

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA CON EL USO  
DE ATRIBUTOS SÍSMICOS, TRAMPA GF-205X.  
GUAFITA, ESTADO APURE.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por: el T.S.U Maita G. Adolfo J.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geofísico

**Caracas, 2010**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA CON  
EL USO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS, TRAMPA GF-205X.  
GUAFITA, ESTADO APURE.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Francisco Bolívar

TUTOR INDUSTRIAL: M.Sc. Franklyn Ángel

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por: el T.S.U Maita G. Adolfo J.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geofísico

**Caracas,2010**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Técnico Superior Universitario Maita G. Adolfo J.:

**“INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA CON EL USO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS TRAMPA GF-205X. GUAFITA, ESTADO APURE”**

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

---

Prof. Adriana González  
Jurado

---

Prof. Yaraixa Pèrez  
Jurado

---

Prof. Francisco Bolívar  
Tutor Académico

## *Dedicatoria*

*A Dios, con el permiso de Jesucristo y el poder del Espíritu, por darme la salud, la fuerza y llegar a este momento en que mis hijos más me necesitan.*

*A mi hermoso padre Félix de Jesús Maita, hombre de honor, trabajo y honradez, a mi hermosa madre Aida R. de Maita Guédez, mujer trabajadora, comprensiva, guía en mi vida, en los cuales Dios me permitió que naciera y me protegieron, condujeron y tuvieron la infinita paciencia para ver este momento en el cual sus esfuerzos fueron mayores que los míos para poder lograr esta meta.*

*A mi hermana Maryjanela del Carmen Maita, mi gran orgullo y ejemplo digno a seguir con su profesionalismo y esfuerzo en ser cada día mejor.*

*A Nuliva Montilla Bitriago, la que has estado en este momento a mi lado, por los consejos que me distes y el apoyo en el momento que más lo necesité, para irme por este camino,*

*A cada una de las innumerables personas que estuvieron atentos con el desarrollo y culminación de este trabajo dándome ánimos, apoyo y aliento.*

*A Danis Mendoza, un apoyo incondicional de nuestra querida Escuela de Geofísica.*

# Agradecimientos

A Dios, con el permiso de Jesucristo y el poder del Espíritu, por darme la inteligencia como herramienta fundamental para el desarrollo de esta tesis.

A mi tutor académico, profesor e Ingeniero geofísico Francisco Bolívar, que con gran conocimiento y responsabilidad, dirigió y revisó este trabajo, para alcanzar el éxito, supiste darme fuerzas y por eso mereces estar aquí.

A mi tutor Industrial M.Sc. En geofísica Franklin Ángel, fue digno trabajar contigo, el compartir los conocimientos y aprender de ti fue mi gran experiencia en la interpretación sísmica.

† Al Ingeniero geólogo Pedro Guzmán, “amigo” te acercaste un día valorando este trabajo y siempre creíste en mí, los éxitos que se han alcanzado es parte de la visión que tenías, hoy día estas con papá Dios y celebras este éxito, gracias Pedrito.

A la Ingeniera geóloga Karilis Castillo, de ti aprendí mucho, fuiste una gran guía y aunque formalmente no estás en el encabezamiento de este trabajo, te doy gran parte de lo más que te mereces.

Al Ingeniero geofísico Pedro Álvarez, tu experiencia fue vital en la realización de este trabajo y gran parte de lo que aprendí es fruto de ti.

Al Ingeniero geólogo Edgar Chacín, el cual con sus conocimientos de geología e información habitual de sus investigaciones forma parte ahora de este logro.

Al Ingeniero geofísico Carlos Brett, tu eres fruto de la escuela de la cual estoy saliendo y nuestras discusiones dieron fruto en este tema.

Al señor Hermes Godoy e ingeniero Edgar González que me brindaron la oportunidad y dieron su confianza para formar parte del gran equipo de Estudios Integrados Apure en PDVSA Centro Sur para la elaboración de este trabajo especial de grado.

Al profesor Antonio Ughi, quien en la enseñanza de geoestadística me impartiste las herramientas necesarias para la realización de este trabajo, siempre estuviste en los momentos que necesite que alguien me escuchara.

Al Profesor José Cavada mi amigo, tus respuestas puntuales dignas de escuchar sirvieron en cada momento que las necesité.

Al equipo de Estudios integrados Apure, donde cada uno de ellos apartó en un momento determinado un minuto de su tiempo para darme la información necesaria en el desarrollo de este trabajo.

A Denis Rondón, Desiré Hernández, Francis Márquez, los cuales forman parte del equipo de Gerencia del dato y tomaron parte importante en la realización de este estudio.

A la profesora Yaraixa Pérez por dar el paso inicial para poder inscribir este tema de tesis.

¡Estoy muy agradecido, están en este mundo porque son lo mejor de lo mejor, estarán por siempre en mis recuerdos porque en lo que me ayudaron dejó marca de conocimiento, solidaridad además de cualquier granito que conforma este Trabajo Especial de Grado que Dios me los bendiga!

**Maita G. Adolfo J.**

**INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRÁFICA CON EL USO  
DE ATRIBUTOS SÍSMICOS TRAMPA GF-205X, GUAFITA, ESTADO  
APURE**

**Tutor Académico: Prof. Francisco Bolívar. Tutor Industrial: Msc. Ángel Franklin. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2010. 225 pp.**

**Palabras claves:** Métodos sísmicos, interpretación sísmico estructural, porosidad y arcillas, fallas en échelon, sismoestratigrafía.

**Resumen:** La trampa GF-205X está localizada en el Campo Guafita al Sur-Oeste de la población de Guasualito en la Parroquia El Amparo del Estado Apure Suroeste de Venezuela. Esta trampa tiene gran complejidad estructural y estratigráfica, por lo cual PDVSA Centro-Sur a través del Departamento de Estudios Integrados Apure, solicitó la realización de la caracterización estructural y estratigráfica mediante el uso de atributos sísmicos de las arenas G7-2 inferior, G7<sup>3</sup>/<sub>4</sub>, G8, G9, G10, de la Formación Guafita, elaborar una interpretación estructural y estratigráfica en unidades de tiempo; crear mapas estructurales en profundidad; elaborar un modelo estructural 3D; elaborar e interpretar los cubos y mapas de atributos sísmicos; elaborar e interpretar cubos y mapas de pseudos propiedades; y correlacionar mapas de atributos sísmicos y de pseudos propiedades. Se recopilaron datos e información, se elaboró la calibración sísmica-pozo, se interpretaron mapas en tiempo para las arenas G7-2 inferior, G8, G9, G10 y fallas geológicas con su respectiva transformación en profundidad, siendo comprobadas con un cubo de “seguimiento de hormiga”, se interpretó la arena G7<sup>3</sup>/<sub>4</sub> en un cubo sísmico con unidades de profundidad. El modelo estructural 3D, incluyó la interpretación de los horizontes de la lutita de Guafita, lutita lignítica y Discordancia de Quevedo. Con los atributos sísmicos de mejor correlación con las propiedades petrofísicas y usando “kriging simple” se elaboraron los cubos de porosidad y arcillosidad. Se concluyó que las fallas en échelon y la estructura de la trampa GF-205X posiblemente se formó como consecuencia del efecto dúplex extensional producto del movimiento transcurrente de la falla Guafita Caño Limón, la sedimentación fue entre 10 y 25 grados Sureste, la zona más prospectiva cercana a la trampa es hacia el Oeste, próxima a la falla principal. Allí se determinaron las mejores propiedades estructurales y estratigráficas en los mapas estructurales y de pseudo propiedades.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
Resumen .....	vii
Índice de contenido.....	viii
Índice de figuras .....	xv
Índice de tablas .....	xxii
Introducción .....	1
CAPÍTULO I: CONTEXTO .....	3
1.1. Ubicación del área de estudio .....	4
1.2. Planteamiento del problema.....	6
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo general .....	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. Justificación .....	8
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO .....	9
2.1. Geología local de la Cuenca Barinas-Apure .....	9
2.1.1. Generalidades .....	9
2.1.2. Evolución de la Cuenca Barinas-Apure.....	14
2.1.2.1. Precámbrico .....	14
2.1.2.2. Paleozóico .....	15
2.1.2.3. Cretácico .....	15
2.1.2.4. Transición Cretácico-Terciario .....	16
2.1.2.5. Paleoceno .....	17

2.1.2.6. Eoceno .....	17
2.1.2.7. Oligoceno - Mioceno Inferior.....	18
2.1.2.8. Mioceno superior-Pleistoceno.....	18
2.2. Geología del Campo Guafita.....	20
2.2.1. Situación geológica.....	21
2.2.2. Geología estructural local .....	22
2.2.3. Interpretación sísmica.....	24
2.2.4. Sedimentología.....	25
2.2.5. Estratigrafía .....	26
2.2.6. Sedimentología y estratigrafía .....	34
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO .....	38
3.1. Método sísmico.....	38
3.1.1. Caracterización estratigráfica .....	39
3.1.2. Caracterización estructural .....	39
3.1.3. Sísmica de reflexión .....	40
3.1.4. Tipos de ondas sísmicas .....	40
3.1.5. Rayo.....	41
3.1.6. Ley de Snell.....	42
3.1.7. Tiros de verificación sísmica (registro <i>check shot</i> ).....	43
3.1.8. Registro sísmico .....	44
3.1.9. Velocidad promedio .....	44
3.1.10. Velocidad interválica .....	45
3.1.11. Ondícula .....	45
3.1.12. Tipos de ondícula .....	46
3.1.13. Coeficiente de reflexión .....	47
3.1.14. Densidad teórica.....	48
3.1.15. Convolución.....	49
3.1.16. Sismograma sintético .....	49
3.1.17. Calibración sísmica-pozo.....	50
3.1.18. Atributo sísmico .....	50

3.1.19. Atributos sísmicos usados en este trabajo .....	51
3.1.19.1. Buzamiento ( <i>Dip</i> ) .....	51
3.1.19.2. Seguimiento de hormiga ( <i>ant tracking</i> ) .....	51
3.1.19.3. Reflectividad de onda S .....	52
3.1.19.4. Frecuencia dominante .....	53
3.1.19.5. Amplitud sísmica .....	53
3.1.19.6. Mu rho .....	53
3.1.19.7. Gradiente .....	54
3.1.19.8. Planitud local ( <i>local flatness</i> ) .....	56
3.1.20. Resolución sísmica vertical .....	57
3.2. Geoestadística .....	58
3.2.1. Población .....	58
3.2.2. Muestra .....	58
3.2.3. Estadística inferencial .....	58
3.2.4. Datos cuantitativos .....	59
3.2.5. Datos cualitativos .....	59
3.2.6. Valores atípicos .....	59
3.2.7. Histograma de frecuencia .....	59
3.2.8. Variograma .....	60
3.2.9. Variograma direccional .....	61
3.2.10. Variograma experimental .....	61
3.2.11. Parámetros para construir un variograma .....	62
3.2.11.1. Azimut .....	62
3.2.11.2. Paso ( <i>lag</i> ) .....	62
3.2.11.3. Tolerancia .....	62
3.2.11.4. Ancho de banda .....	62
3.2.12. Elaboración de un variograma en tres dimensiones .....	62
3.2.12.1. El valor idóneo del paso ( <i>h</i> ) .....	63
3.2.12.2. Distribuciones con valores extremos .....	63
3.2.12.3. La existencia de poblaciones mixtas .....	63

3.2.13. Elementos de un variograma.....	64
3.2.13.1. Meseta ( <i>sill</i> ) .....	64
3.2.13.2. Alcance o rango.....	64
3.2.13.3. Efecto pepita ( <i>Nugget efect</i> ).....	65
3.2.14. Modelos matemáticos que se usan en la elaboración de variogramas .....	65
3.2.14.1. Modelo esférico .....	65
3.2.14.2. Modelo exponencial .....	67
3.2.14.3. Modelo Gaussiano .....	68
3.2.15. Problemas en el modelaje de variogramas .....	69
3.2.16. Coeficiente de correlación de Pearson .....	71
3.2.17. Covarianza .....	72
3.2.18. Desviación típica o estándar .....	73
3.2.19. Regresión lineal.....	73
3.3. Análisis multivariado .....	74
3.3.1. Cokriging simple .....	74
3.4. Conceptos de geología.....	76
3.4.1. Ambientes sedimentarios .....	76
3.4.2. Modelo de sedimentación de ambiente deltaico .....	76
3.4.2.1. Deltas dominados fluvialmente .....	77
3.4.2.2. Deltas dominados por oleaje .....	77
3.4.2.3. Deltas dominados por mareas .....	78
3.4.2.4. Facies y ambientes depositacionales de un Ambiente Deltaico...78	
3.4.2.5. Llanura deltaica alta .....	79
3.4.2.5.1. Depósitos de canales meandriformes y distributarios .....	79
3.4.2.5.2. Llanuras de inundación .....	80
3.4.2.5.3. Depósitos de canal.....	80
3.4.2.5.4. Depósitos de diques .....	80
3.4.2.5.5. Canales abandonados.....	81
3.4.2.6. Llanura deltaica baja.....	81

3.4.2.6.1. Depósitos de relleno de bahías.....	82
3.4.2.6.2. Canales distributarios .....	82
3.4.2.6.3. Barras de desembocadura.....	82
3.4.2.6.4. Playas y frente deltaico .....	83
3.5. Ambientes fluviales .....	84
3.5.1. Canales rectilíneos.....	85
3.5.2. Canales entrelazados .....	85
3.5.3. Canales anastomosados.....	86
3.6. Aspectos estructurales .....	86
3.6.1. Fallas .....	86
3.6.2. Partes de una falla.....	87
3.6.3. Fallas fundamentales.....	87
3.6.3.1. Falla normal.....	87
3.6.3.2. Falla inversa .....	87
3.6.3.3. Falla transcurrente .....	87
3.6.4. Arreglo geométrico de fallas .....	88
3.6.5 Duplexes y estructuras en flor.....	89
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA .....	92
4.1. Recopilación de Información .....	93
4.1.1. Objetivos de la adquisición .....	94
4.1.2. Datos del proyecto.....	95
4.2. Carga y Validación de Datos .....	96
4.2.1. Validación del cubo sísmico en tiempo.....	97
4.2.2. Pozos y registros .....	98
4.3. Calibración Sísmica Pozo .....	99
4.3.1. Amarre sísmica-pozo.....	102
4.4. Interpretación de horizontes en tiempo.....	106
4.5. Interpretación de Fallas en Unidades de Tiempo.....	108
4.5.1. Interpretación de la falla Guafita Caño Limón.....	108
4.5.2. Interpretación de fallas secundarias.....	111

4.6. Vista en Tres Dimensiones de los Horizontes Interpretados en Tiempo .....	114
4.7. Aplicación de Atributo de Buzamiento ( <i>Dip</i> ).....	114
4.8. Delimitación de los Polígonos de Falla .....	115
4.9. Transformación de Mapas de Horizontes en Unidades de Tiempo a Unidades de Profundidad.....	116
4.10. Metodología Usada en la Plataforma de PETREL.....	120
4.10.1. Aplicación del algoritmo de “ <i>Ant Tracking</i> ” para la verificación de fallas .....	121
4.10.2. Interpretación de horizontes en el cubo de profundidad.....	126
4.10.3. Elaboración del modelo estructural 3D .....	128
4.10.3.1. Modelado de fallas .....	128
4.10.3.2. Mallado de pilares .....	128
4.10.3.3. Realización de horizontes.....	129
4.10.3.4. Realización de zonas o definición de capas .....	129
4.11. Mapas estructurales en unidades de profundidad .....	130
4.12. Generación de cubos y mapas de atributos sísmicos .....	131
4.13. Generación de mapas y cubos de Pseudopropiedades .....	133
4.13.1. Escalamiento de registros.....	133
4.13.2. Elaboración de mapas de variogramas .....	134
4.13.3. Independencia lineal entre atributos sísmicos.....	134
4.13.4. Correlación de atributos sísmicos y registros petrofísicos .....	135
4.13.5. Elaboración de variogramas direccionales .....	136
4.13.6. Simulación de propiedades petrofísicas.....	138
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	141
5.1. Mapas Estratigráficos y Estructurales en Unidades de Tiempo .....	141
5.1.1. Mapa en unidades de tiempo de la arena G7-2 Inferior.....	142
5.1.2. Mapa en unidades de tiempo de la arena G8.....	144
5.1.3. Mapa en unidades de tiempo de la arena G9.....	146
5.1.4. Mapa en unidades de tiempo de la arena G10 .....	148

5.2. Mapas Estructurales en Unidades de Profundidad.....	150
5.2.1. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G7-2 Inferior .....	151
5.2.2. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G7 <sup>3/4</sup> .....	152
5.2.3. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G8 .....	153
5.2.4. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G9 .....	154
5.2.5. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G10 .....	155
5.3. Modelo Estructural 3D de la Trampa GF-205X .....	156
5.4. Cubos de Atributos Sísmicos y Cubos de pseudo propiedades .....	159
5.4.1. Mapa de atributo sísmico Gradiente, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G7-2 Inferior .....	165
5.4.2. Mapa de atributo sísmico planitud local, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G7 <sup>3/4</sup> .....	167
5.4.3. Mapa de atributo sísmico frecuencia dominante y mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G8 .....	170
5.4.4. Mapa de atributo sísmico amplitud, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G9 .....	172
5.4.5. Mapa de atributo sísmico $\mu$ rho, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G10 .....	175
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	179
6.1. Conclusiones .....	179
6.2. Recomendaciones .....	181
Referencias .....	183
Anexos .....	193

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo estructural sobre el tope del yacimiento G7-2 Inferior muestra la zona de la Trampa GF-205X .....	5
Figura 1.2. Mapa modelo del Campo Guafita Muestra en rojo la zona de la trampa GF-205X.....	5
Figura 1.3. Mapa de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela, donde se muestra la ubicación del Estado Apure .....	6
Figura 2.1. Columna estratigráfica del lado Surandino de la Cuenca Barinas-Apure.....	12
Figura 2.2 Columna estratigráfica de la parte Norte de la cuenca Barinas-Apure.....	13
Figura 2.3. Sección NO-SE de la Cuenca de Barinas-Apure.. ..	14
Figura 2.4. Ubicación geográfica del Campo Guafita.. ..	21
Figura 2.5. Mapa Estructural del Campo Guafita Sur, a nivel del Yacimiento G7-2 Inferior.. ..	22
Figura 2.6. Modelo estructural del Campo Guafita.....	23
Figura 2.7. Estructura en flor de los planos de falla en el Campo Guafita.. ..	24
Figura 2.8. Interpretación Sísmica del Campo Guafita.. ..	25
Figura 2.9. Ambientes de depositación por unidad cronológica.....	32
Figura 2.10. Registro tipo de rayos gamma, de inducción y resistividad tomados en el pozo GF-205X.. ..	33
Figura 2.11. Registro de Rayos gamma del pozo GF-1X.....	34
Figura 2.12. Sistemas transgresivos y evolución tectónica del campo Guafita.....	37
Figura 3.1. Conversión de rayo incidente (P) según la ley de Snell.. ..	43
Figura 3.2. Diferencia de la posición adoptada por la ondícula fase mínima y fase cero respecto a un mismo coeficiente de reflexión.. ..	46
Figura 3.3. Ondículas según el ángulo de fase.....	47
Figura 3.4. Tipos de ondícula fase cero.. ..	47

Figura 3.5. Tendencia de fondo y anomalía AVO.....	55
Figura 3.6. Modelo de un Histograma de frecuencia..	60
Figura 3.7 Modelo de variograma.....	61
Figura 3.8. Variograma efectuado bajo el modelo matemático esférico.....	67
Figura 3.9. Variograma efectuado bajo el modelo matemático exponencial.....	68
Figura 3.10. Variograma efectuado bajo el modelo matemático Gaussiano.....	70
Figura3.11. Ambiente de sedimentación deltaico.....	84
Figura 3.12. Tipos de ríos.....	85
Figura 3.13. Diversos arreglos de fallas.....	89
Figura 3.14. Inflexiones, saltos, abanicos imbricados y duplexes en sistemas transcurrentes.....	91
Figura 3.15. Estructuras en flor negativa y (B) estructuras en flor positiva.....	91
Figura 4.1. Cubo sísmico en tiempo GUAF TIME00G_3D.....	97
Figura 4.2. Mapa base del campo Guafita donde se muestra la zona de estudio.....	98
Figura 4.3. Muestra la amplitud versus la frecuencia de la línea sísmica a lo largo del pozo GF-209.....	101
Figura 4.4. Ecuación de Rayleigh.....	101
Figura 4.5. Sismograma sintético del pozo GF-209.....	102
Figura 4.6. Correlación de Sección sísmica con el sismograma sintético y registro de rayos Gamma en el pozo GF-209.....	104
Figura 4.7. Correlación de Sección sísmica en trazas con el sismograma sintético y registro de rayos Gamma en el pozo GF-209.....	105
Figura 4.8. Crossline 338 muestra los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9, G10.....	106
Figura 4.9. Mapas en tiempo de los topes de las arenas G7-2 Inferior, G8, G9 y G10 en tiempo.....	107
Figura 4.10. Vista en planta de la falla Guafita-Caño Limón.....	109

Figura 4.11. Pilar de la Falla Guafita Caño Limón (GF_CL_08) en el “Crossline” 390..	109
Figura 4.12. Modelo de estructura tipo “Flor Negativa” que se observan a lo largo de la Falla Guafita Caño Limón..	110
Figura 4.13. Conjunto de fallas y horizontes interpretados en el crossline 338..	112
Figura 4.14. Sección sísmica Inline 151, cercano a la trayectoria del pozo GF-205X..	113
Figura 4.15. Mapas de horizontes interpretados en tiempo correspondientes a las arenas G7-2 Inferior, G8, G9 y G10..	113
Figura 4.16. Vista lateral y diagonal efectuada en “Voxelgeo” donde muestra que los horizontes interpretados no se cruzan..	114
Figura 4.17. Mapas de cada horizonte con aplicación del atributo de buzamiento (DIP) muestra de la presencia de fallas geológicas y la cuña estructural de la trampa GF-205X..	115
Figura 4.18. Superficie del horizonte G8, con muestra de contactos de falla..	116
Figura 4.19. Sección 340 del modelo 3D de velocidades, en dirección del buzamiento, por donde pasa el pozo GF-205X..	118
Figura 4.20. Mapas en unidades de velocidad para los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10..	119
Figura 4.21. Mapas en unidades de profundidad para los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10 interpretado en el módulo de Charismas Interpretation de Geoframe..	120
Figura 4.22. Correlación de la falla Guafita Caño Limón y fallas secundarias en échelon en diferentes vistas sobre el cubo de Ant Tracking..	122
Figura 4.23 Red estereográfica correspondiente al intervalo del cubo de <i>ant tracking</i> del volumen estudiado..	123
Figura 4.24 Parámetros de la Red estereográfica correspondiente al intervalo del cubo de <i>ant tracking</i> del volumen estudiado	

.....	124
Figura 4.25. Forma de despliegue de horizontes con el uso de la función Seeded 3D Autotracking..	127
Figura 4.26. Tope de la arena G7 <sub>3/4</sub> correlacionada con la sísmica en profundidad..	127
Figura 4.27. Tope de la Discordancia de Quevedo correlacionada con la sísmica en profundidad..	128
Figura 4.28. Modelo estructural 3D de la trampa GF-205X..	130
Figura 4.29. Mapa estructural del tope de la arena G7-2 Inferior..	131
Figura 4.30. Cubo con la aplicación del atributo sísmico mu rho ( $\mu\rho$ )..	132
Figura 4.31. Mapa de atributo mhu rho ( $\mu\rho$ ) sobre la el tope del yacimiento G10.....	133
Figura 4.32. Mapa de variograma de la arena G7-2 Inferior.....	134
Figura 4.33 Diagrama cruzado entre atributo mu rho ( $\mu\rho$ o MR) y planitud local (Local flatness).....	135
Figura 4.34. Correlación efectuada entre el atributo sísmico gradiente, la porosidad efectiva y en el eje Z fracción de arcilla.....	136
Figura 4.35. Histograma de frecuencia de los datos de arcillosidad para la arena G7-2 Inferior..	137
Figura 4.36. Variograma en la dirección mayor para la arena G8 con la propiedad petrofísica de arcillosidad..	138
Figura 4.37. Cubo de porosidad efectiva donde está ubicada la trampa GF-205X.....	139
Figura 4.38. Cubo de arcillosidad donde está ubicada la trampa GF-205X....	139
Figura 4.39. Mapa de porosidad efectiva de la arena G8..	140
Figura 5.1. Mapa en unidades de tiempo de la arena G7-2 Inferior, muestra la Cuña estructural de la trampa GF-205X.....	143
Figura 5.2. Mapa en unidades de tiempo de la arena G7-2 Inferior con los contactos de fallas interpretados.....	144

Figura 5.3. Mapa en unidades de tiempo de la arena G8, donde se evidencia presencia de los altos estructurales.....	145
Figura 5.4. Mapa en unidades de tiempo de la arena G8 con los contactos de fallas.. .....	146
Figura 5.5. Mapa en unidades de tiempo de la arena G9, con los altos estructurales observados.....	147
Figura 5.6. Mapa en unidades de tiempo de la arena G9 con los contactos de fallas.. .....	148
Figura 5.7. Mapa en unidades de tiempo de la arena G10, con los altos estructurales observados.....	149
Figura 5.8. Mapa en unidades de tiempo de la arena G10 con los contactos de fallas.. .....	150
Figura 5.9. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G7-2 Inferior.....	152
Figura 5.10. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G73/4.....	153
Figura 5.11. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G8.....	154
Figura 5.12. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G9.....	155
Figura 5.13. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G10.....	156
Figura 5.14. Modelo Estructural 3D de la Trampa GF-205X.. .....	157
Figura 5.15. Sección 3D del tope de la arena G7-2 Inferior con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.. .....	157
Figura 5.16. Sección 3D del tope de la arena G73/4 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.....	158
Figura 5.17. Sección 3D del tope de la arena G8 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.....	158

Figura 5.18. Sección 3D del tope de la arena G9 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.....	158
Figura 5.19. Sección 3D del tope de la arena G10 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.....	159
Figura 5.20 Cubos de atributos sísmicos de mejor correlación con propiedades petrofísicas.....	160
Figura 5.21. Cubo de porosidad.....	162
Figura 5.22. Cubo de arcillosidad.....	163
Figura 5.23. Variograma de la arena G10 mostrando la presencia de 2 poblaciones distintas, arenas limpias y arenas arcillosas.....	163
Figura 5.24 Diagrama cruzado en entre los cubos de pseudo propiedades...	164
Figura 5.25. Secuencia estratigráfica del cubo de porosidad desde el tope de la arena G7-2Inferior hasta el tope de la Discordancia de Quevedo.....	164
Figura 5.26. Mapa de atributo sísmico gradiente en el tope de la arena G7-2 Inferior.....	166
Figura 5.27. Mapa de porosidad del tope de la arena G7-2 Inferior.....	166
Figura 5.28. Mapa de arcillosidad del tope de la arena G7-2 Inferior.....	167
Figura 5.29. Mapa de atributo sísmico planitud local en el tope de la Arena G7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> .....	168
Figura 5.30. Mapa de porosidad del tope de la Arena G7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> .....	169
Figura 5.31. Mapa de arcillosidad del tope de la arena G7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> .....	169
Figura 5.32. Mapa de atributo sísmico frecuencia dominante en el tope de la arena G8.....	171
Figura 5.33. Mapa de porosidad del tope de la Arena G8.....	171
Figura 5.34. Mapa de arcillosidad del tope de la arena G8.....	172
Figura 5.35. Mapa de atributo sísmico amplitud en el tope de la Arena G9..	173
Figura 5.36. Mapa de porosidad del tope de la Arena G9.....	174
Figura 5.37. Mapa de arcillosidad del tope de la arena G9.....	174
Figura 5.38. Mapa de atributo sísmico mu rho en el tope de la Arena G10...	176

Figura 5.39. Mapa de porosidad del tope de la Arena G10.. .....	177
Figura 5.40. Mapa de arcillosidad del tope de la arena G10.. .....	177
Figura 5.41. Gráfico cruzado de porosidad versus atributo $\mu$ rho y en el eje Z contenido de arcilla.. .....	178

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 cuadro evolutivo del proceso estratigráfico y sedimentológico de la Cuenca Barinas-Apure..	20
Tabla 4.1. Datos del proceso de adquisición sísmica del Proyecto..	95
Tabla 4.2. Inventario de registros de pozo..	99
Tabla 4.3. Velocidades interválicas y frecuencia dominante obtenidas en la calibración sísmica pozo y el espectro de frecuencia de la ondícula..	101
Tabla 4.4. Resolución sísmica vertical calculada en los pozos de mejor correlación sísmica..	102
Tabla 4.5. Expresiones sísmicas obtenidas a partir del amarre sísmica pozo..	105
Tabla 4.6 Estadística de la Red estereográfica correspondiente al intervalo del cubo de <i>ant tracking</i> del volumen estudiado..	125
Tabla 4.7 Cubos de atributos encontrados en el inventario y efectuados por la empresa GXT durante la inversión sísmica ..	132
Tabla 5.1. Correlación de Atributos Sísmicos y Petrofísicos..	160
Tabla 5.2. Dirección de sedimentación de las arenas estudiadas..	161
Tabla 5.3. Espesores promedios de las arena que son parte de la Formación Guafita..	162

## INTRODUCCIÓN

A medida que pasa el tiempo avanza el agotamiento de los yacimientos de hidrocarburo, esto debido a los muchos años de extracción. Es más difícil conseguir nuevas trampas de petróleo que tengan un alto potencial de producción. La complejidad estructural y estratigráfica en los cuerpos geológicos es mayor en la medida de que estos hayan sido sometidos a diversos procesos de sedimentación y esfuerzos tectónicos, este tipo de eventos afectaron a la trampa GF-205X la cual está ubicada en el campo Guafita Estado Apure y es la base del presente estudio.

Este trabajo consistió en la interpretación estructural y estratigráfica de la trampa GF-205X con el uso de atributos sísmicos, en un área de 9 km<sup>2</sup>. Los objetivos fueron efectuar la interpretación estructural y estratigráfica en tiempo, realizar e interpretar los mapas estructurales en profundidad, elaborar un modelo estructural 3D de la trampa GF-205X, elaborar e interpretar los cubos y mapas de atributos sísmicos, hacer e interpretar los cubos y mapas de pseudos propiedades, correlacionar los mapas de atributos sísmicos y de pseudos propiedades.

Las metodología que se uso tuvo sus bases en el método de interpretación sísmica, comenzando por la búsqueda de información, realización de un inventario de registros de pozos con su respectiva carga y validación, se efectuó la calibración sísmica-pozo, además de la interpretación de horizontes y fallas en tiempo hasta la transformación de estos en profundidad, la verificación de las fallas se hizo con un recurso de la plataforma PETREL como lo fue el uso del atributo de seguimiento de hormiga "*ant tracking*", se elaboró un modelo estructural 3D, al cual se le aplicó atributos sísmicos de volumen. Con el uso de técnicas de geoestadística como, por ejemplo, la correlación lineal entre atributos

sísmicos y propiedades petrofísicas, además de la realización de variogramas direccionales; se elaboraron los cubos de pseudo propiedades usando el método de kriging simple.

## **CAPÍTULO I**

### **CONTEXTO**

Las metodologías de trabajo aplicadas a la resolución de problemas presentados en diversas áreas de las geociencias, específicamente en Geofísica, traen consigo nuevas visiones para cumplir los objetivos que logren dar con la solución a interrogantes que pueden ir, desde lo común hasta lo complejo.

Dichas metodologías pueden variar según los objetivos que se planteen y la zona de estudio, es por esto que no todos los estudios geocientíficos se pueden tomar bajo una misma visión.

En la extracción de hidrocarburos se invierten grandes sumas de dinero, hasta finalmente llegar a la anhelada producción de derivados, por lo cual, en lo que corresponde a la parte de exploración y producción, el equipo multidisciplinario que lleva a cabo la elaboración de propuestas para realizar la prognosis de los pozos debe tener bien en claro que no se deben tomar decisiones a la ligera.

Con una buena interpretación sísmica como parte fundamental, hoy día en la explotación de hidrocarburos, aplicando herramientas de última tecnología y teniendo un criterio claro de lo que se está haciendo se puede llegar a un modelo geológico que permita sacar el mejor provecho a los yacimientos con

una mínima incertidumbre, lo que se puede traducir como el mayor porcentaje de aciertos en la obtención del hidrocarburo.

En presencia de estructuras y estratigrafía geológica compleja se debe realizar un delineado muy detallado de los horizontes a interpretar y en ocasiones, aunque esto no sea parte del objetivo de estudio, incluir otros horizontes que den fondo a las estructuras objetivos. Además, aplicando a la interpretación atributos que permitan destacar propiedades geológicas representadas en, mapas o cubos y obtener mayor precisión en la delineación de los yacimientos.

En este capítulo se muestran donde y que lineamientos se plantearon en este estudio, dando así un orden desde el principio de la investigación.

### **1.1 Ubicación del área de estudio.**

La zona de estudio es un área de 9 km<sup>2</sup> alrededor del pozo exploratorio GF-205X (Figura 1.1), al Sureste del Campo Guafita (Figura 1.2), el cual está localizado a 43 kilómetros al Sur-Oeste de la población de Guasdualito, en la Parroquia El Amparo del Municipio José Antonio Páez, del Estado Apure, en el Suroeste de Venezuela. Según Coordenadas Geográficas se ubica entre las longitudes 70°58'12" y 71°05'41" Oeste y en latitud entre 06°58'51" y 07°04'15" Norte (Figura 1.3).

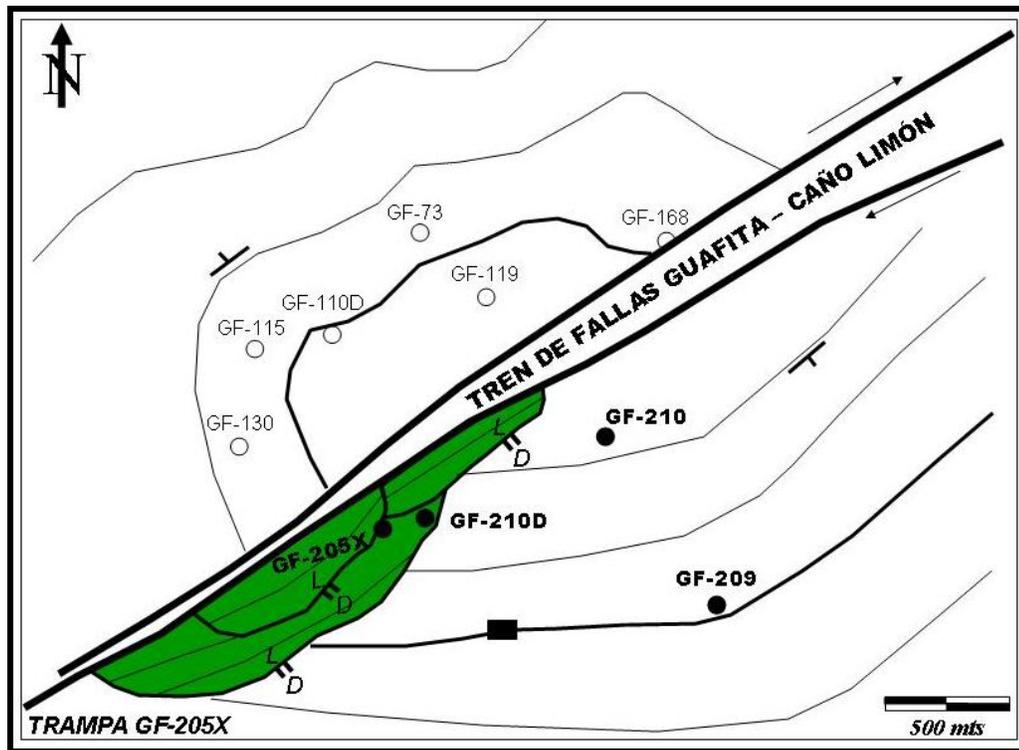


Figura 1.1. Modelo estructural sobre el tope del yacimiento G7-2 Inferior, muestra la zona de la Trampa GF-205X. Tomado del Intranet de PDVSA.



Figura 1.2. Mapa modelo del Campo Guafita muestra en rojo la zona de la Trampa GF-205X. Tomado del Intranet de PDVSA.



**Figura 1.3.** Mapa de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela, donde se muestra la ubicación del Estado Apure. Tomado de <http://www.a-venezuela.com/mapas>.

## 1.2. Planteamiento del problema.

La empresa PDVSA Centro-Sur y específicamente el Departamento de Yacimientos Apure, proponen en el año 2005 la ejecución del proyecto del pozo exploratorio GF-205X cuya localización CA-58 se ubicaría al Sur-Este del Campo Guafita, específicamente 3.5 Km al Noreste del pozo GF-180. El objetivo geológico primario lo constituyeron las arenas G7-2 inferior del Miembro Guardulio de la Formación Guafita y cuya profundidad se estimó en aproximadamente a 7380 pies (TVD), con un potencial de 400 barriles neto por día (BNPD). Las operaciones de perforación se iniciaron el 26 de Diciembre del 2005, finalizando el día 31 de Enero del 2006 a la profundidad de 9286 pies.

Para el año 2008 ya el yacimiento había sido perforado por 5 nuevos pozos el GF-209, GF-210, GF210D, GF213 y GF213D, cuyos éxitos garantizan en forma directa la prospectividad de la trampa en las arenas G7-2 inferior, G7 <sup>3</sup>/<sub>4</sub>, del Miembro Guardulio y G8, G9 y G10 del Miembro Arauca perteneciendo todas estas a la Formación Guafita.

La Formación Guafita en sus Miembros Guardulio y Arauca, contiene yacimientos terciarios que se caracterizan por su complejidad estratigráfica y estructural. En dichos miembros existen indicios de posibles canales y fallas que permitieron la migración y entrapamiento de hidrocarburos hacia zonas específicas cuyas direcciones de cuerpos arenosos se requiere conocer debido a que las mismas, aparentemente, presentan variación en la dirección en que ocurrió el proceso de sedimentación, razón por la cual surge la necesidad de estudiar a detalle las características estructurales y estratigráficas de esta área.

### **1.3. Objetivos.**

#### **1.3.1. Objetivo General.**

Caracterizar estructural y estratigráficamente mediante el uso de atributos sísmicos la trampa GF 205X, las arenas G7-2 inferior, G7<sup>3</sup>/<sub>4</sub>, G8, G9, G10 de los Miembro Guardulio y Arauca en el Campo Guafita, de la Cuenca Barinas-Apure, del Estado Apure, en Venezuela.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

- Efectuar la interpretación estructural y estratigráfica en tiempo
- Realizar mapas estructurales en profundidad
- Elaborar un modelo estructural 3D de la trampa GF-205X.

- Elaborar e interpretar los cubos y mapas de atributos sísmicos.
- Elaborar e interpretar los cubos y mapas de pseudos propiedades.
- Correlacionar los mapas de atributos sísmicos y los de pseudos propiedades.

#### **1.4. Justificación.**

Este trabajo se basa en la necesidad que posee actualmente el Distrito Apure de generar un estudio integrado que defina la zona de la trampa GF-205X para poder hacer una prognosis en ésta área acorde con la complejidad estructural y estratigráfica y así proponer nuevas localizaciones. Académicamente, la metodología aplicada en este trabajo sirve para ampliar los conocimientos del uso de los atributos sísmicos en la caracterización estratigráfica, específicamente en la definición de canales y facies sedimentarias.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO GEOLÓGICO**

#### **2.1. Geología local de la Cuenca Barinas-Apure.**

##### **2.1.1. Generalidades.**

La Cuenca Barinas-Apure está ubicada en la parte Sur-Occidental del país, específicamente Sur-Sureste del Sistema Montañoso de Los Andes, al Norte de la frontera con Colombia y pertenece al sistema de cuencas surandinas, las cuales constituyen un área de sedimentación pericratónica que quedó estructuralmente aislada entre el Escudo Suramericano y la Cordillera de los Andes, a raíz del levantamiento de esta última en el Plio-Pleistoceno.

La roca madre por excelencia es la Formación Navay , de edad Cretácico Tardío, cuyas facies son equivalentes laterales a las de la Formación La Luna. El Grupo Orocue (Formación los Cuervos) conforma rocas madres de importancia secundaria, pero ésta sólo se habría generado en los depocentros más profundos, asociados con la acumulación de grandes espesores de molasa por el levantamiento andino.

Las principales rocas yacimientos clásticas son las formaciones Escandalosa, Burguito (Cretácico), (Grupo) Orocue (Paleoceno), Mirador-Guafita (Miembro Arauca) (Eoceno-Oligoceno) (Figuras 2.1 y 2.2).

El yacimiento carbonático más relevante lo constituyen las calizas con porosidad secundaria del Miembro Guayacán (Caliza "O") de la Formación Escandalosa. Los sellos regionales más importantes son los intervalos lutíticos de las Formaciones Burguita (Cretácico Tardío), Pagüey (Eoceno) y Guafita (Miembro Guardulio), (Figura 2.3).

La mayoría de los campos petroleros se encuentra al sur de la ciudad de Barinas, como San Silvestre y Sinco. La Victoria y Guafita están ubicados cerca de la frontera con Colombia.

La cuenca según su volumen de recursos petrolíferos constituye la tercera de Venezuela, tiene una superficie aproximada de 100.000 Km<sup>2</sup>. Esta limitada al Noreste por el Arco de El Baúl, al Sureste y Este por el Escudo de Guayana, al Oeste y Noroeste por los Andes merideños, y al Sur está separada de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia por el Arco de Arauca, entre los ríos Apure y Arauca (González de Juana, et al, 1980).

El Arco de El Baúl separa la Cuenca Barinas-Apure de la cuenca Oriental de Venezuela, y la Cordillera Andina la separa de la Cuenca de Maracaibo, aunque ésta separación es solo un límite fisiográfico actual, ya que ambas formaban una unidad de sedimentación durante el Cretácico–Eoceno (Bravo Conde, et al, 1966 en González de Juana et al, 1980). La cuenca en su estado actual es pronunciadamente asimétrica con un flanco meridional suavemente inclinado hacia el noroeste y un flanco septentrional marcado por afloramientos de rocas pre-cretácicas y cretácicas muy deformadas (González de Juana, et al, 1980).

Desde el punto de vista de generación y migración de hidrocarburos, se propone dividir la Cuenca Barinas-Apure en dos subcuencas independientes: Subcuenca de Barinas y Subcuenca de Apure, esta última representa prácticamente la extensión septentrional de la Cuenca de los Llanos de Colombia.

Dentro del esquema sedimentario, la región de Barinas y Apure se comportó como una única cuenca durante el Cretácico mientras que, durante el Paleógeno, se separa en dos. Estas subcuencas pueden ser clasificadas durante su evolución como cuencas con diferentes historias tectono-sedimentarias. La depositación del Cretácico y del Paleoceno-Eoceno se desarrolló en la parte interna del margen pasivo del proto-continente suramericano, mientras que la sedimentación del Neógeno se relaciona con un ambiente tectónico tipo “*Foredeep*” como consecuencia del levantamiento de la Cordillera Andina. El Arco de Arauca conforma el límite entre las dos subcuencas y define aproximadamente un cambio de ambiente sedimentario Oligo-Mioceno desde más marino en la subcuenca de Apure a más continental en la subcuenca de Barinas.



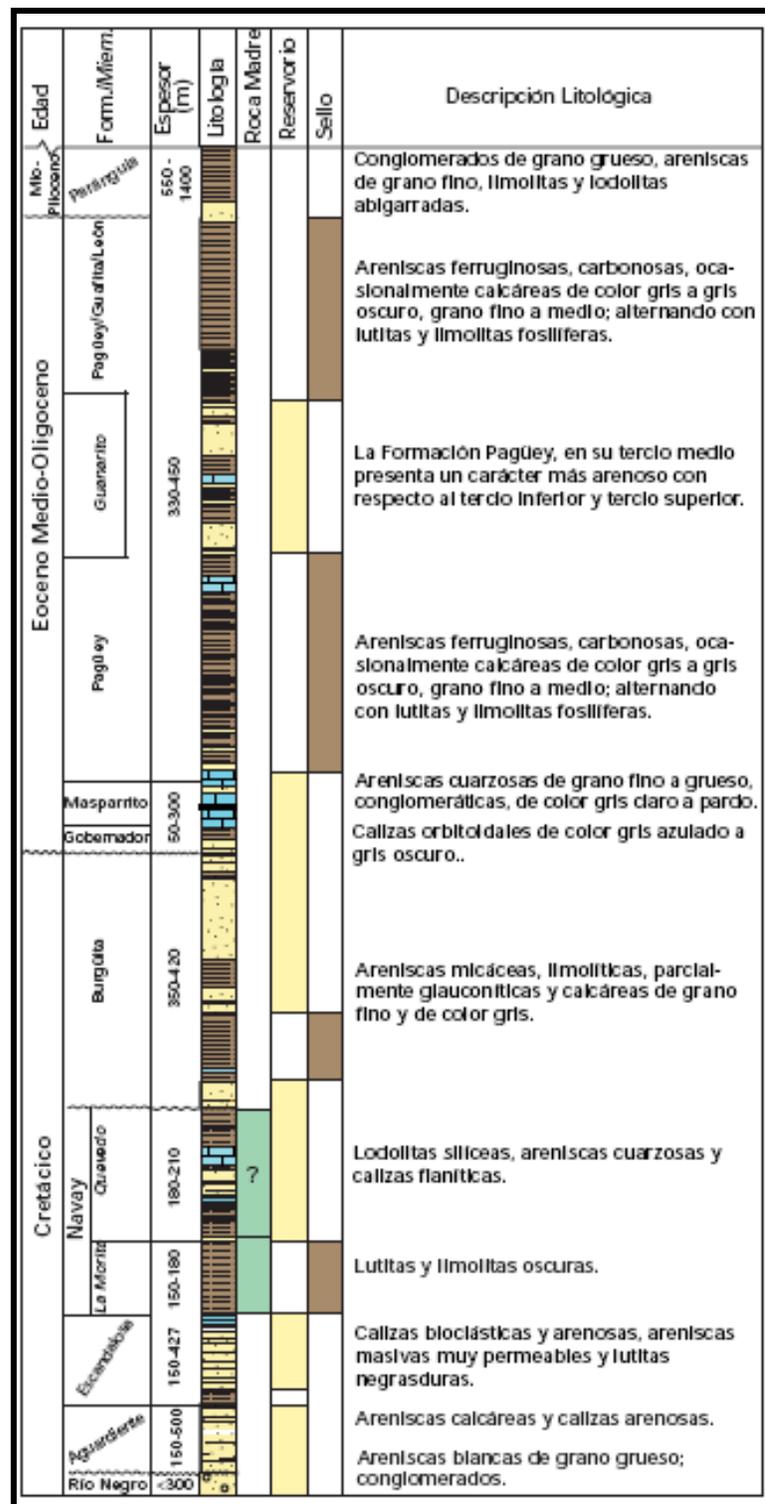
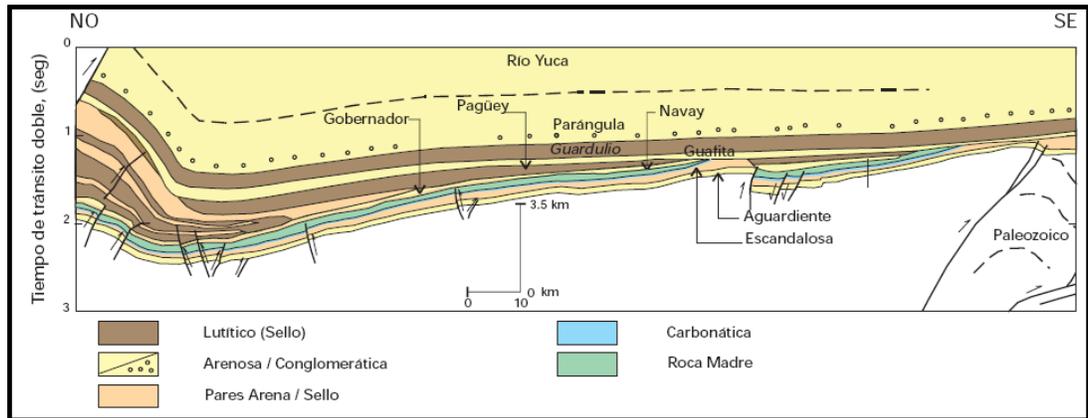


Figura 2.2. Columna estratigráfica de la parte Norte de la cuenca Barinas-Apure. Modificado por Parnaud 1995.



**Figura 2.3.** Sección NO-SE de la Cuenca de Barinas-Apure.  
Modificado de Parnaud, et al 1995.

## 2.1.2. Evolución de la Cuenca Barinas-Apure.

### 2.1.2.1. Precámbrico.

En los terrenos precámbricos están incluidos aquellos ubicados al Norte del río Orinoco, y que actualmente se encuentra bajo porciones de corteza paleozoica adosada a la Placa Suramericana en las diversas colisiones que ocurrieron entre 570 y 245 Ma. Al norte del escudo, en las cuencas petrolíferas, no se puede realizar una discriminación de provincias precámbricas debido a la escasa información disponible, muy pocos taladros han logrado alcanzar el basamento Precámbrico y las descripciones son muy pobres. Los terrenos alóctonos iniciaron su adosamiento a Suramérica durante el Paleozóico temprano (Orogénesis Caledoniana 570-385 Ma). ([http://www.gc.usb.ve/GeoPetroleo/WEC\\_VENEZUELA\\_97/SPANISH/CAP\\_1.PDF](http://www.gc.usb.ve/GeoPetroleo/WEC_VENEZUELA_97/SPANISH/CAP_1.PDF))

### **2.1.2.2. Paleozóico.**

Las rocas Paleozóicas de dicho terreno son principalmente “Capas Rojas” que marcan la apertura de Gondwana y Laurentia, evidenciada en la secuencia cámbrica preservada en las depresiones estructurales en dichas cuencas. Se ha definido a groso modo una cuenca cámbrico-ordovícico que atraviesa los Estados Apure, Guárico y Anzoátegui Occidental (Smith, 1980) donde se han descrito dos unidades: Hato Viejo y suprayacente Carrizal. En la Cuenca Apure se reconoció el Paleozóico no metamorfozido y más hacia el Este se reconoce en treinta pozos tanto en Guárico como en Anzoátegui.

El contenido fosilífero de algunos de estos pozos es similar al de las unidades que afloran en el área de El Baúl, siendo la litología de la Formación Carrizal de areniscas de grano fino, limolitas y arcillitas, con un ambiente marino y se cree tiene su continuidad desde Anzoátegui a través de Guárico y Apure y los Llanos Orientales de Colombia. La infrayacente Formación Hato Viejo consiste en conglomerados y areniscas cuarcíticas normalmente silícicas.

### **2.1.2.3. Cretácico.**

Está acotado por dos discordancias, hacia la base en el contacto de rocas Paleozoicas el cual es el basamento ígneo metamórfico y hacia el tope con el contacto del Eoceno u Oligoceno. Durante el Cretácico ocurre una transgresión basal la cual es identificada en muchos trabajos como Formación Aguardiente la cual es de poco espesor y es tomado como un marcador regional, hacia Colombia la llaman Lutita “S” lo cual es resultado de una profundización de la cuenca por movimientos epirogénicos (Renz 1959).

Luego de la depositación de la Lutita “s” ocurre una regresión produciendo la depositación de paquetes de arenisca glauconíticas y calizas arenosas de plataforma, esta regresión continuó con la depositación de areniscas deltaicas masivas las cuales constituyen la Formación Escandalosa en las cuales se han encontrado las mejores acumulaciones de petróleo en la subcuenca Barinas y representan los estratos de máxima regresión (Renz 1959).

Luego de la máxima regresión, se produjo una nueva transgresión produciendo la sedimentación de la lutita La Morita (Formación Navay, Miembro La Morita) por lo que representa la máxima regresión cretácica (Renz 1959).

En aguas más someras continua la sedimentación a pesar de que intervalos aptaníticos y fosfáticos son prueba de profundidades de más de 300 metros, por lo tanto, las aguas profundas prevalecieron hasta la parte media del intervalo que se conoce como Miembro Quevedo de la Formación Navay, luego de esto se atribuye el comienzo de una nueva regresión para una sedimentación en aguas más someras. El Cretácico en su parte superior fue definido por Renz (1959) como un intervalo arenoso de la Formación Burguita.

#### **2.1.2.4. Transición Cretácico-Terciario.**

En el tope de la Formación Navay o de la Formación Burguita, en la Cuenca Barinas-Apure se encuentra la discordancia del Cretácico, esto depende de la conformación estructural pre-erosión, las edades en este tope van de Coniacense a Maastrichtense, lo que implica que al igual que en los llanos colombianos, está casi completo e incluye un diastema en el tope de Navay, pero es difícil ubicar el tope del Cretácico por falta de evidencias

paleontológicas y se ha ubicado por cambios litológicos abruptos (Méndez 2005).

Finalmente en el cretácico parece haber una última sedimentación en una cuenca con fondo irregular en un ambiente de marino somero a litoral (Formación Burguita) y los arcos de El Baúl y Mérida se reactivaron a finales del Cretácico y la erosión fue más intensa en el primero, erosionándose totalmente en algunas áreas de este arco (Méndez 2005).

#### **2.1.2.5. Paleoceno.**

En el Occidente de Venezuela, el Paleoceno comenzó caracterizado por un levantamiento de la plataforma que bordea el Escudo de Guayana y dio comienzo a la orogénesis de la cordillera colombiana, la cual se cree que sirvió de fuente de sedimentos importantes para la sedimentación en el Eoceno (Méndez 2005).

#### **2.1.2.6. Eoceno.**

Está definido como una secuencia transgresiva y consta de un intervalo basal detrítico calcáreo el cual es llamado Formación Gobernador, luego de lutitas de mar abierto de la Formación Pagüey (Méndez 2005).

Por interpretación sísmica y por paleontología de los pozos de Apure, se determinó que el Eoceno desaparece por acuñaamiento erosional hacia los campos Guafita y La Victoria, además que tiene su mayor espesor hacia el frente de Montañas entre Guanarito y Capitanejo. En sentido Este-Noreste, se presentan significativos cambios de facies en el Eoceno, de manera que pueden definirse tres áreas fundamentales tales: Capitanejo, campos tradicionales (Guafita, La Victoria) y Guanarito que corresponden

aproximadamente a facies de llanura deltaica, frente deltaico pro-delta y plataforma carbonática respectivamente (Méndez 2005).

Hubo un levantamiento a finales del Eoceno de todas las cuencas de Venezuela y se erosiona gran parte de la columna previamente depositada; en la Cuenca Barinas no se ha estimado el Eoceno erosionado, sin embargo, se ha podido estimar que entre Capitanajo y Guanarito se desarrollan los mayores espesores y que tienden a aumentar hacia el Norte de acuerdo a estudios de geología de superficie (Méndez 2005).

#### **2.1.2.7. Oligoceno - Mioceno Inferior.**

Se produce una sedimentación continental; se levantan los Andes Venezolanas que deja como resultado la formación de estructuras de piedemonte. En el área de los campos de Apure, Ortega et al, (1987) propone el nombre de Formación Guafita para incluir el ciclo Oligoceno-mioceno inferior, el cual representa en esta área el mismo ciclo Carbonera-León del suroeste de la cuenca de Maracaibo y la Pascua-Roblecito de la subcuenca de Guárico. El miembro arenoso basal lo denominó Miembro Arauca y el intervalo lutítico superior con más influencia marina, Miembro Guardulio, dicha unidad constituye una secuencia limitada en su base y en su tope por discordancias.

#### **2.1.2.8. Mioceno superior-Pleistoceno.**

Suprayacente a la Formación Guafita se depositó una columna sedimentaria de origen básicamente continental. D. Kiser (1988), señala que la parte basal de la secuencia presenta todavía influencia marina y esta es la razón por la que a esta unidad la denominan primera molasa y es equivalente a la parte media y superior de la Formación Parángula. Los

sedimentos molásicos comienzan a depositarse en un período de compresión y levantamiento. Este período está representado al Norte de Barinas por las facies *flysch*, que fueron depositadas en un período de denudación de las plataformas. En Barinas el ciclo molásico comienza con Parángula Basal la cual se encuentra sobre las lutitas de la Formación Pagüey.

A Continuación se muestra un cuadro evolutivo del proceso estratigráfico y sedimentológico de la Cuenca Barinas-Apure (Tabla 2.1).

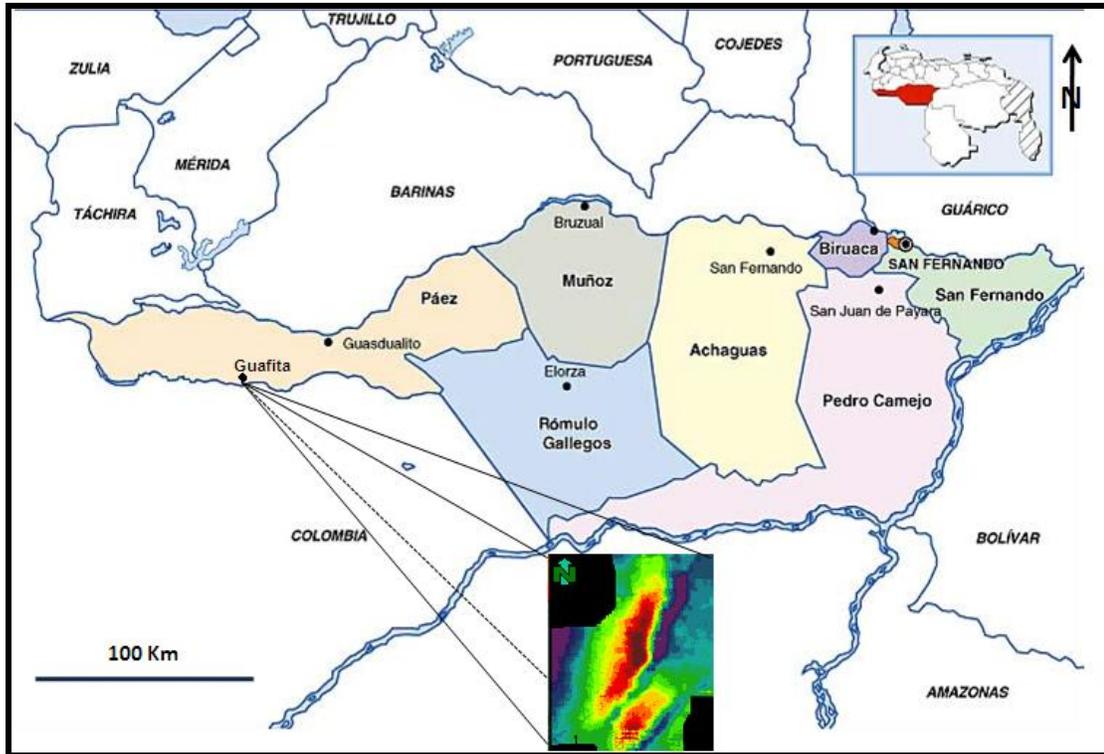
**Tabla 2.1.** Proceso estratigráfico y sedimentológico de la Cuenca Barinas-Apure

MILLONES DE AÑOS	CUADRO RESUMEN DEL PROCESO ESTRATIGRÁFICO-SEDIMENTOLÓGICO DE LA CUENCA BARINAS-APURE
100	<b>Albiense:</b> Transgresión producida por los mares del Norte que rebasaron las elevaciones del Pérmico y el Triásico, se produjo la sedimentación de la Formación Aguardiente de ambiente nerítico, probablemente representado en la cuenca por la Formación Escandalosa en sus arenas "P" y "S" de ambiente costero-Deltáico.
90	<b>Coniaciense-Mastrichtiense:</b> Ocurre el avance de la invasión marina, con la sedimentación de las formaciones Escandalosa, La Morita, Quevedo y Burguita en las facies del Norte, representadas por las formaciones Escandalosa y Navay de ambientes más cercanos a la costa.
65	<b>Final del Cretácico:</b> Ocurre una regresión hacia el Norte dando comienzo a una orogénesis, movimientos epirogénicos durante el Paleoceno y posiblemente durante el Eoceno Inferior, esto con el área central productora de petróleo, se formaron anticlinales fallados en lo que corresponde al subsuelo de Campo Sinco y Silvestre se produjo una erosión casi meridional del arco de Mérida, localmente casi hace desaparecer la sedimentación de la Formación Navay.
55	<b>Eoceno medio:</b> Se produce una transgresión la cual da origen a la Formación Gobernador, la invasión pasó hacia el Sur de Apure y se encuentra hoy día erosionada, cerca de los cursos del río Apón y Uribante, se formaron ambientes costeros al Norte y deltáicos en la zona petrolífera. Ocurre una subsidencia regional con sedimentación lutítica, localmente euxínica hacia el Norte, dando origen a la Formación Pagüey.
44	<b>Eoceno Superior:</b> Ocurre una regresión de las aguas hacia el Norte y Este, se produce un levantamiento y reactivación de fallas anteriores, en trampas del Eoceno se produjo erosión.
43	<b>Oligoceno-Mioceno Inferior:</b> Se tiene sedimentación continental; se levantan los Andes Venezolanos que deja como resultado la formación de estructuras de piedemonte. En el área de los campos de Apure, la Formación Guafita para incluir el ciclo Oligoceno-Mioceno Inferior, el miembro arenoso basal lo dominó el Miembro Arauca y el miembro lutítico superior, Miembro Guardulio. Dicha unidad constituye una secuencia limitada en su base y en su tope por discordancias.
20	<b>Plioceno-Pleistoceno:</b> Continúa la sedimentación continental en toda la cuenca, se produce un segundo levantamiento de los Andes que permite la erosión de parte del Mioceno y con este, la sedimentación de la Formación Parángula, reactivación del levantamiento vertical andino y también la sedimentación conglomerática de la Formación Ría Yuca al final de este período.

## 2.2. Geología del Campo Guafita.

El Campo Guafita está ubicado en el Distrito Páez del Estado Apure, a 180 Kilómetros de la ciudad de Barinas y 40 kilómetros al Sudoeste de la población de Guasualito, colindando con los Campos La Yuca-Caño Limón-Mata Negra en Colombia. (Figura 2.4). Está limitado al Norte y al Sur por los ríos Sarare y Arauca respectivamente. La producción de este Campo es de

la Formación Guafita subdividida en dos miembros, Arauca y Guardulio, además del Miembro Quevedo de la Formación Navay.



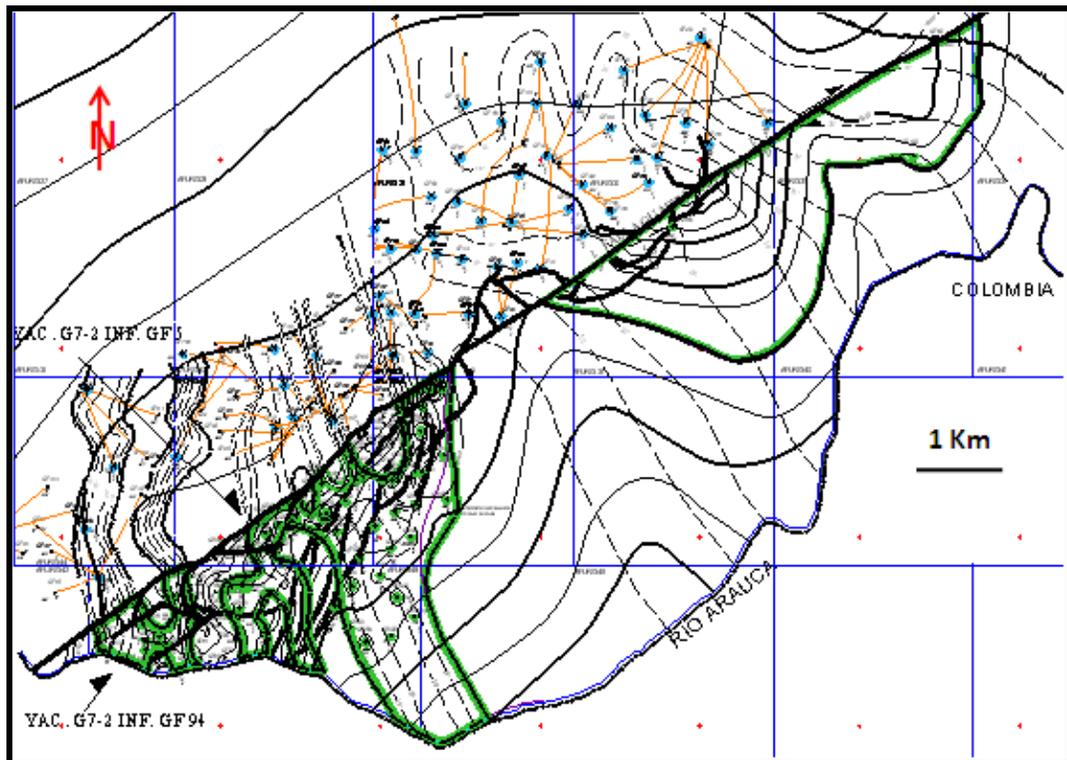
**Figura 2.4.** Ubicación geográfica del Campo Guafita.  
Modificado de <http://www.a-venezuela.com/mapas>

### 2.2.1. Situación geológica.

Geológicamente el Campo Guafita se ubica en la Cuenca de Apure la cual se halla en la parte más septentrional de la Cuenca sedimentaria del Meta constituyendo una subcuenca generada en el flanco Sur de Arauca y que podría pertenecer al sistema de pliegues de segundo orden, que con dirección N-S que se desarrollan en los Llanos Colombianos.

### 2.2.2. Geología estructural local.

El Campo Guafita se encuentra separado en dos bloques (Guafita Norte y Guafita Sur) por un patrón de fallas denominado Sistema de Fallas Guafita-Caño Limón. Este sistema de fallas está conformado por fallas transcurrentes de tipo dextral con 5 Km de movimiento horizontal. Con rumbo promedio de N 55° E (Figura 2.5).

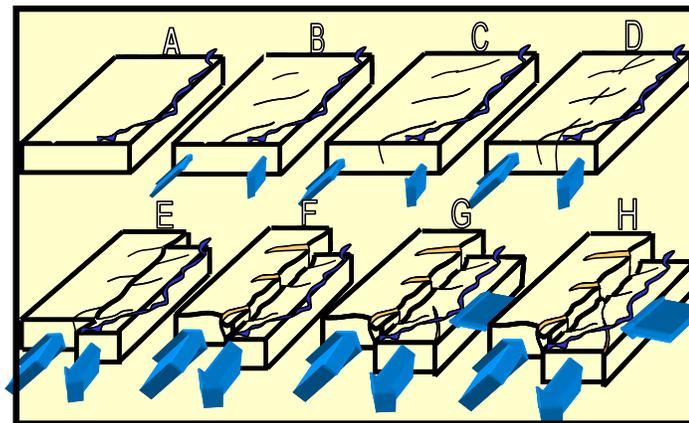


**Figura 2.5.** Mapa Estructural del Campo Guafita Sur, a nivel del Yacimiento G7-2 Inferior. (Tomado de Intranet PDVSA, 2004).

Guafita Sur constituye la otra parte del flanco Sur del anticlinal, se encuentra del lado deprimido de la falla regional antes mencionada, con salto normal vertical de 0 a 500 pies, es considerada como sellante y posee buzamientos muy suaves hacia el Sureste y Sur. El Bloque Sur ha sido afectado por varios regímenes tectónicos compresivos de los cuales, el más importante, fue la compresión Oligoceno-Mioceno relacionada con el

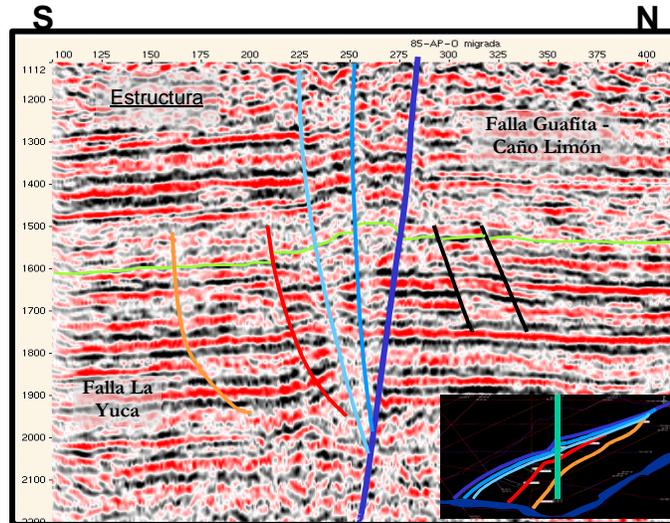
levantamiento de Los Andes, que originó el sistema de fallas inversas de rumbo Noreste-Suroeste. Las principales trampas en la subcuenca de Apure están asociadas a estas fallas paralelas a la Cordillera de Los Andes. Esta área se presenta con pliegues cuyo eje mayor se orientó en la dirección de la Falla de Caño Limón (NE-SO).

La Figura 2.6, muestra el modelo estructural del Campo de forma esquematizada (Chacin Edgar, com. pers.) en esta se observa como actuaron los esfuerzos a través del tiempo.



**Figura 2.6.** Modelo estructural del Campo Guafita.  
Modificado de J. Costero, 2003

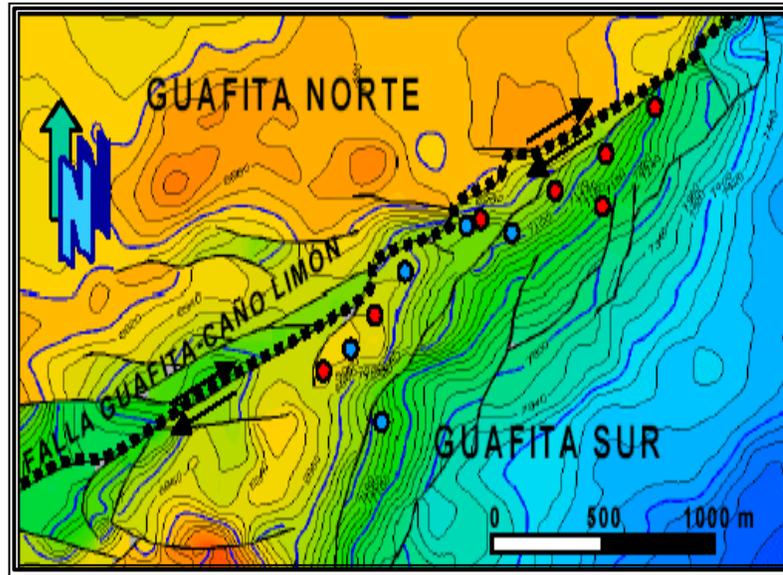
La principal estructura en el Campo Guafita Sur consiste en una estructura anticlinal con buzamiento suave, cuyo eje tiene orientación E-O, cortada por una serie de fallas, siendo la principal la Falla Guafita-Caño Limón (Figura 2.7).



**FIGURA 2.7.** Estructura en flor de los planos de falla en el Campo Guafita. Tomado de PDVSA Intranet

### 2.2.3. Interpretación sísmica.

El modelo geológico estructural previo del Campo Guafita estaba basado en información de pozos y sísmica 2D. Hasta el año 2000, la información sísmica que se tenía era un reticulado de líneas 2D, cuyo espaciamiento promedio era de 2 Km., lo que implicaba que las estructuras pequeñas no se podían identificar. Adicionalmente, la zona inmediatamente adyacente a la Falla Guafita Caño-Limón, por ser muy compleja, no se lograba definir con la información disponible y se tenía como una zona de sombra que no formaba parte del área de los yacimientos probados y donde no se perforaba debido a la incertidumbre. En el año 2000, se adquirió un levantamiento sísmico 3D de 70 Km<sup>2</sup> que cubrió el área de casi todo el Campo Guafita y se han perforado nuevos pozos, donde se ha tomado una serie de perfiles especiales como resonancia magnética, imágenes, rayos gamma espectral y datos adicionales de presiones de yacimiento. La interpretación de estos datos ha permitido definir con mayor detalle la estructura, determinar con mayor precisión la ubicación de las fallas más importantes, como la Falla Guafita-Caño Limón, identificar fallas menores, entre otras (Figura 2.8).



**Figura 2.8.** Interpretación Sísmica del Campo Guafita.  
Tomado de PDVSA Intranet.

#### **2.2.4. Sedimentología.**

La zona de interés del Campo se ubica entre los 6700 y 7500 pies de profundidad en una secuencia Terciaria (principalmente Miembro Arauca y base del Miembro Guardulio de la Fm. Guafita, de edad Oligoceno a Mioceno Temprano). La Figura 2.9 muestra los ambientes de depositación por unidad cronológica del Campo Guafita. Esta consta de arenas productoras como: G7-2 Inferior, G7<sup>3</sup>/<sub>4</sub>, G-8, G9, G10 y otras, siendo la arena G-8 la de mayor importancia en cuanto a volúmenes de reservas y mayor tamaño, y una sección del Cretácico Superior de aproximadamente 200 pies (Miembro Quevedo de la Fm. Navay) donde solo es productor en el Campo Guafita Sur. De base a tope la secuencia está representada por areniscas glauconíticas de grano medio, areniscas cuarzosas semiconsolidadas y areniscas masivas, todas con un grado de escogimiento moderado e intercaladas con capas lutíticas de espesores variables. De acuerdo a análisis de núcleos tomados en los pozos GF-1X, 2X, 5X y 16, se ha

interpretado la secuencia como depósitos de régimen fluviodeltaico a deltaico de plano bajo con ocasionales episodios de influencia marina.

### **2.2.5. Estratigrafía.**

La secuencia estratigráfica del Campo Guafita es la misma encontrada en todos los pozos y consiste en una columna sedimentaria que abarca desde los sedimentos más jóvenes (depósitos continentales) de las Formaciones Río Yuca y Parángula de edad Plio-Pleistoceno, hasta los sedimentos cretácicos (depósitos fluvicosteros y de plataforma restringida) de las Formaciones Aguardiente y Escandalosa.

#### **► Pre-Cretácico.**

- **Basamento.** El basamento se ha presentado en forma variada, en algunos casos se ha observado cuarzo rosado predominantemente y en otros se presentan esquistos micáceos-sericíticos, con inclusiones de cuarzos y gneises cuarzos feldespáticos, de posible edad paleozóica.

#### **► Cretácico.**

- **Formación Aguardiente.** Compuesta por areniscas calcáreas duras, de color gris a verde claro, de grano variable y estratificación cruzada, localmente glauconíticas, con intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas y algunos lechos de caliza en la parte inferior; localmente las areniscas son tan calcáreas que se aproximan a calizas arenosas.

•**Formación Escandalosa.** Está compuesta por areniscas macizas, cuarzosas y muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas. Las areniscas son de color gris, gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidas, micáceas y carbonáceas. Las lutitas son gris oscuro, algo arenosas, calcáreas y carbonáceas. En el tope de la sección, se encuentra una caliza de unos 4 m de espesor, gris oscura, masiva, cristalina y coquinoidea, con manchas de dolomita microcristalina.

•**Formación Navay.** En la localidad tipo está compuesta de lutitas silíceas, friables a no friables, blandas, duras, quebradizas, amarillo claro a crema y blanco; lutitas muy porosas, pardo claro a gris claro, y unas fanitas no porosas, lenticulares, pardo claro, y lutitas calcáreas, carbonáticas, gris a gris oscuro. Ha sido repartida en orden ascendente, en la lutita "N" (Miembro La Morita) y "M" al "I" (Miembro Quevedo). Tiende a ser más arenosa hacia el tope; se vuelve muy arenosa hacia el Escudo de Guayana y hacia Apure y la Cuenca de Los Llanos.

- ✓ **Miembro La Morita.** Consiste en una sección esencialmente lutítica. Hacia el flanco sur-oriental de la cuenca de Barinas, cambia gradualmente a una facie compuesta casi totalmente de areniscas, con intercalaciones menores de lutitas y ocasionalmente calizas. La presencia del amonites Barroisíceras en la parte inferior de la Formación, evidencia la edad Coniaciense de este Miembro (Renz, 1959), confirmado por la presencia del foraminífero Globotruncana fornicata que Van Hinte (1976) considera igualmente de edad Coniaciense. Feo-Codecido (1972), afirma que el Miembro La Morita es de ambiente marino moderadamente profundo, hacia el flanco

suroriental cambia a ambiente de aguas marinas menos profundas, indicado por una secuencia casi enteramente arenácea. Kiser (1988) menciona que la presencia de radiolarios, en este mismo miembro, sugiere profundidades mayores de 300 m (984').

- ✓ **Miembro Quevedo.** Fue introducido por Renz (op. cit.), para designar una secuencia de rocas silíceas, duras, quebradizas, de fractura concoidea, predominantemente lutíticas, de color gris claro que meteorizan a blanco, que incluye además intercalaciones de areniscas gruesamente estratificadas, con estructura flaser en su parte media, lutitas negras, calizas fosfáticas y capas de ftanita. Los restos de peces forman más del 50% de las capas de areniscas, y aunque la Formación es en general muy fosilífera, las faunas están muy mal preservadas y por consiguiente son de difícil identificación.

#### ► **Oligoceno y Mioceno.**

•**Formación Guafita.** Se compone de una alternancia de areniscas, arenas, wacas cuarzosas y arcósicas, lutitas, arcilitas, limolitas y algunas capas delgadas de lignito. En los Campos Guafita y La Victoria, se pueden reconocer dos miembros. El ambiente de sedimentación de la Formación Guafita, se caracteriza por un complejo de canales distributarios activos y abandonados, abanicos de rotura, bahías y llanuras interdistributarias, canales de mareas y marismas (pantanosos-costeros), propios de un sistema deltaico constructivo de llanura baja progradante, basado en la presencia de fauna diversificada, restos de plantas, icnofauna y por la abundancia

de flora. Los dos miembros son transgresivos, siendo el inferior más litoral y el superior más marino.

- ✓ **El Miembro Arauca (Inferior).** Está compuesto de un 75% de arenas, areniscas (wacas cuarcíticas y arcósicas) de color gris claro, pardo, lechoso a translúcido, matriz arcillosa-caolinítica, comúnmente con pirita, nódulos de hematita y esferulitas de siderita, frecuentemente con restos de plantas, escasos bioclastos de foraminíferos, bivalvos, algas y restos de peces. Las limolitas representan el 20% del miembro. Las lutitas son de color gris claro, gris oscuro a negro, laminar a masiva, bien estratificadas, con abundantes concreciones de pirita y esferulitas de siderita, restos de plantas, palinomorfos y escasa fauna bentónica. Las lutitas representan entre el 5 al 10% de la unidad. En la base del miembro, se observan capas delgadas y aisladas de caliza tipo packstone de oncolitos. Las arenas y areniscas del Miembro Arauca presentan abundantes estructuras sedimentarias primarias, tales como estratificación paralela, cruzada, festoneada, ondulada lenticular, rizaduras, estructuras de carga, derrumbe y deslizamiento, bioturbaciones y biohoradaciones, especialmente de las icnofacies de los Skolitos y Glossifungites.
  
- ✓ **El Miembro Guardulio (superior).** Está representado por un 40% de lutitas, gris oscuro a verdoso, ocasionalmente moteadas de óxido de hierro, masivas a laminares, con abundantes restos de plantas y otra flora, concreciones hematíticas y esferulitas de siderita; localmente nódulos de pirita y glauconita. Las lutitas generalmente gradan a lutitas carbonosas y lignitos. Las arcilitas representan el 40%,

generalmente abigarradas y manchadas de óxido de hierro; además, se presentan verdosas y blanquecinas (caoliníticas), mal compactadas, plásticas, con fragmentos aislados de ftanita y wacas cuarzosas, representan entre el 10 a 20 % del miembro, de color gris, gris claro a blanquecinas, con matriz arcillosa-coalinítica, con concreciones de hematita, esferulitas de siderita y escasos nódulos de glauconita.

### ► **Plioceno Y Pleistoceno.**

•**Formación Parángula.** Los abundantes palinomorfos indican claramente que esta unidad litológica pertenece principalmente al Mioceno Temprano. En la superficie, predominan los conglomerados lenticulares de grano grueso, de color gris a verdoso y pardo claro a blanco; areniscas de grano fino en capas masivas con estratificación cruzada, localmente glauconíticas; limolitas y lodolitas abigarradas a tonos rojos, morados, pardo rojizo y pardo claro. En el subsuelo, la litología es similar, pero con la ausencia de los conglomerados. En general, predominan los colores amarillos, rojizos y pardos, característicos del ambiente oxidante, en contraste con los colores predominantemente gris verdosos de la Formación Río Yuca, que indican un ambiente más reductor. Tanto en la superficie como en el subsuelo, la Formación Parángula es discordante, con angularidad sobre la Formación Pagüey, en las partes central y noreste de la cuenca, y sobre el Miembro Arauca en las partes sureste y suroeste de la cuenca. La Formación Parángula, junto con Río Yuca, conforma un típico depósito molásico que refleja la rápida acumulación de los detritos erosionados del levantamiento de Los Andes de Mérida y depositados en la antefosa adyacente. Representa un ciclo sedimentario transgresivo-regresivo sobre formaciones erosionadas

del Eoceno Medio-Tardío y Oligoceno, que se inicia con un clástico basal y continúa, en su parte inferior, con sedimentación de ambiente marino somero-salobre-continental y en su parte superior, con sedimentos de ambiente netamente continental de corrientes fluviales entrelazadas y lacustre. Pueden haber existido ambientes locales de pantano-manglar durante el período de transición al ambiente continental.

•**Formación Río Yuca.** Consiste en conglomerados de grano grueso (25%), en lechos macizos; areniscas macizas, con estratificación cruzada, de grano medio a grueso, localmente caoliníticas, blandas a duras, micáceas, arcillosas, de color típico verde grisáceo, rasgo éste que la distingue de la Formación Parángula. La Formación Río Yuca constituye una molasa depositada, en su parte inferior, en un ambiente de marismas o lagunas costeras; el resto de la formación se caracteriza por un ambiente continental de ríos meandriformes y entrelazados de baja velocidad.

Ambiente de deposición	Edad (Ma)	UNIDAD GEOCRONOLÓGICA	FORMACION	MIEMBRO	ESPESOR (PIES)	OBSERVACION	
Continental de canales fluviales entre lazados.	3	PLEISTOCENO	RIO YUCA Y PARANGULA		± 800'	ARCILLAS MOTEADAS INTERCALADAS CON ARENSICAS Y CONGLOMERADOS	
Marino somero, salobre continental.	5	PLIOCENO					
Sistema deltaico progradante, abanicos de rutura, bahias y canales interdistributarios	23	MIOCENO	G U A F I T A	C V R D U L I O A R A U C A	G-2	LUTITAS CON INTERCALACIONES DE ARENSICAS DE MARRON CLARO	
Sistema deltaico progradante, abanicos de ratura, bahias y canales interdistributarios	34	OLIGOCENO			G-3/4		135-320'
					G-8		60-120'
					L. GUAFITA		10-20'
					G9-1/2 G9-3/4		30-45'
			G10	115-300'			
Erosionado	56	E OCENO					
	66	PALEOCENO					
Costero tipo estuario con varias desembocaduras, a lo largo de la línea de costa entre el límite de baja marea y región litoral	145	CRETACEO	NAVAY	Q U E V E D O	Q	50'-250'	ARENSICAS DE GRANO MEDIO COLOR CLARO, PETROLIFERA
Q							
Q							
Q							
Marino moderadamente profundo.				LA MORITA	50-90'	LUTITAS PARDUSCAS	
Nerítico de plataforma			ESCAÑDALOSA		200'-450'	CALIZAS FINAS ARENSICAS MASTIVAS PET.	
Epinerítico			AGUARDIENTE		665'-935'	ARENSICAS MASTIVAS INTERCALADAS CON LUTITAS	
	251	PRE-CRETACEO	METAMORFICAS		± 50'	ESQUISTOS GRISES SERICITICOS CON INCLUSIONES DE CUARZO	

Figura 2.9. Ambientes de deposición por unidad cronológica.  
Modificado de Intranet PDVSA 2004.

La Figura 2.10 muestra el registro tipo de rayos gamma, de inducción y resistividad tomados en el pozo GF-205X correlacionados con las formaciones presentes en el Campo Guafita.

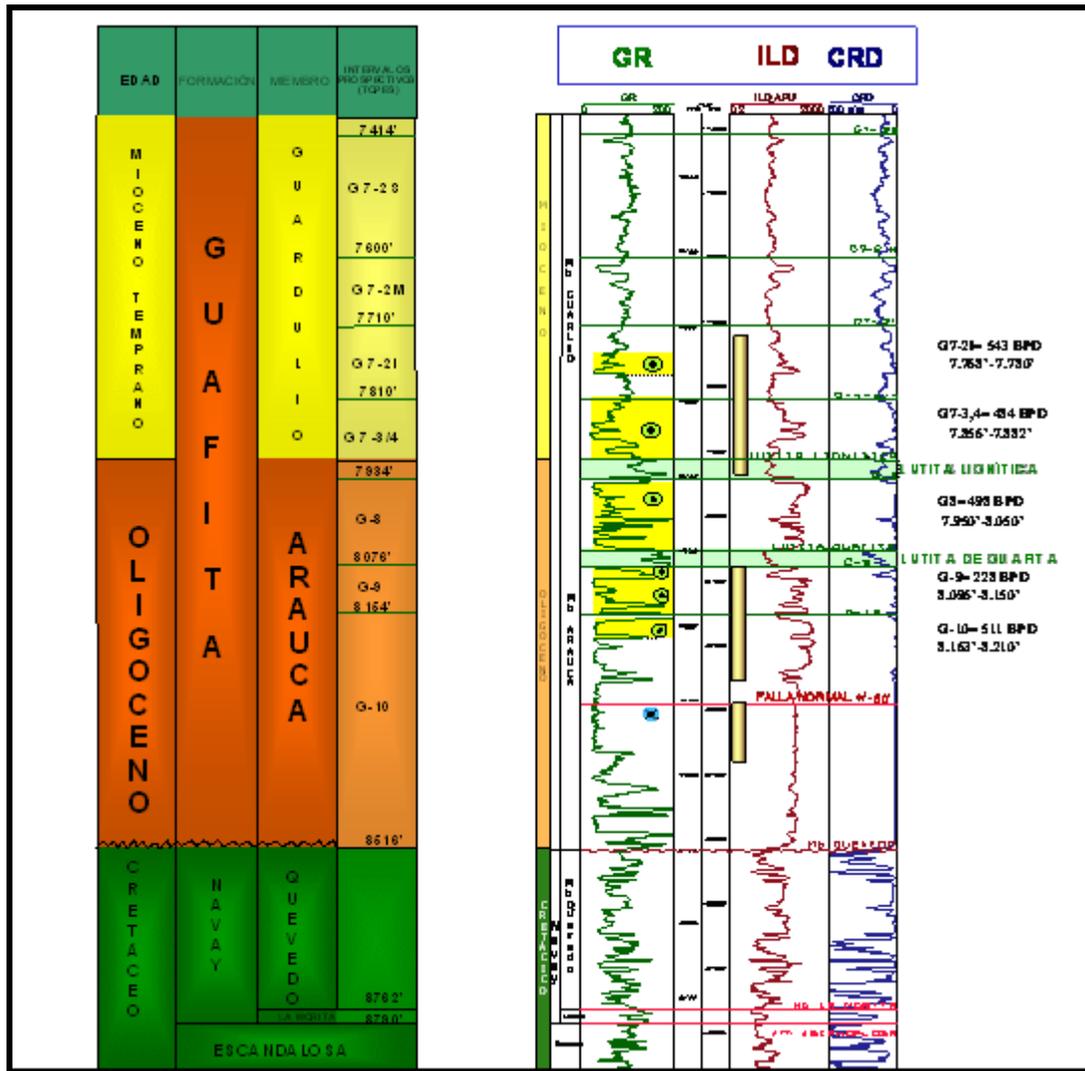
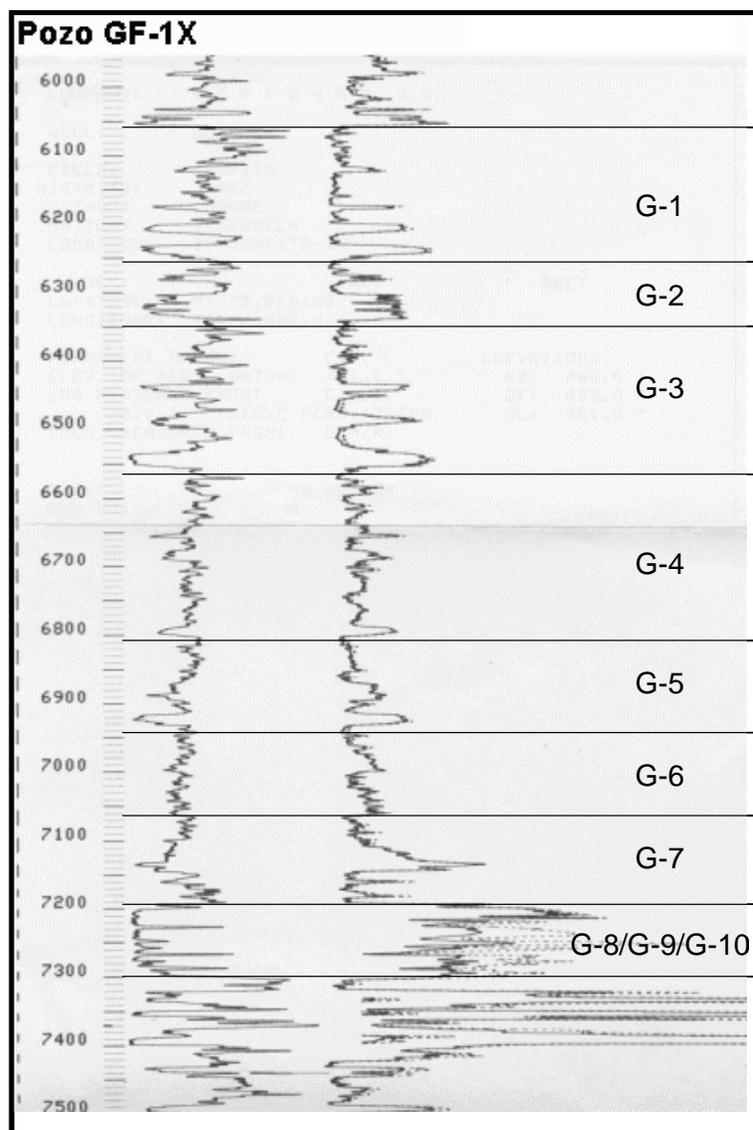


Figura 2.10. Registro tipo de rayos gamma, de inducción y resistividad tomados en el pozo GF-205X. Modificado de Intranet PDVSA 2004.

### 2.2.6. Sedimentología y estratigrafía.

Efectuando la identificación de depósitos que están en el campo Guafita, suprayacentes a la Formación Guafita hasta la misma, van desde la G1 hasta la G10, siendo las que van desde G7 hasta G10 las correspondientes a la Formación Guafita, las cuales fueron definidas con el pozo GF-1X (figura 2.11).



**Figura 2.11.** Registro de Rayos gamma del pozo GF-1X. Tomado de PDVSA Intranet 2004

Lo que corresponde a la Formación Guafita, “las dos secuencias depositacionales mencionadas anteriormente en un orden estratigráfico ascendente: La secuencia inferior, que corresponde al Miembro Arauca se inicia con la unidad sedimentaria G-10, la cual constituye el sistema encadenado de bajo nivel (LST 1). Generalmente, se caracteriza por un complejo de canales distributarios influenciados por mareas, bahías interdistributarias, depósitos de abanicos de rotura y algunas barras deltaicas en una llanura deltaica baja, la cual gradúa verticalmente a depósitos de canales distributarios y llanuras interdistributarias depositadas en un ambiente de llanura deltaica alta” (Herrera M), Hurtado María et al., mencionan que la sedimentación de la arena G10 ocurre en la zona de transición en la llanura deltaica distal y el frente deltaico donde se produce una enorme descarga de sedimentos, provenientes de los canales distributarios, los enormes paquetes de arenas limpias señalan abundantes canales coalescentes los cuales se amalgaman consecutivamente.

En el Bloque de Guafita Sur, la influencia marina se va haciendo más marcada hacia los depósitos ubicados al Suroeste del campo, sugiriendo así para el ciclo correspondiente de la unidad sedimentaria G-10, “la progradación de un sistema deltaico que avanzaría desde el Noreste hacia la cuenca receptora ubicada al Suroeste del área, el ciclo deltaico perteneciente a la unidad sedimentaria G-10, culmina con una superficie de inundación menor que representa el inicio del sistema encadenado transgresivo (TST) definido para la primera secuencia estratigráfica de la Formación Guafita Yacimiento G9” (Herrera M).

La unidad sedimentaria G-9, se compone esencialmente por depósitos sedimentarios de canales, llanuras de mareas y barras mareales en un ambiente caracterizado por condiciones de aguas salobres, las cuales indican que la sedimentación ocurrió posiblemente en un sistema estuarino.

El sistema transgresivo finaliza con la máxima superficie de inundación (MFS) localizada en la Lutita de Guafita, la cual es considerada como un marcador regional del área, el Sistema Encadenado de Alto Nivel (HST) está representado por la unidad sedimentaria G-8, la cual constituye en general un desarrollo de depósitos de canales deltaicos intercalados con bahías interdistributarias, abanicos de rotura, y en ocasiones pantanos y marismas, depositados en un ambiente de llanura deltaica baja progradante.

La G-8 presenta hacia el tope una superficie de inundación menor (Lutita lignítica) (*flooding surface*), la cual fue consecuencia de una disminución en el aporte sedimentario durante la fase tardía del “*Highstand*” de la secuencia estratigráfica correspondiente al Miembro Arauca.

La secuencia del Miembro Guardulio está conformada por las unidades sedimentarias G7-3/4, G7-2Inf, G7-2Med, G7-2Sup, las cuales representan la fase temprana del Sistema Encadenado de Bajo Nivel (LST) y se caracteriza principalmente por depósitos de llanuras de inundación intercalados con menor proporción de depósitos arenosos de grano fino a medio, que corresponden a canales distributarios o fluviales de pequeños espesores y a depósitos de abanico de rotura en un ambiente fluvio deltaico.

Las llanuras de inundación están constituidas esencialmente de limolitas de color gris verdoso, con frecuentes tonalidades rojizas y amarillentas, que sugieren la presencia de paleosuelos. Los intervalos verdosos indican el desarrollo de zonas estancadas de poco drenaje, mientras que los niveles rojizos están relacionados a la intensa oxidación durante momentos de mayor drenaje en la llanura. Las llanuras de inundación se generan a partir de la acreción vertical del limo durante momentos de baja energía. Por su parte, la marcada descarga fluvial se evidencia en la frecuencia de depósitos de canales y abanicos de rotura. En la Figura 2.12 se encuentra

representados los sistemas transgresivos y la evolución tectónica del Campo Guafita.

UNIDAD GEOCRONOLOGICA	FORMACION	MIEMBRO	ESPESOR (PIES)	OBSERVACION	Sistema transgresivo	Evolución tectónica	
PLEISTOCENO	RIO YUCA Y PARANGULA		± 5800'	ARCILLAS MOTEADAS INTERCALADAS CON ARENISCAS Y CONGLOMERADOS	LST SB2	Orogénesis	
PLIOCENO							
MIOCENO	G U A F I T A	G U R D U L I O	± 800'		LUTITAS CON INTERCALACIONES DE ARENISCAS DE MARRON CLARO	LST	Orogénesis
			135-320'	G-7 G7-2 7 G7-3/4 LIGNITICA		Floding Surface	
60-120'		G-8	HST				
10-20'		L GUAFITA	MFS				
30-45'		G9-1/2 G-9 G9-3/4	TST				
OLIGOCENO	A R A U C A	115-300'	G-10	ARENISCAS LENTICULARES INTERCALADAS CON LUTITAS DE ESPESOR VARIABLE	LST		
EOCENO					SB1	Erosionado	
PALEOCENO							
CRETACEO	NAVAY	Q U E V E D O	50'-250'	Q1 Q2 Q3 Q4	ARENISCAS DE GRANO MEDIO COLOR CLARO, PETROLIFERAS	LST	Margen pasivo
			50-90'	LA MORITA	LUTITAS PARDUSCAS	MFS	
	200'-450'		ESCANDALOSA	CALIZAS FINAS ARENISCAS MASIVAS PETROLIFERAS	LST		
	685'-935'		AGUARDIENTE	ARENISCAS MASIVAS INTERCALADAS CON LUTITAS	LST		
PRE-CRETACEO	METAMORFICAS		± 50'	ESQUISTOS GRISES SERICITICOS CON INCLUSIONES DE CUARZO		Rifting	

Figura 2.12. Sistemas transgresivos y evolución tectónica del campo Guafita.

## **CAPITULO III. MARCO TEÓRICO**

### **3.1. Método sísmico.**

Es el que permite obtener la información de cómo está conformado el subsuelo a partir de la propagación de ondas elásticas generadas artificialmente, las cuales son capturadas por unos receptores llamados geófonos, las ondas elásticas son producto de la perturbación del subsuelo con el uso de explosivo, masas pesadas, vibroseis o pistolas de aire ya sea en la sísmica de pozo o sísmica marina.

El objetivo principal del método sísmico es el estudio del subsuelo en general, lo cual permite información geológica de los materiales que lo conforman. La prospección sísmica es una herramienta de investigación poderosa ya que con ella se puede inspeccionar con buena resolución, desde los primeros metros del subsuelo la cual es llamada sísmica de alta resolución o sísmica superficial y se puede Prospeccionar hasta varios kilómetros de profundidad la cual corresponde a la sísmica profunda.

La prospección sísmica superficial y la sísmica profunda tienen sus diferencias en función a la profundidad, la cual va a depender de la fuente que generará las ondas que viajaran a través del subsuelo, para el caso de sísmica superficial se utilizan martillos de impacto o mandarrias, rifles sísmicos o explosivos de baja energía, y para la prospección sísmica

profunda explosivos, vibraseis o cañones de aire para sísmica marina o de pozo que son fuentes de alta energía, todo lo anteriormente expuesto va a depender de la profundidad del objetivo. En el caso de la industria petrolera se usa la prospección sísmica profunda utilizando el método de reflexión ya que generalmente los objetivos están ubicados en profundidad por el orden de los kilómetros (<http://www.scribd.com>).

En fin la prospección sísmica profunda, ya sea terrestre o marina permite detectar grandes estructuras geológicas tales como plegamientos montañosos, zonas de subducción, domos salinos, fallas entre otras estructuras, a la vez que en lo que respecta a canales de paleo-ríos se logran distinguir con una simple interpretación siempre y cuando este dentro de la resolución sísmica al igual que las grandes estructuras.

### **3.1.1. Caracterización estratigráfica.**

Consiste en dar sentido geológico-estratigráfico a los datos que corresponden a un determinado horizonte en el subsuelo, y que engloba la posición de los estratos, el buzamiento, sentido de sedimentación, facies, espesores entre otros.

### **3.1.2. Caracterización estructural.**

Es reconocer las estructuras geológicas presentes en los mapas o cubos realizados a partir de la interpretación sísmica de cubos 3D o 2D, estas estructuras pueden ser fallas, pliegues.

### **3.1.3. Sísmica de reflexión.**

El método sísmico de reflexión, cumple un rol imprescindible durante los procesos de análisis de cuencas y prospección de yacimientos de hidrocarburos. Durante estos procesos los datos sísmicos son la base para la generación de los mapas estructurales, clave en la definición de posibles trampas. También se utilizan para la definición de posibles secuencias estratigráficas contentivas de sedimentos que funcionen como roca yacimiento. Los métodos sísmicos se basan en el fenómeno de propagación de ondas en la tierra. Esta propagación es posible gracias a las propiedades elásticas de las rocas. (Regueiro S, 2007)

### **3.1.4. Tipos de ondas sísmicas.**

En la exploración y producción petrolera se estudian 2 tipos de ondas, las ondas P que viajan longitudinalmente a la superficie de propagación y son llamadas también ondas compresionales, estas son entre 1,5 a 2 veces más rápidas que las ondas S u ondas transversales por la manera como viajan en la superficie, también son llamadas ondas de corte, las ondas S tienen una particularidad la cual es que no se propagan en el agua (Regueiro S, 2007).

La velocidad de onda P y onda S, se pueden calcular en función de ciertos parámetros (3.1), para la onda P se utiliza generalmente el módulo de volumétrico de la roca (K) que es un valor que mide la relación de la presión por cambio de volumen (3.2) (Dobrin M.,1961), el módulo de compresibilidad ( $\mu$ ) que mide la relación del volumen por cambio de presión es decir es el recíproco del módulo volumétrico (3.3) (Dobrin M.,1961) y la densidad de la roca ( $\rho$ ); para el caso de la velocidad de onda S (3.4), se calcula a partir del módulo de compresibilidad y la densidad.

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta V/V} \quad (3.1)$$

$$\mu = \frac{\Delta V}{\Delta p / p} \quad (3.2)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (3.3)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.4)$$

### 3.1.5. Rayo.

Son líneas que indican la dirección en la que viajan las ondas, su objetivo es describir la trayectoria de la energía sísmica (Solano, 2006). Los rayos son perpendiculares a las ondas de esto parte su importancia dentro de la sísmica, el ángulo de propagación del rayo va a depender del medio de propagación del rayo, propiedad que ayuda a diferenciar litologías.

### 3.1.6. Ley de Snell.

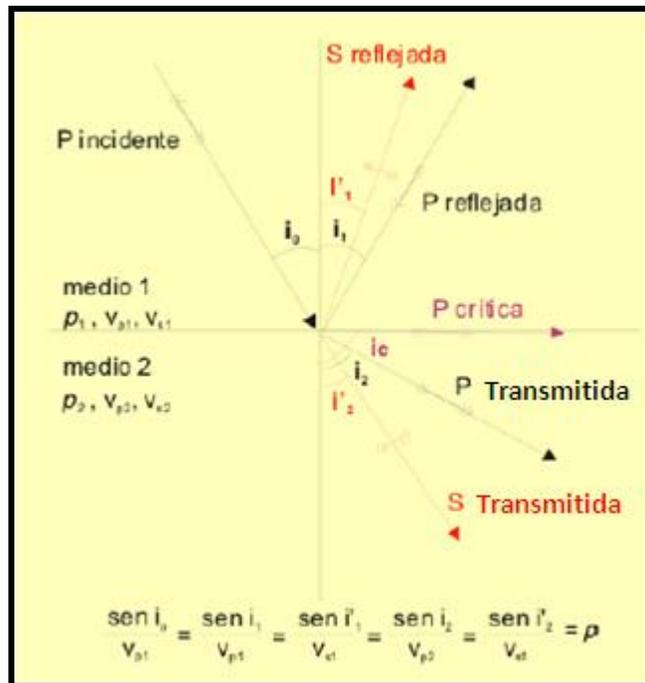
Cuando las ondas sísmicas se propagan en el subsuelo, se encuentra con cambios en las propiedades elásticas de las rocas como por ejemplo la interfase entre dos capas geológicas, parte de la energía, continua en el mismo medio. A la línea perpendicular a la onda se le llama rayo incidente, donde una parte de este se refleja, denominada onda reflejada. Otra parte de la onda se refracta transmitiéndose de un medio superior a uno inferior, donde se producen cambios en la velocidad de propagación, en la dirección de propagación y en la vibración, como consecuencia de que la tierra se asemeja a un filtro paso bajo, es decir, deja pasar las bajas frecuencias por lo que produce el fenómeno de la atenuación.

Las leyes de reflexión y refracción se derivan del principio de Huygenz, cuando se considera un frente de onda que incide sobre una interfase plana. El resultado final es que ambas leyes se conjugan en un solo planteamiento, en una interfase el parámetro de rayo,  $p$ , debe tener el mismo valor para las ondas incidentes reflejadas y refractadas. Si el medio consta de un cierto número de capas paralelas, la ley de Snell establece que el parámetro del rayo, tiene que ser el mismo para todos los rayos reflejados y refractados, resultante de un rayo inicial dado. (Coronel, 2009)

Cuando  $V_1 < V_2$ ,  $i_0 > i_2$  (Figura 3.1) los rayos se refractan por la segunda capa y, en el caso en el que  $i_2$  alcanza los  $90^\circ$ , se define como el ángulo de incidencia crítico para el cual el rayo viaja a través de la interfase (Coronel, 2009) el ángulo de incidencia viene dado por:

$$i_1 = \text{sen}^{-1} (V_1/V_2)$$

(3.5)



**Figura 3.1.** Conversión de rayo incidente (P) según la ley de Snell. (Modificado de <http://www.scribd.com/doc/26886999/Metodos-Sismicos-Refraccion-y-Reflexion>)

### 3.1.7. Tiros de verificación sísmica (registro *check shot*).

Es un tipo de registro de pozo diseñado para medir el tiempo de viaje de las ondas sísmicas desde una profundidad conocida. Se mide la velocidad de onda P sobre las formaciones encontradas en un pozo, estas se miden bajando un geófono a cada formación de interés, se envía una fuente de energía desde la superficie de la tierra y se graba la señal resultante. Los datos pueden ser correlacionados con la sísmica de superficie a partir de la corrección del registro sísmico y generando el sismograma sintético, para confirmar o modificar la interpretación sísmica. (Sheriff 2002)

Partiendo del registro *check shot*, se construye la curva T-Z (curva tiempo profundidad) de cada pozo, por lo cual se puede determinar los valores de tiempo profundidad y esto a la vez permite generar los modelos de velocidades para la conversión tiempo profundidad, con este registro se

puede calibrar el registro sísmico, para construir los sismogramas sintéticos. (Coronel, 2009)

### 3.1.8. Registro sísmico.

Este registro comienza con la introducción de una herramienta que emite impulsos sísmicos contra la formación, los cuales son captados de vuelta a través de unos receptores. Es un registro que mide el tiempo que tarda una onda sonora en atravesar un pie de formación, lo que correspondería a medir lentitudes y no velocidades de viaje de la onda contra la formación. Se registra la onda P y S contra la profundidad, la herramienta consta de dos receptores, el lejano y el cercano, los cuales están espaciados 2 pies y posee una fuente a 3 pies del receptor más cercano, las unidades del registro sísmico por lo general son microsegundos por pie ( $\mu\text{seg/pie}$ ). ([www.glossary.oilfield.slb.com](http://www.glossary.oilfield.slb.com))

### 3.1.9. Velocidad promedio.

Es la velocidad que está asociada a más de una formación o litología, y por lo general se refiere al promedio de velocidades interválicas medido desde la superficie. Este tipo de velocidades se obtienen de los tiros de verificación sísmica y es la velocidad que se utiliza para llevar los tiempos de reflexión a profundidad. (Regueiro S, 2007) La ecuación que permite calcular la velocidad promedio es:

$$V_{pr} = \frac{\sum V_{int_i} \times \Delta t_i}{\sum \Delta t_i} \quad (3.6)$$

### **3.1.10. Velocidad intervállica.**

Se asocia a la velocidad de propagación promedio dentro de un estrato o formación dada, y es la que muchos intérpretes asocian con la litología, su medición se realiza principalmente con el registro sísmico, (Regueiro S, 2007) haciendo una conversión simple de lentitudes a velocidades.

### **3.1.11. Ondícula.**

Es un pulso en una dimensión, que sísmicamente puede representar una respuesta simple a la presencia de un reflector, se origina a lo largo de las trazas sísmicas que conforman un paquete de energía en profundidad, a partir de una fuente, que pueden ser explosivos, vibroseis y pistolas de aire en los casos de sísmica de pozos o sísmica marina. La ondícula tiene su origen a partir del tiempo de disparo y su distribución viene dada en función de los cambios de velocidad y densidad de los medios por las cuales se propaga en el subsuelo y en función de la posición fuente receptor.

La ondícula elegida para el análisis debería ser, en principio, lo más similar posible a las ondas generadas, por la fuente sísmica usada (Requena, 2000). Al momento de establecer las mediciones precisas sobre los sismogramas sintéticos, es necesario conocer el tipo de ondícula empleada en la convolución, debido a que esta adoptará una posición distinta respecto al coeficiente de reflexión (Figura 3.2).

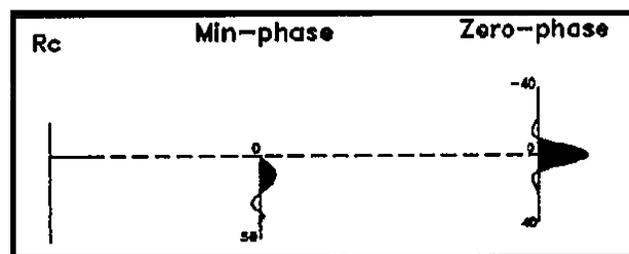
Dependiendo de su fase, las ondículas comúnmente empleadas son la fase cero, si la fuente usada en la adquisición es Vibroseis y fase mínima si la fuente empleada es dinamita (Martínez 1996). Sin embargo, en los datos sísmicos grabados en campo, se presentan una mezcla de fases en las ondículas a lo largo de la traza sísmica (Figura 3.3), y hoy día los geofísicos

han determinado que la ondícula que más comúnmente se usa en la elaboración de sismogramas sintéticos es la ondícula fase cero por las siguientes razones (Liner, 2004):

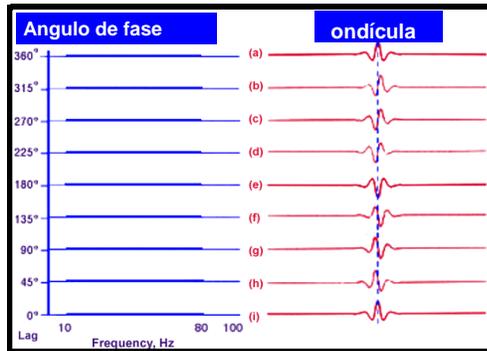
- 1) Son simétricas por lo que se obtiene una resolución vertical óptima.
- 2) Son bastante agudas, semejantes a un pulso, debido a que los lóbulos laterales han sido minimizados (esto optimiza el cálculo de la resolución vertical).
- 3) Su amplitud pico se localiza en el centro de la ondícula.

### 3.1.12. Tipos de ondícula.

Como se mencionó en el párrafo anterior, se pueden considerar dos tipos de ondículas, la ondícula fase mínima y la ondícula fase cero las cuales pueden modificar su ángulo de fase (Figura 3.2 Y 3.3) y dentro de las ondículas de fase cero se tienen la ondícula Ricker, Klauder, Texas Double y las ormbly, cuya diferencia está en tipo de espectro de frecuencia en que estas se propagan (Figura 3.6). (Liner, 2004)



**Figura 3.2.** Diferencia de la posición adoptada por la ondícula fase mínima y fase cero respecto a un mismo coeficiente de reflexión, modificada de Martínez 1996.



**Figura 3.3.** Ondículas según el ángulo de fase. Modificada de Liner, 2004.

NOMBRE	FORMA	ESPECTRO
Ricker		
Klauder		
Texas Double		
Ormsby		

**Figura 3.4.** Tipos de ondícula fase cero. Modificada de Liner, 2004

### 3.1.13. Coeficientes de reflexión (RC).

Son parámetros de gran importancia para efectuar un modelo del subsuelo, sus valores oscilan entre -1 y 1, en el caso que el coeficiente sea igual a cero. Esto implica que toda la energía incidente es transmitida, por lo cual no hay contraste de impedancia acústica a través de la superficie, en cambio si los valores son iguales a -1 ó 1 implica que toda la energía incidente es reflejada. Cada coeficiente de reflexión (ecuación 3.1.5) a lo largo del pozo se obtiene a partir de la relación de impedancias acústicas (ecuación 3.1.6). (Coronel, 2009)

$$RC = \frac{\rho_2 \times V_2 - \rho_1 \times V_1}{\rho_2 \times V_2 + \rho_1 \times V_1} \quad (3.7)$$

$$Z = \rho \times V \quad (3.8)$$

$\rho$  es la densidad  
 $V$  es la velocidad de onda compresional  
 $Z$  es la impedancia acústica

#### 3.1.14. Densidad teórica.

En algunos casos en los cuales los datos de registros de densidad no son confiables o no existen, el cálculo de la densidad se puede efectuar usando la ecuación de Gardner, 1974 (3.1.7) con la base tomada a partir de las velocidades interválicas obtenidas a partir de los registros sínicos, usando la ecuación 3.1.8.

$$d = aV^{0.25}$$

(3.9)

Donde  $a=0.31$  cuando la velocidad sea en metros/segundos y  $a=0.23$  si la velocidad está dada en pies/segundos.

### 3.1.15. Convolución.

En términos matemáticos, la función convolución es una señal de respuesta  $h(t)$ , que en la calibración sísmica pozo se asocia al sismograma sintético y es resultado del producto convolucional de la función señal de entrada,  $f(u)$  que en el caso de los sismogramas son los coeficientes de reflexión y de la perturbación,  $g(t-u)$  cuya señal es la ondícula extraída de la sísmica (Percival et. al 2000), la operación de convolución se denota con un asterisco, esta expresión viene dada por la ecuación (3.1.8):

$$h(t) = f(t) * g(t) \equiv \sum_{u=-\infty}^{\infty} f(u)g(t-u) \quad (3.10)$$

### 3.1.16. Sismograma Sintético:

Consiste en un registro que se construye a partir de las velocidades observadas en un registro sísmico y las densidades de pares de estratos que tienen un reflector en común, obteniéndose la serie de reflectividad a partir de las impedancias acústicas obtenidas de la velocidad de ondas compresivas calculadas a partir del registro sísmico, multiplicadas por la densidad, y dándole equivalencia sísmica con la convolución de una ondícula; el sismograma sintético permite efectuar la calibración sísmica-pozo. ([www.glossary.oilfield.slb.com](http://www.glossary.oilfield.slb.com))

$$S(t)=W(t)*RC(t) +n(t)$$

(3.11)

S(t) es el sismograma sintético  
W(t) es la ondícula  
RC(t) es la serie de reflectividad  
N(t) es el ruido aditivo

La calidad de los sismogramas sintéticos depende de la calidad de los registros de pozos usados, del procesamiento de la data sísmica y de la obtención de ondículas representativas.

### 3.1.17. Calibración sísmica-pozo.

Consiste en verificar los topes geológicos con el uso del sismograma sintético, proporcionando un ajuste tiempo-profundidad y cuya información directa se obtiene de los pozos presentes en el Campo que se estudia (García E., 2008).

### 3.1.18. Atributo Sísmico.

Es una propiedad que se obtiene a través de los datos sísmicos, como las trazas a lo largo de un horizonte que se suman en una ventana en tiempo correspondiente a dicho horizonte, los atributos pueden ser extraídos tanto por lógica, como por razonamiento o experiencia. Algunos autores consideran los atributos sísmicos como cualquier información de carácter geométrico, cinemática, dinámico o estadístico, derivado o extraído de los datos sísmicos. (García E., 2008)

### 3.1.19. Atributos sísmicos (usados en este trabajo).

#### 3.1.19.1. Buzamiento (*Dip*).

El atributo de buzamiento muestra la magnitud del gradiente de tiempo y es construido al comparar cada muestra adyacente en dirección ortogonal. Un plano es ajustado a través de tres puntos. El plano tiene una magnitud de buzamiento en milisegundos por unidad de distancia por 100 (García E, 2008). El cálculo del buzamiento se efectúa a través de la siguiente ecuación:

$$Dip = \sqrt{\left(\frac{dt}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dt}{dy}\right)^2} \times 100 \quad (3.12)$$

En la cual  $dt/dx$  es el buzamiento en dirección de x, y  $dt/dy$  es el buzamiento en la dirección de y, con x e y como coordenadas reales (García E, 2008).

#### 3.1.19.2. Seguimiento de Hormiga (*Ant Tracking*).

Es un nuevo atributo muy útil para la interpretación y corroboración de fallas geológicas, el procedimiento consta de cuatro pasos:

- 1) Es la revisión de los datos sísmicos mediante la reducción de ruido en la señal.
- 2) Aumenta la discontinuidad espacial en los datos sísmicos, por medio del atributo que lo genera y la detección de bordes.
- 3) Genera la pista de hormigas en volumen, mejora significativamente la resolución del atributo debido a la supresión del ruido y restos de acontecimientos no deseados en el cubo sísmico.

#### 4) Crea el modelo final de las fallas.

Esto logra emular el comportamiento de las colonias de hormigas en la naturaleza y la forma en que usan las feromonas para marcar sus caminos con el fin de optimizar la búsqueda de alimentos. Del mismo modo, "hormigas artificiales" se ponen como semillas en un volumen con discontinuidad sísmica en busca de zonas de fallas y por las feromonas virtuales desplegadas por las hormigas captura la información relacionada con las zonas de fallas en el volumen. El resultado es un atributo de volumen que muestra zonas de fallas muy nítidas y detalladas.

A partir del cubo 3D, planos de discontinuidad pueden ser extraídos del cubo de *ant tracking*, a la vez que se puede efectuar un proceso de extracción automática de fallas. Debido a lo poderoso del atributo, el interprete debe saber distinguir en lo que es una discontinuidad de falla, fracturas o una estratificación ya que estas también logra destacarse.

([http://www.slb.com/services/software/geo/petrel/seismic/auto\\_structural\\_in](http://www.slb.com/services/software/geo/petrel/seismic/auto_structural_in))

#### **3.1.19.3. Reflectividad de onda S.**

La reflectividad de onda S es un atributo AVO que depende de la densidad de la roca y de la velocidad de onda de corte y se calcula a partir de una ecuación (3.13) simplificada de las ecuaciones de Zoepprits (3.14) tomando en cuenta ciertas asunciones. Este atributo permite obtener parámetros de caracterización de reservorios tales como porosidad, litología y contenido de fluidos. Continuando con el análisis de la reflectividad de onda S, este atributo permite calcular la reflexión intrínseca que se produce sobre la superficie de contacto y determina contenido de fluidos (Gelfand et. Al., 1986).

$$R_s = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$$

(3.13)

#### 3.1.19.4. Frecuencia dominante.

La frecuencia dominante es calculada como la hipotenusa entre la frecuencia instantánea y el ancho de banda instantáneo. Este atributo en combinación con el ancho de banda instantáneo, sirve de un suplemento a la frecuencia instantánea, estos tres atributos revelan el instante en que cambian las propiedades espectrales de los datos sísmicos. (Tomado en la ayuda de la plataforma de Geoframe)

#### 3.1.19.5. Amplitud sísmica.

Permite leer el valor de la traza en el horizonte seleccionado. Es muy útil y permite identificar puntos brillantes, tenues, canales y tiene buena correlación con los parámetros petrofísicos como espesor y porosidad. Es el total de la energía de reflexión de una traza en una ventana de tiempo y su valor es siempre positivo, se utiliza para detectar fallas sutiles y canales enterrados (Brown, 1996) así como identificar puntos brillantes.

#### 3.1.19.6. Mu-rho.

Es un atributo de tipo físico, debido a que están incluidos el coeficiente de rigidez  $\mu$  el cual es sensible a la matriz (Goodway, et. al., 1997) y la densidad  $\rho$  cuyo producto da como resultado el atributo  $\mu\rho$ , el cual permite la identificación de litologías. Al término de la rigidez  $\mu\rho$  se lo considera el

indicador de la matriz, ya que  $\mu$  no es sensible a una saturación con fluido. En teoría, una arena tendrá un valor de  $\mu\rho$  alto ya que el mineral dominante en su matriz, cuarzo, tiene una mayor rigidez que los minerales de la arcilla (Mason M., 2008). El desarrollo matemático para obtener este atributo se muestra a continuación:

$V_s = \sqrt{\mu/\rho}$ , velocidad de onda de corte en función del módulo de rigidez y la densidad, multiplicando ambos lados de la ecuación por la densidad.

$$\rho \times V_s = \rho \times \sqrt{\mu/\rho}$$

$(\rho \times V_s)^2 = (\rho \times \sqrt{\mu/\rho})^2$ , donde  $\rho \times V_s$  es la impedancia acústica de onda S,  $Z_s$ .

$Z_s^2 = \mu\rho$ , es decir el parámetro que rige el atributo  $\mu$ -rho es la impedancia de onda S al cuadrado

<http://www.cspg.org/conventions/abstracts/2003abstracts/434S0131.pdf>

### 3.1.19.7. Gradiente.

Es un atributo AVO, el cual tiene su fundamento a partir de las ecuaciones de Zoeppritz (3.14), ecuaciones que describen el cambio de energía elástica reflejada y transmitida por una interface como función del ángulo de la onda incidente (Melissa R., 2005). Debido a la complejidad de las ecuaciones de Zoeppritz, Shuey (1985) simplificó las mismas llegando a una ecuación sencilla de gradiente (G) (3.15), este atributo permite efectuar la interpretación estratigráfica y las areniscas saturadas con hidrocarburo, pueden mostrar un aumento o disminución (valor absoluto) del coeficiente de reflexión en función del ángulo de incidencia (Castagna, et. al., 1993), sin embargo, estos fenómenos pueden ser observados en areniscas saturadas

con agua salada, lo cual puede complicar la interpretación AVO (Weitzel D., 2006).

En gráficos cruzados de intercepto-gradiente (Figura 3.5) las areniscas saturadas con agua salada y lutitas, tienden a ubicarse en este tipo de gráfico siguiendo una alineación denominada “tendencia de fondo”, mientras que areniscas saturadas con hidrocarburo tienden a alejarse de la tendencia de fondo (Figura 3.5), entonces desviaciones del tipo AVO, son observadas como desviaciones en tendencia. Las anomalías AVO pueden estar referidas a la presencia de hidrocarburo o a factores litológicos (Weitzel D., 2006).

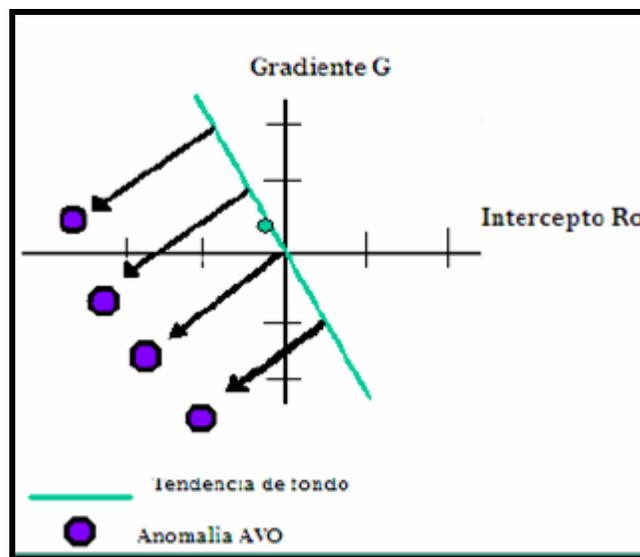


Figura 3.5. Tendencia de fondo y anomalía AVO. (Tomado de Weitzel D., 2006)

$$\begin{pmatrix} \text{Sen}\theta_1 & \text{Cos}\phi_1 & -\text{Sen}\theta_2 & \text{Cos}\phi_2 \\ -\text{Cos}\theta_1 & \text{Sen}\phi_1 & -\text{Cos}\theta_2 & -\text{Sen}\phi_2 \\ \text{Sen}2\theta_1 & \frac{\alpha_1}{\beta_1} \text{Cos}2\phi_1 & \frac{\rho_2\beta_2^2\alpha_1}{\rho_1\beta_1^2\alpha_2} \text{Sen}2\theta_2 & -\frac{\rho_2\beta_2\alpha_1}{\rho_1\beta_1^2} \text{Cos}2\phi_2 \\ \text{Cos}2\theta_1 & -\frac{\beta_1}{\alpha_1} \text{Sen}2\phi_1 & -\frac{\rho_2\alpha_2}{\rho_1\alpha_1} \text{Cos}2\theta_2 & -\frac{\rho_2\beta_2}{\rho_1\alpha_1} \text{Sen}2\phi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\text{Sen}\theta_1 \\ -\text{Cos}\theta_1 \\ \text{Sen}2\theta_1 \\ -\text{Cos}2\theta_1 \end{pmatrix}$$

(3.14)

$$G = \frac{\Delta V_p}{2\langle V_p \rangle} - 2 \left[ \frac{\langle V_s \rangle}{\langle V_p \rangle} \right]^2 \left[ \frac{2\Delta V_s}{\langle V_s \rangle} + \frac{\Delta\rho}{\langle \rho \rangle} \right]$$

(3.15)

$$\begin{aligned}
 \langle V_p \rangle &= (V_{p1} + V_{p2})/2 & \langle V_s \rangle &= (V_{s1} + V_{s2})/2 & \langle \rho \rangle &= (\rho_1 + \rho_2)/2 \\
 \Delta V_p &= (\Delta V_{p2} - \Delta V_{p1}) & \Delta V_s &= (\Delta V_{s2} - \Delta V_{s1}) & \Delta \rho &= (\Delta \rho_2 - \Delta \rho_1)
 \end{aligned}$$

### 3.1.19.8. Planitud local (*Local flatness*).

Utiliza la diferencia de la orientación sobre el terreno para determinar la uniformidad de la señal dentro del rango de estimación de la orientación. Esto puede ser un atributo para determinar características estratigráficas y estructurales.

El filtro controla el tamaño del número de trazas, horizontal y verticalmente, a utilizar en las muestras para la estimación de planitud. El valor representa la desviación estándar para el filtro Gaussiano en la dirección de los inlines, crosslines y vertical. Cuanto mayor sea el valor, mayor es el número de

huellas y muestras a utilizar (3.16). (Tomado del manual digital de PETREL, 2008)

$$\nabla F = DT_D = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \\ \frac{\partial z}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial Y} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

### 3.1.20. Resolución sísmica Vertical.

Se entiende como resolución sísmica vertical la menor distancia vertical entre dos interfases litológicas que produce dos reflexiones discretas, las cuales pueden separarse visualmente (Regueiro, 2007).

En sísmica la resolución vertical concierne al espesor mínimo de una capa, en la cual las reflexiones provenientes de su tope y de su base pueden ser distinguidas.

El criterio de Rayleigh establece que el límite de resolución es de un 1/4 de la longitud de onda dominante (Ecuación 3.17) (Sheriff, 1997), sin embargo algunos autores han afirmado que han podido obtener resoluciones por el orden de 1/16 de la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

(3.17)

Donde V es la velocidad interválica, f es la frecuencia dominante la cual es el promedio de la suma de los dos valores más altos en frecuencia dentro de un espectro de frecuencia dividido entre 2 (3.18)

$$F_{dom} = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

(3.18)

### **3.2. Geoestadística.**

Es una rama de la estadística que permite recopilar, analizar, representar e interpretar datos geológicos (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.1. Población.**

Es el fenómeno que se desea estudiar y describir tanto físicos como geológicos (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.2. Muestra.**

Consiste en una discretización del fenómeno que se desea estudiar (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.3. Estadística inferencial.**

Se encarga de utilizar la información e interpretación obtenida de las muestras y extrapolarlas a nivel del fenómeno macro (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.4. Datos cuantitativos.**

Son cantidades numéricas que representan el fenómeno a estudiar (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.5. Datos cualitativos.**

Describen la característica de la muestra y solo se puede clasificar y jerarquizar (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.6. Valores atípicos.**

Son datos que no siguen el comportamiento general de la distribución principal. Las causas de estos valores atípicos son errores al introducir los datos, errores de medición, acontecimientos anormales que pueden alterar la medición, problemas de muestreo a una escala inadecuada, o un mal diseño llevado a cabo (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.7. Histograma de frecuencia.**

Es un gráfico de barras que clasifica el total de datos en grupos denominados clases, y cuantifica la frecuencia de aparición de cada dato dentro de su correspondiente clase (Figura 3.6) (Ughi A., Com. Pers.).

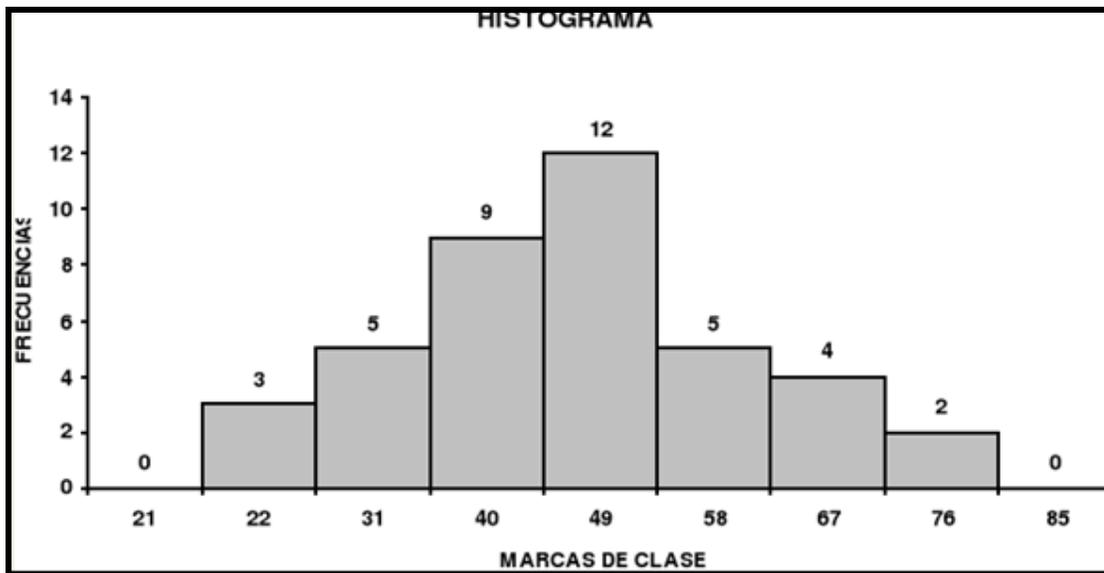


Figura 3.6 Modelo de un Histograma de frecuencia.

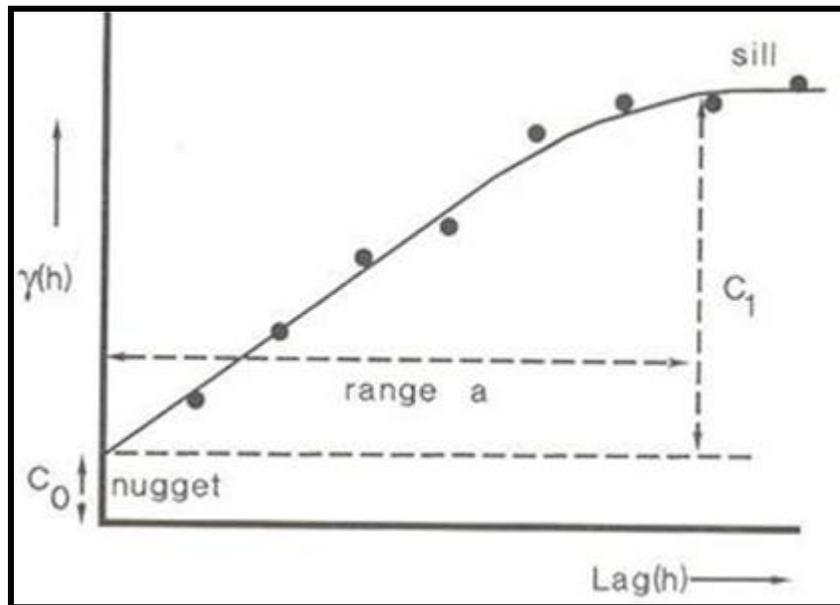
### 3.2.8. Variograma.

Es una medida del grado de correlación espacial o continuidad de alguna variable que representa una propiedad geofísica dada (Figura 3.7) (Ughi A., Com. Pers.).

La función  $\gamma(h)$  se denomina semivariograma, la cual puede ser obtenido por la expresión (3.19).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_p(h)} \sum_{i=1}^{N_p(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

(3.19)



**Figura 3.7** Modelo de variograma.  
 Modificado de [http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial\\_solar.html](http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial_solar.html)

donde:  $N_p(h)$  es el número de pares a la distancia  $h$ .

$h$  es el incremento.

$Z(x_i)$  son los valores experimentales.

$x_i$  localizaciones donde son medidos los valores  $z(x_i)$ .

### 3.2.9. Variograma direccional.

Es el que permite cuantificar la correlación espacial en una dirección preferencial (Ughi A., Com. Pers.).

### 3.2.10. Variograma experimental.

Es un modelo de correlación espacial generado a partir de datos de campo (Ughi A., Com. Pers.).

### **3.2.11. Parámetros para construir un variograma.**

#### **3.2.11.1. Azimuth.**

Es un ángulo con respecto al norte (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.11.2. Paso (*lag*). $\vec{h}$**

Es el tamaño del vector de desplazamiento de la propiedad (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.11.3. Tolerancia.**

Es un valor de la aceptabilidad del vector de desplazamiento de la propiedad según la correlación (Ughi A., Com. Pers.).

#### **3.2.11.4. Ancho de banda.**

Es la tolerancia en la magnitud del tamaño del salto con que se correlaciona el vector desplazamiento  $h$  (Ughi A., Com. Pers.).

### **3.2.12. Elaboración de un variograma en tres dimensiones.**

Debido a la variabilidad de elementos geológicos como la variedad estructural y de cuerpos sedimentarios, la elaboración de un variograma presenta, por lo general las siguientes dificultades:

### **3.2.12.1. El valor idóneo del paso (h).**

Una inadecuada selección de h puede proporcionar un semivariograma errático, aunque no se puede dar un criterio exacto o aproximado sobre cuál es el mejor valor de h, es recomendable recalcular g (h) para distintos valores de h, hasta encontrar una forma suavizada del mismo. Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>

### **3.2.12.2. Distribuciones con valores extremos.**

La existencia de valores extremos, altos o bajos, en una distribución, puede conducir a la obtención de un variograma fuertemente errático. En este caso la solución puede ser simple, eliminar los datos extremos, porque pueden ser ocasionados por errores, en otros casos pueden encontrarse en zonas geográficamente distintas y pueden ser tratados de manera separada. Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>

### **3.2.12.3. La existencia de poblaciones mixtas.**

Existen datos que pueden mostrar diferentes poblaciones, los cuales pueden estar estadísticamente diferenciados. En muchos casos las poblaciones están geográficamente diferenciadas, donde se recomienda tratar las zonas por separado. En otros casos las poblaciones se presenten mezcladas geográficamente, en este caso una solución puede ser un cambio de escala, con lo que se logra reducir la diferencia de los valores extremos. Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>

En Krajewski y Gibbs (1993) se presentan otras razones por los que los variogramas son erráticos, las cuales son:

- 1.- No hay suficientes muestras.
- 2.- Las muestras no son representativas del fenómeno.
- 3.- Las clasificaciones de las muestras no son válidas.
- 4.- El área estudiada no es homogénea.
- 5.- Pequeños o largos conjuntos de datos son necesarios.
- 6.- Pequeñas o largas distancia deben ser calculadas.
- 7.- Más o menos distancias deben ser calculadas.
- 8.- Pequeñas tolerancias son necesarias.
- 9.- Las muestras pueden tener localizaciones incorrectas.
- 10.- Los valores muestreados pueden ser erróneos.

### **3.2.13. Elementos de un variograma.**

#### **3.2.13.1. Meseta (*sill*).**

Es el valor de  $\gamma(h)$  para el cual con el aumento de  $h$  su valor permanece constante. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del variograma y su valor se lee en la intersección de esta línea con la ordenada, es decir es el valor de mayor variación que ocurre entre los datos experimentales para una dirección específica y es el punto de inflexión de la curva y su valor de varianza es la proyección sobre el eje y lo que corresponde a los valores de  $\gamma(h)$ . Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>

#### **3.2.13.2. Alcance o rango**

Es la máxima distancia en unidades de longitud en que se produce la meseta (Ughi A., Com. Pers.). La distancia  $h$  para la cual las variables  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  son independientes, se denomina alcance y se representa por  $(a)$ , es decir,

las distancias para la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el variograma alcanza su meseta. Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>

El alcance siempre tiene valor positivo y puede ser obtenido a partir de la intersección de las líneas descritas en los puntos anteriores, ese punto leído en la abscisa es una fracción del propio alcance.

### **3.2.13.3. Efecto pepita (*Nugget effect*).**

Indica la existencia de una variabilidad a una distancia mínima (Ughi A., Com. Pers.). El variograma por definición es nulo en el origen, pero en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar discontinuidad en el origen, a esta discontinuidad se le llama efecto de pepita, en inglés (*Nugget effect*). Puede ser obtenido trazando una línea recta entre los primeros puntos del variograma empírico y extender ésta hasta que se intercepte con el eje Y. Si esta intersección ocurre por debajo de cero, el valor asumido por este efecto es cero, pues valores negativos de  $g(0)$  no tienen significado y no es común. El efecto pepita se representa como  $C_0$  (Figura 3.8). Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>

### **3.2.14. Modelos matemáticos que se usan en la elaboración de variogramas.**

#### **3.2.14.1. Modelo esférico.**

Este modelo es probablemente el más utilizado, es una expresión polinomial simple, en su forma representada en la figura 3.7, se puede

observar un crecimiento casi lineal y después a cierta distancia finita del origen se alcanza una estabilización, la meseta. La tangente en el origen encuentra a la meseta en el punto de abscisa  $(2/3)a$ , donde  $a$  representa el valor del alcance, la ecuación 3.20 representa la expresión matemática para este modelo. Tomado de:

<http://www.monografías.com/trabajos14/geoestadística/geoestadística.shtml>

La forma del variograma es bastante reveladora acerca de la clase de variación espacial presente en un área, y puede ayudar a decidir cómo proceder con la interpolación. Cuando la varianza del *nugget* es considerable pero no demasiado grande y hay claridad en el rango y en el *sill*, una curva conocida como el modelo esférico se podría ajustar al variograma observado. Tomado de:

[http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial\\_solar.html](http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial_solar.html)

Modelo esférico

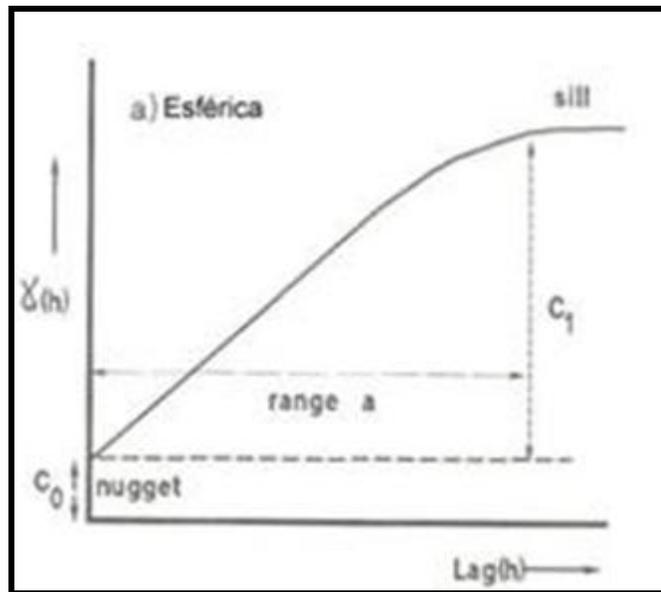
$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right\} \text{ para } 0 < h < a$$

$$= C_0 + C_1 \text{ para } h \geq a$$

$$\gamma(0) = 0$$

(3.20)

en donde “a” es el rango, h es el lag, C0 es la varianza del *nugget* y C0 + C1 es igual al *sill*.



**Figura 3.8.** Variograma efectuado bajo el modelo matemático esférico.  
 (Modificado de [http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial\\_solar.html](http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial_solar.html))

### 3.2.14.2. Modelo exponencial.

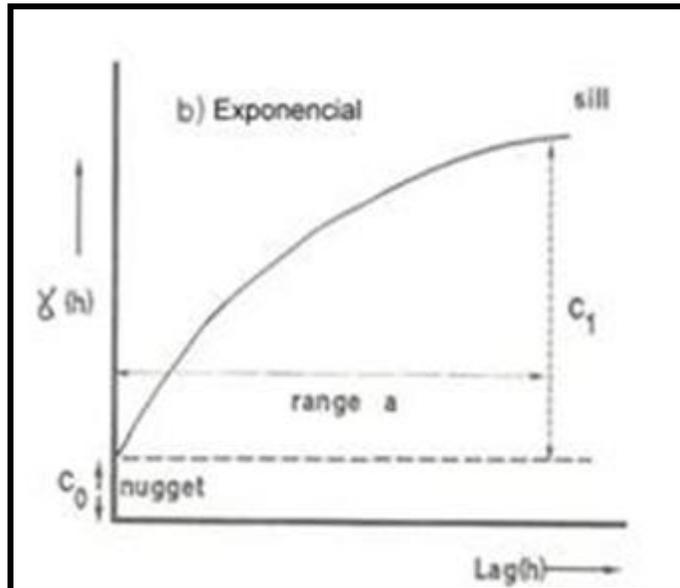
Este modelo (ecuación 3.21), a diferencia del esférico, crece inicialmente más rápido y después se estabiliza de forma asintótica figura 3.9. Como la meseta no se alcanza a una distancia finita, se usa con fines prácticos el “alcance efectivo” o “alcance práctico”  $a'$ , valor que se obtiene en el punto de abscisa para el cual el modelo obtiene el 95% de la meseta, con un valor  $a' = 3a$ , donde  $a$  es el parámetro de escala. La tangente en el origen encuentra a la meseta en el punto  $a = (1/3)a'$ . Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadística/geoestadística.shtml>

Si hay un claro *nugget* y *sill*, pero únicamente una aproximación gradual al rango, el modelo exponencial es la mejor selección.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-h/a\right) \right]$$

(3.21)



**Figura 3.9.** Variograma efectuado bajo el modelo matemático exponencial.  
 (Modificado de [http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial\\_solar.html](http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial_solar.html))

### 3.2.14.3. Modelo Gaussiano.

Este es un modelo extremadamente continuo (Figura 3.10), inicialmente presenta un comportamiento parabólico en el origen, después al igual que en el modelo Exponencial se alcanza la meseta de forma asintótica. El alcance práctico tiene un valor de  $a' = 1.73a$ , que es el valor de la abscisa donde se alcanza el 95% de la meseta (ecuación 3.22). Tomado de:  
<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadística/geoestadística.shtml>

Si la variación es muy suave y la varianza del *nugget*  $C_0$  es muy pequeña comparada con la variable aleatoria  $C_0$ , entonces el variograma se ajusta mejor a una curva que tiene una inflexión tal como el modelo Gaussiano.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)^2 \right]$$

(3.22)

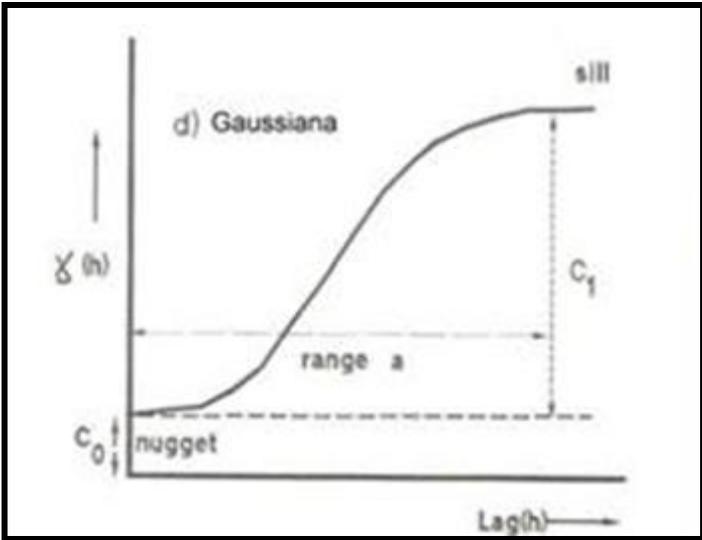


Figura 3.10. Variograma efectuado bajo el modelo matemático Gaussiano.  
(Modificado de [http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial\\_solar.html](http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial_solar.html))

**3.2.15. Problemas en el modelaje de variogramas.**

Los problemas más comunes al modelar semivariogramas que complican este proceso se presentan en Krajewski y Gibbs (1993).

1.- **La anisotropía geométrica está presente:** Indica que los variogramas direccionales tienen la misma meseta pero diferentes alcances, ésta puede ser corregida a través de una transformación lineal de coordenadas que permita reducir una elipse a un círculo.

2.- **La anisotropía zonal está presente:** indica que tanto las mesetas como los alcances son diferentes para los variogramas direccionales, puede ser

corregido separando el variograma en sus componentes isotrópicos horizontal y anisotrópico vertical.

3.- **La tendencia de los datos está presente:** Indica que los valores medidos aumentan o disminuyen dramáticamente en la zona estudiada con el aumento de la distancia. Esto puede ser resuelto aplicando polinomios a la ecuación del variograma, es decir un análisis de tendencia.

4.- **El efecto proporcional está presente:** Indica que la desviación estándar local es proporcional al cuadrado de la media local y que los datos presentan una distribución lognormal, puede ser resuelto dividiendo cada valor del variograma local por el cuadrado de la media local, es decir usando variogramas relativos.

5.- **Existencia de estructuras anidadas:** Indica que diferentes procesos operan a diferentes escalas, como por ejemplo alguno o todos los siguientes: A muy pequeñas distancias la variabilidad puede estar presente debido a cambios de una composición mineral a otra. A pequeñas distancias la variabilidad puede estar presente debido a errores. A grandes distancia la variabilidad puede estar presente debido a casos transitorios de desgaste mineral. El cual puede ser resuelto aplicando varios modelos simultáneamente.

6.- **Existencia de efecto hueco:** Indica que muy pocos pares están disponible para la comparación a una distancia específica. Y puede ser resuelto recuperando más casos para la distancia definida.

7.- **La periodicidad está presente:** Indica que el comportamiento del variograma repite por sí mismo periodicidades, por ejemplo: El valor de la meseta puede aumentar o disminuir sistemáticamente, o un caso en que los

valores son tomados alternativamente a través de diferentes estratos, como piedras areniscas, esquistos, etc. Esto puede ser resuelto si es un problema real y no un artificio del análisis, la periodicidad puede ser también un fenómeno real mostrado por zonas ricas y pobres repetidas a espacios similares. Tomado de:

<http://www.monografías.com/trabajos14/geoestadística/geoestadística.shtml>

### 3.2.16 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

El cálculo del coeficiente de correlación lineal se realiza dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables (ecuación 3.23):

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

(3.23)

Siendo:

$\sigma_{XY}$  la covarianza de (X,Y)

$\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  las desviaciones típicas de las distribuciones marginales.

El valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1, +1]:

Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica una independencia total entre las dos variables, es decir, que la variación de una de ellas puede influir en el valor que pueda tomar la otra. Pudiendo haber

relaciones no lineales entre las dos variables. Estas pueden calcularse con la razón de correlación.

Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en idéntica proporción.

Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.

Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en idéntica proporción.

Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa. Tomado de:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Covarianza>

### 3.2.17. Covarianza.

En estadística la covarianza es una medida de dispersión conjunta de dos variables estadísticas.

La covarianza  $S(X,Y)$  de dos variables aleatorias  $X$  e  $Y$  se define como:

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i,j} x_i y_j n_{ij} - \bar{x}\bar{y}$$

(3.24)

Si  $S_{xy} > 0$  hay dependencia directa (positiva), es decir, a grandes valores de  $x$  corresponden grandes valores de  $y$ .

Si  $S_{xy} = 0$  Una covarianza 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas.

Si  $S_{xy} < 0$  hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de  $x$  corresponden pequeños valores de  $y$ .

Si  $X$  e  $Y$  son independientes, entonces su covarianza es cero. Esto ocurre por la propiedad de independencia, pero lo contrario no es cierto se debe

tener una normalidad multivariada de los datos, que implica que los datos de  $y$  deben ser normales, los valores de  $x$  deben ser normales y la distribución de  $xy$  en conjunto deben ser normales. Tomado de:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Covarianza>

### 3.2.18. Desviación típica o estándar.

La desviación estándar o desviación típica ( $\sigma$ ) es una medida de centralización o dispersión para variables de razón (ratio o cociente) y de intervalo, de gran utilidad en la estadística descriptiva.

Se define como la raíz cuadrada de la varianza (3.25). Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable,  $\mu$  es la media aritmética del conjunto de datos. Tomado de:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Desviaci%C3%B3n\\_est%C3%A1ndar](http://es.wikipedia.org/wiki/Desviaci%C3%B3n_est%C3%A1ndar)

$$\sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}} \quad (3.25)$$

### 3.2.19. Regresión lineal.

La regresión lineal (3.26) permite que a partir de una recta se pueda ver la tendencia de dos conjunto de datos que se cruzan, son las rectas que mejor se ajustan a la nube de puntos (o también llamado diagrama de dispersión) generada por una distribución binomial (Ughi A., Com. Pers.).

$$y = \bar{y} + \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2}(x - \bar{x}) \quad (3.26)$$

### 3.3. Análisis multivariado.

Consiste en hallar un operador lineal o no lineal que permita efectuar la correspondiente simulación de un atributo en una o varias direcciones, para esto inicialmente se deben correlacionar los atributos y las propiedades a propagar. En el análisis multivariado existen la interpolación por el método del Kriging y cokriging, ambas con un propósito en común, la interpolación de propiedades en varias direcciones. La diferencia que el cokriging incluye una variable adicional a las empleadas en el kriging. Tomado de:

<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadística/geoestadística.shtml>

En este trabajo se darán detalles teóricos del cokriging simple ya que es el método de interpolación usado por la plataforma de PETREL, en el modelado de cubos de pseudos propiedades.

#### 3.3.1. Cokriging simple.

Es una técnica de interpolación de datos basada en fundamentos estadísticos como la media aritmética y la varianza, asumiendo que la media aritmética no cambia lateralmente, que las variables son estacionarias, es decir que no cambian en el tiempo ni el espacio, por lo tanto actúan en todas las direcciones de la misma manera y no tienen tendencia. Los datos de entrada son los variogramas y los puntos de datos. Kriging es un sistema de ecuaciones lineal donde los valores de variograma son los conocidos parámetros, y los pesos de los parámetros del kriging son desconocidos.

De forma más simple la técnica del kriging como una estimación basada entre los resultados del variograma y los parámetros localizados en el vecindario del valor a estimar, este valor es estimado por medio de la ecuación 3.27.

$$z(x_0) = \sum_i^n \lambda_i z(x_i) + [1 - \sum_i^n \lambda_i] m$$

(3.27)

Donde  $\lambda_i$  es el peso desconocido de cada valor del entorno al valor a calcular, estos pesos son calculados a través de la ecuación matricial (3.28)

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \gamma_{ij} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

(3.28)

El valor de  $\gamma$  (gamma) son los valores obtenidos a partir de la ecuación del modelo de variograma escogido. Cabe destacar que la suma de los pesos ( $\lambda$ ) debe ser igual a 1. (Schlumberger, PETREL Seismic to simulation Software)

### **3.4. Conceptos de geología.**

#### **3.4.1. Ambientes sedimentarios.**

Los ambientes sedimentarios que rigieron el proceso de la Formación Guafita son los que serán tratados en esta parte. Según Klein 1985 los ambientes sedimentarios se clasifican en:

- ✓ Ambientes continentales.
- ✓ Ambientes transicionales.
- ✓ Ambientes marinos.

El ambiente que rige la Formación Guafita es el de ambientes transicionales, en donde se localiza el ambiente deltaico.

#### **3.4.2. Modelo de sedimentación de ambiente deltaico.**

Las secuencias depositacionales deltaicas (Figura 3.11) resultan de la interacción de un conjunto de procesos dinámicos tales como energía de las olas, régimen de marea, corrientes, clima, etc., los cuales modifican y dispersan los depósitos clásticos provenientes de los ríos. El término delta se puede definir como las características depositacionales, tanto subaéreas como subacuáticas, formadas por los sedimentos fluviales. Los sedimentos fluviales pueden ser fuertemente modificados por fuerzas marinas tales como olas, oleaje, corrientes y mareas, por lo que las características depositacionales encontradas en los deltas presentan una alta variedad (Ochoa R. C, 2007).

Los depósitos característicos de un delta son: canales distributarios, barras de desembocadura, bahías interdistributarias, llanuras de marea, lomas de marea, playas, dunas eólicas, pantanos, marismas y llanuras evaporíticas. Para que exista una depositación de gran cantidad de

sedimentos, debe estar presente un gran sistema fluvial, que descargue la gran cantidad de sedimentos hacia la costa, donde se formará un depósito de llanura deltaica (Ochoa R. C, 2007).

Los deltas se forman por la competencia entre los sistemas marinos y fluviales al momento en que haya influencia de carga y descarga de uno con respecto al otro en un proceso constructivo y destructivo, estando en este proceso el oleaje, las mareas y las crecidas de los ríos, a la vez estos se pueden ver influenciados por procesos tectónicos. Los procesos básicos que dominan la formación de un sistema deltaico son, el aporte de sedimentos, el flujo de energía de las olas y el flujo de energía de las mareas. De esto último los deltas se clasifican en:

#### **3.4.2.1. Deltas dominados fluvialmente.**

En un sistema deltaico dominado fluvialmente, la tasa y el volumen de aporte de sedimento, excede la capacidad flujo marino. Dependiendo del dominio relativo que tengan los procesos constructivos fluviales sobre los destructivos, la geometría de los lóbulos del delta serán altamente elongados y digitados a redondeados o lobulares. Ejemplo de éste tipo de delta es el delta del río Mississippi. (Galloway y Hobday, 1996).

#### **3.4.2.2. Deltas dominados por oleaje.**

En un sistema deltaico dominado por oleaje, los sedimentos que inicialmente se han depositado en la boca de los canales distributarios es retrabajado por el oleaje y redistribuido a lo largo del frente deltaico por las corrientes costeras. Barras de desembocaduras de forma arqueadas, consistiendo de crestas de playa coalescientes. Numerosos deltas oceánicos

modernos, incluyendo el Rhone, Magdalena, Tiber, Nilo, Burdekin y Kelantan son dominados por olas. (Galloway y Hobday, 1996).

#### **3.4.2.3. Deltas dominados por mareas.**

A medida que el rango de las mareas y sus corrientes se incrementan, se modifican la geometría de la desembocadura de los canales distributarios y redistribuyen los sedimentos que han sido depositados en la boca de los mismos. En este caso, al contrario de los deltas dominados por oleaje, la dirección de transporte del sedimento es principalmente perpendicular a la costa, hacia dentro y hacia fuera del canal, sobre un extenso prodelta de aguas poco profundas construido por la mezcla y decantación rápida de los sedimentos en suspensión. Las barras de desembocadura son retrabajadas como una serie de barras elongadas que se extienden tanto dentro de la boca de los canales distributarios como en la plataforma del delta subacuática. Ejemplos de deltas dominados por mareas son: Mahakam, Niger, Ganges, Oomkens, y Klang-Langat. (Galloway y Hobday, 1996).

De los tipos de deltas anteriormente nombrados no necesariamente pueden estar influenciados particularmente así, sino que también pueden intervenir los tres procesos.

#### **3.4.2.4. Facies y ambientes depositacionales de un Ambiente Deltaico.**

Puede ser subdivididos en dos marcos fisiográficos, donde los componentes son subaéreos y otros donde son subacuáticos. Los componentes subaéreos se dividen frecuentemente en llanura deltaica alta y baja (Ochoa R. C, 2007).

### **3.4.2.5. Llanura deltaica alta**

En esta se desarrollan canales entrelazados y canales meandriformes, relleno lacustrino de delta, ciénagas y llanuras de inundación (pantanos, ciénagas y lagos de agua dulce) (Ochoa R. C, 2007):

#### **3.4.2.5.1. Depósitos de canales meandriformes y distributarios.**

Los ríos meandriformes tienden a estar confinados a un solo canal principal, caracterizado por bancos cohesivos que difícilmente se erosionan. Éstos presentan una gran sinuosidad, se desarrollan en lugares con una baja pendiente y una carga sedimentaria principalmente de tamaño fino. Esta abundancia de sedimentos finos permite la construcción de extensas llanuras fluviales arcillosas que estabilizan las márgenes de los canales, frenando la migración lateral de los mismos. (Boggs, S., 2006).

Los sedimentos que se transportan por el cauce del canal son depositados en la parte más proximal del frente deltaico, si el delta es progradante, estos sedimentos constituirán la parte alta de un ciclo depositacional para los frentes deltaicos. Los causes quedan limitados lateralmente por diques algo más elevados que llegan a introducirse dentro de las aguas marinas, formando el dique subacuático. Hacia el mar estos diques van progresivamente perdiendo altura y por lo tanto la potencia de sus sedimentos hasta desaparecer por completo. La parte subacuática se halla continuamente expuesta a la acción del oleaje y al influjo de las mareas. (Boggs, S., 2006).

#### **3.4.2.5.2. Llanuras de inundación.**

Las llanuras de inundación se forman por la acreción vertical en la cual se acumulan sedimentos de grano fino que han sido transportados en suspensión cuando en períodos de inundación el río se desborda. Estos depósitos están constituidos por limos, limos arcillosos y arcillas, masivos, ricos en materia orgánica y en depósitos de carbón. (Boggs, S., 2006).

#### **3.4.2.5.3. Depósitos de canal.**

Se encuentran constituidos principalmente por depósitos de fondo de canal (*channel lag*) y están compuestos por material grueso que el río sólo puede mover durante períodos de inundación, donde la velocidad de la corriente es máxima. Estos depósitos son, por lo general, discontinuos, delgados y presentan forma lenticular. La estratificación no se observa en estos materiales gruesos, pero la imbricación de guijarros es común. El material que los constituye es grueso, tales como grava, bloques parcialmente consolidados de arcillas que han sido localmente erosionadas de las paredes del canal, pudiendo también encontrarse fragmentos de madera, etc. Están recubiertos por sedimentos de grano más fino, que corresponden a las barras de canal (Ochoa R. C, 2007).

#### **3.4.2.5.4. Depósitos de diques.**

Durante las crecidas el nivel del agua aumenta y el río desborda el canal. Esto provoca la sedimentación de materiales en suspensión en el margen del canal, formando los diques fluviales a uno y otro lado del canal. Estos diques pueden alcanzar alturas de varios metros por una anchura de unos centenares de metros. Los diques juegan un papel morfológico importante

puesto que tienden a limitar el canal y a frenar su migración lateral. (Ochoa R. C, 2007).

#### **3.4.2.5.5. Canales abandonados.**

Los meandros pueden ser abandonados gradualmente o violentamente. Cuando son abandonados gradualmente, el río progresivamente invade la llanura de inundación, y simultáneamente el flujo disminuye gradualmente en el canal principal. La disminución paulatina en el flujo del canal provoca el abandono gradual del meandro, lo cual se refleja en los sedimentos por el desarrollo de espesas secuencias con estructuras sedimentarias de bajo flujo (esencialmente laminación cruzada de rizaduras). Después de que el canal es completamente abandonado, se forma un lago con forma de herradura, donde la sedimentación está restringida a finos (arcillas y limos) que se depositan durante los períodos de inundación de la corriente principal. (Boggs S., 2006)

#### **3.4.2.6. Llanura deltaica baja.**

Se desarrolla donde ocurre la interacción fluvial-marina y se extiende desde el límite de la marea baja hasta el límite de la marea alta, por lo que su extensión se encuentra controlada por el rango de las mareas y por la pendiente de la topografía. Los principales ambientes depositacionales de la llanura deltaica baja son: depósitos de relleno de bahía (bahías interdistributarias, abanicos de rotura, diques naturales) y relleno de canales distributarios abandonados (Ochoa R. C, 2007):

#### **3.4.2.6.1. Depósitos de relleno de bahías.**

Los depósitos de relleno de bahía representan arealmente la mayor parte de la llanura deltaica baja, por ejemplo Las bahías interdistributarias son normalmente cuerpos de agua, por lo general, completamente rodeados por canales distributarios. Frecuentemente, sin embargo, las bahías interdistributarias se encuentran parcialmente abiertas hacia el mar o conectadas a éste por un pequeño canal de marea (Ochoa R. C, 2007).

#### **3.4.2.6.2. Canales distributarios.**

Los canales distributarios presentan muchas de las características de los canales fluviales. El flujo unidireccional es predominante, con estados de fluctuaciones periódicas. Los sistemas de canales pueden tener, o no, una alta sinuosidad dependiendo de la pendiente y del tamaño de grano del sedimento. Los depósitos resultantes son, por lo general, granodecrecientes, aunque pueden ser agradantes, y se inician con una base erosiva y con sedimentos gruesos que pasan a arenas con estratificación cruzada que pueden alternarse con limos y arcillas. Hacia el tope aparecen restos de raíces o cualquier característica que indique emersión. Mientras que la unidad inferior del canal distributario son arenas masivas con estratificación tabular que frecuentemente pueden mostrar bioturbaciones en caso de ser un distributario muerto (Ochoa R. C, 2007).

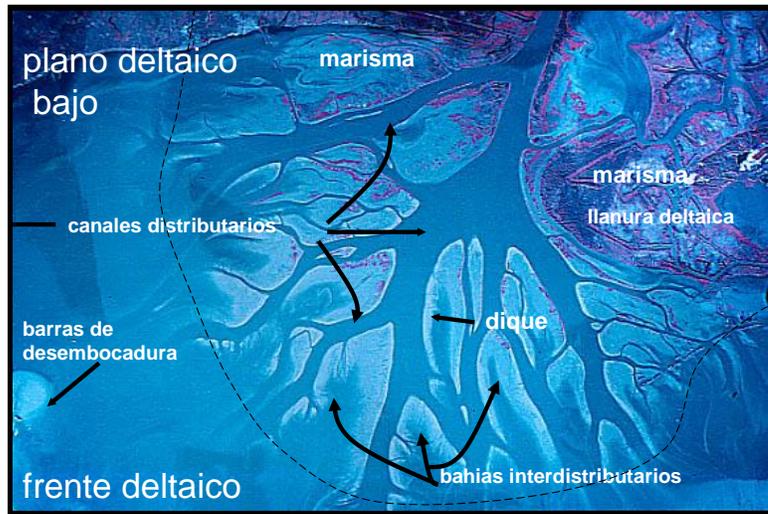
#### **3.4.2.6.3. Barras de desembocadura.**

Las barras de desembocadura presentan características mixtas entre canales fluviales o distributarios y barra-cordón de playa. El flujo unidireccional es predominante, con estados de fluctuaciones periódicas. Los sistemas de boca de desembocadura no tienen una alta sinuosidad y son

generalmente muy sensibles a los fenómenos de marea. Los depósitos resultantes son por lo general granocrecientes. Se inician con una base agradante con sedimentos finos y limosos que pasan a arenas con estratificación tabular que pueden alternarse con limos y arcillas. Hacia el tope aparecen restos de raíces o cualquier característica que indique emersión. La secuencia vertical resultante de una barra de desembocadura es granocreciente con arcillas de agua somera salobre y materia orgánica hacia la parte inferior y arenas bien escogidas hacia la parte superior, son arenas masivas con estratificación tabular que frecuentemente pueden mostrar bioturbaciones.

#### **3.4.2.6.4. Playas y frente deltaico.**

Las playas llegan a constituir la facies más abundante en algunos deltas dominados por olas y oleaje, como es el caso de la Formación Oficina como paleo-delta del río Orinoco. Los depósitos característicos presentan estratificación planar de bajo ángulo y son granocreciente como consecuencia de la progradación de la anteplaya (Galloway y Hobway, 1996). La secuencia vertical resultante de una barra de playa o de un cordón de playa es cilíndrica. La unidad superior se encuentra asociada con depósitos limosos y paleosuelos con bioturbaciones, mientras que la unidad inferior y la mayor parte de la barra de playa son arenas masivas con estratificación tabular o planar de bajo ángulo. (Informe Final Guico Guara, 2002)



**Figura 3.11.** Ambiente de sedimentación deltaico  
(Modificado de las clases de estratigrafía U.C.V)

### 3.5. Ambientes fluviales.

El canal o río, la llanura aluvial y los conos aluviales, viéndolos desde una escala menor al frente deltaico, presentan un flujo de energía debido a las corrientes y el material sedimentario, puede ser desde un bloque hasta arcilla, estos canales de río pueden clasificarse en: rectilíneos, meandriiformes, entrelazados y anastomosados. (Figura 3.12).

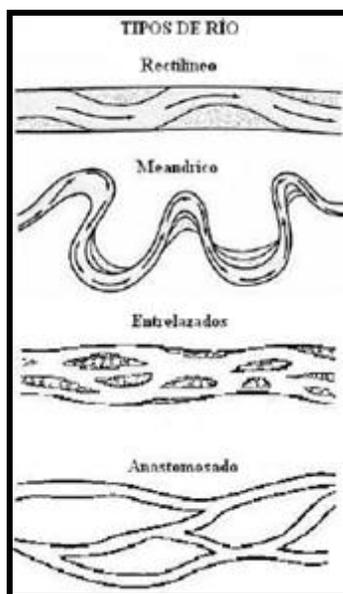


Figura 3.12. Tipos de ríos. Modificado de Quilen K. 2006.

### 3.5.1. Canales rectilíneos.

Estos canales son inusuales aunque, se presentan en deltas (Alfonso, 1997). Sus profundidades son variables se forman barras por acumulación de material fino, las cuales se alteran de una rivera a la otra como en el caso de las corrientes meandriformes (Quilen K., 2006).

### 3.5.2. Canales entrelazados.

Se forman por corrientes separadas por barras de sedimentos depositadas por el mismo canal, algunos factores que favorecen la formación de canales entrelazados son: la alta pendiente del terreno, las variaciones rápidas en el régimen de flujo y la disponibilidad abundante de material grueso. Las secuencias sedimentarias de este tipo de canales muestran espesores hasta de 5 metros es decir 17 pies aproximadamente, con estratificación cruzada festoneada a gran escala en la base, así como estratificación cruzada planar y rizaduras hacia el tope. Estos depósitos presentan buena porosidad y

permeabilidad, representando así, cuerpos favorables para la acumulación de hidrocarburos (Alfonso, 1997).

### **3.5.3. Canales anastomosados.**

Son considerados como una variación de los sistemas de canales meándricos, de alta sinuosidad, estables y permanentes, (Miall, 1977). El término anastomosados se emplea para describir un complejo de depósito fluvial de gradiente muy bajo, donde se interconectan una serie de canales de muy alta sinuosidad, angostos y relativamente profundos (Smith, 1980). Estos sistemas se encuentran separados por planicies de inundación, parecidas a islas con abundante vegetación, diques naturales y áreas donde pueden desarrollarse abanicos de rotura. Los canales son rellenados con arena y grava y las planicies de inundación se caracterizan por presentar limo-arcilloso, incluyendo depósitos de pantano con alto contenido de materia orgánica, una de las características distintivas de este tipo de sistema fluvial es la existencia de abundantes raíces en los sedimentos finos de las planicies de inundación, así como la acumulación de materia orgánica (Smith, 1983), las condiciones en que se desarrollan este tipo de ríos se mantienen en cuencas ante país y sistemas de grábenes (Quilen K., 2006).

## **3.6. Aspectos estructurales.**

### **3.6.1. Fallas.**

Es una discontinuidad que se forma por la fractura tangencial en las rocas debido a esfuerzos tectónicos, la cual puede observarse a simple vista en superficie si la falla aflora, generalmente se define una superficie de deslizamiento siendo una de las característica principales para la definición del tipo de falla que se observa (BeicipFranlap, 2007).

### **3.6.2. Partes de una falla.**

- **Plano de falla:** Es la superficie donde se desplazan los estratos superiores, se puede notar cuando esta liza o estriada por lo cual se le dice espejo de falla.
- **Bloque de piso:** Es donde se observa el deslizamiento del otro bloque y se reconoce por la presencia del plano de falla.
- **Bloque del techo:** Es el bloque que descansa sobre el plano de falla (BeicipFranlap, 2007).

En los casos que la falla sea vertical no se habla de bloque del techo o bloque del piso.

### **3.6.3 Fallas fundamentales.**

#### **3.6.3.1 Falla normal.**

Es cuando el bloque del techo se desplaza hacia abajo del bloque del piso, debido a esfuerzos de tracción (BeicipFranlap, 2007).

#### **3.6.3.2 Falla inversa.**

Es cuando el bloque del techo se desplaza hacia arriba del bloque del piso, debido a esfuerzos de compresión (BeicipFranlap, 2007).

#### **3.6.3.3 Falla transcurrente.**

Es cuando el desplazamiento es lateral y puede ser hacia a la derecha, por lo que se le da la denominación de transcurrente dextral, y si es a la izquierda se le da la denominación de transcurrente sinistral. En ocasiones

se puede observar cierta inclinación que permite dar una tercera cualidad como normal o inversa según sea el desplazamiento del bloque del techo con respecto al bloque del piso (BeicipFranlap, 2007).

#### **3.6.4 Arreglo geométrico de fallas.**

En muchas ocasiones las fallas geológicas se curvan ya que los materiales no son isotrópicos, esto debido a que los ambientes en que se forman las diferentes capas del subsuelo, son por lo general distintos, por lo cual hay diferencia de sedimentos y en consecuencia no es igual la compactación, siendo un efecto principal de esto la profundidad, también la presencia de estructuras previas afecta el arreglo de las fallas. A escala local o regional induce variaciones direccionales en el vector de propagación de una falla, en otras palabras, una falla o zona de falla no puede mantener una continuidad en el rumbo, debido a los cambios físicos que encuentra en el camino (Oyarzun R. 2008).

A lo largo de las fallas transcurrentes, pueden observarse zonas de falla que pueden disponerse espacialmente de diversas maneras: en échelon (o escalonadas), en relevo, anastomosadas, en terminaciones en "cola de caballo" (Figura 3.13). Estas disposiciones reflejan las diferentes formas en que se puede distribuir el deslizamiento en función de las condiciones reológicas y el esfuerzo total que tiene que ser acomodado. Cabe destacar que algunas de las consecuencias estructurales más interesantes desde el punto de vista de los yacimientos ocurren justamente donde las fallas se curvan o se escalonan (Oyarzun R. 2008).

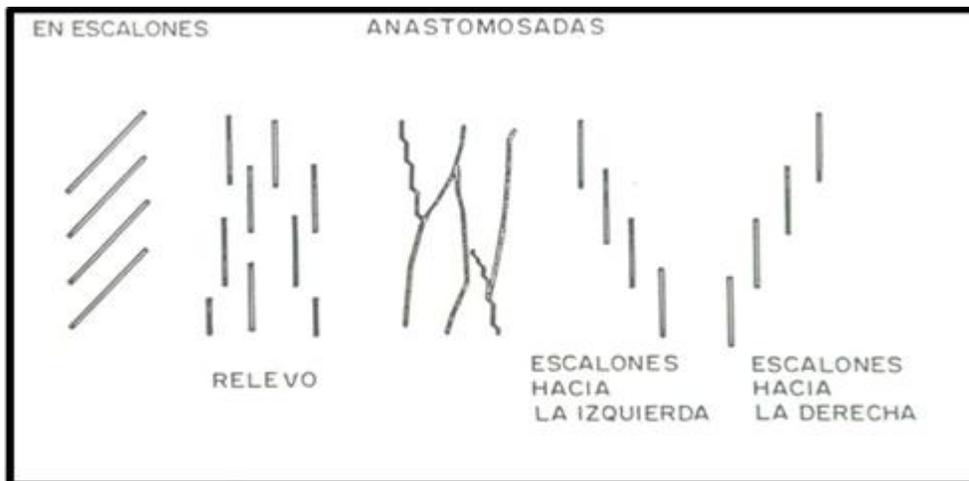


Figura 3.13. Diversos arreglos de fallas (Modificado de Davis y Reynolds, 1996).

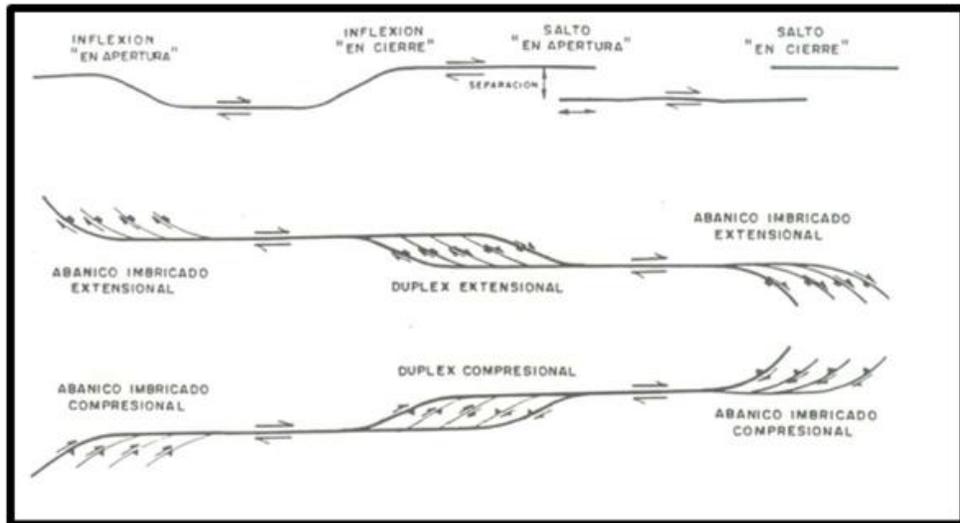
### 3.6.5 Duplexes y estructuras en flor.

La presencia de inflexiones y saltos a lo largo de una falla promueve la formación de estructuras denominadas duplexes (Woodcox y Fischer, 1986). Las rocas que se encuentran dentro de la zona de influencia de una inflexión o salto se pueden fallar progresivamente (fallas menores paralelas a la dirección de la inflexión) generando sistemas imbricados en relación a la falla principal. Por otra parte en el caso de fallas de traza recta, la formación de un duplex puede originarse a través del desarrollo de fracturas de Riedel (Oyarzun R. 2008).

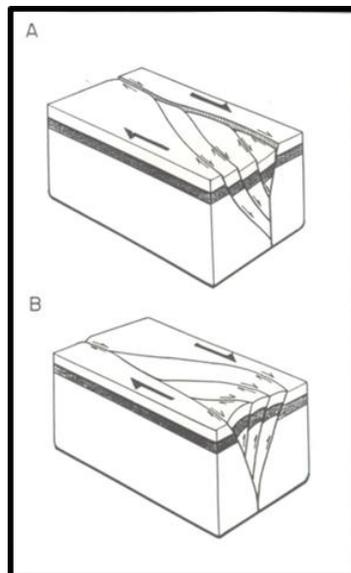
El análisis del proceso de formación de duplexes puede realizarse a través de dos mecanismos: procesos de deformación planar y de deformación no planar (Davis y Reynolds, 1996). En el caso teórico de la deformación planar si una esfera es deformada triaxialmente y ocurre un estiramiento en la dirección  $S_1$  (máximo estiramiento) éste será compensado de manera perfecta por un acortamiento en la dirección  $S_3$  (mínimo estiramiento), sin que se produzcan cambios en la dirección  $S_2$ , así una esfera perfecta se transformará en un elipsoide perfecto (de revolución) (Figura 3.14). Si

llevamos esto al caso que nos interesa (sistemas de fallas transcurrentes), la situación será la siguiente (Woodcock y Fischer, 1996): dado que  $\sigma_1$  (esfuerzo máximo) y  $\sigma_3$  (esfuerzo mínimo) están en la horizontal, todos los cambios ocurrirán ahí. En otras palabras, bajo esta perspectiva teórica, no habría levantamientos o hundimientos, ya que estos tendrían que ocurrir en la dirección de  $\sigma_2$  (en este caso, equivalente a  $S_2$ ), que es perpendicular a la superficie horizontal. La deformación planar es difícil de mantener en sistemas reales, pero sirve en todo caso como referente para introducir el modelo cinemático (Oyarzun R. 2008).

La diferencia principal que presentará la formación de duplexes por deformación no planar se encuentra en la compensación volumétrica por hundimientos y levantamientos. Así en duplexes extensionales se formaran hundimientos, y en los compresionales, levantamientos. Unas de las estructuras más notables derivadas de la deformación no planar son las denominadas flor positiva y flor negativa (Woodcock y Fischer, 1986) (Figura 3.15), que a su vez se corresponden con los casos de duplex compresional y extensional, respectivamente. La geometría interior de las fallas secundarias en un duplex muestra que estas convergen en profundidad hacia una zona de falla única. En el caso de una estructura en flor negativa, las fallas secundarias dentro del duplex tendrán un comportamiento mixto, transcurrente-normal, por lo cual podemos decir que la zona interior está en extensión y sometida a hundimiento. Por el contrario, en una estructura tipo flor positiva, las fallas interiores se comportarán como transcurrentes-inversas, por lo cual podemos decir que la zona está en compresión y por lo tanto sometida a levantamiento (Oyarzun R. 2008).



**Figura 3.14.** Inflexiones, saltos, abanicos imbricados y duplexes en sistemas transcurrentes. Modificado de Woodcock y Fischer 1986.



**Figura 3.15.** (A) Estructuras en flor negativa y (B) estructuras en flor positiva. Modificado de Woodcock y Fischer 1986.

## **CAPITULO IV**

### **METODOLOGÍA**

Luego de recopilar la información necesaria para dar comienzo al desarrollo de este trabajo, se efectuaron 2 etapas las cuales están enmarcadas en el uso de dos plataformas de interpretación, estas fueron Geoframe 4.2 y PETREL.

La plataforma de Geoframe, se usó en lo correspondiente a la interpretación sísmica en unidades de tiempo de los horizontes de los yacimientos G7-2 Inferior, G8, G9, G10, además de la interpretación de fallas geológicas, como la falla Guafita-CañoLimón y fallas secundarias asociadas a la zona de la trampa GF-205X, con su respectiva transformación en unidades de profundidad, los mapas de los horizontes en unidades de profundidad presentan anomalías en las curvas de nivel ya que no se contó con una buena distribución de pozos en la ventana de estudio y tampoco las herramientas para efectuar una buena la calibración de velocidades en el área afectada la cual está alejada a la de máximo interés que es la de la Trampa GF-205X finalmente se utilizó el atributo de buzamiento para comprobar la existencia de las fallas interpretadas.

Luego de exportar los archivos de horizontes y fallas interpretadas en la plataforma de Geoframe, estos se usaron en la plataforma de PETREL, donde las fallas geológicas interpretadas fueron observadas en un cubo de

seguimiento “*Ant Tracking*” el cual es un algoritmo que se le aplica a un cubo de varianza, con la finalidad de darle mayor control de calidad a las fallas, ya que este algoritmo destaca las discontinuidades geológicas que estén presentes en la sísmica, y permite observar de forma más clara si las fallas tienen mayor continuidad lateral y vertical.

En un cubo sísmico generado a partir del reprocesamiento efectuado en el año 2006 y en unidades de profundidad, se interpretó el horizonte G7<sub>3/4</sub>, además de los topes de otros cuerpos sedimentarios como la lutita lignítica, la Lutita de Guafita y la discordancia de Quevedo. Para generar el modelo estructural 3D completo se elaboraron los horizontes en profundidad del paquete comprendido entre la arena G7-2 Inferior hasta la Discordancia de Quevedo que comprenden gran parte de la Formación Guafita .

Finalmente se efectuó el procedimiento de generación de cubos de atributos sísmicos y utilización de cubos de atributos generados por la empresa “GX TECHNOLOGY” para PDVSA en la inversión sísmica efectuada en el año 2006, además se elaboraron de gráficos cruzados, escalamientos de registros, variogramas y propagación de propiedades petrofísicas para elaborar los Cubo de Pseudo-propiedades como porosidad efectiva y arcillosidad, usando el método geoestadístico de cokriging, mas detalles de los procedimientos efectuados se presentan a continuación.

#### **4.1. Recopilación de Información.**

En esta etapa se revisaron trabajos de interpretación sísmica efectuados en las zonas correspondientes a los campos de explotación de PDVSA Centro Sur y los informes de adquisición y reprocesamiento de la sísmica correspondiente al Campo Guafita. Adicionalmente, se recopiló información geológica tanto a nivel bibliográfico como de las experiencias del grupo de

ingenieros del Departamento de Estudios Integrados Apure de PDVSA Centro-Sur.

La interpretación sísmica en tiempo se realizó en la plataforma de Geoframe 4.2 en la cual se encuentran cargados tanto el cubo sísmico procesado luego de la adquisición del año 2000, el cual es llamado "GUAFITA", como el cubo sísmico resultado de un reprocesamiento el cual finalizó en el año 2006. Este último fue el utilizado para la interpretación estructural en unidades de tiempo.

Del informe de adquisición sísmica del Campo Guafita se extrajo la siguiente información:

#### **4.1.1. Objetivos de la adquisición.**

A consecuencia de la complejidad estructural del área debido a la confluencia de dos direcciones estructurales relacionada con el levantamiento de Los Andes Venezolanos y la Cordillera Oriental de Colombia, cuyas direcciones estructurales son NE-SO y N-S, respectivamente, asociados al sistema de fallas Guafita-Caño Limón, dividiendo este sistema el campo en Guafita Norte y Guafita Sur definiendo los límites del yacimiento en la Formación Guafita y la Formación Quevedo.

Entre las estructuras más importantes se tienen pliegues dómicos y fallas regionales transcurrentes normales e inversas asociadas al Arco de Arauca las cuales permiten el entrapamiento de hidrocarburo, estratigráficamente, las principales rocas reservorios están constituidas por la secuencia de la Formación Guafita del Terciario y la Formación Quevedo del Cretácico.

#### 4.1.2. Datos del proyecto.

Las perforaciones para los puntos de tiro fueron de 10 metros de profundidad con una carga explosiva de 1 kg y 2 fulminantes y para la recepción de la señal, se usaron geófonos SERCEL SM 24 UB con resistencia eléctrica de 395 ohms. Los datos del proyecto de adquisición sísmica se concretan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos del proceso de adquisición sísmica del Proyecto.

DATOS	VALORES
Superficie	70 Km <sup>2</sup>
Nº de swath	5
Nº de líneas receptoras	23
Longitud de líneas receptoras	229,86m
Distancia entre líneas receptoras	360m
Distancia entre receptores	60m
Total de líneas de tiro	20
Longitud de líneas de tiro	24,56Km
Distancia entre líneas de disparo	600m
Distancia entre puntos de grabación	60m
Número de canales por línea receptora	140
Número de líneas receptoras por disparo	8
Número de trazas por disparo	1120 full spread
Canales auxiliares	3
Tamaño del Bin	30*30m
Arreglo de geófonos	Lineal
número de geófonos por traza	12
Distancia entre geófonos	3m
Longitud del arreglo de geófonos	33m
Ángulo entre líneas de tiro y receptoras	90°

Fuente: Informe de GXTecnology, 2006

El reprocesamiento que se efectuó a la sísmica en el año 2006, tuvo como finalidad mejorar la continuidad de los reflectores sísmicos y recuperar las altas frecuencias coherentes. La secuencia usada durante el reprocesamiento fue la siguiente:

- Conversión de formato.
- Geometría.
- Compensación de ganancia exponencial.
- Atenuación de ruido “*swdnoise*” 1er pase de corrección de amplitud consistente con superficie.
- 2do pase de corrección de amplitud consistente con superficie.

- Deconvolución “*spiking*” consistente con superficie.
- Balanceo espectral.
- 3er pase de corrección de amplitud consistente con superficie.
- Eliminación de la ganancia exponencial.
- Aplicación de estáticas de refracción.
- Aplicación de estáticas residuales consistentes con superficie.
- Migración pre-apilamiento en tiempo (Kirchhoff).
- Migración pre-apilamiento en profundidad (Kirchhoff y Ecuación de onda).
- Análisis de velocidades para DMO y apilado DMO.
- Migración post-apilamiento en tiempo.
- Aplicación de post-procesos.

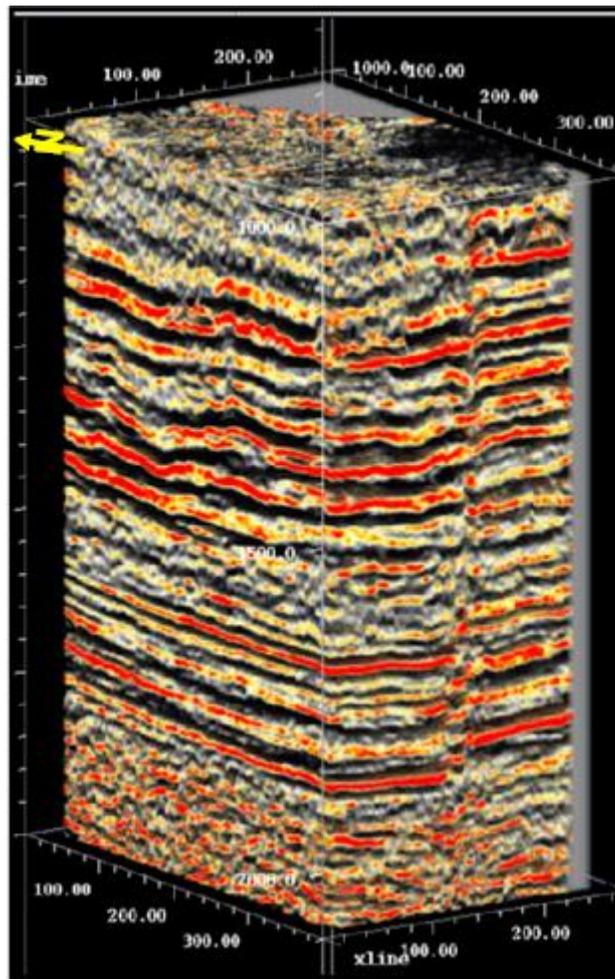
Este trabajo de reprocesamiento sísmico concluyó que la mayor cantidad de geocuerpos se encuentran en las arenas G-8, G-9, G-10 y que se distinguen pocos a nivel de G-7 (GXTecnology, 2006).

#### **4.2. Carga y Validación de Datos.**

Se solicitó vía Intranet al Departamento de Calidad Del Dato, la carga en la plataforma de Geoframe de los registros de pozos necesarios para la calibración sísmica pozos los cuales se validaron con el respectivo registro en físico, también se pidieron los archivos del cubo sísmico en unidades de profundidad, así como los cubos de atributos generados por la empresa “GX TECHNOLOGY” a partir del reprocesamiento finalizado en el año 2006, estos fueron colocados en la plataforma de PETREL.

#### 4.2.1. Validación del cubo sísmico en tiempo.

Lo que corresponde al cubo sísmico, posee una longitud de registro de 6000 milisegundos (ms), tamaño de bin de 30mx30m y cuyo intervalo de muestreo fue de 2 ms, la dirección de los Inline es suroeste-Noreste (SO-NE) y las Crossline Sureste-Noroeste (SE-NO), el tipo de formato de grabación es SEG-Y, el total de trazas es 3075 (Figura 4.1).

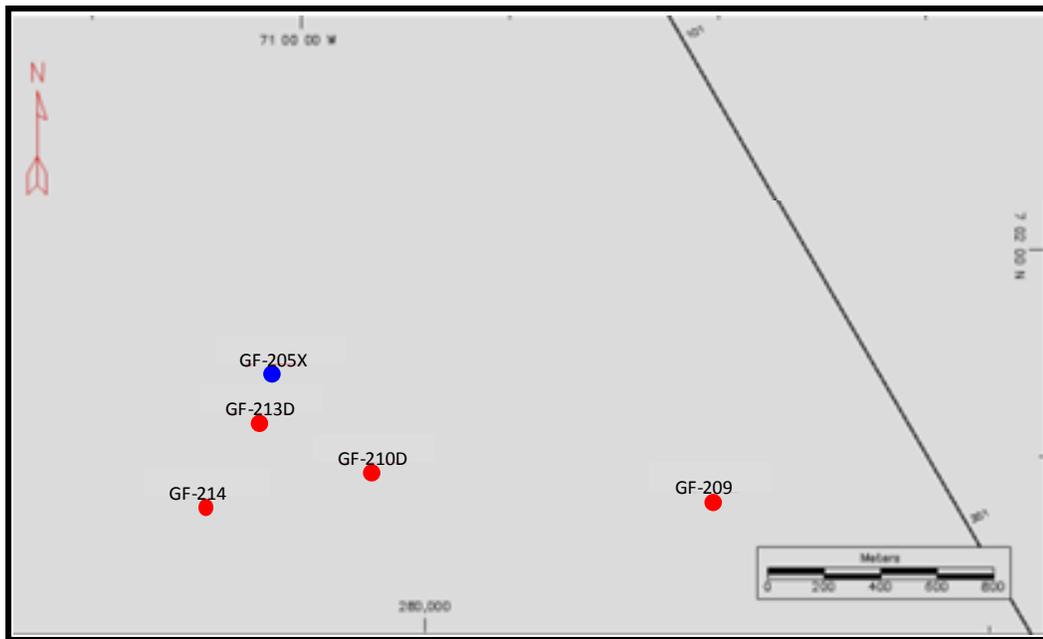


**Figura 4.1.** Cubo sísmico en tiempo GUAF TIME00G\_3D. (Intranet PDVSA, 2009)

Los pozos correspondientes a la zona de estudio fueron revisados observando su posición geográfica y la profundidad en tiempo doble de viaje

(TWT), colocando los marcadores geológicos de los topes de cada cuerpo sedimentario correspondiente a la Formación Guafita.

En lo que respecta a la ubicación en la zona estudio en la sísmica, la información se obtuvo a partir del mapa base, esta se encuentra en la región en el cual está ubicado el pozo GF-205X (Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Mapa base del campo Guafita donde se muestra en azul el pozo GF-205X, único pozo con muestra de núcleo.

#### 4.2.2. Pozos y registros.

El cubo sísmico 3D del campo Guafita, visto en planta ocupa un área de 70 km<sup>2</sup>, de los cuales se tomaron 9 Km<sup>2</sup> incluyendo la zona de la trampa Guafita 205X. Los pozos que se encuentran en la ventana de estudio y que contaban con los registros suficientes (Tabla 4.2) para elaborar este trabajo son: GF-205X, GF-209, GF-210D, GF-213D y GF-214 siendo el pozo GF-209

el más alejado de la trampa. La única muestra de núcleo corresponde al pozo GF-205X.

**Tabla 4.2.** Inventario de registros de pozo.

POZO	SÓNICO (DT)	DENSIDAD(RHOB)	RAYOS GAMMA (GR)	CHECKSHOT	RHOBT	VCL	POROSIDAD
GF-205X	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
GF-209	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
GF-210D	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
GF-213D	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI
GF-214	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI

Los pozos a los cuales se les realizó el inventario también contienen registros de resistividad, caliper, densidad neutrón dichos pozos también tienen como cualidad que atraviesan los 5 horizontes de interés.

#### 4.3. Calibración Sísmica-Pozo.

Los pozos escogidos por poseer la mínima cantidad de registros para efectuar la calibración sísmica pozo fueron: GF-205X y GF-214 que son pozos desviados tipo J ubicados en la zona de la trampa, GF-209 que es un pozo vertical el cual está alejado de la trampa permitiendo realizar una interpretación sísmica regional y los GF-210D y 213D, pozos tipo J y tipo S respectivamente, ubicados en la zona de la trampa (Tabla 4.3). Estos últimos no poseían registro de densidad, razón por la cual se les calcularon registros teóricos de densidad con el uso de la ecuación de Gardner:  $D=0,23 \cdot V^{0,25}$ , siendo D la densidad en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ , donde  $V=1000000/(\text{delta } T)$  donde delta T es la diferencia de tiempo de tránsito medida en microsegundos de tránsito obtenida de los valores de las lentitudes leídas por el registro sísmico para cada pozo y V la velocidad interválica en pies/seg. En detalle, el procedimiento para efectuar la calibración sísmica pozo en el programa “*synthetics*” fue el siguiente:

- ✓ Se cargo el registro de tiros de verificación sísmica (pozo GF-205X) y el sísmico del pozo a usar en la calibración.
- ✓ Se calibraron en el programa el registro sísmico y tiros de verificación sísmica observando que no hubiesen picos anómalos.
- ✓ Se obtuvo una curva de deriva el cual permitió el ajuste entre ambos registros.
- ✓ Se cargo el registro de densidad y se calcularon los coeficientes de reflexión.
- ✓ Se extrajo la ondícula por el método estadístico y se convolucionó con los coeficientes de reflexión obteniéndose el sismograma sintético.
- ✓ Se cargo la sección sísmica por la cual pasa el pozo correspondiente.
- ✓ Se cargo el pozo con el sismograma sintético en la sísmica.
- ✓ Se cargo un registro de rayos gamma con los marcadores geológicos.
- ✓ Se colocó el registro sísmico como curva T-Z.

Del procedimiento anterior se obtuvo la frecuencia dominante (Tabla 4.3) para cada pozo a partir de la gráfica de amplitud versus frecuencia (Figura 4.3) de cada ondícula tipo Ricker, además de las velocidades interválicas (Tabla 4.3) para el cálculo de la resolución vertical (Tabla 4.4) con el uso de la ecuación de Rayleigh (Figura 4.4). Cabe destacar que el pozo GF- 210D no dio buena correspondencia con los horizontes a interpretar por lo cual la ley de velocidades usada fue la obtenida a partir de los pozos GF-205X, GF-209, GF-213D y GF-214, siendo el GF-209 quien mostró la mejor correspondencia para el amarre de los marcadores con las correspondientes facies sísmicas (Figura 4.5).

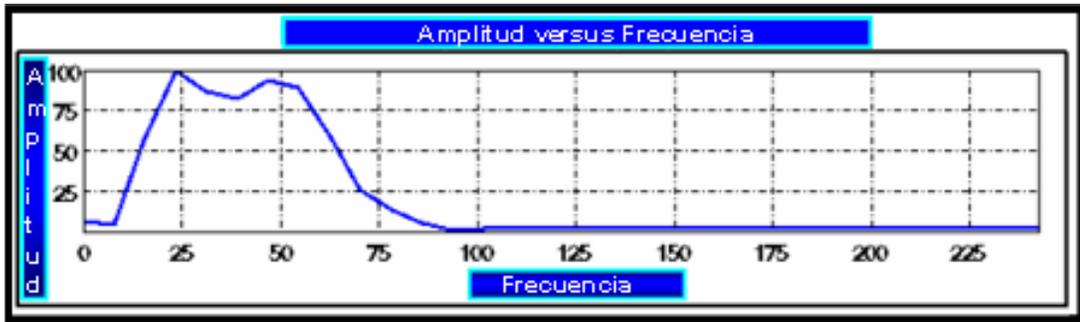


Figura 4.3. Amplitud versus la frecuencia de la línea sísmica a lo largo del pozo GF-209.

$$N/4 = V_{int}/4 * F_{dom} \quad \text{Ecuación de Rayleigh}$$

$\lambda$ : Es la longitud de onda  
 $V_{int}$ : Es la velocidad intervállica  
 $F_{dom}$ : Es la frecuencia dominante

Figura 4.4. Ecuación de Rayleigh.

Tabla 4.3. Velocidades intervállicas y frecuencia dominante obtenidas en la calibración sísmica pozo y el espectro de frecuencia de la ondícula.

POZOS	VI-G7_2INF	VI-G8	VI-G9	VI-G10	FRECUENCIA (HZ)
205X	8724,4	11415,0	11061,7	11396,3	32
209	8734,6	9992,5	9890,7	10003,7	37,5
213D	8695,1	11428,5	11404	10667,4	33
214	8698	11886	12665,5	12875,2	30

VI: Velocidad intervállica.

Unidades: pie/seg

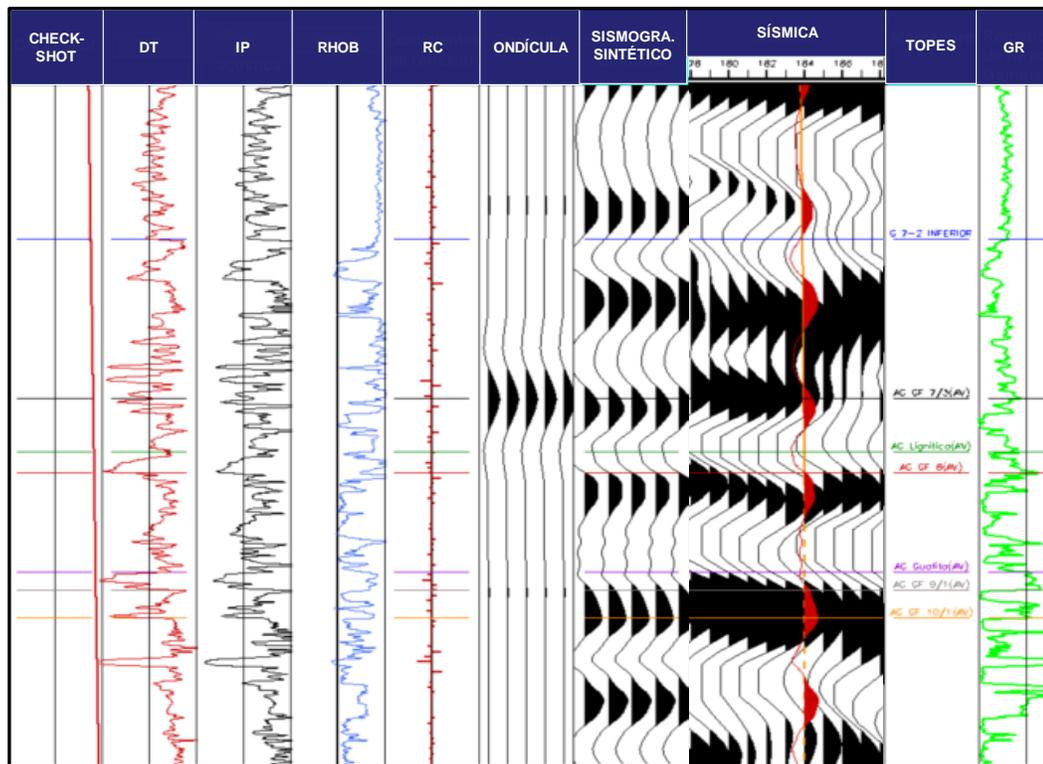


Figura 4.5. Sismograma sintético del pozo GF-209.

Tabla 4.4. Resolución sísmica vertical calculada en los pozos de mejor correlación sísmica.

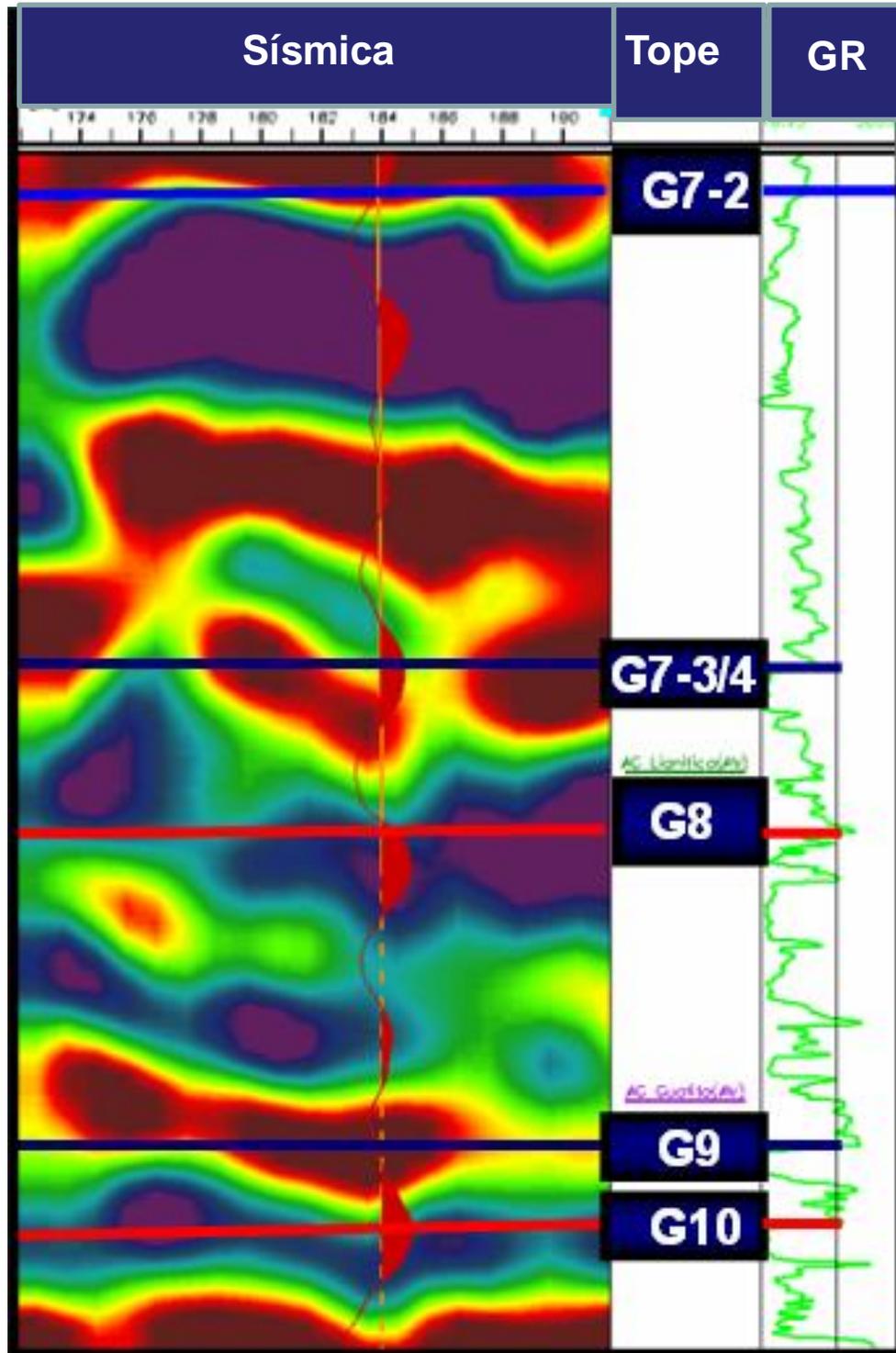
POZOS	R_VER-G7_2INF (PIES)	R_VER-G8 (PIES)	R_VER-G9 (PIES)	R_VER-G10 (PIES)	R_VER-PROMEDIO (PIES)
205X	68,2	89,2	86,4	89,0	80,9
209	58,2	66,6	65,9	66,7	
213D	66,2	86,6	86,4	80,8	
214	72,5	99,1	105,5	107,3	
VALOR MEDIO	66,2	85,4	86,1	86,0	

R\_VER: Resolución Vertical

#### 4.3.1. Amarre sísmica-pozo.

Colocando el registro sintético sobre el pozo cargado en la sección sísmica correspondiente con los marcadores geológicos y el registro de rayos gamma, se procedió a identificar la expresión sísmica, como picos, valles o cruce en cero (Tabla 4.5), que correlacionan con los topes (marcadores)

geológicos de las arenas G7-2 inferior, G7-3/4, G8, G9 y G10. Cabe destacar que por problemas de continuidad de los reflectores sísmicos y el ruido en la zona de interés, hubo que calibrar con reflectores más continuos para lograr la mejor correspondencia entre las ondículas de la sección sísmica y las del registro sintético (Figura 4.6 y 4.7).



**Figura 4.6.** Correlación de la sección sísmica migrada en tiempo con el sismograma sintético y registro de rayos Gamma en el pozo GF-209.

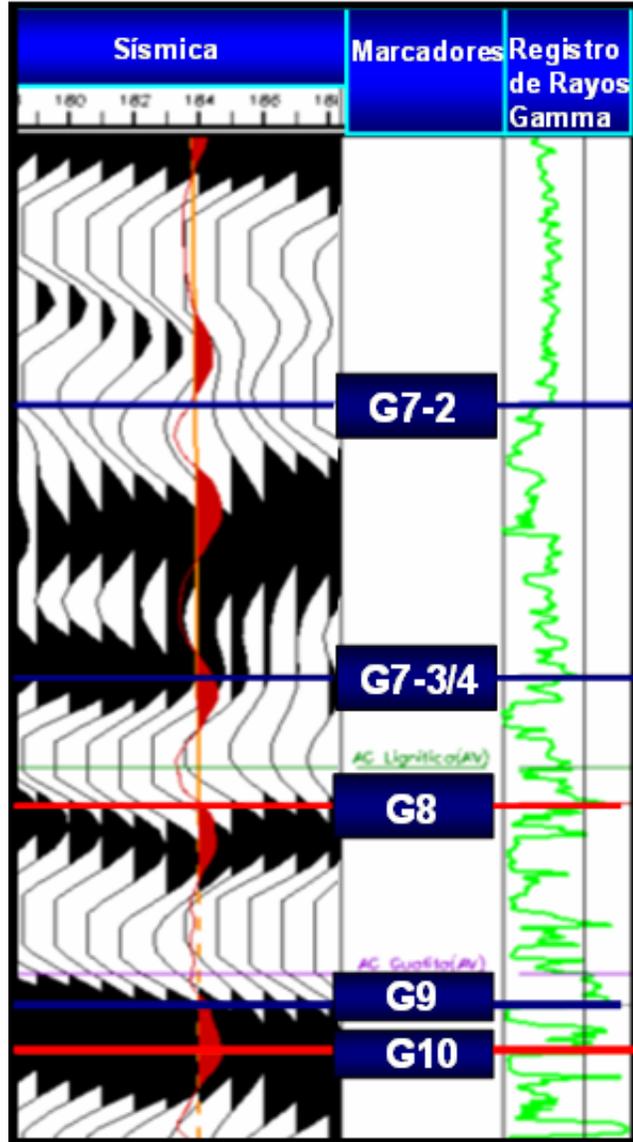


Figura 4.7. Correlación de sección sísmica en trazas con el sismograma sintético y registro de rayos Gamma en el pozo GF-209.

Tabla 4.5. Expresiones sísmicas obtenidas a partir del amarre sísmica pozo.

Marcador Geológico	Expresión sísmica	Observaciones
G7-2 Inferior	Cruce en Cero +/-	mala continuidad lateral del reflector sísmico
G7-3/4	Cruce en Cero -/+	mala continuidad lateral del reflector sísmico
G8	Cruce en Cero -/+	Buena continuidad lateral del reflector sísmico
G9	Cruce en Cero +/-	mala continuidad lateral del reflector sísmico
G10	Pico máximo	Buena continuidad lateral del reflector sísmico

#### 4.4. Interpretación de horizontes en tiempo.

Luego de identificar las expresiones sísmicas y observar que los reflectores sísmicos asociados a los horizontes G8 y G10, los cuales presentan la mejor continuidad, se comenzó interpretando cada 3 Crossline o líneas en dirección del buzamiento del horizonte G8 en el módulo Charismas Interpretation de Geoframe (Figura 4.8), comenzando por el correspondiente reflector correlacionado con el marcador geológico correspondiente, a partir de la calibración sísmica pozo siendo los pozos de mejor correlación la de los pozos GF-209, GF-205X, GF-213D, GF-214.

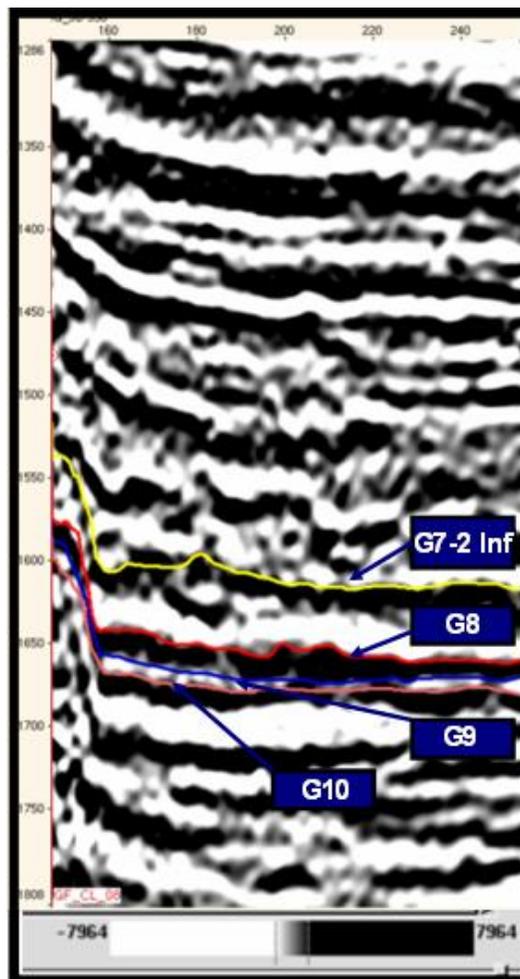
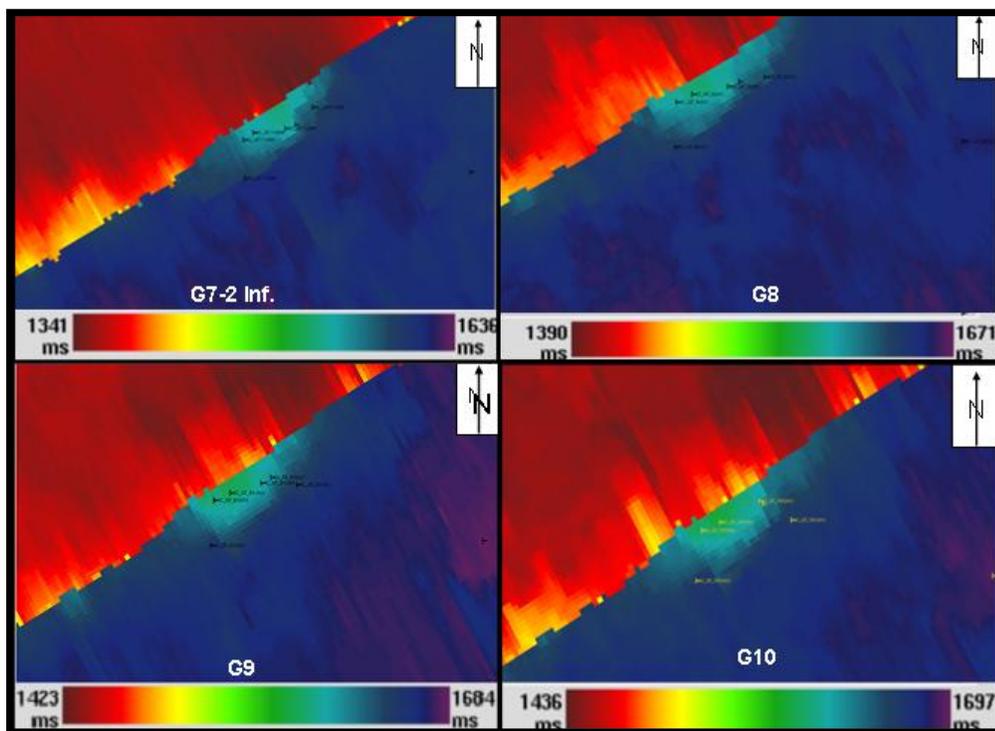


Figura 4.8. Crossline 338 muestra los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10.

En el caso de los reflectores G7-2 inferior y G9, fueron interpretados cada dos “Crosslines”, en algunos momentos de uno en uno, para poder tener la mejor visualización en la continuidad de los reflectores. Para darle continuidad al mapa de cada tope de arena en unidades de tiempo y se repasó cada horizonte haciendo la corrección necesaria en el ajuste de la línea correspondiente al horizonte y el reflector sísmico (Figura 4.8), el horizonte G7-3/4 no se interpretó en la plataforma de Geoframe, sino usando la plataforma de Petrel, esto debido a la pésima continuidad del horizonte, por lo cual se explica más detallado en la parte correspondiente a la elaboración de mapas estructurales en profundidad.



**Figura 4.9.** Mapa en tiempo de los topos de las arenas G7-2 Inferior, G8, G9 y G10 en tiempo.

En los mapas de los horizontes en tiempo, se muestra que la principal estructura es una cuña que es común en los 4 mapas (Figura 4.9) y esta se

puede identificar porque es donde se concentra la mayoría de los marcadores geológicos correspondientes a los pozos perforados.

#### **4.5. Interpretación de Fallas en Unidades de Tiempo.**

Para la interpretación de fallas, se observó que existe complejidad estructural en la zona de estudio, esto se debe a la presencia de fallas asociadas a la principal que es la Falla Guafita Caño Limón, en la parte superior de las secciones sísmicas se muestran como un tren de fallas que en fondo se conjugan con la falla principal y tienden a enmascararla, por lo cual se comenzó con la definición de la línea de falla de la Falla Guafita Caño limón para luego interpretar las fallas secundarias.

##### **4.5.1. Interpretación de la falla Guafita Caño Limón.**

Se identificó la falla principal, la cual es la Falla Guafita-Caño Limón, esta falla se interpretó desde los 1200 milisegundos hasta los 2000 milisegundos, cada 1 “crossline”, para un total de 398 crosslines que tiene todo el cubo sísmico (Figura 4.10), en la secciones sísmicas se muestra subvertical (Figura 4.11).

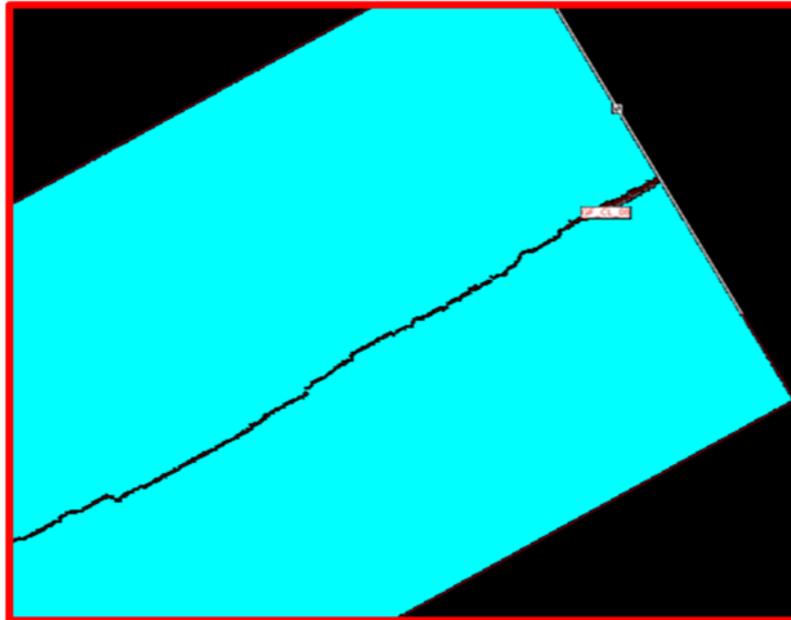


Figura 4.10. Vista en planta de la falla Guafita-Caño Limón.

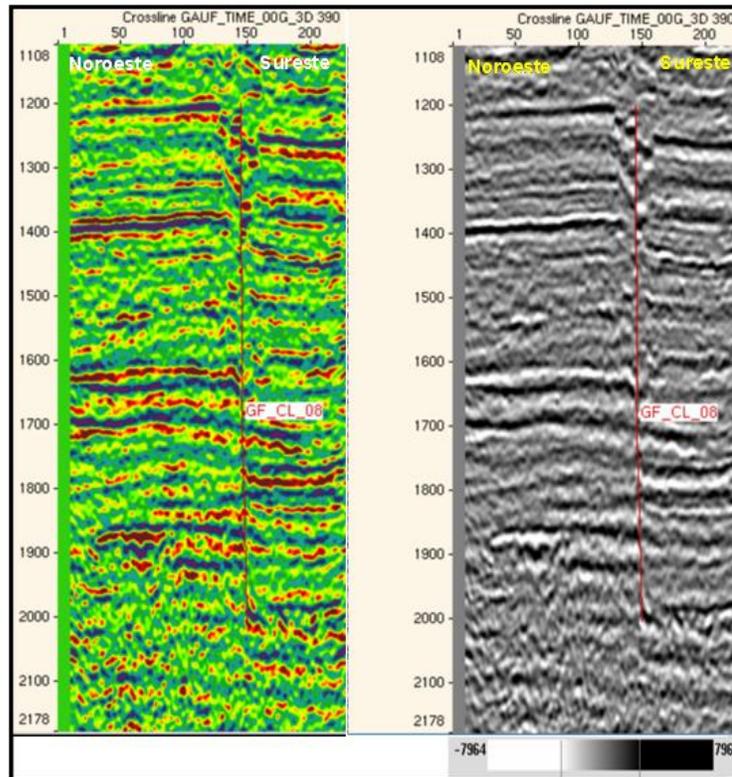
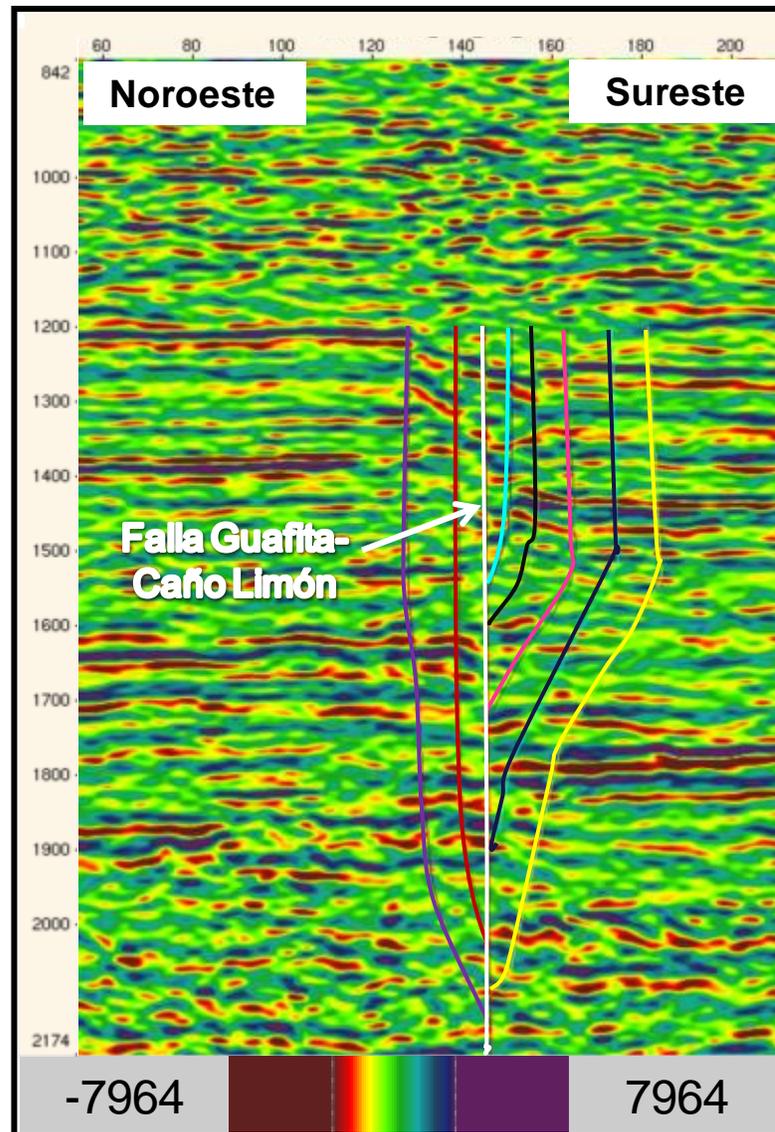


Figura 4.11. Pilar de la Falla Guafita Caño Limón (GF\_CL\_08) en el "Crossline" 390.

La Falla Guafita Caño Limón es el límite entre la zona de Guafita Norte y Guafita Sur, en ambas zonas se observaron, de forma general, un conjunto de fallas normales en escalón (échelon), estas fallas secundarias se conjugan en profundidad con la falla Guafita-Caño Limón por lo cual forma una estructura en “flor negativa” (Figura 4.12).



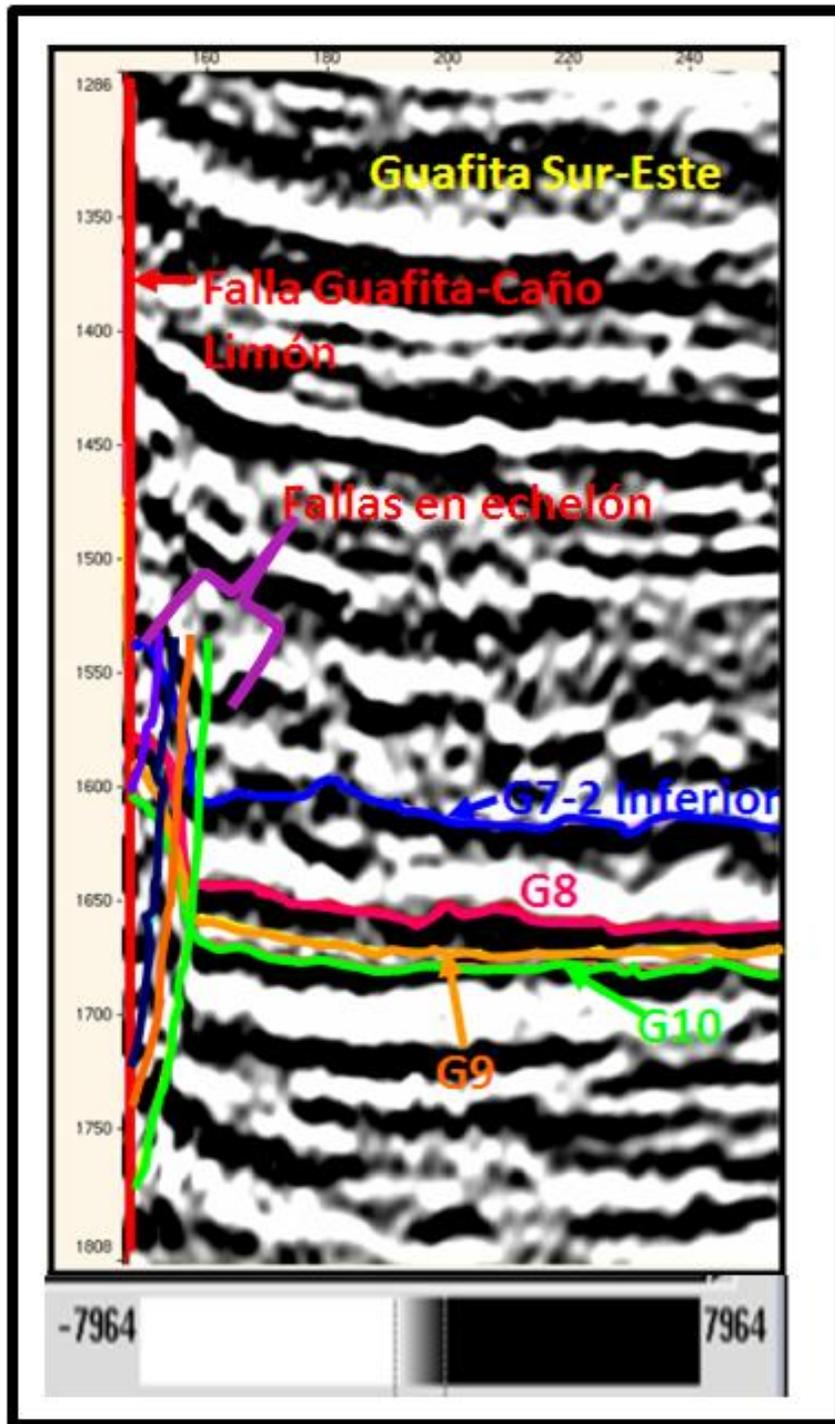
**Figura 4.12.** Modelo de estructura tipo “Flor Negativa” que se observan a lo largo de la Falla Guafita Caño Limón, crossline 389.

#### **4.5.2. Interpretación de fallas secundarias.**

En la zona de la cuña estructural en la cual está enmarcada la estructura principal de la trampa GF-205X, se interpretaron en la dirección del buzamiento de la estructura cada 1 “Crossline”, 4 fallas normales en échelon que la seccionan, el seguimiento de los quiebres de los reflectores sísmicos permitió darle continuidad a la interpretación ya que la baja resolución sísmica y la complejidad de la estructura de la trampa dificultaron la interpretación, sin embargo se logró dar la mejor continuidad de cada falla y su conjugación en profundidad con la Falla Guafita-Caño Limón (Figura 4.13).

En dirección a las líneas de Rumbo o “Inlines” no se divisó claramente una continuidad en la línea de fallas, debido a que los reflectores están muy cizallados hacia la zona de la trampa y es caótica la continuidad de los reflectores, cuestión que justifica la interpretación de los horizontes en la dirección del buzamiento de la estructura. El ruido es otro de los factores que complican la interpretación de fallas y horizontes (Figura 4.14).

De la interpretación de horizontes y fallas en tiempo, se obtuvo, para los 4 horizontes interpretados, una cuña estructural en común y es la de mayor proporción encontrada en lo que corresponde al área de la ventana de estudio (9 km<sup>2</sup>), dicha zona de la cuña estructural es de 0,7 km<sup>2</sup> aproximadamente, hacia la zona Oeste de esta cuña hay otra pequeña estructura (cuña menor) que no deja de ser de menor interés y que al igual que la trampa del GF-205X está limitada al Norte con la Falla Guafita Caño Limón la cual es común principalmente para las arenas G8, G9, G10, por lo cual refleja una posible prospectividad para el entrapamiento de hidrocarburo (Figura 4.15).



**Figura 4.13.** Conjunto de fallas y horizontes interpretados en el crossline 338.

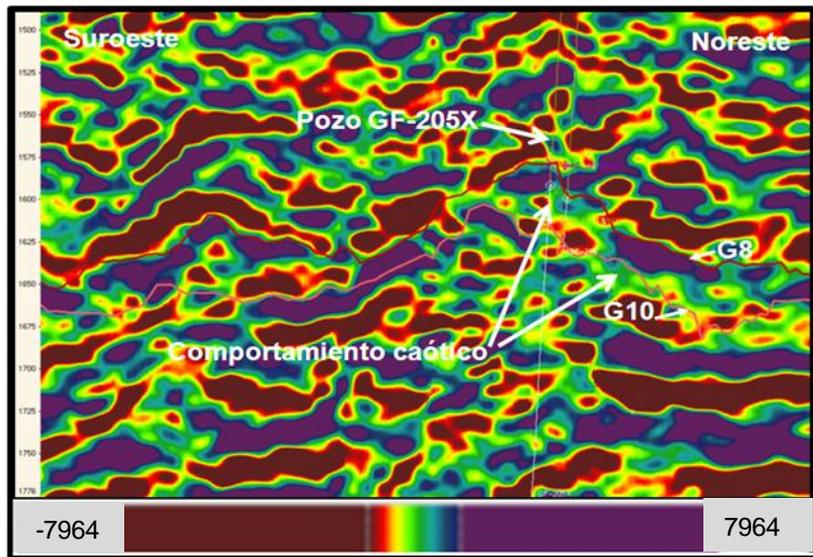


Figura 4.14. Sección sísmica Inline 151, cercano a la trayectoria del pozo GF-205X.

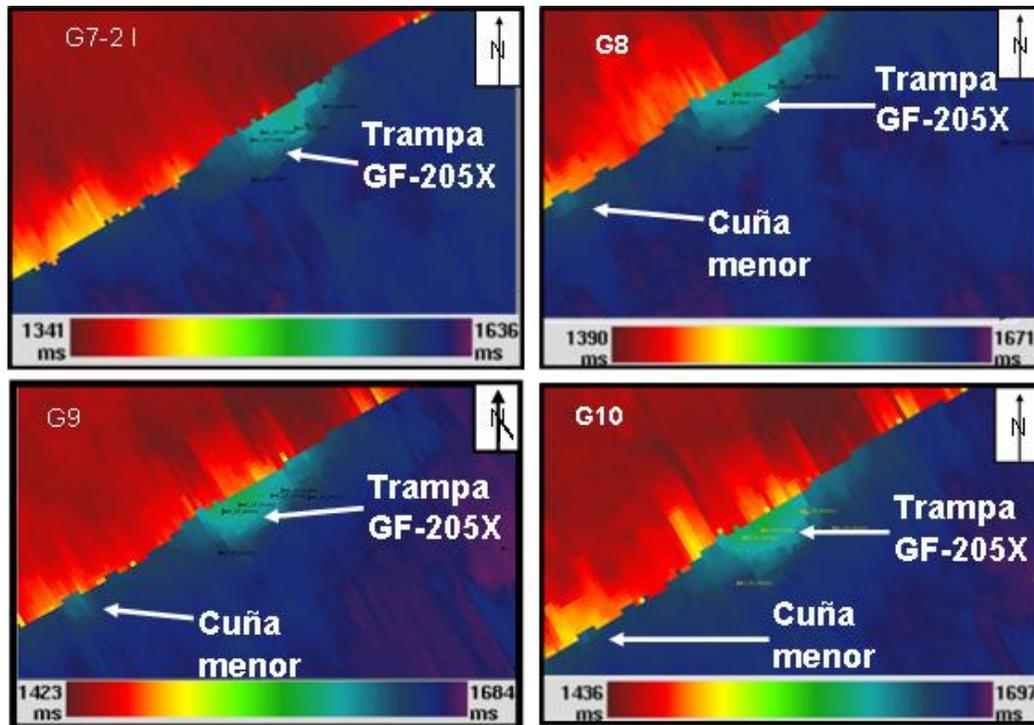
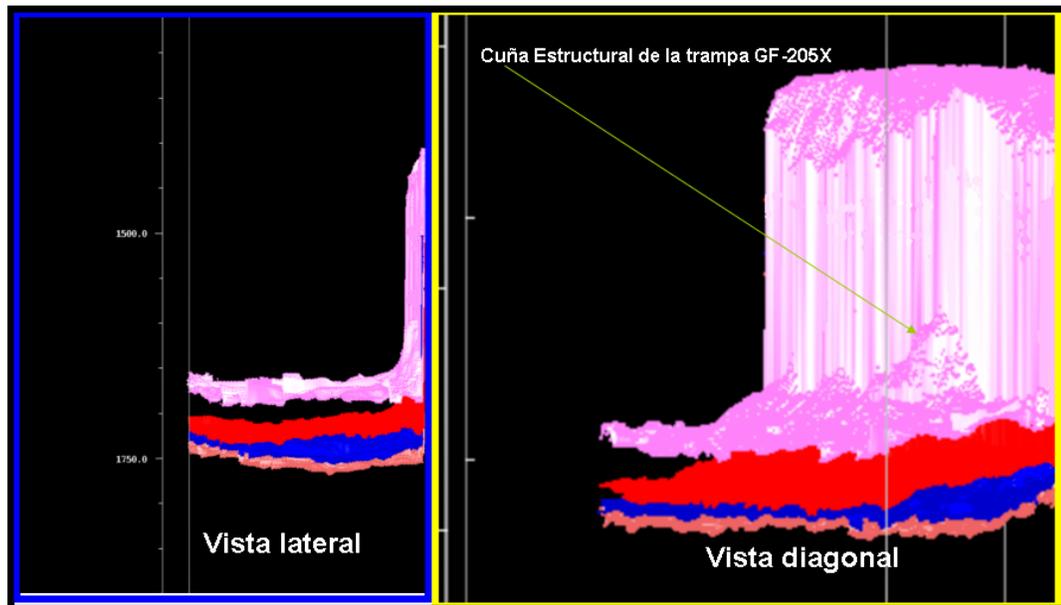


Figura 4.15. Mapas de horizontes interpretados en tiempo correspondientes a las arenas G7-2 Inferior, G8, G9 y G10.

#### 4.6. Vista en Tres Dimensiones de los Horizontes Interpretados en Tiempo.

Proyectando en tres dimensiones los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10, se puede corroborar que los planos correspondientes a estos, no se cruzan, (Figura 4.16).



**Figura 4.16.** Vista lateral y diagonal efectuada en “Voxelgeo”.

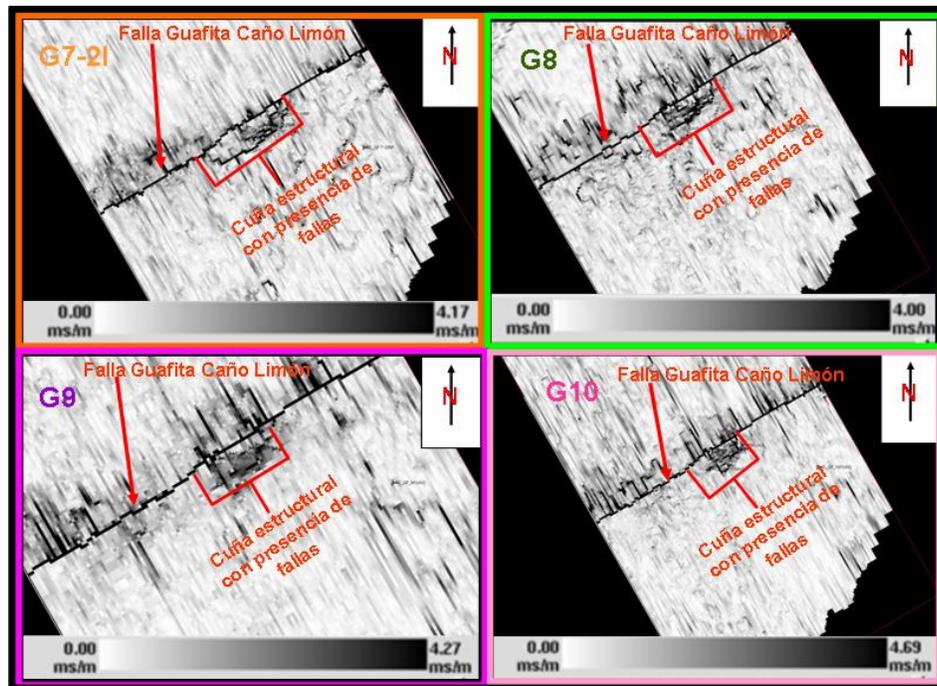
#### 4.7. Aplicación de Atributo de Buzamiento (*Dip*).

Con la finalidad de observar la presencia de fallas geológicas en los horizontes interpretados en las líneas sísmicas obtenidas de los cortes en dirección perpendicular a la Falla Guafita Caño Limón (Crossline) y observar la estructura principal de la trampa GF-205X, se aplicó el atributo sísmico de buzamiento (Figura 4.17), este atributo calcula el gradiente de la función tiempo de las direcciones ortogonales en el eje X y el eje Y para finalmente reportar diversos valores de gradiente como resultado del módulo de las dos

direcciones en el plano del mapa estructural elaborado en unidades de tiempo (Ecuación 4.1).

$$Dip = \sqrt{\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2} \quad (4.1)$$

Donde  $\frac{\partial t}{\partial x}$  es el gradiente del tiempo en la dirección del eje X y  $\frac{\partial t}{\partial y}$  es el gradiente del tiempo en la dirección del eje Y.



**Figura 4.17.** Mapas de cada horizonte con aplicación del atributo de buzamiento (DIP) muestra de la presencia de fallas geológicas y la cuña estructural de la trampa GF-205X.

#### 4.8. Delimitación de los Polígonos de Falla.

Para poder observar sobre los mapas la intersección de las fallas, se deben crear los contactos de falla con los horizontes interpretados en tiempo, para esto se colocan los contactos de las fallas correspondientes con la

intersección de los pilares de falla en el horizonte correspondiente, (Figura 4.18).

Luego se observan las alineaciones de los pilares de falla, finalmente se deben dibujar los polígonos de continuidad de la falla en el horizonte, colocando el polígono a la largo de cada contacto de falla, quedando expresado así en cada horizonte la falla Guafita Caño Limón y las Fallas normales interpretadas en la Trampa.

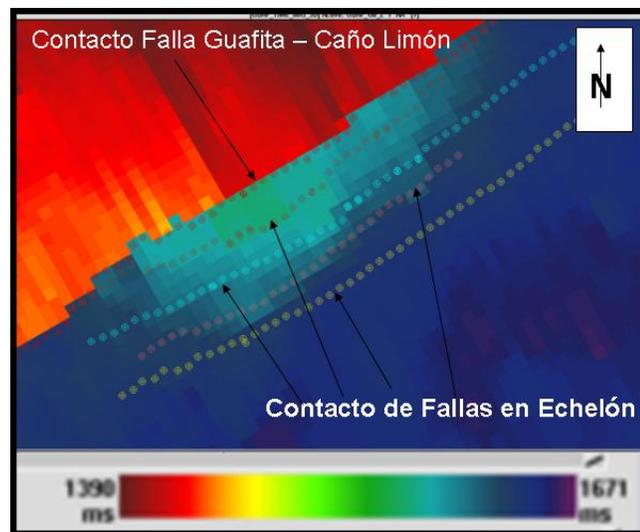


Figura 4.18. Superficie del horizonte G8, con muestra de contactos de falla.

#### 4.9. Transformación de Mapas de Horizontes en Unidades de Tiempo a Unidades de Profundidad.

Para la transformación a profundidad se utilizó la aplicación *Indepth* de Geoframe con la finalidad de darle sentido geológico a cada uno de los horizontes interpretados. Con el uso de las curvas T-Z asignadas a partir del registro de tiros de verificación sísmica del pozo GF-205X y de los sónicos de los pozos GF-209, GF-213D y GF-214, se creó un modelo 3D de velocidades (Figura 4.19), efectuando el siguiente procedimiento:

- Se seleccionaron los pozos GF-205X, GF-209, GF-213D y GF-214, los cuales están ubicados en la trampa, con sus respectivos registro de tiros de verificación sísmica y sónicos calibrados durante la calibración sísmica pozo.
- Se organizaron los intervalos de los horizontes interpretados en tiempo en los cuales se calcularía la velocidad interválca los cuales fueron desde 0 milisegundos (SRD o superficie)-G7-2 inferior, G7-2 inferior-G8, G8-G9, G9-G10, además de la carpeta de fallas y polígonos de falla.
- Se generó una función de velocidad basada en la entrada de datos, esta función velocidad interválca se calcula por la siguiente fórmula:

$$VI = 2 \times \frac{\Delta p}{\Delta t} \text{ Donde } \Delta p \text{ es la diferencia de la profundidad de fondo}$$

menos la profundidad del tope y  $\Delta t$  es el tiempo de Fondo menos el tiempo del tope. Se efectuó una visualización de los mapas de velocidad (Figura 4.20) generados para así efectuar una calibración entre los mapas de profundidad a generar y los marcadores geológicos.

- Se elaboraron unos mapas de profundidad preliminares multiplicando los mapas en tiempo de los horizontes interpretados con los mapas de velocidad preliminares.
- Se realizó la selección de los puntos de control, por medio de los marcadores geológicos para cada horizonte
- Se calculó la corrección por cada punto de control (marcadores geológicos) en cada horizonte, está corrección es la diferencia entre la profundidad del punto donde está el marcador geológico y horizonte en sí, estas correcciones generan un mapa de corrección.
- Se aplicó la corrección a partir de la diferencia calculada de los mapas de profundidad y los marcadores geológicos.

- Se observaron los mapas finales en profundidad (Figura 4.21) y los mapas en tiempo para ver la existencia de alguna anomalía entre ambos.

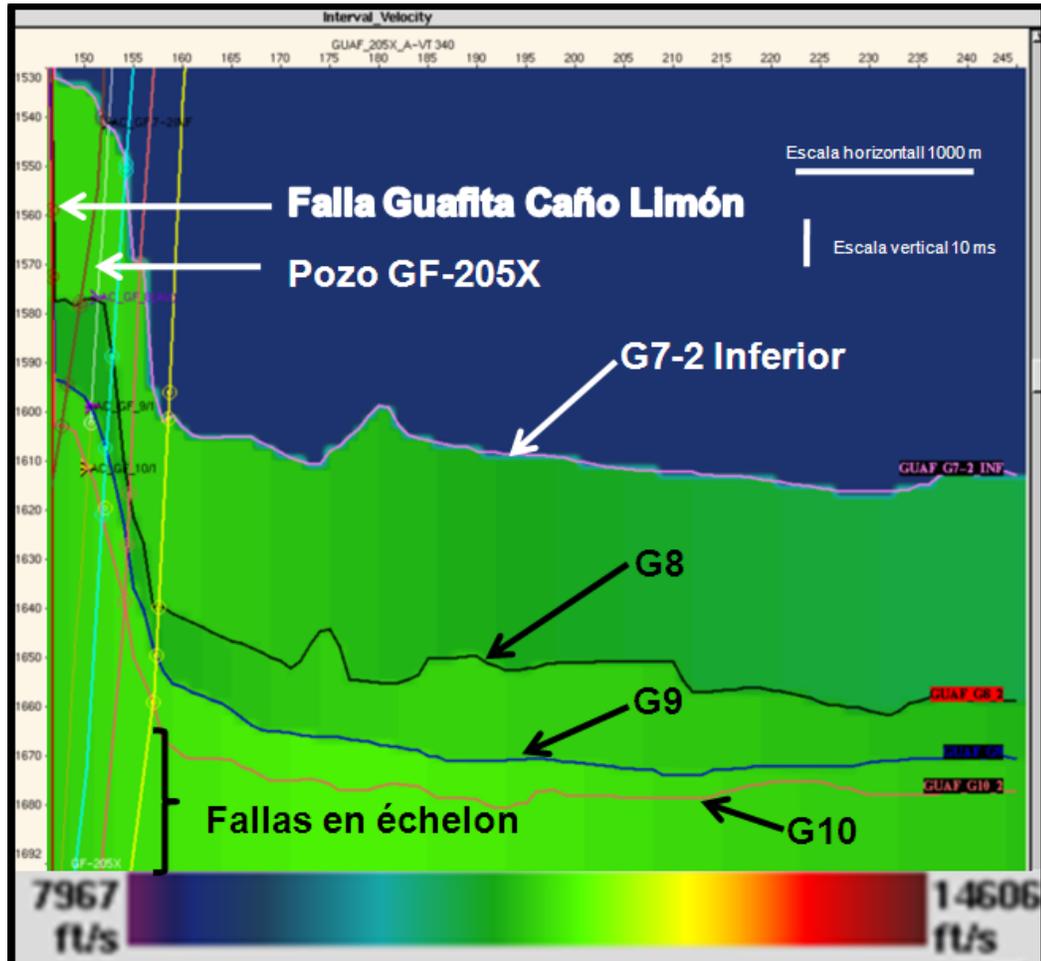
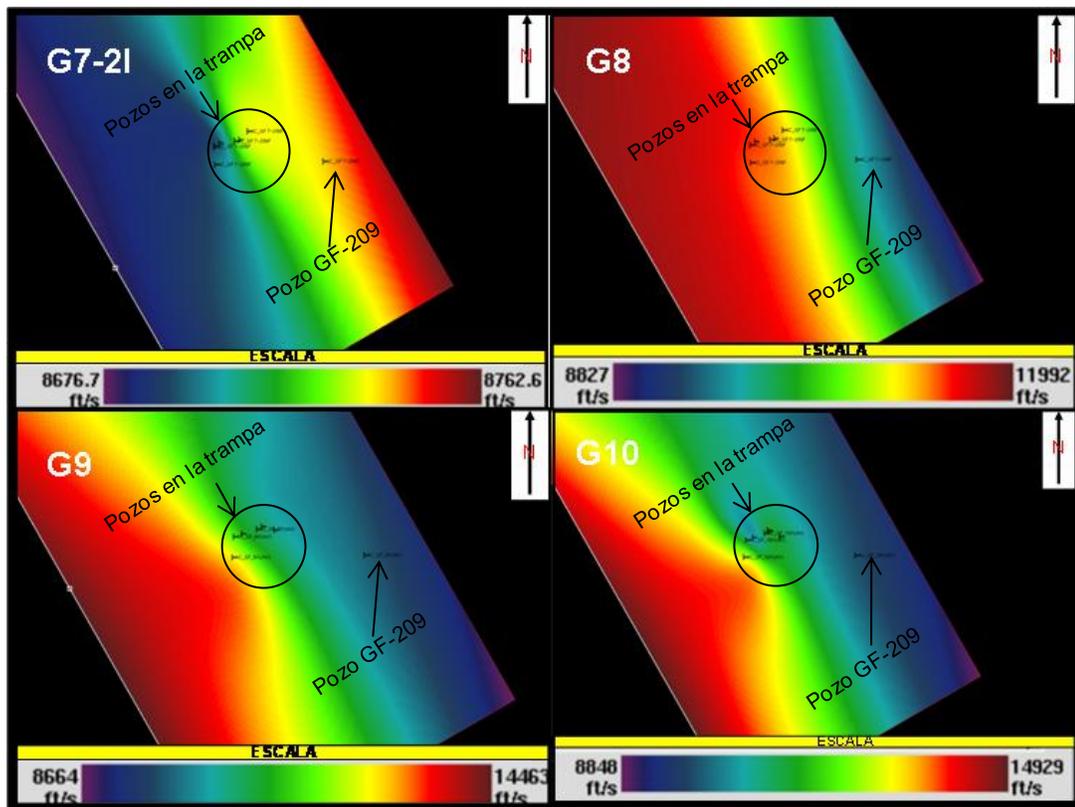
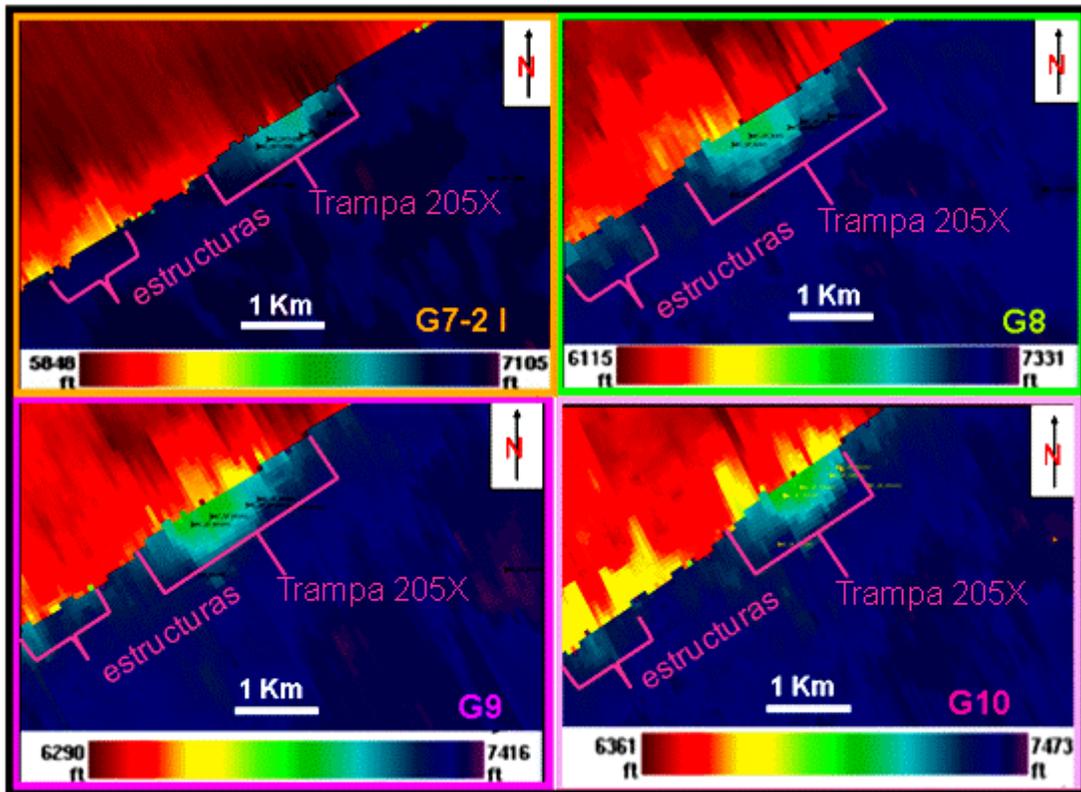


Figura 4.19. Sección 340 del modelo 3D de velocidades, en dirección del buzamiento, por donde pasa el pozo GF-205X.



4.20. Mapas en unidades de velocidad para los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10.



4.21. Mapas en unidades de profundidad para los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10 interpretado en el módulo de *Charismas Interpretation* de Geoframe.

#### 4.10. Metodología Usada en la Plataforma de PETREL.

La falla Guafita Caño Limón, y las cuatro fallas inversas en Echelón, que fueron interpretadas en *Charismas Interpretation* y los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10 todo esto convertido en unidades de profundidad, fueron exportados como archivos, para luego trabajar con la plataforma de PETREL, donde está cargado un cubo en unidades de profundidad efectuado por la empresa GX Technologies de Venezuela para PDVSA.

Aunque no es común realizar este tipo de procedimientos en la interpretación sísmica con aplicación de atributos, los motivos de realizar este cambio de plataforma de interpretación sísmica se debió a la versatilidad del software para lograr dar respuesta a la interpretación

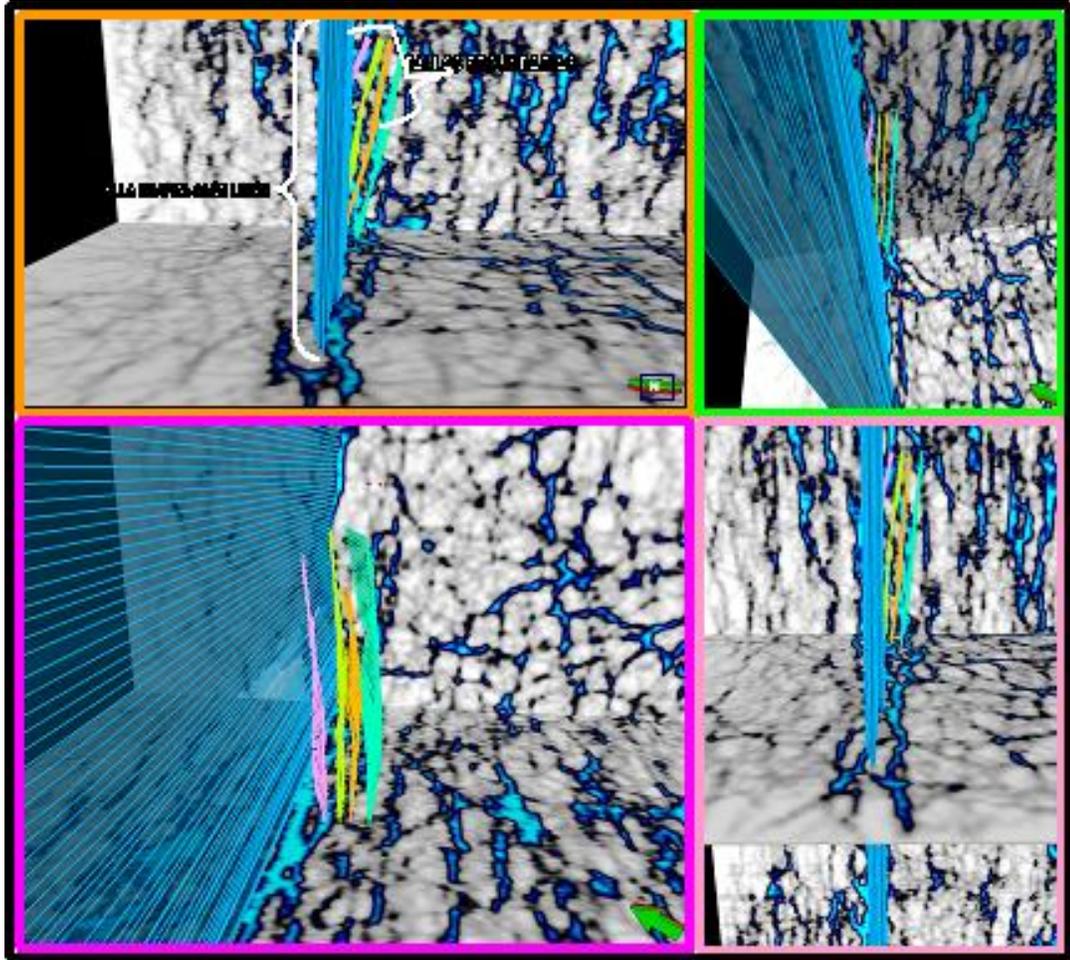
estructural y estratigráfica compleja, que es propio del campo Guafita y sobre todo hacia la zona de la trampa GF-205X, además de dar algunas respuestas de interés a algunas interrogantes que solo le compete a la empresa PDVSA y no están como objetivos de este trabajo.

#### **4.10.1. Aplicación del algoritmo de “*Ant Tracking*” para la verificación de fallas.**

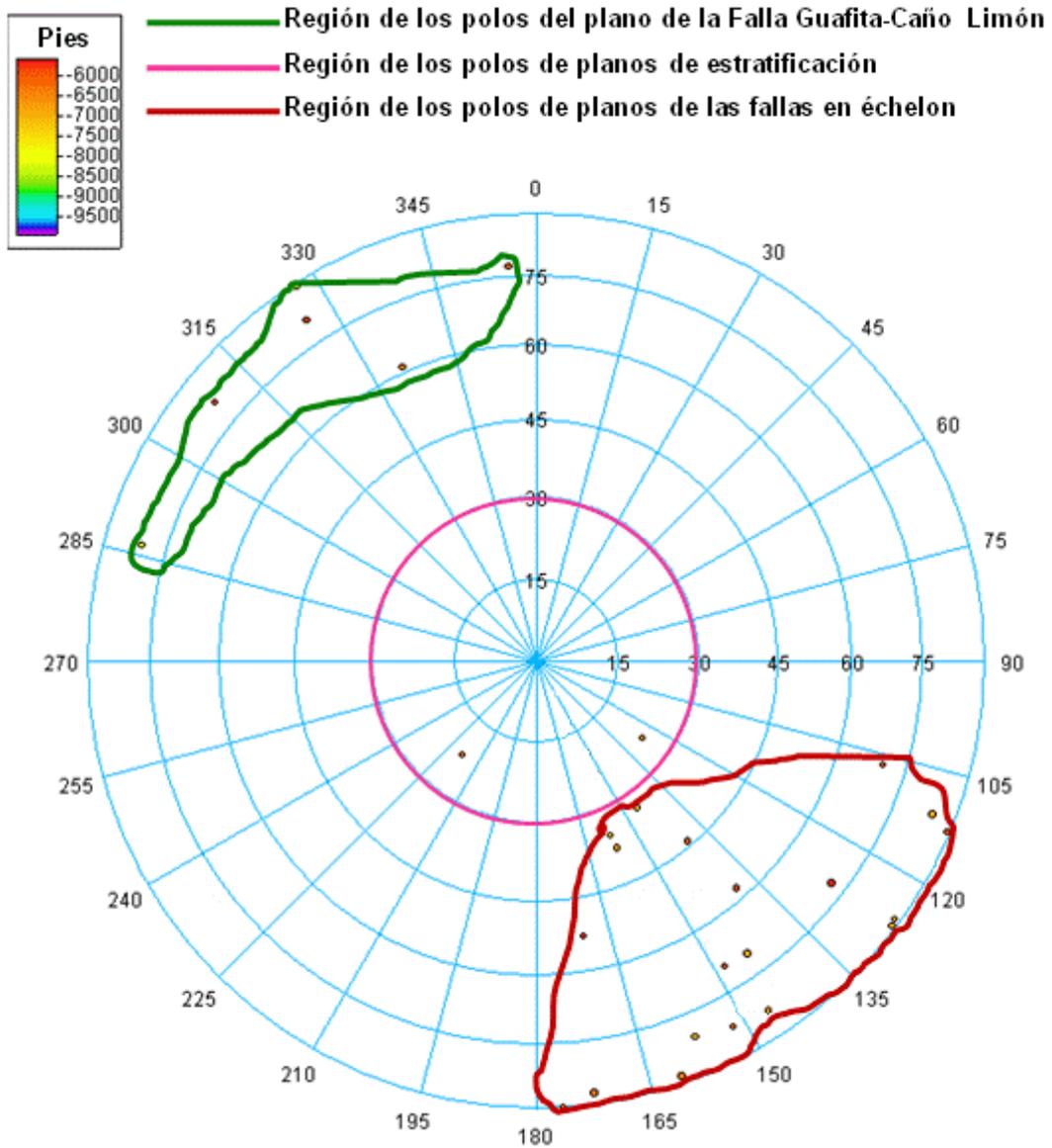
Las fallas interpretadas fueron correlacionadas en un cubo de “*Ant Tracking*” u hormigas virtuales (Figura 4.22), que se realizó a partir del cubo de atributo de varianza el cual fue aplicado al cubo sísmico que está en unidades de profundidad, este algoritmo que fue definido como un atributo, propio de la plataforma de PETREL, el cual permite destacar todas las discontinuidades debido a las feromonas dejadas por hormigas virtuales, siguiendo la dirección de los valores de alta variabilidad obtenidos en el cubo de varianza y que a su vez representan la presencia de fallas geológicas.

Este algoritmo también tiende a destacar las discontinuidades por contacto estratigráfico y fracturas, cuestión que se observa en la red estereográfica (*stereonet*) (Figura 4.23) resultante, la cual muestra los polos de todos los planos de discontinuidad, tomando en cuenta esto se destacó en la red la región de estratificación, debido a que no se observaron fallas lístricas, la región de fallas en échelon ya que las interpretadas no son las únicas observadas y la zona de la Falla Guafita-Caño Limón, todo esto en el intervalo de profundidad de 6800 a 7600 pies correspondiente a los horizontes interpretados y desde los 6000 hasta los 8000 pies para la Falla Guafita-Caño Limón, los parámetros de la red se muestran en la Figura 4.24 la tabla estadística (Tabla 4.6). A causa de la complejidad estructural se aplicó este atributo en el modo de hormigas agresivas, lográndose verificar la

continuidad de las fallas y su extensión la cual no se pudo observar en los mapas de Buzamiento (Dip).



**Figura 4.22.** Correlación de la falla Guafita Caño Limón y fallas secundarias en Echelón en diferentes vistas sobre el cubo de *Ant Tracking*.



**Figura 4.23** Red estereográfica correspondiente al intervalo del cubo de *ant tracking* del volumen estudiado.

Input\Output Parameters Stereonet

Passive ants  Aggressive ants

Initial ant boundary: 5

Ant track deviation: 2

Ant step size: 3

Illegal steps allowed: 2

Legal steps required: 2

Stop criteria [%]: 10

Figura 4.24 Parámetros de la Red estereográfica correspondiente al intervalo del cubo de *ant tracking* del volumen estudiado.

**Tabla 4.6** Estadística de la Red estereográfica correspondiente al intervalo del cubo de *ant tracking* del volumen estudiado.

	A	B	C	D
<b>1</b>	<b>Statistics for ANT_TRACK [Realized]</b>			
<b>2</b>				
<b>3</b>	<b>Axis</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Delta</b>
<b>4</b>	X	276236.77	282917.69	6680.92
<b>5</b>	Y	772742.70	779544.45	6801.75
<b>6</b>	Depth	-10005.00	-5495.00	4510.00
<b>7</b>	Trace	-10000.00	-5500.00	4500.00
<b>8</b>	AntTracking (t	-1.00	1.00	2.00
<b>9</b>	Value (data)	-1.00	1.00	2.00
<b>10</b>				
<b>11</b>	<b>Description</b>	<b>Value</b>		
<b>12</b>	Origin X:	276257.26		
<b>13</b>	Origin Y:	777153.93		
<b>14</b>	End first inline	280362.11		
<b>15</b>	End first inline	779523.96		
<b>16</b>	End first cross	278792.34		
<b>17</b>	End first cross	772763.19		
<b>18</b>	Number of inli	170		
<b>19</b>	Number of cro	159		
<b>20</b>	Inline length:	4739.92		
<b>21</b>	Inline interval:	30.00		
<b>22</b>	Crossline leng	5070.04		
<b>23</b>	Crossline inter	30.00		
<b>24</b>	Inline rotation	60.00		
<b>25</b>	Inline range:	100 to 269 step 1		
<b>26</b>	Crossline rang	240 to 398 step 1		
<b>27</b>	Vintage:	AntTrack 1		
<b>28</b>	Realization so	(Not found - probably deleted)		
<b>29</b>	Seismic type:	3D		
<b>30</b>	Number of sa	451		
<b>31</b>	Number of cell	12190530		
<b>32</b>	Inline interval:	30.000214		
<b>33</b>	Crossline inter	29.999512		
<b>34</b>	Sample interv	10		
<b>35</b>	Volume value	Floating point 32 bit		
<b>36</b>	Is storage OK	Yes		
<b>37</b>	Bytes consum	48762120		
<b>38</b>	Bulk value for	Floating point 32 bit		
<b>39</b>	Bulk has nativ	Yes		
<b>40</b>	Primary directi	Inlines		
<b>41</b>	Secondary dir	Crosslines		
<b>42</b>	Storage type:	ZGY seismic bricked format		
<b>43</b>	File path:	Z:\Estudios Integrados\Modelos\Estáticos\GU		

#### **4.10.2. Interpretación de horizontes en el cubo de profundidad.**

Con la finalidad de completar la interpretación de los horizontes objetivos (G7-2 Inferior, G7<sup>3/4</sup>, G8, G9 y G10) y además elaborar un modelo estructural 3D completo de la zona de estudios, los mapas y fallas elaborados en la plataforma de Geoframe fueron desplegados en el cubo en profundidad, y a partir de la calibración sísmica-pozo elaborada previamente, se identificó en este cubo la facie sísmica correspondiente al tope del yacimiento G7<sup>3/4</sup>, el cual está debajo de la facie sísmica del tope del yacimiento G7-2 Inferior en el cambio de amplitud cruce en cero de ondícula negativa a ondícula positiva, esta interpretación correlacionó bien con el cubo en profundidad cargado en PETREL, por lo cual se usó la función “*Seeded 3D Autotracking*”, y se seleccionó el horizonte correspondiente, en el que se le colocó la semilla de interpretación, para finalmente efectuar el desplegado (Figura 4.25).

En los lugares de difícil continuidad sísmica, hubo que efectuar la interpretación manualmente, así como realizar un seguimiento de sección a sección sísmica para que no hubiese un salto en la interpretación del horizonte. De esta manera, se interpretó G7<sup>3/4</sup> (Figura 4.26), el horizonte correspondiente a la lutita lignítica, el horizonte de la lutita de Guafita y la discordancia de Quevedo o Discordancia del cretácico (Figura 4.27), todo esto con la finalidad de tener los correspondientes topes y bases de los paquetes de cuerpos geológicos que conforman la mayor parte de los Miembros Guardulio y Arauca de la Formación Guafita, con la finalidad de efectuar el modelo estructural 3D de la trampa GF-205X.

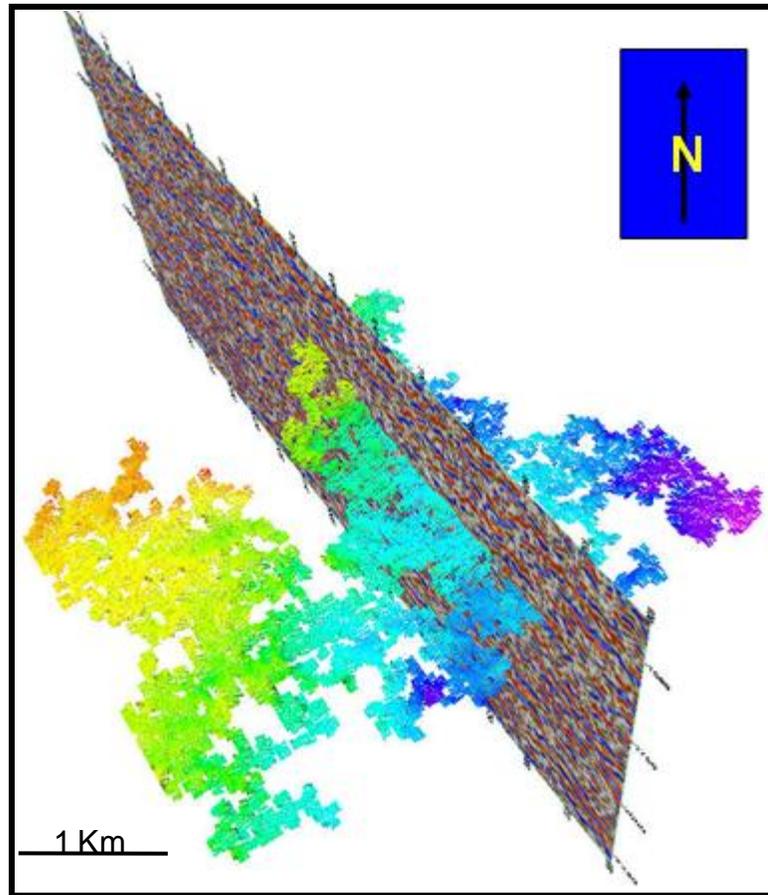


Figura 4.25. Forma de despliegue de horizontes con el uso de la función *Seeded 3D Autotracking*.

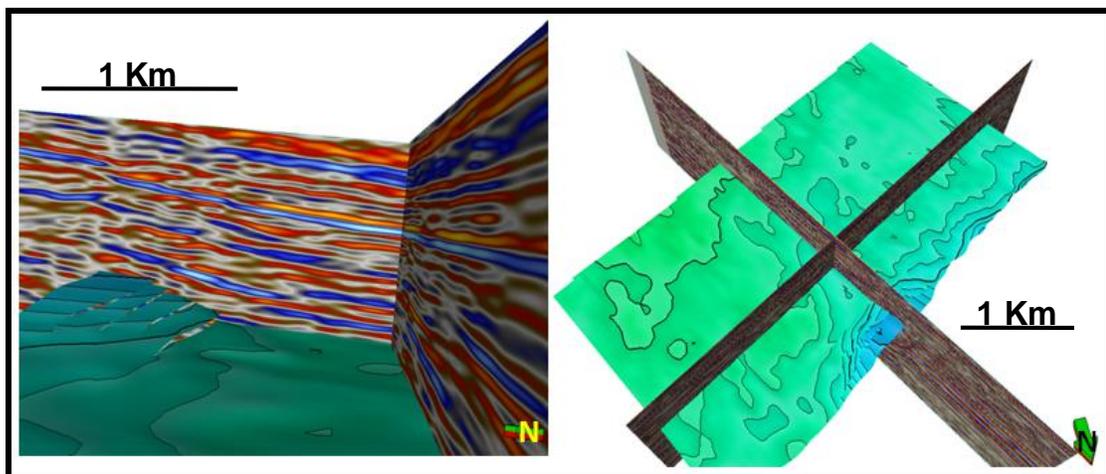
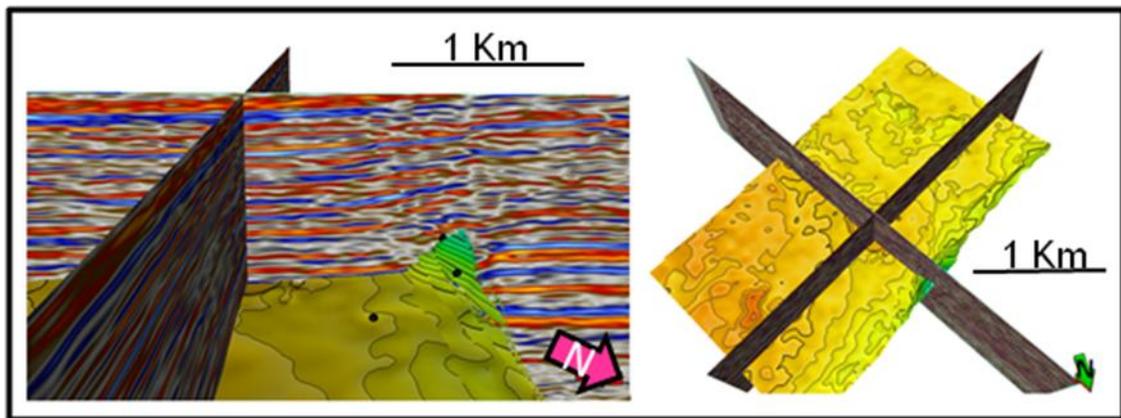


Figura 4.26. Tople de la arena G7<sup>3/4</sup> correlacionada con la sísmica en profundidad.



**Figura 4.27.** Tope de la Discordancia de Quevedo correlacionada con la sísmica en profundidad.

#### **4.10.3. Elaboración del modelo estructural 3D.**

Este modelo se efectuó mediante el proceso que conlleva, el modelado de fallas, mallado de pilares, realización de horizontes, cuyos pasos permitieron la elaboración del modelo estructural 3D en unidades de profundidad de la trampa GF-205X (Figura 4.28), a continuación se definen la función de cada uno de los procesos:

##### **4.10.3.1. Modelado de fallas.**

Consiste en tomar las fallas previamente interpretadas en las líneas sísmicas y corroboradas en el cubo de seguimiento de hormiga y usar su información para incorporarlas al modelo estructural 3D, la información se basa en el descenso, el azimut, largo y forma que definen los planos de falla por medio de los pilares que las determinan.

##### **4.10.3.2. Mallado de pilares.**

Es el proceso mediante el cual se efectúa un esqueleto o grillados entre los puntos superior medio e inferior de las fallas en los pilares determinantes

de estas, el esqueleto consiste en grillas o mallados que se convierten en superficies de falla, las cuales tienen un área igual al área correspondiente a los horizontes interpretados.

#### **4.10.3.3. Realización de horizontes.**

En esta etapa se definieron las capas verticales, las cuales son los horizontes correspondientes a los yacimientos G7-2 Inferior, G73/4, Lutita lignítica, G8, Lutita de Guafita, G9, G10 y discordancia de Quevedo (discordancia del Cretácico), estos incorporados a las fallas geológicas interpretadas y modeladas. En este proceso se deben crear, a lo largo y ancho del esqueleto o mallados una serie de pilares, los cuales permiten dividir el esqueleto en celdas con un área aproximada al tamaño del Bin con el cual se efectuó la adquisición sísmica.

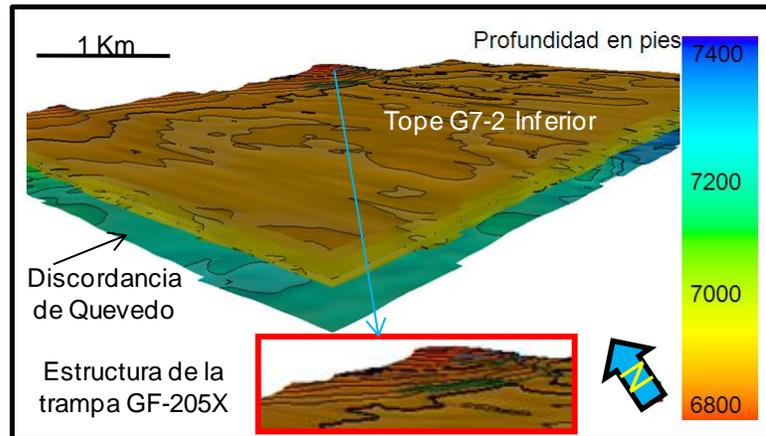
A medida que fueron incorporados los horizontes dentro del esqueleto, cada uno de estos fueron equilibrados iterativamente y proyectados nuevamente cerca de las fallas con las especificaciones de la realización de horizontes, mostrando así el desplazamiento de las fallas en los horizontes como fallas individuales.

En esta etapa se definieron los horizontes de base a tope de la siguiente manera: Discontinuidad del Cretácico, horizonte G10, horizonte G9, lutita de Guafita, horizonte G8, lutita lignítica, horizonte G73/4 y horizonte G7-2 inferior.

#### **4.10.3.4. Realización de zonas o definición de capas.**

Permite definir la resolución vertical del grillado 3D. Con esto se crea zonas entre cada horizonte y definiendo zonas de grosor entre cada horizonte los

cuales se definen como isópacos, utilizando los datos de pozos y los marcadores geológicos, de esta forma se ve un buen despliegue de cada horizonte generado y se comprueba de que no se cortan los horizontes entre sí.



**Figura 4.28.** Modelo estructural 3D de la trampa GF-205X.

#### **4.11. Mapas estructurales en unidades de profundidad.**

A partir del modelo de 3D en profundidad se generaron los mapas para cada yacimiento objetivo, los cuales son las arenas G7-2 Inferior, G7 3/4, G8, G9, G10, en estos se muestran las fallas interpretadas desde la plataforma de Geoframe 4.2 y la extensión que se logró observar por medio del atributo de seguimiento de hormiga, estos mapas en general permiten tener una información clara de la ubicación de zonas prospectivas a la vez de observar la variación de profundidad en el tope de la arena, siendo esta una excelente ayuda para la ubicación de fallas y estructuras al momento de efectuar el diseño de un pozo (Figura 4.29) .

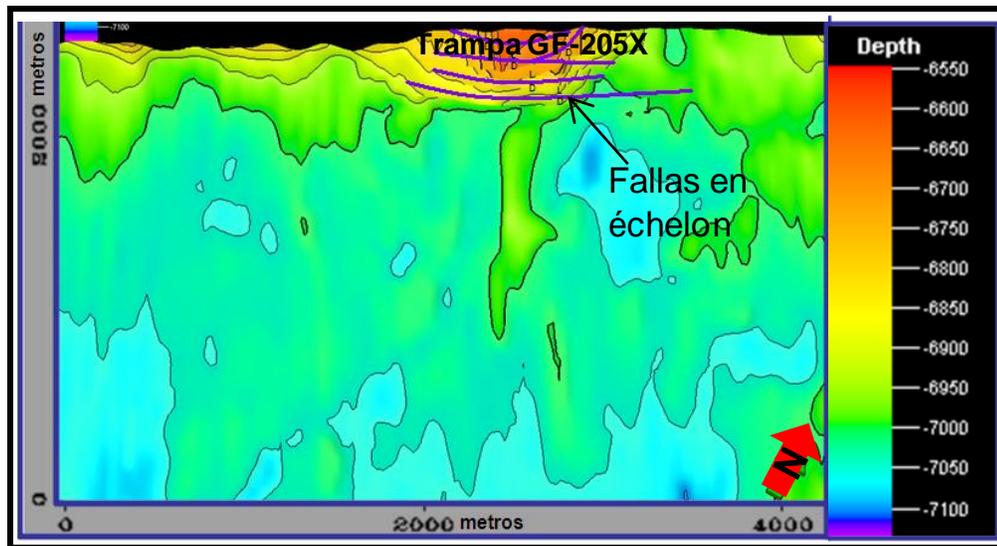


Figura 4.29. Mapa estructural del tope de la arena G7-2 Inferior.

#### 4.12. Generación de cubos y mapas de atributos sísmicos.

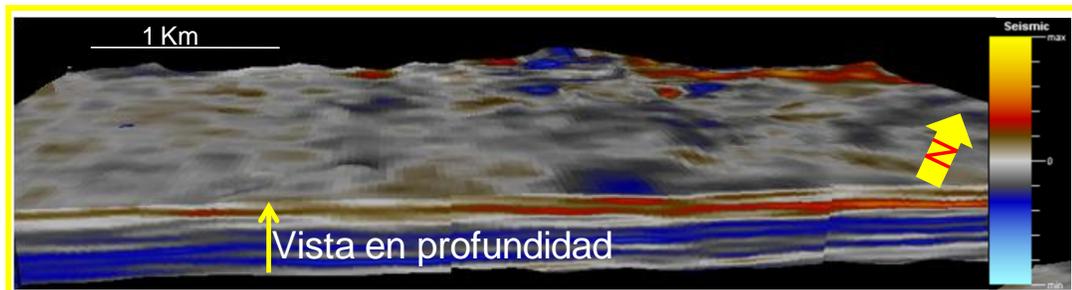
Los atributos sísmicos de volumen se generaron a partir del cubo sísmico el cual se acotó verticalmente al tamaño del modelo estructural 3D para interceptarlos al momento de aplicar el atributo. Por medio de la calculadora de la plataforma de PETREL, se efectuaron operaciones algebraicas como suma, resta, multiplicación y división entre los atributos generados.

Los atributos generados por la empresa GXT durante la inversión sísmica y que estaban en la base de datos de PDVSA Centro-Sur (Tabla 4.7), algunos fueron empleados tomando en cuenta la buena correlación lineal con las propiedades petrofísicas (Figura 4.30). Todo esto permitió tener una considerable cantidad de atributos con el fin de efectuar la correlación entre las propiedades petrofísicas de porosidad efectiva y arcillosidad, tomando como resultado las mejores correlaciones y así generar los mapas de atributos sísmicos (Figura 4.31), los atributos sirvieron de dato de entrada para generar los cubos de pseudo propiedades, tomando en cuenta que

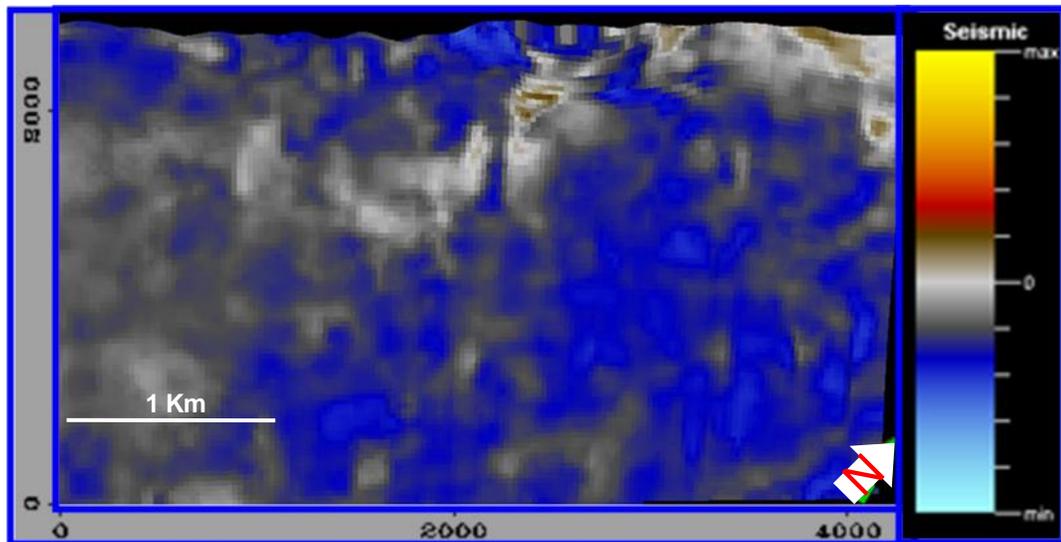
hubiese la mejor correlación con los datos petrofísicos de porosidad efectiva y arcillosidad.

**Tabla 4.7** Cubos de atributos encontrados en el inventario y efectuados por la empresa GXT durante la inversión sísmica.

Cubos Sísmicos en la base de datos
Gradiente AVO (G)
Impedancia de onda S (IS)
Impedancia de onda P (IP)
Mu Rho ( $\mu\rho$ )
Lambda Rho ( $\lambda\rho$ )
Atributos Combinados (AC)
Reflectividad de Onda S (RS)
Reflectividad de Onda P (RP)



**Figura 4.30.** Cubo con la aplicación del atributo sísmico mu rho ( $\mu\rho$ ) que fue generado por la empresa GXT.



**Figura 4.31.** Mapa de atributo mu rho ( $\mu\rho$ ) sobre la el tope del yacimiento G10.

#### **4.13 Generación de mapas y cubos de Pseudo propiedades.**

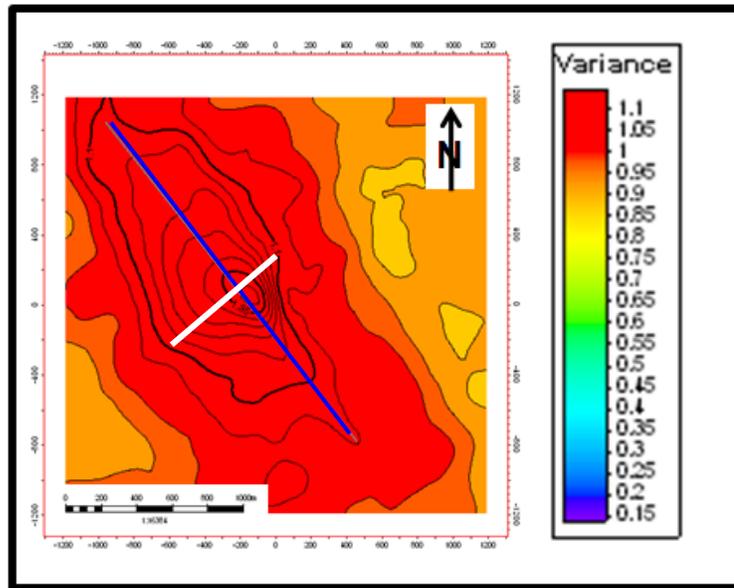
Debido a la poca cantidad de pozos, se efectuaron los modelos petrofísicos de porosidad y arcillosidad, usando el método estocástico, el cual depende de los datos de entrada que se hayan colocado para el modelado, de esta forma se realizaron los 2 modelos en 3D. Para que tuviesen la mejor compaginación con la realidad geológica, el proceso en esta etapa fue la siguiente:

##### **4.13.1. Escalamiento de registros.**

En esta etapa, se colocó el registro correspondiente a la propiedad a propagar en el modelo estructural de manera que el pilar del registro fuese del tamaño y espesor de cada celda por la cual atraviesa el registro. El método usado para el escalamiento es el de media aritmética, ya que este es el más recomendado para los casos de porosidad efectiva y arcillosidad.

#### 4.13.2. Elaboración de mapas de variogramas.

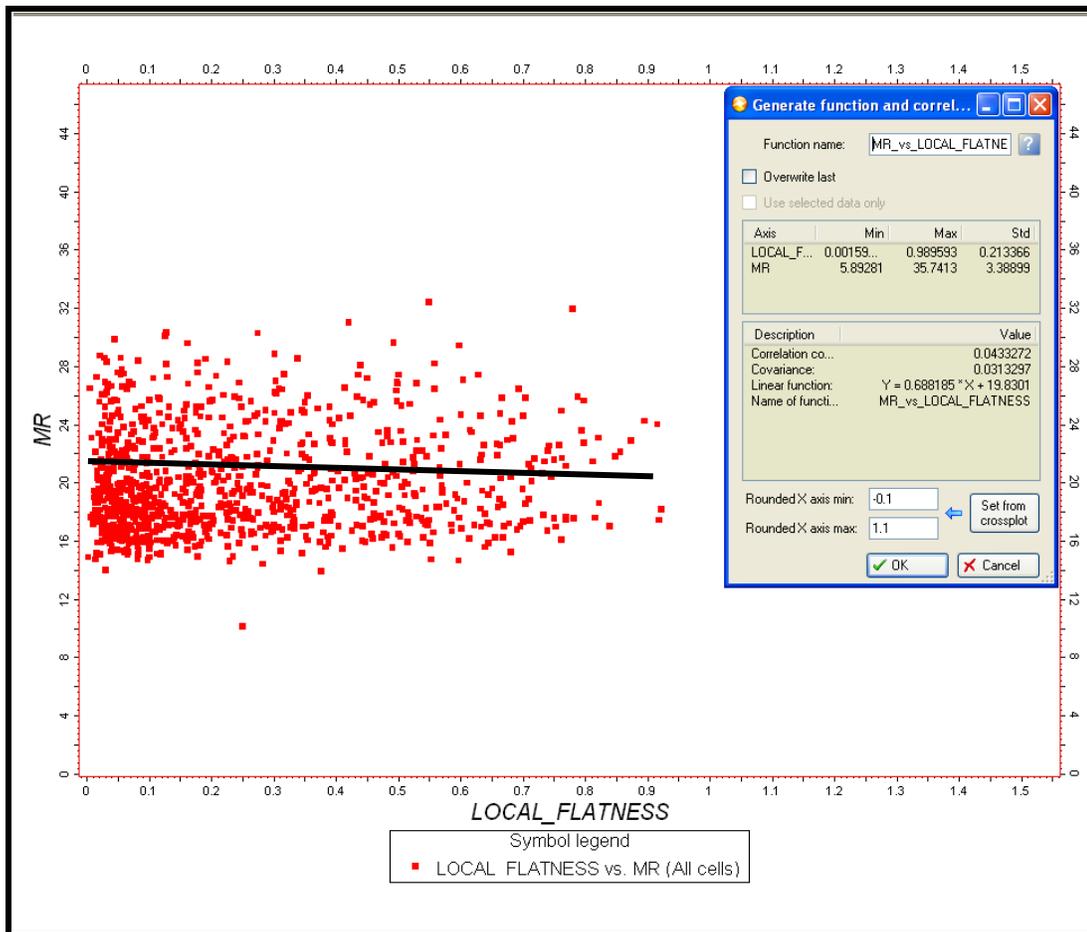
Es el que permite dar la dirección preliminar de sedimentación para cada cuerpo de arena interpretado y modelado. Para el caso de las lutitas no se realizó tal análisis ya que la propiedad se consideró como una sola, sin importar sus anisotropías, cada mapa de variograma se tomó por medio del atributo de amplitud dando como resultado la dirección de menor anisotropía (Figura 4.32).



**Figura 4.32.** Mapa de variograma de la arena G7-2 Inferior, muestra la dirección de menor anisotropía (eje mayor) y la de mayor anisotropía (eje menor).

#### 4.13.3. Independencia lineal entre atributos sísmicos.

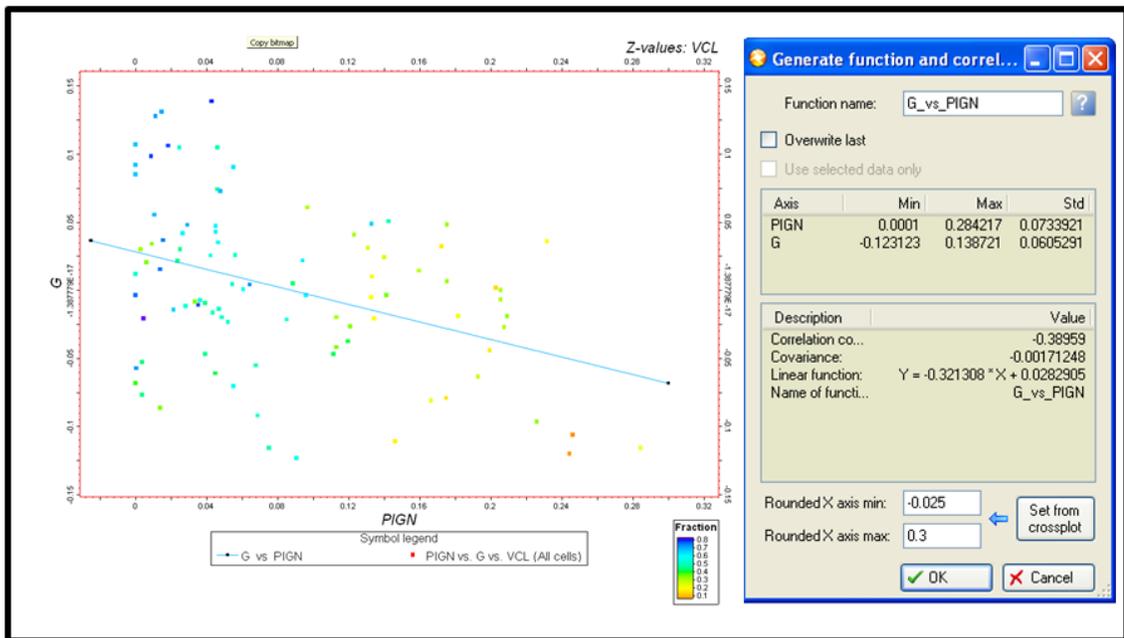
En función de evitar la dependencia lineal entre atributos sísmicos y propiedades petrofísicas, se efectuó una correlación entre estos, aunque en el caso donde dos atributos tuviesen cierta dependencia lineal, pero alta correlación con la propiedad petrofísica, se tomó el atributo de mayor correlación con la propiedad petrofísica a simular (Figura 4.33).



**Figura 4.33.** Diagrama cruzado entre atributo mu rho ( $\mu\rho$  o MR) y planitud local (Local flatness).

#### 4.13.4. Correlación de atributos sísmicos y registros petrofísicos.

Para determinar que atributo sísmico tenía mejor correlación con los registros petrofísicos de porosidad efectiva y arcillosidad se efectuaron los diagramas cruzados. Esto se realizó, colocándose en el eje de las “Y” el atributo sísmico, en el eje de las “X” la porosidad efectiva y en el eje “Z” la arcillosidad (Figura 4.34), sin embargo estas fueron correlaciones preliminares, ya que mejoraron entre 1 y 2 por ciento cuando se efectuaron los variogramas de los atributos con las pseudo propiedades.



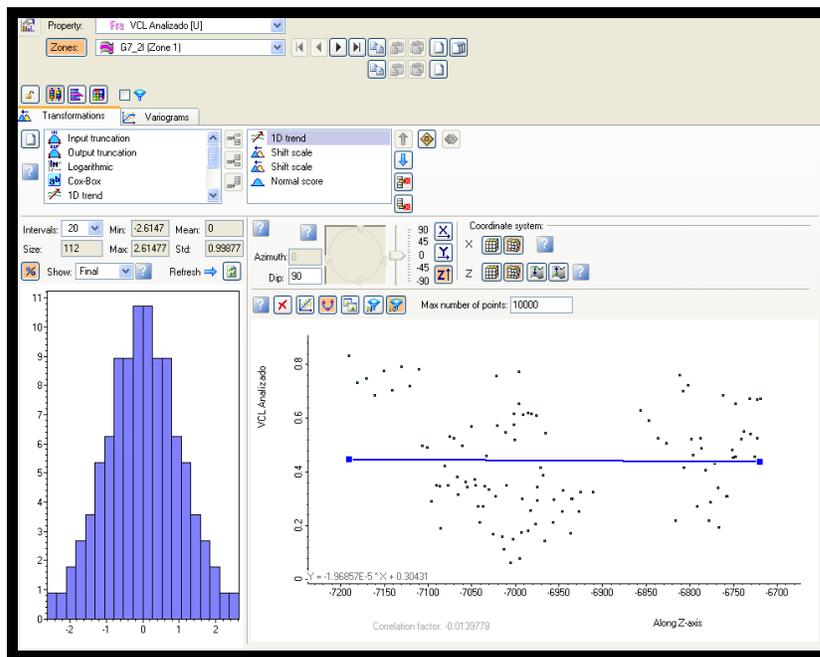
**Figura 4.34.** Correlación efectuada entre el atributo sísmico gradiente (Y), la porosidad efectiva (X) y fracción de arcilla (Z).

#### 4.13.5. Elaboración de variogramas direccionales.

El modelo escogido para la realización de los variogramas fue el modelo esférico, por ser el más usado debido a sus buenos resultados, además que el crecimiento de la propiedad a propagar es casi lineal y la distancia al origen de la estabilización de los datos es finita.

En esta parte se verificó inicialmente que el conjunto de datos de la propiedad petrofísica a propagar tuviesen una distribución normal (Figura 4.35), además de colocar los valores de la dirección preliminar de menor anisotropía obtenida de los mapas de variogramas (azimut) y colocar el espesor promedio de los cuerpos sedimentarios a simular, se definió el número de pasos (*lags*), la tolerancia y el ancho de banda en cada variograma, en las direcciones mayor, menor y vertical.

Al efectuar los ajustes del radio de investigación se modificaba la dirección preliminar, estos cambios se efectuaron en función, de que la varianza fuese igual a 1, lograr el mejor ajuste entre la curva teórica y la práctica del variograma teniendo en cuenta que el rango mayor y rango menor de la elipse de anisotropía cumplierse con la relación correspondiente al lado mayor y lado menor, además que hubiesen al menos dos puntos de amarre en el variograma (Figura 4.36).



**Figura 4.35.** Histograma de frecuencia de los datos de arcillosidad para la arena G7-2 Inferior.

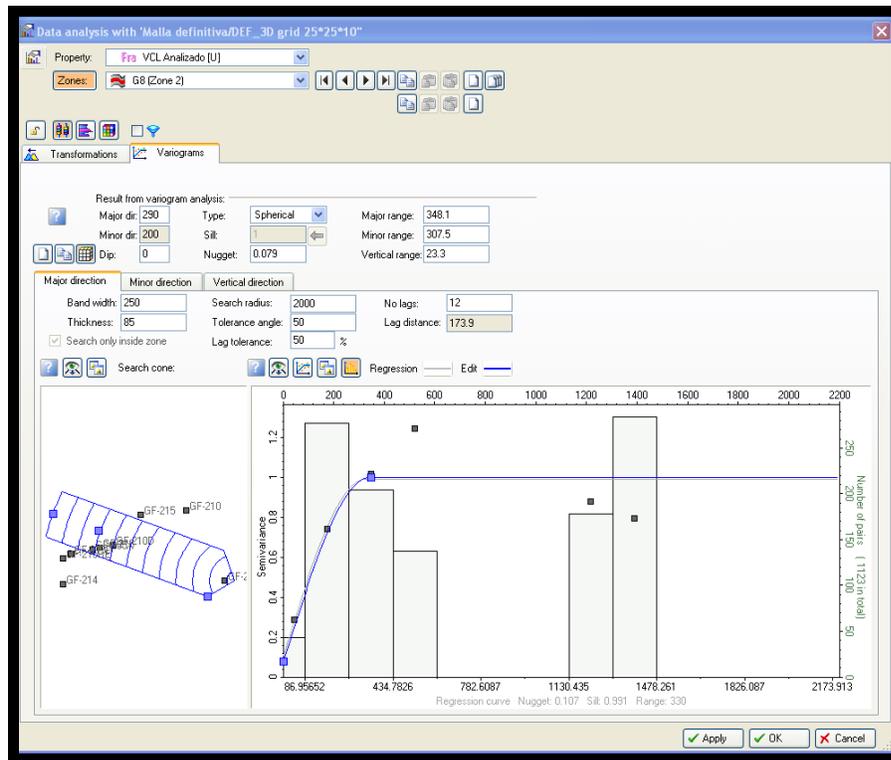


Figura 4.36. Variograma en la dirección mayor para la arena G8 con la propiedad petrofísica de arcillosidad.

#### 4.13.6. Simulación de propiedades petrofísicas.

En esta etapa final para la generación de cubos y mapas de pseudo propiedades se usó el módulo de petrofísica de PETREL. En este se introdujeron los datos de la propiedad petrofísica a simular, la zona a simular, el variograma y el atributo sísmico correspondiente, así fue en lo sucesivo para cada cuerpo sedimentario generado a través de la interpretación sísmica, lográndose la elaboración de un cubo de porosidad (Figura 4.37) y un cubo de arcillosidad (Figura 4.38), y de cuyas secciones se generaron los mapas de pseudo propiedades (figura 4.39).

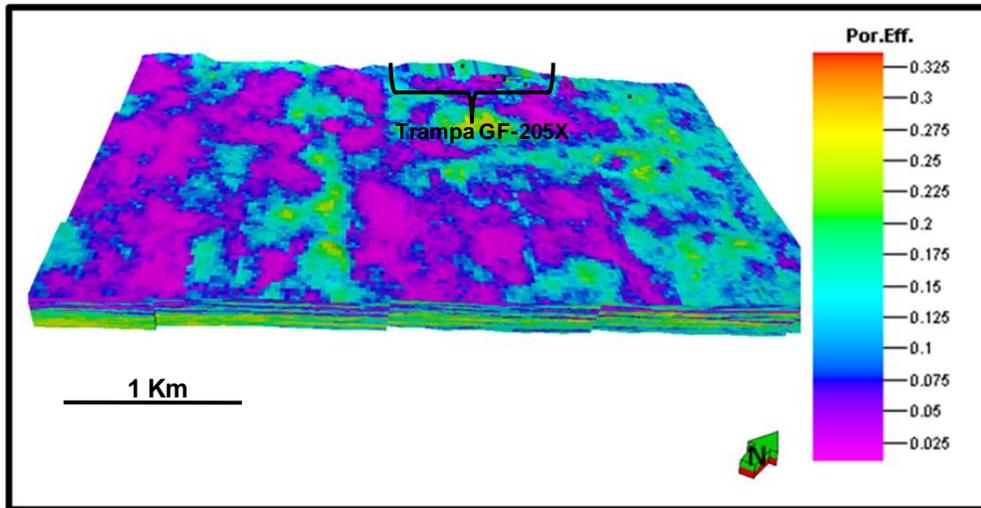


Figura 4.37. Cubo de porosidad efectiva donde está ubicada la trampa GF-205X.

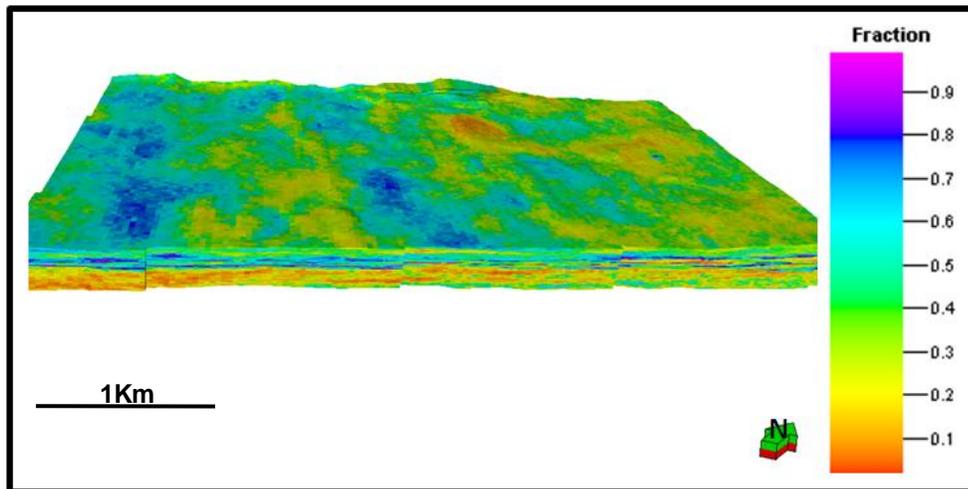


Figura 4.38. Cubo de arcillosidad donde está ubicada la trampa GF-205X.

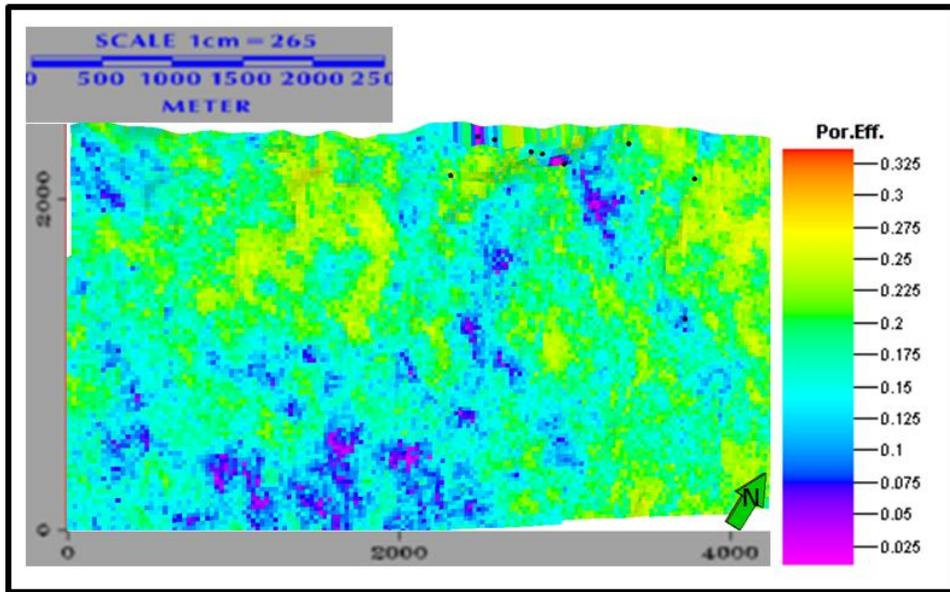


Figura 4.39. Mapa de porosidad efectiva de la arena G8.

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

Del proceso metodológico para cumplir con los objetivos de este trabajo de investigación, se presentan en este capítulo los resultados y su análisis, donde se explica detalladamente algunos aspectos relevantes en la metodología que suministraron información necesaria para el alcance de los objetivos. Cabe destacar que en la zona alejada de la trampa y hacia el Sur existe cierta incertidumbre, ya que los pozos tomados en este estudio se concentran en el área de la Trampa GF-205X, por lo cual es posible que esta zona observada en los mapas estructurales no responda como es deseado a una buena distribución de velocidades y en consecuencia muestra unas curvas de nivel anómalas.

Este trabajo dio un aporte fundamental, ya que es un modelo inicial que arrojó datos sobre la dirección de sedimentación, información que hasta este estudio no se tenía en el área y es de suma importancia. A continuación se muestra en un orden secuencial los resultados que fueron logrados durante la elaboración del trabajo especial de grado y su análisis.

#### **5.1. Mapas Estratigráficos y Estructurales en Unidades de Tiempo.**

De la interpretación de las secciones sísmicas en unidades de tiempo, se obtuvieron los mapas correspondientes a las arenas G7-2 Inferior, G8, G9 y G10, en la zona de la trampa del pozo GF-205X. Cada uno de estos mapas

abarca un área de 8 Km<sup>2</sup> aproximadamente y la secuencia desde G7-2 Inferior hasta G10 corresponde a un intervalo en tiempo doble de viaje entre 1530 a 1690 milisegundos (ms), donde la falla Guafita-Caño Limón es el límite de contacto entre el área de Guafita Norte y Guafita Sur, siendo esta última donde está ubicada la trampa.

En el sentido estratigráfico ningún mapa interpretado en unidades de tiempo muestra la presencia de cuerpos geológicos como canales o barras de meandros, sin querer decir con esto que no estén presentes, sino que es posible que estén por debajo de la resolución sísmica que se calculó, la cual fue de ochenta pies.

#### **5.1.1. Mapa en unidades de tiempo de la arena G7-2 Inferior.**

El mapa de la arena G7-2 presenta una variación de profundidad en unidades de tiempo doble de viaje de las ondas que va desde los 1532 ms hacia la zona de la cuña estructural de la trampa hasta los 1636 ms en las zonas de mayor profundidad. En cuanto a la presencia de estructuras, se observó la existencia de un alto estructural (Figura 5.1) que está cortado por fallas normales en escalera (échelon) (Figura 5.2), las cuales son parte de las fallas que conforman las flores negativas vistas en las secciones sísmicas, específicamente en la Trampa GF-205X.

En lo que respecta a las zonas ubicadas hacia el Sur y el Este de la cuña estructural son profundas comparadas con ésta. Hacia el Oeste la profundidad es menor, pero no se observaron profundidades inferiores a las de la estructura principal.

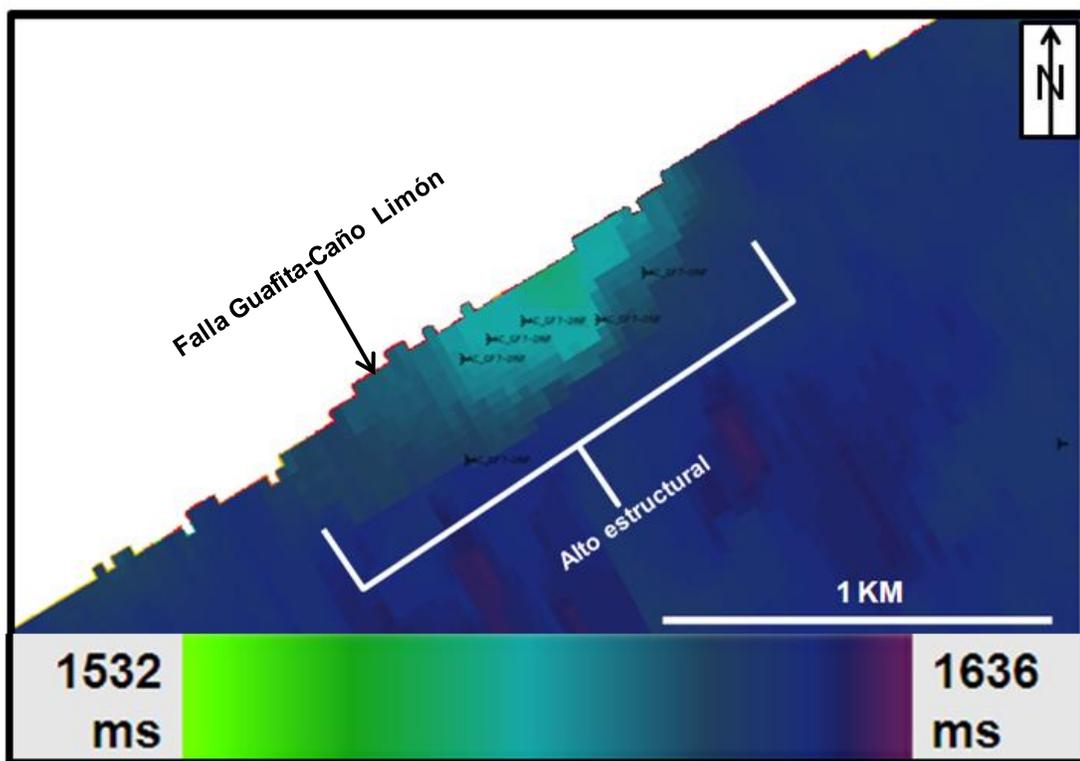


Figura 5.1. Mapa en unidades de tiempo de la arena G7-2 Inferior, muestra la Cuña estructural de la trampa GF-205X.

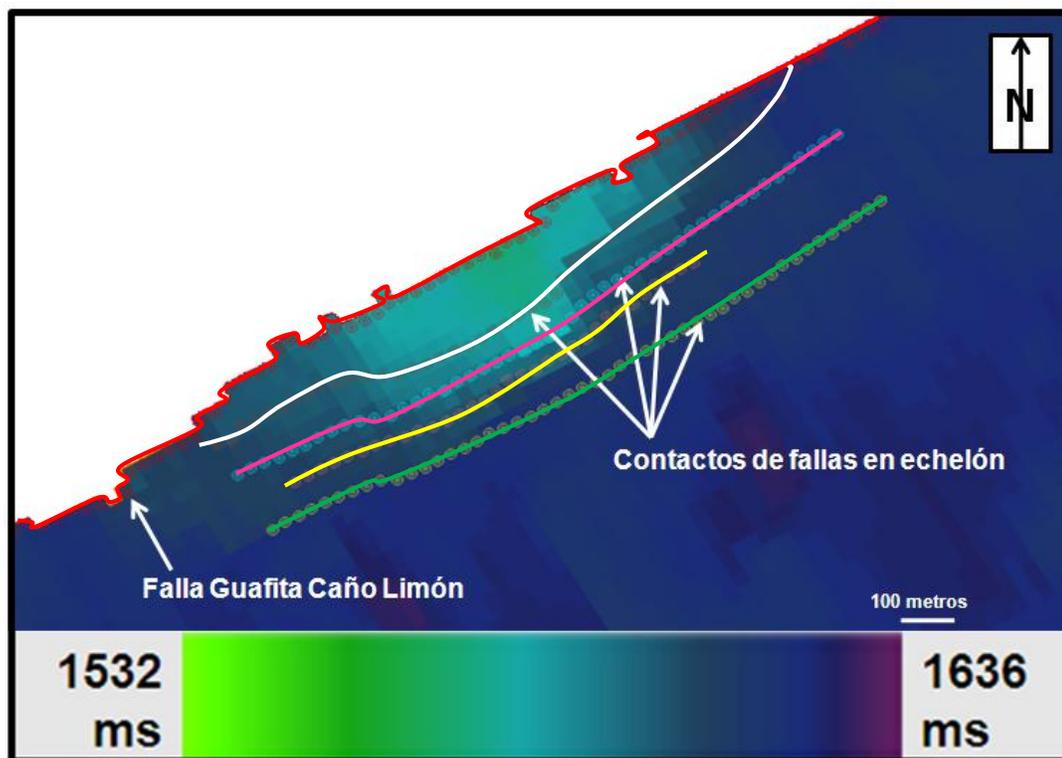


Figura 5.2. Mapa en unidades de tiempo de la arena G7-2 Inferior con los contactos de fallas interpretados.

### 5.1.2. Mapa en unidades de tiempo de la arena G8.

En el mapa del tope de la arena G8 no se observaron cuerpos geológicos de mayor área que la estructura que atraviesa el pozo GF-205X, hacia el Oeste de ésta y adjunta a la falla Guafita Caño Limón, se observó una estructura de menor volumen, la cual está conectada a la cuña estructural principal de la trampa GF-205X, por medio de una zona de mayor profundidad entre ambas estructuras la cual comienza desde el pozo GF-214 hacia el Oeste (Figura 5.3), el alto estructural donde está el pozo GF-205X, se observaron los contactos de las fallas en échelon, interpretadas en las secciones sísmicas (Figura 5.4).

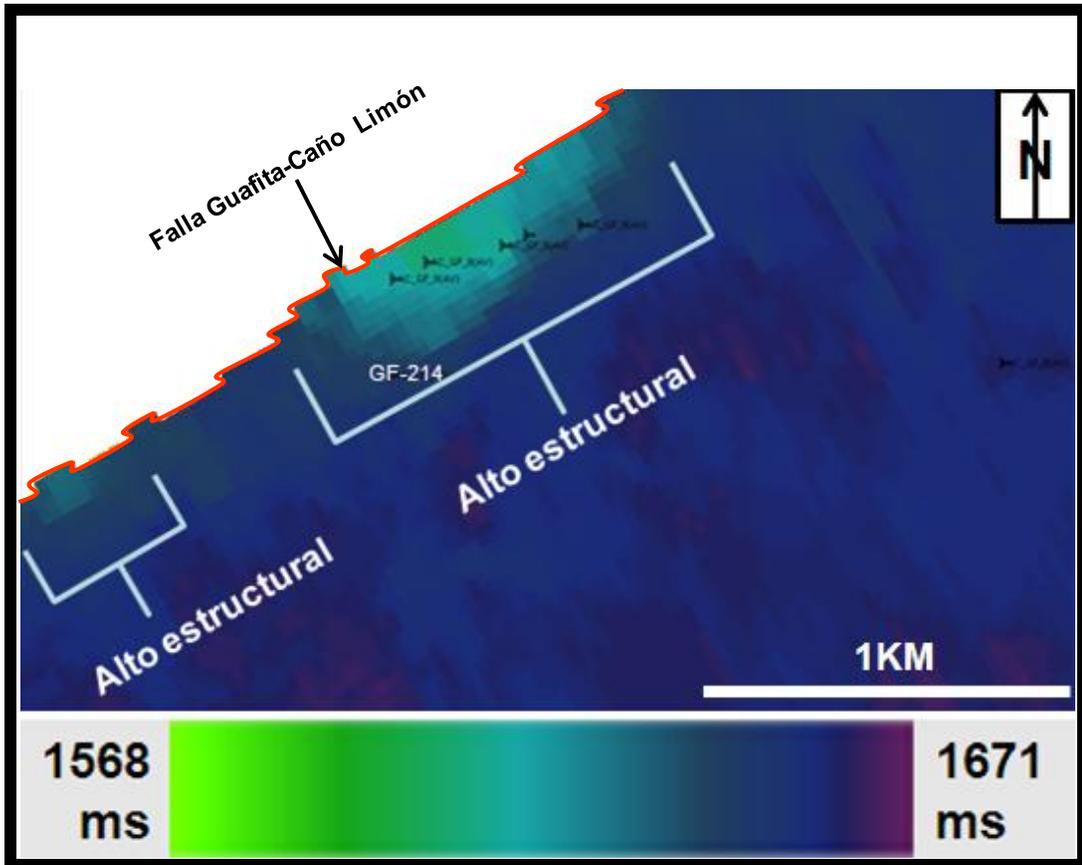


Figura 5.3. Mapa en unidades de tiempo de la arena G8, donde se evidencia presencia de los altos estructurales.

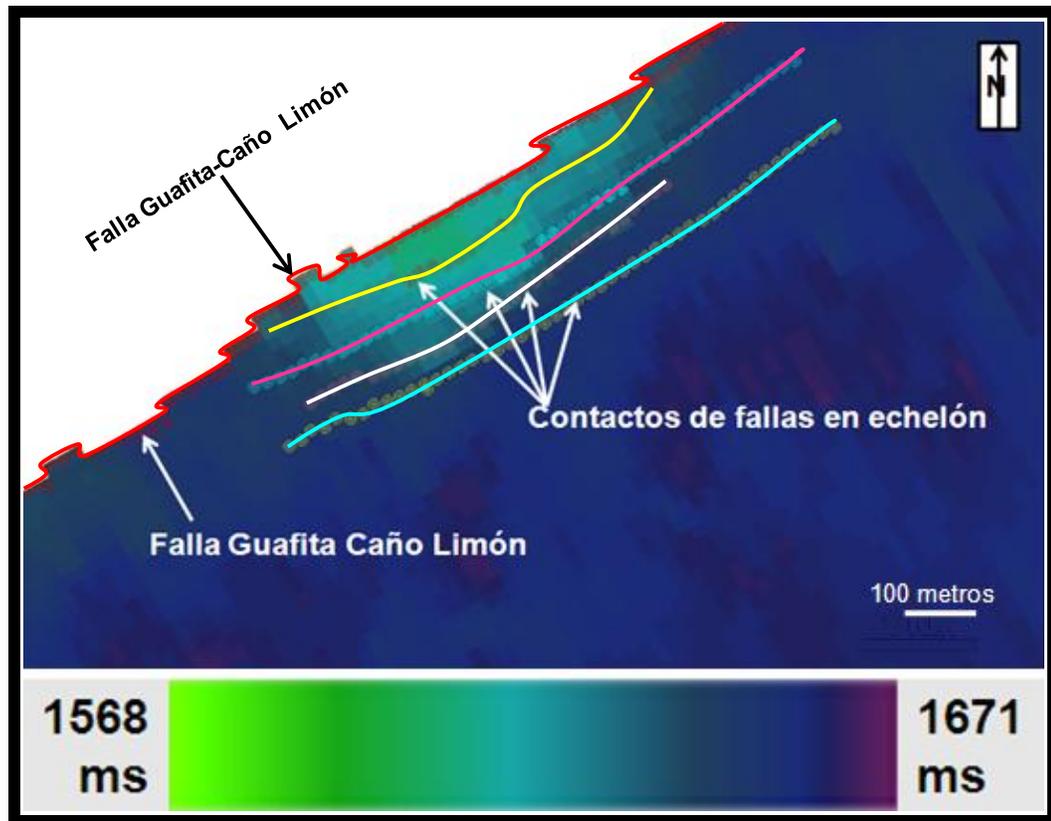


Figura 5.4. Mapa en unidades de tiempo de la arena G8 con los contactos de fallas.

### 5.1.3. Mapa en unidades de tiempo de la arena G9.

Las profundidades van desde 1582 ms hacia la parte más alta y 1684 ms hacia las zonas más bajas, las cuales están distribuidas entre las zonas noroeste y sureste de la superficie del horizonte correspondiente a la arena G9. Visto esto, hacia la zona noroeste y adjunto a la Falla Guafita-Caño Limón, se observó la estructura principal del pozo GF-205X (Figura 5.5) la cual hace contacto con las fallas en échelon que se conjugan en profundidad, con la Falla Guafita Caño-Limón (Figura 5.6); al Oeste existe otro alto estructural pero de menor área que la nombrada anteriormente y es una continuidad en fondo de la estructura mencionada en el mapa en unidades de tiempo de la arena G8.

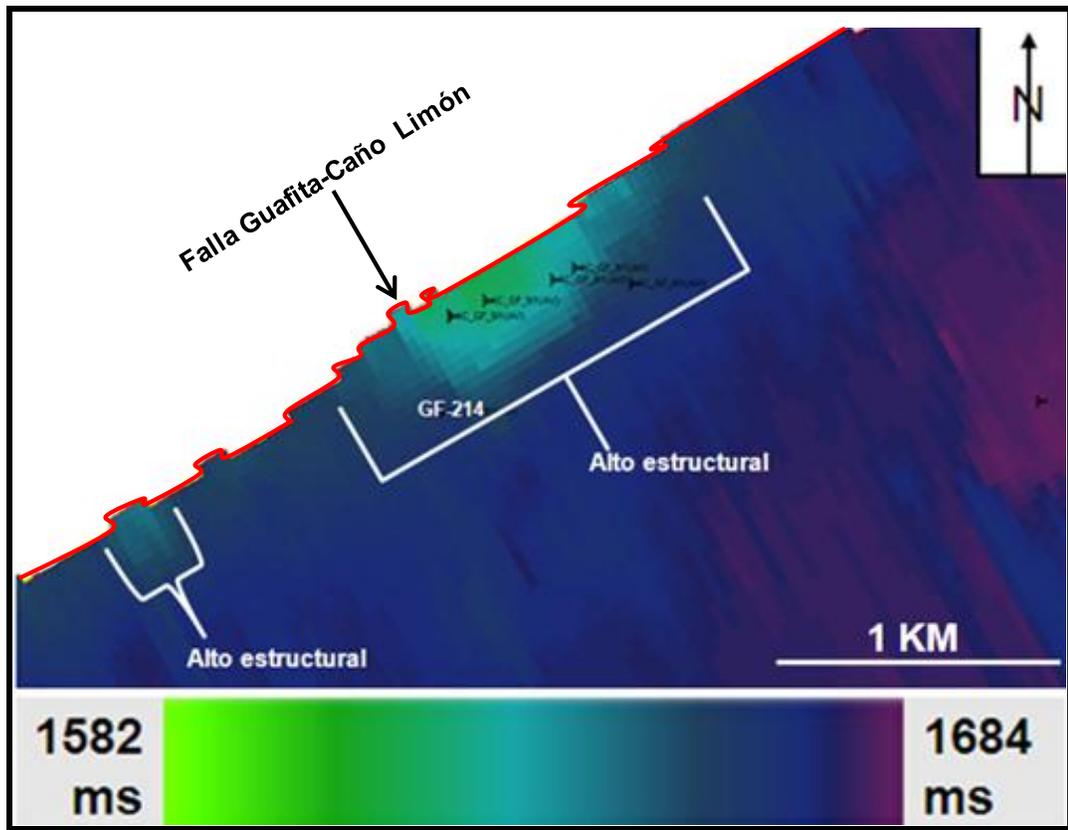


Figura 5.5. Mapa en unidades de tiempo de la arena G9, con los altos estructurales observados.

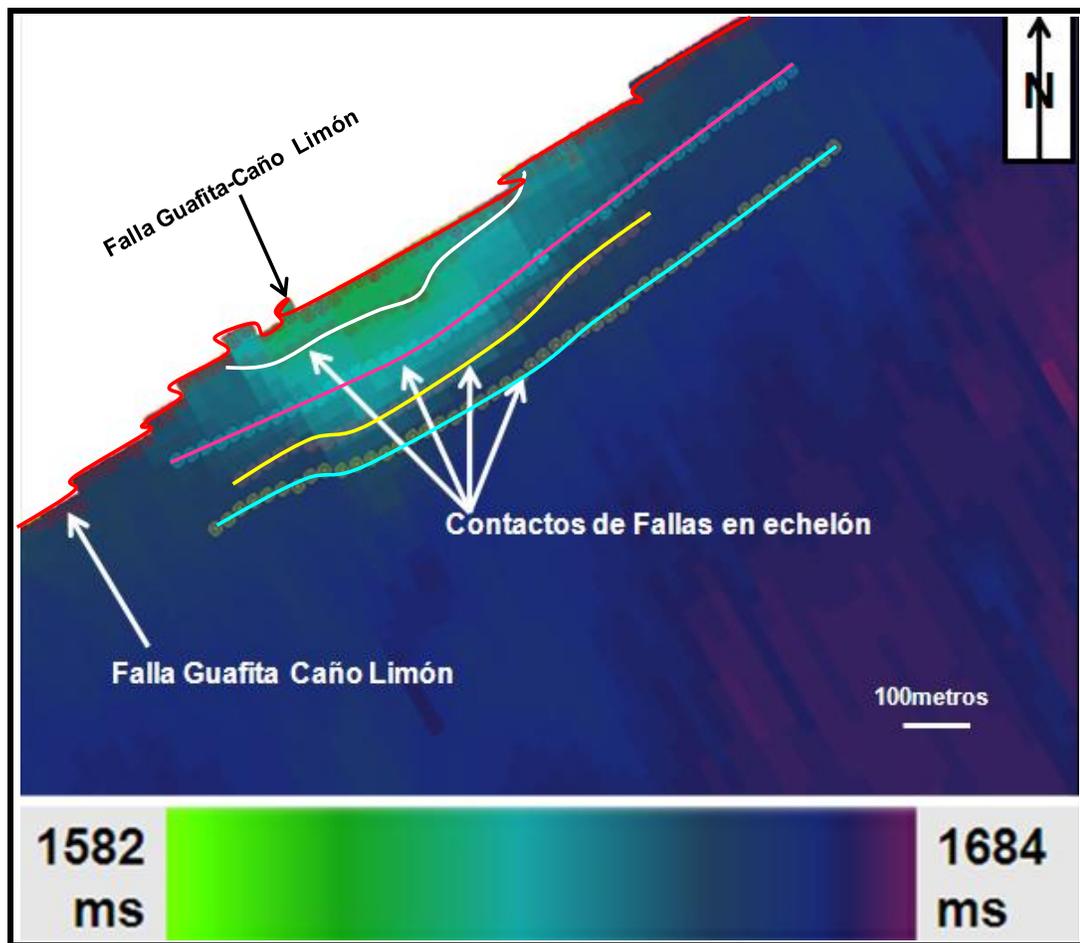


Figura 5.6. Mapa en unidades de tiempo de la arena G9 con los contactos de fallas.

#### 5.1.4. Mapa en unidades de tiempo de la arena G10.

Estructuralmente se observaron dos cuñas una principal, la trampa donde está el pozo GF-205X y otra más pequeña hacia el Oeste (Figura 5.7). Las fallas en escalón hacen a este nivel contacto con la estructura principal de la trampa y la dirección, que al igual que en los horizontes anteriores, es noreste-sureste (Figura 5.8). La profundidad en unidades de tiempo doble de viaje en la zona de estudio para esta arena está entre los 1590ms y 1697ms.

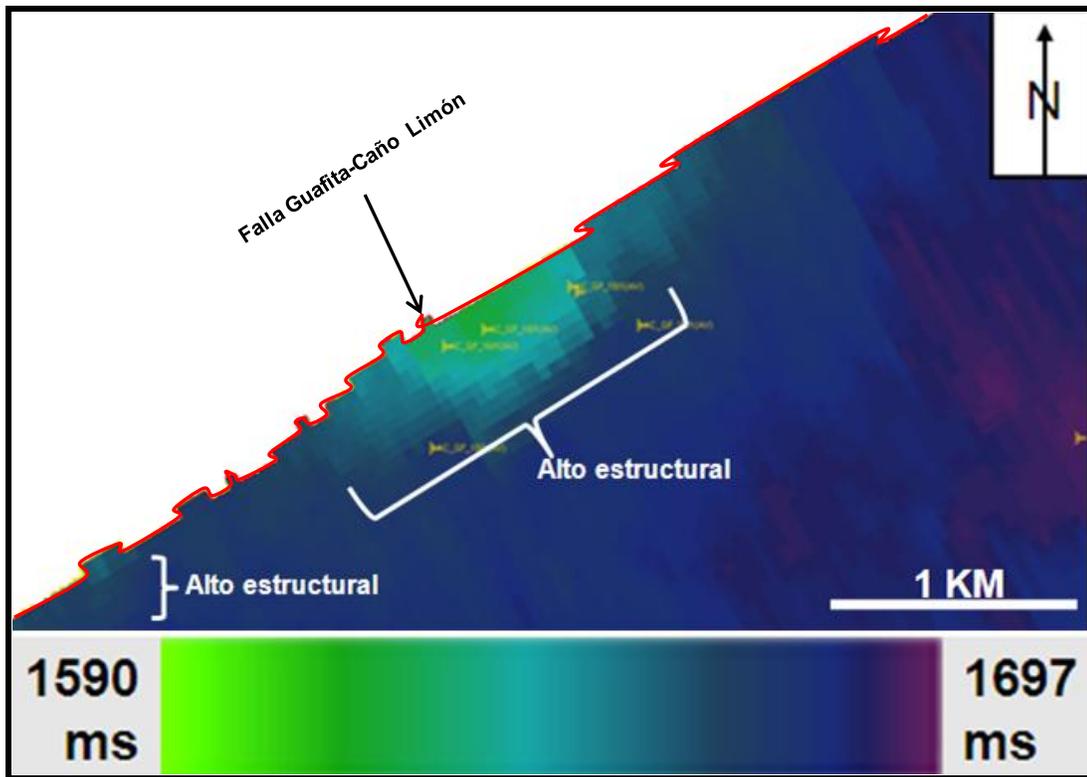


Figura 5.7. Mapa en unidades de tiempo de la arena G10, con los altos estructurales observados.

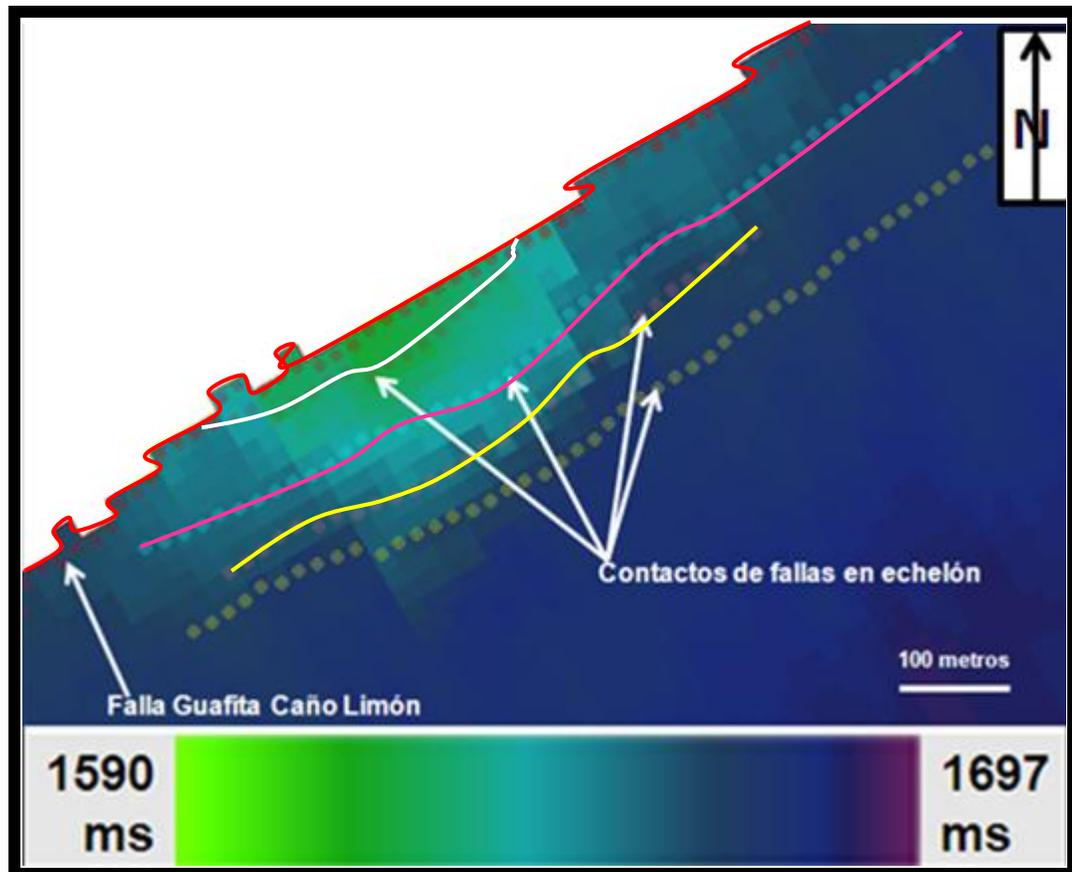


Figura 5.8. Mapa en unidades de tiempo de la arena G10 con los contactos de fallas.

## 5.2. Mapas Estructurales en Unidades de Profundidad.

De la conversión de mapas en unidades de tiempo a profundidad, se obtuvieron 4 mapas que son un símil al compararlos, tanto estratigráfica como estructuralmente. Los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9 y G10, se correlacionaron con las facies del cubo sísmico en unidades de profundidad, dando una excelente correlación. Con base en esto, y como objetivo complementario se interpretó el mapa de la arena G7<sub>3/4</sub>. Además se elaboró el modelo estructural 3D interpretando, adicionalmente, en profundidad la Lutita Lignítica, la Lutita de Guafita y la Discordancia de Quevedo (Discordancia del Cretácico), quedando en orden secuencial desde lo más

joven a lo más antiguo, gran parte de los topes de las arenas de la Formación Guafita de Edad Oligoceno, como a continuación se describe:

### **5.2.1. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G7-2 Inferior.**

La arena G7-2 Inferior Correspondiente al Miembro Guardulio de la Formación Guafita, muestra en el mapa en unidades de profundidad, la estructura principal de la trampa GF-205X, la cual es un alto estructural que está cizallado por fallas tipo escalón las cuales son normales, desde esta estructura y hacia el Oeste de la trampa se presentan las zonas menos profundas las cuales están adjuntas a la Falla Guafita Caño Limón (Figura 5.9).

Las profundidades en el sector del alto estructural oscilan entre 6550 y 6800 pies, allí se muestran las curvas de nivel con cambios más abruptos, la tendencia de las curvas de nivel es en dirección Noroeste-Sureste, esto es probable que haya sido producto de la inflexión de apertura o zona de extensión que es característico de las fallas transcurrentes las cuales producen intrusiones de pequeña envergadura. Hacia la zona Sur y Este del mapa de forma general las curvas de nivel tienen un comportamiento más suave y la profundidad es mayor cuyo intervalo es mayor a 6800 y menor a 7100 pies.

Durante la interpretación sísmica no se observó que hubiese presencia de fallas hacia las zonas más bajas por lo cual es posible que esta zona no haya sido afectada por los eventos tectónicos que ocurrieron en el área asociada a la ventana de estudio.

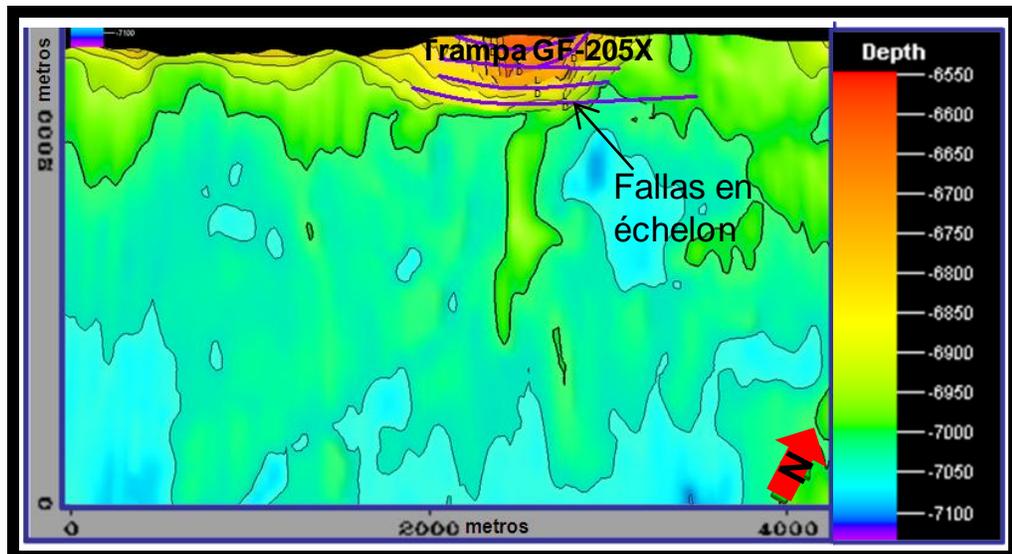


Figura 5.9. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G7-2 Inferior.

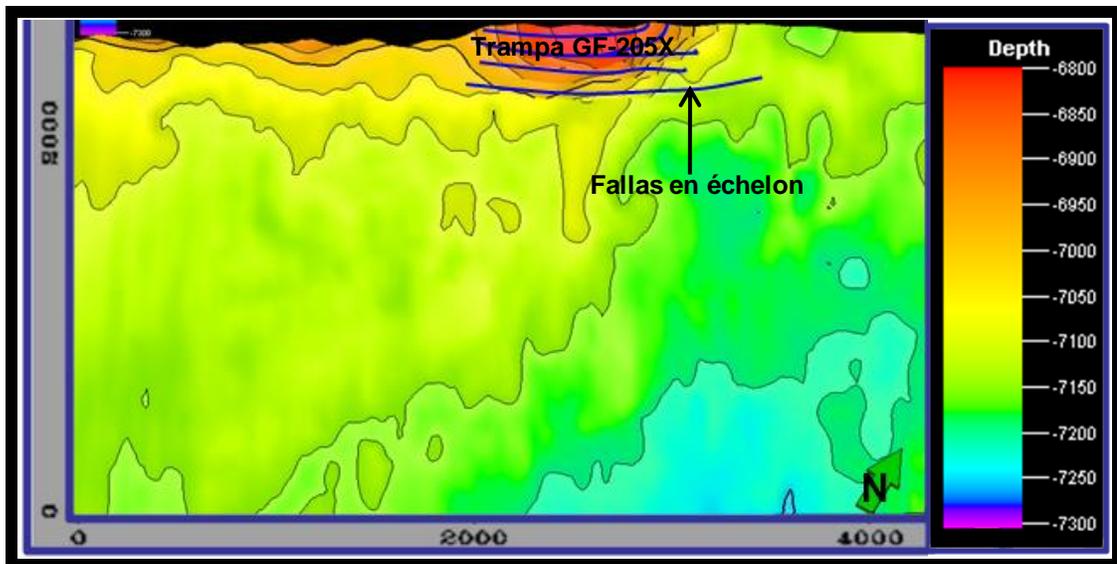
### 5.2.2. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G73/4.

Esta superficie se encuentra por debajo del tope de la arena G7-2 Inferior, la cual muestra una continuidad de las fallas en échelon, que atraviesan la estructura principal del pozo GF-205X. El tope de la arena G73/4 muestra menores profundidades en la dirección noroeste y las más someras están

La estructura principal de la Trampa GF-205X y la que se observó hacia el Oeste de ésta, son una continuación de la posible inflexión de apertura, producto de la extensión debido a entre los 6800 y 7000 pies, las profundidades hacia el sur van en aumento y la suavidad de las curvas de nivel así lo muestran. En las zonas más bajas no se observó la presencia de fallas, el intervalo de profundidades es mayor a los 7000 pies y puede llegar hasta 7200 pies.

un alejamiento del Bloque de Guafita Norte con respecto al Bloque de Guafita sur en esta zona. Observando la Figura 5.10 se puede ver que la línea de la Falla Guafita Caño Limón presenta cierta curvatura hacia donde

está el alto estructural y también se observó hacia el Oeste, cabe destacar que la inflexión de apertura o dúplex extensional forma hundimientos y en este caso existe es un levantamiento. Por lo que es probable que la estructura ya existiese previamente a la apertura. La apertura extensional dio origen a la estructura en flor negativa que se observó en la sísmica y que está formada por fallas normales cuyo salto no es apreciable en la sísmica, es decir, los saltos de las fallas en escalón interpretadas deben estar por debajo de la resolución sísmica vertical la cual se calculó en 80 pies.



**Figura 5.10.** Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G73/4.

### **5.2.3. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G8.**

En este caso las profundidades menores van desde 6850 hasta 7100 pies y están en la zona de la estructura mayor adjunta a la Falla Guafita Caño limón y hacia el Oeste de ésta, los sectores de mayor profundidad están hacia el Este y Sur de la estructura principal que son mayores a los 7100 pies con un límite aproximado a los 7300 pies (Figura 5.11).

La Zona estructural más levantada es una consecuencia de la posible deformación no planar (compensación volumétrica por hundimientos y levantamientos) donde posiblemente se produjo un efecto dúplex extensional con la previa presencia de la estructura principal de la trampa GF-205X, dando origen a las fallas en échelon que conforman parte de una flor negativa y cuyos saltos son despreciables ante la resolución sísmica vertical.

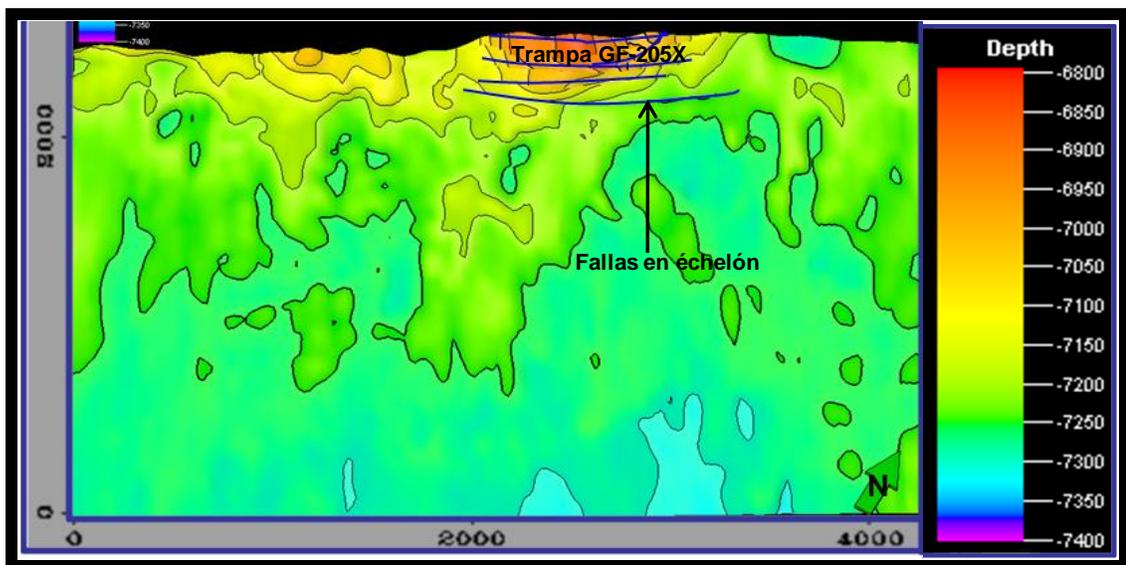


Figura 5.11. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G8.

#### 5.2.4. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G9.

Las zonas menos profundas en el mapa de la arena G9, se ubican desde el alto estructural de la Trampa GF-205X y hacia el Oeste de ésta, manteniendo la secuencia en profundidad de lo que fue el efecto de los posibles esfuerzos del dúplex extensional que produjo una zona de apertura como consecuencia del desplazamiento transcurrente de la Falla Guafita Caño Limón, permitiendo de esta forma, que el alto estructural previamente

formado colapsara formando las fallas imbricadas en échelon. La profundidad en esta región oscila entre 6900 y 7200 pies. Hacia el Sur y Este de la trampa principal la profundidad es mayor a los 6900 pies y puede llegar hasta 7400 pies (Figura 5.12).

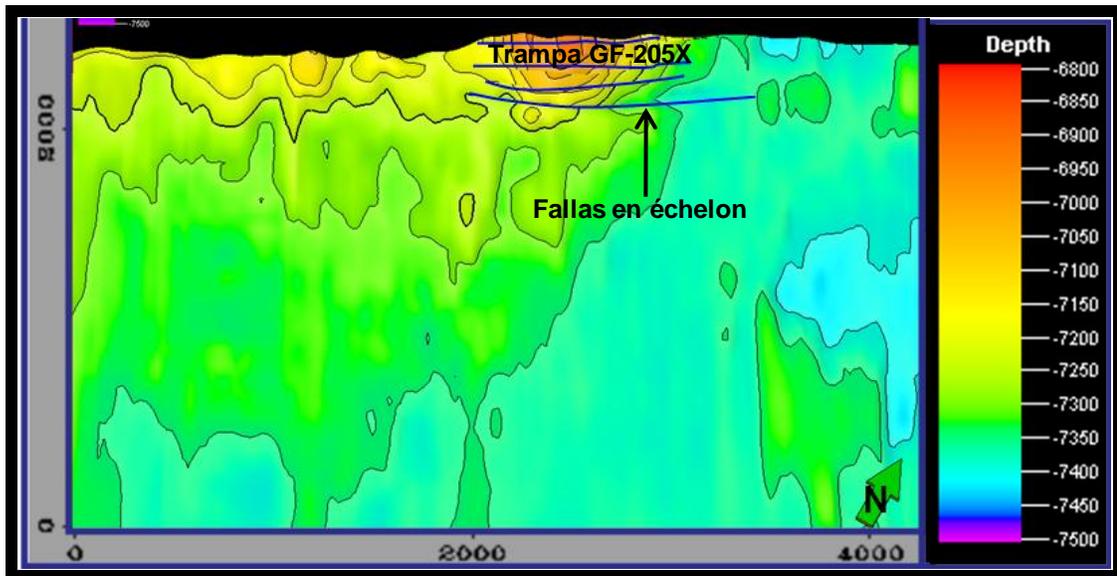


Figura 5.12. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G9.

### 5.2.5. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G10.

El mapa estructural del tope de la arena G10 muestra, al igual que en los mapas anteriores, los efectos de los esfuerzos producidos por el desplazamiento dextral normal de la Falla Guafita-Caño Limón, la distribución de zonas menos profundas permanece desde la trampa GF-205X hacia el Oeste en el intervalo de 7000 a 7200 pies. Los sectores de menor profundidad se ubican hacia el Sur y Oeste del mapa con valores mayores a los 7200 pies y menores a 7400 de profundidad; hacia la zona más profunda no se observaron fallas estructurales, lo que implica que este sector

posiblemente no fue afectado por los eventos tectónicos de la falla principal (Figura 5.13)

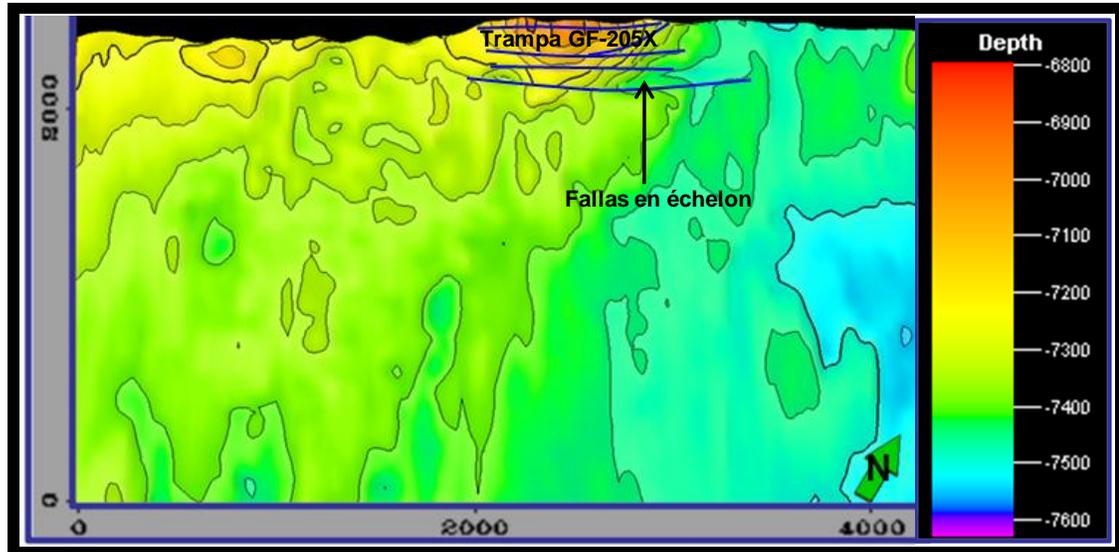


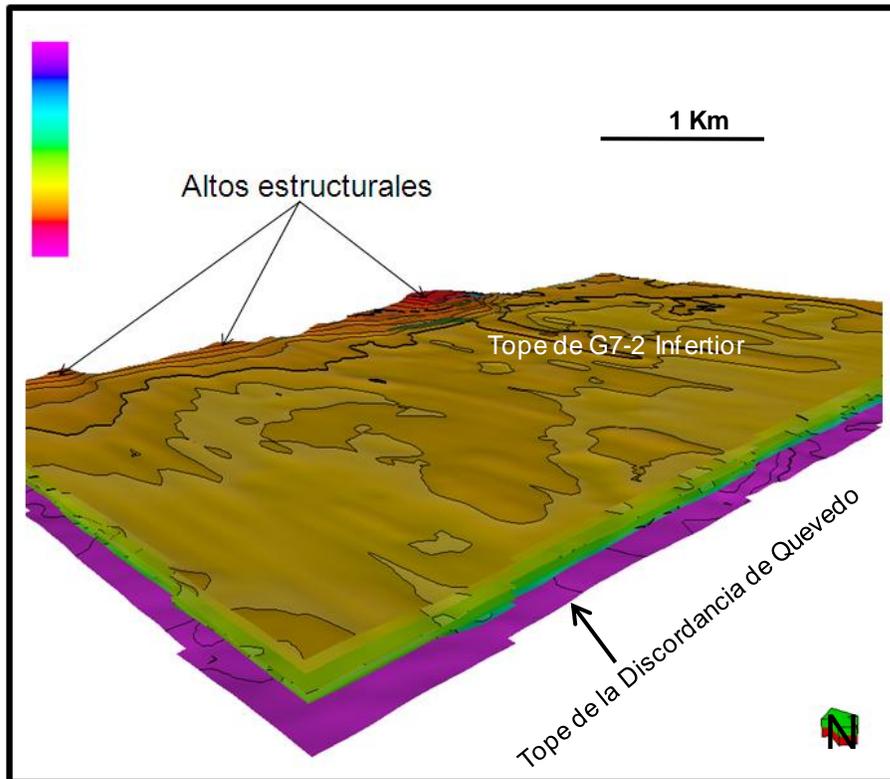
Figura 5.13. Mapa estructural en unidades de profundidad del tope de la arena G10.

### 5.3. Modelo Estructural 3D de la Trampa GF-205X.

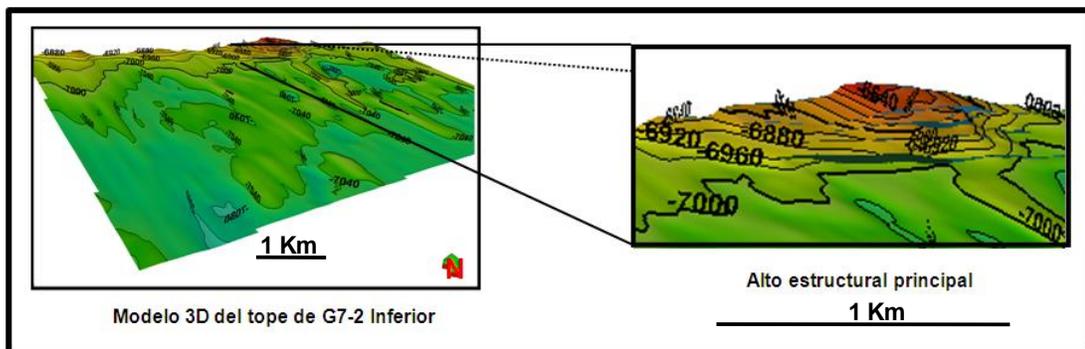
Este modelo está elaborado en una malla con celdas de 25x25 metros cuadrados y 10 pies de profundidad muestra la distribución espacial en forma paralela de la secuencia geológica que conforma gran parte de la Formación Guafita a partir del tope de la arena G7-2 Inferior hasta la Discordancia de Quevedo como base de todo el cubo, allí se destaca en particular el alto estructural principal de la trampa GF-205X, con otras pequeñas zonas altas y hacia el Oeste, además y en gran parte para el resto del modelo 3D, muestra sectores planos que aumentan su profundidad hacia el Este y el Sur (Figura 5.14).

Del modelo estructural 3D se extrajeron mapas de las secciones que conforman el cubo, desde el tope de la G7-2 Inferior (Figura 5.15), G73/4

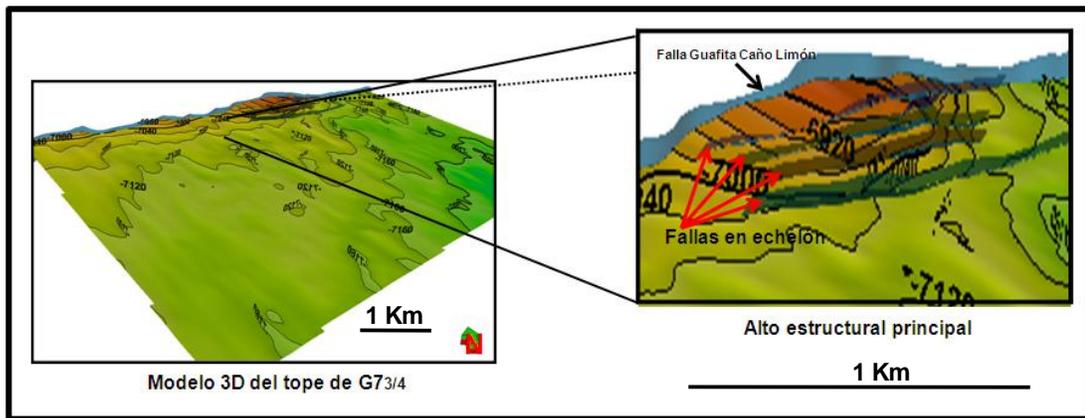
(Figura 5.16), G8 (Figura 5.17), G9 (Figura 5.18) y G10 (Figura 5.19) estas permitieron ver espacialmente la distribución de profundidades en cada tope, la presencia de las estructuras y las correspondientes fallas interpretadas, las cuales fueron descritas en los mapas estructurales.



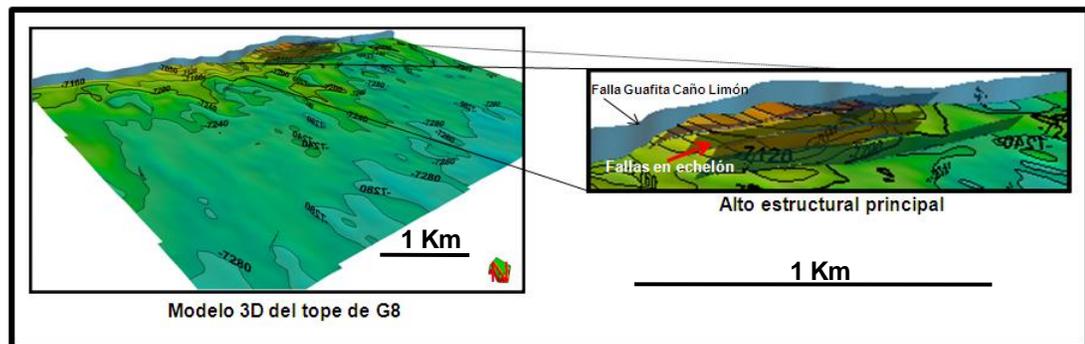
**Figura 5.14.** Modelo Estructural 3D de la Trampa GF-205X.



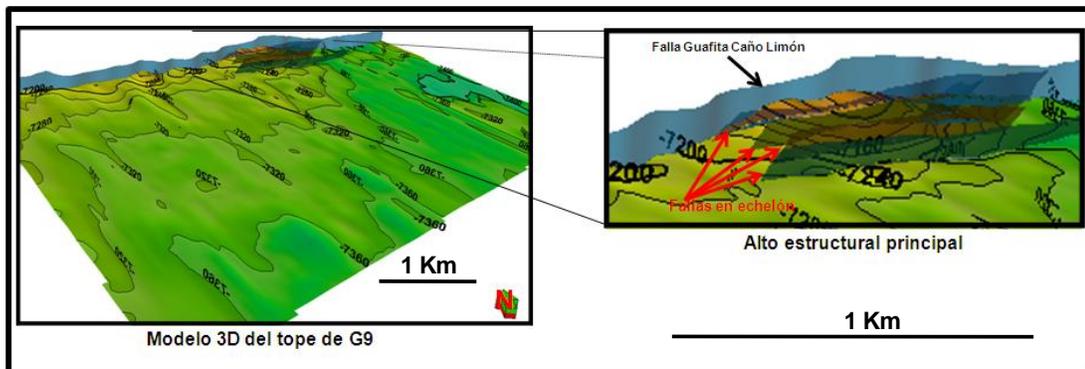
**Figura 5.15.** Sección 3D del tope de la arena G7-2 Inferior con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.



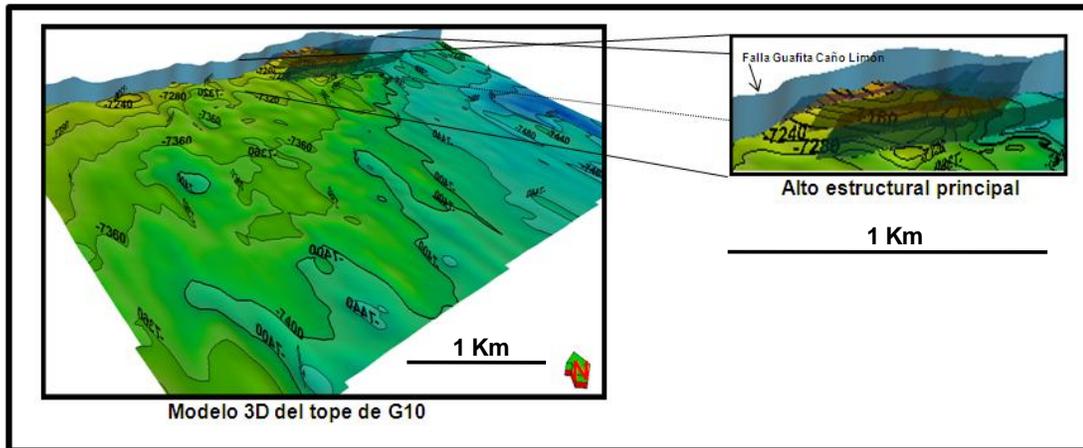
**Figura 5.16.** Sección 3D del tope de la arena G73/4 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.



**Figura 5.17.** Sección 3D del tope de la arena G8 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.



**Figura 5.18.** Sección 3D del tope de la arena G9 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.

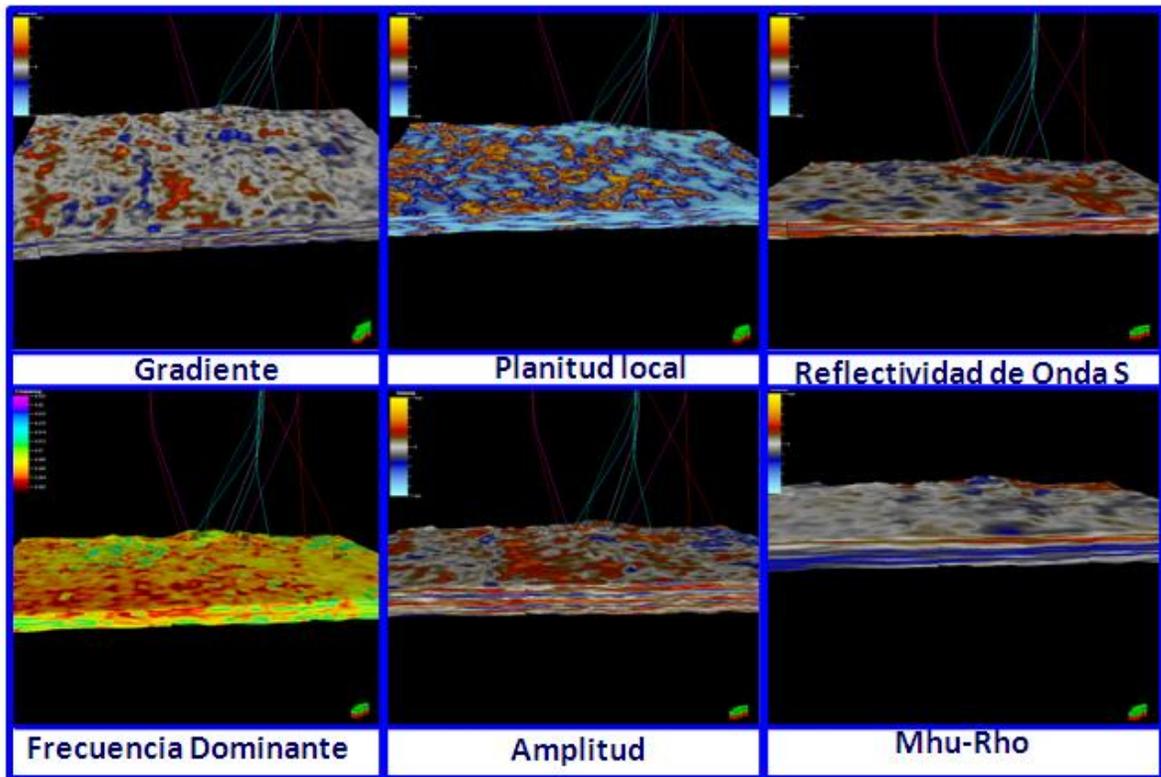


**Figura 5.19.** Sección 3D del tope de la arena G10 con la extracción del alto estructural principal de la Trampa GF-205X.

#### 5.4. Cubos de Atributos Sísmicos y Cubos de pseudo propiedades.

Luego de aplicar al modelo estructural 3D una serie de atributos sísmicos de volumen, donde unos fueron elaborados y otros tomados de la inversión sísmica efectuada por la empresa GX Technologies.

El resultado de la elección se realizó por medio del análisis de dos aspectos fundamentales en particular, los cuales fueron que tuviesen la mejor correlación lineal con la propiedad petrofísica a propagar en determinado horizonte geológico (Figura 5.20), es decir, que existiese el mejor factor de regresión, tanto en el atributo petrofísico de porosidad como el de arcillosidad y que haya independencia lineal entre los atributos a aplicar, es decir una baja regresión lineal (Tabla 5.1). Los atributos que obtuvieron los valores más altos de factor de regresión lineal, en los gráficos cruzados se aprecian en la tabla 5.2.



**Figura 5.20.** Cubos de atributos sísmicos de mejor correlación con propiedades petrofísicas.

**Tabla 5.1.** Correlación de Atributos Sísmicos y Petrofísicos.

SUPERFICIE	ATRIBUTO	CORRELACION CON POROSIDAD	CORRELACION CON ARCILLOSIDAD
G7-2 Inferior	Gradiente	39,38	32,73
G7-3/4	Local Flatness	48,04	32,41
Lutita lignítica	Reflectividad de onda S	32,65	52,84
G8	Frecuencia Dominante	28,65	46,00
Lutita de Guafita	Frecuencia Dominante	47,43	71,03
G9	Amplitud	44,10	55,16
G10	Mhu-Rho	44,10	28,61

Los cubos de pseudo propiedades se obtuvieron por la propagación de propiedades petrofísicas de porosidad efectiva y arcillosidad, Figuras 5.21 y 5.22, con el uso del método de *kriging* simple, de estos cubos se extrajeron los mapas de pseudo propiedades que dieron la información necesaria para estimar las zonas probables de mayor porosidad que están asociadas a regiones de menor arcillosidad, para así estimar la distribución estratigráfica, definir las zonas de mejores propiedades petrofísicas y la dirección de

sedimentación como objetivo de este trabajo y que representa la única información en este sentido del Campo Guafita ya que no se encontró información al respecto, esta dirección fue obtenida de los variogramas (Tabla 5.2).

Es importante destacar que en los variogramas de cada arena se identificaron 2 poblaciones distintas, las cuales son las arenas de alta porosidad (arenas limpias) y las de baja porosidad, debido a la influencia de las arcillas, ya que después del punto de silla comienzan las fluctuaciones en dichos gráficos mostrando un comportamiento periódico (Figura 5.23).

**Tabla 5.2.** Dirección de sedimentación de las arenas estudiadas.

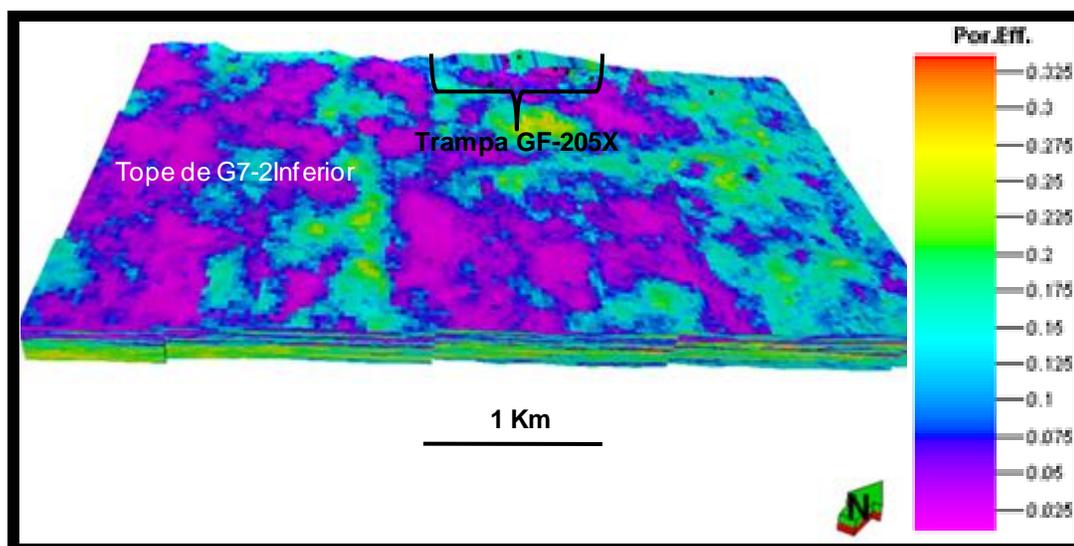
Arena	Dirección de sedimentación
G7-2 Inferior	Sur 15º Este
G73/4	Sur 10º Este
G8	Sur 20º Este
G9	Sur 15º Este
G10	Sur 25º Este

La correlación lineal entre el cubo de porosidad y arcillosidad fue de 83,22% así lo demuestra el diagrama cruzado entre los cubos de pseudo propiedades (Figura 5.24), lo cual permite una comparación veraz entre las secciones de cada tope de cuerpo sedimentario que conforman estos cubos.

Un aspecto muy importante obtenido de los cubos fue el espesor promedio de cada cuerpo sedimentario que conforman gran parte del paquete geológico de la Formación Guafita (Figura 5.25), cuyos valores se muestran en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3.** Espesores promedios de las arena que son parte de la Formación Guafita.

Arena	Espesor promedio (pies)
G7-2 Inferior	85
G73/4	110
G8	85
G9	80
G10	120



**Figura 5.21.** Cubo de porosidad.

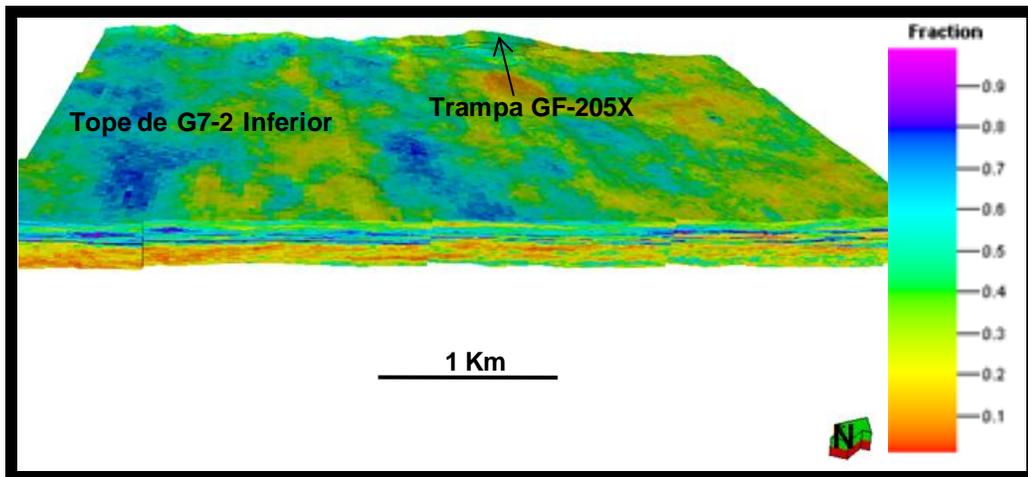


Figura 5.22. Cubo de arcillosidad.

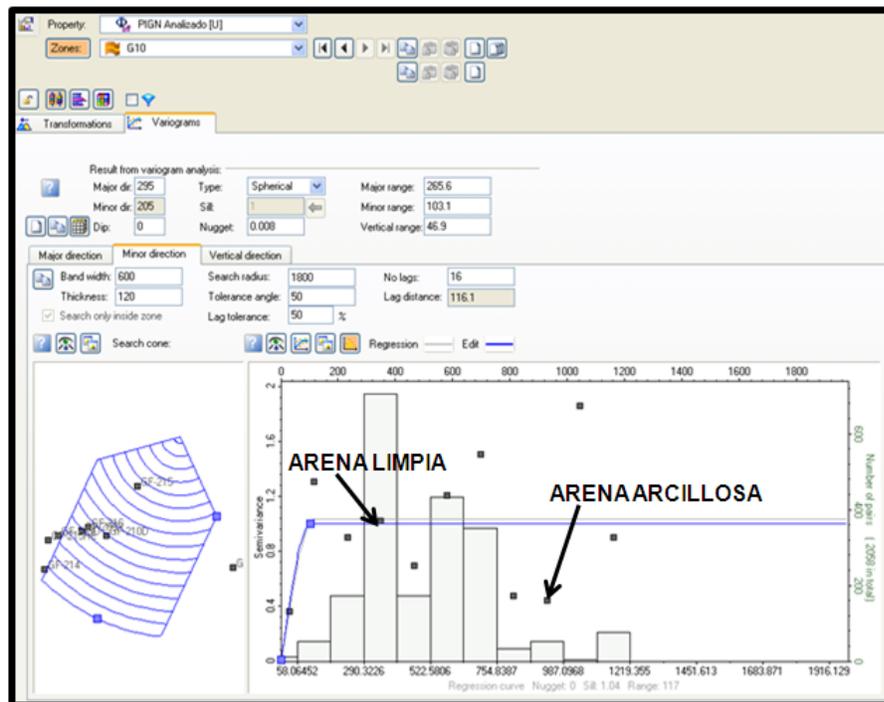


Figura 5.23. Variograma de la arena G10 mostrando la presencia de 2 poblaciones distintas, arenas limpias y arenas arcillosas.

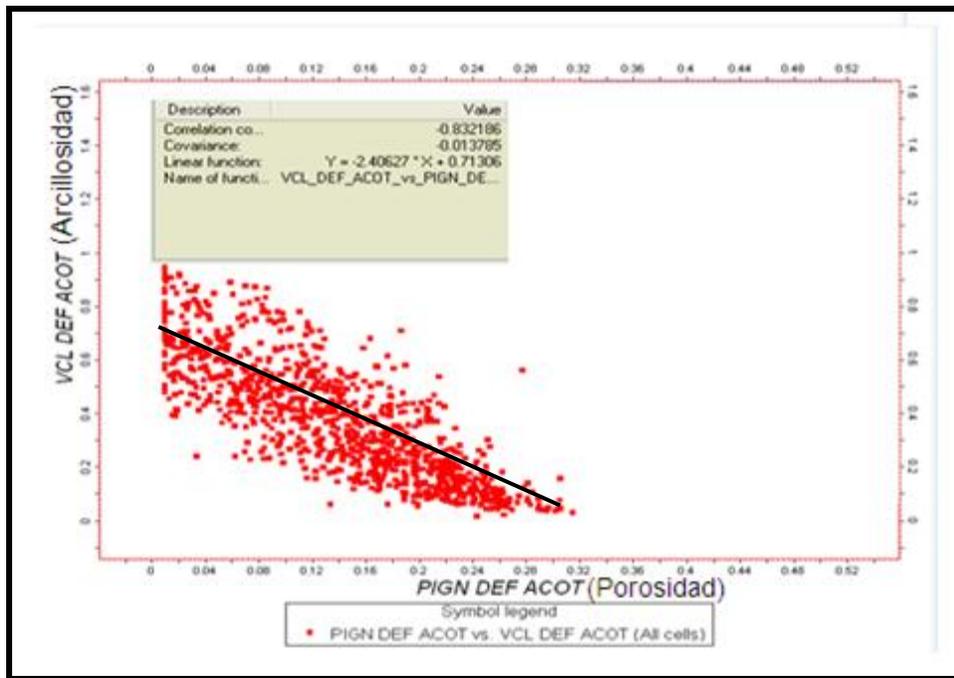


Figura 5.24 Diagrama cruzado en entre los cubos de pseudo propiedades.

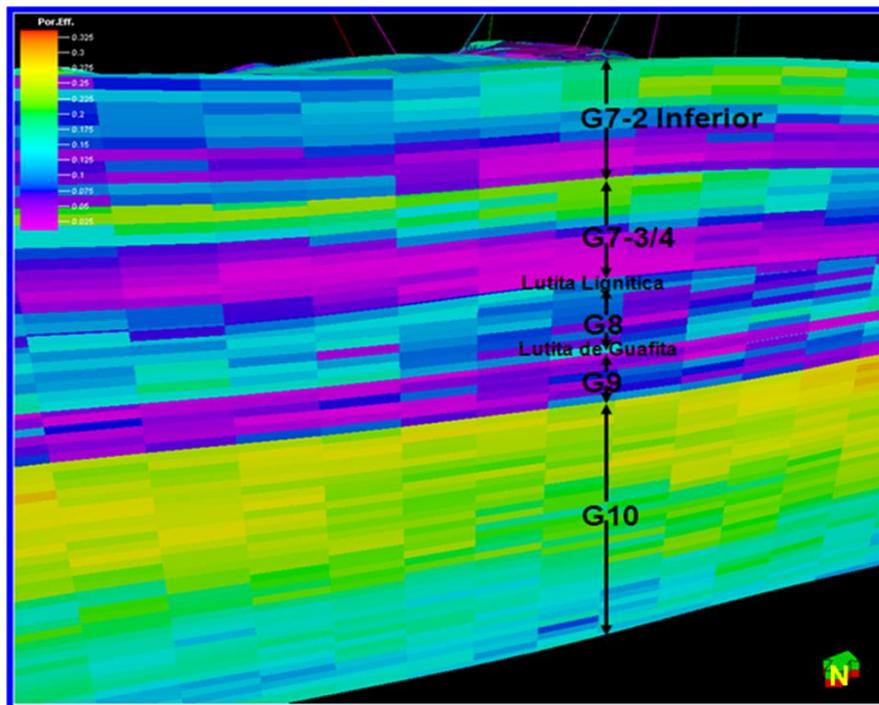


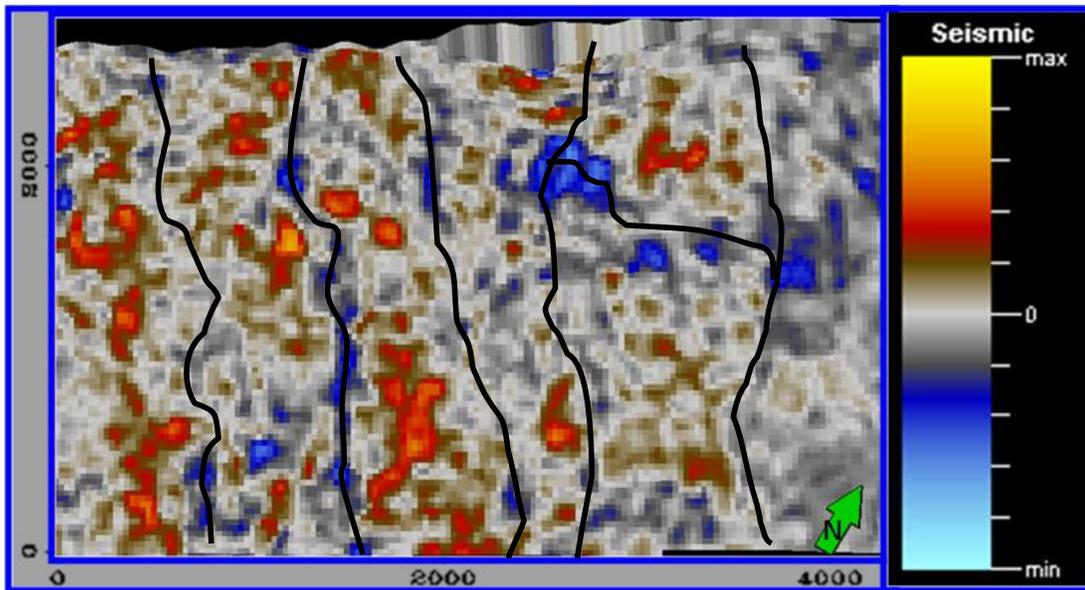
Figura 5.25. Secuencia estratigráfica del cubo de porosidad desde el tope de la arena G7-2Inferior hasta el tope de la Discordancia de Quevedo.

#### **5.4.1. Mapa de atributo sísmico Gradiente, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G7-2 Inferior.**

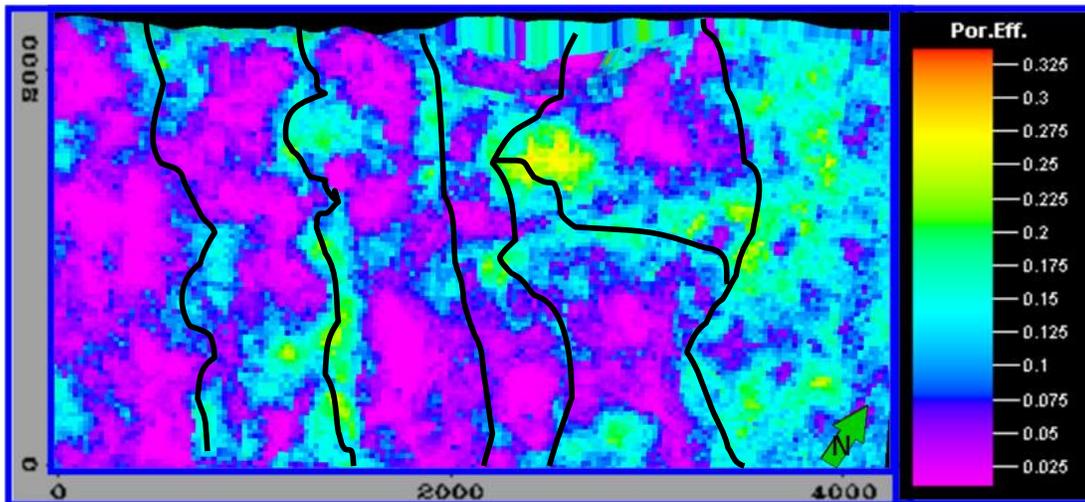
El atributo sísmico Gradiente AVO es un atributo que permite efectuar interpretaciones de tipo estratigráfico, además de ayudar a clasificar el tipo de fluidos, para poder lograr una interpretación suficientemente coherente con la realidad geológica, se usa con el atributo Intercepto AVO en un gráfico cruzado (*crossplot*) ya que ambos permiten discriminar el efecto de fondo a causa de la presencia de arcillas el cual es un factor que interviene en las arenas del Campo Guafita o el contenido de agua salada en la formación. Por la razón de que no se pudo contar con este atributo (elaborado por la empresa GXT) y no se tenían las herramientas suficientes para efectuarlo, se aplicó bajo la base de que el atributo gradiente fue el que dio la mejor correlación lineal en el tope de la arena G7-2 Inferior (Figura 5.26).

El mapa de atributo gradiente AVO muestra zonas de bajos valores, los cuales están asociados a zonas de alta porosidad, esto corroborado con el mapa de porosidad (Figura 5.27). Este mapa muestra que hacia la zona de la Trampa GF-205X las porosidades son altas y se destaca un posible canal principal en dirección Noroeste-Sureste que en el mapa de contenido de arcilla se presenta con valores bajos, sin embargo, sobre la el mapa de porosidad se observa que la región de mayor porosidad está hacia la región derecha del mapa y es correspondiente con las zonas de menor contenido de arcilla (Figura 5.28) .

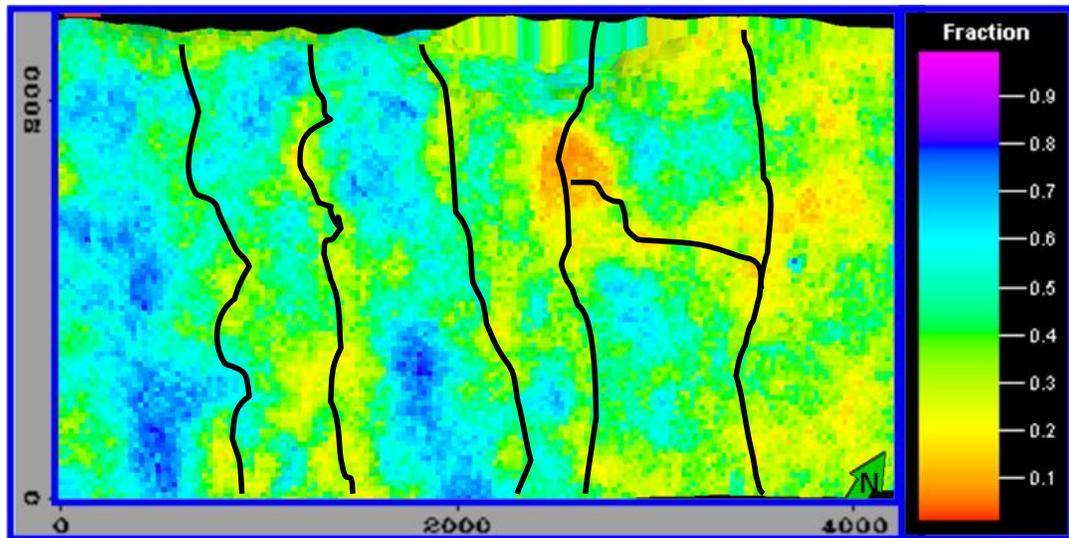
Hacia el Oeste de la Trampa GF-205X, donde están los altos estructurales de menor volumen, se muestran un bajo gradiente, alta porosidad y correspondientemente baja arcillosidad por lo cual puede ser una zona de entrapamiento de hidrocarburo.



**Figura 5.26.** Mapa de atributo sísmico gradiente en el tope de la arena G7-2 Inferior, las zonas en negro representan posibles canales.



**Figura 5.27.** Mapa de porosidad del tope de la arena G7-2 Inferior, las zonas en negro correspondientes a la menor porosidad, pueden estar asociados a posibles canales.



**Figura 5.28.** Mapa de arcillosidad del tope de la arena G7-2 Inferior, en negro se destacan las zonas de menor arcillosidad las cuales puede que correspondan a posibles canales.

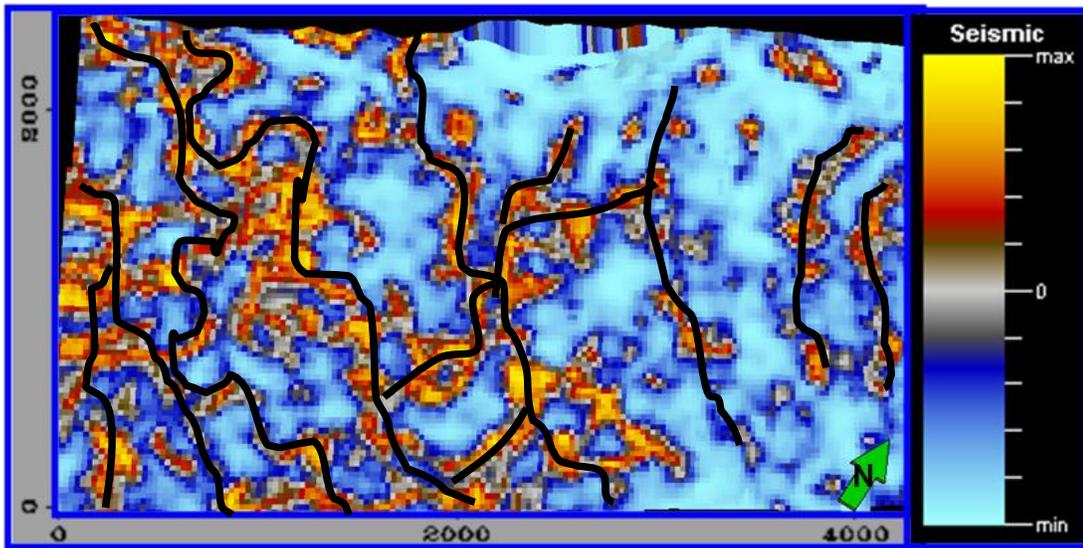
#### **5.4.2. Mapa de atributo sísmico planitud local, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G73/4.**

Es un atributo que se usa tanto para la interpretación estratigráfica como estructural y compara la orientación y la uniformidad de cada punto en la superficie aplicada, la correlación más alta fue con la superficie de la arena G73/4 (Figura 5.29) donde en los lugares de altos valores de planitud local, las regiones muestran los mayores valores de porosidad (Figura 5.30) y está asociada con zonas de bajo contenido de arcilla (Figura 5.31).

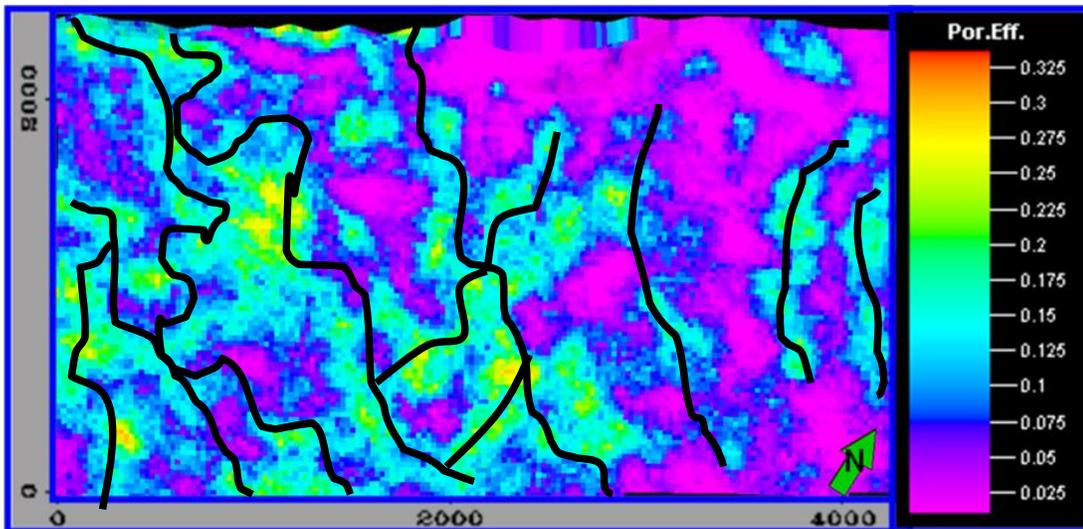
En dirección Oeste de la Trampa GF-205X se observó valores de alta planitud local, con alta porosidad y correlacionada con una baja arcillosidad. Lo contrario sucede hacia el Este, por lo cual es posible tener prospectividad en cuanto a la explotación de hidrocarburo, en esta dirección.

Estratigráficamente se observaron formas alargadas y ondulantes posiblemente asociadas a canales, además de zonas en forma de arco que

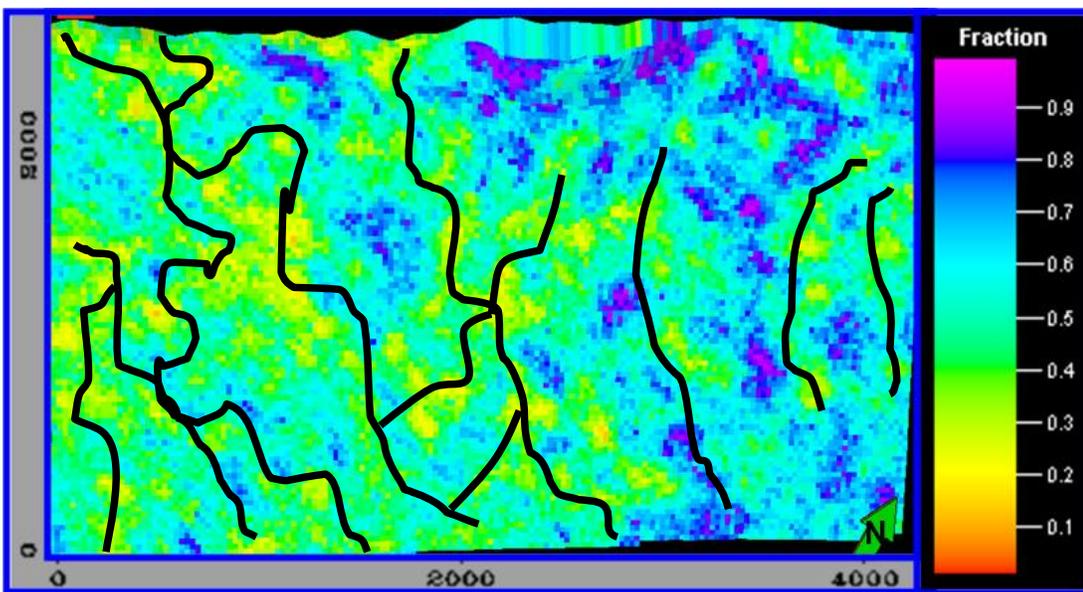
puede ser parte de un abanico de rotura, siendo estas expresiones estratigráficas las que conforman principalmente la geología de la arena G73/4, la región del mapa de porosidad con mejores propiedades petrofísicas de porosidad y contenido de arcilla es en dirección Este-Oeste, del lado izquierdo de los mapa respectivos, en el cual las expresiones de planitud local son mayores.



**Figura 5.29.** Mapa de atributo sísmico planitud local en el tope de la Arena G73/4, muestra en las zonas de alto valor de planitud formas que se asemejan a canales entrelazados.



**Figura 5.30.** Mapa de porosidad del tope de la Arena G73/4, muestra las delineaciones de poros interconectados en lugares de posibles canales.



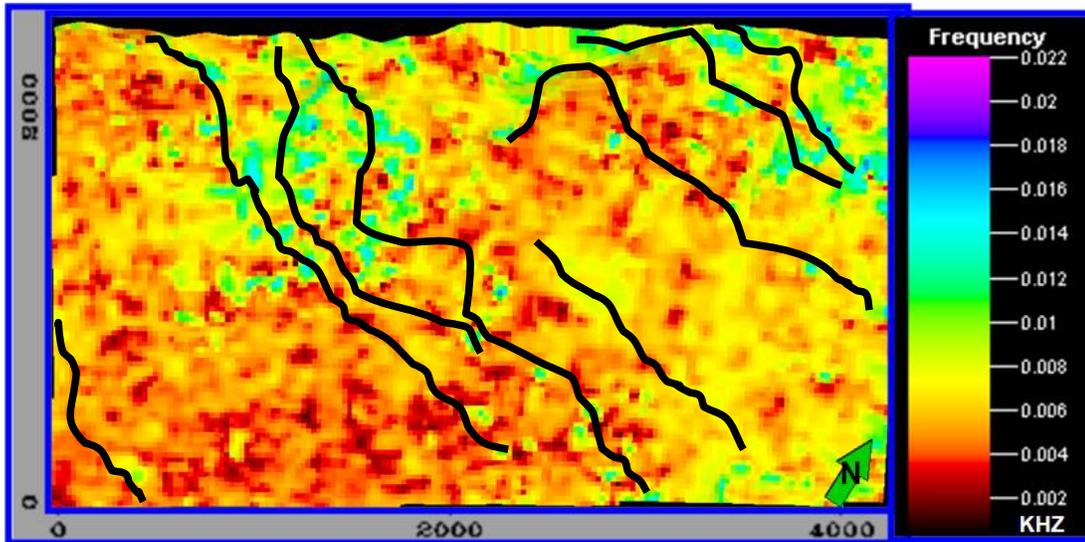
**Figura 5.31.** Mapa de arcillosidad del tope de la arena G73/4, se observó que las zonas de menor contenido de arcillas corresponden a las de mayor porosidad distinguiéndose posibles canales.

### **5.4.3. Mapa de atributo sísmico frecuencia dominante y mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G8.**

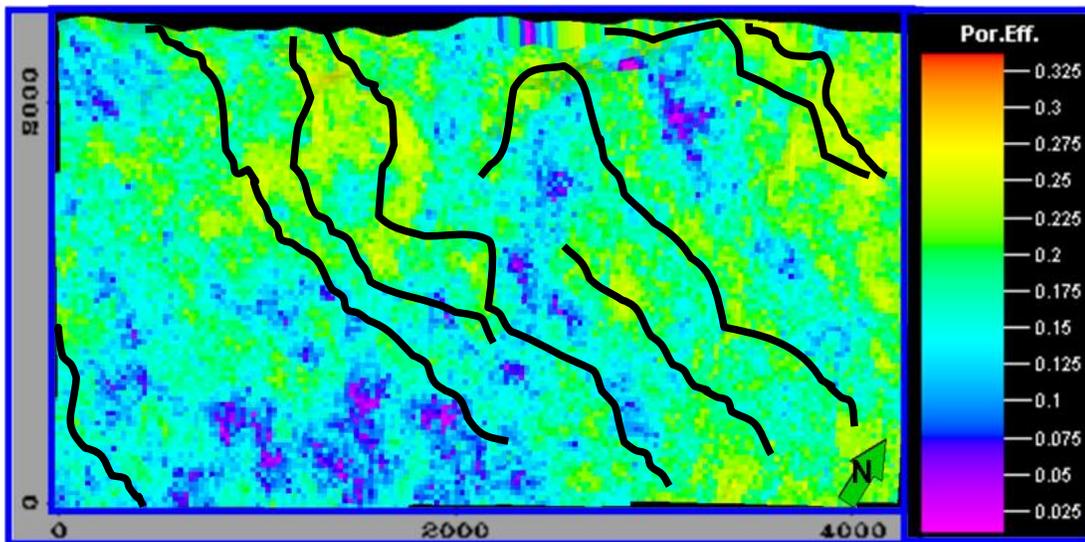
En el mapa del tope de la arena G8. La frecuencia dominante (Figura 5.32) no está relacionada con la frecuencia de la sísmica en tiempo doble de viaje, ya que las unidades en la dirección vertical son en profundidad, sin embargo fue el atributo que mejor factor de correlación tuvo con el horizonte correspondiente a la arena G8.

Las zonas de mayor frecuencia dominante presentan las regiones de mayor porosidad, el mapa de la Figura 5.33 muestra que una frecuencia mayor a 4hertz para la aplicación de este atributo en profundidad en la arena G8, permite destacar los lugares en el cual la porosidad es mejor (Figura 5.33). La correlación del mapa de porosidad con el mapa de arcillosidad (Figura 5.34), permitió determinar que las zonas con mayor porosidad son correspondientes a las zonas de menor contenido de arcilla.

En general la arena G8 presenta una excelente porosidad, la cual está distribuida en dirección Este-Oeste del mapa de la Figura 5.33, esta arena, está menos afectada por la influencia de las arcillas cuestión contraria a las arenas G7-2 Inferior y la G73/4, que tienen menor calidad en cuanto a las propiedades de porosidad y contenido de arcilla, ya que esta última propiedad petrofísica las afecta de gran forma.



**Figura 5.32.** Mapa de atributo sísmico frecuencia dominante en el tope de la arena G8, en este atributo se observa que las frecuencias altas corresponden a zonas de alta porosidad y baja arcillosidad.



**Figura 5.33.** Mapa de porosidad del tope de la Arena G8, donde se observaran posibles canales, los cuales están delineados es color negro y que corresponden a zonas de mayor porosidad efectiva

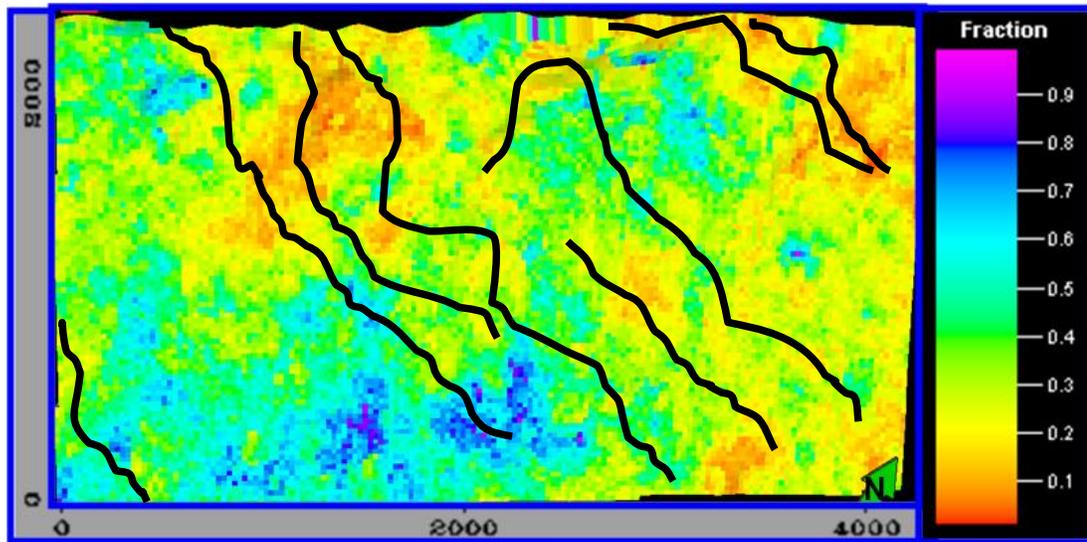


Figura 5.34. Mapa de arcillosidad del tope de la arena G8.

#### 5.4.4. Mapa de atributo sísmico amplitud, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G9.

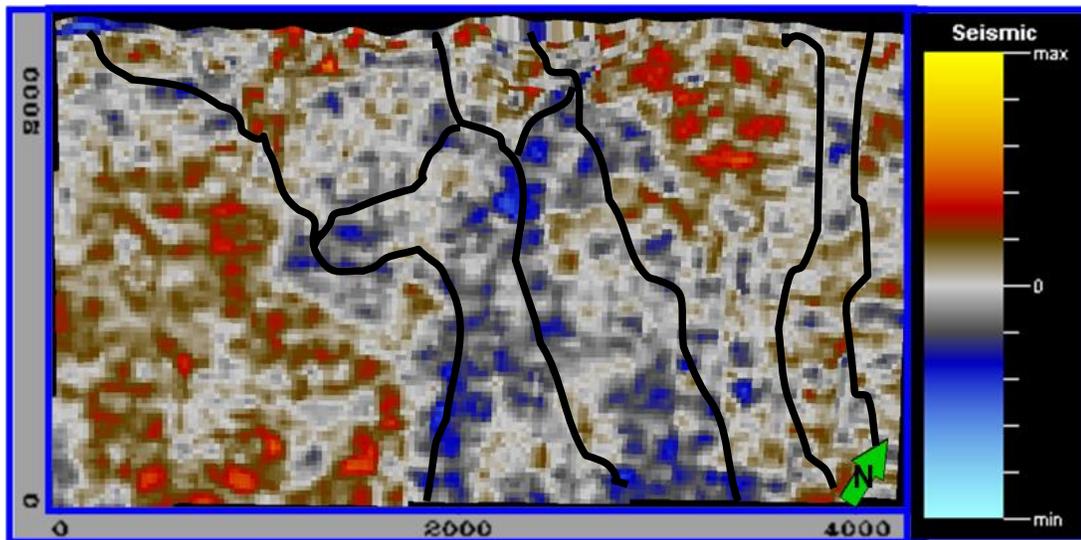
El mapa de amplitud sísmica muestra los valores de los picos en las trazas, la amplitud viene asociada con la impedancia acústica, donde a mayor impedancia acústica mayor amplitud en este caso la velocidad de onda y la densidad son de valores altos y uno de los principales factores es que la porosidad es baja.

En el mapa de amplitud de la Figura 5.35, se observó que en la región central y la parte superior derecha del mapa están las menores amplitudes mayoritariamente, en la zona de la trampa GF-205X, también se observaron zonas de baja amplitud, lo cual puede ser una respuesta al contenido de petróleo.

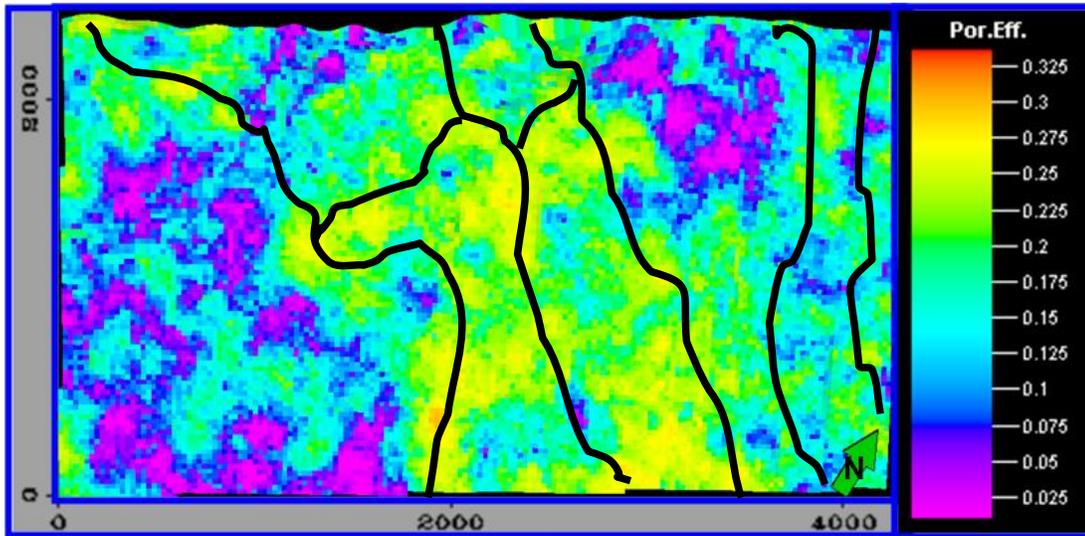
Las amplitudes de valores bajos están asociadas a sectores donde la porosidad es alta (Figura 5.36) y la arcillosidad es baja (Figura 5.37), la

dirección de mayor porosidad es noroeste- sureste hacia la zona central del mapa como anteriormente se mencionó.

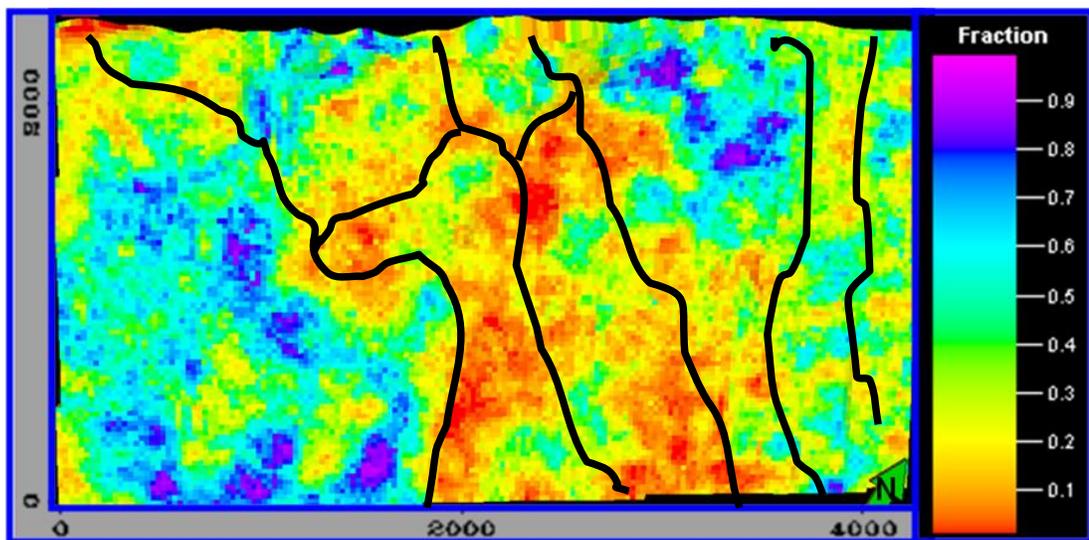
Los mapas de porosidad y contenido de arcilla muestran algunas zonas alargadas y ondulantes con alta porosidad y baja arcillosidad que pueden ser de posibles canales de paleo ríos, esto se observó hacia el Oeste de los mapas respectivos y en el centro las zonas donde los valores de porosidad altos y baja arcillosidad se acumulan. Puede ser una región donde ocurrió la depositación de arenas limpias, que es característico de los ambientes estuarinos como es el caso de la arena G9.



**Figura 5.35.** Mapa de atributo sísmico amplitud en el tope de la Arena G9, muestra gran concentración de amplitudes bajas hacia el centro del mapa.



**Figura 5.36.** Mapa de porosidad del tope de la Arena G9, acá se observa la porosidad efectiva concordante con las bajas amplitudes.



**Figura 5.37.** Mapa de arcillosidad del tope de la arena G9, las zonas de baja arcillosidad en este mapa corresponden con las zonas de baja porosidad efectiva.

#### **5.4.5. Mapa de atributo sísmico $\mu$ rho, mapas de porosidad y arcillosidad del tope de la arena G10.**

Partiendo de que este atributo toma en cuenta el módulo de rigidez y la densidad, las cuales son propiedades intrínsecas de las rocas que van a depender de la porosidad y por lo tanto es un atributo muy útil para la caracterización de yacimientos, en este caso la arena G10, en cuyo mapa de atributo  $\mu$  rho, muestra desde la Trampa GF-205X en dirección valores bajos del atributo y en dirección Este-Oeste del mapa en general.

La propiedad petrofísica de porosidad (Figuras 5.38), para la arena G10 muestran sus mejores valores en la misma dirección que el atributo  $\mu$  rho presenta los rangos más bajos, observado esto desde el punto de vista que la relación rigidez-densidad de la roca, depende en gran parte de la porosidad, debido a que el aumento del número de poros disminuye la rigidez y por ende la densidad de la roca. Esto es opuesto a lo que teóricamente se debe obtener ya que por lo general debido a la influencia de las arcillas se debe mostrar en un gráfico cruzado de porosidad versus atributo  $\mu$  rho valores bajos de porosidad correspondiente con valores bajos de  $\mu$  rho porque el cuarzo produce que las arenas sean más rígidas que las arcillas.

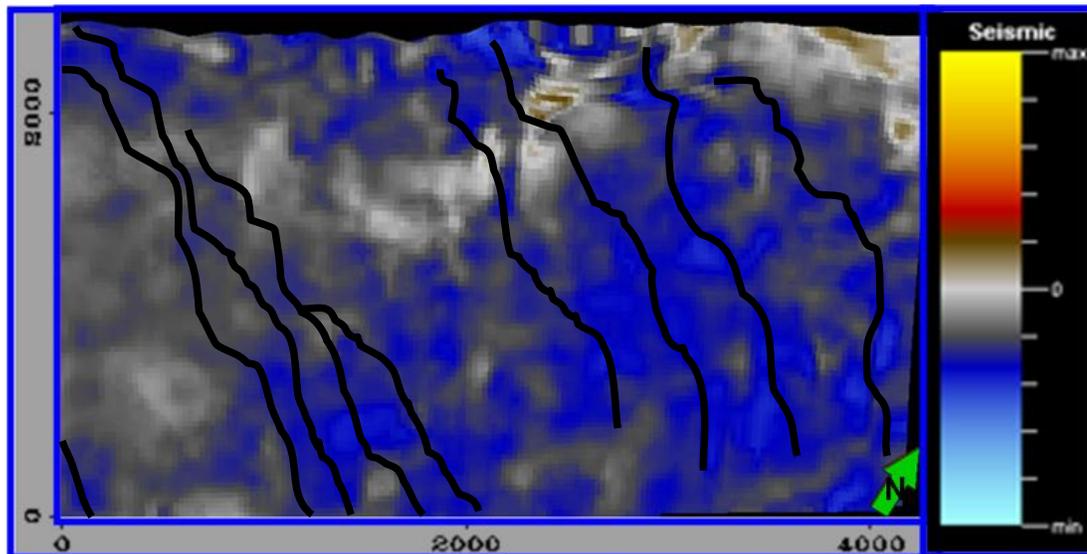
En el gráfico cruzado de porosidad versus atributo  $\mu$  rho y en el eje Z contenido de arcilla se obtuvo, contrario a la teoría, que valores bajos de  $\mu$  rho corresponde a una porosidad alta (Figura 5.41).

La contrariedad de lo teórico con lo práctico en este trabajo, y que se expuso en el párrafo anterior, puede ser a causa de lo que se observa en el mapa de arcillosidad (Figura 5.39), que muestra en general baja influencia en

cuanto al contenido de arcilla para la arena G10 y por ende baja influencia de parámetro de valores bajos del factor de rigidez  $\mu$  ( $\mu$ ).

En cuanto a la arcillosidad, los valores bajos de esta propiedad tienen efecto en los intersticios de la roca, por cuanto en el mapa de contenido de arcilla de la arena G10 (Figura 5.39) muestra que la dirección de menor arcillosidad es la misma dirección de mayor porosidad.

Estratigráficamente no se observan presencia de canales claramente, ya que se muestra un amalgamamiento de los paquetes de arena alta porosidad en sentido Este-Oeste del mapa de la Figura 5.40, sin embargo en esta figura se muestra una interpretación de posibles canales. La arena G10, en la ventana de estudio que es la arena con mejores propiedades petrofísicas, de porosidad y arcillosidad en la Formación Guafita.



**Figura 5.38.** Mapa de atributo sísmico  $\mu$  rho en el tope de la Arena G10.

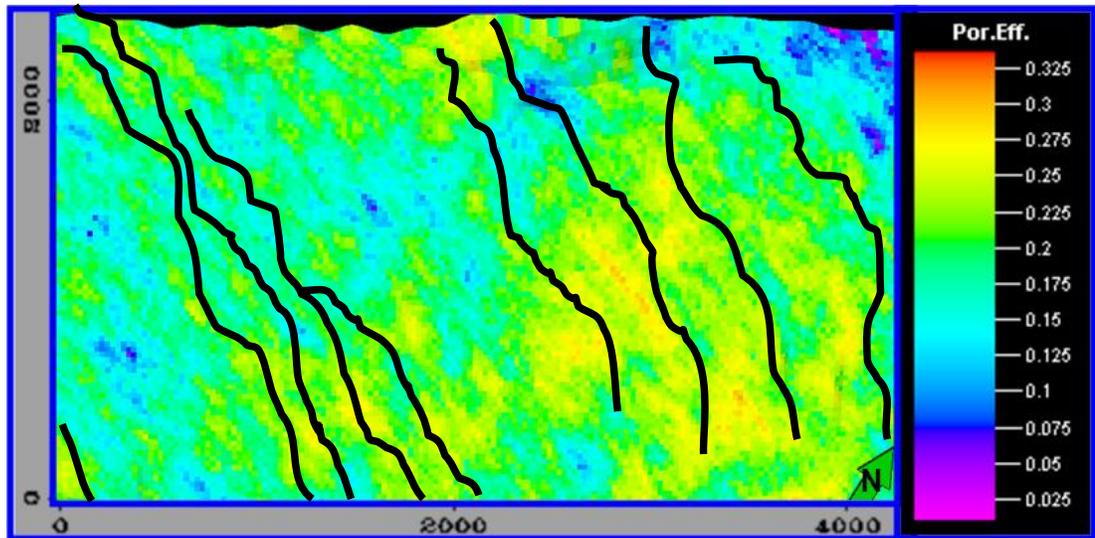


Figura 5.39. Mapa de porosidad del tope de la Arena G10.

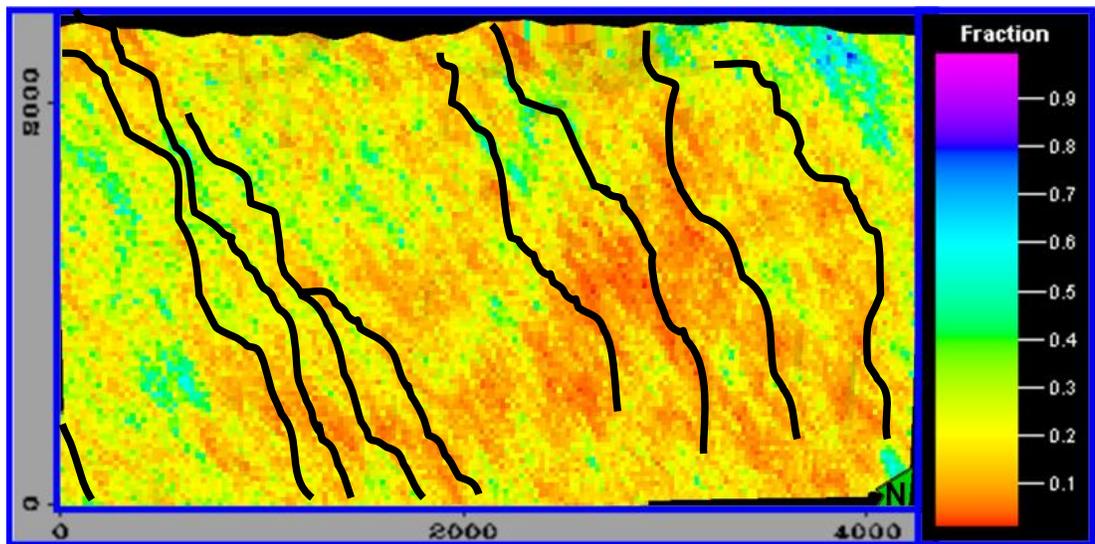
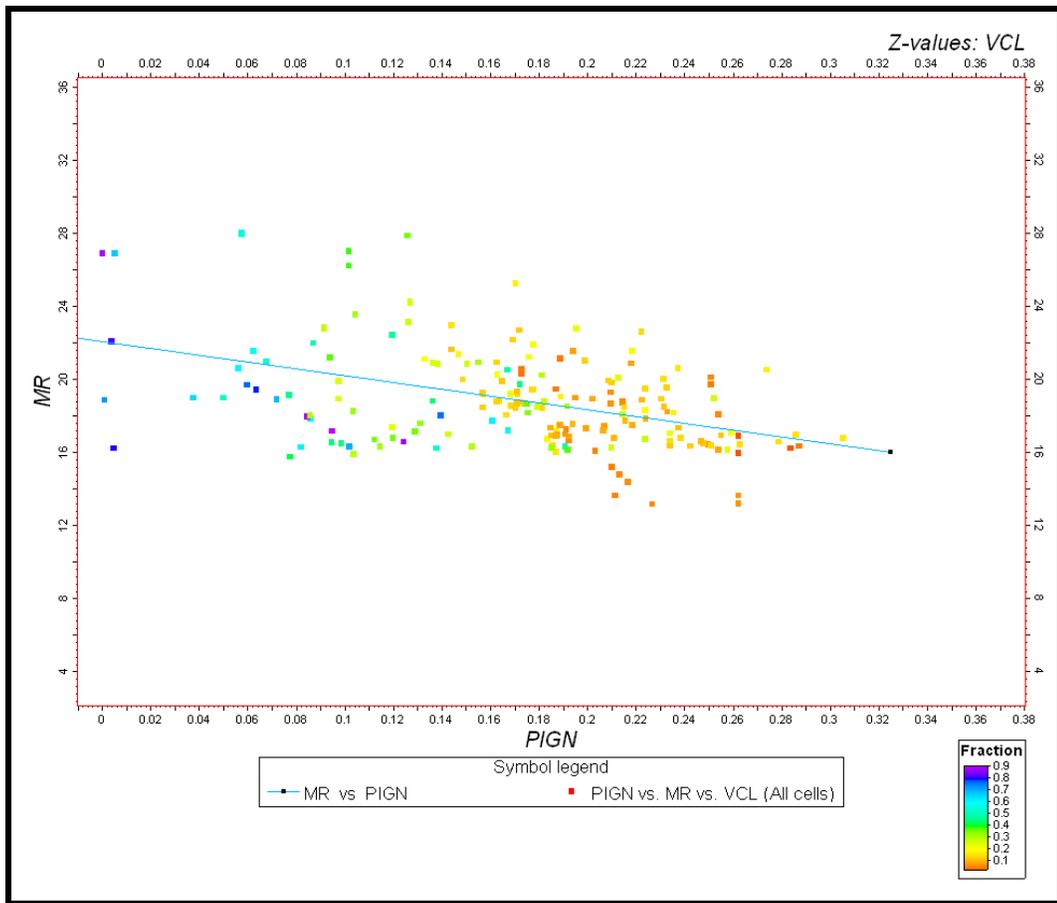


Figura 5.40. Mapa de arcillosidad del tope de la arena G10.



**Figura 5.41.** Gráfico cruzado de porosidad versus atributo mu rho y en el eje Z contenido de arcilla

## **CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. Conclusiones.**

- En general, el cubo estructural 3D de la ventana de estudio de la Trampa GF-205X muestra la estructura principal donde está el pozo exploratorio y otro alto estructural hacia el Oeste de esta cuña estructural, toda esta región se puede considerar la de menor profundidad de la ventana de estudio y de posible entrapamiento de hidrocarburo.
- Las fallas interpretadas que seccionan la cuña principal de la Trampa GF-205X son en échelon y se conjugan en fondo con la Falla Guafita Caño Limón. Es posible que estas fallas hayan sido producto de los esfuerzos extensivos del dúplex extensional, que es característico en las fallas transcurrentes y en consecuencia dieron origen a las estructuras en flor negativa que se observan claramente en las secciones sísmicas en dirección del buzamiento de la estructura.
- Las fallas en échelon conceptualmente son normales, su salto no pudo ser determinado ya que la resolución sísmica no lo permite, por lo que se concluye en este aspecto que deben estar por debajo de los 80 pies.
- Las fallas normales interpretadas, no afectaron de gran manera a la estructura principal de la trampa, fueron posterior a la formación de la

Cuña la cual tiene menor profundidad en las zonas más cercanas a la falla principal.

- Las zonas hacia el Sur, de la Trampa GF-205X, retiradas de la Falla Guafita Caño Limón son planas, en esta región las facies sísmicas se muestran muy continuas y desde el punto de vista de los mapas estructurales, de atributos y pseudo propiedades lo que se pudo determinar es que son probables zonas que contengan trampas de hidrocarburo de tipo estratigráfica.
- Las arenas G7-2 Inferior y G7<sup>3/4</sup> son las de mayor dificultad para interpretarla en la sísmica en tiempo, este paquete está conformado por facies sísmicas que varían su amplitud y muestran la menor continuidad.
- Los reflectores más fuertes en las secciones sísmicas, son los correspondientes a la arena del yacimiento G8 y el G10, sin embargo, todos los reflectores en la zona de la cuña estructural y cercana a la falla Guafita Caño Limón tienden a enmascarar su continuidad. Esto puede ser a consecuencia del ruido blanco que proporcionan las ondas de difracción propagadas por esta zona de gran cizallamiento, de allí la importancia en la interpretación de haber podido contar con los datos de registros del pozo GF-209 que al estar alejado de la estructura principal permitió identificar las facies sísmicas correspondientes a cada yacimiento.
- La dirección de sedimentación preferencial de sedimentación de los cuerpos de arenas para los yacimientos interpretados a través de los variogramas, está entre los 10 y 25 grados en dirección Sur-Este.
- La arena con mejores propiedades petrofísicas de porosidad y arcillosidad es la G10, seguida de la G8 y G9, en el caso específico de

la G10 el proceso de sedimentación es posible que haya sido por la descarga de grandes paquetes de arena limpia, a consecuencia del proceso en la zona de transición entre la llanura deltaica distal y el frente deltaico, por lo cual se efectuó la distribución de canales conformado por arenas muy limpias por lo que se observó la porosidad en forma aglomerada debido a la coalescencia y amalgamiento de canales.

- Las arenas G7-2 Inferior y G73/4, en el mapa correspondiente de contenido de arcilla, muestran que son las más afectadas por este sedimento, posiblemente por el ambiente de sedimentación que fue llanura de inundación, donde la formación de pantanos favoreció la formación de los mismos y en consecuencia disminuye la porosidad de las arenas.
- La zona con mejor de porosidad y posible presencia de hidrocarburo es hacia la zona Oeste de la Trampa GF-205X y cercana a la Falla Guafita –Caño Limón.

## **6.2. Recomendaciones.**

- En vista de que en el inventario de pozos, hubo muchos de estos que no tenían registro sísmico y de tiros de verificación sísmica, se recomienda hacerlos con más continuidad y a hoyo desnudo preferiblemente, con la finalidad de tener mayor información de las lentitudes y la relación tiempo profundidad para la calibración sísmica pozo y otros cálculos como el de impedancia acústica que es una herramienta fuerte en la caracterización de yacimientos.
- Para que exista una correlación lineal por encima del 80% entre datos de pozos y datos sísmicos se debe contar con herramientas que

permitan llevar la frecuencia de los registros que es por el orden de los kilohertzio a la frecuencia de la sísmica que es en hertzio para que así haya paridad en el volumen de datos.

- En vista que la posible prospectividad se ha observado hacia el lado Oeste de la trampa GF-205X, se aconseja generar una ventana de estudio hacia el Oeste del área estudiada, siguiendo la línea de la Falla Guafita-Caño Limón con la finalidad de ver la posibilidad de nuevas zonas de entrapamiento de hidrocarburo.
- Se recomienda efectuar una nueva adquisición sísmica donde se pueda observar la continuidad de la Falla Guafita-Caño Limón ya que pudiesen existir otras estructuras de entrapamiento como la de la Trampa GF-205X.
- Efectuar la perforación de un pozo en la zona ubicada al Oeste de la trampa ya que existe estructura con posibilidades de entrapamiento.
- Se recomienda efectuar un estudio geológico para corroborar las direcciones de sedimentación encontradas en este trabajo tomando en cuenta un buen muestreo de datos y que no estén concentrados en una región en particular del campo
- Se recomienda adquirir paquetes de interpretación sísmica que permitan colocar pozos artificiales, para así efectuar una buena calibración de velocidades en zonas donde no existan pozos o que no tengan información completa, realizando con esto los procesos de elaboración de mapas de velocidades y de conversión en unidades de profundidad, más acordes con la realidad geológica.

## Referencias

ALFONSI P. Ambientes Sedimentarios CORPOVEN, p. 2-29.

AUDEMARD, F., (1991) Tectonic of Western Venezuela; Rice University (Tesis Doctoral) Rice University, EEUU. Houston, 245 p.

AUDEMARD, F. E y AUDEMARD F. A., (2002) Structure of the Mérida Andes, Venezuelan Relations with the South America Caribbean Geodynamic interaction, Tectonophysics, 345 p, p 299-327.

BeicipFranlab (2007) Geología Estructural Avenue Napoleón Bonaparte Francia.

BELLIZZIA A. y PIMENTEL N., (1995) Consolidación de Terrenos Continentales Gondveánicos Precambrico-Paleozóico en los andes de Venezuela. Boletín de Geología del Ministerio de Energía y Minas, publicación especial N° 10, p 227-255.

BOGGS SAM Jr. (2006). Principles of Sedimentology and Stratigraphy. 4th edition Pretince Hall N.Y 662 p.

BROWN, ALISTAIR. R. (1996) Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data AAPG Memoir 42, American Association of Petroleum Geologists, Third Edition. P 137-164,179-184.

Castagna J. P., Batzle M. L., Kan T. K. (1993) Rock Physics The betwen rock properties and AVO Response in offset-Dependent Reflectivity Theory and practice of AVO Analisis, J. P. Castagna y M Backus Investigations in Geophysics N\_ 8 SEG 135-171

CHIGNE, N., LAUREIRO D. y ROJAS E (1994) El Pie de Monte de La Cordillera Oriental de Colombia y de Los Andes de Mérida; Estilos Estructurales y Consideraciones Sobre la Migración del hidrocarburo, en VI simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas: Cartagena, Asociación Colombiana de Geólogos y geofísicos del Petróleo, p. 457-477.

CONEY P. J. y EVENCHICK C. A. (1994) Consolidation of the American Cordilleras. Journal of South American Earth Sciences. Volumen 7 p. 241-262.

COSTERO, J. (2003) Modelo Estático del Yacimiento G8 GF5 Campo Guafita Sur Estado Apure Tesis de grado para optar al título de ingeniera geóloga, Universidad de los Andes Mérida-Venezuela P. 128

DEWEY, J. F., y PINDELL, J. L., (1986) Neogene Block Tectonics of Eastern Turkey and Northern South America: Continental Applications of the Finite Difference Method. Tectonics. Volumen 5, p 703-715.

DAVIS, G.H., y REYNOLDS, S.J., (1996), Structural Geology of Rocks and Regions. Wiley, N.Y., 776 p.

GX Tegnology (2005) Informe de Reprocesamiento del cubo Guafita 3D

Caracas-Venezuela.

MÉNDEZ F. DUGMAR I. (2005) Estudio Sedimentológico de las Arenas G10 y Quevedo del Campo Guafita Área Sur Integrando Data de Producción y Petrofísica y Soportado por Análisis Petrográfico, Tesis de grado para optar

al título de ingeniera geóloga, Universidad de los Andes Merida-Venezuela.  
P. 170

DOBRIN MILTON (1961) Introducción a la Prospección Geofísica Ediciones Omega, Barcelona-España P. 482

FEO CADECIDO, G. (1972) Contribución a la Estratigrafía de la Cuenca Barinas-Apure. IV Congreso Geológico Venezolano, volumen 2. Boletín de Geología publicación especial volumen 5 caracas-Venezuela.

GALLOWAY W. E y HOLADAY D. K. (1996) Terrigenous Clastic Depositional Systems. Springer-Verlag, Heidelberg 489 p.

GARCÍA ERICK A., (2008) Caracterización de los Yacimientos C-4LAG 3047 y C-5 LAG3047 Mediante Análisis de Sismofacies Utilizando Redes Neuronales. (Tesis de Grado para Optar al Título de Ingeniero Geofísico) Universidad Simón Bolívar Caracas-Venezuela 135 p.

GARCÍA J. R. GHOSH S., RONDÓN F. FIERRO I. SAMPOL M.S., BENEDETTO G.A. MEDINA C., ODREMÁN O., SÁNCHEZ T. y USECHE A., (1980) Correlación Estratigráfica y Síntesis Paleoambiental del Cretácico de los Andes Venezolanos. Boletín de Geología del Ministerio de Energía y Minas, XIV (26): p 3-77.

GARDNER, G. H., GARDNER, L. W. Y GREGORY, A. R., (1974) Formation Velocity and Density-the Diagnostic Basic for Stratigraphic Traps: Geophysics volumen 39, p. 770-780.

GELFAND, V., LARNER K. L., (1986): Seismic Lithologic Modeling of Amplitude-versus-offset Data", Proceedings of the 56th Annual Meeting of the SEG, Nov. 2-6, 1986, p. 334-336

GONZÁLEZ DE JUANA, C., ITURRALDE, J. M., y PICARD, X., (1980) Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas; Ediciones Foninves Caracas. Volumen 1, 407 p. y volumen 2. 624 p.

GOODWAY B., CHEN T., DOWNTON J., (1997) Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters: 67th Ann. Internat. Mtg, Soc. Expl. Geophys, Expanded Abstract 183-186.

HERRERA MEILYN, DÍAZ N., y AQUINO ROSA. (2007) Sedimentología y Estratigrafía del Oligoceno-Mioceno en el Campo Guafita, Estado Apure, Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica, Mérida, Gerencia de Exploración, PDVSA, Puerto la Cruz, Universidad de Saskatchewan, Canadá IX Congreso Geológico Venezolano.

HURTADO MARÍA, DELGADO MARÍA, PALACIOS SONIA, ESCALANTE JOSÉ. (2008) Modelo Sedimentológico de los Yacimientos G9, y G10 del Campo Guafita Norte, Área Apure Venezuela. Revista Ciencia e Ingeniería volumen 29, N<sup>o</sup> 2. P. 137-146.

KISER, G. D. (1989). Relaciones Estratigráficas, de la Cuenca Apure-Llanos con Áreas Adyacentes, Venezuela Suroeste y Colombia Oriental. Monografía. Sociedad Venezolana de Geólogos. N<sup>o</sup> 1: p. 77.

KRAJEWSKI, S. A. y GIBBS, B. L., (1993) A Variogram Primer, Gibbs Associates, 93 p.

LINER CHRISTOPHER, (2004). Elements of 3D Seismology. Segunda edición, Editorial Penn Well, Tulsa-Oklahoma. p. 600-608.

LUGO J. Y MANN, P. (1995). Jurassic-Eocene Tectonic Evolution of Maracaibo Basin, Venezuelan. Editorial Technologies. AAPG Memoir 62, p. 699-725.

MASON MARÍA V., (2008). Fluid discrimination of post stack “bright spots” in the Columbus Basin, offshore Trinidad reporte de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas UNLP

MESCHEDE, M Y WOLFGANG, F. (1998) A Plate – Tectonic Model for the Mesozoic and early Cenozoic History of the Caribbean Plate: Tectonophysics p. 296.

MIALL ANDREW. (1977). Fluvial Sedimentology Canadian of Petroleum geologist, Calgary Canadá.

OCHOA R. C. (2007). Inversión Sísmica y Estudio de Atributos Postapilamiento de los niveles I33 y TU de la Formación Oficina en el Campo Guico Guara, Estado Anzoátegui. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar.

ORTEGA J. F, A. VAN ERVE y Z DE MONROY (1987) Formación Guafita: Nueva Unidad Litoestratigráfica del Tercario en el Subsuelo de la Cuenca Barinas-Apure, Venezuela Suroccidental, Boletín. Sociedad Venezolana de Geólogos, N° 31: p. 9-35.

OSTOS, M. y YORIS, F. (1997) WEC Evaluación de Pozos. Capítulo 1: Geología de Venezuela, Schlumberger, 44 p.

PARNAUD, F., Y. GOU, J. C. PASCUAL, M. A. CAPELLO, I. TRUSKOWSKI, y H. PASSALACQUA (1995). Stratigraphic Síntesis of Western Venezuela en

A. J Tankard, R en: A. J. Tankard, R. Suárez s. y H. J. Welsink editors, Petroleum Basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 681-698.

PDVSA, Beicip Franlab (2002) Estudio Integrado Área Guico Guara. Modelo Estático p. 64-70 y 107-124.

PERCIVAL D. B y WALDEN A. T. (2000) Wavelet Methods for Time Series Análisis, primera edición, Crambridge University impreso en Crambridge.

PÉREZ, O., VILMA, R., BENDÍCK, R., VELANDIA, J. R., HERNANDEZ N., MONCAYO, C., HOYER, M. y KOZUCH, M. (2001) Velocity Field Across the Southern Caribbean Plate Boundary and Estimates of Caribbean/ South America Plate Using GPS Geodesy 1994-2000. Geophysical Research Letters Vol. 28, p. 2987-2990.

PINDELL, J. L., (1994) Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean: In Donorean S. K. an Jackson T.A. (eds) Caribbean Geology: an introduction University of the West publishers Association University of the West Indies, p. 13-39.

REQUENA, NEPTALÍ. (2000) Análisis de Velocidad de Sísmica de Superficie y de Pozos para la Migración en Profundidad, Utilizando Datos 3D de los Campos el Furrial y Carito. Proyecto de Grado UCV 2000.

RENTZ, O., (1959) Estratigrafía del Cretácico en Venezuela Occidental: Boletín Geológico Caracas Venezuela, V.5, p. 3-48.

ROSS, M. y ESCOTESE, C. (1988) A Hierarchical Tectonic Model of Gulf of Mexico and Caribbean Region; Tectonophysics 296 p.

REGUEIRO, S. (2007) Sísmica para Ingenieros y Geólogos. El Método Sísmico de Reflexión. Universidad Simón Bolívar.

Schlumberger (2006), PETREL Seismic to simulation Software, Property Modeling Course V. 2005. P. 56-57

SHERIFF, R. (2002) Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, cuarta edición, Society of Exploration Geophysics, Tulsa. E.E.U.U.

SHUEY, R. T., (1985). A Simplification of the Zoeppritz Equation Geophysics, 50, p.609-614.

SOLANO, Y. (2006) Secuencia de Procesamiento Convencional hasta Migración Preapilamiento en un Tiempo del Levantamiento Sísmico Oeste 04G-3D. Universidad Simón Bolívar Caracas-Venezuela.

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

VAN HINTE, J. E. (1976) A Cretaceous Time Table. Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.

Weitzel D. E. (2006) Estudio de Factibilidad del uso de Atributos AVO PP y PS para Discriminación de Litología y Tipo de Fluidos utilizando "Análisis de Discriminación Lineal Local" (Bloque Norte de Guafita).

Trabajo Especial de Grado para Optar al Título de ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

## Sitios Web

BARCLAY F., BRUUN A., RASSMUSENG K., Inversión Sísmica: Lectura Entre Líneas: Visitado el 5 de mayo de 2009.

<[http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish08/sum08/inversion\\_sismica.ashx](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish08/sum08/inversion_sismica.ashx)>

CHOPRA S., Multi- Attribute Seismic Analysis on AVO Derived Parameters – a Case Study: Visitado el 28 febrero de 2009

< <http://www.cspg.org/conventions/abstracts/2003abstracts/434S0131.pdf>>

CORONEL, ANA (2009) Interpretación Sísmica 3D e Interpretación Geológica de la Arena AR1 y Superficie MI7 en el Campo Corocoro, Costa afuera (Informe de Pasantías para Optar al título de Ingeniero Geofísico) Universidad Simón Bolívar: Caracas-Venezuela 83 p: Visitado el 5 de febrero de 2009.

< <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Tesis/Pre/Ana%20Coronel.pdf>>

Elementos de Geoestadística: visitado el 5 de mayo 2010.

<<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>>

MARTINEZ CABAÑAS (1996) Interpretación Geológica de Sismogramas Sintéticos un Ejemplo Aplicado al Sondeo Río Segura G-1: Visitado el 14 de mayo de 2009.

<<http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo20%20%281%29/Art39.pdf>>

MÉTODOS SÍSMICOS (REFRACCIÓN Y REFLEXIÓN): Visitado el 25 de marzo de 2010. < <http://www.scribd.com/doc/26886999/Metodos-Sismicos-Refraccion-y-Reflexion>>

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA Ondas sísmicas: Visitado el 8 de abril de 2009.  
<<http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/VerContenido.aspx?GUID=123.456.789.000&ID=135267>>

OYARZUN R. Y DOBLAS M. (2008) Fallas y Zonas de Cizalla: Visitado el 12 de febrero de 2009.  
<<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/fallas/FallasPrimeraParte.htm>>

QUILEN K. (2006) Integración de Atributos Sísmicos con Datos Petrofísicos para Determinar Zonas propectivas, Arena L2M, Arena de Finca-Yopales, Estado Anzoátegui Trabajo de Pregrado, Universidad Simón Bolívar Caracas-Venezuela: Visitado el 23 de octubre de 2009.  
<<http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Tesis/Pre/Keyla%20Quilen.pdf>>

PDVSA INTEVEP, (2009) III Léxico Estratigráfico de Venezuela: Visitado el 8 de enero de 2009.  
<<http://www.pdv.com/lexico>>

SCHLUMBERGER (2009) Petrel Seguimiento Automatizado de Estructuras Interpretación-Hormiga: Visitado el 5 de mayo de 2009.  
<[http://www.slb.com/services/software/geo/petrel/seismic/auto\\_structural\\_interpretation/ant\\_tracking.aspx](http://www.slb.com/services/software/geo/petrel/seismic/auto_structural_interpretation/ant_tracking.aspx)>

PROYECTO SWERA: Visitado el 25 de abril de 2010.  
<[http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial\\_solar.html](http://gis.uca.edu.sv/swera/potencial_solar.html)>

SCHLUMBERGER oilfield glossary: visitado el 28 de noviembre de 2009.  
<<http://www.glossary.oilfield.slb.com/display.cfm?term=check-shot%20survey>>

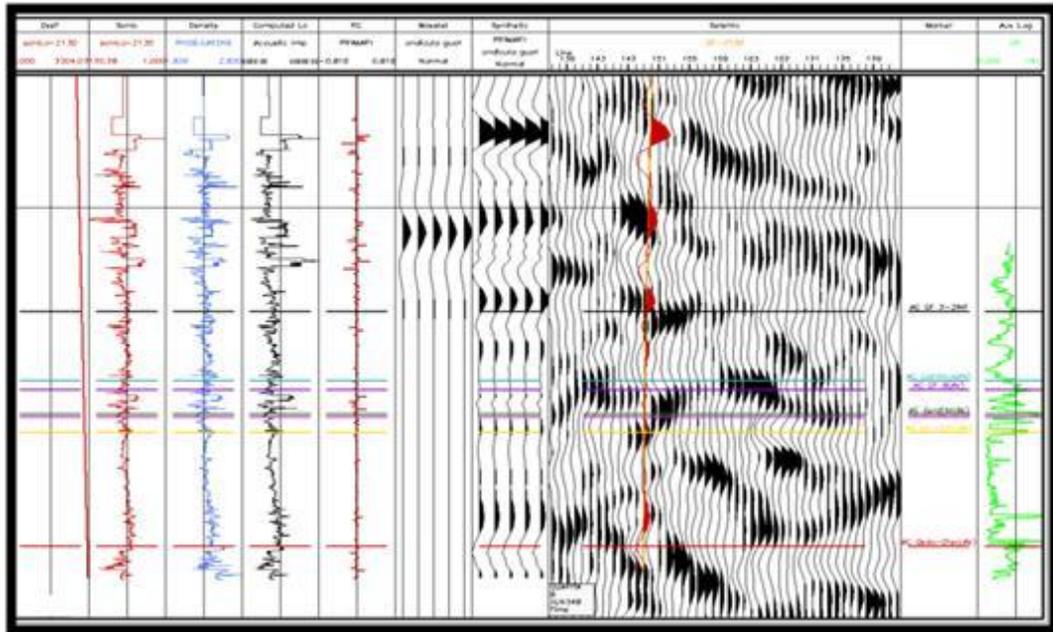
CAMPOS V. y BOESI T. (1993) Cretaceous and Paleogene Sedimentation in the south Western Venezuelan Andes. Sociedad Venezolana de Geólogos, Field Trip N° 4 Visitado el 30 de marzo de 2009.  
<<http://www.pdvsa.com/lexico/excursio/excsvg93.htm>>

WIKIPEDIA Covarianza: Visitado el 17 de mayo de 2009  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Covarianza>>

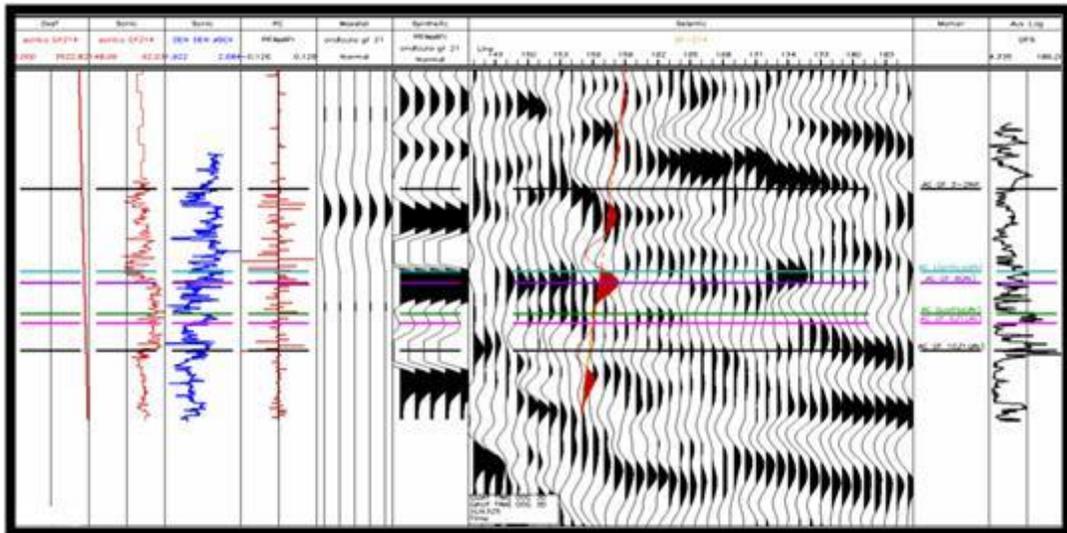
WIKIPEDIA Desviación Estándar: Visitado el 28 de noviembre de 2009.  
<[http://es.wikipedia.org/wiki/desviaci%c3%B3n\\_est%c3%A1ndar](http://es.wikipedia.org/wiki/desviaci%c3%B3n_est%c3%A1ndar)>

WIKIPEDIA Gradiente: Visitado el 17 de mayo de 2009.  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Gradiente>>

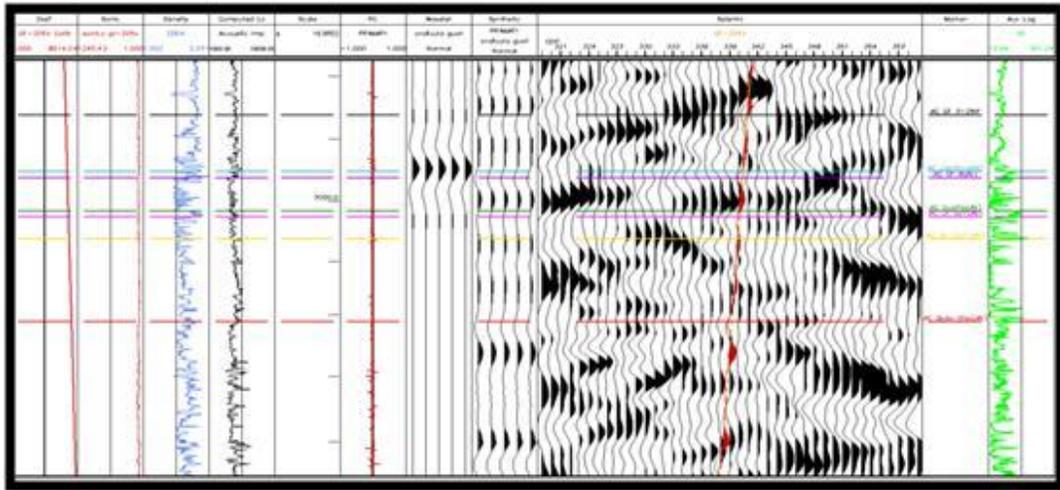
## **ANEXOS**



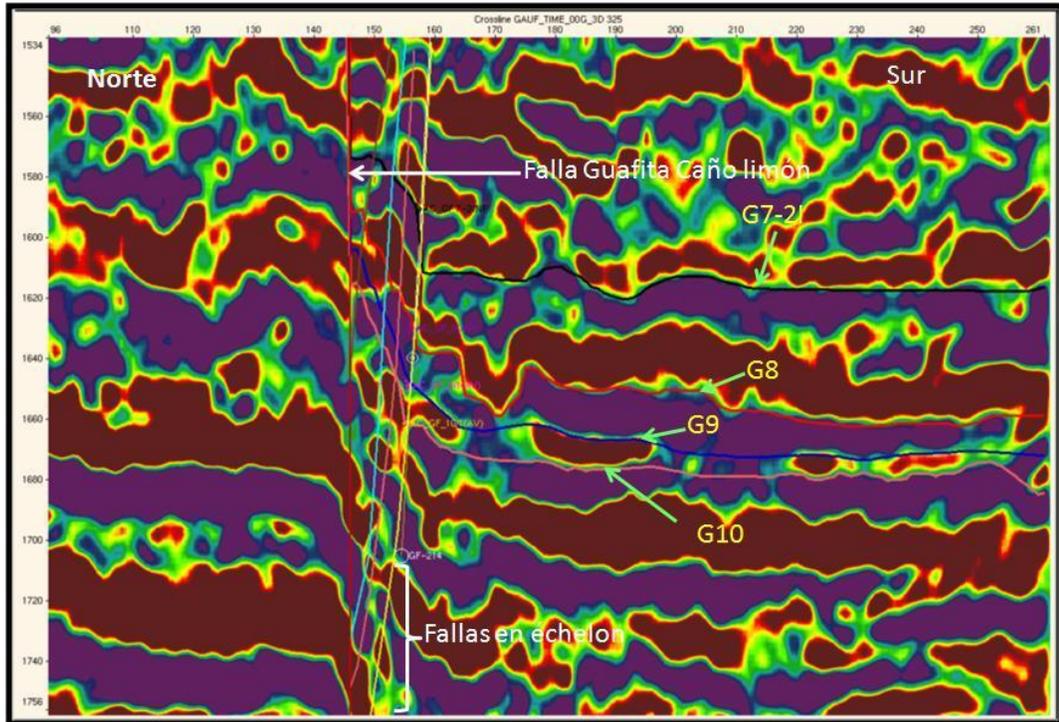
Anexo A. Sismograma sintético del pozo GF-213D.



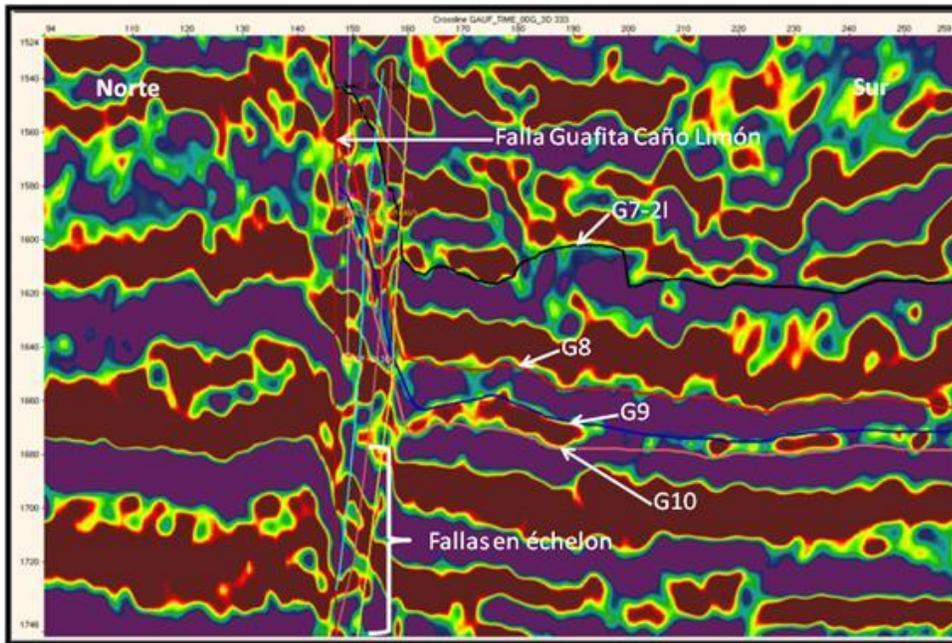
Anexo B. Sismograma sintético del pozo GF-214.



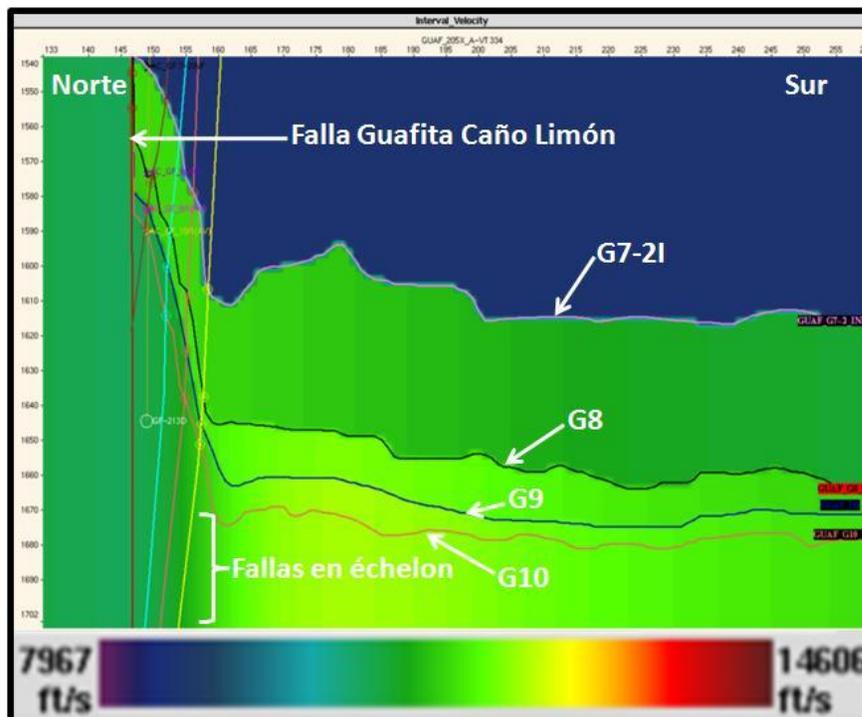
Anexo C. Sismograma sintético del pozo GF-205X.



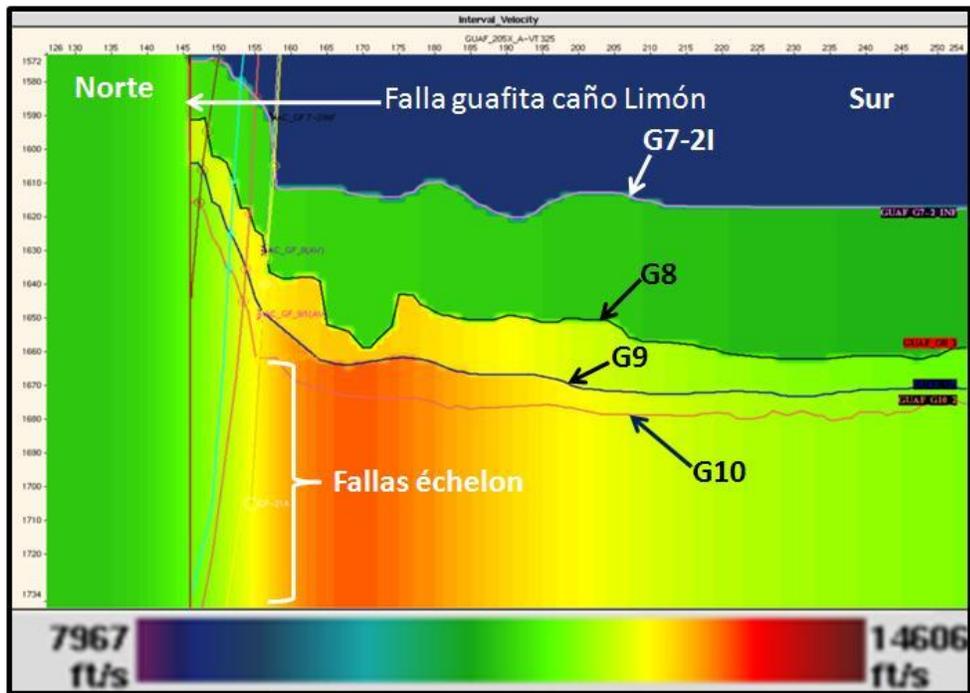
Anexo D. Crossline 325 a lo largo del pozo GF-214, muestra las fallas y los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9, G10.



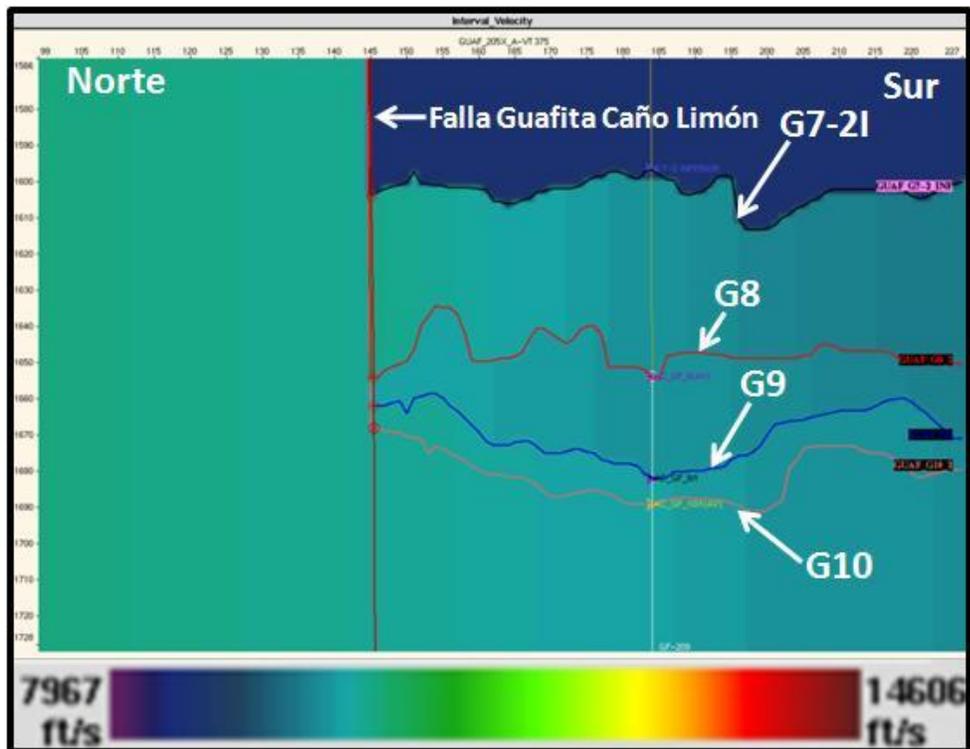
Anexo E. Crossline 333 a lo largo del pozo GF-213D, muestra las fallas y los horizontes G7-2 Inferior, G8, G9, G10.



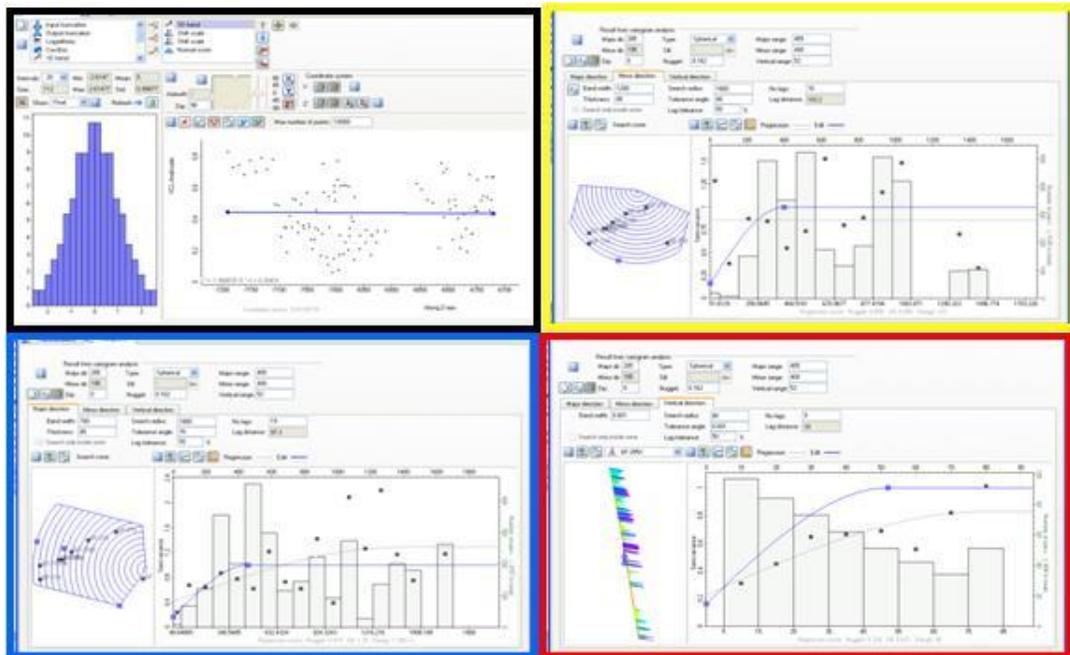
Anexo F. Sección 334 del modelo 3D de velocidades, en dirección del buzamiento, por donde pasa el pozo GF-213D.



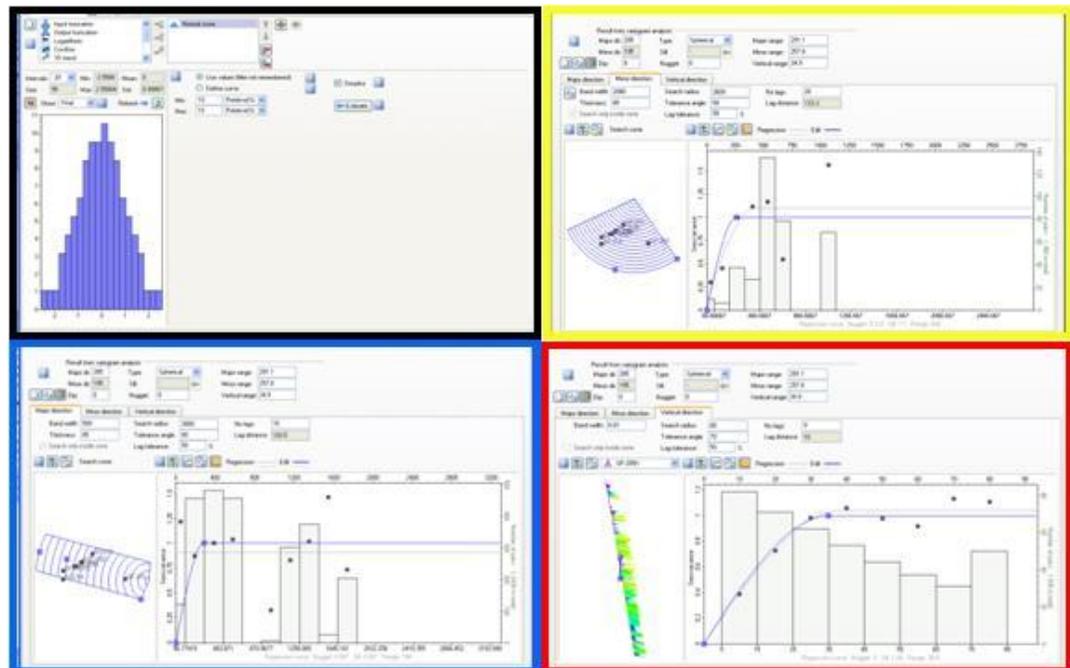
Anexo G. Sección 325 del modelo 3D de velocidades, en dirección del buzamiento, por donde pasa el pozo GF-214.



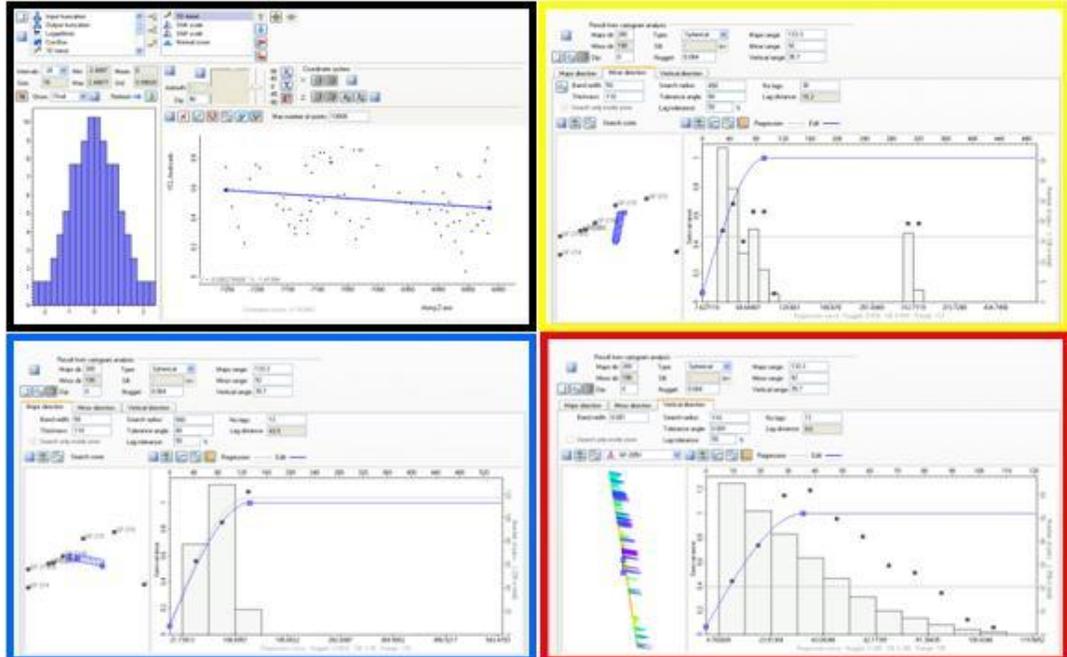
**Anexo H.** Sección 375 del modelo 3D de velocidades, en dirección del buzamiento, por donde pasa el pozo GF-209.



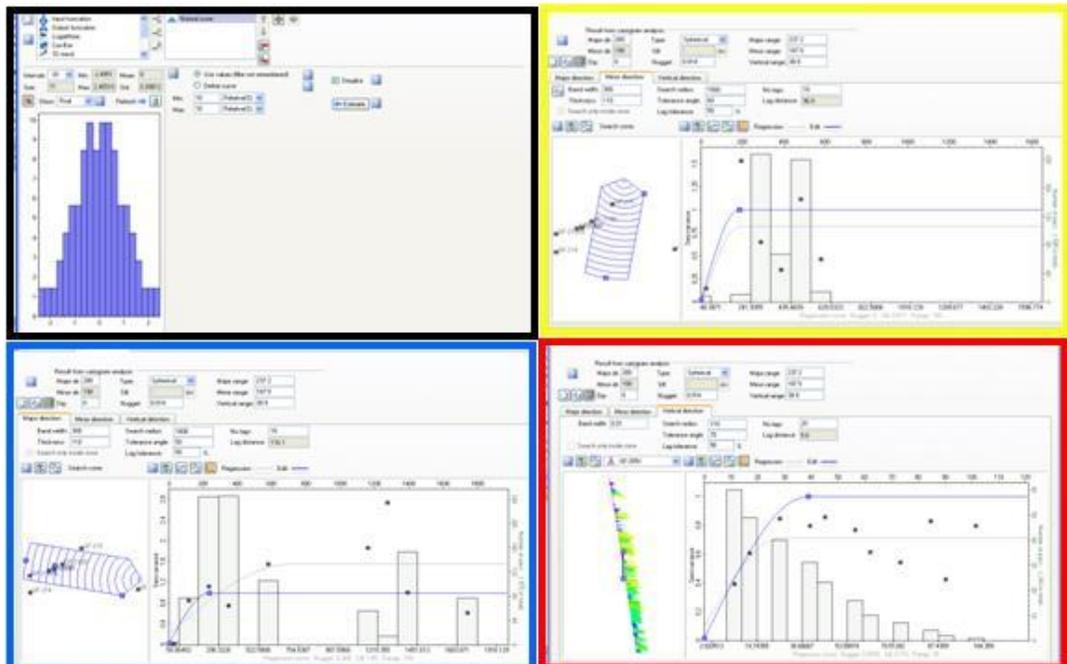
**Anexo I.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de arcilla del yacimiento G7-21.



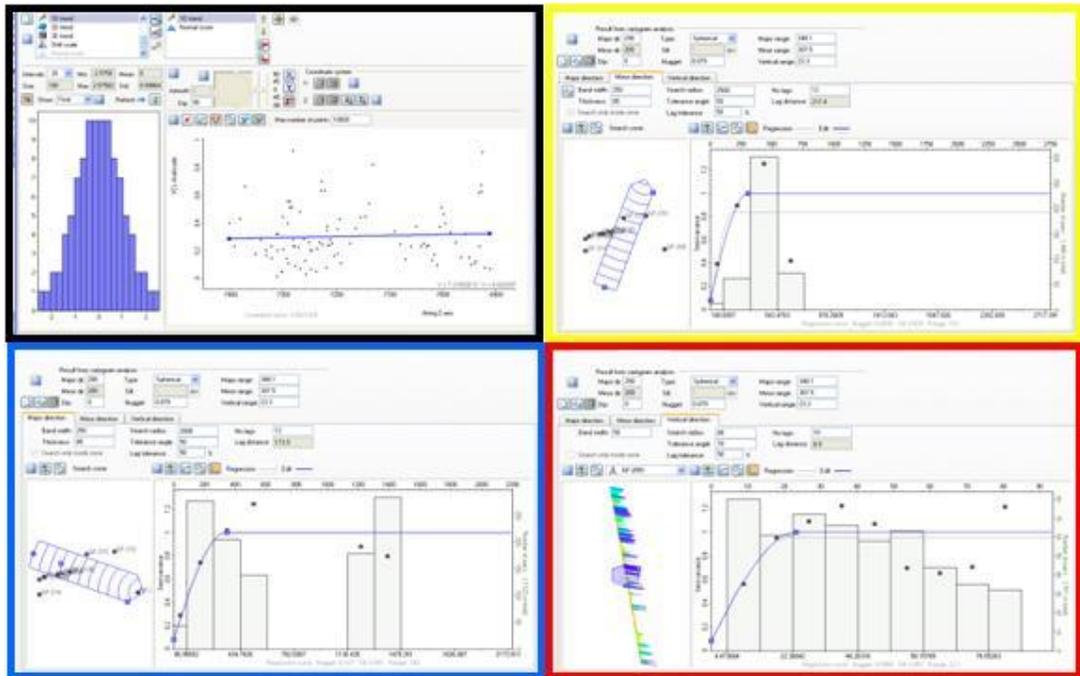
**Anexo J.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de porosidad del yacimiento G7-2Inferior.



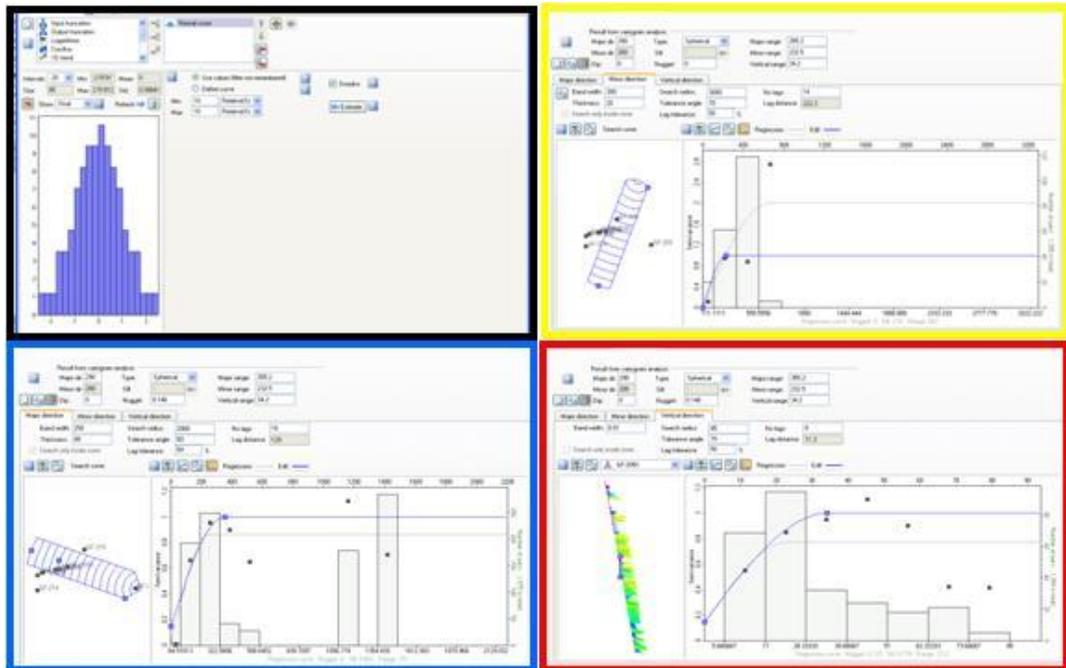
**Anexo K.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de arcilla del yacimiento G73/4.



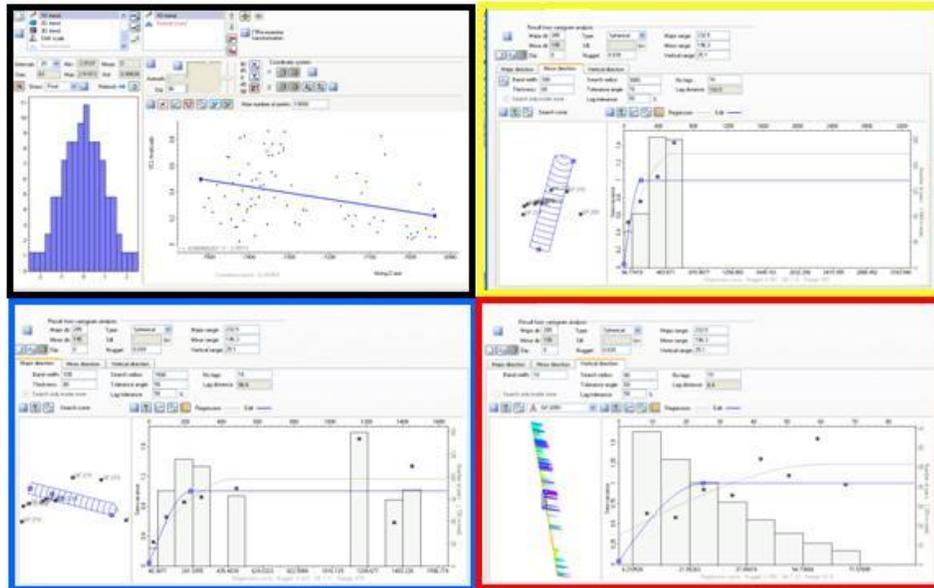
**Anexo L.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de porosidad del yacimiento G7-3/4.



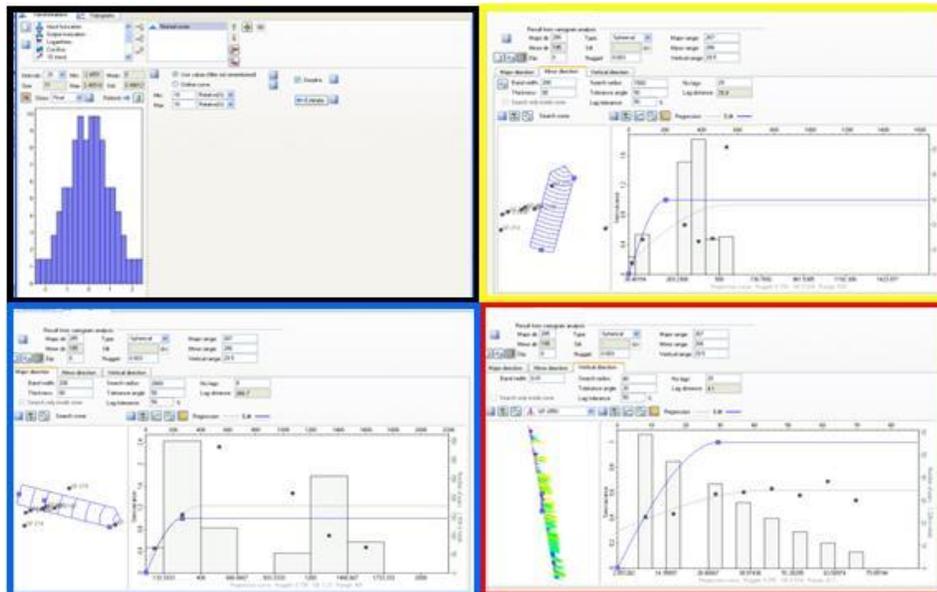
**Anexo LL.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de arcilla del yacimiento G8



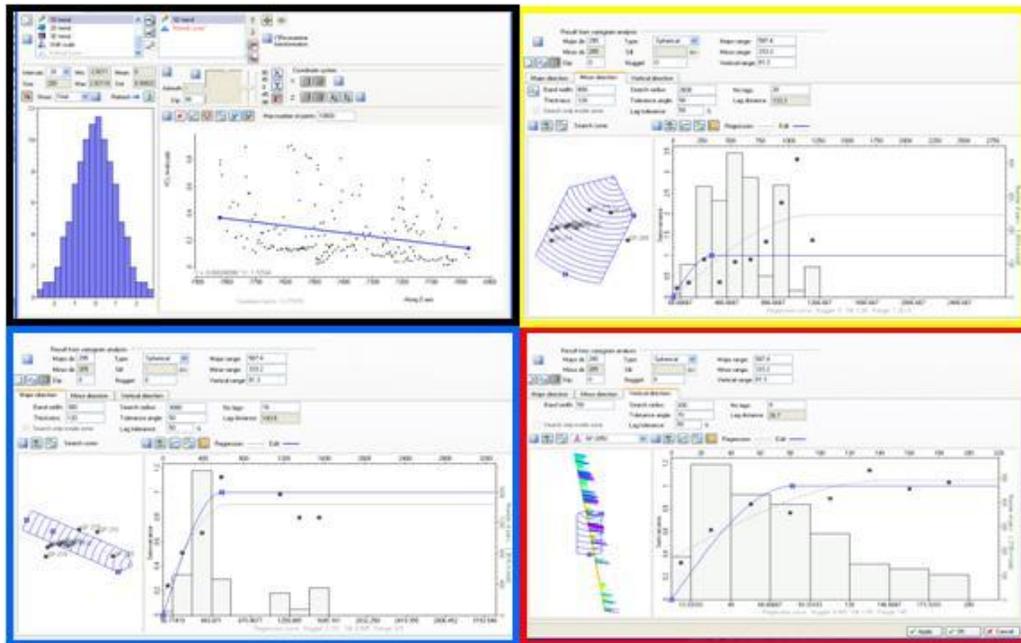
**Anexo M.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de porosidad del yacimiento G8.



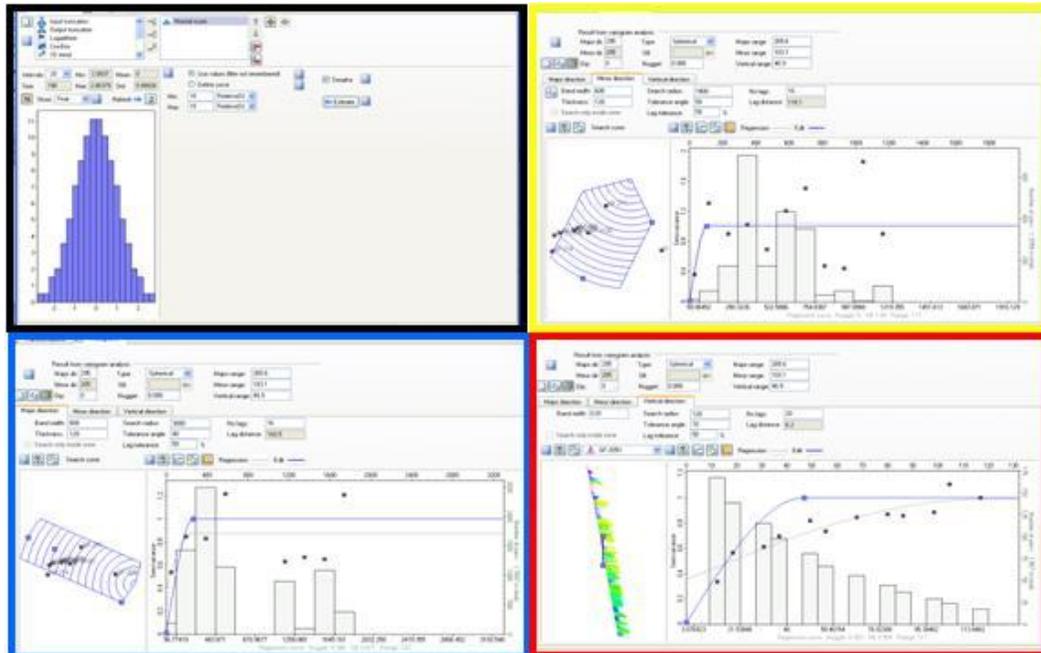
**Anexo N.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de arcilla del yacimiento G9



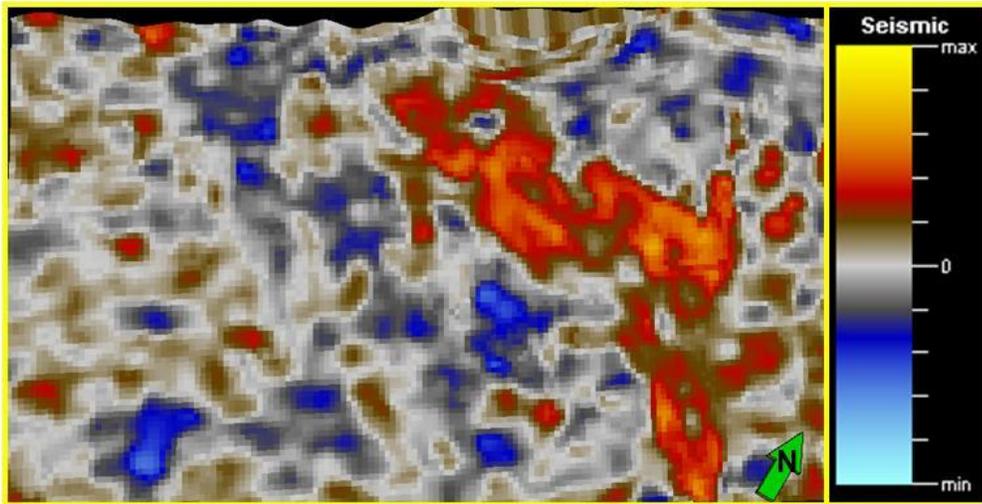
**Anexo O.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de porosidad del yacimiento G9.



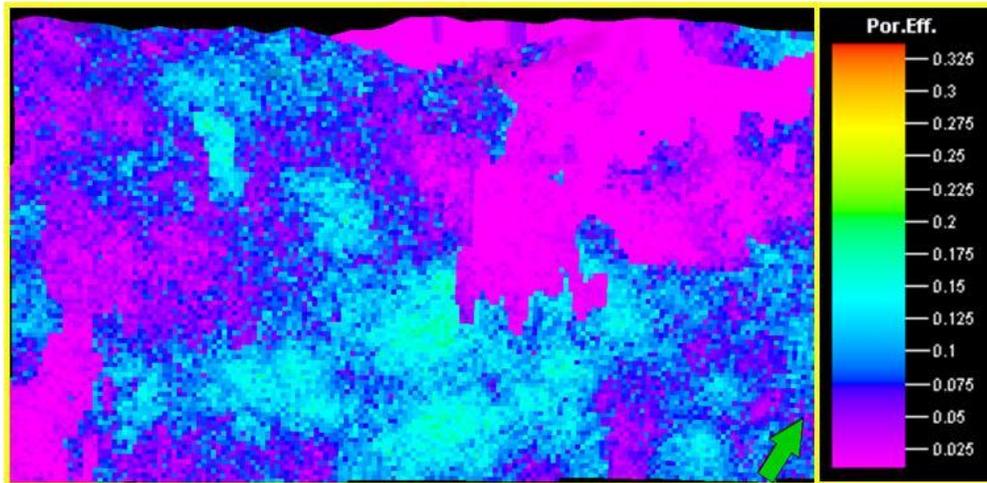
**Anexo P.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de arcilla del yacimiento G10.



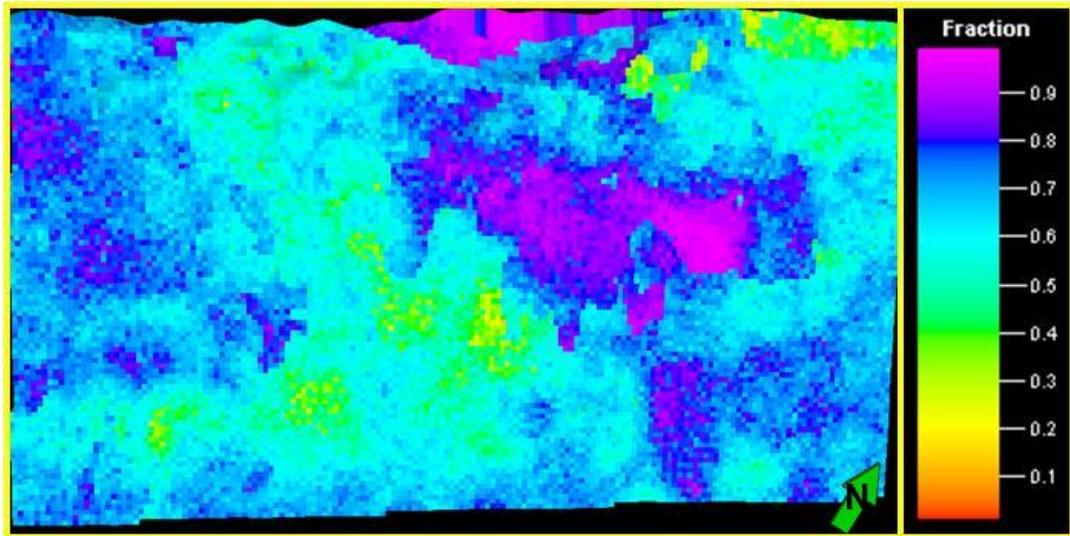
**Anexo Q.** Histograma y Variogramas en direcciones menor, mayor y vertical, de contenido de porosidad del yacimiento G9.



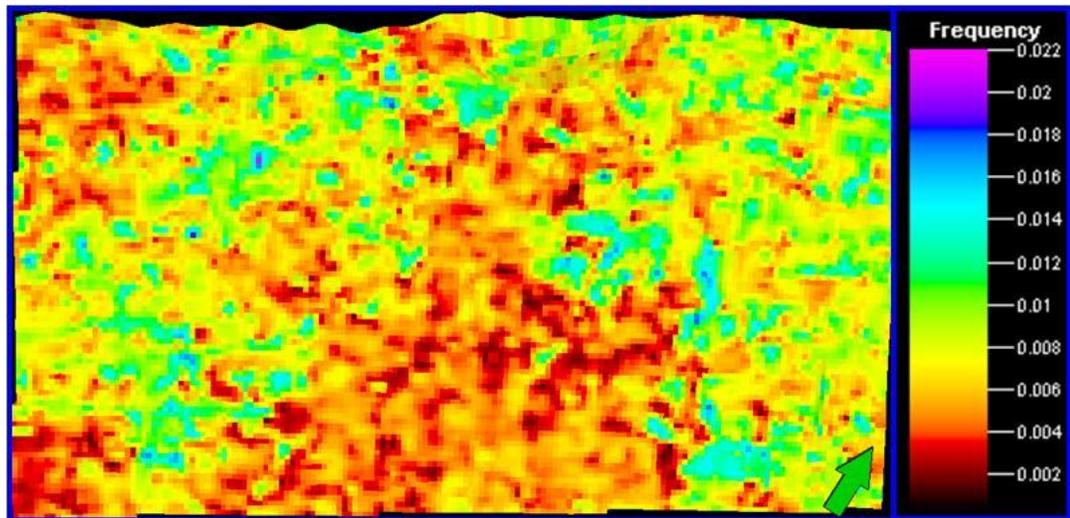
**Anexo R.** Mapa de atributo sísmico reflectividad de onda S sobre el tope de la lutita lignítica.



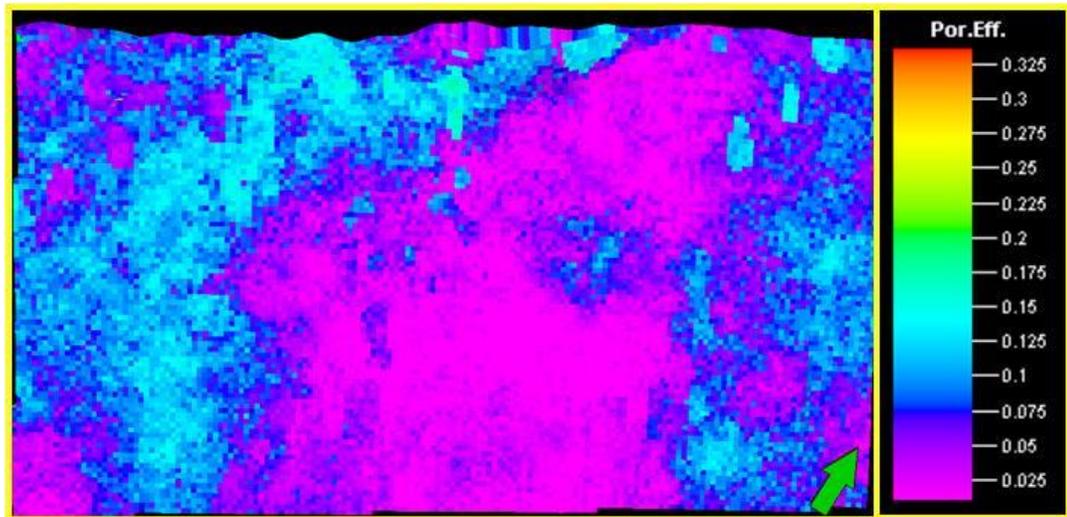
**Anexo S.** Mapa de porosidad efectiva del tope de la lutita lignítica.



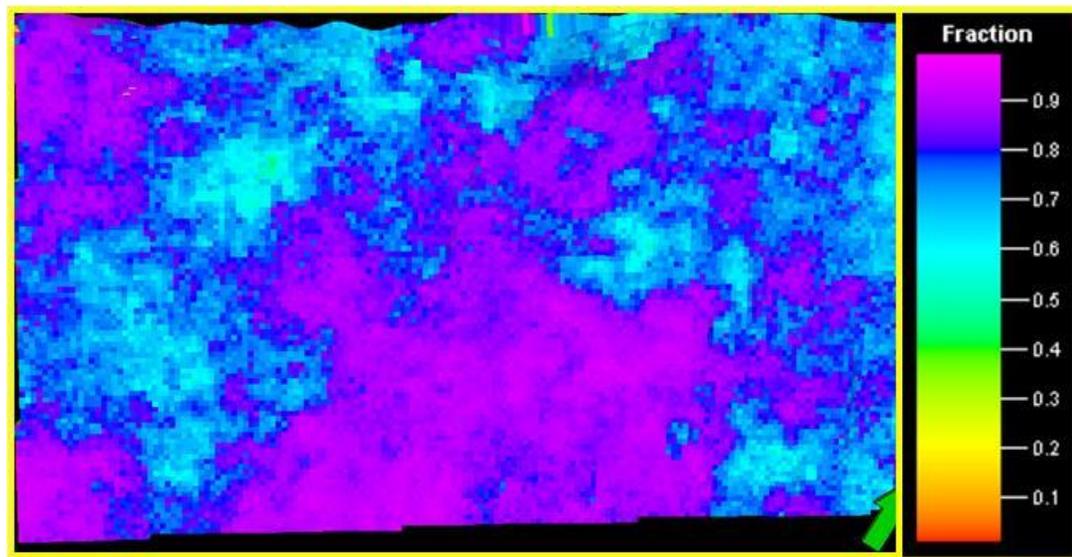
**Anexo T.** Mapa de arcillosidad del tope de la lutita lignítica.



**Anexo U.** Mapa de atributo sísmico frecuencia dominante sobre el tope de la lutita de Guafita



**Anexo V.** Mapa de porosidad efectiva del tope de la lutita de Guafita.



**Anexo W.** Mapa de arcillosidad del tope de la lutita de Guafita.