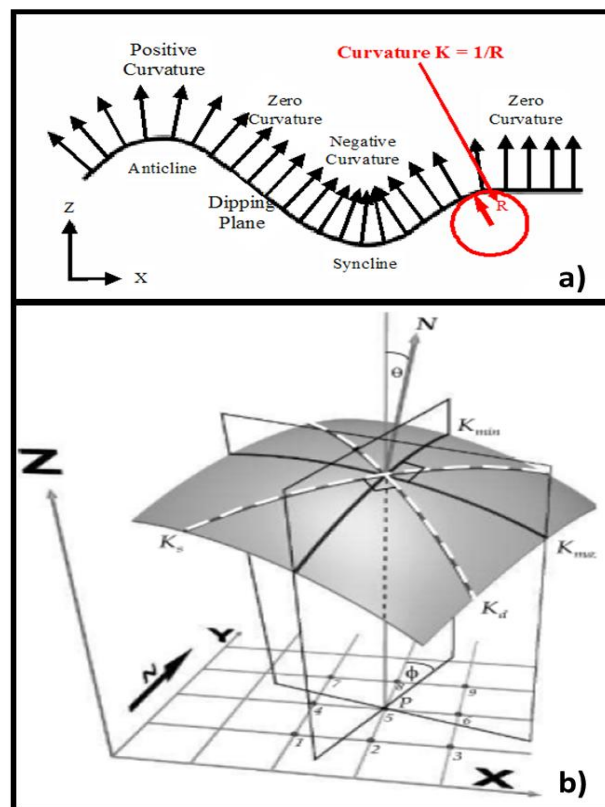
El atributo de varianza se aplica en base al cálculo de parámetros de muestreo, que consiste en un filtrado horizontal que controla el número de trazas para estimar la varianza horizontal y con un smoothing vertical que se comporta como un filtro cónico donde valores altos reducen el ruido de manera eficaz pero enmascaran la nitidez de los bordes detectados. Este atributo utiliza la variación local como una medida de inconformidad de la señal, la variación local se calcula para cada voxel desde slices horizontales, si este slice se encuentra dentro de un reflector continuo, la variación de la amplitud será pequeña, mientras que cambios de amplitud debido a una zona de falla dará lugar a una variación más grande.

6.2.2 Atributo de Curvatura

Los atributos de curvatura permiten conocer la relación geométrica de los reflectores a ser cóncava o convexa y la proporción entre ellas. Entre estos atributos se encuentran el atributo de (1) Mínima Curvatura, (2) Máxima Curvatura, (3) Curvatura Media, (4) Mayor curvatura Negativa y (5) Mayor Curvatura Positiva. En la Figura 9, se muestra de forma esquemática la forma en que funcionan los

Atributos Sísmicos de Curvatura, siendo esta inversamente proporcional al radio de la circunferencia que representa un cambio en cada punto de cada reflector de nuestro cubo sísmico, curvatura en 3dimensiones se describe la intersección de dos planos ortogonales con la superficie, donde K_{min} es la mínima curvatura, y K_{max} es la máxima curvatura, los otras dos planos ortogonales describen a K_d que representa a la curvatura en dirección del buzamiento y K_s describe la curvatura en dirección del rumbo (Chopra, 2010).

Figura 9. (a) Definición de curvatura en dos dimensiones., 2001.(b) definición de curvaturas en 3 dimensiones.



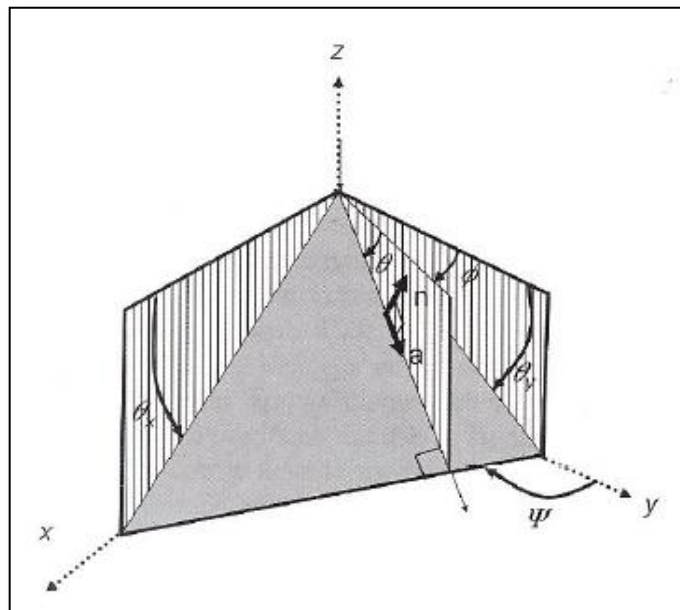
Fuente: Chopra y Marfurt, 2010.

6.2.3 Atributo de Buzamiento y Azimuth

Los atributos de buzamiento y azimuth permiten conocer el carácter de inclinación y orientación de los reflectores sísmicos, haciendo más fácil la identificación de bloque inclinados o rotados con respecto a otros, de la misma forma cambios en el dominio del buzamiento y de rumbo de los estratos, iluminan fallas haciendo más fácil la interpretación estructural.

Matemáticamente, un elemento plano de un reflector sísmico puede ser definido únicamente por un punto del espacio, $X=(x, y, z)$, y una unidad perpendicular a la superficie, $n = (n_x, n_y, n_z)$, donde n_x, n_y, n_z denotan los componentes a lo largo de la x, y, z respectivamente, y se escogen de manera que $n_z \geq 0$ (Figura 10).

Figura 10. Matemáticamente, la nomenclatura sísmica utilizada para definir buzamientos de un reflector.



Fuente: Chopra y Marfurt, 2010.

Donde:

n = vector unitario normal perpendicular al reflector, a = vector del buzamiento a lo largo del reflector; θ = magnitud del buzamiento; ϕ = azimuth del buzamiento ψ = esfuerzo, θ_x = buzamiento aparente en el plano xz, θ_y = buzamiento aparente en el plano yz.

7. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

A través de este capítulo se va a desarrollar la metodología empleada para la realización del modelo 3D de distribución de geocuerpos, en cada una de sus etapas. Se tratará inicialmente lo concerniente al análisis de núcleos, amarre roca-registro, definición de electrofacies, correlación estratigráfica, calibración sísmica-pozo, seguida de la interpretación de horizontes y aplicación de atributos sísmicos. Por último en el software académico PETREL 2009 se cargan los datos que integran el modelo, así como el proceso de ensamble de la malla 3D y distribución de electrofacies en el campo a través de métodos geostatísticos.

7.1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

Esta primera etapa consistió en realizar una recopilación y análisis de fuentes bibliográficas con el fin de adquirir las bases teóricas necesarias con respecto al tema de estudio.

7.2 DESCRIPCION DE NÚCLEOS

Se realizó una descripción general de los núcleos disponibles en la Litoteca Nacional, que corresponden a 400 pies de roca parcialmente recuperada del Pozo Tenerife-2, Formación Mugrosa C (Tabla 1). Para este análisis se reconoció litología, color, estructuras sedimentarias (físicas, químicas y biogénicas), tamaño de grano, morfología de granos (grado de redondez y esfericidad), sorteado, empaquetamiento, tipo de armazón, contactos entre granos, grado de cementación, grados de impregnación y minerales accesorios; con el fin de

generar curvas de tamaño de grano y definir sub-ambientes de depositación a partir de las características litológicas presentes.

El análisis de estos corazones fue basado en la metodología de (Folk, 1974), la cual ayudo a tener una mejor idea de los cambios que se dieron durante la depositación de sedimento en el Valle Medio del Magdalena en el Terciario.

Tabla 1. Intervalos corazonados, recuperados actualmente en la Litoteca Nacional.

Pozo	Núcleo	Intervalos profundidad (pies)	Recuperado (pies)
TENERIFE-2	1	7042-7064	20
	2	7064-7086	22
	3	7093-7123	7
	4	7123-7158	31
	5	7272-7298	16
	6	7298-7322	23
	7	7322-7346	21
	8	7346-7374	11
	9	7379-7399	19
	10	7399-7439	40
	11	7439-7464	18

7.3 AMARRE ROCA – REGISTROS DE POZO

El amarre roca registro es un paso fundamental, y tiene como objetivo llevar de manera idónea los datos obtenidos de la roca (corazones) al reservorio a través de los registros de pozo (Tabla 2).

Tabla 2. Inventario de los registros más utilizados, clasificados por pozo.

REGISTROS TENERIFE		
Tenerife 1	Tenerife 2	Tenerife 3
SPc : SP	SPc: SP	SN: ShalRes
SP1	SP1: SP	SPc : Spontaneous Potential
MCAL: caliper	MCAL: Caliper	MCAL: Caliper
ILD: DeepRes Induction-Deep Resistivity	ILD: DeepRes Induction-Deep Resistivity	ILD: DeepRes Induction-Deep Resistivity
ITT	GR: GammaRay 3 Gamma Ray	ITT
CILD	CILD	CILD .mS/m
DT: Sonic Sonic Travel Time	DT: Sonic Travel Time	DTbu: Sonic Travel Time

Los registros de potencial espontaneo (SP) son los más comunes en el campo Tenerife y se usan porque no son afectados como el registro gamma ray (GR) por el contenido de potasio. Para esta etapa se compararon las respuestas del registro potencial espontaneo, sónico (Dt) y un resistivo (ILD) ya que permiten identificar el tipo de material en función de su resistividad característica. Las propiedades físicas de las rocas y minerales medidos en un registro eléctrico, son la conductividad eléctrica y el potencial espontáneo. Estos se compararon con las descripciones litológicas, para asociarlas posteriormente a calidad del reservorio como se describe a continuación:

Ubicación en profundidad real del núcleo: Se genero una curva de tamaño de grano y calibrado de la roca a partir de los análisis de corazón y posteriormente esta curva se comparo core a core según la preservación del núcleo con los registros litológicos y resistivos presentes en el pozo corazonado, llevando a profundidad real el núcleo según la similitud de las respuestas entre las curvas. Además se comparó estas respuestas con los datos de permeabilidad y porosidad a partir de las muestra de núcleo (*plots*) obtenidos de los núcleos de Tenerife-2. (Tabla4).

Estas curvas discretas de tamaño de grano y calibrado se realizaron con base en los parámetros descritos en la Tabla 3; de tal manera que se lograra diferenciar la granulometría y grado de calibración en este intervalo del pozo, para posteriormente poder realizar un mejor ajuste con los registros de pozo (Figura 11)

Tabla 3. Nomenclaturas propuestas para la generación de curvas pie a pie de tamaño de grano y calibrado a partir de corazones.

Tamaño Grano		
1	Arcilla	Lodo
2	Limo	
3	Muy fina	Arena
4	Fina	
5	Media	
6	Gruesa	
7	Muy gruesa	
8	Gránulos	Grava
9	Guijas	
10	Guijarros	

Calibrado	
0	Pésimo
1	Malo
2	Moderado
3	Bueno
4	Muy Bueno

Tabla 4. Valores de tamaño de grano, porosidad, permeabilidad (K) y calibrado, obtenidas de las muestras de corazones pozo Tenerife-2.

MD	Tamaño de Grano	Porosidad	K	Calibrado
7066.5	4	16.6	3.3	3
7068.5	4	18.1	5.2	3
7069.5	4	25.1		3
7070	4	14.7	2.8	3
7333.75		14	1.7	3
7342.5	4	12.8	2.2	3
7343.5	4	13.7	2.8	3
7344.5	4	13.7	2.6	3
7347.5	4	10.3	2	2
7351.5	4	8	1.9	2
7352.5	4	11.3	2.4	2
7372.5	4	15.3	24.7	2

La tendencia general observada en las areniscas es el aumento de la porosidad, relacionado con el tamaño del grano, relativamente las areniscas de grano medio muestran una mayor permeabilidad que las areniscas de grano fino y lodolitas (Figura 11).

El análisis de la porosidad y permeabilidad, en la calidad de los reservorios depende de la capacidad de almacenamiento y la capacidad de flujo que presenta una roca, estas propiedades son controladas por diferentes factores geológicos.

Estos factores incluyen los primarios o texturales generados durante la depositación de los sedimentos (Tamaño de grano y sorteado de los granos) y los factores influenciados por procesos post depositacionales como la diagénesis (Química, física y/o orgánica), que controlan la geometría final de la estructura de los poros, la orientación de los granos y el empaquetamiento así como el grado de cementación y el contenido de arcilla en el espacio poroso.

Figura 11. Valores de calibrado, tamaño de grano, porosidad y permeabilidad tomados de core y core plugs para una secuencia dominada por canales de arena y llanura de inundación característicos en el Pozo Tenerife-2.

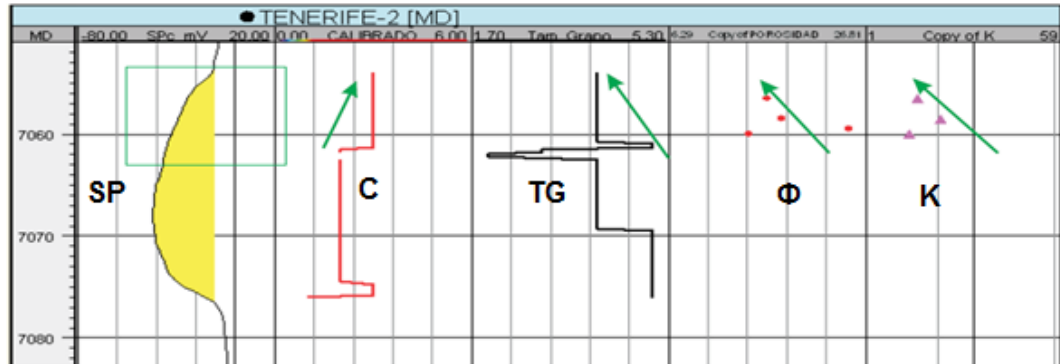
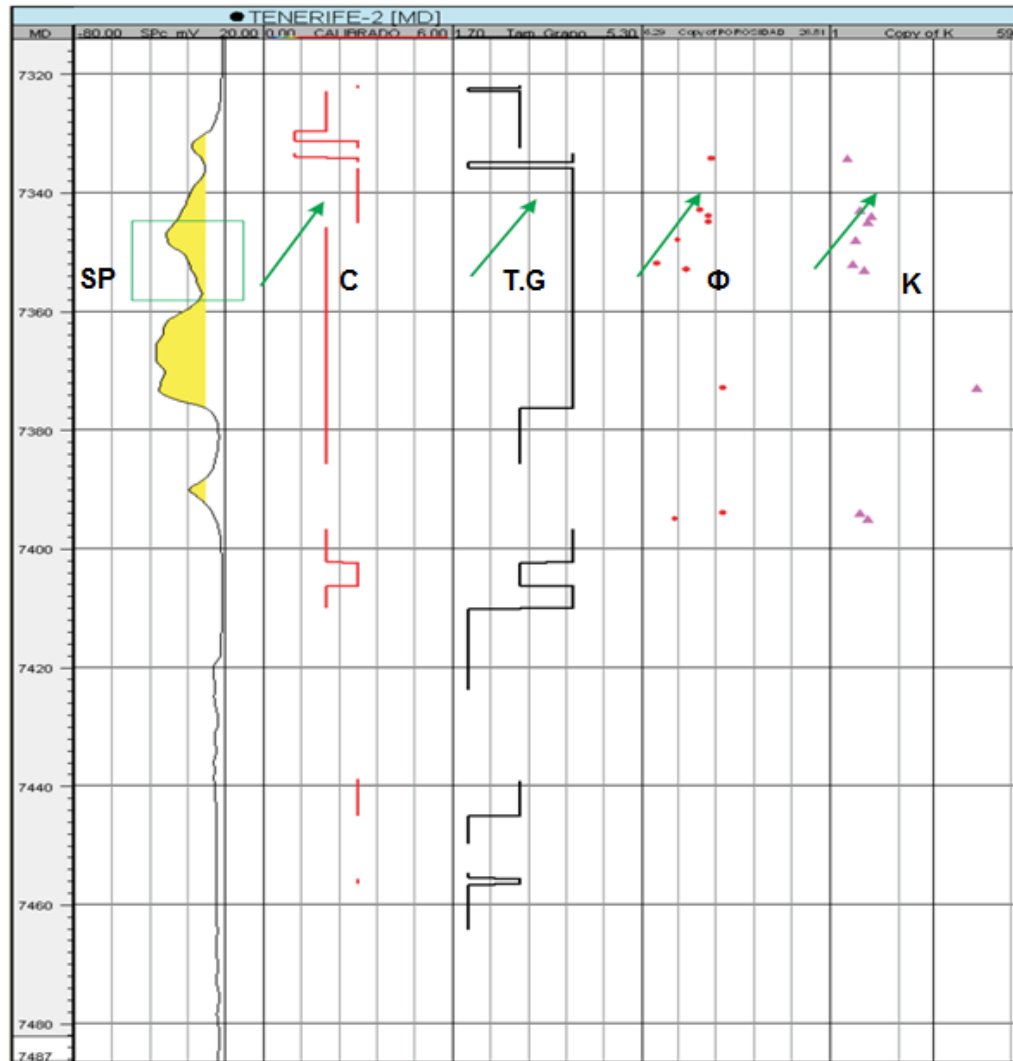
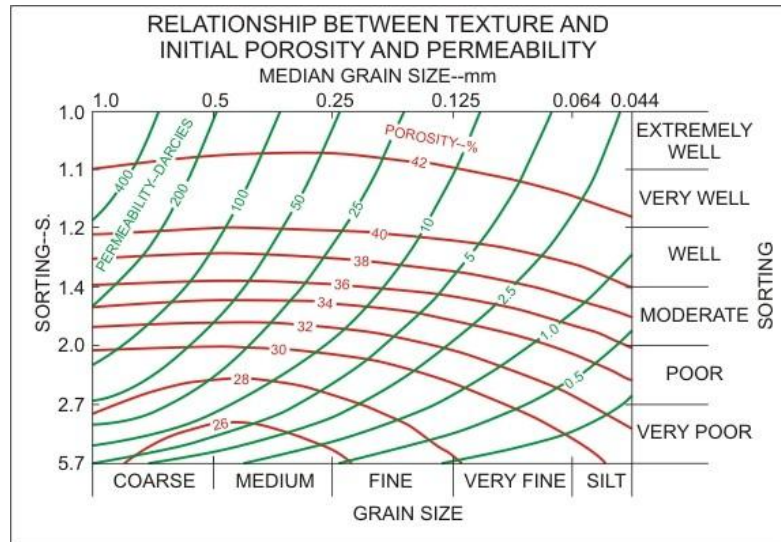


Figura 11. Continuación.



La relación propuesta en la Figura 12 es útil para entender como las características de un reservorio dependen de las condiciones de depositación.

Figura 12. Relación propuesta después de Sneider 1987 entre el tamaño de grano, el sorteado, la porosidad y la permeabilidad.



Fuente: Slatt, 2006.

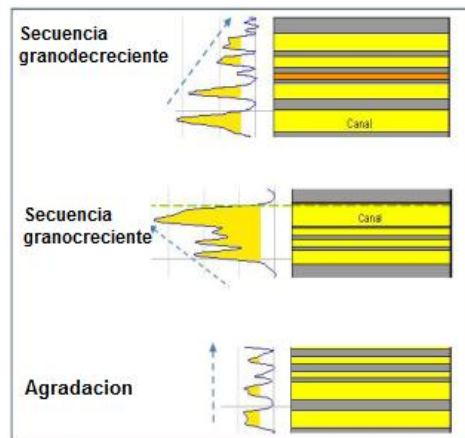
La relación entre el tamaño de grano, porosidad y permeabilidad aumenta cuando aumenta el calibrado de la roca. Para las muestras de corazones del campo Tenerife, el tamaño promedio de las arenas es de grano fino, con permeabilidad promedio de 5 milidarcys, y porosidades que varían en 14% y 16%, lo cual nos indica que estas arenas son pobremente calibradas, está relación del mal calibrado, se debe a que las arenas contienen una gran cantidad de partículas finas, reduciendo la porosidad y la permeabilidad.

7.3.1 Electrofacies

A pesar de no existir un muestreo pie a pie de la Formación Mugrosa-C, el objetivo es generar curvas de litofacies. Con el fin de reconocer las distintas electrofacies fundamentales, analizar la asociación vertical con otras secuencias para poder deducir su evolución lateral y reconstruir los modelos de electrofacies que ayuden a definir los ambientes sedimentarios.

En los tres pozos se identifican en orden de abundancia hacia la base, facies de llanuras de inundación, canales y depósitos de desborde, los canales van aumentando su abundancia hacia el tope, son comunes las electrofacies aserradas que indican intercalaciones de canales con niveles de llanuras de inundación como se muestra en la figura 13.

Figura 13. Electrofacies Aserradas Características en Campo Tenerife.



7.4 CARACTERIZACION ESTRATIGRÁFICA

7.4.1 Correlación de Pozos

La correlación de registros entre pozos pretende establecer y visualizar la extensión lateral de las formaciones de interés, y la relación espacial entre estas a lo largo y ancho del campo a partir del reconocimiento de patrones en las diferentes curvas para zonas específicas de la sección registrada.

Para llevar a cabo un buen proceso de correlación, se debe tener conocimiento acerca de diferentes temáticas en geología y evaluación de formaciones, como lo son: ambientes de sedimentación, principios de adquisición de registros y sus

medidas, fundamentos de ingeniería de yacimientos, geología de desarrollo y análisis de registros (cualitativos y cuantitativos).

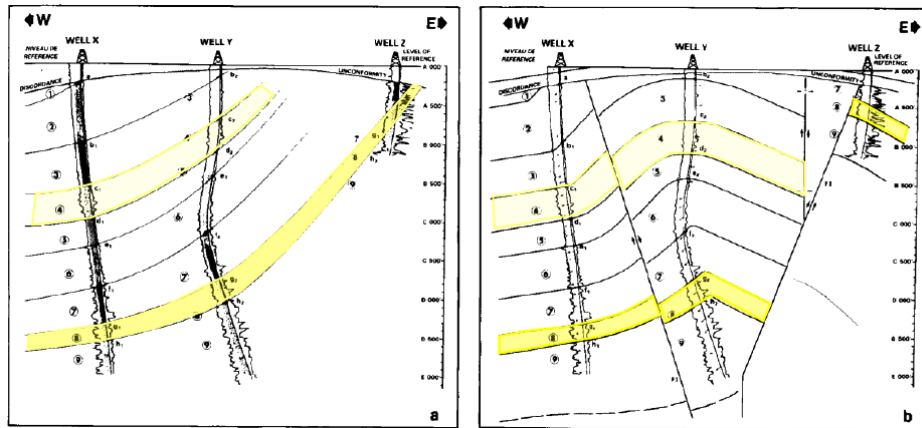
Es por ello, que para este trabajo se interpretaron registros dipmeter, patrones de estacados y electrofacies en los tres pozos del campo Tenerife, con el fin de extraer la mayor cantidad de información concerniente a la ubicación de superficies estratigráficas.

Además estudios bioestratigráficos fueron propuestos con el objetivo de definir estas superficies y la discordancia; pero el carácter estéril (sin recobro de palinomorfos) de la mayoría de las muestras analizadas no permite asignar edades a los intervalos estudiados.

7.4.2 Registros Dipmeter

El uso del registro Dipmeter en áreas complejas tectónicamente, es muy importante como se puede observar en el ejemplo de la Figura 14, en donde la figura de la izquierda es una excelente correlación estratigráfica con datum en el nivel del mar, y la Figura 14 de la derecha utilizando los datos de dipmeter mejora la interpretación del corte estructural (Rubiano, 2009). Además de ser de gran utilidad al momento de determinar relaciones estratigráficas en un área debido a los cambios de buzamiento entre las unidades.

Figura 14. Ejemplo de la utilidad del registro dipmeter en la interpretación geológica entre pozos.



Fuente: Serra, 1985.

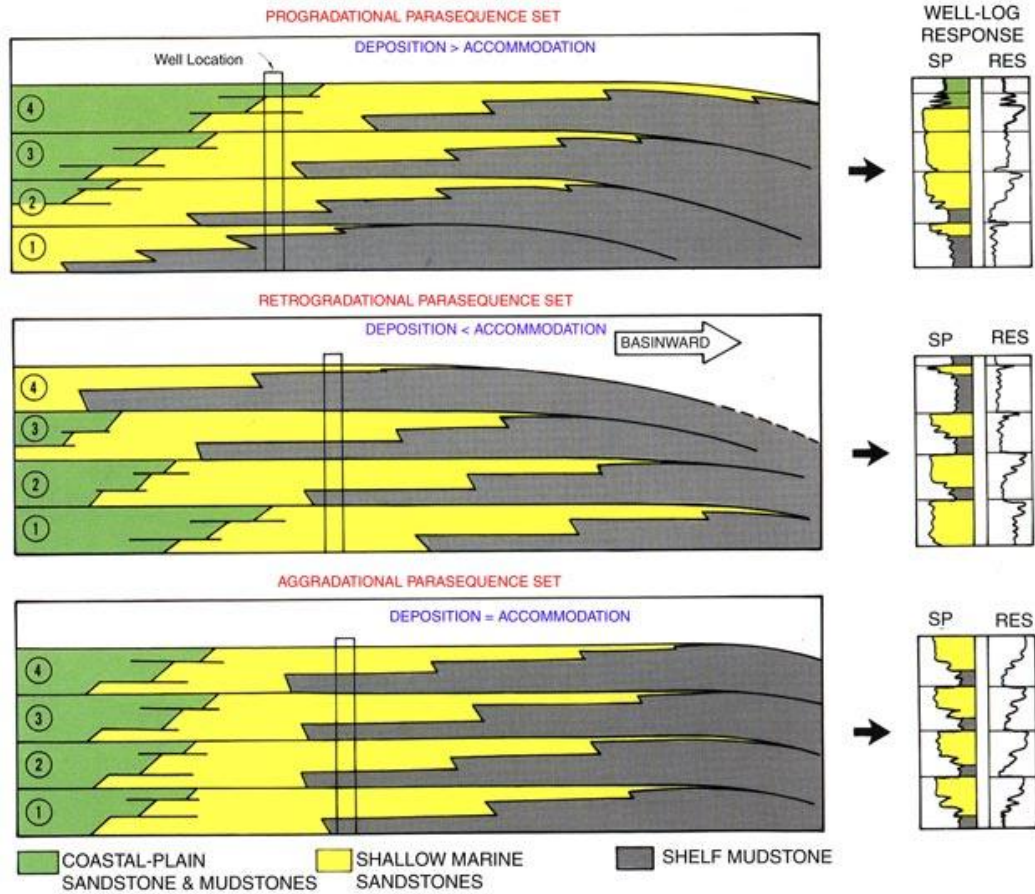
Se utilizaron datos de dipmeter, empleando la metodología del SCAT (*Statistical Curvature Analysis Techniques*) para determinar las relaciones estratigráficas entre las diferentes unidades del área de estudio. Empleando esta herramienta se lograron diferenciar más fácilmente las relaciones angulares entre las siguientes unidades: Colorado - Mugrosa y Mugrosa - Esmeraldas.

7.4.3 Patrones de Estacado / *stacking patterns*

Para definir paquetes de estratos limitados por discontinuidades, la estratigrafía de secuencias enfatiza los controles externos en la sedimentación, los límites de secuencia se forman en respuesta a caídas relativas del nivel del mar. Una parasecuencia se define como un conjunto de estratos, relativamente concordantes, genéticamente relacionados, limitados por superficies de inundación marina o sus superficies correlativas, una superficie de inundación marina es aquella que separa estratos más jóvenes de otros más antiguos y a través de la cual hay evidencia de un abrupto incremento en la profundidad del agua.

Las parasecuencias presentan arreglos sedimentarios en donde los sedimentos más jóvenes fueron depositados en aguas menos profundas que los más antiguos por debajo el conjunto de parasecuencias, genéticamente relacionadas forman un patrón de estacado particular, limitadas en muchos casos, por superficies de máxima inundación marina y sus superficies correlativas (Van Wagoner *et al.*,1988). Los patrones de estacado en un set de parasecuencias (Figura 15) pueden ser progradacionales: cuando las parasecuencias mas jóvenes migran hacia el centro de cuenca porque la tasa de sedimentación es mayor que la tasa de creación de espacio de acomodación; retrogradacionales: cuando las parasecuencias mas jóvenes migran hacia la costa porque la tasa de sedimentación es menor que la tasa de creación de espacio de acomodación; y agradacionales: cuando las parasecuencias mas jóvenes se apilan una sobre otra sin desplazamiento lateral significativo porque la tasa de sedimentación esta balanceada con la tasa de creación de espacio de acomodación.

Figura 15. Patrones de estacado/ *Stacking Pattern*.



Fuente: Van Wagoner *et al.*, 1988

7.4.4 Interpretación de Paleocorrientes

Esta metodología consiste en diferenciar de la totalidad de los datos suministrados del registro de dipmeter, los patrones de paleocorrientes de otros tipos de información, como son las medidas de rumbo y buzamiento de la estratificación, o medidas de fracturas (fallas y/o diaclasas) etc.

Para la obtención de los datos de paleocorrientes se interpretaron los resultados a partir del método de SCAT, (Rubiano, 2000).

En la aplicación de este método se siguieron los siguientes pasos:

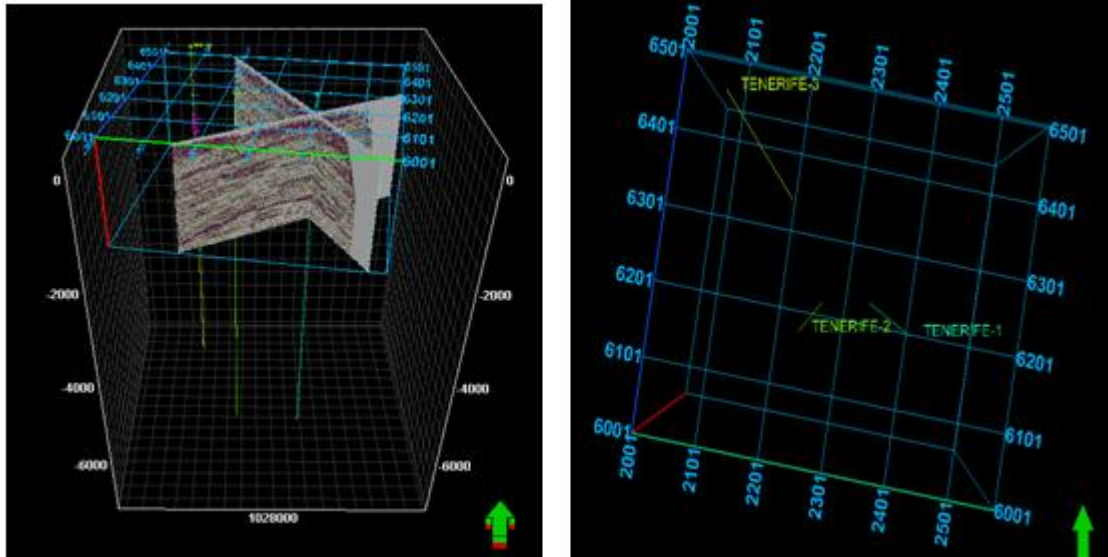
- Definición de los valores regionales de rumbo y buzamiento de la estratificación para cada una de las diferentes formaciones en cada pozo.
- Corrección por basculamiento (utilizando los valores regionales de la estratificación) de todos los datos obtenidos del registro de dipmeter para cada pozo y unidad estratigráfica estudiada.
- Selección y análisis estadísticos de los datos con buzamientos entre $>5^\circ$ y $<45^\circ$ (grados), asumiendo que es este rango donde se encuentra el ángulo de estabilidad de las partículas al sedimentarse en un medio acuoso.
- Se determinó el valor de la media (θ , medida en azimuth) y su relación de consistencia (CR) para cada unidad estratigráfica y para cada pozo.
- Con base en lo anterior se procedió a visualizar estas paleocorrientes, haciendo uso del programa StereoNett y Petrel graficando estas direcciones en cada unidad estratigráfica para cada uno de los pozos.

7.5 CARACTERIZACIÓN DE INFORMACIÓN SÍSMICA

7.5.1 Información Sísmica

La información sísmica disponible y proporcionada por el Instituto Colombiano del Petróleo corresponde a un cubo sísmico 3D migrado-postapilado en tiempo, a partir de la onda P, conformado por 504 inlines y 576 crosslines, que cubre un área de 20 km². La adquisición produjo 4498ms de grabación con un intervalo de muestreo de 2ms, para efectos de rendimiento de procesos en el software PETREL se trabajó con un recorte(*crop*) del cubo sísmico de 0-2012ms, en el cual se encuentra el área de estudio, ya que las formaciones de interés varían en el intervalo de 1200-1600ms (Figura 16).

Figura 16. Imagen del área del volumen sísmico del campo Tenerife y ubicación pozos Tenerife 1, 2, 3.

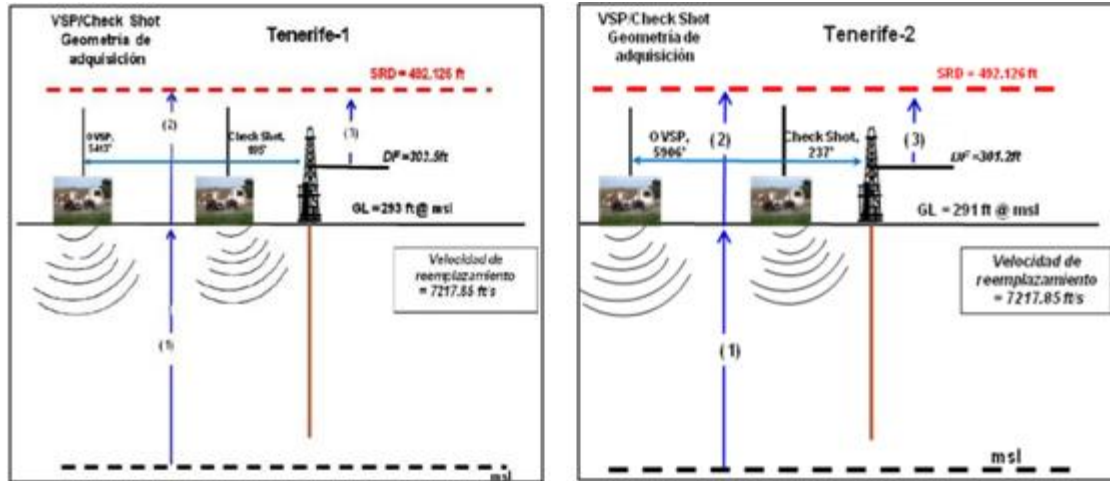


7.5.2 Calibración Tiempo-Profundidad

Para comenzar la interpretación sísmica es necesario realizar una calibración sísmica-pozo. Teniendo la información de los pozos, ubicados en un área determinada, como los marcadores, tiros de verificación (*check shots*) y registros sísmicos, se puede identificar la respuesta sísmica de los marcadores estratigráficos de interés. Luego es necesario calibrar el volumen sísmico para lograr el amarre entre reflectores y marcadores.

Un tiro de prueba de velocidad o tiro de verificación (*check shot*) es una medición sísmica de pozo que permite convertir datos de tiempo a profundidad. Su funcionamiento se basa en la colocación de un receptor, a una profundidad conocida, dentro del pozo. En la superficie, a una distancia no muy lejana, se ubica una fuente. El receptor capta el tiempo de viaje del primer arribo u onda directa que se propaga desde la fuente (Figura 17).

Figura 17. Geometría de adquisición Pozo Tenerife 1 y 2.



Fuente: Reporte sísmica de pozo Tenerife 1 y 2, Schlumberger (Camacho, 2010)

El objetivo de este apartado consiste en integrar datos de sísmica con datos de pozo para desarrollar la calibración tiempo-profundidad. Se conto con datos de sísmica 3D-3C, sísmica de pozo; *Check Shot (Zero VSP)*, *OVSP (Offset Vertical Seismic Profile)*, *Corridor Stack* (Traza sísmica de pozo) y registro *sonic scanner*, cabe anotar que no se tenía un registro de densidad, con el cual se podrían obtener mejores resultados ya que es bastante necesario a la hora de realizar el sismograma sintético.

7.5.3 Amarre *Check Shot* – VSP

Una vez realizado el control de los datos con los que se contaba para iniciar el ajuste, se procedió a construir tablas Tiempo-Profundidad (T-D) a partir de los datos de Tiro de verificación (*Check shot*) y Perfil sísmico vertical (VSP). Se realizaron todas las combinaciones posibles con puntos de referencia (Dato de referencia de la sísmica/Seismic Reference Datum SRD ó Profundidad medida/measured depth MD) y tiempo de propagación de la onda (Tiempo doble/Two Way Time TWT ó Tiempo simple/One way time OWT) de los cuales resultaron 16 tablas T-D, con las que se ejecutaron pruebas en la ventana 2D,

para verificar cuál de estas tablas ajustaba mejor entre la sísmica y los topes anteriormente identificados.

El pozo Tenerife-3 al no contar con datos de VSP y Check Shot se le ejecutó pruebas de ajuste con las 16 tablas mencionadas anteriormente (para los pozos Tenerife 1 y 2) y finalmente la tabla “Check shot MD-TWT” del pozo Tenerife-2 fue la que mejor ajuste presento -aunque para el tope de la formación Mugrosa marco un desfase notorio.

7.5.4 Amarre Corridor Stack (Traza sísmica de pozo)

El Corridor stack es el producto (TWT vs Amplitud) calculado a partir del VSP, que en apariencia se asemeja a los sismogramas sintéticos. Pero en realidad es la mejor herramienta de correlación, ya que contiene datos reales de sísmica de reflexión, así como el campo de ondas por recorrido. Para que los resultados en este procedimiento sean muy confiables, es necesario contar con la información que requiere el software como: Datum de la sísmica, Header del pozo, coordenadas, Depth, Ground Level y desviación del pozo, en este caso los pozos son verticales. Antes de dar inicio a las pruebas de ajuste fue necesario crear un corredor inverso (multiplicando los valores de la columna de amplitud por -1).

Posteriormente se cargo la sísmica, los pozos, topes, las tablas T-D y los dos archivos prn. *corridor stack* (normal e inverso); con los que se realizaron pruebas, con el fin de identificar cuál de estos generaba un mejor amarre entre la sísmica y los pozos.

Al realizar dichas pruebas, se pudo constatar que las diferencias entre la relación tiempo-profundidad de la sísmica y el corredor stack eran significativas, indicando una mala calibración que en tanto genera una relación errónea. Por lo cual se decidió aplicar un shift (desplazamiento en tiempo) a la sísmica para intentar

calibrarla con cada uno de los pozos, valores que fueron sumados a los corredor stack de cada pozo, para poder dejar la sísmica en cero.

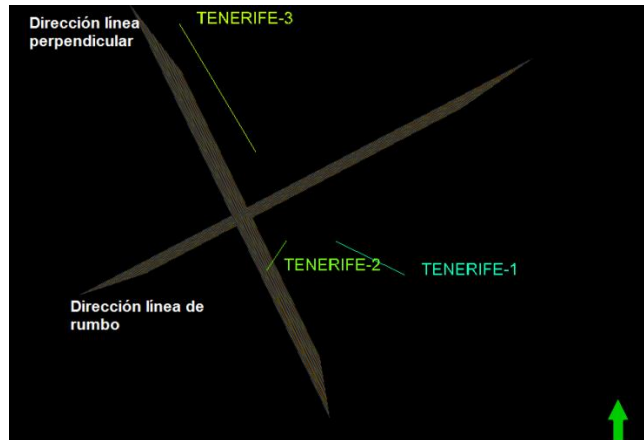
7.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL CUBO SÍSMICO

7.6.1 Interpretación de los Horizontes

Una vez realizado el calibrado entre sísmica y pozo, se desplegaron los pozos con los marcadores a ser interpretados, teniendo como referencia el horizonte de la Discordancia del Eoceno, ya que se evidencia bien en la data sísmica y posteriormente se efectuó la interpretación de los horizontes línea por línea, partiendo de la interpretación estructural para el campo Tenerife realizada por Sandoval (2010).

El método de interpretación utilizado en esta etapa fue el seguimiento manual. Se sigue el reflector a lo largo de una línea sísmica del mallado y a su vez el programa va almacenando las coordenadas x, y, z, la amplitud, y diversos atributos sísmicos. Para este proceso se tuvieron en cuenta 2 direcciones de líneas compuestas, una perpendicular al buzamiento de las estructuras, en donde era más clara la continuidad de los reflectores y otra en dirección del rumbo de las estructuras (Figura 18).

Figura 18. Dirección de las líneas compuestas interpretadas.



La interpretación se inició a partir de los marcadores del pozo Tenerife-2, ubicado hacia el centro del cubo y seguidamente se fueron desplazando las líneas en sentido E-W hasta cubrir el área total. En la siguiente tabla se muestra un paralelo entre los topes de las formaciones definidos por (Sandoval, 2010) y los nuevos topes Formacionales interpretados, los cuales variaron en profundidad.

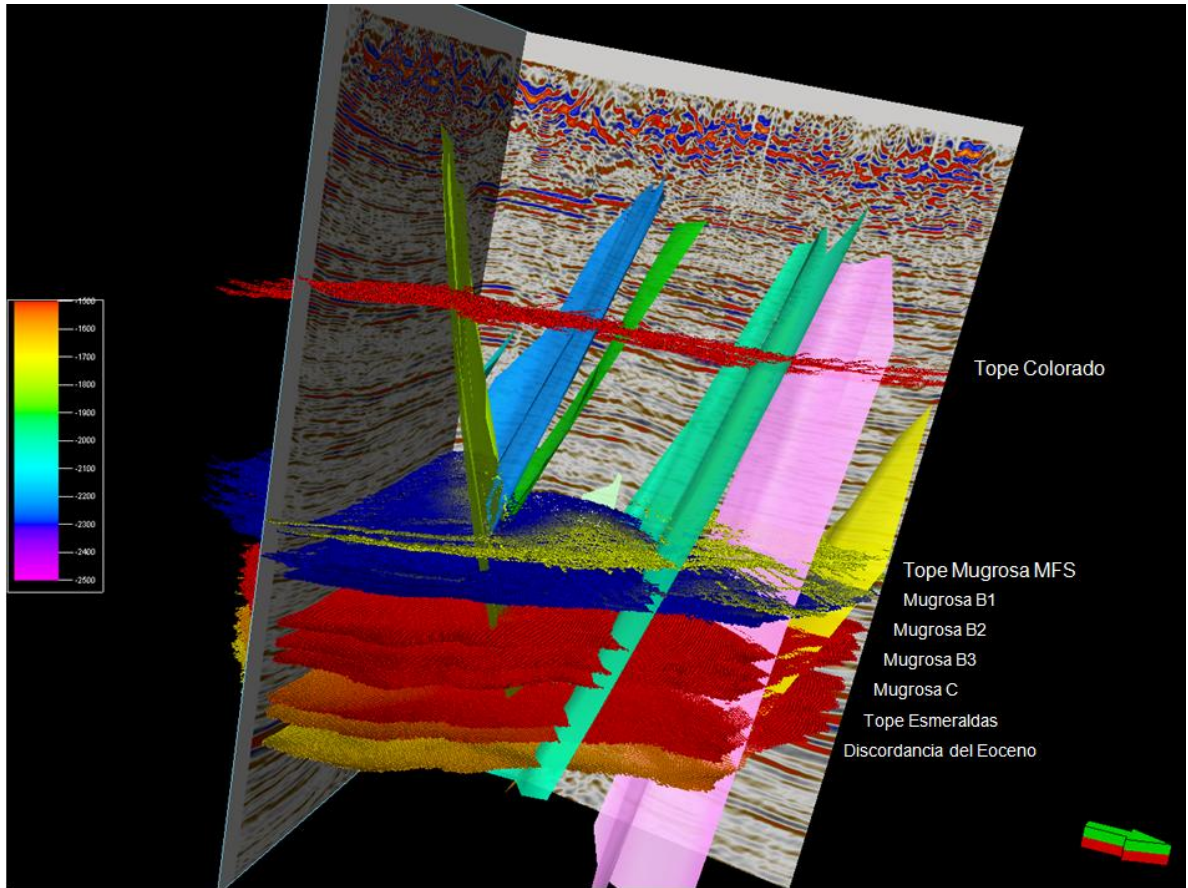
Tabla 5. Topes de las Formaciones Campo Tenerife antiguos (Izquierda), recientes (Derecha). Los topes con color azul representan los de mayores cambios.

Pozo	Tope Formacional	MD	Pozo	Tope Formacional	MD		
Tenerife-1	COLORADO ZONA A	2062,95	Tenerife-1	Colorado-MFS	1992,56		
	MFS-Mugrosa top	4589,23		Tope Mugrosa -MFS	4854,34		
	Mugrosa B-1	5066,5		Mugrosa B1 Arenas	5094,9		
	Mugrosa B tope silt	5295,75		Mugrosa B1 Finos	5296,73		
	Mugrosa B-2	5393,83		Mugrosa B2 Arenas	5451,93		
	Mugrosa B medio silt	5704,24		Mugrosa B2 Finos	5698,89		
	Mugrosa B-3	5806,36		Mugrosa B3 Arenas	5805,77		
	Mugrosa B-Base silt	6262,78		Mugrosa B3 Base Finos	6238,44		
	MUGROSA ZONA C	6369,44		Mugrosa Zona C Arenas	6361,2		
	Mugrosa C medio silt	6869,51		Mugrosa C Finos	6965,87		
	ESMERALDAS ZONA D	7185,66		Esmeraldas Zona D-MFS	7190,18		
	DISCORDANCIA EOCENO	7593,16		Discordacia Eoceno	7581,24		
	Tenerife-2	COLORADO ZONA A		2462,32	Tenerife-2	Colorado-MFS	2503,26
MFS-Mugrosa top		5045,83	Tope Mugrosa -MFS	4999,53			
Mugrosa B-1		5504,17	Mugrosa B1 Arenas	5497,75			
Mugrosa B tope silt		5712,5	Mugrosa B1 Finos	5704,4			
Mugrosa B-2		5879,29	Mugrosa B2 Arenas	5889,16			
Mugrosa B medio silt		6187,5	Mugrosa B2 Finos	6135,16			
Mugrosa B-3		6375	Mugrosa B3 Arenas	6379,36			
Mugrosa B-Base silt		6694,72	Mugrosa B3 Base Finos	6694,03			
MUGROSA ZONA C		6856,84	Mugrosa Zona C Arenas	6860,01			
"Mugrosa C (Silt)"		7255,70	Mugrosa C Finos	7263,66			
ESMERALDAS ZONA D		7529,85	Esmeraldas Zona D-MFS	7424,5			
Tenerife-3		COLORADO ZONA A	2250,23	Tenerife-3		Colorado-MFS	2335,4
		MFS-Mugrosa top	4431,55			Tope Mugrosa -MFS	4810,15
	Mugrosa B-1	4932,63	Mugrosa B1 Arenas		4961,49		
	Mugrosa B tope silt	5118,06	Mugrosa B1 Finos		5116,04		
	Mugrosa B-2	5255,57	Mugrosa B2 Arenas		5228,43		
	Mugrosa B medio silt	5632,67	Mugrosa B2 Finos		5647,51		
	Mugrosa B-3	5699,35	Mugrosa B3 Arenas		5699,87		
	Mugrosa B-Base silt	6018,16	Mugrosa B3 Base Finos		6018,28		
	MUGROSA ZONA C	6178,91	Mugrosa Zona C Arenas		6176,87		
	"Mugrosa C medio (Silt)"	6576,54	Mugrosa C Finos		6567,46		
	ESMERALDAS ZONA D	6868,81	Esmeraldas Zona D-MFS		6715,32		
	DISCORDANCIA EOCENO	7219,42	Discordacia Eoceno		7000,99		

Fuente: (1) Informe técnico ICP., Sandoval y Estévez, 2010. (2) Autores.

A continuación se muestran los horizontes interpretados en su totalidad para la Discordancia Eoceno, Formación Esmeraldas, Mugrosa y Colorado, la interpretación fue realizada línea a línea en la dirección perpendicular a la estructura y cada 10 líneas en la dirección del rumbo de las estructuras, en el área del campo de estudio.

Figura 19. Horizontes picados en tiempo.



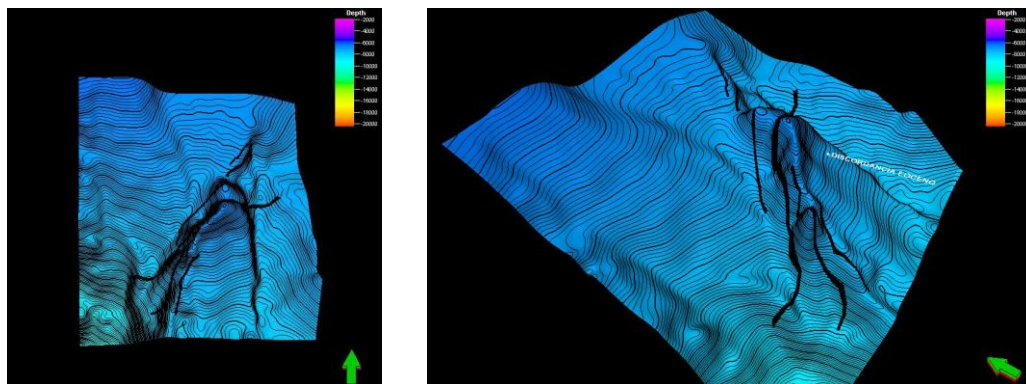
Para el horizonte más somero Colorado fue un poco difícil seguir su interpretación debido a la discontinuidad que tiene el reflector por la relación señal/ruido, mientras que la discordancia del Eoceno pudo seguirse sin problemas en la sísmica, por presentarse como un reflector de alta amplitud, bien diferenciado y con marcadores que aparecen en dos de los pozos sobre el cubo, lo que permitió trazarlo de forma coherente como se aprecia en la Figura 19. Para las Formaciones Mugrosa y Esmeraldas hacia arriba de la discordancia muestran una marcada concordancia, estas fueron trazadas a partir de los marcadores de los pozos, en algunas subdivisiones de la Formación Mugrosa debido a la relación señal / ruido se dificultó la interpretación en algunas zonas.

7.6.2 Interpretación Estructural

La interpretación estructural del campo fue tomada del informe “Modelo Estructural y Atributos Sísmicos Campo Tenerife” (Sandoval y Estévez , 2010), mientras que los topes de las formaciones geológicas se definieron nuevamente empleando la descripción de los corazones, interpretación de registros dipmeter, paleocorrientes, patrones de estacado y correlación de pozos, que en conjunto contribuyeron para definir los topes Formacionales, la calidad de esta nueva información, brinda un mayor grado de certidumbre permitiendo un mayor detalle del estudio.

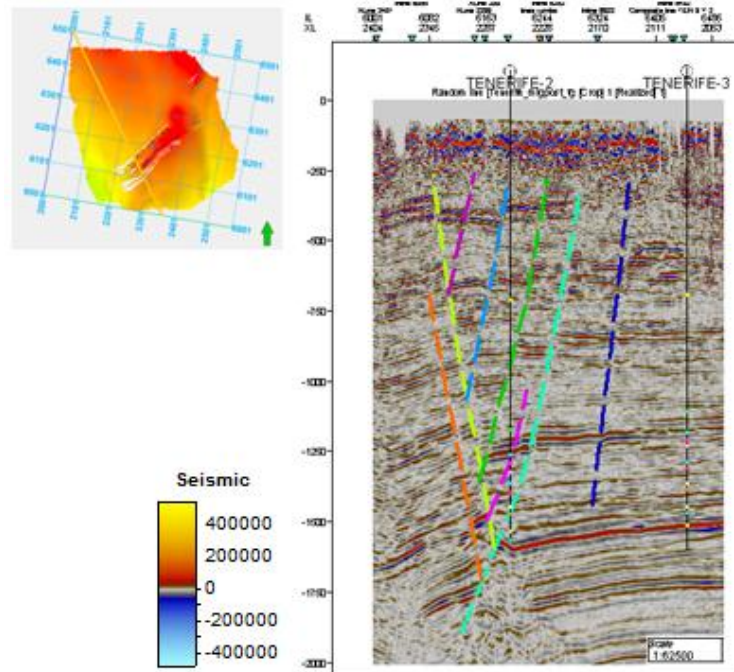
El campo se define como un estilo estructural distensivo caracterizado por tener una estructura anticlinal asimétrica abierta con cabeceo en dirección NE-SW delimitado en su flanco Oriental por fallamiento normal, el cual afecta a las Formaciones Esmeraldas, Mugrosa zona C y Mugrosa zona B. Además posee una componente extensiva reflejada en un graben tectónico delimitado por fallas normales. Hacia la parte del flanco Occidental de la estructura anticlinal la distribución de la magnitud de sus buzamientos decrece en sentido Norte a sur (Figura 20).

Figura 20. Mapa de la superficie discordancia del Eoceno, que muestra la estructura anticlinal.



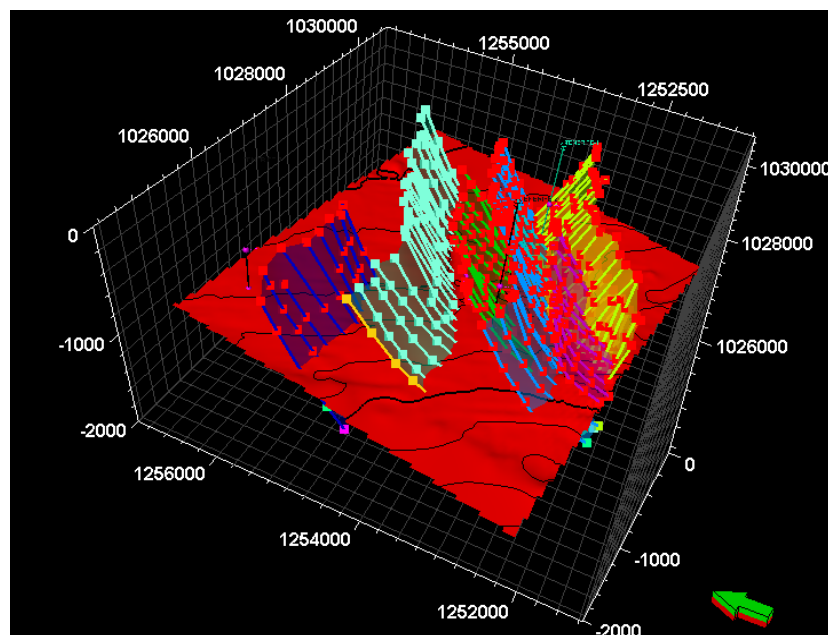
Fuente: Informe técnico ICP., Sandoval y Estévez, 2010.

Figura 21. Líneas sísmicas interpretadas en dirección del buzamiento de las estructuras.



Fuente: Informe técnico ICP., Sandoval y Estévez, 2010.

Figura 22. Vista 3D del modelo de fallas.



Fuente: Informe técnico ICP., Sandoval y Estévez, 2010.

7.7 ANÁLISIS DE ATRIBUTOS SÍSMICOS

La aplicación de diferentes atributos los más representativos para el análisis estratigráfico en los horizontes picados en TWT (Two Way Time) en milisegundos, se realizó en los intervalos comprendidos entre los horizontes Mugrosa Esmeraldas y Discordancia del Eoceno; además se reforzó la aplicación de atributos al volumen sísmico, con el fin de compararlos y evaluarlos desde el punto de vista de determinación de direcciones preferenciales de depositación de canales en ambientes fluviales presentes en el campos de estudio.

7.7.1 Aplicación de Atributos Sísmicos de Superficie

La generación de atributos sísmicos en Petrel permite aplicarlos directamente sobre las superficies, estos atributos representan el manejo matemático y estadístico en el procesamiento de la señal desde los puntos de vista de amplitud y forma de la señal. Con el fin de lograr un análisis más completo de la variación estratigráfica del intervalo de interés en la aplicación de atributos de superficie, se realizaron pruebas para determinar el intervalo en tiempo de la ventana que mostrara mejores detalles geométricos, se probaron intervalos de 5, 10, 15 y 20 milisegundos. Este análisis permitió la determinación del intervalo de 3 ms, ya que evidencian con mayor claridad los cambios estratigráficos y estructurales.

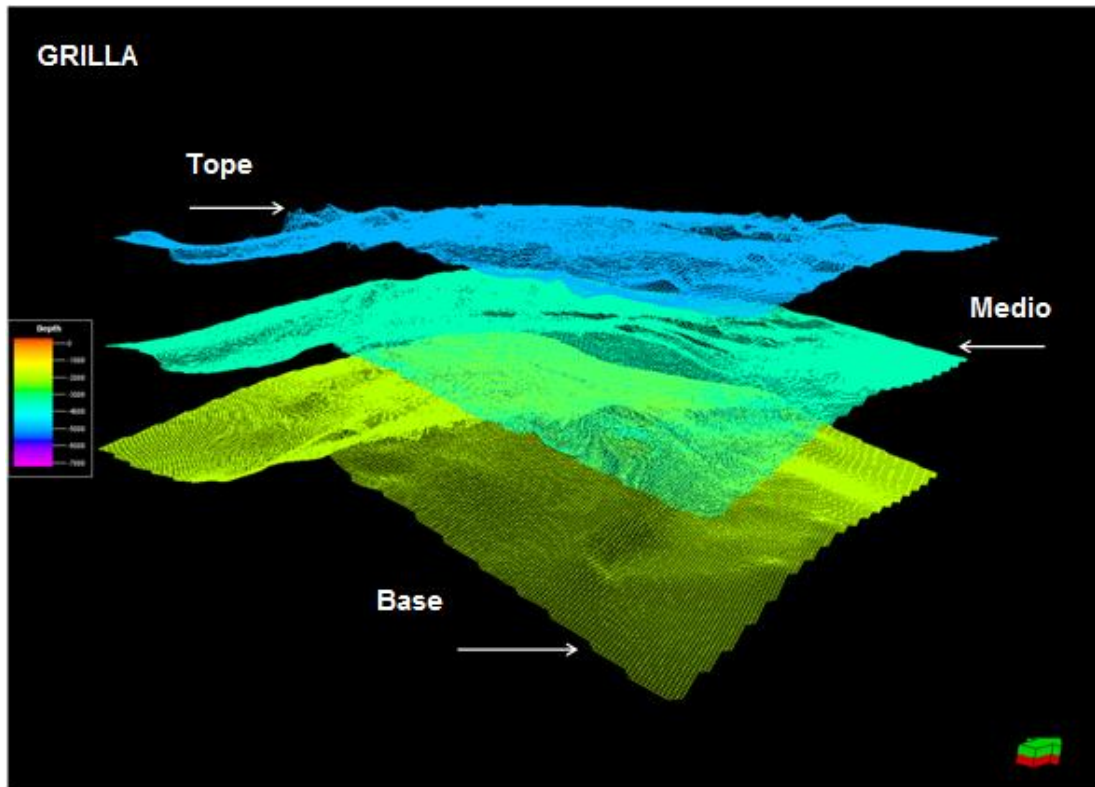
7.8 GENERACIÓN DEL MODELO 3D

El Modelamiento para este trabajo consistió en la generación de una grilla 3D, la inserción de horizontes, zonas y capas dentro de ésta. No se realizó el modelado de fallas ya que estas no afectan significativamente los objetivos propuestos en este trabajo, en este caso estratigráficos. Los pasos realizados en cada uno de los procesos se resumen a continuación:

7.8.1 Generación de una Grilla Simple

Primero se realizo una grilla 3D simple que cubre toda el área de interés en un polígono predeterminado; con celdas de 25m y se genero un esqueleto delimitado por las superficies construidas a partir de los horizontes interpretados previamente (Figura 23). Las superficies usadas como datos de entrada para delimitar este esqueleto del modelo corresponden de base a techo: Discordancia del Eoceno, Tope Esmeraldas, Mugrosa C, Mugrosa B3, Mugrosa B2, Mugrosa B1 y Tope de Mugrosa MFS.

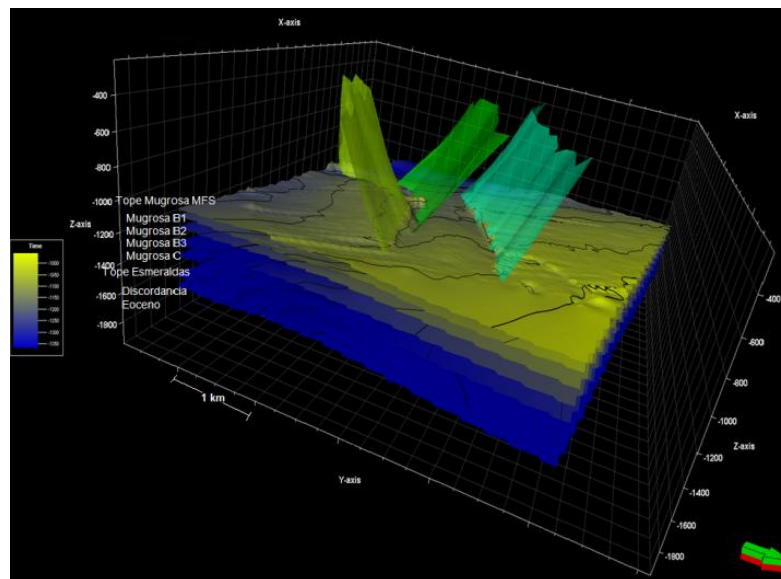
Figura 23. Esqueleto generado a partir de las superficies.



7.8.3 Creación de Horizontes

Para la creación de los horizontes se tuvieron en cuenta desde la discordancia del Eoceno hasta el tope de Mugrosa, ya que el intervalo Mugrosa - Esmeraldas representa la zona de interés. El horizonte de Colorado y las subdivisiones finas de la Formación mugrosa no fueron modelados porque no afectaban directamente el propósito de este trabajo (Figura 24).

Figura 24. Visualización de los Horizontes en tiempo insertados en la grilla con tres de las fallas principales.



7.8.4 Delimitación de Zonas

Se generaron 6 zonas a partir de superficies “conformables”, de las cuales la zona 5 representa el interés, ésta se encuentra delimitada hacia el tope por el horizonte Formación Mugrosa C y a la base por el horizonte de la Formación Esmeraldas.

7.8.5 Delimitación de Capas (*Layering*)

Una vez que se tienen las zonas creadas, éstas son divididas en capas (Figura 25). Para estimar el número de estas capas se revisaron los registros de cada uno de los pozos. La revisión consistió en tomar el registro SP en el dominio TWT y sacar la diferencia en tiempo de cada zona, teniendo en cuenta que el muestreo de la sísmica es de 2ms. En la tabla 6 se observa el número de capas que mejor representara los cambios de litología en el dominio discreto.

Figura 25. Delimitación de capas para cada zona.

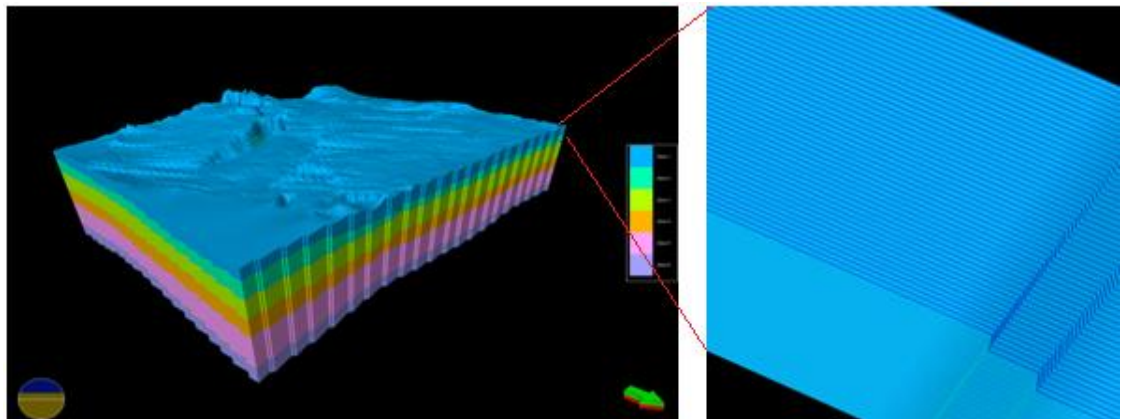


Tabla 6. Valores usados en la delimitación de capas para cada zona.

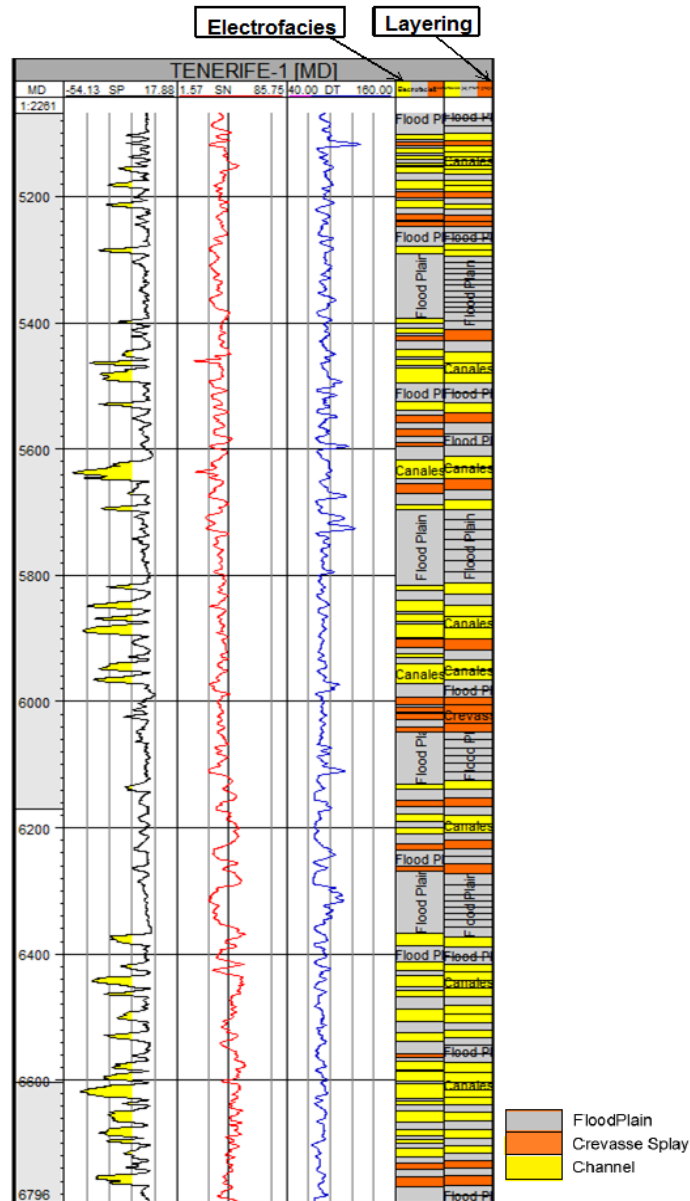
zonas	Intervalos	Espesor (ms)	Delimitación de capas (ms)
1	Tope de Mugrosa-Mugrosa B1	68	34
2	Mugrosa B1-Mugrosa B2	57	28
3	Mugrosa B2-Mugrosa B3	72	36
4	Mugrosa B3-Mugrosa C	80	40
5	Mugrosa C-Tope Esmeraldas	102	51
6	Tope Esmeraldas-Discordancia	45	22

7.8.6 Escalado de Registros de Pozo-Sísmica

El escalado se genero tratando de conservar la mayor parte de la información de entrada (Registros eléctricos, Sísmica y electrofacies), con el objetivo que el modelo fuese lo más representativo posible del yacimiento. Este escalado se realizo mediante el método de promedio *most of*. Este promedio utiliza el valor de la facie o las facies que ocupen la mayor parte de la celda para tomarla en la celda escalada.

Como se indica en la Figura 26 los respectivos escalados de las facies del pozo Tenerife-1 preservan los valores originales en cada profundidad, preservando la información.

Figura 26. Escalado de electrofacies

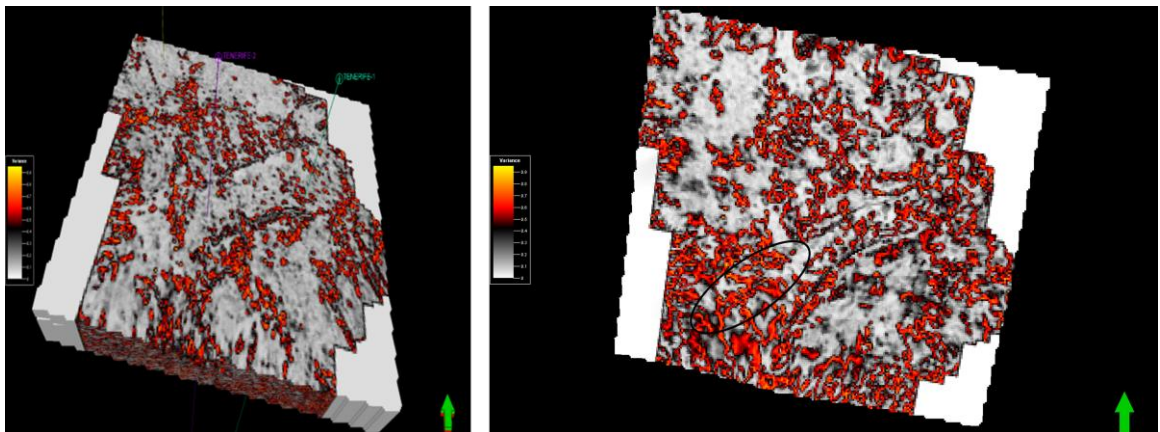


El objetivo de modelar propiedades es conocer la distribución de éstas en los pozos disponibles, ya que refleja la realidad del depósito. Para ello se muestreó la grid 3D con los atributos que favorecieron la visualización de canales como son: Impedancia acústica relativa (ARI), buzamiento, curvatura negativa, varianza y segunda derivada de la varianza. Luego estos atributos se tratan como cualquier otra propiedad ya que quedan escalados en el modelo.

A continuación una breve descripción de cada uno de los atributos que se poblaron en el grid 3D:

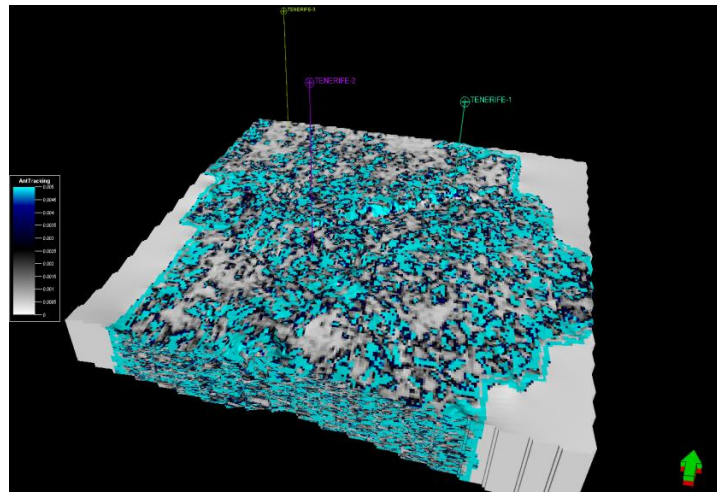
En la figura 27 se observa el grid de Tenerife poblado con un atributo de varianza, donde los valores más altos de color rojo representan una distribución de canales en dirección NE-SW, caracterizados por su forma sinuosa y ancho de 20m aproximadamente.

Figura 27. Grid poblado con atributo de varianza a la izquierda y vista en planta a la derecha



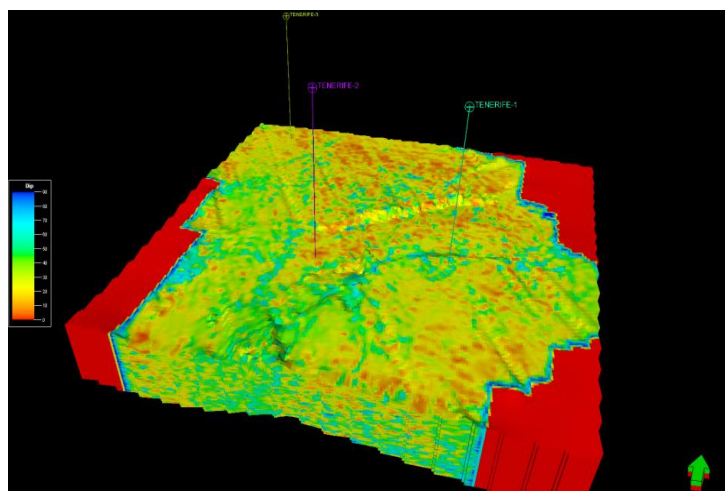
Posteriormente se aplicó el atributo sísmico de la segunda derivada de la varianza la cual representa máximos y mínimos, en este caso, máxima varianza y mínima varianza. En la figura 28 se observa que las geoformas azul claras representan pequeños canales meandriformes y fallas distribuidas en el área, mientras que las zonas de color gris de mínima varianza hacen referencia a zonas de llanuras de inundación, ya que es el lugar en donde se presentan menos cambios litológicos.

Figura 28. Grid poblado con atributo de D2 varianza o “Segunda derivada de la varianza”



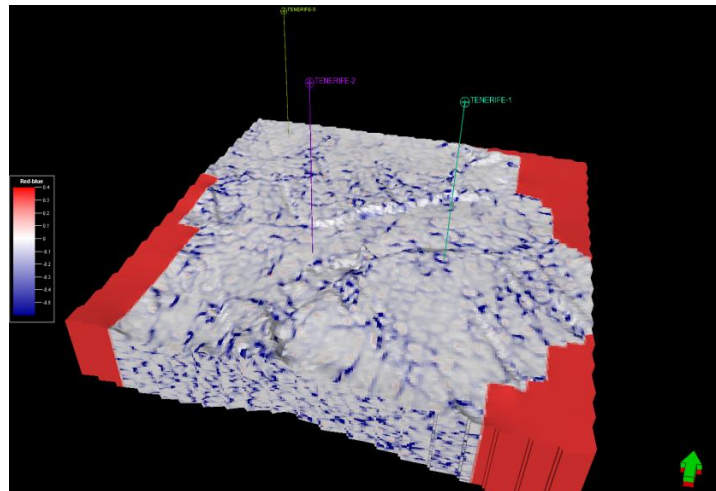
El atributo de buzamiento con el que se pobló la grilla en la figura 29 permite diferenciar el carácter de inclinación y orientación de los reflectores sísmicos, haciendo fácil la identificación de fallas como la que se observa en la zona central de la grilla en colores azules claros indicando las mayores inclinaciones, en sentido NW principalmente.

Figura 29. Grid poblado con atributo de buzamiento.



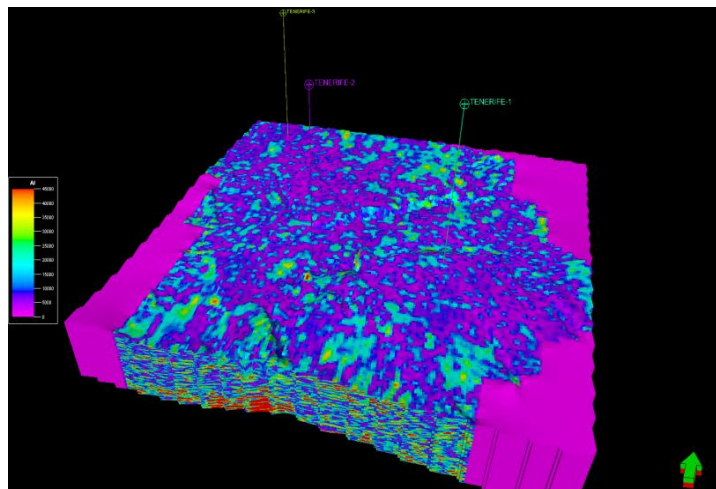
El atributo de “Most curvature negative” sobre el *grid*, corroboro las geometrías marcadas con los anteriores atributos sísmicos, reflejando geometría de canales en los valores más bajos de color azul (Figura 30).

Figura 30. *Grid* poblado con atributo de “Most curvature negative”



Por último se pobló el *grid* con el atributo de impedancia acústica relativa y se logro identificar geometrías de canales meandriformes como se puede observar en la figura 31, los canales se presentan en color fucsia.

Figura 31. *Grid* poblado con atributo de “impedancia acústica relativa”



7.8.7 Modelamiento a partir de Red Neuronal

Para la generación del modelo se entreno una red neuronal con los atributos sísmicos que facilitaron la visualización de los canales, supervisado por 3 clases (canales, llanuras de inundación y depósitos de desborde) según las electrofacies interpretadas previamente.

Los atributos sísmicos que se tuvieron en cuenta para dicho proceso son: Impedancia acústica relativa, varianza, segunda derivada de la varianza, buzamiento y curvatura negativa.

Red Neuronal Es una estructura compuesta de un número de unidades interconectadas (neuronas artificiales). Cada unidad posee una característica de entrada/salida e implementa una computación local o función. La salida de cualquier unidad está determinada por sus características de entrada/salida, su interconexión con otras unidades, y posiblemente de sus entradas externas. La red desarrolla usualmente una funcionalidad general a través de una o más formas de entrenamiento (Schalkoff, 1997).

La propiedad más importante de las redes neuronales es su capacidad de aprender a partir de un conjunto de patrones de entrenamientos, es decir, es capaz de encontrar un modelo que ajuste los datos. El proceso de aprendizaje también es conocido como entrenamiento de la red puede ser supervisado o no supervisado. El aprendizaje supervisado consiste en entrenar la red a partir de un conjunto de datos o patrones de entrenamiento compuesto por patrones de entrada y salida, mientras que el aprendizaje no supervisado se presentan sólo un conjunto de patrones a la RN, y el objetivo del algoritmo de aprendizaje es ajustar los pesos de la red de manera tal que la red encuentre alguna estructura o configuración presente en los datos (Schalkoff, 1997).

8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1 ANÁLISIS DE NÚCLEOS

El análisis sedimentológico de los núcleos de pozo Tenerife-2 por intervalos se describe a continuación:

El intervalo de 7464 a 7451pies se caracteriza por la presencia de lodolitas grisáceas masivas con laminación plano paralela difusa y algunas superficies de oxidación; hacia la base lodolita calcárea con moldes de conchas rellenas de pirita.

El intervalo de 7447 a 7439 pies se caracteriza por la presencia de areniscas de grano muy fino de color beige-gris, bien calibrada, granos redondeados con algunas superficies de oxidación de color violeta y restos vegetales; hacia la base de este intervalo hay presencia de lodolita grisácea de estructura masiva con impregnación de hidrocarburos.

El intervalo de 7422 a 7379 pies se caracteriza por areniscas de grano muy fino a fino, pardas oscuras, de moderadas a bien calibradas, granos subredondeados a redondeados con estructura masiva; hacia el tope presenta relictos de baja bioturbación y fracturas rellenas de lodo, hacia la base lodolita grisácea impregnada de hidrocarburos y pequeños niveles de carbón, que permiten asociar a un subambiente de floodplain.

El intervalo de 7379 a 7359 pies arenisca de grano muy fino, parda oscura a verde oliva, bien calibrada, granos subredondeados a redondeados, de estructura masiva con restos de vegetales asociadas a ambiente de canal.

El intervalo de 7359 a 7322 pies se presentan areniscas de grano muy fino, pardas oscuras, de moderadas a bien calibradas, granos redondeados a subredondeados con estructura masiva. Hacia el tope se presenta bioturbación de bajo grado con ichnofosiles (Diplocraterion) ofiomorfo y hacia la base relictos de una laminación ondulosa.

El intervalo de 7086 a 7064 pies es caracterizado por areniscas de grano fino a medio, pardas oscuras, moderadamente calibradas, granos subredondeados, impregnadas de hidrocarburos, con restos de materia orgánica. Hacia el tope presenta relictos de laminación flaser, estos paquetes de arena son altamente fracturados en forma de discos (disked) asociadas a ambiente de canal.

Esta información fue registrada en un formato de descripción de núcleos suministrado por ECOPELROL S.A, el cual sugiere toma de datos a escala 1:10. Una vez realizado el análisis de estos núcleos se procedió a consolidar esta información en la columna estratigráfica a escala 1:100 (ANEXO 1)

Se puede afirmar que a partir de la descripción de los núcleos del pozo Tenerife-2, se evidencian zonas de reactivación de canal, arenas de canal, paleosuelo varicoloreados por exposición subaérea con ichnofósiles, además de un nivel de carbón, el cual indica condiciones anóxicas que permitieron la preservación de la materia orgánica depositada; estas características se clasifican basadas en sus principales atributos de depositación en particular (en el caso de depósitos clásticos de origen fluvial), tamaño de grano, texturas y estructuras sedimentarias; la asociación de litologías preservadas es evidencia de sistemas depositacionales asociados a ríos meándricos.

No se lograron concretar facies para contribuir en una definición más precisa de los subambientes, ya que para ello se deben reunir un conjunto de características litológicas y paleontológicas que permiten diferenciar un conjunto de estratos o

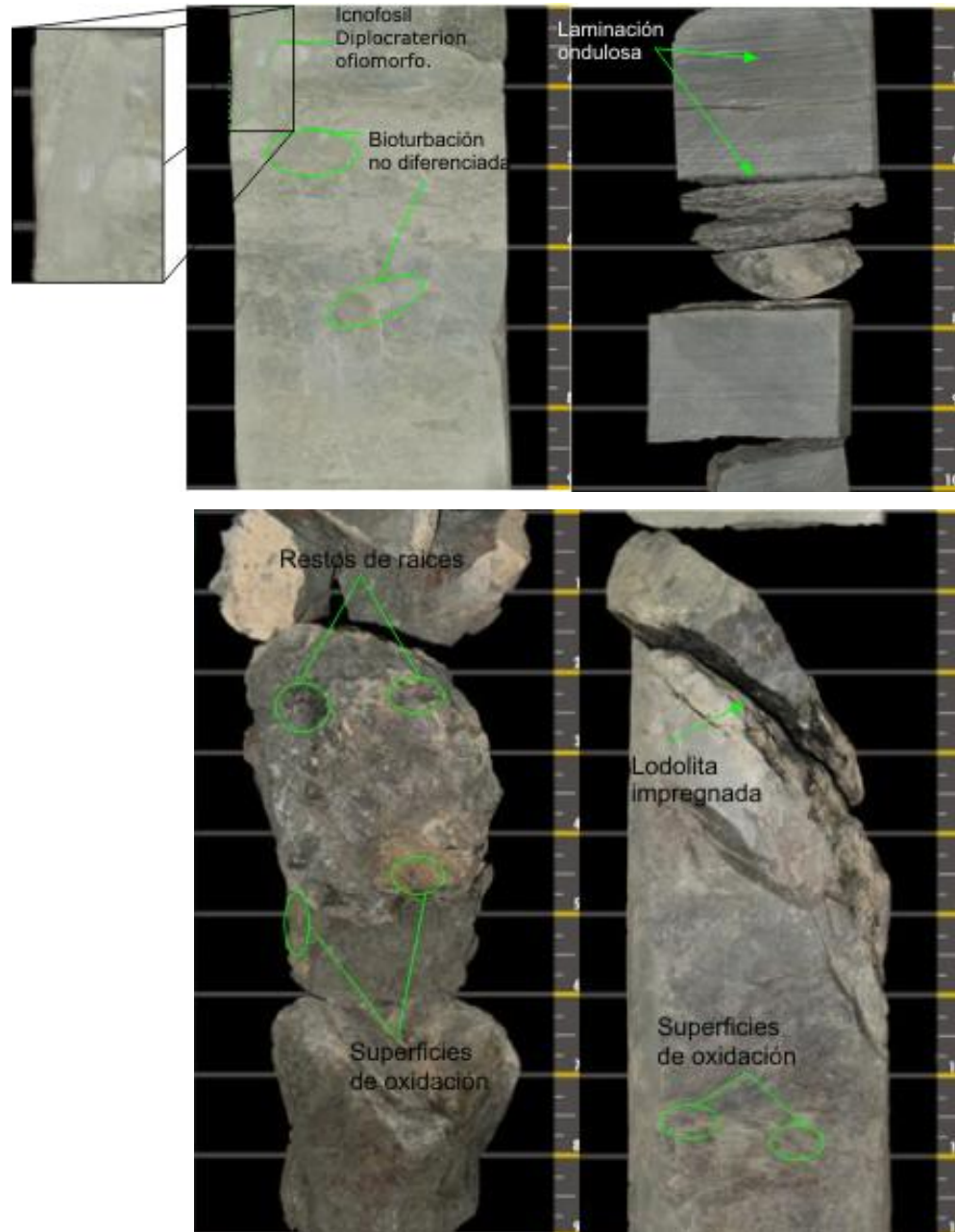
paquetes de otros; hay que tener presente que una facie individual puede tener poco valor para realizar una interpretación de un medio sedimentario específico, se debe encontrar una asociación de facies que estén ligadas genéticamente que se encuentran en una sucesión vertical continúa para poder dar una descripción de los ambientes de depositación; como estos núcleos no presentan una sucesión vertical continua ya que tienen varios espacios perdidos (*gaps*) entre un intervalo y otro, se optó de una forma más sencilla realizar una interpretación de los subambientes por medio de la descripción de los intervalos existentes, esta asociación de litologías preservadas son evidencia de sistemas depositacionales asociados a ríos meándricos.

8.1.1 Definición de Ambiente de Depositación

Se lograron identificar diferentes sub-ambientes de depositación, se tuvo en cuenta la estructura sedimentaria dominante, así como en el momento de la descripción se determino el tamaño del grano, para este sistema fluvial de ríos meándricos, según la clasificación de (Folk, 1974). El único pozo con información de núcleos en el área es Tenerife-2, adicionalmente existen los datos de porosidad (PHIE) y permeabilidad (K) medidos sobre muestras de la sección corazonada.

8.1.1.1 Sub-Ambiente *Floodplain* /Llanura de inundación. Corresponden a depósitos de lodolitas varicoloreadas (gris verdosa, rojiza, amarillenta, etc.) y por limolitas gris rojizas con restos de raíces, con un diferente grado de pedogenización (exposición subaérea) y sectores bioturbados rellenos de arenas calcáreas (Figura 32).

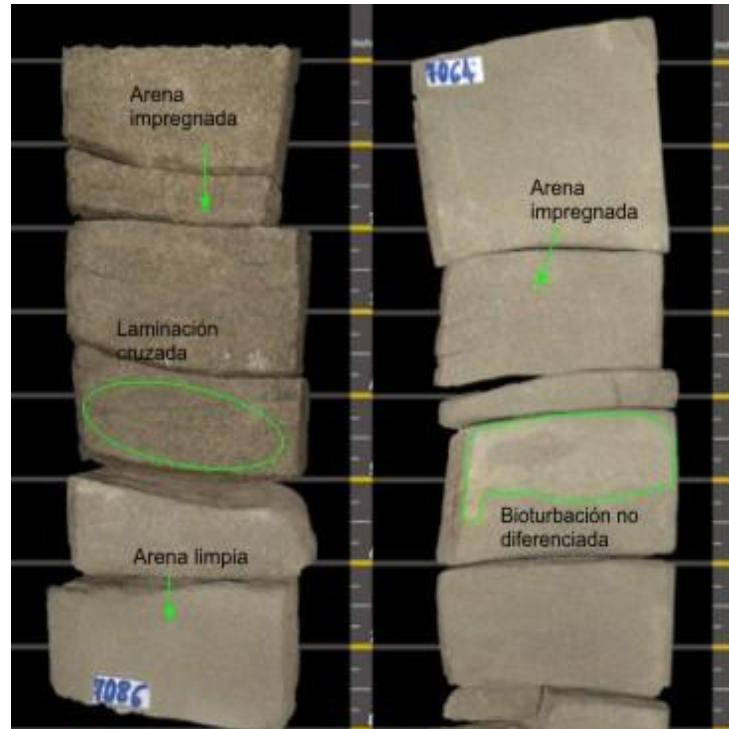
Figura 32. Núcleo pozo Tenerife-2, subambiente floodplain.



8.1.1.2 Sub-Ambiente de Canal. Caracterizado por niveles de arenas de grano medio, pardas, con buena selección, buena redondez, buena porosidad visible, masivas, con estructuras de laminación cruzada, buena impregnación de

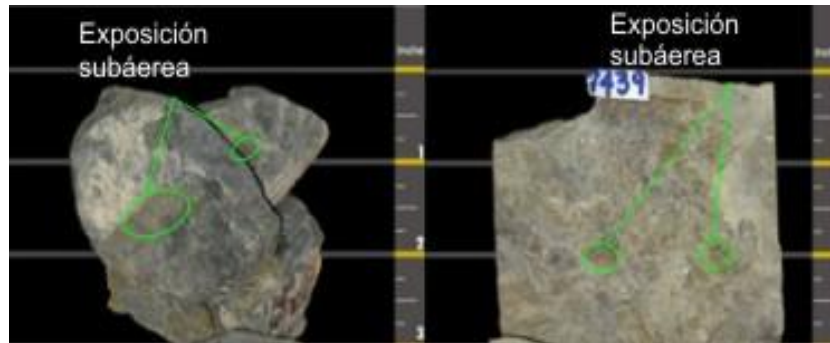
hidrocarburos, con bioturbación no diferenciada, fracturas asociadas a planos de debilidad debido a intercalaciones con niveles arcillosos (Figura 33).

Figura 33. Núcleo pozo Tenerife-2, subambiente de canal.



8.1.1.3 Sub-Ambiente Crevasse Splay. Están constituidos por secuencias grano crecientes con areniscas de grano fino a muy fino que gradan a secuencias de grano más grueso hacia el tope, arenas finas y limos de desborde del canal, espesores de 4 a 8 pies aproximadamente de tonalidades violáceas-naranjadas por exposición subáerea, con pequeños intraclastos de lodo (Figura 34).

Figura 34. Núcleo pozo Tenerife-2, subambiente Crevasse Splay



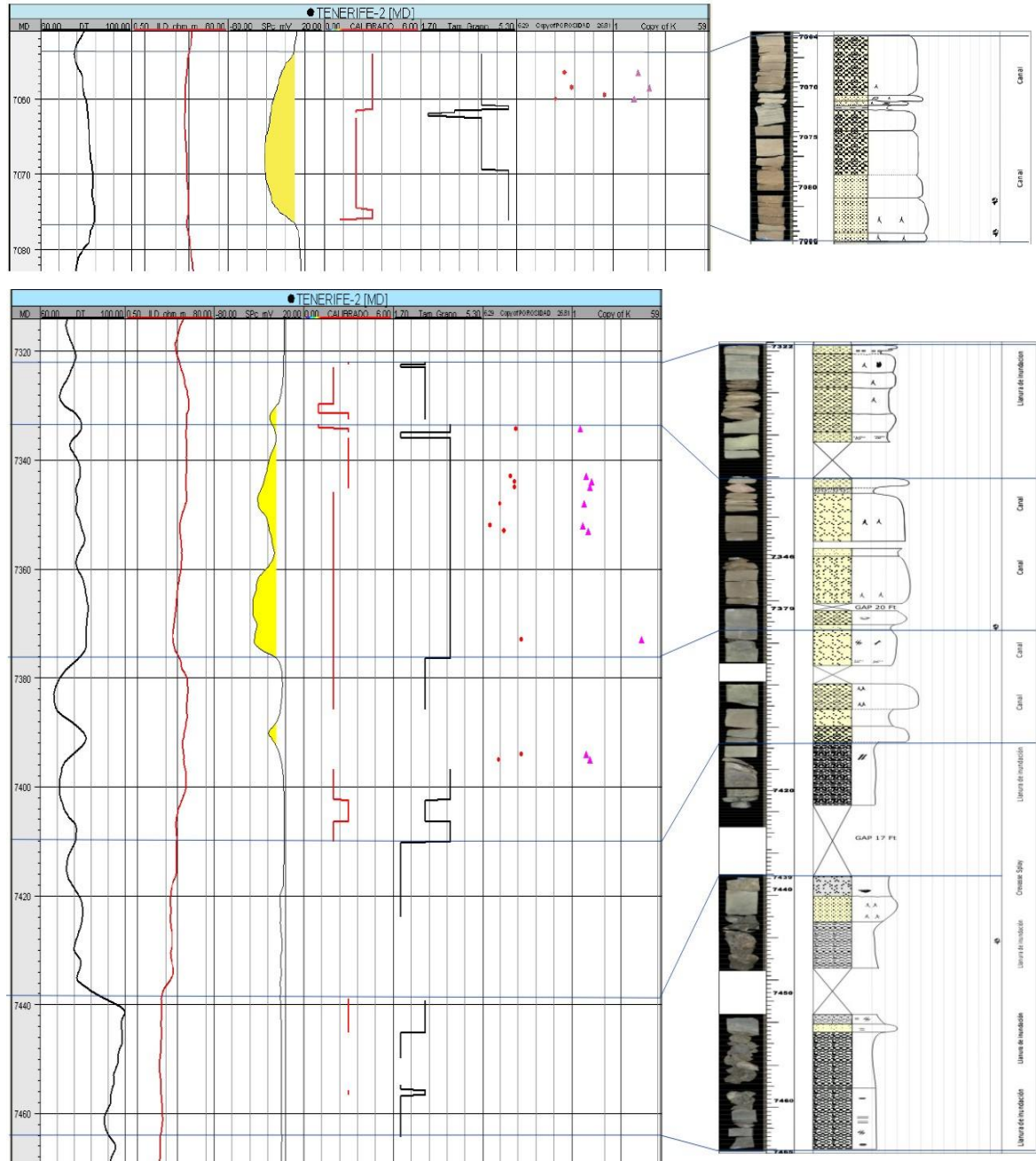
8.2 AMARRE ROCA – REGISTROS

Al revisar la respectiva respuesta de los registros SP, resistividad, sónico en cada subambiente, se llego a la propuesta de trabajar con el registro SP por la capacidad de resolución, y por ser predominantes en los pozos de la cuenca del VMM donde se centraron los análisis.

Los tres subambientes identificados a nivel de registros son canales de arena, crevasse splay y floodplain, cada una de estos presentan una respuesta característica en los registros eléctricos (Figura 35).

Estos subambientes se lograron identificar a partir de la respuesta del registro SP, si presentaban forma de cilindro (secuencia agradacional) y altos valores, se asocio a depósitos de Floodplain, los cuales se caracterizan por preservarse en gruesos paquetes de lodo; si presentaba forma de embudo (secuencia granocreciente), se asocio a deposito de crevasse splay y si su forma era de campana (secuencia granodecreciente) se asocio a depósitos de canal los cuales son de interés en este tipo ambientes continentales debido a los espesores que presentan para almacenar hidrocarburos.

Figura 35. Amarre roca-registro y propiedades petrofísicas.

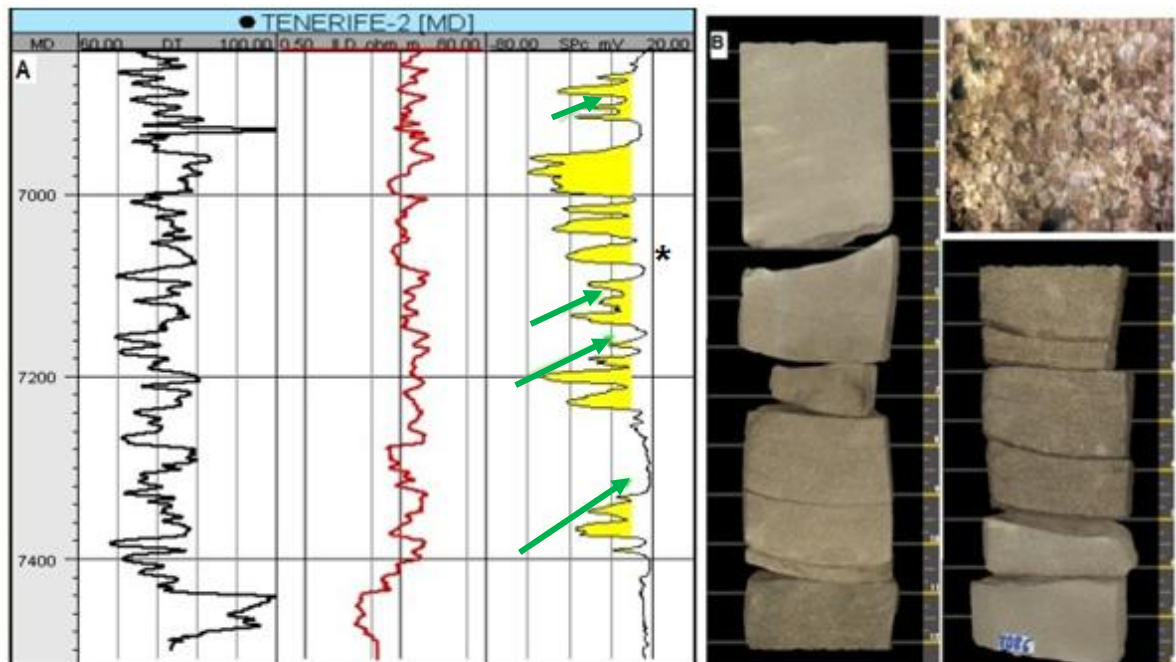


Canales de Arena

Usualmente presenta una forma plana en el límite inferior en el registro SP, aparecen intercalados con intraclastos de limolita o facies de lago. Los canales

amalgamados presentan electroformas de campana con un comportamiento de bloque, algunas veces limitados por respuestas asociadas a la granodecrecencia de la secuencia. Estos canales de arena presentan respuestas grano decrecientes dentro de un dominio de facies finas con repuestas más heterogéneas algunas veces seguidas de complejos de crevasse. Usualmente los espesores de arena oscilan entre 8 y 10 pies.

Figura 36. (A). Registros de pozo sónico, resistividad, potencial espontáneo. (B) núcleos de un intervalo de la Formación Mugrosa. Ambientes de depositación de canal, Arenisca de grano medio, granos redondeados, bien calibrados e impregnados de hidrocarburo.

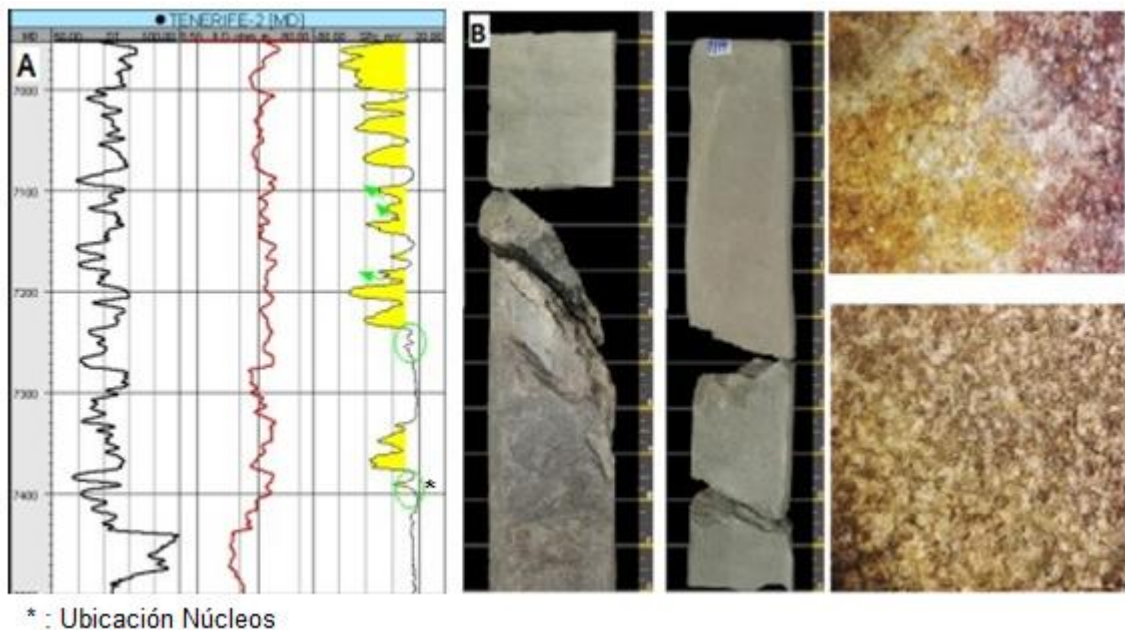


* : Ubicación Núcleo

Crevasse Splay/Canales de Crevasse

Se caracteriza por presentar registros GR y SP con forma aserrada y tendencias grano crecientes, pequeñas capas de arena limpia grano decreciente asociadas a canales de crevasse pueden aparecer en la parte superior de algunos crevasse splays, esto se diferencia de la areniscas de canal por su asociación con secuencias grano crecientes desde el crevasse splay y su pequeño tamaño típicamente con espesores no superiores a 3 pies.

Figura 37. (A) Registros de pozo sónico, resistividad, potencial espontáneo. (B) Núcleos de un intervalo de la Formación Mugrosa. Ambientes de deposición de Crevasse splay caracterizado por arenas finas y limos de desborde del canal.

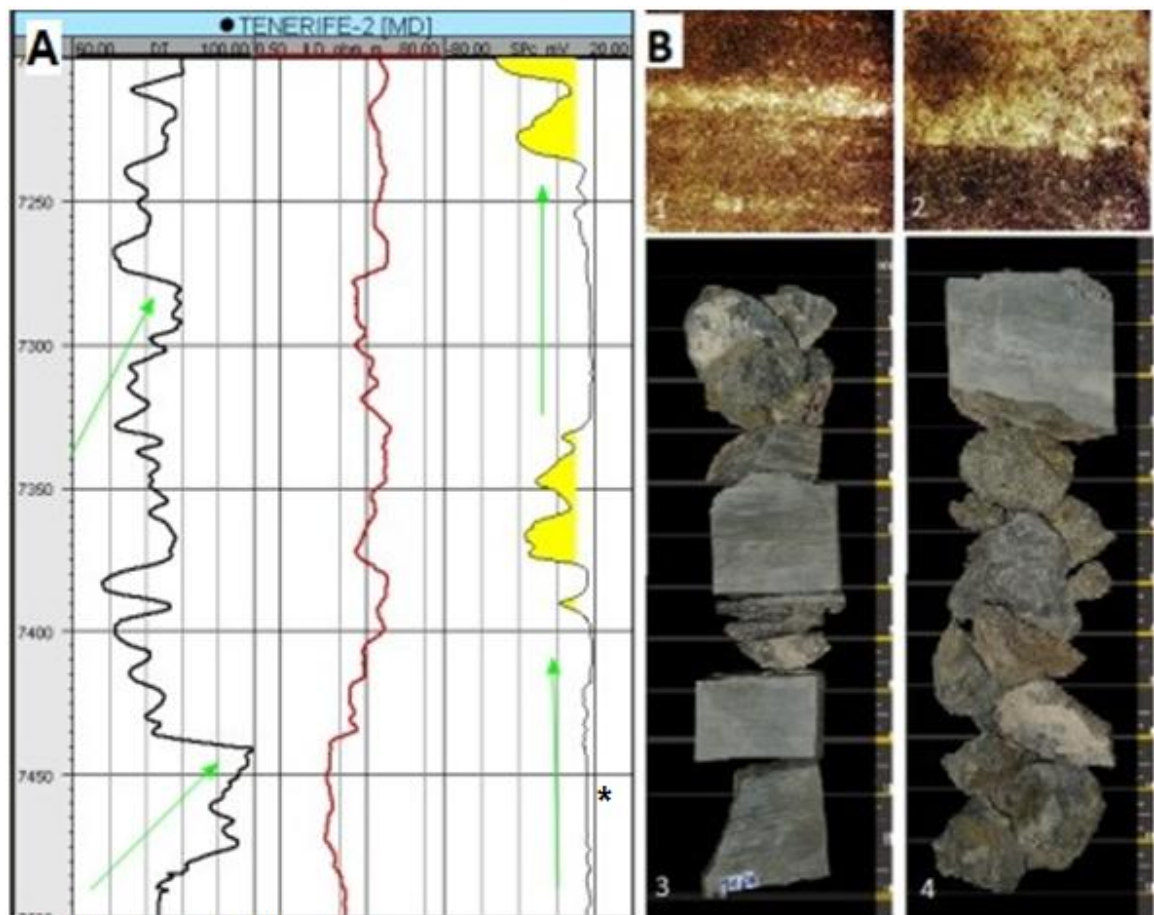


Floodplain

Caracterizada por pocas capas litológicamente heterogéneas exhiben una respuesta aserrada cilíndrica en los registros de GR y SP la cual carece de una tendencia clara hacia lo granocreciente o granodecreciente. Respuestas altas en

los valores de GR pueden responder a canales y arenas de crevasse aislados y embebidos en una secuencia vertical de floodplain agradacional o limolitas de lago.

Figura 38. (A) Registros de pozo sónico, resistividad, potencial espontáneo. (B) Núcleos de un intervalo de la Formación Mugrosa. Ambientes de deposición Floodplain (B3) Lodolita gris con laminación plana paralela, (B4) Arenisca de grano muy fino gris, granos redondeados y bien calibrada.

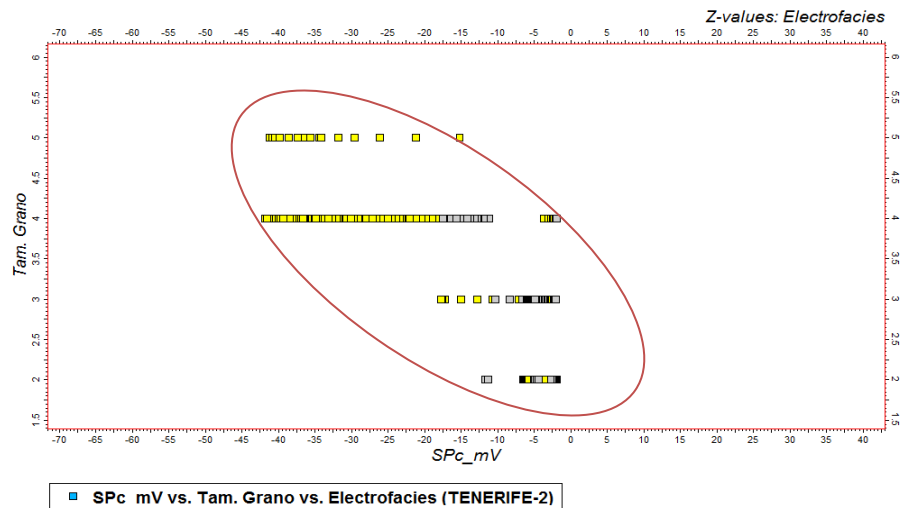


* : Ubicación Núcleo

8.2.1 Validación del Ajuste Roca-Registro

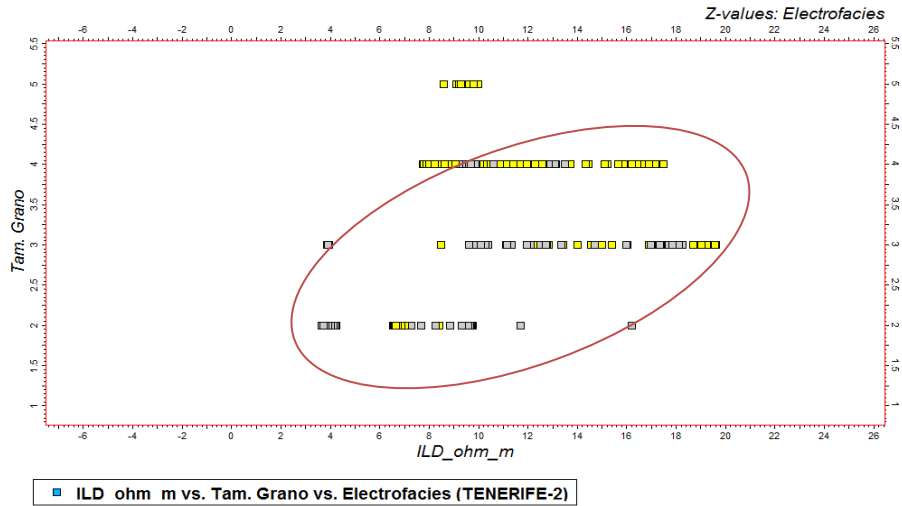
En los siguientes *crossplots* se puede evidenciar que la respuesta del registro de potencial espontáneo es mayor para las arenas de grano muy fino a lodo, mientras que para los tamaños de arena más grueso la respuesta de potencial espontáneo es menor.

Figura 39. *Crossplot* tamaño de grano contra registro de potencial espontáneo.



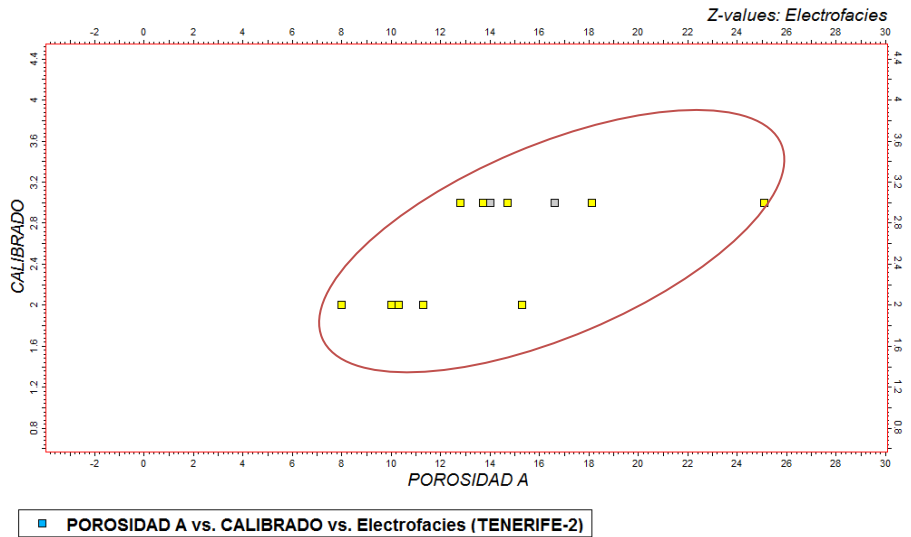
El registro de resistividad tiene una respuesta mayor en los paquetes de arena de tamaños más gruesos y menor en paquetes de lodo, de lo que se logra deducir que los paquetes de arena más gruesas de la Formación Mugrosa C se encuentran posiblemente impregnadas de hidrocarburos.

Figura 40. Crossplot Tamaño de grano contra Registro resistividad



A mayor calibrado mayor porosidad, a partir de los datos de núcleos y registros de Tenerife-2 se logra verificar que estos dos parámetros son directamente proporcionales como se muestra Figura 41.

Figura 41. Crossplot Calibrado contra Porosidad

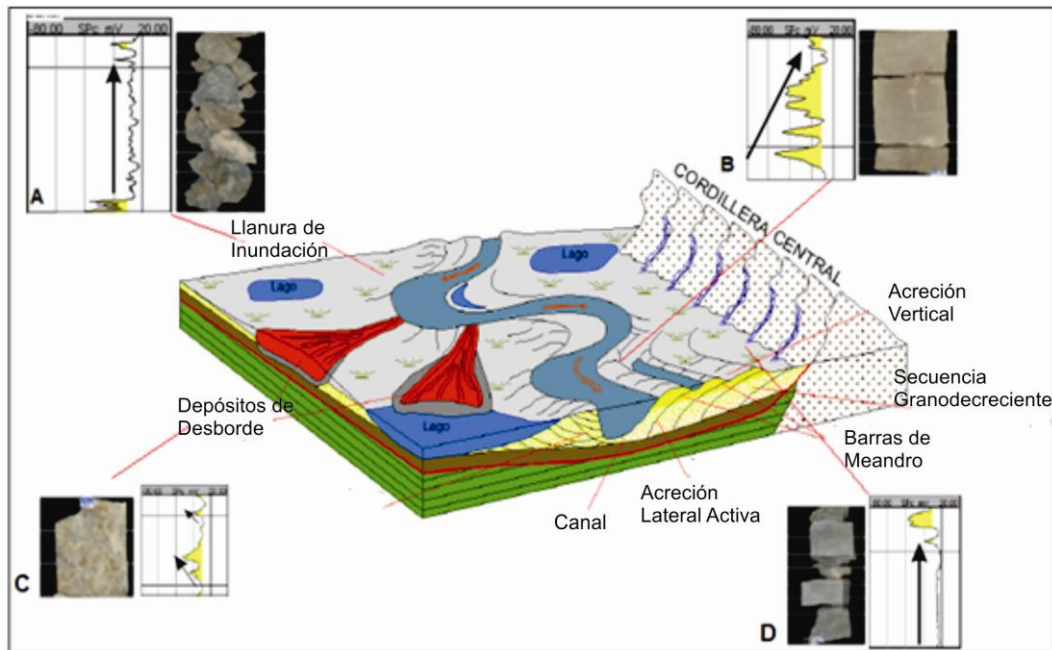


8.2.2 Definición Electrofacies

La identificación de las electrofacies en los pozos del campo Tenerife se realizó teniendo en cuenta las electroformas características para ambientes fluviales, que generalmente son aserradas (Figura 42), y la relación de arena-lodos que es menor a 1, éstos son factores característicos de ambientes fluviales, que se identifican en los depósitos asociados a ríos meándricos (Serra, 1985). El tipo de ambiente también está sustentado por los rasgos presentes en los núcleos del pozo Tenerife-2, cuyas características permitieron confirmar que el nivel estratigráfico de la Formación Mugrosa C, fue depositado bajo el régimen de un río meándrico como lo referencian también los estudios de (Ansall, 2003) y (Rubiano, 1996).

Con los registros del pozo Tenerife-2 se identificaron electrofacies que corresponden a depósitos de ríos meándricos, compuestos por depósitos de canal, desborde (Crevasse Splay) y llanuras de inundación (Floodplain), en la figura 42 se ilustran los depósitos de un sistema fluvial y las respuestas de los registros SP de Tenerife-2 en cada uno de ellos. En donde el floodplain se presenta en forma cilíndrica (Figura 42A y D), canal en forma de campana (Figura 42B) y Crevasse Splay en forma de embudo (Figura 42C).

Figura 42. Respuestas de electrofacies para el pozo Tenerife-2 (A). Depósitos de floodplain, (B). Canal, (C). Crevasse Splay, (D).Lago.



8.3 CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA

8.3.1 Respuesta Dipmeter

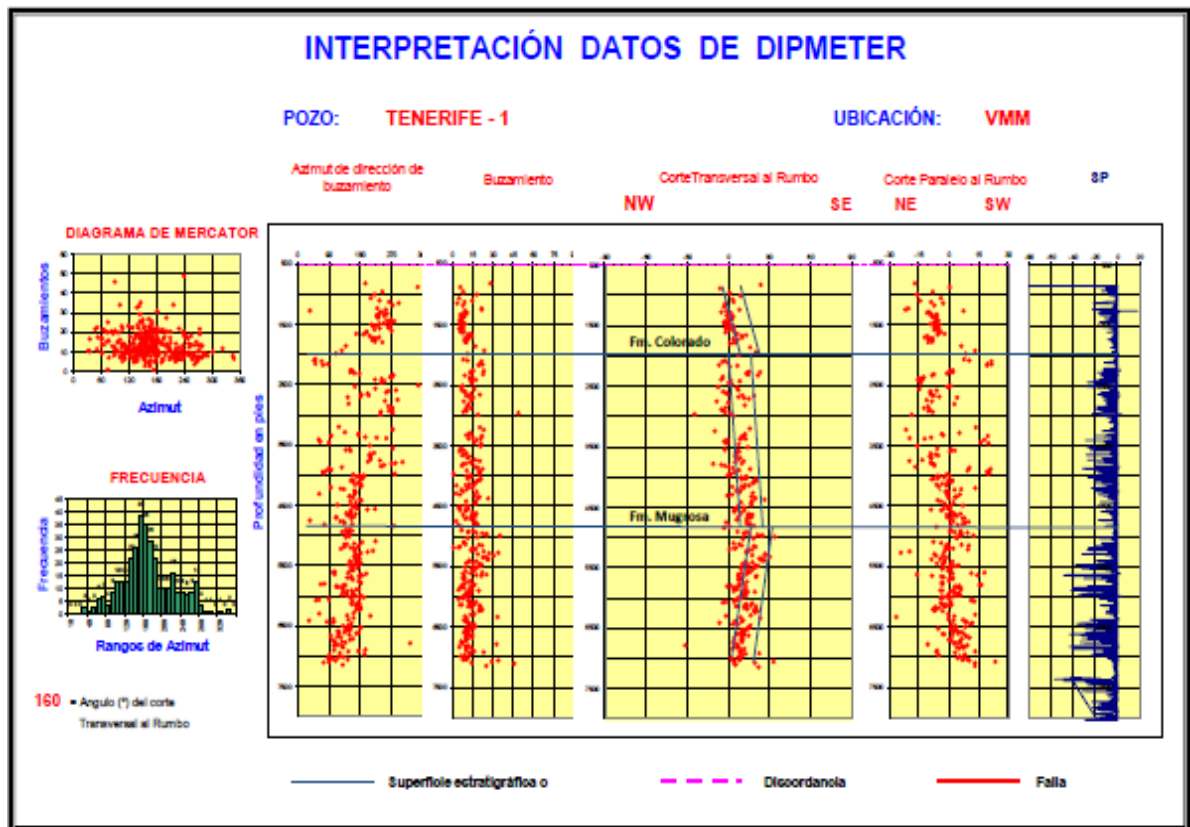
A continuación se describe las relaciones encontradas mediante los registros dipmeter:

Pozo Tenerife-1: En el diagrama de Mercator se identifican dos familias de datos de buzamiento los cuales son de 10° y 20° principalmente. En el corte transversal al rumbo se observan los cambios drásticos de buzamiento en las profundidades 2062,95, 5018,06, 7028,89 pies denotando el contacto discordante entre estas formaciones.

El contacto entre la Formación Mugrosa-Colorado se observa una diferencia entre 5° a 15° en el mismo sentido del buzamiento hacia el NE como se ve en el pozo Tenerife 1 y 2 (Figura 43 y 44).

Figura 43. Interpretación de datos dipmeter para el pozo Tenerife-1.

El histograma muestra un cambio en la tendencia datos estructurales aproximadamente hacia los 160° en el corte transversal al rumbo.

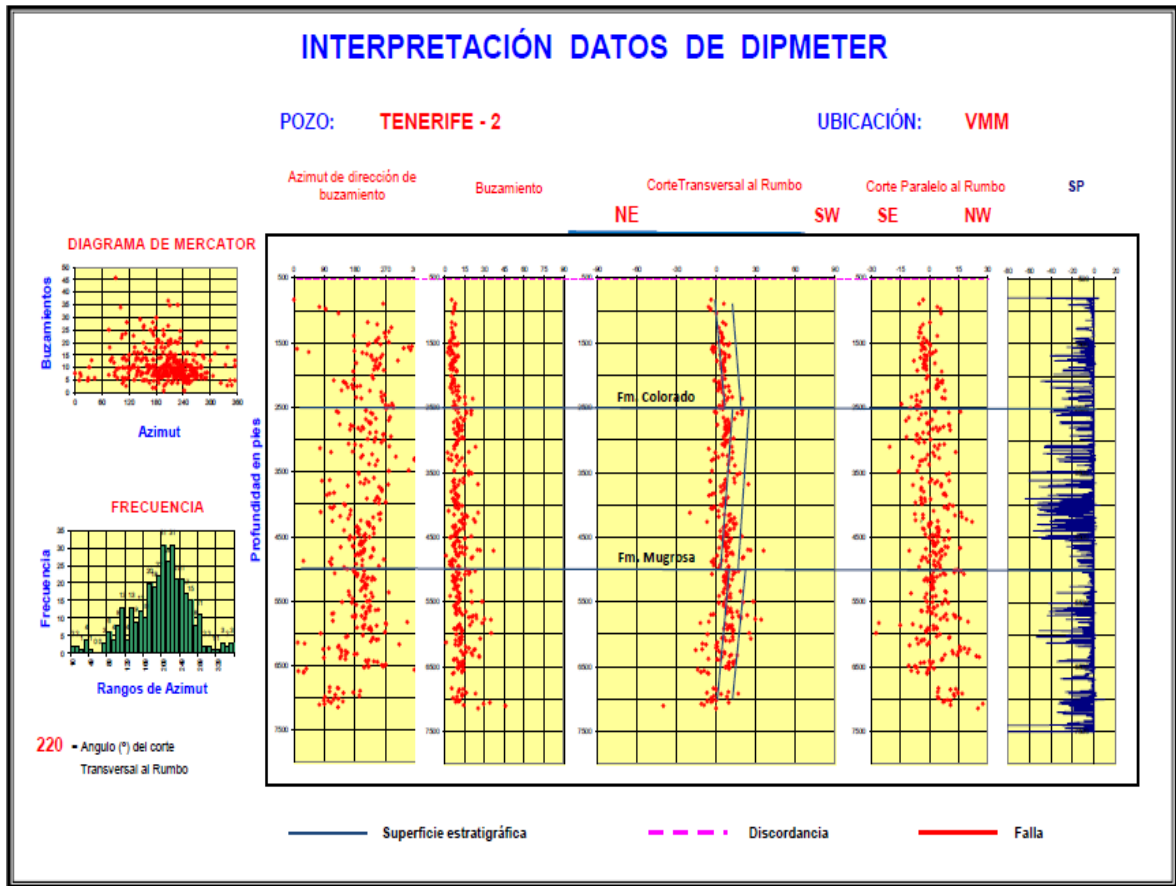


Pozo Tenerife-2: En el diagrama de Mercator se evidencian cambios en los datos de buzamiento los cuales varían entre 5° y 15° principalmente. En el corte transversal al rumbo se observan los cambios drásticos de buzamiento en las profundidades 2461.56, 5209,03, 7491,67 pies mostrando el contacto discordante entre estas formaciones y se identifica una falla intraformacional a 5850 pies de profundidad (Figura 44). Además se logro diferenciar un cambio en el sentido del

buzamiento en el intervalo de 5800 a 6000 pies de profundidad, indicando muy posiblemente la presencia de una falla en sentido normal.

Figura 44. Interpretación de datos dipmeter para el pozo Tenerife-2.

Se observan discordancias en las Formaciones Mugrosa y Colorado, sus buzamientos son relativamente suaves de 0° a 15°.

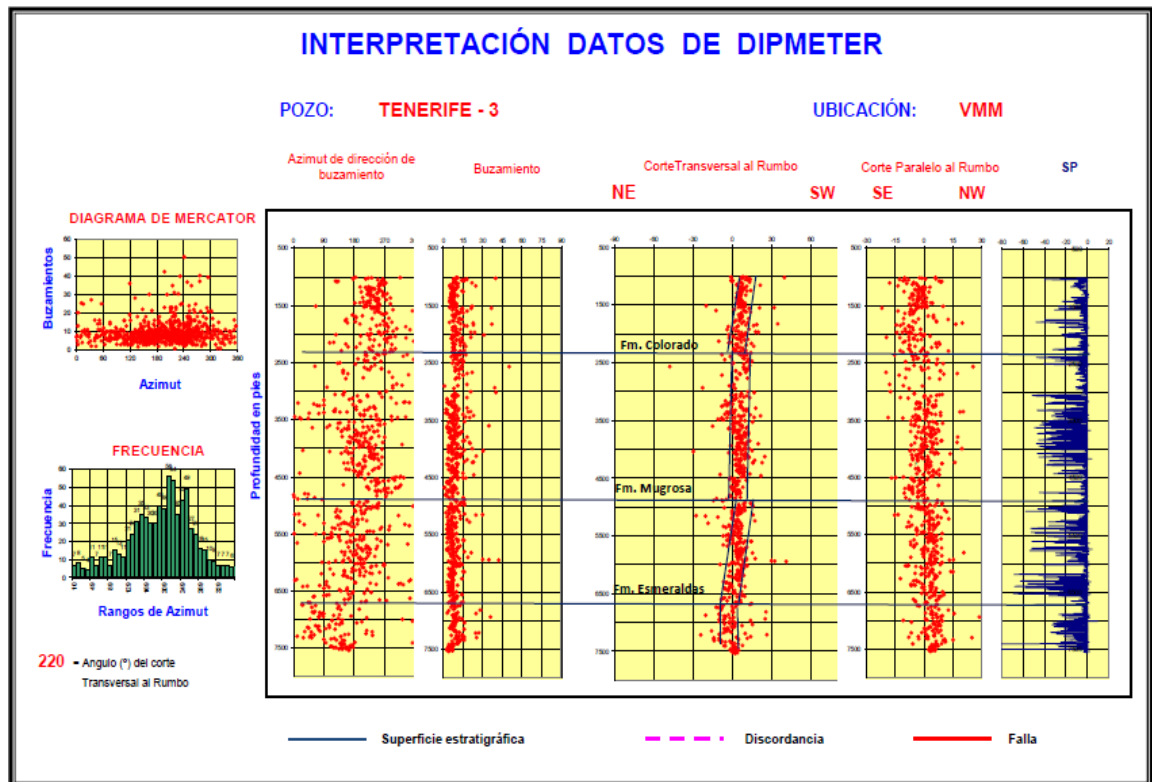


PozoTenerife-3: En el diagrama de Mercator se observan cambios en los datos de buzamiento los cuales varían entre 5° y 15° principalmente. En el corte transversal al rumbo se observan los cambios drásticos de buzamiento en las profundidades 2993,27 y 4870,72 pies mostrando el contacto discordante entre estas formaciones. En la profundidad de 6715.32 pies se identifica el tope EZD, donde no se evidencian cambios drásticos en el buzamiento.

El contacto entre la formación Esmeraldas-Mugrosa se observa una diferencia de 5° a 10° en el mismo sentido de la dirección de buzamiento SW-NE como se ve en el pozo Tenerife 3 (Figura 45).

Figura 45. Interpretación de los datos dipmeter para el pozo Tenerife-3.

Sus buzamientos en general son suaves de 0° a 15°. Se observan discordancias en las Formaciones Colorado, Mugrosa y Esmeraldas.



Las interpretaciones de los registro dipmeter permitieron establecer características correlacionables necesarias para identificar los topos de las Formaciones Colorado, Mugrosa y Esmeraldas (Tabla 7).

Tabla 7. Topes Formacionales a partir de registros dipmeter

Pozo	Tope Formacional	Tope (pies)
Tenerife 1	Colorado	2000
Tenerife 1	Mugrosa-MFS	4900
Tenerife 2	Colorado	2500
Tenerife 2	Mugrosa-MFS	5000
Tenerife 3	Colorado	2300
Tenerife 3	Mugrosa-MFS	4800
Tenerife 3	Esmeraldas	6650

8.3.2 Interpretación de Electrofacies

Al realizar las comparaciones entre los patrones de comportamiento de las curvas en los registros se propusieron electrofacies para las formaciones perforadas durante la perforación en campo Tenerife y a su vez se realizó el análisis de la asociación vertical con otras secuencias para poder deducir su evolución lateral.

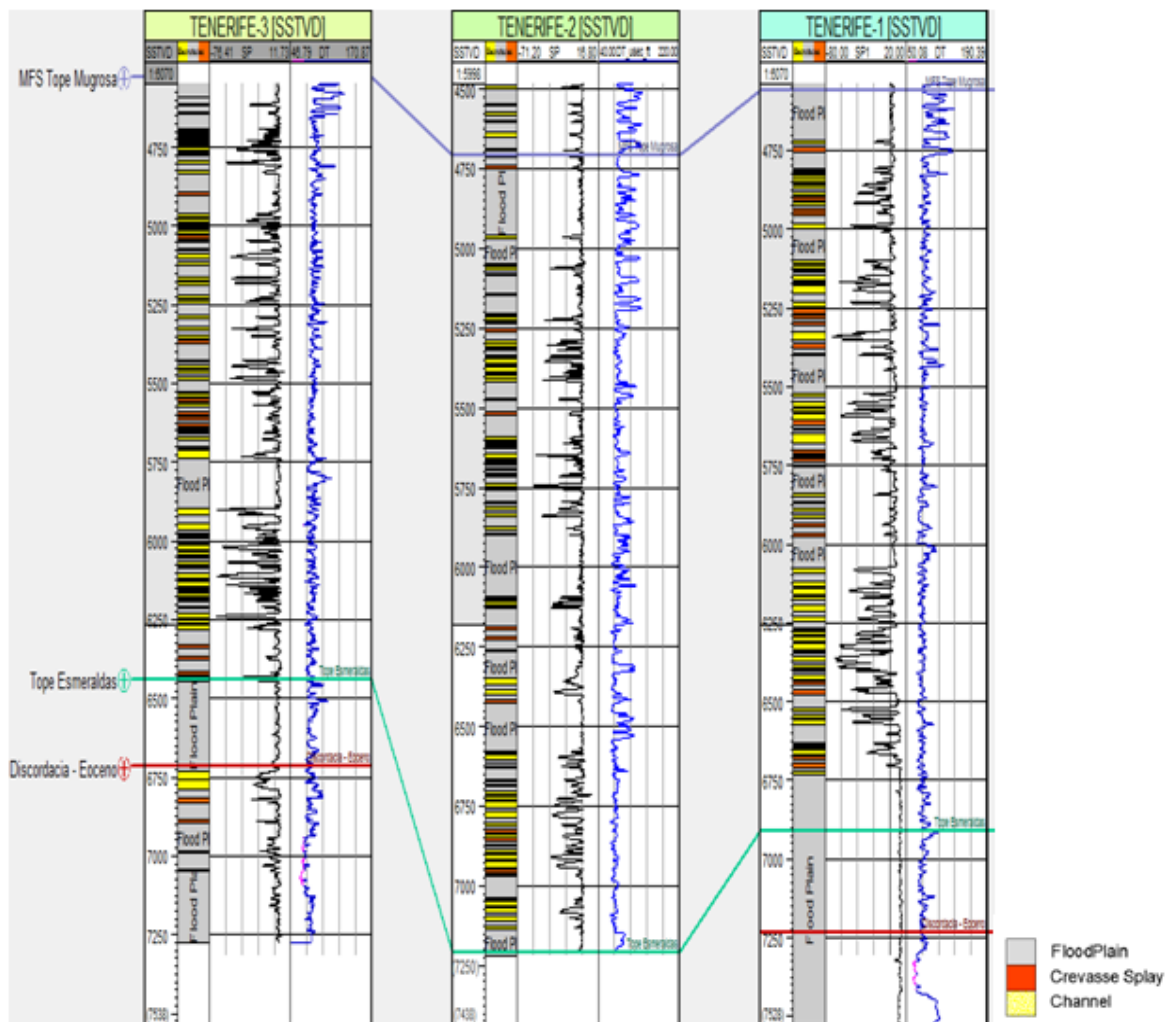
En el área de estudio las facies por lo general van desde llanuras de inundación (FP), “crevasse splays” (C), canales fluviales (CF) (Figura 46).

Las electrofacies identificadas en el pozo Tenerife-3 corresponden hacia la base a una intercalación de facies de llanuras de inundación, depósitos de desborde y canales, es común encontrar las electrofacies aserradas por intercalación con niveles de grano fino.

El pozo Tenerife-2 hacia la base presenta facies de llanura de inundación, intercalados con delgados depósitos de desborde, y algunos depósitos de canal, hacia el tope en forma similar al pozo Tenerife-3, aumentan los niveles de canales, son comunes las electrofacies aserradas lo cual indica intercalaciones de los canales con niveles de grano fino (limos, lodos).

Para el pozo Tenerife-1 hacia la base se encuentran facies de llanura de inundación, intercaladas con pequeños niveles de depósitos de desborde y canal, como en los pozos Tenerife-1 y Tenerife-2 hay aumento en los canales de arena hacia el tope, las electrofacies presentan la misma tendencia, las electroformas son aserradas por intercalaciones con niveles lodosos.

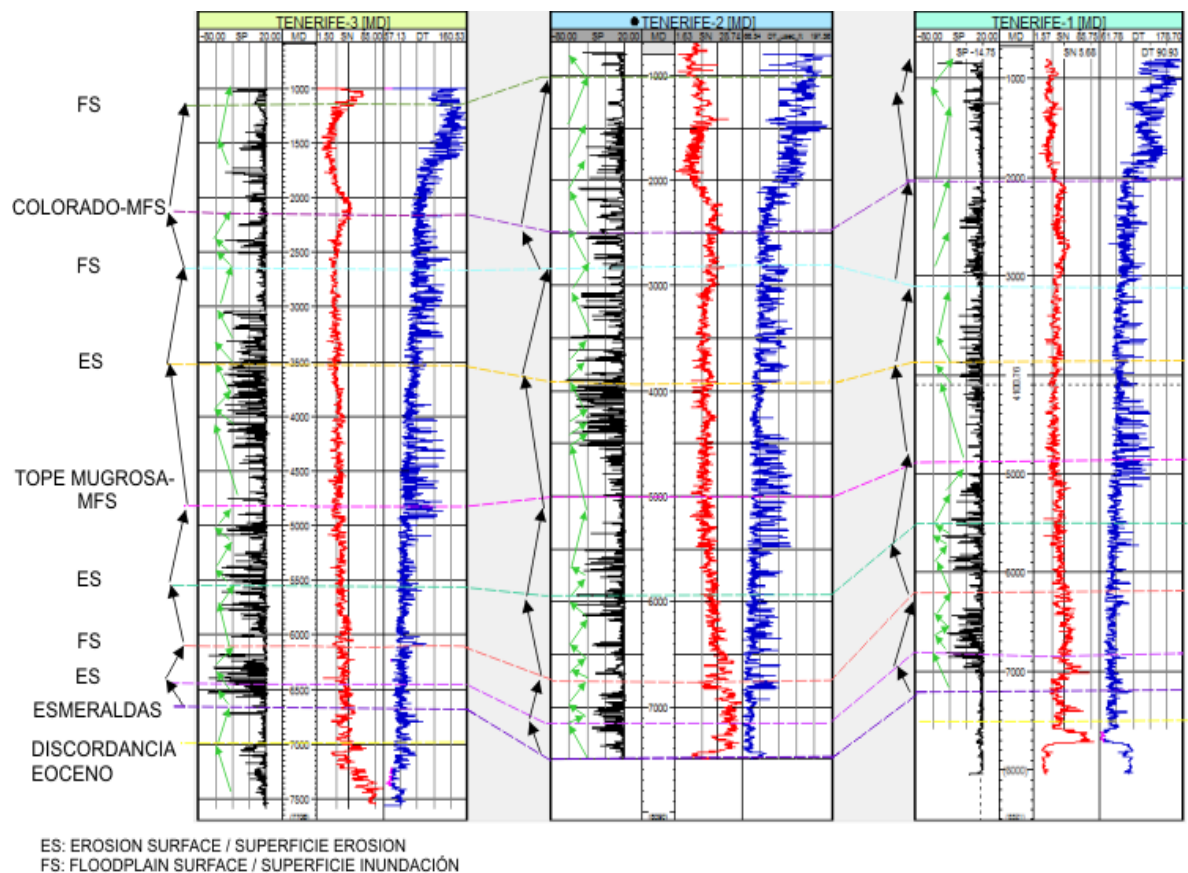
Figura 46. Electrofacies, registro SP y DT.



8.3.3 Identificación de Patrones de Estacado

Para este análisis en cada uno de los pozos se identificaron patrones de estacados (granocreciente, granodecreciente y agradacional) según el comportamiento de las curvas de los registros, logrando definir superficies de máxima inundación (MFS), inundación (FS) caracterizadas principalmente por la presencia de depósitos de shales y superficies de erosión (ES) caracterizadas por amalgamiento de arena, en la figura 47 se pueden observar las superficies y sus respectivas equivalencias Formacionales.

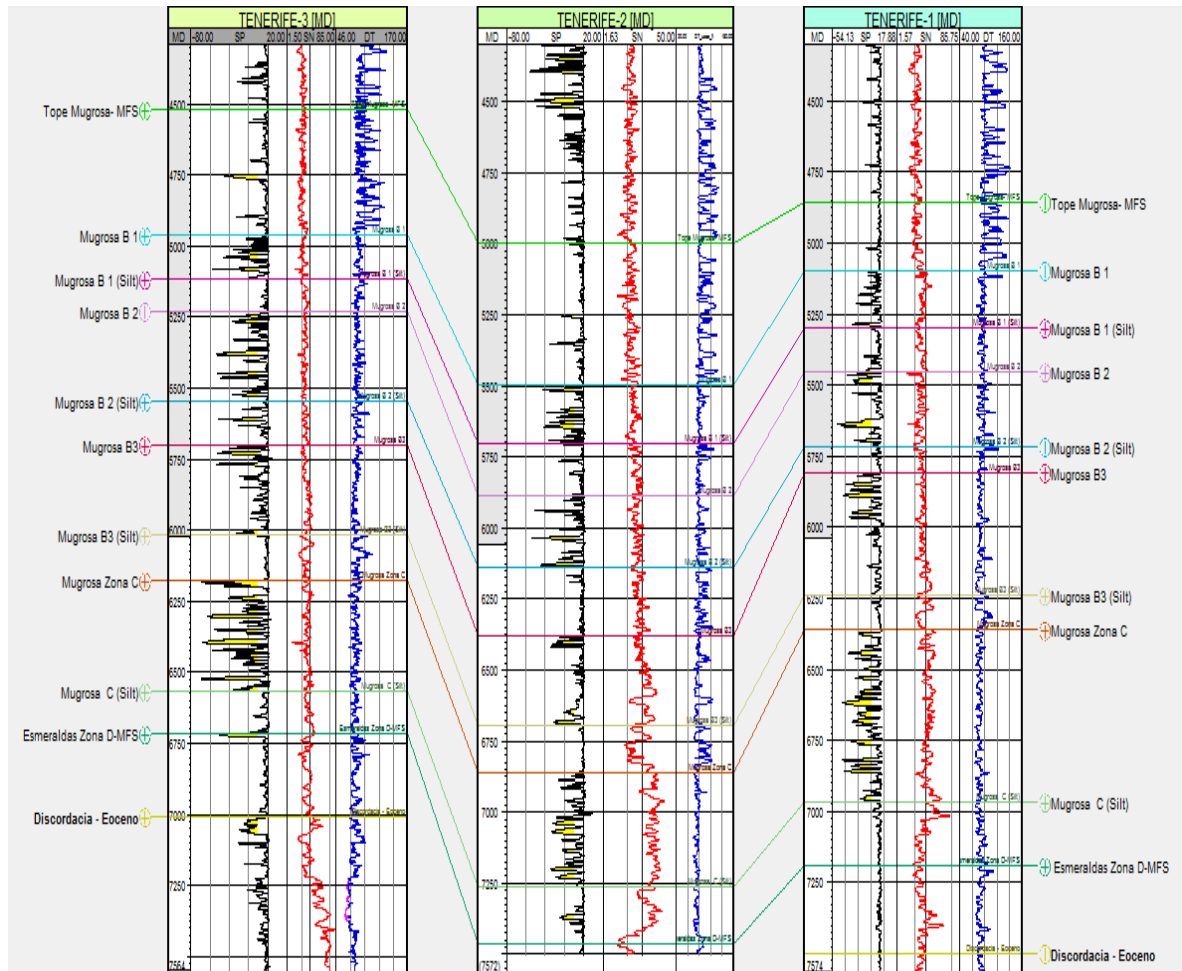
Figura 47. Patrones destacados para los pozos Tenerife 1, 2 y 3 en base a los registros SP, resistivo y DT respectivamente. Superficies de máxima inundación MFS, inundación FS y erosión ES.



8.3.4 Correlación de Pozos

Para correlación de pozos se usaron los ciclos de mayor escala y los topes identificados a partir de los registros dipmeter con el fin de reconocer el tope de la Formación Colorado, el contacto de la Formación Colorado con la Formación Mugrosa, el contacto entre la Formación Mugrosa y Esmeraldas. La Formación mugrosa se encuentra dividida en dos unidades superior (B) e inferior (C) (Figura 48). En este trabajo la Formación Mugrosa se dividió en intervalos de “finos” y “arenas” con el fin de obtener mayor calidad de información para esta.

Figura 48. Correlación de registros entre pozos (SP-Resistivo SN-DT).



La correlación estratigráfica descrita se basó en los niveles correspondientes a las máximas superficies de inundación, superficies de inundación y de erosión, se encontró que cada intervalo estratigráfico definido como una superficie de inundación corresponde a horizontes continuos. Los intervalos estratigráficos definidos como arenas corresponden a horizontes que presentan cambios laterales de facies propios del ambiente de sedimentación.

8.3.4.1 Topes y Subzonas. La clasificación de los topes formacionales de Campo Tenerife, se realizó según los cambios en las características litológicas que permitieron diferenciar un conjunto de estratos o paquetes de otros, en términos generales se pueden dividir según los subambientes presentes en el campo de la siguiente manera, canales de arena, desborde y llanura de inundación.

De base a tope, corresponden a rocas terciarias:

- **Formación Esmeraldas**

Se identificaron electrofacies correspondientes a canales de arenas pobremente desarrollados hacia la base en el pozo Tenerife-3, hacia el tope facies de llanuras de inundación, con mayor desarrollo de arenas en este pozo y en menor porcentaje para el pozo Tenerife-2 donde las facies cambian lateralmente a llanuras de inundación.

- **Formación Mugrosa**

El tope de la Formación Mugrosa que corresponde a un MFS donde hay conservación de las facies de llanura de inundación, estos intervalos lodosos más espesos representan condiciones de baja energía dentro de la cuenca. Una vez definido la MSF para la Formación Mugrosa y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se procedió a clasificar cada paquete de arenas, de acuerdo con su posición estratigráfica y a su unidad genética (canales de arenas, crevasse splay y floodplain), éste horizonte cuenta con la descripción realizada de

los corazones del pozo Tenerife-2 que ayudaron a subdividir con mayor exactitud el horizonte, donde se reportan (1) limos de coloración café, o variocoloreados y (2) arenas de grano fino arcillosos de color beige.

Después de tener definido el tope de la Formación Mugrosa, se establecieron subdivisiones internas, para esto se utilizó el análisis realizado de la descripción de muestras de corazones, los patrones de estacado, las electrofacies; este análisis corresponde a los cuerpos de arena con mayor amalgamiento y por lo tanto los de mayor espesor que son los poseen mayor continuidad lateral, la tendencia de gran amalgamiento los cuerpos de canal tienden a estar conectados, mientras que es menor el amalgamiento los cuerpos de canal tienden a estar poco interconectados (Ramón y Cross, 1997).

Se procedió a establecer subdivisiones internas de la Formación Mugrosa; Para lo cual, se utilizó un análisis del comportamiento de los cuerpos canal mas amalgamados y por tanto los de mayor espesor que son los que poseen la mayor continuidad lateral.

En los cambios de espesor de los cuerpos de arenas de canal se tuvo en cuenta: (1) tiene un espesor bajo entre 3 y 5 pies; (2) un espesor medio entre 5 y 15 pies y (3) un espesor alto cuando los espesores superan 15 pies.

En la figura 48 se muestra la subdivisión de la Formación Mugrosa en el Campo Tenerife, están comprendidas por subzonas estratigráficas, B1, B1 Silt, B2, B2 Silt, B3, B3 Silt, C, C Silt; estas son subzonas claramente correlacionables en el Campo.

Para determinar las subzonas de la Formación Mugrosa, se comenzó eligiendo las zonas que contaran con los amalgamamientos más gruesos y con la que se pudiera observar mayor continuidad lateral, que corresponde a las Subzonas B1,

B2, B3 y C; en algunos de los intervalos como B1, el contenido arenoso es bueno pero su continuidad lateral no es tan importante como en B2 y C; después se procedió a encontrar las subzonas más lodosas y continuas de la Formación Mugrosa que corresponden a B1 Silt, B2 Silt, B3 Silt; y C Silt.

En el análisis de cambios de espesor de los cuerpos de arena de canal de la figura 48 se observa como los segmentos B2 y C tienen mayor cantidad de cuerpos, esta tendencia de espesor alto en estos segmentos se mantiene a lo largo de los tres pozos, también se puede observar que los Segmentos B1 y B3 poseen la menor cantidad de cuerpos de espesor medio y alto, esta es una tendencia que se conserva a lo largo de todo el Campo.

Mugrosa – C: Esta unidad presenta aumento de su espesor hacia el este, en los tres pozos se identifican en orden de abundancia hacia la base, facies de Llanuras de inundación, canales y depósitos de desborde, los canales van aumentando su abundancia hacia el tope.

Se puede concluir que para la unidad operacional Mugrosa, los ciclos presentes tienen una tendencia progradacional inicial y culminan hacia el tope de la unidad con un ciclo retrogradacional.

Mugrosa – B: El espesor de esta unidad tiende a ser uniforme en los pozos Tenerife-3 y Tenerife-1. En el pozo Tenerife-2 hay un incremento en el espesor de esta unidad debido a una falla; las electrofacies identificadas en los pozos corresponden hacia la base a una intercalación de facies de llanura de inundación, desborde y canal. Son comunes los ciclos progradacionales, los cuales son correlacionables lateralmente y hacia el tope es característico el ciclo de tipo retrogradacional.

8.3.4.2 Espesor de Depósitos. Para el análisis de espesor se utilizó la interpretación de las electrofacies de la Formación Mugrosa de los tres pozos, con el fin de obtener un espesor promedio de los cuerpos de arena del campo Tenerife. Se diferencian los depósitos de canal, desborde y de llanura de inundación presentes en campo Tenerife, obteniendo la sumatoria de los canales presentes tanto para la unidad mugrosa-B como para la unidad Mugrosa-C.

Espesor de Canales Mugrosa-B: El análisis de los cuerpos de arena para los intervalos B1, B2 y B3 se realizó para los tres pozos perforados. Se hizo conteo de los canales presentes en esta unidad, y se determinó su espesor, que están en un rango entre 5-10 pies y 10-15 pies de acuerdo a los registros de pozo interpretados.

Espesor de Canales Mugrosa-C: En los intervalos estudiados para Mugrosa C, los canales presentan espesores que están en un rango entre 5-10 pies y 10-15 pies.

Espesores Niveles Formacionales Mugrosa B y Mugrosa C: Estos fueron determinados a partir de los topes de los niveles formacionales definidos en los registros de pozo, en la Tabla 8 se ilustra el espesor de los niveles Formacionales de interés en el campo Tenerife.

Tabla 8. Espesores Niveles Formacionales

Pozo	Unidad Espesor	Total (ft.)
Tenerife-1	Mugrosa B	1143,54
	Mugrosa C	604,87
Tenerife-2	Mugrosa B	1694,05
	Mugrosa C	403,66
Tenerife-3	Mugrosa B 1	1208,13
	Mugrosa C	390.76

8.3.5 Variación de Direcciones de Paleocorrientes

A continuación describiremos como es la variación de direcciones vertical entre las diferentes unidades estratigráficas.

Para el pozo Tenerife-1 el análisis de las paleocorrientes (Figura 49) fue el siguiente:

En la Fm. Mugrosa Zona C se midieron 34 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $51,68^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,67.

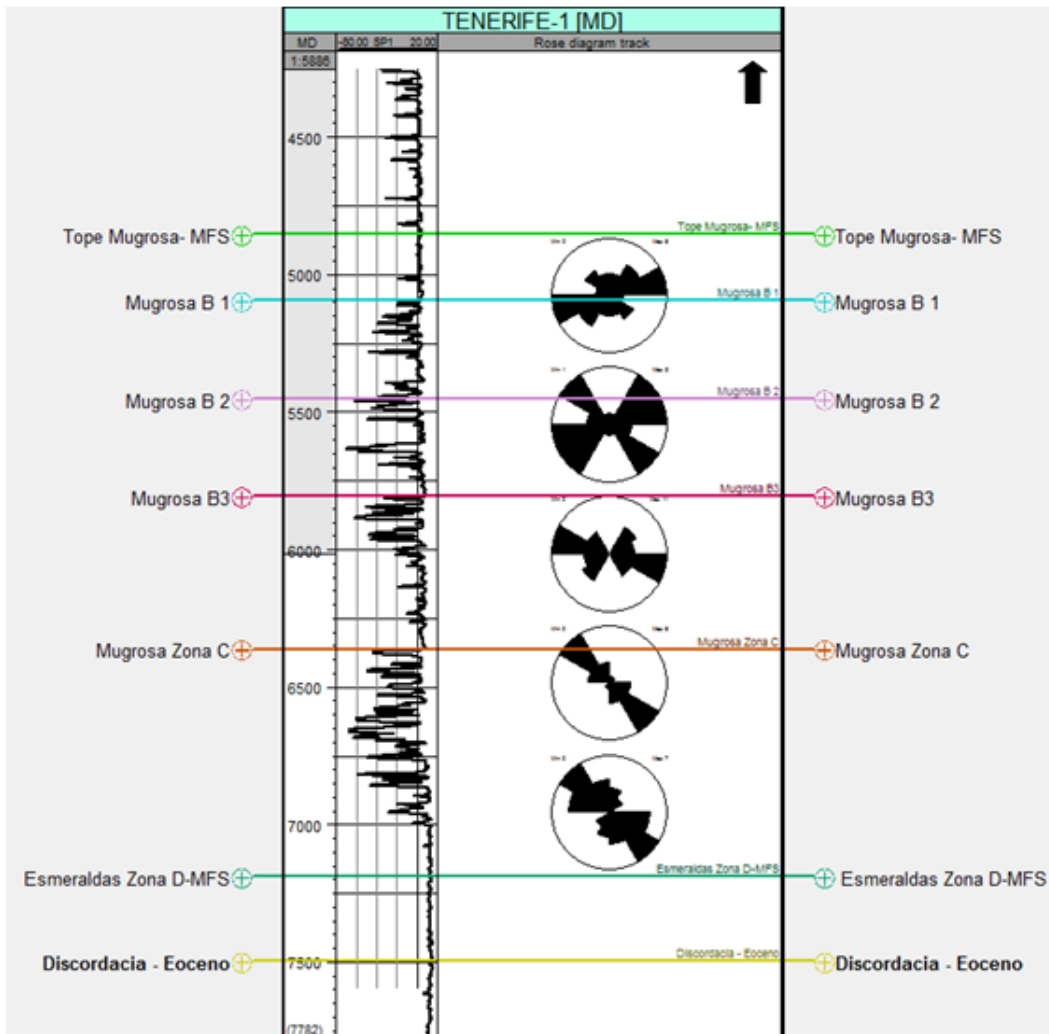
En la Fm. Mugrosa B3 se midieron 27 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $348,35^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,60.

En la Fm. Mugrosa B2 se midieron 16 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $351,19^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,40.

En la Fm. Mugrosa B1 se midieron 20 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $314,73^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,42.

En el Tope de la Fm. Mugrosa MFS se midieron 11 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $35,40^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,58.

Figura 49. Topes del pozo Tenerife-1 y dirección de paleocorrientes en cada intervalo.

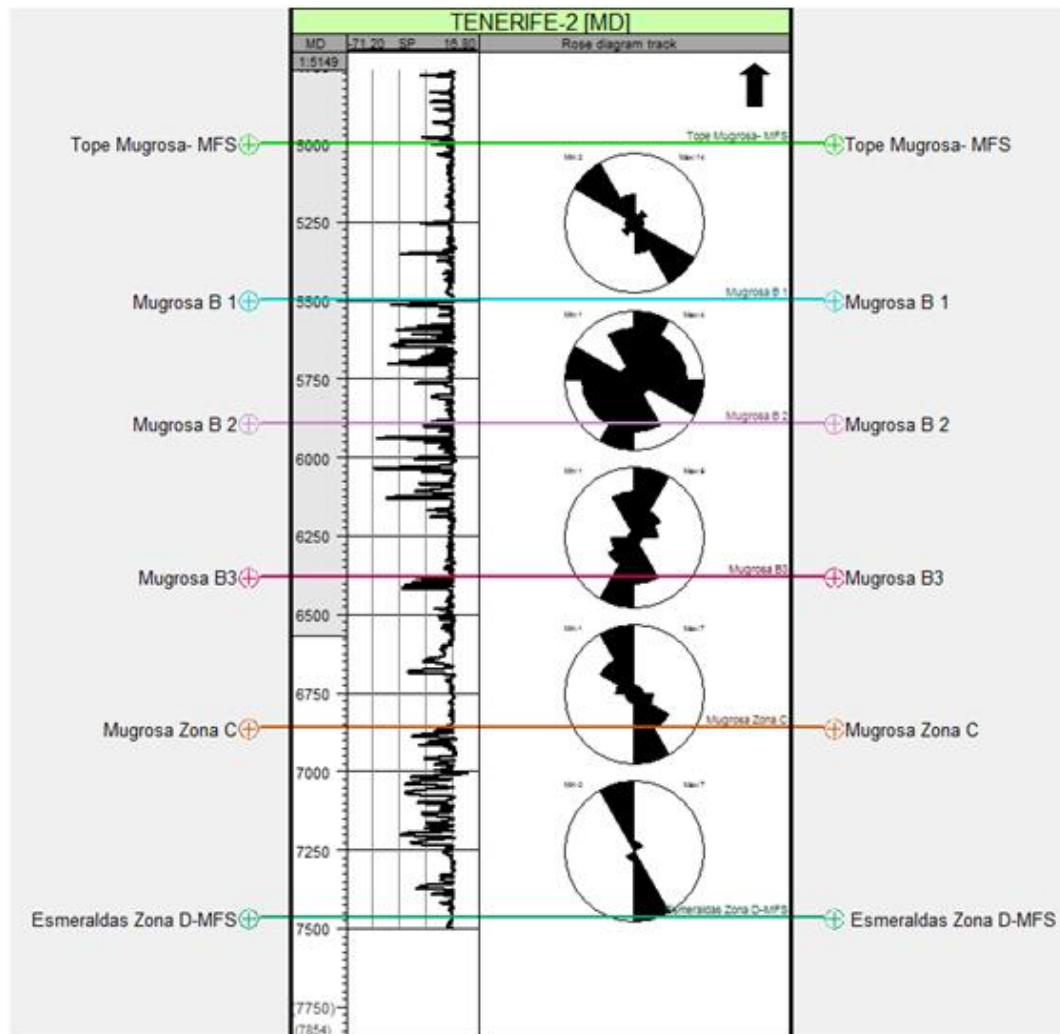


Para el pozo Tenerife-2 el análisis de las paleocorrientes (Figura 50) fue el siguiente:

En la Fm. Mugrosa Zona C se midieron 16 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $80,42^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,93.

En la Fm. Mugrosa B3 se midieron 14 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de 28,99° con un radio de consistencia (CR) de 0,71.

Figura 50. Topes del pozo Tenerife-2 y dirección de paleocorrientes en cada intervalo



En la Fm. Mugrosa B2 se midieron 20 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de 98,01° con un radio de consistencia (CR) de 0,61.

En la Fm. Mugrosa B1 se midieron 18 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $148,19^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,34.

En el Tope de la Fm. Mugrosa MFS se midieron 27 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $67,92^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,82.

Para el pozo Tenerife-3 el análisis de las paleocorrientes (Figura 51) fue el siguiente:

En la Fm. Esmeraldas se midieron 27 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $74,65^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0.73.

En la Fm. Mugrosa Zona C se midieron 43 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $56,95^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,86.

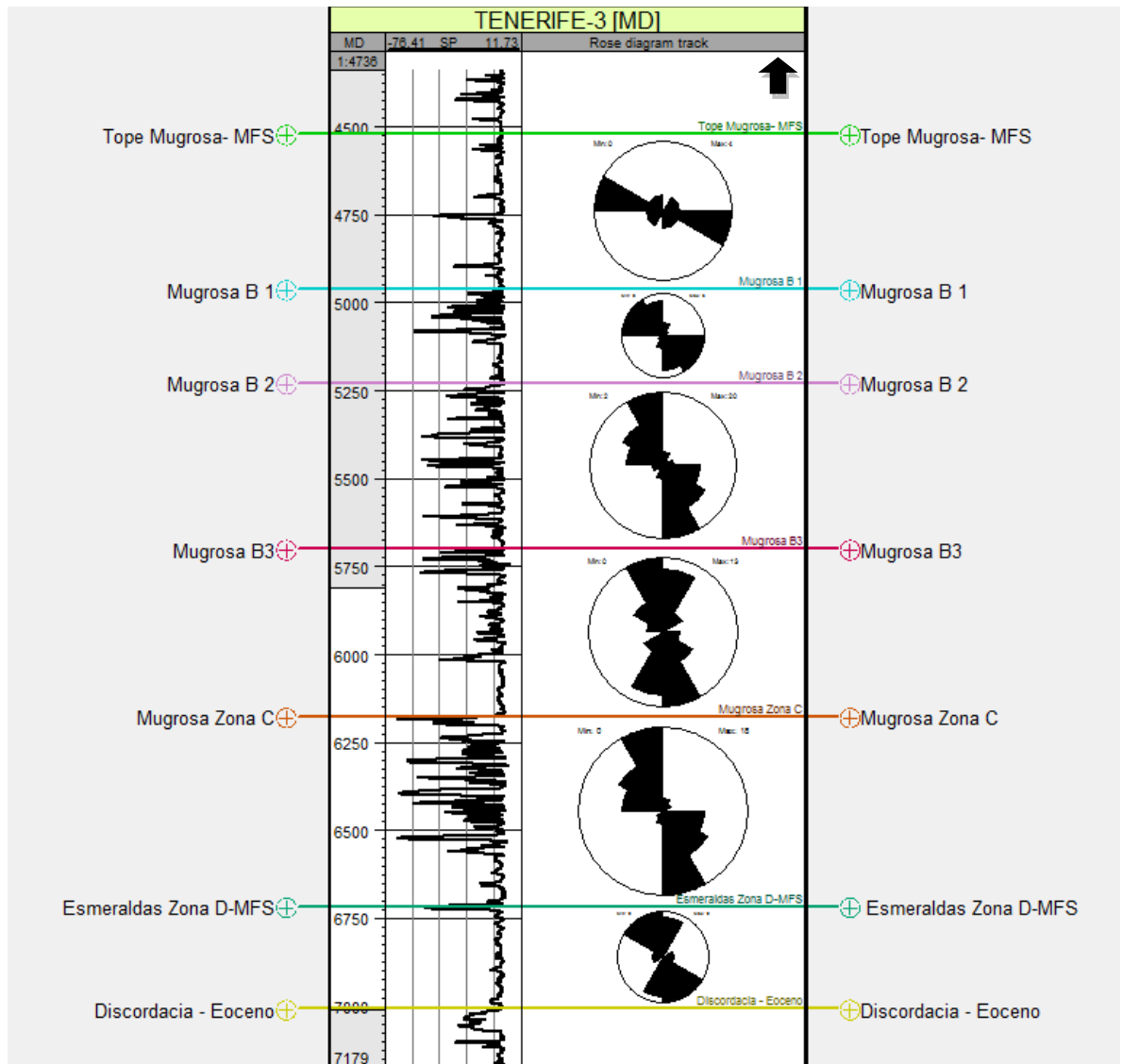
En la Fm. Mugrosa B3 se midieron 38 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $84,59^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,59.

En la Fm. Mugrosa B2 se midieron 52 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $57,28^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,81.

En la Fm. Mugrosa B1 se midieron 19 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de $62,79^\circ$ con un radio de consistencia (CR) de 0,69.

En el Tope de la Fm. Mugrosa MFS se midieron 8 datos, el diagrama de roseta presenta una distribución polimodal y la media es de 46,57° con un radio de consistencia (CR) de 0,63.

Figura 51. Topes del pozo Tenerife-3 y dirección de paleocorrientes en cada intervalo.



Haciendo un análisis de paleocorrientes se puede inferir cambios de depositación en el área de aporte de los sedimentos en cada una de las diferentes unidades

estratigráficas perforadas de Campo Tenerife, siendo la Cordillera Central la principal fuente de suministro de sedimentos y en menor proporción de la Cordillera Oriental.

A medida que ascendemos estratigráficamente el área de aporte de los sedimentos cambia en posición geográfica, por ejemplo la parte NW para la Formación Mugrosa y de la parte SE de la ancestral Cordillera Oriental para las Formación Esmeraldas, con base en la diferencia, se sugiere que el área estuvo sometida a diferentes grados de actividad tectónica o levantamiento.

8.4 CALIBRACIÓN DATOS SÍSMICOS A PARTIR DE CORRIDOR STACK

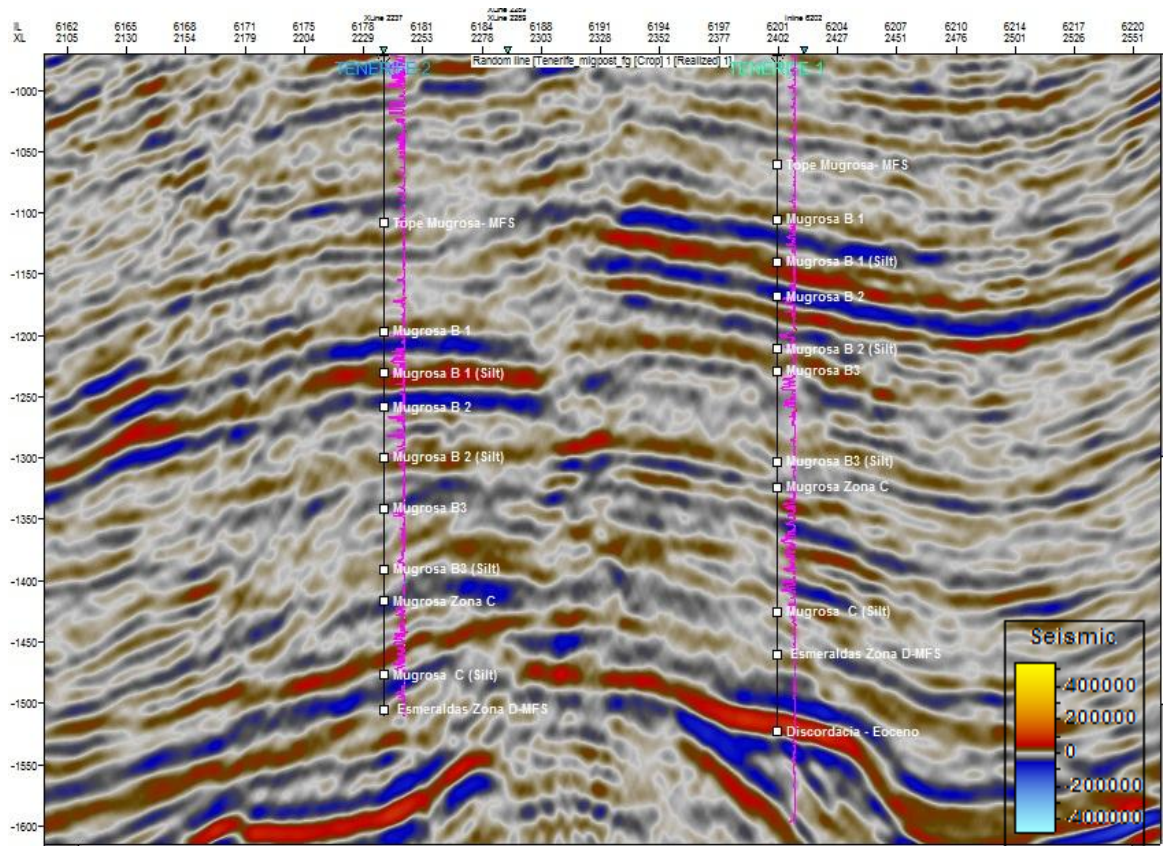
Los datos de VSP para el pozo Tenerife-1 generaron un amarre aceptable, ya que presentaban errores en más de un tope, que fueron corregidos mediante la aplicación de un desplazamiento en tiempo (*shift*) de 15 ms a la sísmica, tiempo que fue sumado a los datos de VSP, para poder continuar con las pruebas en los otros pozos del campo, con la sísmica en cero. Este procedimiento no se realiza comúnmente para esta clase de datos ya que deberían tener una buena correspondencia con la sísmica de superficie si los datos se adquirieron y procesaron de la forma correcta.

Los datos de check shot / tiro de verificación para el pozo Tenerife-2 generaron un buen amarre. En la línea compuesta que pasa por los dos pozos (Figura 52) se observa el ajuste de los topes estratigráficos con la sísmica, en donde, los reflectores de máxima amplitud o crestas se asocian a depósitos finos y los negativos de mínima amplitud o valles a cuerpos de arena. En la tabla 9 se muestra el mejor ajuste para cada uno de los pozos.

Tabla 9. Ajuste Check shot y VSP en los pozos Ten-1,2 y 3

POZO	TABLA T-D	SHIF
Tenerife -1	VSP MD-TWT	-15 ms
Tenerife -2	CSKS SRD-TWT	No
Tenerife -3	CSKS MD-TWT(Ten-2)	17ms

Figura 52. Amarre Tiempo-Profundidad VSP-Check Shot pozos Tenerife 1 y 2.

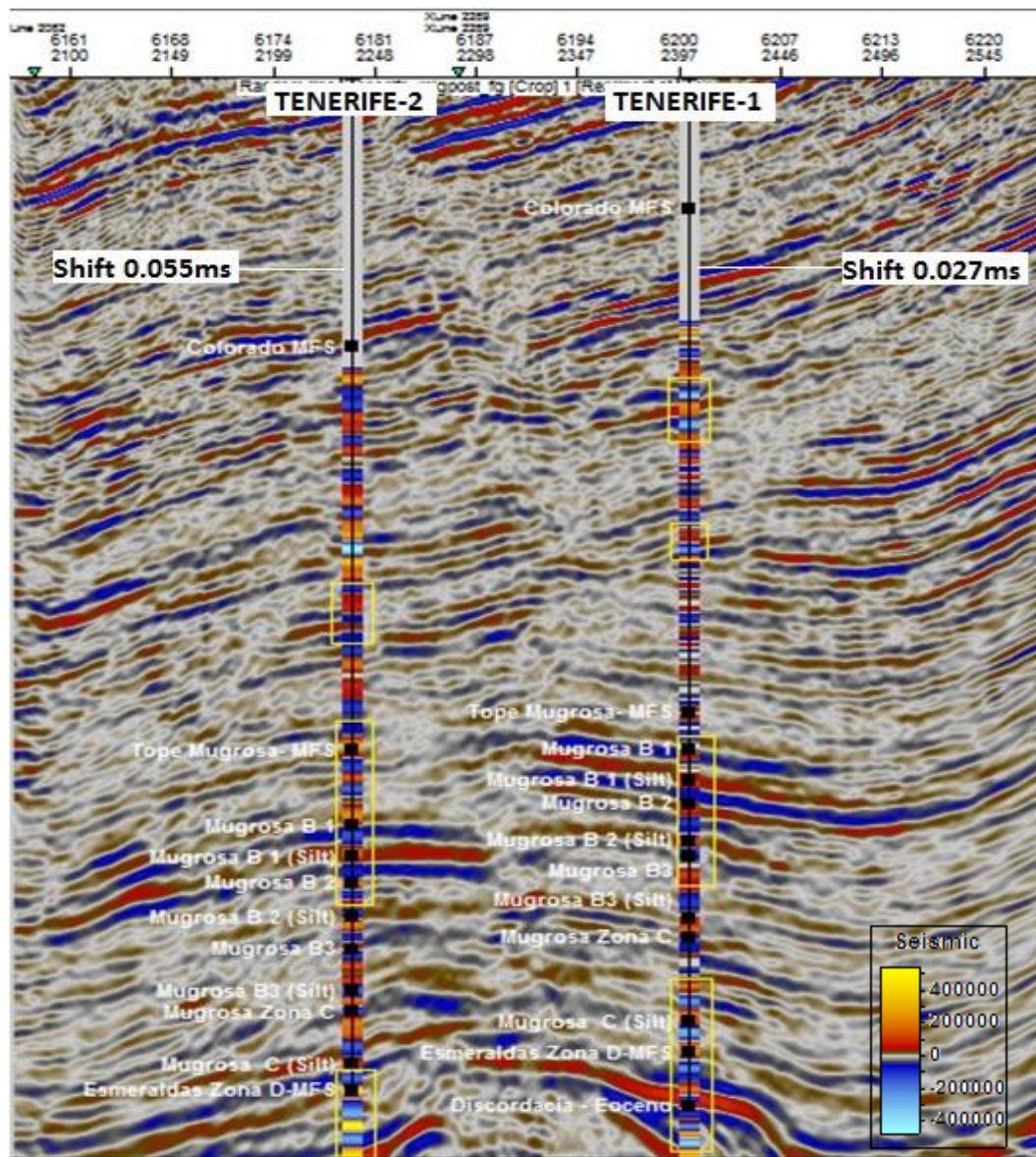


La tabla 10 muestra los corredor usados en cada pozo y el valor sumado para el respectivo ajuste.

Tabla 10. Corridor stack para pozos Tenerife 1 y 2

Pozo	Corridor Stack	Shift (s)
Tenerife-1	Normal	20
Tenerife-2	Normal	55

Figura 53. Amarre tiempo profundidad a partir del *Corridor Stack*, a la izquierda Tenerife 1 (shift 0.027ms), a la derecha Tenerife 2 (shift 0.055ms).

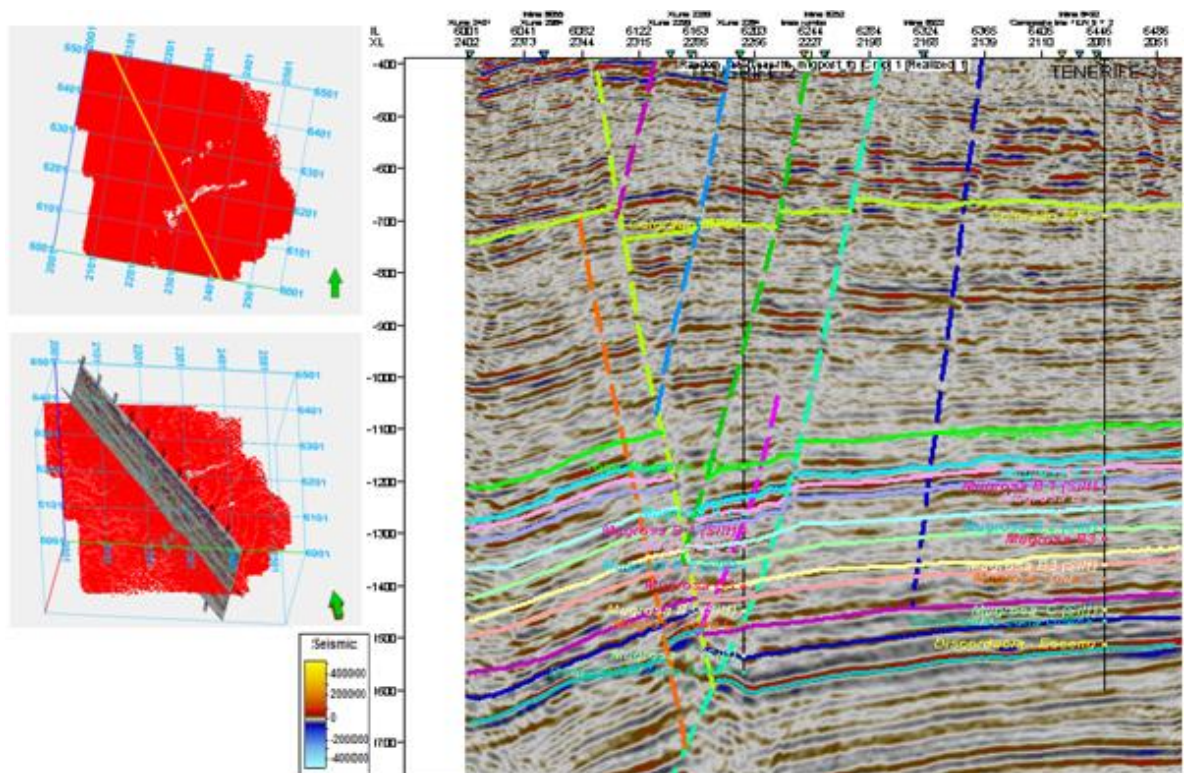


8.5 INTERPRETACIÓN SÍSMICA

8.5.1 Interpretación Estratigráfica

La Figura 54 corresponde a una línea compuesta de buzamiento ubicada hacia la parte suroccidental del área de interpretación con una orientación NW-SE (Cuadro superior derecho de la figura), Los 12 horizontes interpretados se ilustran en la línea compuesta, el horizonte más somero lo constituyo el Tope de la Formación Colorado, el cual se presenta como un reflector fuerte pero con muy poca continuidad que hace difícil su identificación a largo del todo el cubo sísmico. Por su parte la discordancia del Eoceno se presenta como un reflector fuerte y continuo que representa el horizonte interpretado a mayor profundidad, por lo que la ventana de estudio se verá limitada entre estos horizontes.

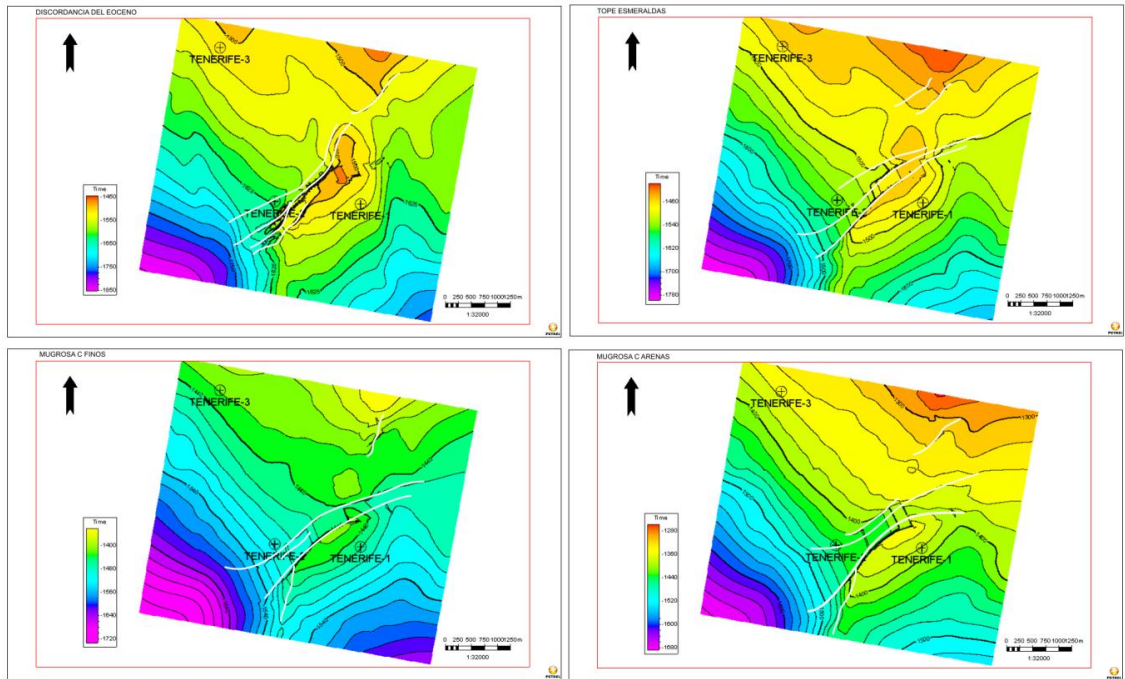
Figura 54. Horizontes interpretados. Línea compuesta.



Se generaron mapas en tiempo a partir de la interpretación original de los horizontes. Los mapas correspondientes a la discordancia del Eoceno, Esmeraldas, Mugrosa C finos y arenas presentan rasgos similares en el sentido de que están controlados por el estilo tectónico de la zona. El sistema de fallas normales tiene una dirección aproximada NE-SW, de base a tope estos mapas presentan máximos y mínimos locales de 1850 a 1280 ms (Figura 55).

Al realizar la integración de las interpretaciones, se notó una gran coherencia entre la ubicación de los horizontes interpretados con respecto a las amplitudes de las trazas, es decir, no existen saltos en los mismos horizontes entre una sección y otra. En los mapas superficies generadas en tiempo se utilizó como input cada uno de los horizontes interpretados para las formaciones de la secuencia estratigráfica. En estas superficies se pueden diferenciar una estructura anticlinal principal (Figuras 55 ,56 y 57), con un control de la estructura y un respectivo cierre de las fallas normales. Este sistema de fallas observado en los mapas isopacos, coincide con el modelo estructural interpretado para Tenerife en el Informe técnico ICP., (Sandoval y Estévez, 2010)

Figura 55. Mapas en Tiempo para la discordancia del Eoceno, tope de esmeraldas, Mugrosa C finos y arenas



Los mapas generados para la Formación Mugrosa B3 y B2, son bastante similares entre sí debido a que se encuentran cercanos en tiempo, variando de 1640 a 1160ms. En la figura 56 se puede observa que el mapa de la zona mugrosa B2 arenas es atravesado por cuatro fallas en dirección NE.

Figura 56. Mapas en tiempo de la Formación Mugrosa B3 Y B2.

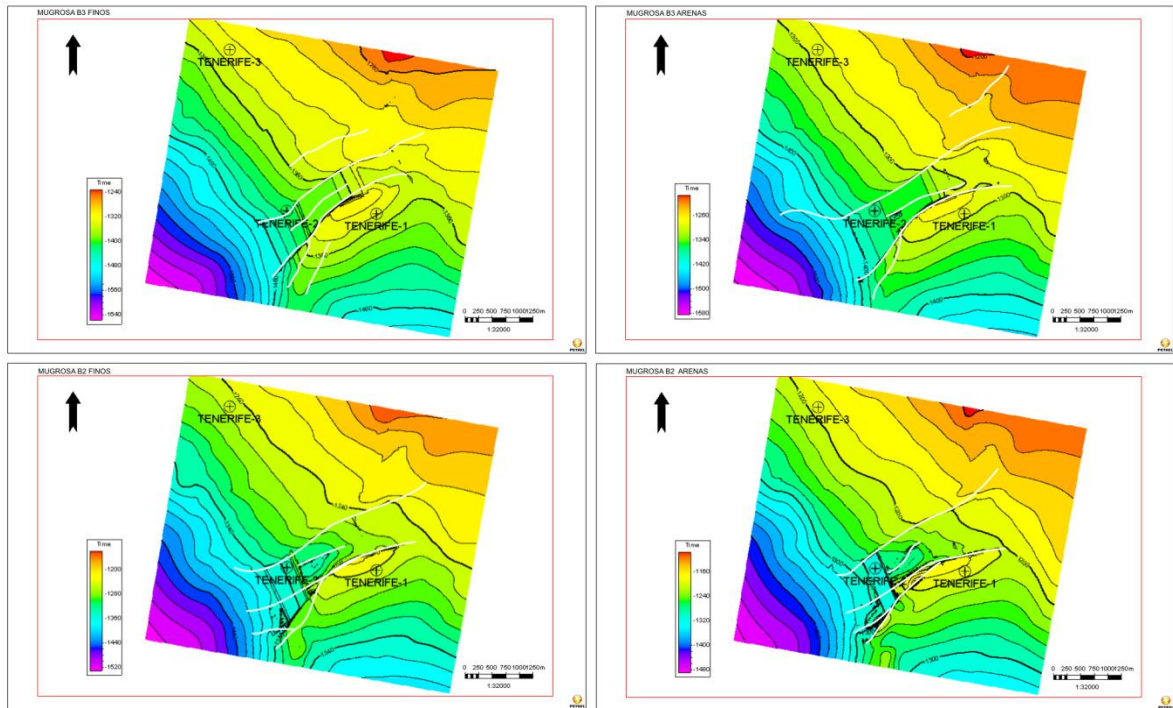
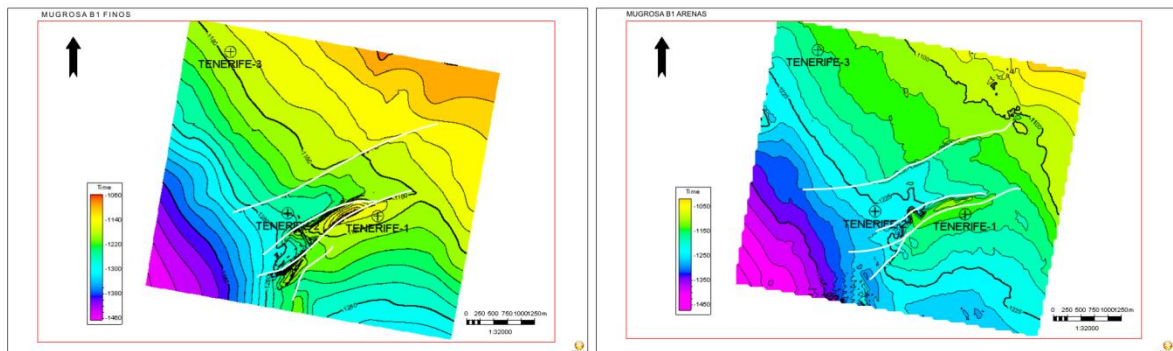


Figura 57. Mapas en tiempo de la Formación Mugrosa B1



En la tabla 11 se presenta la ubicación en tiempo de base a tope de los horizontes interpretados.

Tabla 11. Valores de tiempo para los horizontes interpretados

Horizonte	Tiempo (μ s)	
	Mínimo	Máximo
Discordancia	1450	1850
Tope Esmeraldas	1460	1780
Mugrosa C Finos	1400	1720
Mugrosa C Arenas	1280	1680
Mugrosa B3 Finos	1240	1640
Mugrosa B3 Arenas	1260	1580
Mugrosa B2 Finos	1200	1520
Mugrosa B2 Arenas	1160	1480
Mugrosa B1 Finos	1140	1460
Mugrosa B1 Arenas	1050	1450
Tope Mugrosa	1025	1400
Tope colorado	475	975

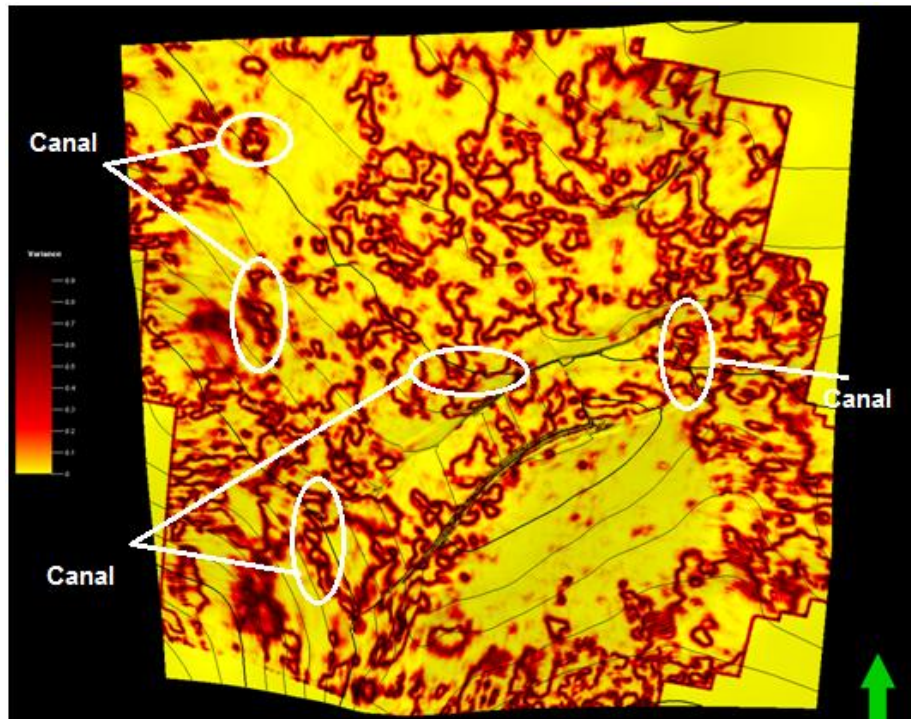
8.5.2 Visualización Atributos Sísmicos

Los atributos aplicados que mostraron mayor visualización de canales son varianza, energía, buzamiento, impedancia acústica relativa y mayor curvatura negativa, los atributos que se aplicaron y no mostraron mayores cambios estratigráficos son curvatura máxima, mínima, positiva y direccional.

Atributos Geométricos de Varianza

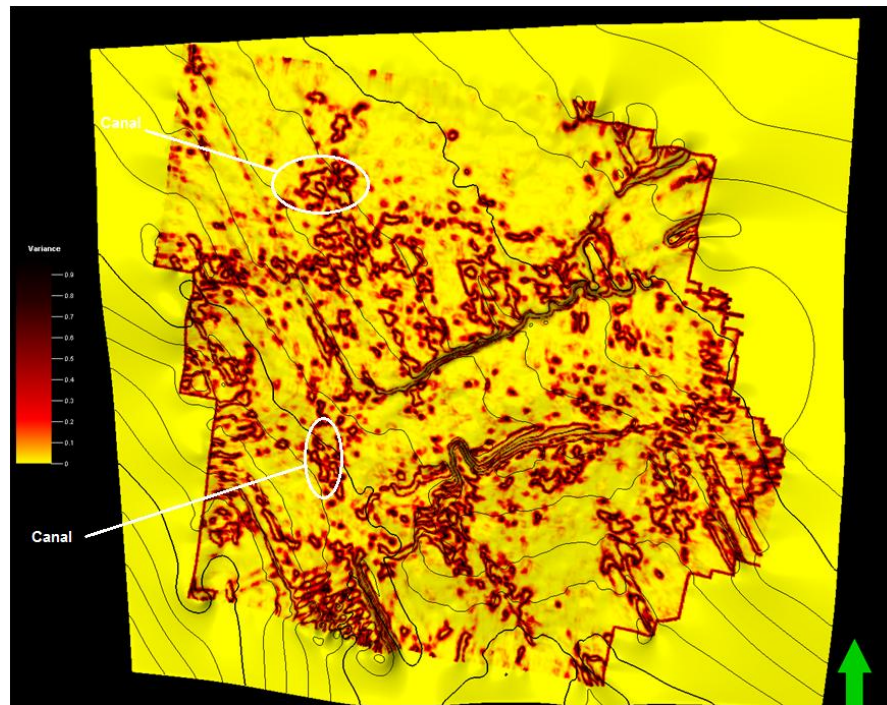
Visualiza la continuidad horizontal de la amplitud, permitiendo aislar bordes asociados a fallas y variaciones laterales de facies, es decir a medida que aumenta la varianza aumenta la discontinuidad, lo cual en el contexto geológico puede estar señalando la presencia de discontinuidades estructurales (fallas y fracturas) o estratigráficas (cambios laterales como canales fluviales, discordancias). En la Figura 58 y 59, se muestra esquemáticamente la forma en que trabajan los atributos de varianza; las zonas de color amarillo representan el grado de no varianza o coherencia que tiene con respecto a las zonas que la rodean en dirección Inline y Crossline. Se puede observar el canal meandriforme con alta respuesta en la varianza, también fallamiento en dirección SW-NE hacia el centro del área de estudio y SE-NW hacia el suroriente.

Figura 58. Time slice a 1693 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Mugrosa C; en este caso se muestra el resultado que arroja el atributo de varianza.



Aplicando el atributo de varianza se visualizan claramente los bordes del canal mostrando cierto grado de continuidad de izquierda a derecha.

Figura 59. Time slice a 1693 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Esmeraldas.



El atributo de varianza se aplica en base al cálculo de parámetros de muestreo, que consiste en un filtrado horizontal que controla el número de trazas para estimar la varianza horizontal.

Atributos Geométricos de Energía

Es importante para la detección de puntos brillantes causados por la acumulación de gas, localización de los principales cambios litológicos que son causadas por los reflejos de energía máxima y límites de secuencia. El atributo muestra claramente cambios litológicos (Figura 60, 61 Y 62) sutiles que pueden no ser evidentes en los datos sísmicos.

Figura 60. Time slice a 2013 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Mugrosa C.

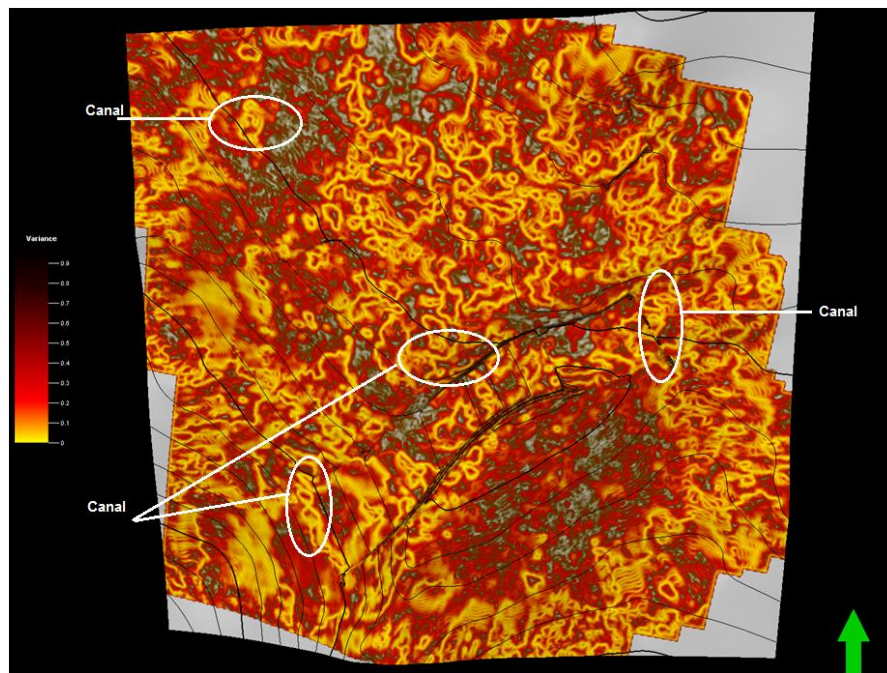
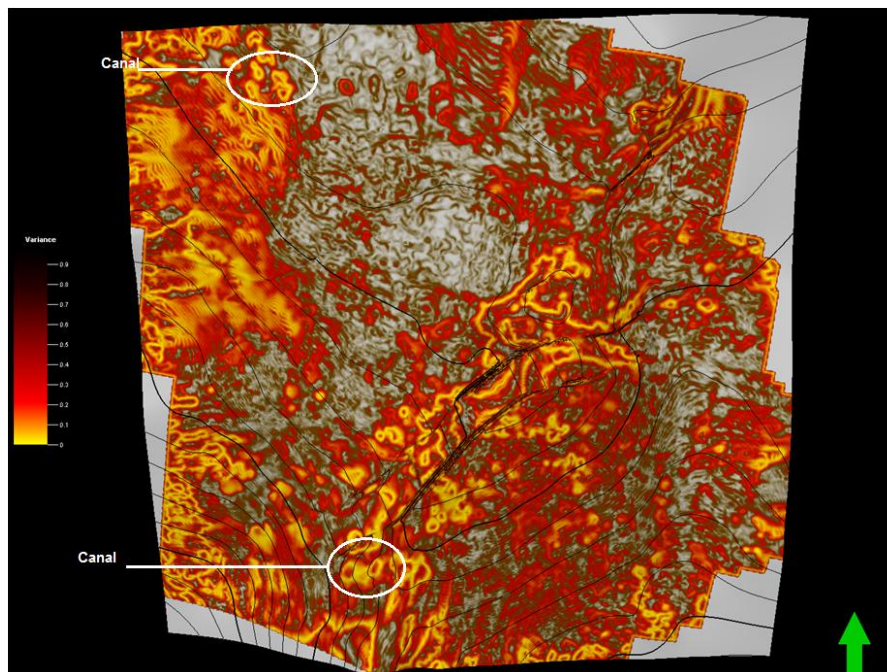
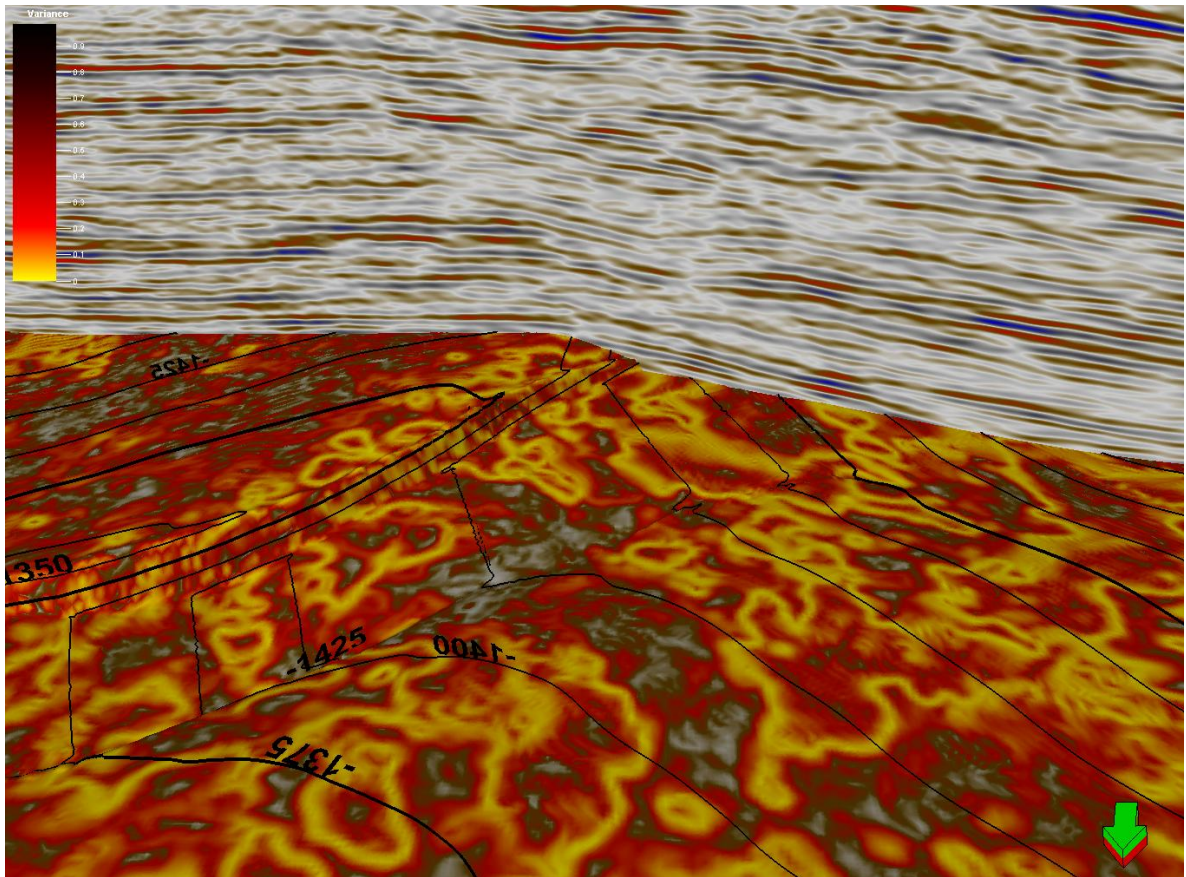


Figura 61. Time slice a 2013 ms donde se evidencia la existencia de canales presentes en el campo de Tenerife para la Formación Esmeraldas.



El atributo de energía muestra un canal meandriforme adicional al expuesto con los atributos de varianza (Figura 62), altos valores de energía indican altos valores de amplitud, con este atributo pueden realizarse variaciones laterales.

Figura 62. Definición e interpretación de canales en el campo Tenerife utilizando los atributos de varianza en el time slice 2013.

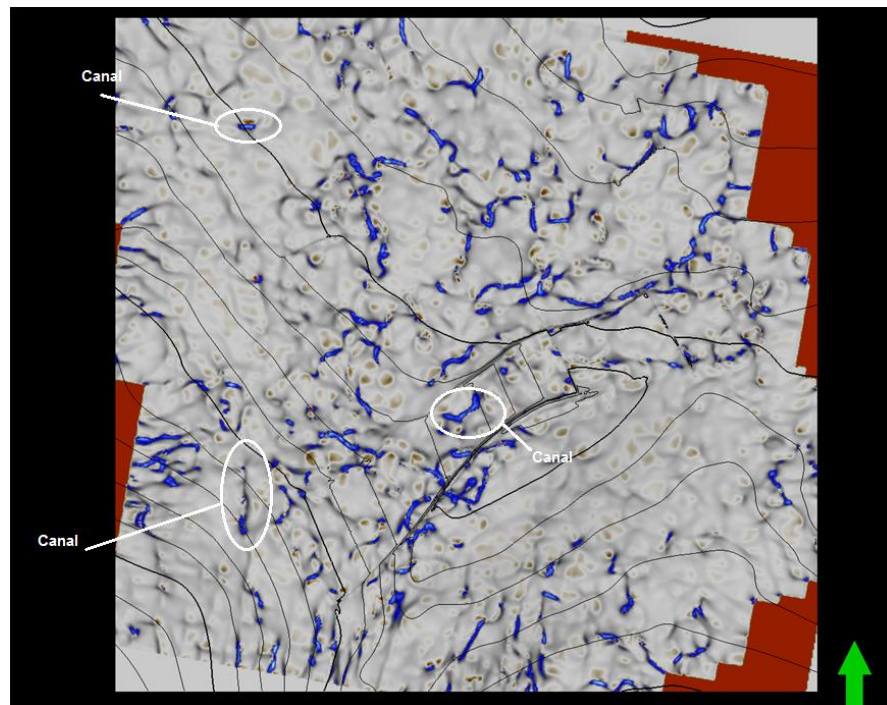


Atributos Geométricos de Curvatura

Los atributos de curvatura permiten conocer la relación geométrica de los reflectores al ser cóncava o convexa y la proporción entre ellas. Entre estos atributos se encuentran el atributo de (1) Mínima curvatura, (2) Máxima curvatura, (3) Curvatura media, (4) curvatura negativa y (5) Curvature positiva. En la figura 63, el time slice a 1006 ms con el atributo de curvatura negativa, se observa una relación entre deformación y curvatura, que es útil en la interpretación de

estructuras como fallas y zonas estructuralmente más altas o más bajas; las curvaturas mínima y la más negativa curvatura en colores azules representan el bloque más bajo estructuralmente, zonas de cero curvatura se relacionan a zonas estructuralmente planas y a zonas de desplazamiento de falla.

Figura 63. Atributos de curvatura *most negative curvature* para la Formación Mugrosa C.



Atributos Geométricos de Buzamiento

EL atributo de buzamiento permite conocer el carácter de inclinación y orientación de los reflectores sísmicos, haciendo fácil la identificación de bloques inclinados o rotados con respecto a otros, además cambios en el dominio del buzamiento y de rumbo de los estratos, iluminan fallas haciendo más fácil la interpretación estructural, figura 64 y 65.

Figura 64. Atributos de dip para la Formación Mugrosa C.

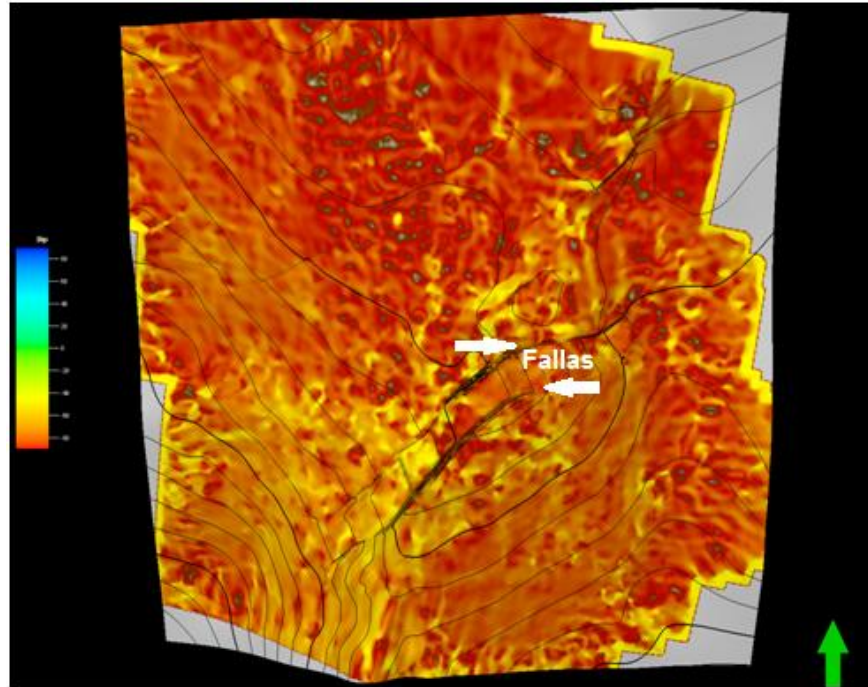
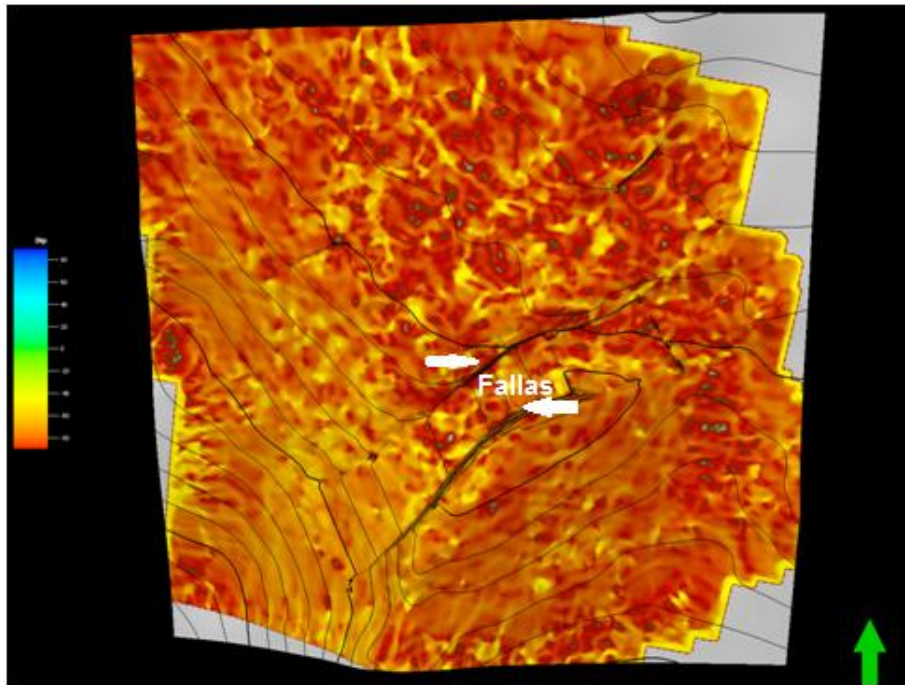


Figura 65. Atributos de dip para la Formación Esmeraldas.



Las figuras anteriores muestran con cierto grado de incertidumbre algunos componentes del modelo ambiental establecido en el modelo estratigráfico, ya que es evidente que la geometría de los rasgos interpretados sugiere la presencia de canales, pero es necesario mejorar la resolución horizontal de los datos para identificar o relacionarlos con las electrofacies identificadas, para que permitan dar un resultado concluyente. Aunque la visualización de estos detalles sobre la imagen sísmica confirma un ligero incremento de resolución horizontal, es notoria la presencia de artificios o ruido que revelan las limitaciones en el mejoramiento de la resolución lateral, relacionados con el desempeño de la técnica y la distancia horizontal de las trazas sísmicas.

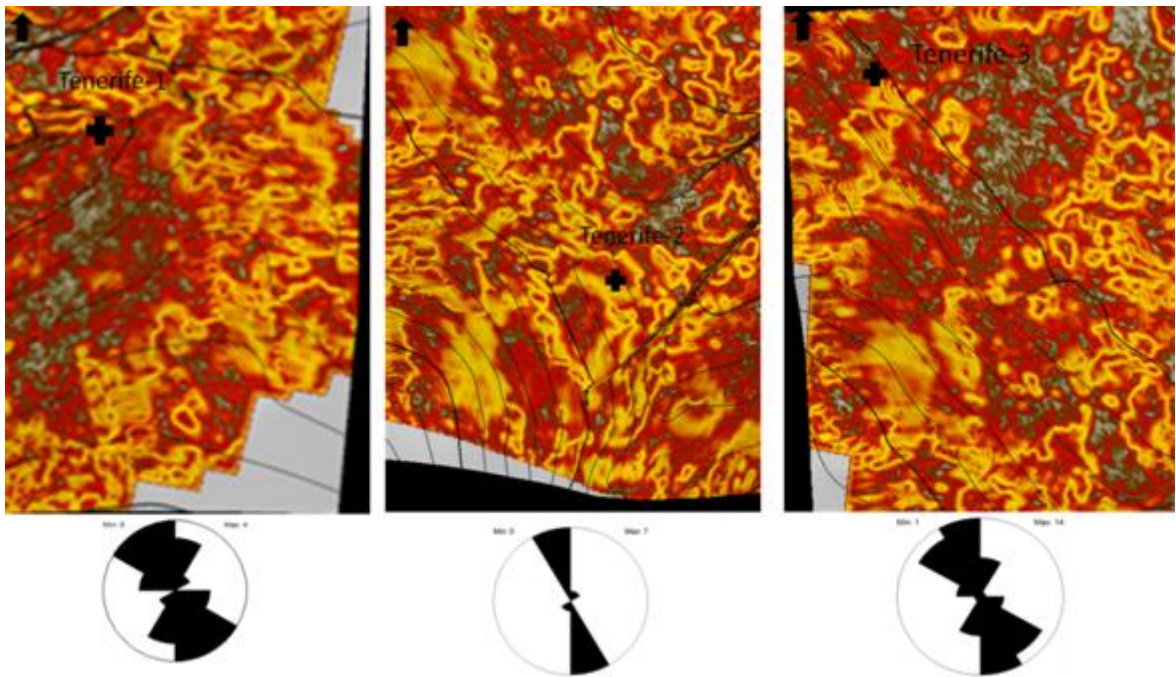
Cabe mencionar que la interpretación de canales en grandes áreas depende al grado de canibalismo que tuvo el cauce en ese momento. Además por ser una interpretación en intervalos de tiempo, lateralmente los canales pueden ser una representación de la depositación del cauce en distintos periodos y que por efectos de basculamiento de la cuenca se muestran en un mismo tiempo. La formación Mugrosa en esta zona buza pocos grados hacia el Sur-Este.

Con el fin de validar la interpretación realizada sobre el atributo de Máxima Amplitud, el presente análisis muestra la aplicación de otros atributos adicionales que representan con mayor claridad rasgos estratigráficos y estructurales sobre la misma ventana de iteración (-1565 a -1575).

8.5.2.1 Validación de los Atributos Sísmicos. La clasificación de antiguos sistemas de canales rara vez son lo suficientemente expuestos para permitir la medición directa de la corriente, es por esto que la aplicación de los atributos es necesaria para visualizar canales y poder determinar si es posible la relación de las direcciones del meandro, con las direcciones de paleocorrientes calculadas por medio de los registros Dipmeter, se puede dar una estimación de la dirección del meandro bastante exacta.

La secuencia de atributos mostrados para las Formaciones Mugrosa y Esmeraldas, en donde se muestran en las imágenes el tránsito del tope de la formación a través de los atributos sísmicos, evidencian una concentración de canales, donde las direcciones de las paleocorrientes en la Formación Mugrosa en general son hacia el sureste, el diagrama de roseta para la Fm. Mugrosa C (Figura 66) en el área de estudio presenta un patrón de tipo polimodal paleodirección sugiere de nuevo que el noroeste es el área de aporte de los sedimentos, es decir de la ancestral Cordillera Central.

Figura 66. Time Slices que corresponden al atributo de energía, y la dirección de las paleocorrientes, Formación Mugrosa C

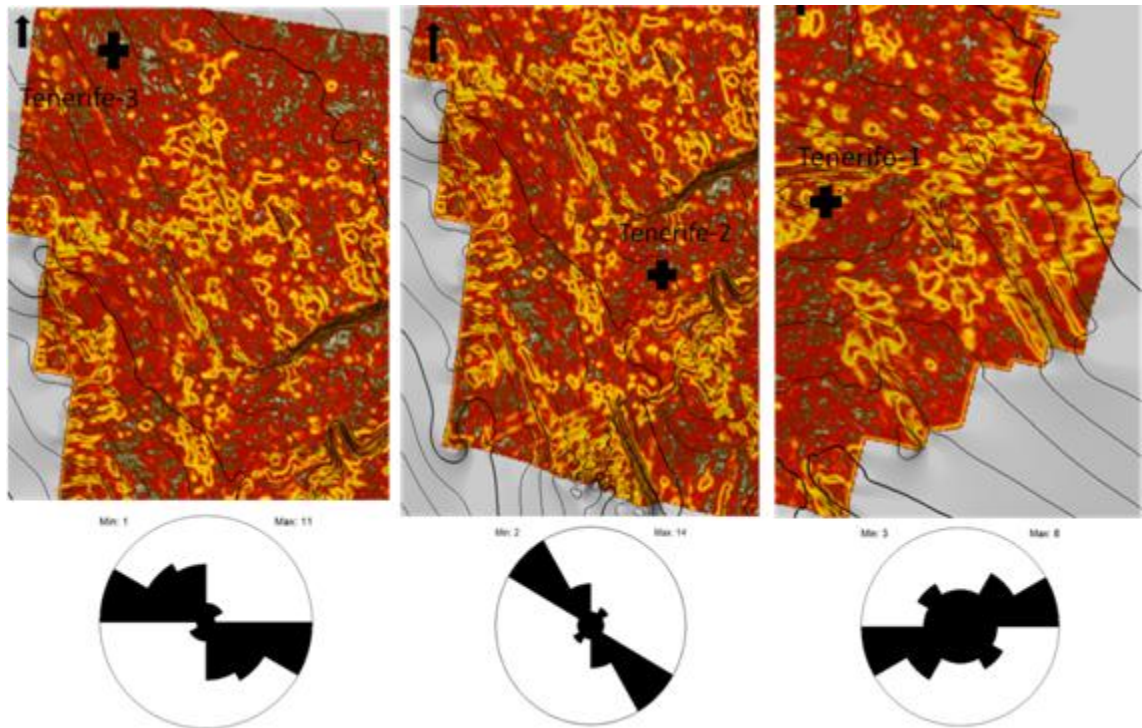


Las direcciones de las paleocorrientes muestran orientaciones de la superficie, lo que indica un total de la dirección del flujo hacia el sur a sureste.

Las direcciones de paleocorrientes para la Formación. Esmeraldas, en general están orientadas al NW, el diagrama de roseta presenta una marcada forma bimodal (Figura 67), la paleodirección sugiere que el área de aporte de los

sedimentos es predominante en la parte SE, proveniente de la Cordillera Oriental o del escudo en los Llanos Orientales.

Figura 67. Time Slices que corresponden al atributo de energía, dirección de las paleocorrientes Formación Mugrosa MFS.



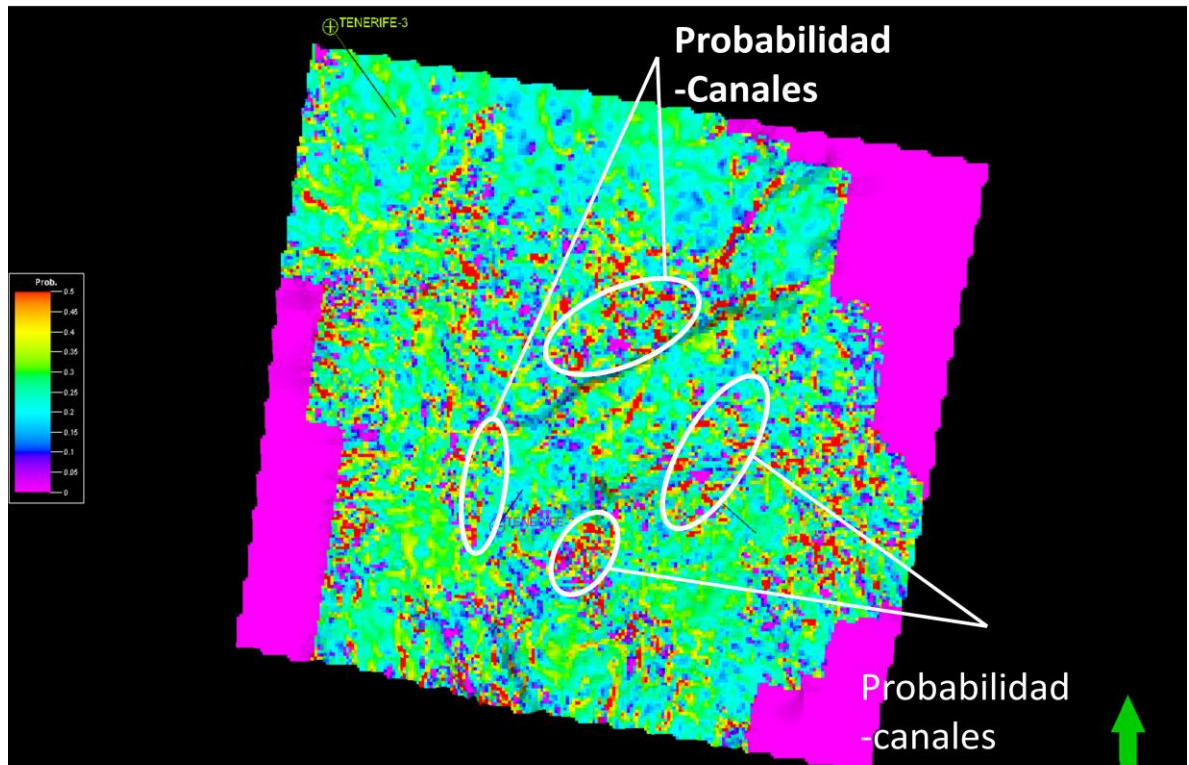
8.6 GENERACIÓN DEL MODELO

8.6.1 Modelamiento a partir de una Red Neuronal

La red neuronal supervisada por las electrofacies descritas en el capítulo 4, se forma con un máximo número de interacciones de 30, un error límite de 5%, y una validación 70%, generando una salida de probabilidades de ocurrencia de arenas lodos como se observa en la figura 68 y 69.

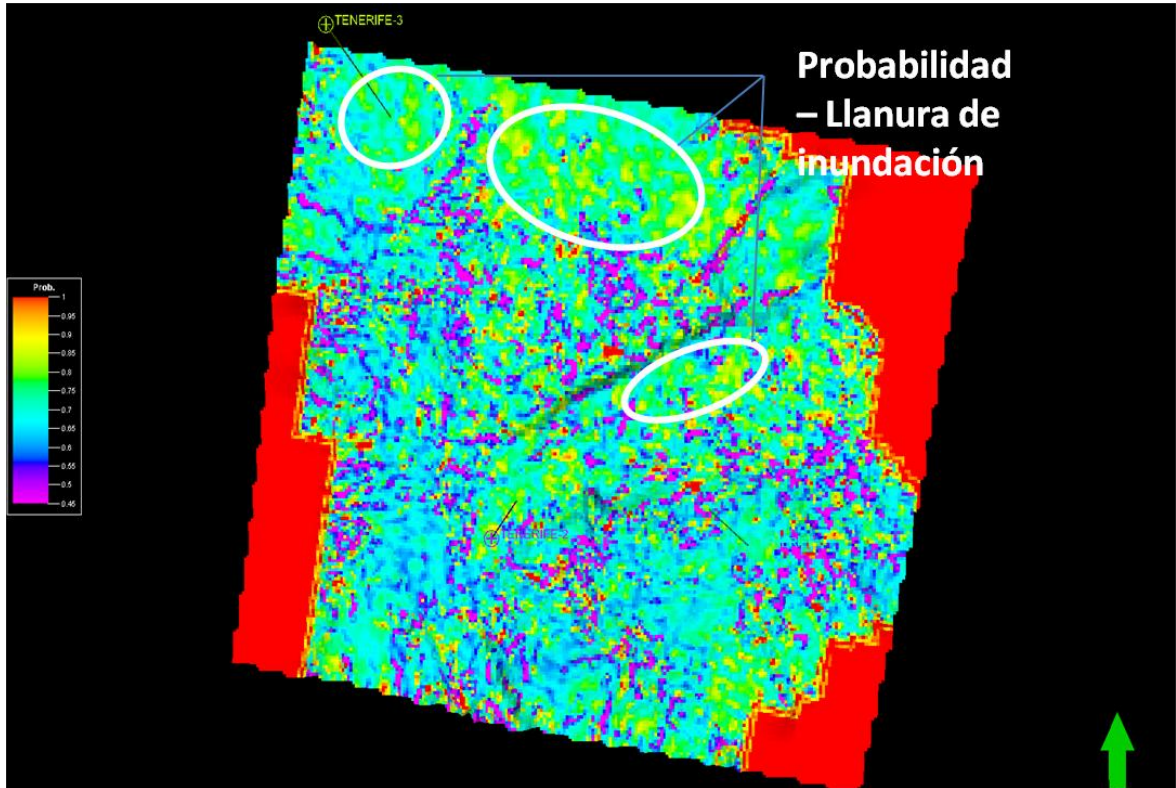
La mayor probabilidad de que ocurran canales, se presentan en colores rojos y coinciden con los canales visualizados con el set de atributos (Figura 68)

Figura 68. Probabilidad de ocurrencia de canales para la Formación Mugrosa C a partir de la red neuronal entrenada con set de atributos sobre grid de 25*25m.



La mayor probabilidad de que ocurran depósitos de llanura de inundación, se presentan en colores rojos y amarillos, estas zonas coinciden con la respuesta del atributo de impedancia acústica relativa, en donde los altos valores de RAI están asociadas a zonas de llanuras de inundación (Figura 69).

Figura 69. Probabilidad de ocurrencia depósitos de llanura de inundación para la Fm. Mugrosa C a partir de la red neuronal entrenada con set de atributos sobre grid de 25*25m.



Las electrofacies fueron modeladas a partir de la red neuronal entrenada con el set de atributos, a continuación se observa el modelo para las zonas de interés en este estudio; la Formación Mugrosa C (zona 5) y la Formación Esmeraldas (zona 6) (Figura 71 y 73).

8.6.2 Caracterización de Canales de Arena

Estos canales como se puede observar en los histogramas de distribución de facies de la figura 70 y 72, tienen una dirección NW-SE y su geometría es característica de un ambiente fluvial de ríos meándricos, los cuerpos de arena de la formación Mugrosa zona C comprenden espesores entre 20 a 30pies (Figura

69) y los de la Formación Esmeraldas 17-20 pies (Figura 71), con un ancho de canal de 20 a 23m respectivamente.

8.6.2.1 Canales de la Formación Mugrosa Zona C. En esta zona es donde mejor se presentan los canales, aunque no son muy continuos se pueden diferenciar su carácter meándrico, el análisis de los espesores en este intervalo se realizó mediante la lectura de histogramas de distribución de facies partir del modelo 3D (Figura 70). A continuación se describen las características de cada subambiente:

- Los canales presentan espesores desde 10 ft en un 80% y de 20 hasta 30 pies en un 20% aproximadamente. Dichos canales cubren un área total aproximada del 29%.
- Los Floodplain presentan espesores hasta de 120 pies ya que son mas continuos, cubriendo un área total de 68%
- Los Crevasse Splay presentan espesores de 10 pies y cubren alrededor del 3% del área.

Figura 70. A la izquierda distribución de las tres electrofacies de canal, floodplain y Crevasse Splay en la zona de la Fm Mugrosa C. A la derecha distribución de los canales.

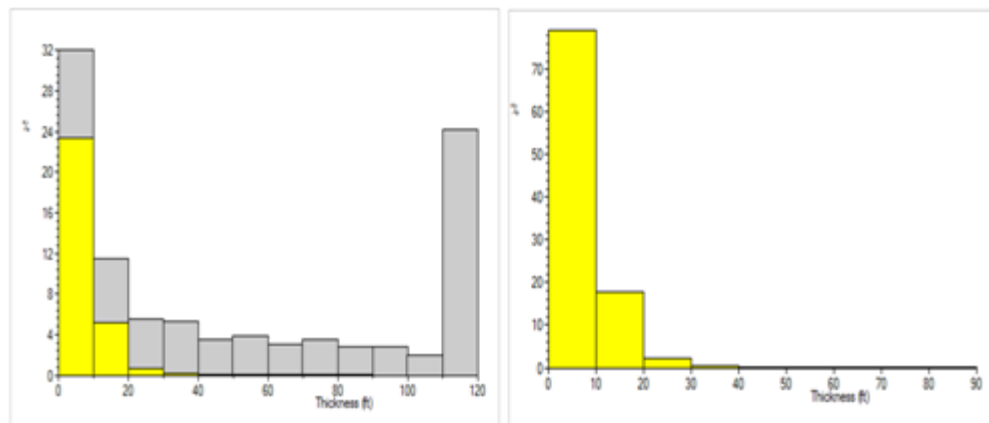
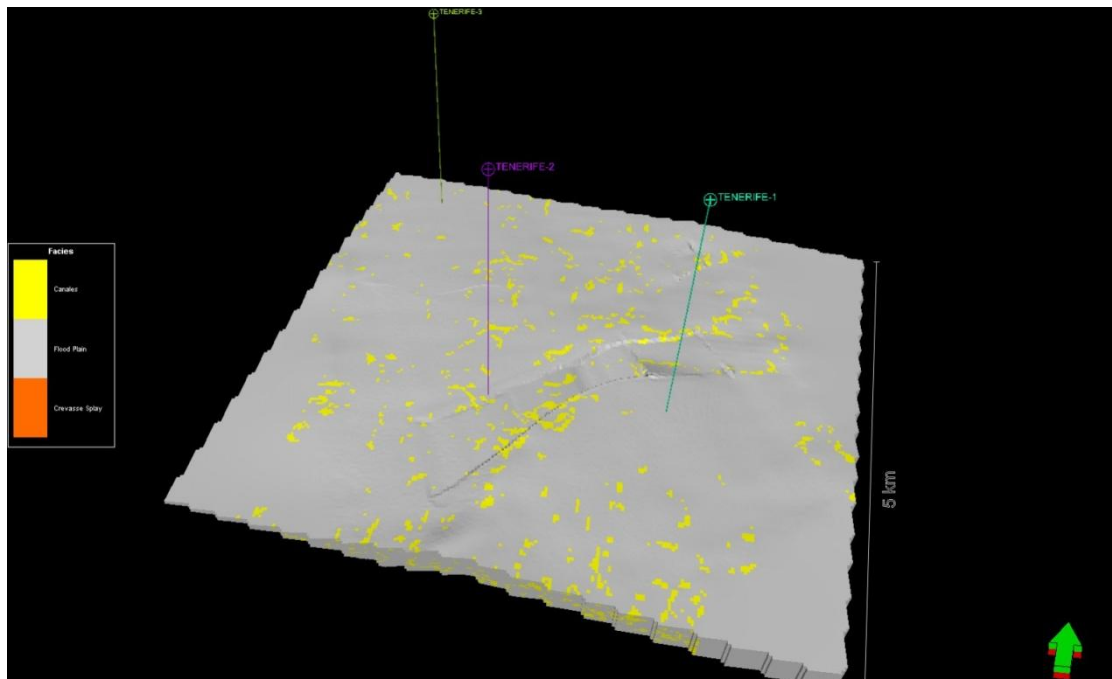


Figura 71. Modelo 3D de distribución de geocuerpos de arena para la Formación Mugrosa zona C.



8.6.2.2 Canales de la Formación Esmeraldas. En esta zona se presentan intercalaciones de canales con floodplain predominando estos últimos. Sin embargo se logró caracterizar los canales ya que también representan uno de los intereses del área. A continuación se describe las observaciones realizadas a partir de los variogramas (Figura 72).

- Los canales presentan espesores de 20 pies con una ocurrencia de 17% en el área, es decir en esta zona se preservan menos los canales de arenas que para la formación Mugrosa Zona C.
- Los Floodplain tienen espesores hasta de 50 pies y su distribución en el área es de aproximadamente el 78%.
- Los Crevasse Splay presentan espesores de 10 pies y cubren alrededor del 5% del área.

Figura 72. A la izquierda distribución de las tres electrofacies de canal, floodplain y Crevasse Splay en la zona de la Fm Esmeraldas. A la derecha distribución de Floodplain.

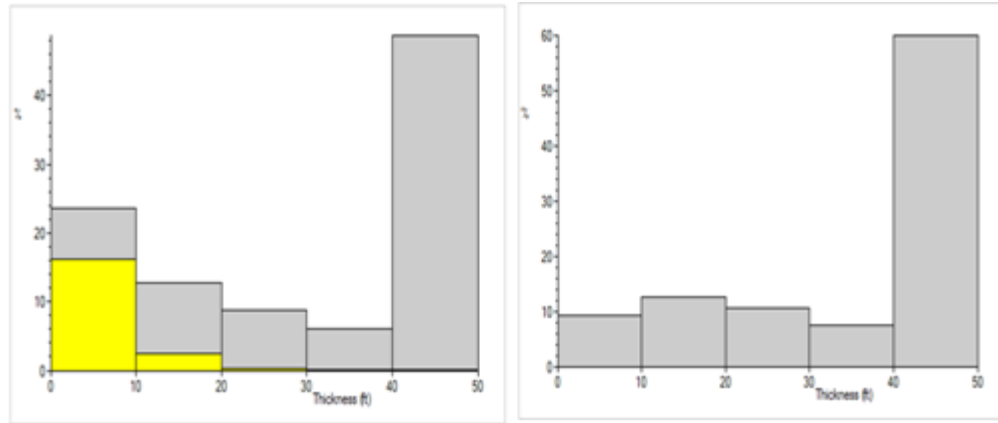
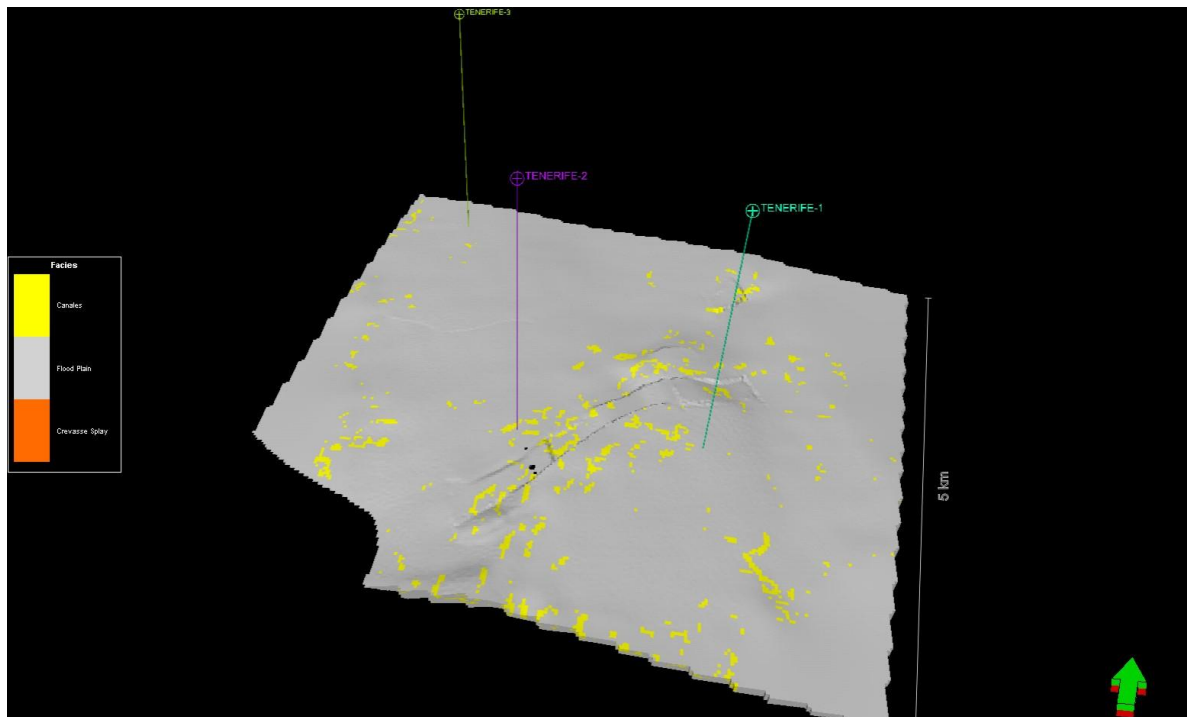


Figura 73. Modelo 3D de distribución de geocuerpos de arena para la Formación Esmeraldas.



Se comprobó la calidad de este modelo resultante mediante la revisión de propiedades de los atributos y sus respectivas respuestas en las superficies, se corrobora que las áreas con depósitos de canal vistas en el modelo 3D correspondían a las mismas diferenciadas con atributos sísmicos. Posteriormente se realizó una interpretación de reconstrucción de canales en el mapa de la formación Mugrosa zona C (Figura 73).

8.6.3 Oportunidades del Campo

8.6.3.1 Propuesta de Pozo. A partir de los resultados obtenidos en el análisis del modelo 3D de distribución espacial de geocuerpos se realiza la propuesta de pozo.

Se buscaron aquellas zonas al tope de la Formación Mugrosa donde posiblemente existiera mayor acumulación de sedimentos como las barras de arena/point bars. En la figura 74 se observan en color amarillo y azul la zona de interés en el recuadro hacia el SW.

Al revisar lo observado en esta zona se puede decir que la combinación de los resultados obtenidos a partir de los atributos sísmicos y su respectiva correspondencia con los datos de pozo, son una excelente herramienta para determinar la presencia de zonas productoras.

En la figura 75 se observa cómo es la geometría de los canales más representativos en la zona de estudio para la Formación Mugrosa C y su respectiva conectividad de cuerpos que permiten definir con mayor criterio la zona potencial en sentido Noreste-Sureste con el fin de seguir desarrollando el campo.

Figura 74. Interpretación y distribución de canales al tope de la Formación Mugrosa C.

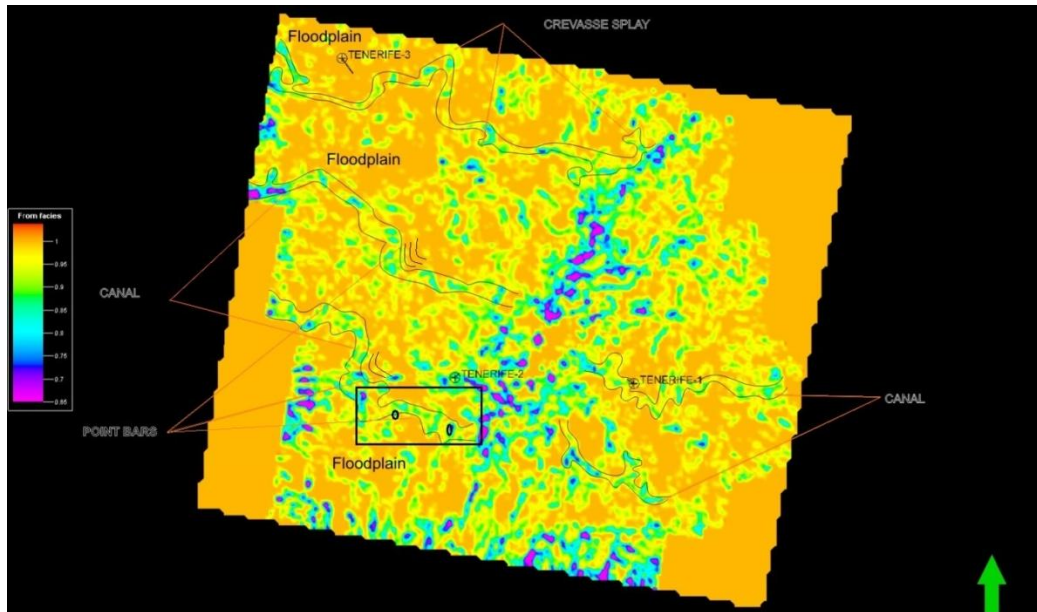
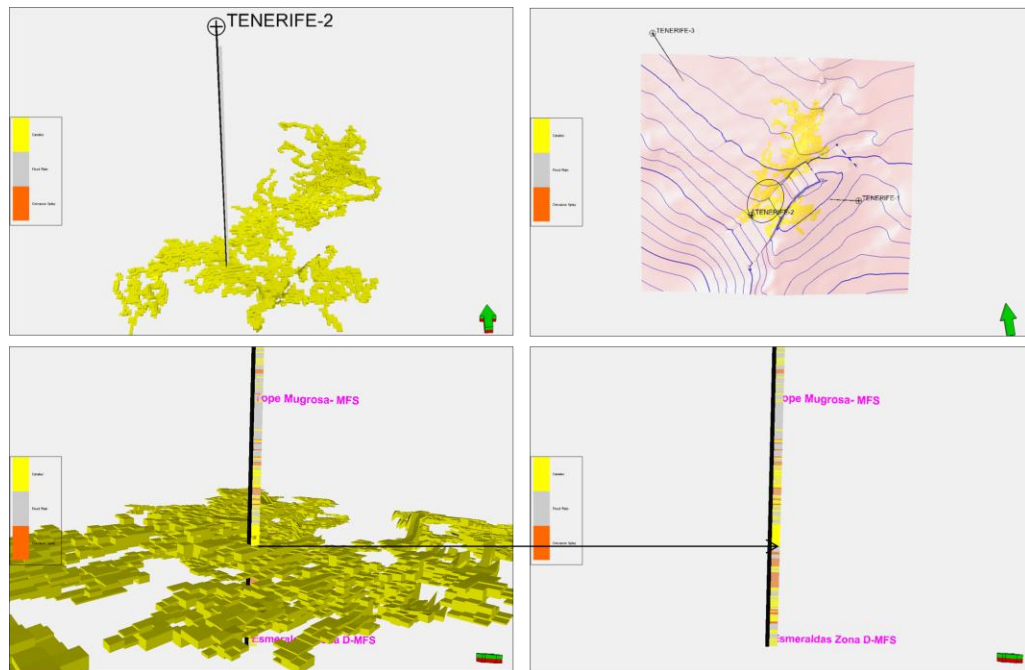


Figura 75. Distribución y conectividad de canales campo Tenerife.



9. CONCLUSIONES

Se identificaron tres subambientes en Campo Tenerife; llanura de inundación, depósitos de desborde y canal.

El amarre roca-registro, permitió diferenciar un aumento de porosidad - permeabilidad, asociado al incremento del tamaño de grano que indica buena calidad de reservorio para la Formación Mugrosa zona C y posibilitó mejorar la interpretación de los subambientes en este intervalo, ya que se contó con información del análisis sedimentológico de corazones.

Se definieron las superficies estratigráficas del campo Tenerife: (1) las subzonas de la Formación Mugrosa B1 y B3, con poca continuidad lateral y amalgamamiento de cuerpos de arenas, (2) Las subzonas de la Formación Mugrosa B2 y C con intervalos de mayor continuidad y amalgamamiento de cuerpos de arenas y (3) Las subzonas “finas” de la Formación Mugrosa B1, B2, B3 y C con intervalos continuos lodosos asociados a superficies de inundación.

Los mapas Isópacos generados a partir de la interpretación de horizontes, permitieron reconocer el sistema de fallas normales con rumbo NE – SW y el sistema de bloques monoclinales de bajo buzamiento que compartimentalizan el campo.

El conjunto de atributos sísmicos de varianza, buzamiento, mayor curvatura negativa, impedancia acústica relativa y energía aplicados a las superficies de interés permitieron facilitar la visualización de canales; estos atributos fueron validados mediante la interpretación de paleocorrientes, donde las direcciones

preferenciales de los canales correspondieron en sentido NE-SW para las formaciones Mugrosa B, Mugrosa C y Esmeraldas.

La ejecución de la red neuronal entrenada con atributos sísmicos y supervisados por las electrofacies permitió definir un modelo de facies para conocer la distribución espacial y conexión de los cuerpos de arena en la formación Mugrosa C y Esmeraldas con direcciones NE-SW y espesores de canales de 20-30 ft y de 20 ft respectivamente.

Se logro proponer una zona potencial en sentido NE-SW hacia el centro del área de estudio que cumple con las condiciones necesarias en cuanto a distribución y conectividad de cuerpos de arena para la Formación Mugrosa C.

10. RECOMENDACIONES

El amarre roca registro daría de una forma más precisa si se contara con una continuidad lateral de los núcleos ya que de esta manera se podría hacer un análisis facial del campo.

En los nuevos pozos a desarrollar en el campo, realizar registros de pozo como el core-gama que proporcionen información detallada del campo sobre litología, estructuras, granulometría, propiedades petrofísicas de las formaciones perforadas para tener un mayor conocimiento del campo.

Se recomienda la revisión de los parámetros de adquisición, para determinar la posibilidad del reprocesamiento del cubo de datos sísmicos 3D del área, puesto que el nivel de ruido dificulta tanto la interpretación de horizontes sísmicos como la interpretación estructural, restándole de esta forma confiabilidad a los productos que se generan a partir de la data sísmica. Posterior al reprocesamiento se sugiere el fortalecimiento de los mapas generados en este estudio y la posterior aplicación de Redes Neuronales para la predicción de permeabilidades para así completar el set de mapas de propiedades petrofísicas que permitan identificar con mayor precisión las zonas de interés comercial.

BIBLIOGRAFÍA

- ANSALL, Ecopetrol. Informe geológico de campo Colorado, diagnostico y estrategias de recobro campo Tenerife. Gerencia Magdalena Medio, El Centro. 2003.
- CAMACHO, Alonso. Reporte sísmica de pozo Tenerife 1., Reporte sísmica de pozo Tenerife 2 Schlumberger. 2010.
- CHOPRA, Satinder y MARFURT, Kurt. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. In: Geophysical Developments, N°11. 2007.
- CHOPRA, Satinder y MARFURT, Kurt. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. In: Geophysical Developments, N°11. 2010.
- COOPER, Mark. Basin development and tectonic history of the Llanos basin, eastern cordillera and Middle Magdalena valley, Colombia. In: The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1995. 79, 10, 1421-1443.
- BARRERO, Dario. Geology of the central wester cordillera, west of Buga and Roldanillo, Colombia. In: Pub. Geol. Sp Ingeominas. 1979. N°4, 1-75.
- DE LA CRUZ, E. Stratigraphy of the tertiary of the Middle Magdalena basin (Colombia), central and northern parts. Unpublished MA thesis. University of Texas Austin. 1988. 118.

- DENGÓ, Carlos y COVEY, Michael. Structure of the eastern cordillera of Colombia: implications for traps styles and regional tectonics. In: American Association of Petroleum Geologist Bulletin. N° 77, 1993. 1325-1337.
- ETAYO, Fernando. El sistema cretáceo en la región de Villa de Leyva y zonas próximas. In: Geología Colombiana. N° 5, 1968. 574.
- ETAYO, Fernando. Ammonitina speciation and eustasy. In: AAPG Bulletin. N°77(2), 1993. 317.
- ETAYO, Fernando. A modo de historia geológica del cretácico del valle Superior del Magdalena. In: Etayo, F (Editor), Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, N°20, 1994. 1–7.
- FOLK, Robert. Petrology of sedimentary rocks. Austin Texas, Hemphill Publications Co. 1974. 182.
- FREEMAN, James y SKAPURA, David. Redes neuronales algoritmos aplicaciones y técnica de programación. México, Addison Wesley. 1991.
- GUTIERREZ, Mario. Rock physics and 3-d seismic characterization of reservoir heterogeneities to improve recovery efficiency. Stanford, California. 2001.
- MIALL, Andrew. The Geology of the fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology. Berlin, Springer-Verlag. 1985.
- MIALL, Andrew. Recent development in the studie of Ffluvial facies models sedimentology. In: ETHRIDGE, F., FLORES, R. & HARVEY, M. (Editors).

Recent Development in Fluvial sedimentology. SEPM Special Publication. 1987.

- MIALL, Andrew. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology. Springer. 1996. 582.
- MOJICA, J y FRANCO, R. Estructura y evolución tectónica del Valle Medio y superior del Magdalena. Colombia. Geol. Col. 1990.
- MORALES, Luis. General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia, Colombia. In: Weeks L. G., Habitat of Oil, A.A.P.G., Tulsa, A. 1985.
- MEZA, Germán y CASADIEGO, Efraín. Continuidad lateral y vertical de las areniscas de la formación Mugrosa en el Campo Llanito. 2009.
- OLAYA, I. D y FAJARDO, A. A. Evaluación para la secuencia terciaria del Valle del Magdalena Medio. Ecopetrol, ICP.1999.
- PATIÑO, Wilson y VARGAS, Andrés. Definición de tendencias preferenciales de depositación de canales en ambientes fluviales en dos campos maduros de la cuenca del valle medio del magdalena. Ecopetrol s.a. 2010.
- POSAMENTIER, Henry y ALLEN, George. Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications. In: SEPM concepts in sedimentology and paleontology. N° 7, 1990. 210.
- QUILEN, Keyla. Integración de atributos sísmicos con datos petrofísicos para determinar zonas prospectivas, arena L2m, área de finca – Yopales. Anzoátegui. 2006.

- RAMON, J y CROSS, T. Characterization and prediction of reservoir architecture and petrophysical properties in fluvial channel sandstones, Middle Magdalena basin, Colombia. 1997. In: CT&F, Vol 1, N°3, 19-46.
- REGUEIRO, J. Sísmica para ingenieros y geólogos de yacimientos. Venezuela, CIED. 1997.
- REYES, J. y RUBIANO, José. Modelo estratigráfico y estructural del campo Tenerife. Valle Medio del Magdalena. 1996.
- RUBIANO, José. Modelo estratigráfico y estructural del campo Provincia, valle Medio del Magdalena, Santander, Colombia. In: Memorias VI Congreso Colombiano del Petróleo. Bogotá, Colombia. 1995. 235-242.
- RUBIANO, José. Interpretación geológica de los datos de dipmeter a partir de los registros de dipmeter, usando el programa SCAT. Ecopetrol-ICP, reporte Interno, 2000. 103.
- RUBIANO, José. Interpretación Geológica de los datos obtenidos a partir de los Registros de Dipmeter, usando el programa SCAT. Ecopetrol-ICP. 2009.
- SANDOVAL, José y SLATT, Roger. Metodología para el análisis estratigráfico de yacimientos en ambientes fluviales. Instituto Colombiano Del Petróleo (ICP). 2009.
- SANDOVAL, José y ESTÉVEZ Yudy. Informe Final Modelo Estructural y Atributos Sísmicos Campo Tenerife. 2010.
- SERRA, O. Análisis de Ambientes Sedimentarios Mediante Perfiles de Pozo. Schlumberger Technical Services. 1985.

- SLATT, Roger. Stratigraphic reservoir characterization for petroleum geologists, geophysicists, and engineer. In: Handbook of Petroleum Exploration and Production, Vol 6, Elsevier Science. 2006.
- SUAREZ, M. A. Facies analysis of the upper Eocene La Paz formation and regional evaluation of the post middle Eocene stratigraphy, northern Middle Magdalena valley, Colombia. University of Colorado, U. S. A., Boulder, 88. 1996.
- SCHALKOFF, Robert. Artificial neural networks. International Editions. McGraw-Hill. 1997.
- TARBUCK, Edward y LUTGENS, Frederick. Ciencias de la tierra una introducción a la geología física. Madrid, Pearson Education, 8ª edición. 2005
- VALENCIA, Leydy. Calibración de atributos sísmicos para la identificación litológica de carbonatos en el Caribe colombiano. Bucaramanga 2010, 123p. Tesis de pregrado: Universidad Industrial de Santander.
- VAN WAGONER Jhon y POSAMENTIER, Henry. An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C.G.St.C., Sea Level Changes—An Integrated Approach, Vol. 42. SEPM Special Publication, 1988. pp. 39–45.

ANEXO

Anexo 1. Columna estratigráfica tenerife-2

(Archivo Adjunto?)