
**VALIDAR EL POTENCIAL PETROLÍFERO DE UN BLOQUE EN LA CUENCA
DE LOS LLANOS ORIENTALES COLOMBIA. A PARTIR DE SISMICA 3D
UTILIZANDO CUBO DE COHERENCIA Y ATRIBUTOS SISMICOS**

**PRESENTADO POR:
ANDREA JULIANA COTE MELO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA DE FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GELOGIA
BUCARAMNGA
2013**

**VALIDAR EL POTENCIAL PETROLÍFERO DE UN BLOQUE EN LA CUENCA
DE LOS LLANOS ORIENTALES COLOMBIA. A PARTIR DE SISMICA 3D
UTILIZANDO CUBO DE COHERENCIA Y ATRIBUTOS SISMICOS**

PRESENTADO POR:

ANDREA JULIANA COTE MELO

**Proyecto de grado en la modalidad práctica empresarial para
Optar al título de Geólogo**

DIRECTORES

Javier Villamizar

Ivan Dario Olaya

Gerente de Geología y Geofísica de Nuevos Negocios

Pacific Rubiales Energy.

CO-DIRECTOR

Msc. Geol. Sait Khurama Velásquez

Director de Escuela de Geología, UIS.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA DE FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GELOGIA
BUCARAMNGA**

2013

DEDICATORIA

A mi Familia quien es el motor de cada meta propuesta en mi vida, mi más grande inspiración.

A mi Gordita que siempre me tiene en su pensamiento y aunque hoy es difícil no poder compartirlo contigo, sé que estás muy orgullosa de mi.

Dedicado a todas las personas que nacen con un ideal y que pese a las adversidades no desfallecen y logran cada día recargarse de energía y sonreírle nuevamente a la vida.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios padre todo creador quien cada día me fortaleza con su grandeza y construye de mi un mejor ser humano.

A Rosangela Cote quien me ha brindado su apoyo siempre y fue parte esencial en la realización de esta meta.

Al gran equipo de trabajo área de Nuevos Negocios, Pacific Rubiales Energy, quienes me enseñaron el arte de trabajar en equipo, mi Director y amigo Javier Villamizar quien valoro siempre mi trabajo y creyó en mis capacidades. A Ivan Dario Olaya quien brindo esta maravillosa experiencia.

A los docentes de la Escuela de Geología que con paciencia y metodología lograr transmitir todo su conocimiento.

Y por último pero no menos importante, a Juan Felipe Gomez y compañeros, con quien compartí semestre a semestre la felicidad de poder ser parte de una meta en común, ser profesionales.

CONTENIDO

	Pág.
1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO	18
1.1. TÍTULO	18
1.2. DIRECTOR	18
1.3. AUTORES	18
1.4. ENTIDADES INTERESADAS EN EL PROYECTO	18
1.5. DIRECTOR DE ESCUELA	18
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	19
2.1. OBJETIVO GENERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2.3. JUSTIFICACIÓN	20
2.4. ALCANCE	21
3. METODOLOGIA	22
3.1. FASE 1	23
3.2. FASE 2	23
3.3. FASE 3	24
3.4. FASE 4	24
4. MARCO GEOLOGICO DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	25
4.1. LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	25
4.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	27
4.3. MARCO ESTRUCTURAL CON BASE A LA SÍSMICA DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	29
4.3.1 <i>Dominio Estructural Arauca:</i>	31

4.3.2. Dominio Estructural Casanare:	32
4.3.3. Dominio Estructural Meta:	33
4.3.4. Dominio Estructural Foothills:	34
4.4. MARCO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL (UNIDAD TECTONOESTRATIGRÁFICO)	36
4.4.1. Precámbrico	37
4.4.2. Paleozoico	37
4.4.3. Triásico – Jurásico (Secuencia de Synrift)	38
4.4.4. Cretácico (Secuencia de Back Arc)	38
4.4.5. Paleógeno (Secuencia Pre – Andina Temprana de ante País)	40
4.4.6. Secuencia del Neógeno	43
5. MARCO TEORICO	46
5.1. SISMICA: ADQUISICION Y PROCESAMIENTO	46
5.1.1. Sísmica De Reflexión	47
5.1.2. Sísmica de Refracción	47
5.1.3. Impedancia Acústica	48
5.1.4. Serie de Reflectividad	49
5.1.5. Ondícula sísmica	51
5.1.6. Modelo de Convolución de traza sísmica	52
5.1.7. Sismograma Sintético	54
5.1.8. Resolución sísmica	56
5.1.9. Velocidad Sísmica	57
5.2. PARAMETROS PETROFISICOS	58
5.2.1. Registro de Densidad	59
5.2.2. Registro Sónico	60
5.3. ATRIBUTOS SISMICOS	61
5.3.1. Clasificación De Atributos Sísmicos	62
5.3.2. Coherencia Sísmica	64

6.	EVALUACION DEL BLOQUE CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA	66
6.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL BLOQUE	66
6.2.	MODELO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL BLOQUE 26	67
6.3.	SISTEMA PETROLERO	67
6.3.1.	<i>Roca Generadora</i>	68
6.3.2.	<i>Roca Almacenadoras en el Bloque</i>	69
6.3.3.	<i>Migración</i>	71
6.3.4.	<i>Trampas</i>	71
6.3.5.	<i>Roca Sello</i>	71
7.	INTERPRETACION SISMICA DEL BLOQUE	73
7.1.	BASE DE DATOS	73
7.1.1.	<i>Datos Sísmicos</i>	73
7.1.2.	<i>Datos de Pozo</i>	73
7.1.3.	<i>Sismograma Sintético</i>	73
7.1.4.	<i>Calibración Sísmica – Pozo</i>	75
7.2.	METODOLOGÍA PARA LA INTERPRETACIÓN SÍSMICA	76
7.2.1.	<i>Interpretación de Horizontes</i>	78
7.2.2.	<i>Coherencia Sísmica</i>	81
7.2.3.	<i>Interpretación de Fallas</i>	84
7.2.4.	<i>Superficies de Tiempo</i>	85
7.2.5.	<i>Atributos Sísmicos</i>	86
8.	ANALISIS DE RESULTADOS	87
8.1.	SISMOGRAMA SINTÉTICO	87
8.2.	CALIBRACIÓN SÍSMICA-POZO	89
8.3.	RESOLUCIÓN VERTICAL	90
8.4.	INTERPRETACIÓN SÍSMICA ESTRUCTURAL	91
8.4.1.	<i>Interpretación de Horizontes</i>	91

8.4.2. Interpretación de Fallas	97
8.4.3. Interpretación Mapas de Tiempo	100
8.5. ATRIBUTOS SISMICOS	105
8.5.1. Coherencia Sísmica	105
9. CONCLUSIONES	113
BIBLIOGRAFIA	114
ANEXOS	118

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Esquema realizado según la metodología a trabajar.</i>	22
<i>Figura 2. Mapa de la localización de la Cuenca de los Llanos Orientales, límites con Venezuela, AJC.</i>	26
<i>Figura 3. Prospectividad de la Cuenca de Los Llanos Orientales en Crudo pesado, ACIPET – Agosto 2010.</i>	27
<i>Figura 4. Dominios Estructurales de La Cuenca de los Llanos Orientales y localización de líneas sísmica, Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH.</i>	30
<i>Figura 5. Esquema sección transversal a través de los dominios de Arauca, Donde se ve el Graben y el depocentro Cámbrico – Ordovícico, limitado por fallas normales posteriores. Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH.</i>	31
<i>Figura 6. Esquema de la sección transversal de La</i>	32
<i>Figura 7. Líneas Sísmicas E-W y S-N Dominio Meta, Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH. (Nota: Fallas Normales, algunas están con tectónica de inversión).</i>	33
<i>Figura 8. Líneas Sísmicas, Imagen a. CO-95-04, b. ME-94-1910, c PT-90-379. Dominio Foothills, Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH.</i>	35
<i>Figura 9. Carta de Correlación Estratigráfica, Cuenca de los Llanos Orientales, Ingeominas 2009. Modificado AJC.</i>	36
<i>Figura 10. Ubicación del corredor de sedimentación en la Cuenca de Los Llanos orientales, (modificado de Baldís, 1988) 1. Fm. Negritos, 2. Gp. Guejar, 3. Fm Araracuara, 4. Fm Benjamin Constant, 5. Silúrico de Ecuador, 6. Rocas Metamórficas Caledonianas. Modificado AJC.</i>	37
<i>Figura 11. Columna estratigráfica simplificada de las formaciones Carbonera y León, Tomado de Evolución Geológica de Colombia – 1999 – Jean François Toussaint. Modificado AJC.</i>	42
<i>Figura 12. Columna estratigráfica regional con la Evolución Geológica de Cuenca de los Llanos Orientales – 1999 – Jean François Toussaint. Modificado AJC.</i>	45
<i>Figura 13. Imagen ilustrativa de la ley de Snell.</i>	46
<i>Figura 14. Procesos de Reflexión y Refracción Sísmica. Se observa el proceso esquemático del comportamiento de una onda al conseguir un obstáculo. (Tomado de Regueiro, 2007).</i>	48
<i>Figura 15. Ondícularicker o Fase Cero.</i>	52
<i>Figura 16. Modelo de convolucional junto con una traza sísmica.</i>	54
<i>Figura 17. Tomado de Geological interpretation of synthetic seismograms. An applied example to the Rio Segura G-1 well, W.I. Martínez Cabañas, 1996. Generación de un sismograma sintético.</i>	56
<i>Figura 18. Efecto Campton. Tomado de: (http://www.didactika.com/fisica/fisica_moderna/fisica_moderna_efecto_campon.html)</i>	59
<i>Figura 19. Figura tomada de la Ronda ANH, 2010 con los bloques puestos para la ronda, ubicación generalizada del bloque a evaluar.</i>	66

Figura 20. Carta de eventos para la Cuenca de los Llanos Orientales. Se ilustran los tiempos de los eventos en los cuales ocurrió la depositación de las rocas fuentes, reservorio, sello y de sobrecarga. El tiempo de la conformación de la trampa, como también se indica el intervalo en el cual ocurrió el proceso de generación migración, y acumulación. También se muestra el intervalo de preservación y el momento crítico. Tomado de la ANH 2010.	72
Figura 21. Diagrama de la historia de subsidencia de la Cuenca de los Llanos Orientales. En esta figura se ilustra la variación del %Ro con el tiempo. Nótese que la Formación Gachetá entró a la ventana de generación de petróleo en el Paleógeno y la Formación Barco- Cuervos entró a la ventana de petróleo en el Neógeno. Así mismo la Formación Gachetá entró a la ventana de gas al inicio del Neógeno. Tomado de la ANH 2010	72
Figura 22. Construcción del Sismograma Sintético. Se aprecia los registros Sónico (Rojo) y el de densidad (Azul), igualmente se observa la serie de Reflectividad (Turquesa) y el sismograma sintético (Blanco).Elaborado AJC.	74
Figura 23. Calibración Sísmica – Pozo. Se puede observar en la figura como se coloca el sismograma sintético creado en Syntool, encima de la sísmica de SeisWorks y como se pueden correlacionar la ondícula con los reflectores fuertes.	76
Figura 24. Inicio de interpretación de los primeros reflectores correspondientes a intra – Carbonera (C1, C7) y Near Guadalupe.	78
Figura 25. Inicio de interpretación de los primeros reflectores correspondientes a intra – Carbonera (C1, C7) y Near Guadalupe.	79
Figura 26. Interpretación de Zig – Zag. En el mapa se observa la línea amarilla como se intercalan los inlines y los crossline, mientras que en el panel derecho se observa las dos líneas sísmicas en una misma escala con su continuidad.	80
Figura 27. Imagen donde se observa procedimiento para la elaboración del cubo de coherencia.	81
Figura 28. Imagen de un corte a profundidad 1322 en tiempo del cubo de coherencia.	83
Figura 29. Polígonos de Falla, construidos a partir de los altos interpretados en la sísmica, se marcaron 3 fallas de las cuales solo la roja llega a profundidad.	85
Figura 30. Mapa de tiempo del Horizonte Near C1 donde se observa el rango de tiempo en el cual se encuentra el reflector y los contrastes de amplitud.	86
Figura 31. Sismograma Sintético para el Pozo_C, los rectángulos rojos muestran donde se ubica las reflexiones más fuertes, interpretadas como Carbonera Near (C1, C5, C7).	87
Figura 32. Syntool, elaboración del sismograma sintético para el Pozo_C. se puede observar el empalme de la sísmica con los Horizonte interpretados y el sismograma sintético.	88
Figura 33. Sintético del Pozo_C mostrando los marcadores estratigráficos con sus respectivos Horizontes.	89
Figura 34. Datos tomados de Syntool para el cálculo de resolución Vertical.	90
Figura 35. Reflector correspondiente al tope de la formación Carbonera asignado como NearC1, en la inlines 226, cerca al Pozo_C.	92
Figura 36. Reflector correspondiente de la formación intra-Carbonera asignado como NearC5, en la inlines 181.	93
Figura 37. Reflector correspondiente de la formación intra-Carbonera asignado como NearC7, en la inlines 72.	94
Figura 38. Reflector correspondiente de la formación Guadalupe asignado como Near Guadalupe, en la inlines 72.	95

Figura 39. Corte geológico esquemático de la geología general en la cuenca de los llanos Orientales (Tomado de Trabajo de Grado L. Farooq, UIS, 2011)	96
Figura 40. Inlines 186 y Crosslines 377, donde se puede apreciar el plano de falla en las zonas de discontinuidad del volumen sísmico. Sin Interpretar.	98
Figura 41. Inlines 186 y Crosslines 377, donde se puede apreciar el plano de falla en las zonas de discontinuidad del volumen sísmico. Interpretadas.	98
Figura 42. Inlines 121, donde se puede apreciar el plano de falla B de color verde en las zonas de discontinuidad del volumen sísmico. Interpretadas.	99
Figura 43. Mapa de Tiempo, tope C1, Intra-Carbonera, finalización Formación León y comienzo de Carbonera. Se observa Falla A, que sube hasta superficie.	100
Figura 44. Mapa de Tiempo, tope NearC5, Intra-Carbonera, Se observa Falla A, que sube hasta superficie y aparece Falla B	101
Figura 45. Mapa de Tiempo, tope Cnear7, Intra-Carbonera, Se observa Falla A, que sube hasta superficie y Falla B.	102
Figura 46. Mapa de Tiempo, tope Paleozoico, Se observa Falla A y Falla B.	103
Figura 47. Mapa de tiempo, Intra-Basamento, se observa la Falla A, Falla B y el lineamiento que presenta el basamento en dirección NW.	104
Figura 48. Línea diagonal del volumen sísmico con la interpretación de los horizontes, sin Horizontalisar.	105
Figura 49. Línea diagonal del volumen sísmico con la interpretación de los horizontes, con Horizontalisar el Tope-Paleozoico de color Magenta.	106
Figura 50. Corte de tiempo de 1882ms y 1890 ms a profundidad del Cubo de coherencia donde se puede apreciar el alto estructural en el Intra-Paleozoico.	107
Figura 51. Línea inlines 133 y Corte a profundidad a 1968 ms del cubo de coherencia, horizonte Intra-Paleozoico de Color Azul interpretado con la Falla B. se aprecia el salto estructural.	108
Figura 52. Línea inlines 160 y Corte a profundidad a 1688 ms del cubo de coherencia, horizonte Tope - Paleozoico de Color Magenta interpretado con la Falla B. se aprecia el salto estructural.	109
Figura 53. Línea inlines 161 y Corte a profundidad a 1646 ms del cubo de coherencia, horizonte Tope - Paleozoico de Color Magenta, aparece por primer vez la Falla A de color Rojo.	110

INDICE DE ECUACIONES

Pág.

<i>Ecuación 1 Impedancia Acústica</i>	<i>48</i>
<i>Ecuación 2 Ecuación de Onda en un medio homogéneo.....</i>	<i>49</i>
<i>Ecuación 3 Amplitudes primarias reflejadas en la i-esima capa.....</i>	<i>50</i>
<i>Ecuación 4 Ecuaciones de Zoepprits, tomado de Regueiro, 2007.....</i>	<i>50</i>
<i>Ecuación 5 Ecuación de Ricker.....</i>	<i>51</i>
<i>Ecuación 6 Expresión matemática del modelo convolucional de la traza sísmica.</i>	<i>53</i>
<i>Ecuación 7 Relación entre la longitud de onda, la velocidad y la frecuencia.....</i>	<i>56</i>
<i>Ecuación 8 Velocidad de propagación en un medio homogéneo de la onda P.....</i>	<i>57</i>
<i>Ecuación 9 Velocidad de propagación en un medio homogéneo de la onda S</i>	<i>57</i>
<i>Ecuación 10 Tiempo promedio en función de la Lentitud</i>	<i>61</i>
<i>Ecuación 11 Porosidad en función de la lentitud.....</i>	<i>61</i>
<i>Ecuación 12 Relación para el cálculo de la resolución vertical.</i>	<i>90</i>

ANEXOS

<i>ANEXO 1 Línea sísmica 2D donde se puede observar la calibración del Pozo_C con la sísmica.....</i>	<i>118</i>
<i>ANEXO 2 Corte a Profundidad 1938 ms del cubo de coherencia, Paleozoico.</i>	<i>119</i>
<i>ANEXO 3 Corte a profundidad 1536 ms del Cubo del coherencia, gran canal con dirección SE.....</i>	<i>121</i>
<i>ANEXO 4 Línea inlines 183 y corte a profundidad a 1404 ms del cubo de coherencia, horizonte Near C5 de Color Azul, donde se observa el salto de la falla A.</i>	<i>122</i>
<i>ANEXO 5 Corte a profundidad 1348 ms, 1328 ms, 1386 ms y 1450 ms, Donde se aprecia el cambio de dirección de los canales.</i>	<i>123</i>
<i>ANEXO 6 Corte a profundidad 1342 ms, del cubo sísmico procesado y el cubo de coherencia donde se puede apreciar los canales antes de la depositación de los Horizontes Near C1.</i>	<i>124</i>
<i>ANEXO 7 Corte a profundidad 1054 ms, 1084 ms, 1100 ms y 1142 ms, donde se aprecia el ultimo registro del evento de transicion y el cambio de la formacion carbonera a la formacion León.</i>	<i>125</i>
<i>ANEXO 8 Mapa de Horizonte Nera C7, realizado en Z-map, donde se puede apreciar los contornos en cada 5 ms, contiene la falla A, trampa de interés.</i>	<i>126</i>
<i>ANEXO 9 Zoom Mapa del Horizonte NearC7, Cargado en SeisWorks, donde se observa el cierre estructural y su área en acres. 71.902 Acres.</i>	<i>127</i>
<i>ANEXO 10 Inline 200 donde se puede observar la zona de interés y su área respectiva, NearC7 es el objetivo principal y NearC5 secundario.....</i>	<i>128</i>

RESUMEN

TÍTULO: VALIDAR EL POTENCIAL PETROLIFERO DE UN BLOQUE EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES COLOMBIA A PARTIR DE SISMICA 3D UTILIZANDO CUBO DE COHERENCIA Y ATRIBUTOS SISMICOS *

AUTOR: ANDREA JULIANA COTE MELO **

PALABRAS CLAVE: Interpretación, sísmica, terciario, Formación Carbonera, potencial, atributos sísmicos, PSTM, cubo de coherencia, cuenca Llanos Orientales, Seisworks.

DESCRIPCION:

La cuenca de los Llanos Orientales ha sido una de las áreas del país con más estudios por parte de la industria de petróleo en Colombia, esto ha facilitado de alguna manera, no solo el desarrollo de la cuenca sino también proyectos de investigación que proveen grandes ramas de la geología como, geofísica, hidrogeología, geoquímica, permitiendo establecer los diversos factores que afectan la generación, migración y entrapamiento del crudo.

Los primeros trabajos petroleros en la cuenca de los Llanos Orientales se inician en 1944 con la perforación por parte de la compañía Shell con el pozo San Martín – 1, el cual presentó un crudo con 23° API. Desde esa fecha la cuenca cuenta con más de 300 pozos exploratorios y 82 campos petrolíferos entre 1988-2000.

Mediante este trabajo se busca alcanzar un estudio detallado de un bloque de la Empresa Pacific Rubiales, en la Cuenca de los Llanos Orientales Colombia utilizando Sísmica 3D y atributos sísmicos como Cubo de Coherencia, a la Formación Carbonera, con el fin de analizar el potencial petrolífero, identificando estructuras y posible Play.

La interpretación sísmica y el mapeo fueron realizados a partir de Software Openworks con las aplicaciones de Seisworks, Syntool, Z-map, logrando aprender las herramientas esenciales en la industria, desarrollando un pensamiento crítico con la metodología utilizada, para evaluar una propuesta y concluir si es económicamente viable.

*Proyecto de Grado, Modalidad: Práctica Empresarial

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Director, Geólogo Javier Villamizar, Codirector, M.Sc Ivan Olaya, Pacific Stratus Energy.

ABSTRACT

TITLE: VALIDATE THE BLOCK OIL POTENTIAL IN THE BASIN OF THE EASTERN PLAINS COLOMBIA FROM USING CUBE 3D SEISMIC COHERENCE AND SEISMIC ATTRIBUTES *

AUTHOR: ANDREA JULIANA COTE MELO **

KEYWORDS: Interpretation, seismic Tertiary Carbonera, potential seismic attributes, PSTM, coherence cube, Llanos Basin, SeisWorks.

DESCRIPTION:

The Eastern Llanos Basin is one of the areas of the country with more studies by the oil industry in Colombia, this has facilitated in some way, not only the development of the basin but also research projects that provide large branches of geology as, geophysics, hydrogeology, geochemistry, thus allowing for the various factors affecting the generation, migration and entrapment of oil.

Early work in the Eastern Llanos Basin are started in 1944 with the drilling by Shell Company in San Martin well - 1, which presented a 23 ° API crude. Since that time the basin has more than 300 exploration wells and 82 oil fields between 1988-2000.

This work aims to achieve a detailed study of a block of Pacific Rubiales Company, in the Llanos Basin of Colombia using 3D seismic and seismic attributes as Coherence Cube, to the Carbonera formation, to analyze the oil potential identifying possible structures and Play.

The seismic interpretation and mapping were conducted from OpenWorks Software with Seisworks applications, Syntool, Z-map, achieving essential learning tools in the industry, developing critical thinking with the methodology used to evaluate a proposal and conclude whether is economically viable.

* Graduation Project, Business Practice Mode

**Faculty of Engineering physicochemical, School of Geology. Director, Geologist Javier Villamizar, CoDirector, M.Sc Ivan Olaya, Pacific Stratus Energy

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1. TÍTULO

“VALIDAR EL POTENCIAL PETROLÍFERO DE UN BLOQUE EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES COLOMBIA. A PARTIR DE SISMICA 3D UTILIZANDO CUBO DE COHERENCIA Y ATRIBUTOS SISMICOS”.

1.2. DIRECTOR

Nombre : Geol. Javier Villamizar
Nombre : M.Sc. Ivan Dario Olaya
Empresa : Pacific Rubiales EnergyCopr.
Cargo : Gerente de Geología y Geofísica

1.3. AUTORES

Nombre : Andrea Juliana Cote Melo
Código : 2061938
Carrera : Geología

1.4. ENTIDADES INTERESADAS EN EL PROYECTO

- Universidad Industrial de Santander
- Pacific Rubiales Energy Corp.

1.5. DIRECTOR DE ESCUELA

Nombre : Msc. Geol. Sait Khurama Velásquez
Institución : Universidad Industrial de Santander.
Cargo : Director de Escuela de Geología.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar, definir y cuantificar el potencial petrolífero de un proyecto en los Llanos Orientales Colombia, Bloque_C.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar el sistema petrolífero y sus estructuras favorables para la acumulación de hidrocarburo o gas, utilizando como herramienta; Datos de sísmica 2D - 3D y registros de pozo del área de interés, (La empresa se reserva el nombre del bloque como confidencial).
- Identificar las unidades del terciario y cretácico que puedan tener un alto porcentaje de Hidrocarburo, generar los mapas y la interpretación necesaria del volumen 3D del bloque utilizando atributos sísmicos como respectivos de cada unidad de interés.
- Cuantificar el área en acres del posible leads donde se encuentra acumulado el Hidrocarburo en la trampa de interés, afianzando de esta manera el desarrollo y entrenamiento en programas que se utilizan diariamente en la industria del Petróleo.

2.3. JUSTIFICACIÓN

El proyecto elaborado, fue dado gracias al proceso de convocatoria realizado por la empresa PACIFIC RUBIALES ENERGY CORP, ubicada en Bogotá Colombia, la cual permito la participación de un estudiante de último semestre de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, con fin de apoyar las actividades realizadas en el área de la Vicepresidencia de Nuevos Negocios, capacitar y afianzar al aprendiz en todos los proyectos de esta área.

Por medio de este trabajo de grado en la modalidad de “Práctica Empresarial” y basándose en la necesidad que tiene el área de Nuevos Negocios, se plantea evaluar el potencial petrolífero que presenta un bloque de la compañía en la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, con el fin de identificar nuevas oportunidades Exploratorias.

PACIFIC RUBIALES ENERGY CORP ve cada día la necesidad de ampliar su exploración y producción de hidrocarburo, por esta razón el área de Nuevos Negocios está en constante crecimiento, teniendo la responsabilidad de incorporar nuevas reservas mediante la participación en oportunidades identificadas o la adquisición de áreas.

La elaboración de este proyecto no solo busca dar apoyo en las actividades del área de Nuevos Negocios, sino igualmente capacitar de una manera integral al aprendiz con la intención de visualizar la dinámica que se maneja en la industria del Petróleo.

2.4. ALCANCE

Teniendo en cuenta la demanda mundial de petróleo y gas, la empresa Pacific Rubiales Energy, ha intensificado el estudio de interpretación y evaluación de cuencas sedimentarias en varios países del mundo, en este caso los Llanos Orientales Colombia, ha sido una de las áreas de mayor interés, lo cual ha facilitado los proyectos de investigación y exploración en el área.

Debido a la gran importancia de esta cuenca, por estar limitada al Nororiente con la región petrolífera de Apuré – Barinas¹ver bibliografía, localizada en Venezuela y una de las mayores productoras a nivel mundial, se asocia que estos campos maduros ubicados en el territorio colombiano presentan analogía con todo este gran sistema petrolífero.

Por medio de este trabajo se busca alcanzar un estudio detallado de todo el bloque, identificar todas sus estructuras y sistema petrolífero, analizar con profundidad las posibles trampas y el volumen calculado en estas, con el fin de generar una nueva propuesta.

Igualmente se busca alcanzar que el aprendiz utilice herramientas, esenciales como software, desarrollando un pensamiento crítico con la metodología utilizada para evaluar un proyecto, fijar parámetros o prioridades para concluir si es una propuesta económica viable y rentable.

1. Cuenca Apure-Barinas: Cuenca de Venezuela con una extensión de 87.000 Km^2 , con más de 350 pozos activos y una capacidad de producción de 166 millones de Barriles diarios.

3. METODOLOGIA

La dinámica de la Práctica empresarial permite la organización del proyecto por fases, durante 6 meses propuestos de los cuales también se dedican al apoyo geológico en las actividades del Área Nuevos Negocios.

Mediante la metodología se pudo realizar cada fase en forma organizada, permitiendo el logro de los objetivos planteados, cada una cuenta con 2 o 3 actividades importantes en que se enfoca cada etapa. **Figura 1.**

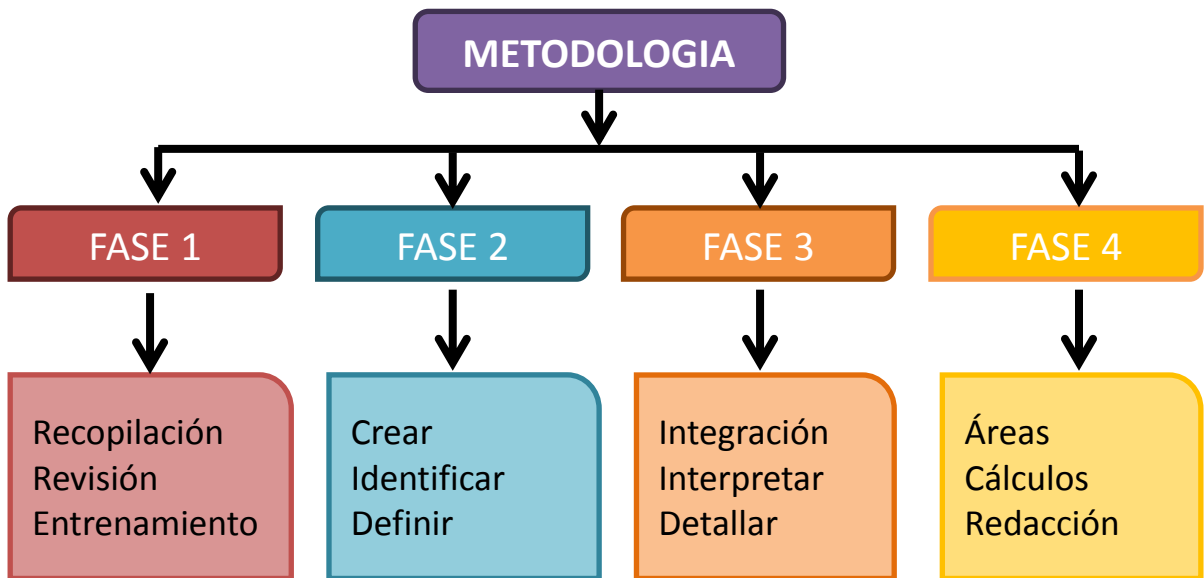


Figura 1. Esquema realizado según la metodología a trabajar.

3.1. FASE 1

Para la primera fase se realizó una búsqueda y revisión bibliográfica que permitió entender la Cuenca de los Llanos Orientales de una manera más regional, de igual manera se realizó una prueba de calidad a la información sísmica 2D – 3D disponible y registros de pozos de la base de datos de la empresa Pacific Rubiales Energy.

Al mismo tiempo se realizó un entrenamiento por parte del personal de soporte de Halliburton durante dos meses en el cual se enfocó en OpenWorks Plataforma y aplicaciones como SeisWorks, CRep5, Z-Map.

Posteriormente se realizó un curso de Registros para identificar propiedades petrofísicas de las formaciones, por parte de la empresa Elite Training. Dictado por el Geofísico Carlos Torres en la ciudad de Bogotá Junio del 2012. Estas capacitaciones son parte de contrato de aprendizaje que brinda la Empresa Pacific Rubiales Energy.

3.2. FASE 2

Para esta fase se trabajó con registros de densidad y sónico, se creó un sismograma sintético del pozo_C localizado en el bloque sísmico el cual es de mucha ayuda para calibrar el pozo con la sísmica.

De igual manera se identificaron las posibles unidades del Terciario y el Cretácico, las fallas existentes, además se utilizó el sismograma para crear los pick estratigráficos de los pozos y poder definir realmente que se quiere buscar con la sísmica verificando que estas unidades si coincidan con un los horizonte productor, esto permite calibrar de una manera confiable la sísmica y poder trabajar con más seguridad.

3.3. FASE 3

En esta fase se trabajó con los horizontes ya identificados y las fallas. La idea de esta fase es comenzar una interpretación coherente, enfocada en definir el sistema de acumulación, migración y tiempo, de la zona de interés, se intenta identificar la trampa de interés y poder verificar si existe un cierre entre la trampa y la estructura que comprende el yacimiento.

3.4. FASE 4

Teniendo ya delimitada los Leads o Prospectos, se realizan (unos cálculos) de volúmenes en el área, el cual se realizará por medio de aplicaciones como software Z-map.

Finalmente Redactar el respectivo libro para entregarlo a la Escuela de Geología.

4. MARCO GEOLOGICO DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

La cuenca de los Llanos Orientales ha sido una de las áreas del país con más estudios por parte de la industria de petróleo en Colombia, esto ha facilitado de alguna manera, no solo el desarrollo de la cuenca sino también proyectos de investigación que proveen grandes ramas de la geología como, geofísica, hidrogeología, geoquímica, permitiendo establecer los diversos factores que afectan la generación, migración y entrapamiento del crudo.

Los primeros trabajos petroleros en la cuenca de los Llanos Orientales se inician en 1944 con la perforación por parte de la compañía Shell con el pozo San Martín – 1, el cual presentó un crudo con 23° API. Desde esa fecha la cuenca cuenta con más de 300 pozos exploratorios y 82 campos petrolíferos entre 1988-2000.

En la década del 2000 la actividad de exploración aumenta notoriamente en el centro de Cuenca de los Llanos Orientales, como resultado de la creación y el nuevo modelo de contratación impuesto por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Muchas pequeñas empresas, extranjeras y nacionales adquirieron nuevos volúmenes sísmicos que permitieron definir mejor las trampas de esta área ayudando al desarrollo de muchos campos pequeños, ejemplo; Campo Castilla, Campo Rubiales, Campo Oropéndola, entre otros.

4.1. LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

La Cuenca de los Llanos Orientales se encuentra localizada en la región centro-oriental de Colombia, limitada al oriente por el Escudo Guayanés, al occidente por la Cordillera Oriental, al Sur por la saliente del Vaupés o Arco del Guaviare y al norte se prolonga hasta Venezuela con la Cuenca de Apure-Barina, Como se puede observar en la **Figura 2**. Presenta un total de 220.000 Km^2 equivalentes a 52'000.000 acres, de los cuales 153. 000 Km^2 corresponde al área de

Prospectividad de Crudos Pesados donde se ha adquirido gran cantidad de información desde 1944. (Acipet – Agosto 2010). Ver **Figura 3**.

Para mejorar el estudio de la cuenca, esta se ha dividido en tres áreas principales: una zona norte – Arauca, una parte central – Casanare, y un sector sur – Meta.

Esta cuenca tiene una capacidad de producción promedio cerca de 425Kbps, de los cuales 187.000 son crudo pesado, 121.000 son crudo medianos y 116.000 son crudos livianos. Los aceites varían desde 22° API a 42° API, (Reporte ANH ronda 2010).



Figura 2. Mapa de la localización de la Cuenca de los Llanos Orientales, límites con Venezuela, AJC.

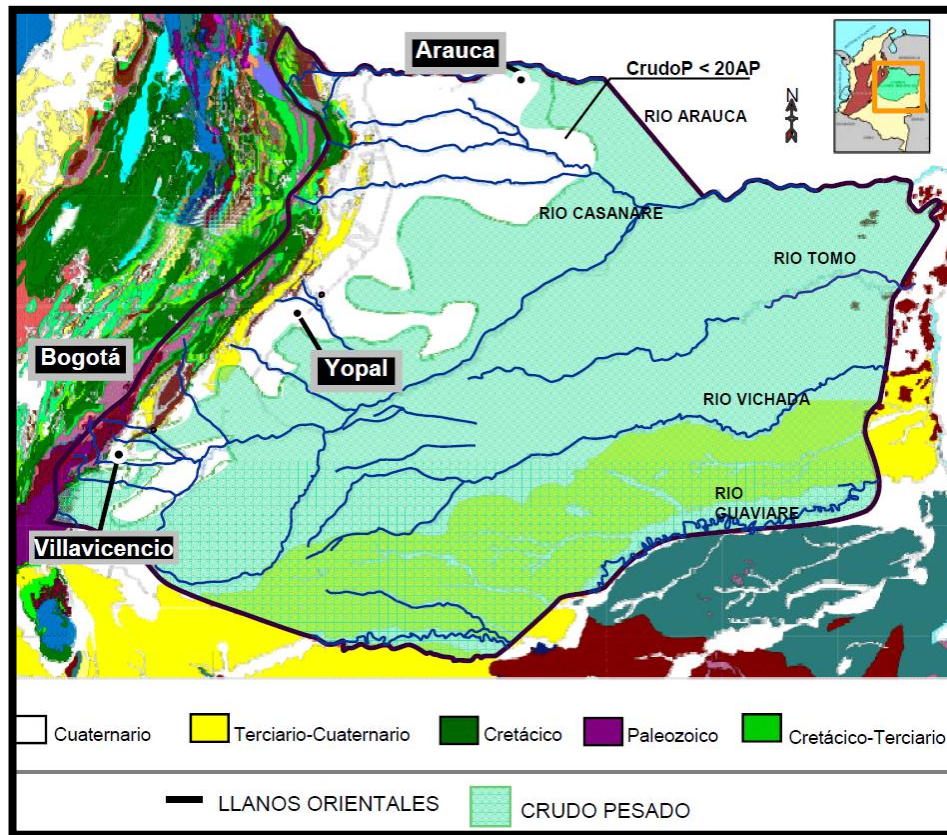


Figura 3. Prospectividad de la Cuenca de Los Llanos Orientales en Crudo pesado, ACIPET – Agosto 2010.

4.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

Es una unidad tectónica que se originó en el Cretáceo medio a tardío en facies inicialmente marinas y finalizó con facies continentales. Estructuralmente es un gran monoclinual con buzamientos muy suaves en dirección al piedemonte de la Cordillera Oriental. Los límites de la cuenca son difíciles de establecer, pero está bien delimitada entre el Escudo de Guyana al este y la Cordillera oriental al oeste.

Debido a la naturaleza de los llanos el conocimiento de las condiciones geológicas ha sido posible a partir del análisis de datos del subsuelo. La disposición estructural es muy similar a la de los llanos de Venezuela donde existen dos

cuencas: la Cuenca Oriental de Venezuela y la de Barinas-Apure, separadas por el Arco del Baúl.

La Cuenca de Barinas-Apure en Venezuela y la de los llanos en Colombia son prácticamente la misma. Esta última es consecuencia de la Orogenia Terciaria y enlaza hacia el occidente con la Cordillera Oriental. Asimismo, se encuentra por debajo del Terciario un cierto espesor de Cretácico, adelgazándose hacia el este y que igualmente en Venezuela está recubierto transgresivamente por el Terciario. Estratigráficamente es importante mencionar que a finales del Cretácico tuvo lugar un cambio completo en las condiciones de sedimentación pasándose a condiciones continentales. Los yacimientos productores en la escala estratigráfica van desde el Cretáceo Superior hasta el Oligoceno Inferior, incluyendo a las formaciones: Gachetá, Guadalupe, Mirador y Carbonera, siendo los intervalos arenosos de estos dos últimos los más sobresalientes.

4.3. MARCO ESTRUCTURAL CON BASE A LA SÍSMICA DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

Los datos sísmicos revelan eventos importantes de deformación que afectaron rocas sedimentarias de edad Paleozoico, según Ecopetrol y Beicip (1995). Un régimen extensional prevalece durante el Paleozoico, lo que generó el desarrollo de muchas estructuras tipo graben que se tienen en la cuenca. Durante el Ordovícico superior y Silúrico, un régimen de compresión parece haber afectado a las zonas de Arauca y Meta. Este evento puede ser correlacionado con la Orogenia Caledoniana.

Durante el Devónico y el Paleozoico Tardío un régimen tectónico extensional epicontinental relativamente profundo, domina la parte central de la cuenca, como resultado se obtienen fosas tectónicas orientadas NS, (Ecopetrol y Beicip, 1995). La historia de La Cuenca es poco conocida, en el paleozoico ya que pocos pozos la han penetrado.

Posteriormente durante el Mesozoico en el Triásico y Jurásico corresponde a una cuenca de rift extensional, probablemente corresponde a la ruptura de la Pangea y más tarde a la extensión del retroarco, presentan esfuerzos extensionales o transtensionales que han sido reconocidos en las áreas de Arauca y Meta.

Para completar mejor el estudio de esta cuenca, se ha dividido en 7 dominios tectónicos que se pueden observar en la **Figura 4**. Y que se caracterizan por su patrón estructural. Estos dominios están definidos por la interpretación sísmica de diferentes líneas dispersas por toda la Cuenca.

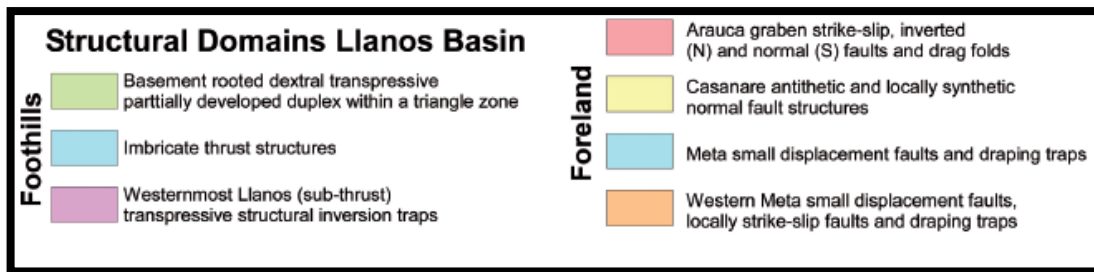
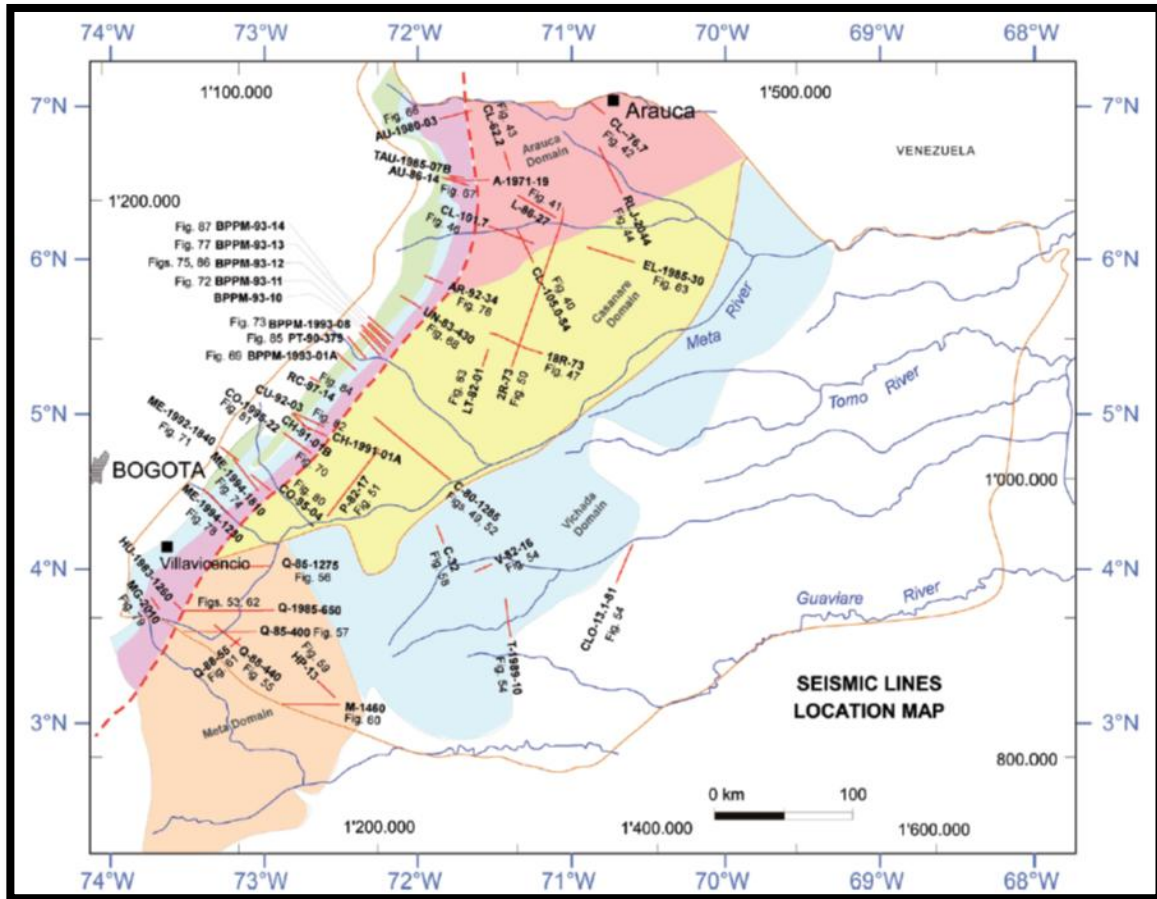


Figura 4. Dominios Estructurales de La Cuenca de los Llanos Orientales y localización de líneas sísmica, Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH.

4.3.1 Dominio Estructural Arauca:

Con la interpretación sísmica se pueden en la caracterizar esfuerzos con tendencia E-NE – W-SW, fallas tipo strike –slip y espesores menores de 8 Km para los sedimentos del Paleozoico. Las Fallas Mantecal y Achagua ver **Figura 5**. (Fallas que se Extiende hasta carbonera) tienen dirección N-S, bordeando el graben con desplazamiento vertical entre 0.2 y 2 Km hasta el basamento y un pequeño throw en el tope del Paleozoico. Estas fallas parecen haber sido tectónicamente invertida al final del Ordovícico y reactivado ligeramente durante el Cenozoico. Altas fallas inversas de ángulo bordean el graben hacia el norte. La compresión Cenozoico (Oligoceno Mioceno tardío) genera reactivación del E-NE-W-SW. Dentro del graben, hay pliegues E-NE-W-SW tendencias asociadas a revertir las fallas. Su orientación sugiere que las fallas Mantecal y Achagua fueron fallas Sinistral de salto durante Paleozoico.

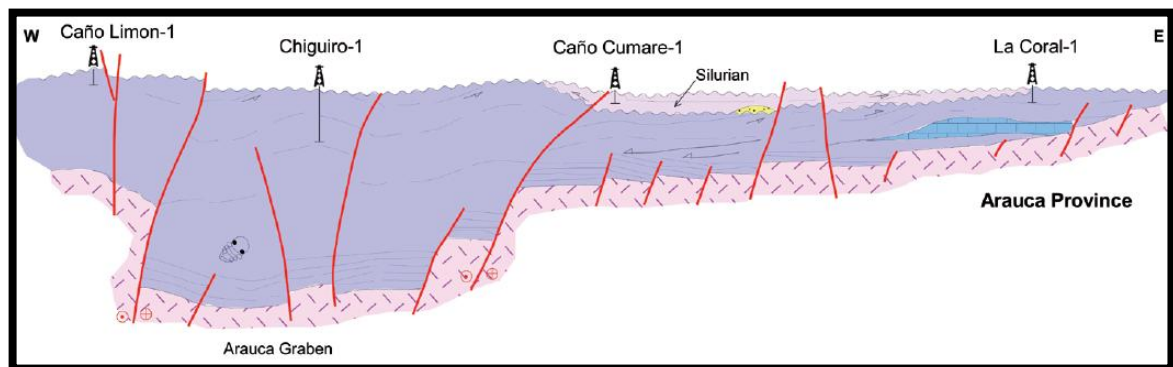


Figura 5. Esquema sección transversal a través de los dominios de Arauca, Donde se ve el Graben y el depocentro Cámbrico – Ordovícico, limitado por fallas normales posteriores. Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH.

4.3.2. Dominio Estructural Casanare:

Este Dominio presenta buzamiento hacia el Oeste acompañado de fallas normales, se caracteriza por una fina sección sedimentaria del Paleozoico, que se engruesa hacia el Oeste, dos familias de fallas normales (NS y NE) que afectan toda la sección sedimentaria. La mayoría de estas fallas son antitéticas (regido por un up-to the Basin, Fault), pero también existen Fallas normales sintéticas Asociadas a (Roll- OverFolds). Esto se aprecia en el esquema de la **Figura 6**.

Però el mapeo sísmico adecuado de estos tipos de trampas es problemático, por la Baja Velocidad de la Formación León, el cual se observa problemas conocidos como (Fault Shadow Effect), lo que crea una estructura fantasma que muchas veces engaña a los intérpretes, (Chermak et al., 2009).

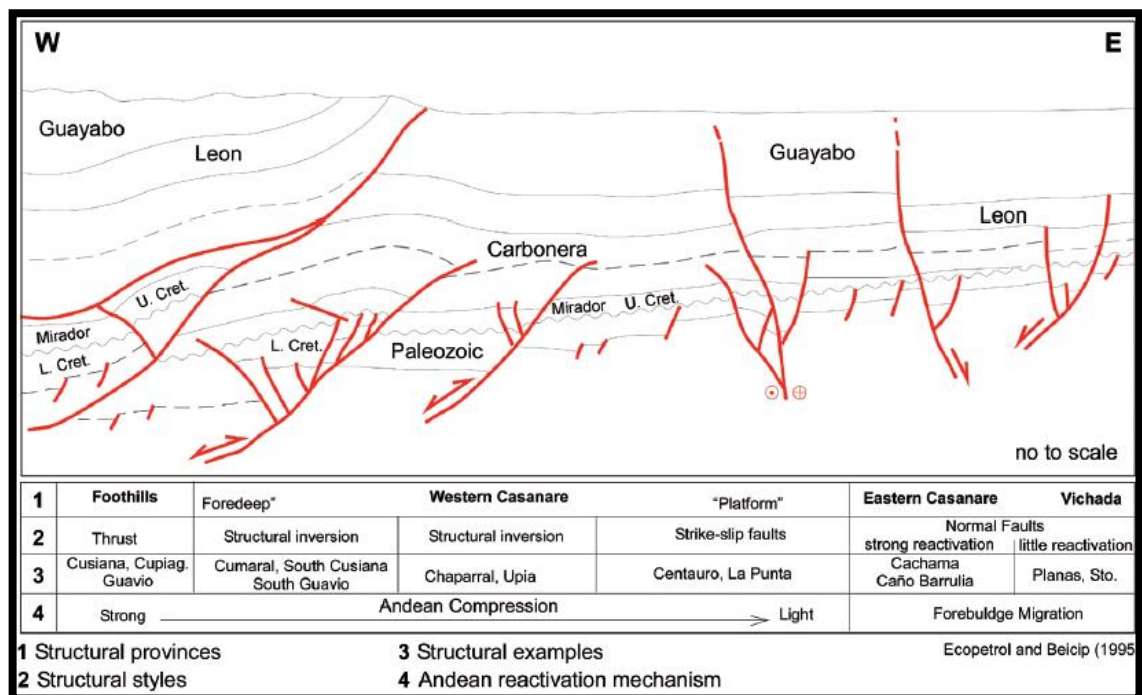


Figura 6. Esquema de la sección transversal de La Casanare

4.3.3. Dominio Estructural Meta:

Se encuentra situado en el sur de Los Llanos Orientales, en la parte del antepaís, se caracteriza por fallas Normales, algunas de ellas invertida cerca del BCE y NE – SE y NS con tendencia a fallas Strike – slip y una grueso registro sedimentario del Paleozoico afectado por Pliegues y fallas de Empuje Guaicáramo.

En la **Figura 7**. Se puede observar las Fallas normales que nacen desde basamento pero con comportamiento de falla inversa, inversión tectónica por la orogenia Andina.

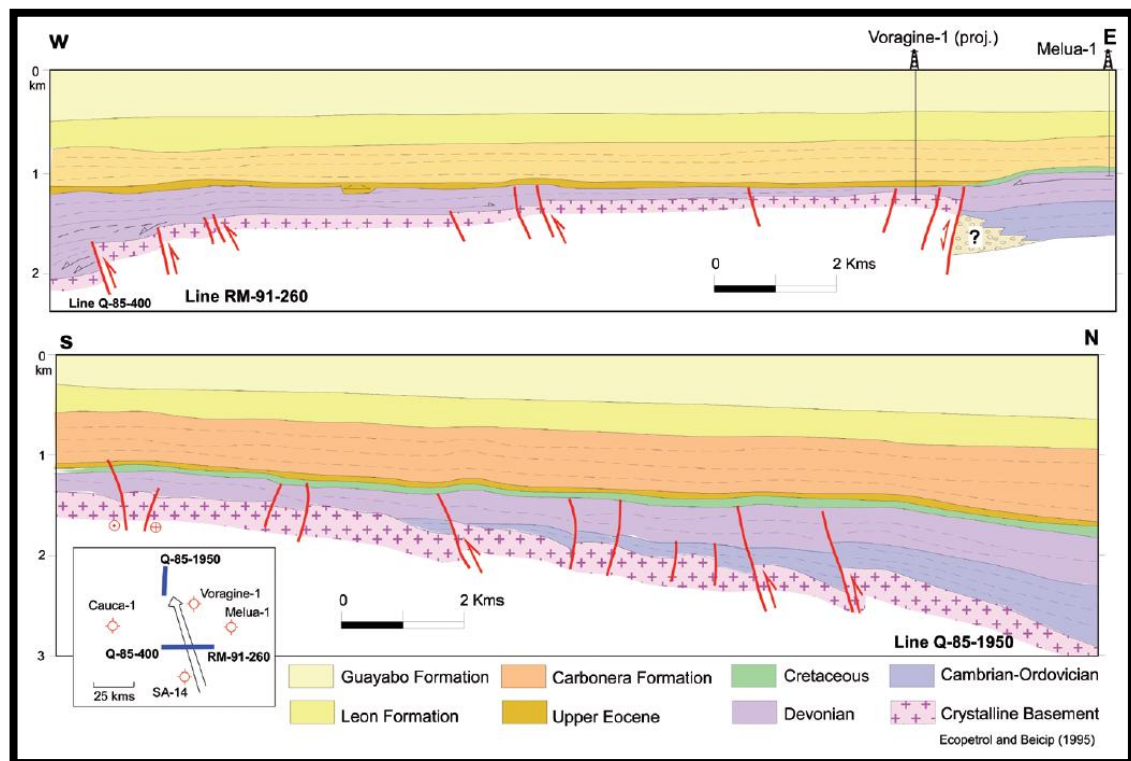
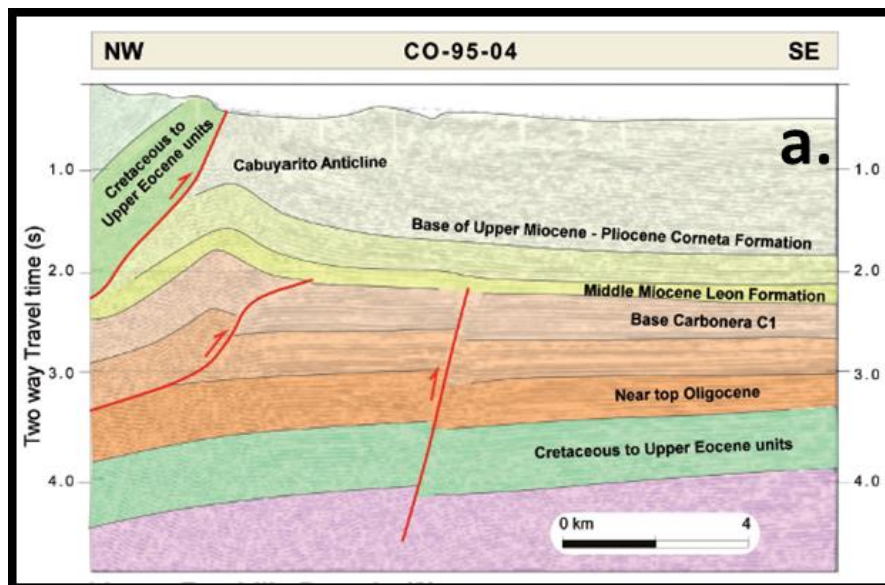


Figura 7. Líneas Sísmicas E-W y S-N Dominio Meta, Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH. (Nota: Fallas Normales, algunas están con tectónica de inversión).

4.3.4. Dominio Estructural Foothills:

Se encuentra localizado al extremo occidental de la Cuenca adyacente Cordillera Oriental. Corresponde a la zona externa de esta cuenca donde se encuentra sedimentos Cretácico y Cenozoico (Paleógeno y Neógeno) como se observa en la **Figura 8**. Las rocas sedimentarias que afloran con características de bajo ángulo de empuje y con una larga faja plegada, **Figura 8**. La zona oriental tiene menos deformación que la zona occidental, donde se puede reconocer.

- 1). Fallas de inversión (Ex Normales) del Cretácico o Paleozoica, que ahora son falla inversas, **Figura 8.a**.
- 2) Fallas inversas imbricadas y locales, **Figura 8.b**.
- 3) zonas triangulares con estructuras Dúplex. Este tipo de estructuras tiene un gran potencial de trampa (muchas ya son productoras) donde el Cretácico superior y el Paleógeno son reservorio con sellos involucrados. **Figura 8.c**.



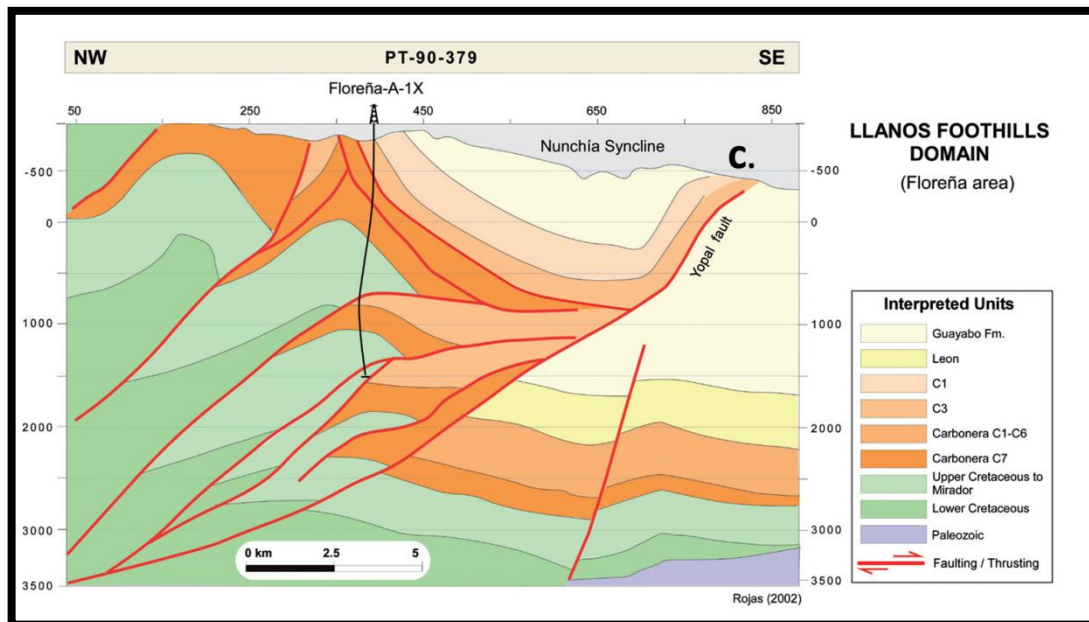
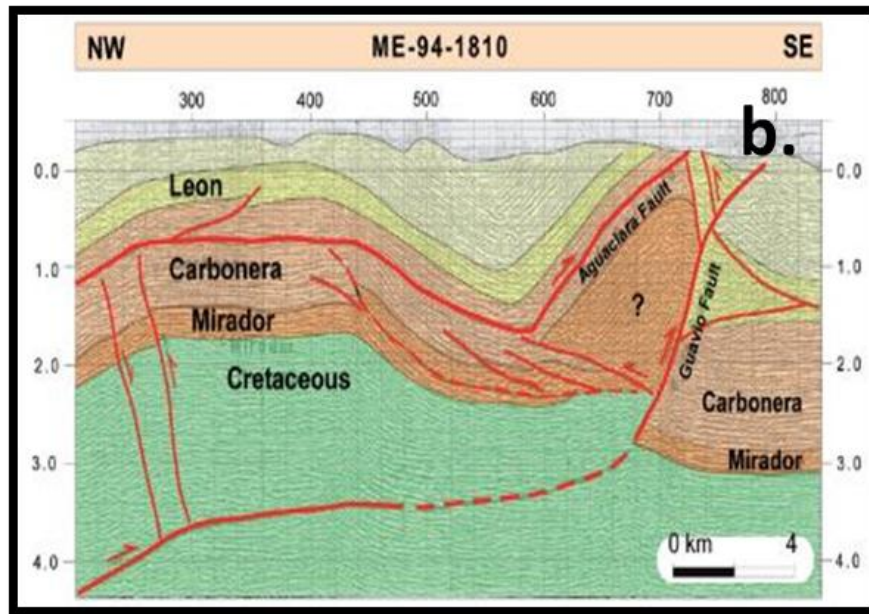


Figura 8. Líneas Sísmicas, Imagen a. CO-95-04, b. ME-94-1910, c. PT-90-379. Dominio Foothills, Tomado de PGC, 2012 Vol 1-15. ANH.

4.4. MARCO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL (Unidad Tectonoestratigráfico)

La cuenca de los Llanos Orientales como se ha mencionado, se encuentra limitada por sistema del borde Llanero al W y el Cratón al E. presenta rocas Cristalinas del Precámbrico y rocas sedimentarias que fueron depositadas en el intervalo de tiempo geológico en que la cuenca paso de un comportamiento de Retro-Arco durante el Cretácico Tardío a una cuenca de tipo Foreland en el Terciario Temprano y cuyo depocentro se movió progresivamente hacia el este a lo largo del terciario (Cooper, 1995).

La columna Sedimentaria de la Cuenca se encuentra representada por Rocas de Edad Paleozoicas inferior (Cámbrico – Ordovícico), Mesozoico Superior (Cretácico Superior) y Cenozoico (Terciario – Cuaternario) (**Ver Figura 9.**) La cuenca se origina por la interacción de tres placas Tectónicas y por esta razón presenta diferentes unidades estratigráficas y dominios estructurales.

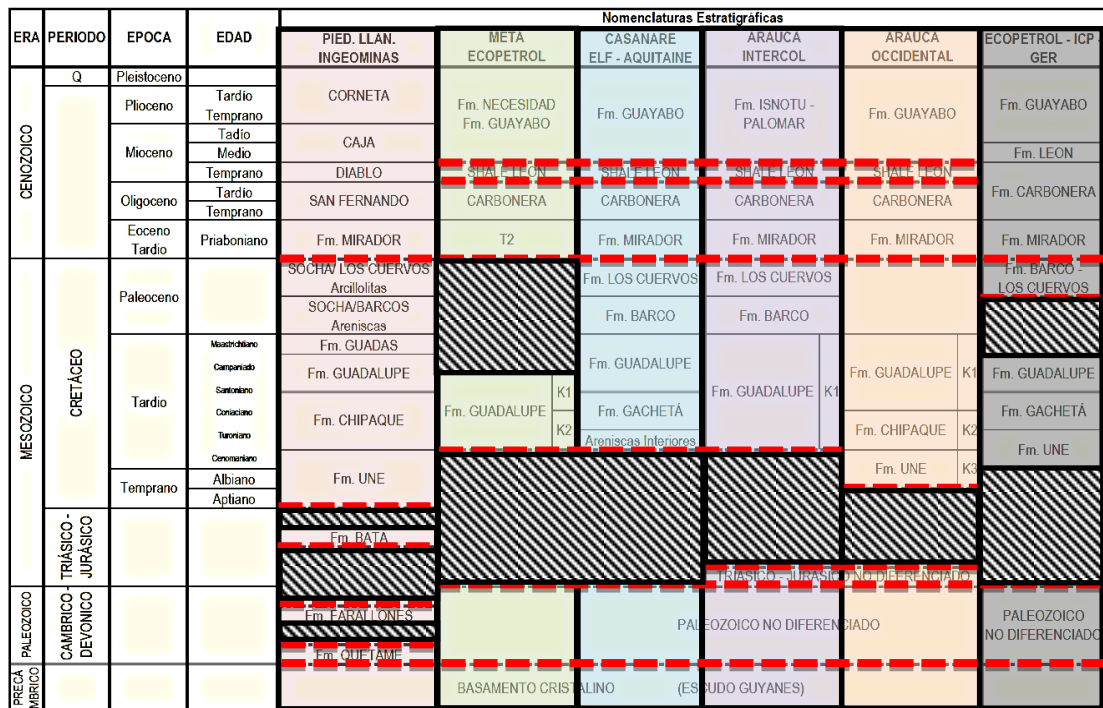


Figura 9. Carta de Correlación Estratigráfica, Cuenca de los Llanos Orientales, Ingeominas 2009. Modificado AJC.

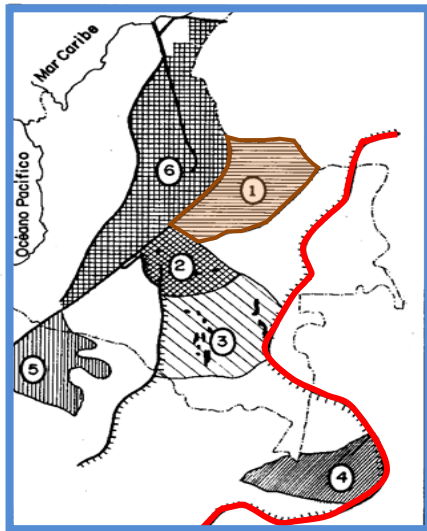
En el orden cronológico de más antiguo a reciente las unidades estratigráficas se describen de la siguiente manera:

4.4.1. Precámbrico

Las unidades más antiguas son las que corresponde a rocas cristalinas de origen Ígneo y Metamórficas, constituidas por el Complejo Migmatítico de Mitú, Granito Foliado de Ararawara, Granito Rapaquivi de Parguaza y la Sienita Nefelinita de San José del Guaviare, las cuales hacen parte del Escudo Guayanés, son rocas que han sido datadas con el basamento del precámbrico.

4.4.2. Paleozoico

El paleozoico temprano está representado por sedimentos marinos epicontinentales que constituyen formaciones relativamente débiles en espesor y poca deformación, se encuentra en discordancia con el basamento cristalino de la Cuenca.



Durante el Cámbrico – Ordovícico, una trasgresión marina y pericratónica afectó el borde occidental de la cuenca, permitiendo una sedimentación de plataforma en una depresión que formaba un corredor de dirección aproximadamente N-S **Figura 10** y que se extiende desde el Departamento de Arauca al norte hasta el Departamento Amazonas. Esta depresión estaba probablemente limitada de ambos lados por altos fondos y está actualmente cortada bruscamente al NW por la Falla de Guaicáramo. Las formaciones de la cuenca han sido agrupadas en varias formaciones y grupos de los cuales se destacan la Formación Negritos.

Figura 10. Ubicación del corredor de sedimentación en la Cuenca de Los Llanos orientales, (modificado de Baldís, 1988) 1. Fm. Negritos, 2. Gp. Guejar, 3. Fm Araracuara, 4. Fm Benjamin Constant, 5. Silúrico de Ecuador, 6. Rocas Metamórficas Caledonianas. Modificado AJC.

En la parte superior de esta secuencia estratigráfica del Paleozoico está compuesta por lutitas grises a negras literalmente calcarías depositas en un ambiente marino de plataforma somera, datada con edad devónico con base en palinomorfos y braquiópodos.

4.4.3. Triásico – Jurásico (Secuencia de Synrift)

En la cuenca de los Llanos Orientales se encuentra un registro estratigráfico referido al jurásico aun no datado, correspondiente a las Formaciones La Quinta y Girón, una de las posibles perdida de registro es que la cuenca en este periodo se encontraba en una mayor altura con respecto al occidente, por esta razón no existía la posibilidad de que se depositara formaciones como Girón, Bata, Rusia, entre otras.

4.4.4. Cretácico (Secuencia de Back Arc)

Durante todo el Cretácico, el oriente fue afectado por fenómenos tectónicos distensionales y por una subsidencia que permitió la depositación, en un ambiente bastante tranquilo, de una sedimentación marina epicontinental que alcanza unos 10.000 mt de espesor en la Cuenca de la Codillera Oriental y va disminuyendo llegando a acuñarse hacia la Cuenca de los Llanos Orientales.

Esta Megasecuencia de los Llanos presenta una pérdida de registro del Cretácico Temprano a Medio, aproximadamente a partir del Cenomaniano, la combinación entre el ascenso del nivel del mar y los eventos de subsidencia ocasionó una transgresión de orden regional que genera la depositación de las rocas siliciclásticas marinas someras, las arenas se depositaron hacia el escudo Guayanés correspondiente a la Formación Une. (Cooper *et al*, 1995).

- **4.4.4.1. Formación Une**

La formación Une muestra una transición de ambientes fluviales hacia la base a ambientes de bahía o estuarios hacia el tope, de oriente a occidente se espera una transición de ambientes continentales a ambientes parállicos.

En el Turoniano – Coniaciano Temprano el ascenso global (Haq *et al*, 1987 en Cooper *et al*, 1995) del nivel del mar combinado con up welling anóxico (Villamil y Kauf, 1993 en Cooper *et al*, 1995), depósitos lodolitas marinas, Cherts y fosfatos, que en el Piedemonte Llanero están representados por la Formación Gacheta y que se considera la más importante roca fuente en este sector.

- **4.4.4.2. Formación Gacheta**

La descripciones de corazones de los Pozo Valdivia, Almagro entre otros, del departamento del Meta reportan unidades de shales, arcillolitas y limolitas con delgadas intercalaciones arenosas; el ambiente de depositación es interpretado como una llanura mareal o planicie deltaica con una significativa influencia marina.

Posteriormente en el Coniaciano – Santoniano, sucede un descenso del nivel del mar ocasionando cambio en las condiciones anóxicas y generado la depositación de la Formación Guadalupe.

- **4.4.4.3. Formación Guadalupe**

Arenisca Cuarzosa, areniscas fosfáticas y niveles de lodolitas grises a negras. En la base del intervalo descrito, se encuentra depósitos arenosos agradacionales de canales y estuarios suprayacidos por depósitos porgradacionales de shoreface y que terminan en una superficie de inconformidad. Se reportan unos ambientes de shoreface y plataforma marina y presencia de canales estuarios.

4.4.5. Paleógeno (Secuencia Pre – Andina Temprana de ante País)

Existe aproximadamente un Hiato de 14 Ma en la zona del Piedemonte Llanero, que se puede correlacionar con la Formación Guaduas que se encuentra en la Cordillera Oriental.

“ La depositación se reinició en la zona del piedemonte llanero en el Paleoceno Tardío en respuesta a una trasgresión que tuvo influencia en la Cuenca de los Llanos. La Formación Barco es el TST (Transgressive system Track).de la Formación Cuervos, con la cual presenta un contacto transicional” (Cooper *et al*, 1995).

- **4.4.5.1. Paleoceno Formación Barco – Los Cuervos**

La diferencia entre la Formación Barco y Formación Cuervo ha sido históricamente basada en criterios litológicos, el límite entre las dos formaciones se define por el cambio de granometría de arenoso a lodoso. La Formación Barco es altamente madura, rica en areniscas y se considera un deposito estuario derivado del Escudo Guyanés, con fuerte influencia marina en el área de Cusiana” (Cooper *et al*, 1995).

Limitada a la base y al tope por superficies de inconformidad depositada en un ambiente continental fluvial de ríos meandriformes, con depósitos de canales arenoso (Pineda *et al*, 2005) lodolitas de pantanos; hacia el tope se presentan lodolitas Vari-coloreadas que se interpretan como de pósitos de llanura e inundación, (Suarez *et al*, 2005).

El contacto entre las Formaciones los Cuervos y Mirador presenta un hiato en el registro sedimentario, la depositación se reinició en el Eoceno Medio en respuesta a una trasgresión.

- **4.4.5.2. Eoceno Formación Mirador**

La Formación Mirador está compuesta por conglomerados y areniscas con delgadas intercalaciones lodosas y hacia el tope lodolitas y shale de color oscuro (Suarez *et al*, 2005). Las areniscas presentes son cuarzosas, muy friables, limpias grano fino a grueso, ocasionalmente conglomeráticas con menos porcentaje de shales y limolitas. Presenta un ambiente de depositación fluvial de corrientes entrelazadas en su parte basal y ambiente transicionales de bahías o estuarios en su parte superior.

Esta unidad corresponde al objetivo petrolífero más importante en Casanare (Areniscas depositadas en un medio fluviátil de alta energía). Posteriormente se depositó la Formación Carbonera que comprende varios ciclos de depositación en llanuras costeras con influencia marina (Cooper *et al*, 1995).

- **4.4.5.3. Oligoceno Formación Carbonera**

La formación carbonera ha sido de mucho interés en la Cuenca de los Llanos Orientales, limitada de base a tope por superficies de máxima inundación o de mayor relación MFS ver **Figura 11**, consiste en una serie alternante de areniscas, arcillolitas grises a grises verdosas, marrón, limolitas y carbones. La presencia de lentes de carbón no indica un ambiente sedimentario no marino, pero de igual manera se obtienen capas de sedimentación marina con presencia de faunas de moluscos. Por esta razón se deduce que la sedimentación transicional continental marino representado en intercalaciones de marial fino de suspensión y arenoso de arrastre.

La superficie de inundación al tope de Formación Carbonera es el evento que se identifica con mayor facilidad y confiabilidad en el área. Existe una extensión y acuñaamiento del cretáceo, Paleoceno y Eoceno que ocurre hacia el E.

Para mejorar el análisis de esta formación las diferentes empresas petrolíferas ha dividido en 8 secciones la Formación Carbonera para mejorar su estudio;

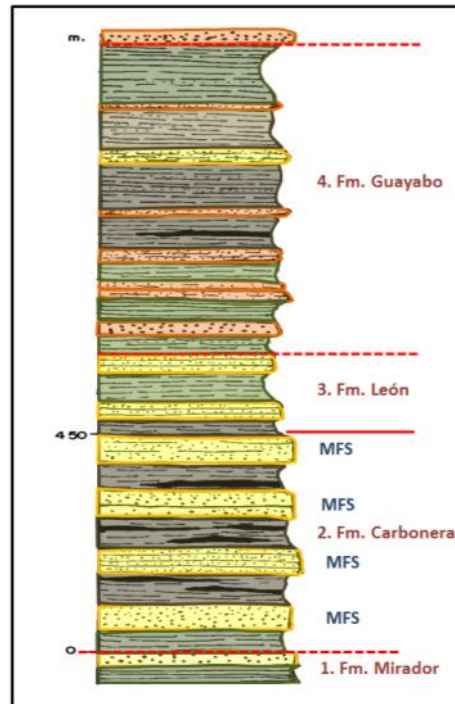


Figura 11. Columna estratigráfica simplificada de las formaciones Carbonera y León, Tomado de Evolución Geológica de Colombia – 1999 – Jean François Toussaint. Modificado AJC.

C7: Arenas Basales suprayacente del Paleozoico o Cretáceo, está comprendida de arenas masivas las cuales son un excelente reservorio de hidrocarburos en la parte oriental de la Cuenca de los Llanos.

C6, C5, C4, C3: Corresponde a una miembro intermedio compuesto de intercalaciones de lodolitas que representa ambientes lacustres de llanura de inundaciones relacionado con depósitos de lagos o complejos de crevassesplay, (Jiménez Jácome, et al, 2010).

C2, C1: Intercalación de arenas que incrementan su espesor hacia el occidente de la cuenca, depositadas en canales fluviales con intercalación de lodolitas de depósitos progradantes lacustres.

4.4.6. Secuencia del Neógeno

Este periodo comprende los primeros eventos de la Orogenia Andina en la cual se presenta la primera deformación y levantamiento de la cordillera Oriental, con el aumento global del nivel del Mar (Haq *et al*, 1987) de acuerdo con este evento se ocasiona la diferenciación de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena y la Cuenca de los Llanos Orientales y concuerda con la depositación de la formación León (Notestein *et al*, 1944).

- **4.4.6.1. Mioceno Formación León**

Esta formación corresponde a un evento de transición de marino a continental la evidencia de este ambiente es la intercalación estratigráfica de secuencias arcillosas, con arenas carbonosas, color gris verdoso (Robertson research, 1985). Predomina lodolitas de ambientes lacustres y se considera como el último pulso transgresivo del mar en la Cuenca de los Llanos, **Figura 12**. Evolución de la Cuenca según Toussaint.

Las formaciones Carbonera y León han sido también denominadas respectivamente Fm. San Fernando y Fm. Diablo por parte de algunas compañías petroleras.

- **4.4.6.2. Mioceno Formación Guayabo**

La sedimentación de la Fm. Guayabo también llamada Fm. Caja, se produce a finales del Oligoceno y durante el Mioceno inferior. Esta formación que consta de arcillolitas abigarradas, de lutitas grises y de areniscas a veces conglomeráticas y con lentes de lignito, es discordante sobre la Fm. León del principio del Oligoceno superior. Su espesor alcanza 1200 m. en el borde W de los Llanos Orientales. Esta discordancia del Oligoceno tardío marca los principales movimientos de la orogenia andina en esta región.

La Fm. Guayabo se deposita también en la Cuenca del Catatumbo pero allí no parece presentarse discordancia a su base. La litología es a su vez más arcillolítica y su espesor menor.

En la Cuenca de los Llanos Orientales y en la Cuenca del Catatumbo, el Plioceno está representado por la Fm. Necesidad.

- **4.4.6.3. Plioceno Formación Necesidad**

Esta formación está constituida por conglomerados, arenisca desde gruesa hasta fina y arcillas rojas de que indican ambiente de depositación continentales, se encuentra en discordancia sobre la Fm. Guayabo, el espesor es generalmente débil alcanza un máximo de unos 200 mt. Esta formación está recubierta por depósitos aluviales recientes. Depósitos de arenas eólicas se presentan en particular en Guaina, Vaupés y Amazonas.

De manera conjunta la Cuenca presenta depositación del cuaternario y de intervalo arenoso que permite evidenciar que su proceso de evolución terminando en un margen continental limitado con algunos ríos meandriformes que aun en la actualidad se encuentran en la Cuenca.

EDAD		FORMACION	COLUMNA	DESCRIPCIÓN	
NEÓGENO	PLIOCENO	NECESIDAD		Deposición de sedimentos en un ambiente fluvial posterior a la cuenca ante-país	
	MIOCENO	GUAYABO			
		LEÓN			
PALEÓGENO	OLIGOCENO	CARBONERA C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8		Durante este periodo se genera nuevamente una cuenca ante-País en el valle del Magdalena y Los Llanos Orientales sin embargo para esta edad en el sitio actual de la cordillera oriental existen elementos positivos que impiden una comunicación directa entre la cuenca de los Llanos Orientales y valle Medio del Magdalena.	
				Corresponde al periodo de erosión en el área de los Llanos Orientales el material enroscado fue transportado hacia el norte y corresponde a la Fm. Mirador y Misoa C y B de la cuenca de Maracaibo.	
	EOCENO		MIRADOR		
PALEOCENO	CUERVOS BARCO			Se presenta la Orogenia Pre-Andina en la cual se produce el choque del Arco volcánico de la Cordillera Occidental con la Cordillera Central y la creación de una nueva cuenca de ante-país ubicada en el valle del Magdalena y los Llanos Orientales	
CRETÁCICO	TARDÍO		K3	GUADALUPE	
			K2	GACHETÁ	
			K1		
	MEDIO Y TEMPRANO		UNE / UBAQUE	Corresponde a una segunda Fase de Rift, continuación de la secuencia del rift.	
TRIÁSICO / JURÁSICO				Corresponde a una cuenca tipo Rift con una subsidencia tectónica, de tras de arco Volcánico localizado en la presente cordillera Oriental.	
PALEOZOICO		PÉRMICO-CARBONIFERO			
		DEVÓNICO			
		SILÚRICO			
		ORDOVÍCIO			
		CÁMBRICO		Culmina la Orogenia Herciniana	
PRECÁMBRICO		EDIACARA		Culmina la Orogenia Caledoniana	

Figura 12. Columna estratigráfica regional con la Evolución Geológica de Cuenca de los Llanos Orientales – 1999 – Jean François Toussaint. Modificado AJC.

5. MARCO TEORICO

5.1. SISMICA: ADQUISICION Y PROCESAMIENTO

Una adquisición sísmica consiste producir datos por medio de una onda acústica, utilizados y procesados con el fin de obtener un corte vertical a profundidad de un área determinada.

Este proceso consiste en generar una onda, por medio de una fuente ya sea dinamita, vibradores o pistola de aire comprimido, esta onda pasa en profundidad a través de formaciones, la onda se comporta de diferente manera dependiendo de la litología que está atravesando, parte de esta energía regresa a superficie debido a la refracción o reflexión proveniente de las superficie a profundidad. **Ver Figura 13.**

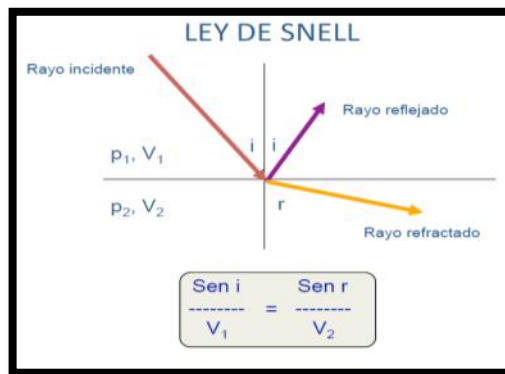


Figura 13. Imagen ilustrativa de la ley de Snell.

La Ley de SNELL es el principio mas utilizado en este metodo ayuda a calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de índice de refracción distinto. La ley dice que el producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia es constante para cualquier rayo de luz que incide sobre la superficie separatriz de dos medios. Aunque la ley de Snell

fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz, es aplicable a todo tipo de ondas que atraviesan una superficie de separación, entre dos medios en los que la velocidad de propagación de la onda varía.

Por esta razón este método varía dependiendo a muchos factores geológicos, tales como objetivos, la accesibilidad de la zona, la tierra o medio ambiente marino y de superficies con obstrucciones.

5.1.1. Sísmica De Reflexión

Cuando una fuente emite una señal a través del subsuelo, parte de esta energía es reflejada en la interfaz de cada cambio litológico, volviendo a la superficie donde es captada por un receptor, el cual registra dicho cambio de energía como ondas con amplitudes que varían de acuerdo al tiempo, estos datos son procesados y convertidos en imágenes de reflectores. Esta imágenes son dadas en tiempo y es muy difícil convertidas a profundidad a menos que se conozca con certeza la velocidad de propagación en cada una de sus capas. **Ver Imagen 14.**

Este es un método excelente para poder recolectar datos detallados de los cambios litoestratigráfico del subsuelo, para el estudio de las estructuras geológicas de interés, en un sistema petrolífero, que se encuentra a gran profundidad.

5.1.2. Sísmica de Refracción

Seria indicado precisar el término de Refracción antes de exponer este método. La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de la velocidad de propagación de la onda (Bello. G, 2006).

La sismica de refracción es la técnica geofísica basada en la refracción de las ondas sísmicas en las capas del subsuelo, para la caracterización de las condiciones geológicas del mismo. Este método consiste en el hecho de que las ondas sísmicas varían su velocidad de propagación dependiendo del tipo de roca que conforma el medio, es por esto que en el cambio litológico, esta onda sufre una refracción, permitiendo de esta manera determinar qué tipo de material es en el cual viaja y la profundidad aproximada en la que se encuentra.

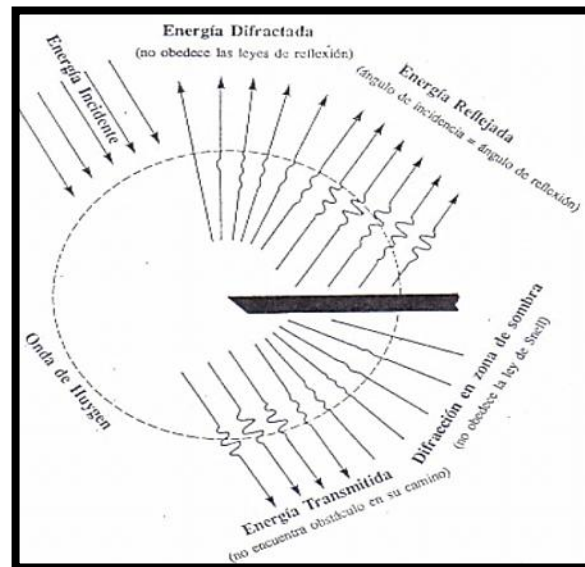


Figura 14. Procesos de Reflexión y Refracción Sísmica. Se observa el proceso esquemático del comportamiento de una onda al conseguir un obstáculo. (Tomado de Regueiro, 2007).

5.1.3. Impedancia Acústica

La impedancia acústica es la resistencia que oponen los estratos del subsuelo a las ondas que se propagan a través de los mismos. Está definido como el producto entre la densidad del medio de propagación y la velocidad de la onda P.

$$AI = \rho * Vp$$

Ecuación 1 Impedancia Acústica

Dónde:

AI: Impedancia Acústica.

ρ : Densidad del Medio

Vp: Velocidad de la Onda P

La importancia de la impedancia acústica es que permite la determinación de los coeficientes de reflexión, los cuales describen la amplitud (o la intensidad) de una onda reflejada respecto a la onda incidente, en la interfaz del material que poseen diferentes impedancias acústicas.

5.1.4. Serie de Reflectividad

Considerando un modelo geológico constituido por estratos horizontales homogéneos y onda que incide perpendicularmente (incidencia normal) a las interfaces entre dichos estratos, es posible dar una descripción muy simplificada de las ondas reflejadas por las interfaces (Reflectores Sísmicos) en términos de coeficientes de reflexión y transmisión. En efecto, de acuerdo al modelo simplificado, cada capa es homogénea y la propagación de ondas es vertical, en consecuencia, en cada capa las ondas acústicas deben obedecer a la ecuación:

$$\partial_z^2 u - \frac{\partial_t^2 u}{C_i^2} = 0$$

Ecuación 2 Ecuación de Onda en un medio homogéneo.

Dónde:

Ci: Velocidad de propagación en cada capa.

Z: Profundidad

De acuerdo al modelo utilizado, en cada capa las ondas se propagan sin deformarse y en cada interface generan una onda reflejada primaria y una onda transmitida, cuyas amplitudes se calculan como el producto de la amplitud incidente por el coeficiente de reflexión o transmisión correspondiente.

5.1.5. Ondícula sísmica

La ondícula es una herramienta matemáticas moderna de aplicación en el tratamiento de las señales. Se define como un pulso sísmico que consiste usualmente de pocos ciclos (Sheriff, 2002) y representa la forma de la reflexión en el dominio de un reflector positivo en el caso de incidencia normal. La ondícula depende directamente de dos parámetros: frecuencia y tiempo como se puede apreciar en la **Figura 15**, está definida por su espectro de amplitud y su espectro de fase (amplitud vs frecuencia y fase vs frecuencia, respectivamente). Entre las ondículas más usadas están: la ondícula la Ricker o fase cero y la ondícula fase mínima.

5.1.5.1. Ondícula de Ricker o Fase Cero

La ondícula sísmica es un pulso unidimensional que representa la forma de la reflexión en el dominio del tiempo de un reflector en el caso de la incidencia normal. La ondícula está definida por un espectro de amplitud (amplitud vs frecuencia) y su espectro de fase (fase vs frecuencia) (Bernaez. A, 2010).

La ondícula de Ricker o de fase cero es una ondícula simétrica y como su nombre lo indica, es fase cero, es decir, que su pico está ubicado en el cero. Es la segunda derivada normalizada de la función gaussiana y es la más usada en los casos de los modelos sísmicos.

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3\sigma\pi^{\frac{1}{4}}}} \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}}$$

Ecuación 5 Ecuación de Ricker.

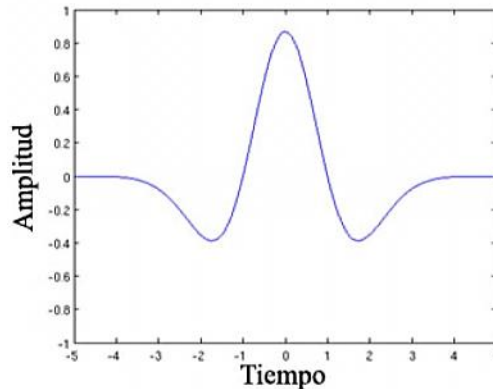


Figura 15. Ondícula ricker o Fase Cero.

Esta Ondícula representa las siguientes ventajas:

- La máxima amplitud ocurre en el centro de la ondícula y por lo tanto coincide con la interface que causa la reflexión.
- Un horizonte que haya sido interpretado en el centro de la ondícula coincide en tiempo con el tiempo de viaje a la interface del subsuelo que causa la reflexión.
- La resolución es mejor al compararlas con otras ondículas con el mismo contenido de frecuencia.
- Es bastante aguda (Semejante a un pulso) debido a que sus lóbulos laterales han sido minimizados.

5.1.5.2. Ondícula Fase mínima

Son generadas en su mayoría por explosivos y concentra su energía al comienzo y después se atenúan, pero a diferencia de la fase cero no es simétrica.

5.1.6. Modelo de Convulación de traza sísmica

Para la definición del modelo de Convulación Ver **Ecuación 6**, es necesario entender el término, el cual consiste en un operador matemático que transforma

dos funciones en una tercera función que en cierto sentido representa la magnitud en la que se superponen f y una versión trasladada e invertida de g .

Este modelo más sencillo utilizado para representar la traza sísmica es el modelo convolucional, el cual está definido por la Convolución de la serie de Reflectividad con una ondícula más una componente de ruido.

Para poder realizar una campaña de adquisición sísmica 2D o 3D, se tiene que organizar 3 etapas que cumplan un objetivo específico y que se desarrollan en un tiempo determinado para no generar problemas con licencia y permisos ambientales en los bloques.

$$S(t) = w(t) * R(t) + \text{Ruido}$$

Ecuación 6 Expresión matemática del modelo convolucional de la traza sísmica.

Dónde:

S (t): Traza Sísmica.

W (t): Ondícula sísmica.

R (t): Serie de Reflectividad.

Este proceso de Convolución, comprende la serie de Reflectividad compuesta por funciones deltas, se puede interpretar como la superposición de ondículas ubicadas en cada uno de los reflectores, escaladas por los valores de los coeficientes de reflexión correspondientes ver esto en la **Figura 16**.

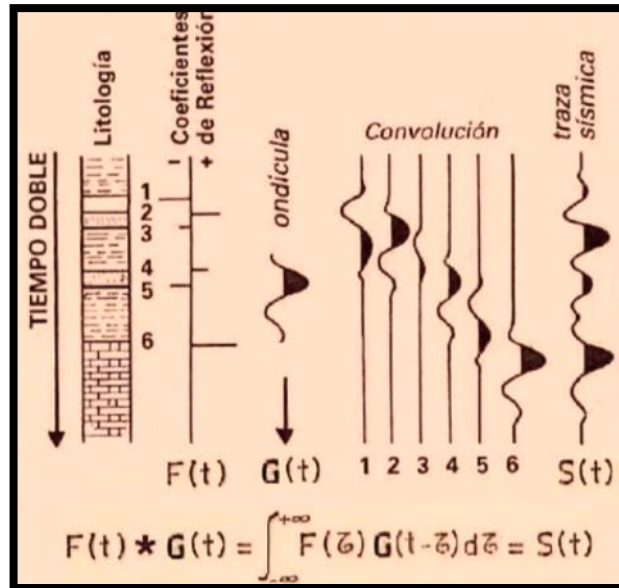


Figura 16. Modelo de convolucional junto con una traza sísmica.

5.1.7. Sismograma Sintético

El estudio de sismogramas sintéticos en compañía de otras herramientas de pozo permite determinar las relaciones existentes entre la litoestratigrafía de un sondeo y la respuesta sísmica que ella genera, hasta el punto de poder establecer dentro de una traza sintética el origen y significado geológico de las reflexiones que la constituyen. Este control sirve de criterio para determinar el horizonte más adecuado a la interpretación sísmica – geológica.

5.1.7.1. Fundamento Teórico

Los sismogramas sintéticos reproducen a partir de datos de un sondeo, la imagen en forma de traza sintética, de la vertical sísmica sobre la que está situado el pozo. Se dispone de una correlación entre atributos puramente geológicos (litologías, estratigrafía, porosidad) y parámetros geofísicos, tales como reflexiones sísmicas, amplitudes, frecuencias, etc.

El nexo de unión entre ambos tipos de parámetros son los llamados coeficientes de reflexión (R_c , que nos dan la relación de amplitudes entre dos medios sobre los que incide un rayo perpendicular) definidos según la ecuación fundamental y/o su forma simplificada cuando la densidades son parecidas (Gardner *et al.*, 1974) que se muestran en la **Figura 17** donde V_1 y V_2 representa las velocidades de propagación a través de los medios de densidades ρ_1 y ρ_2 . El producto de las velocidades de propagación de un medio por la densidad del mismo, es lo que se denomina impedancia acústica (**I**).

Estos coeficientes (R_c) se pueden calcular a partir de dos diagramas de pozo, Sónico y Densidad, que tras ser asociados a una ondícula (Convolución), se transforma en valores de amplitud, que definirán la traza sísmica.

5.1.7.2. Significado geológico

Los intervalos geológicos homogéneos poseen un carácter sísmico continuo, por lo que en ocasiones y apoyándose en el resto de los registros del pozo, se puede aislar (**Facies sísmicas**) en conjuntos de ondícula con una expresiva continuidad y asociarlas directamente con los intervalos geológicos que representa. Para establecer estos tramos homogéneos se debe, en ocasiones, valorar la importancia de reflectores aislados que rompan localmente la monotonía.

En muchas ocasiones, las variaciones realmente significativas pueden pasar desapercibidas si estas están expresadas por ondículas blancas (El color de la ondícula viene determinado por la polaridad escogida: se habla de polaridad (Normal) cuando los aumentos en la velocidad de propagación vienen representados por ondículas negras y de polaridad invertida si ocurre lo contrario).

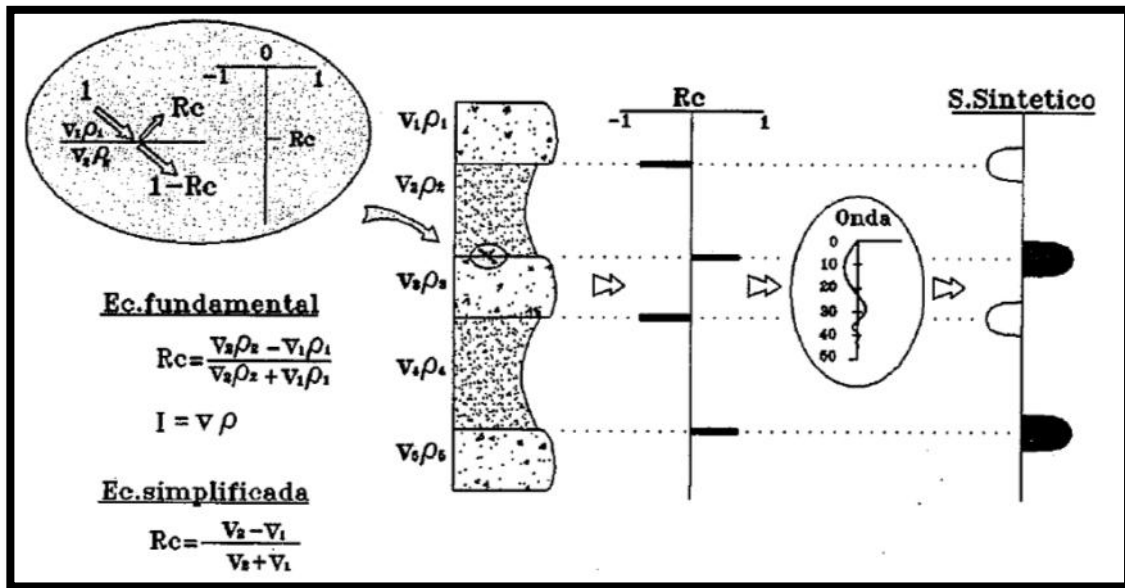


Figura 17. Tomado de *Geological interpretation of synthetic seismograms. An applied example to the Rio Segura G-1 well, W.I. Martínez Cabañas, 1996.* Generación de un sismograma sintético.

5.1.8. Resolución sísmica

La resolución vertical de un registro sísmico puede definirse como la menor distancia vertical (espesor) entre dos interfaces litológicas que produce dos reflexiones discretas, las cuales pueden separarse visualmente. Esta definición se traduce, en el menor espesor para el cual el tiempo de viaje de la onda proporciona información acerca de los espesores de los estratos en el subsuelo.

El límite de resolución depende del mínimo espesor que la sísmica puede ver, expresado cuantitativamente en el parámetro $\frac{\lambda}{4}$ y está relacionada con otros dos parámetros: la velocidad de propagación (Componente Geológico) y el contenido de frecuencia o ancho de banda de la ondícula (Componente Sísmico).

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

Ecuación 7 Relación entre la longitud de onda, la velocidad y la frecuencia

Dónde:

λ : **Longitud de onda**

V : **Velocidad intervállica de los estratos**

F : **Frecuencia (Análisis de Fourier)**

5.1.9. Velocidad Sísmica

La velocidad sísmica es una cantidad definida por la rapidez de propagación de una onda sísmica (Regueiro, 2007). Sabemos que existen dos tipos de ondas: las P y las S y que estas se propagan con velocidad α y β respectivamente.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

Ecuación 8 Velocidad de propagación en un medio homogéneo de la onda P

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Ecuación 9 Velocidad de propagación en un medio homogéneo de la onda S

Esta velocidad sísmica es medida en las rocas del subsuelo mediante una herramienta conocida como el registro sísmico y es calculada dividiendo las distancias que separa cada pulso acústico entre la diferencia de tipo de tránsito de los mismos grabados por los receptores. Según Regueiro, 2007. La velocidad sísmica se clasifica en:

- **Velocidad intrínseca:** es una propiedad física de materiales puros como densidad, permeabilidad y porosidad.
- **Velocidad intervállica:** Está asociada con la litología, definida como la rapidez con que se propaga las ondas dentro de estratos o formaciones definidas y es calculada con el registro sísmico.

- **Velocidad promedio:** es el promedio de las velocidades interválicas, medidos desde la superficie, de varias formaciones o litologías. Estas velocidades se obtienen de los registros conocidos como cCheckshots y es la que se utiliza para llevar los tiempos de reflexión a profundidad.
- **Velocidad de apilamiento:** Es la velocidad en función del ángulo que conforma el frente de onda con la superficie sobre la que se encuentran los detectores.
- **Velocidad aparente:** Es la velocidad en función del ángulo que conforma el frente de onda con la superficie sobre la que se encuentran los detectores.
- **Velocidad RMS (Raíz Cuadrática Media):** Esta velocidad, es puramente matemática, se obtiene de un promedio ponderado de los cuadrados de las velocidades interválica y tiene aplicación cuando se trata de estimar velocidades promedio a partir de las velocidades del procesamiento.

5.2. PARAMETROS PETROFISICOS

La medición de los parámetros y la interpretación de los registros petrofísicos son fundamentales para la evolución y elaboración de un perfilaje geofísico, que a su vez tiene como objetivo principal, ampliar la medición del sondaje, mediante la medición in situ de los parámetros físicos de las formaciones, para así elaborar una correlación entre los sondajes de las áreas de especial interés, ya que cada uno de estos sugiere ciertas características o propiedades del subsuelo, permitiendo en muchos casos definir claramente la interfaces y las características físicas de las formaciones atravesadas.

A su vez estas características pueden brindar información indirecta y cuantitativa sobre aspectos específicos de interés en una exploración, tales como porosidad, contenido de agua, salinidad del agua, presencia de hidrocarburos o elementos radioactivos, etc.

Por lo tanto, deben ser interpretados en conjunto, para poder elaborar un análisis completo y detallado que facilite la caracterización de un yacimiento.

5.2.1. Registro de Densidad

Los registros de densidad se usan principalmente para las mediciones de porosidad, pero también para la identificación de depósitos de evaporitas, evaluación de arenas arcillosas y detección de gas, entre otros.

Estos registros contienen la información de la *Densidad total* de las formaciones y hace uso de la respuesta de la materia ante el bombardeo de rayos gamma, en particular del efecto Compton, que se define como el aumento de la longitud onda de un fotón de rayos X cuando choca con un electrón libre y pierde parte de su energía, el rayo gamma disperso posee menor energía que el rayo original (transferencia de energía durante la colisión).

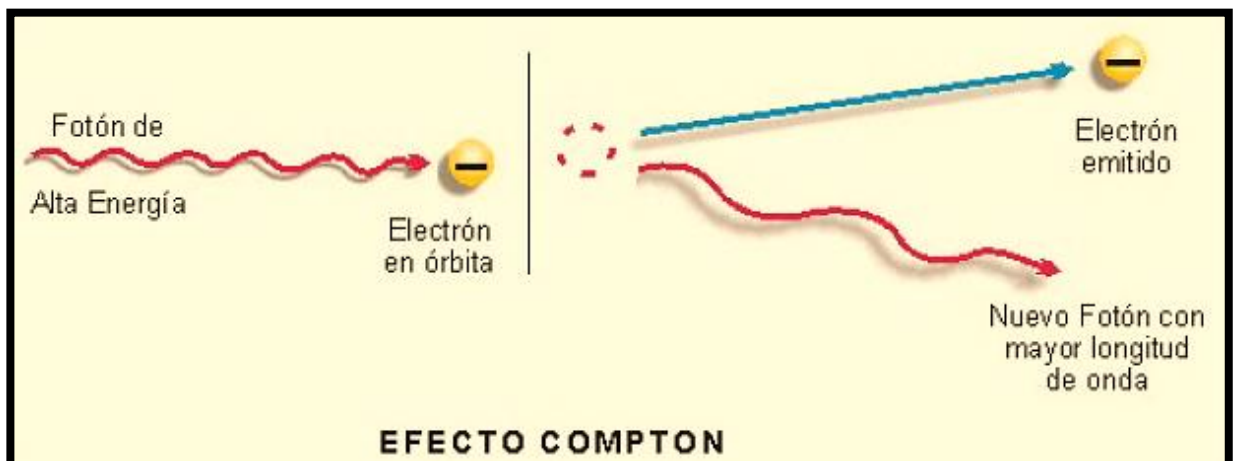


Figura 18. Efecto Compton. Tomado de:
(http://www.didactika.com/fisica/fisica_moderna/fisica_moderna_efecto_compton.html)

Mientras más colisiones mayor es la pérdida de energía. El rayo finalmente es absorbido por un electrón (Efecto Fotoeléctrico).

Finalmente, los valores de densidad serán directamente proporcionales al número de electrones y al número de átomos, de manera que en presencia de más electrones, se producirán más colisiones, así, a mayor densidad habrá mayor dispersión, por lo que la penetración de los rayos gamma será menor al aumentar la densidad del medio.

5.2.2. Registro Sónico

En su forma más sencilla, una herramienta sónica comprende de un transmisor que se encarga de emitir impulsos sónicos y un receptor que capta y registra los impulsos. El registro sónico es simplemente un registro en función del tiempo, que requiere una onda sonora para atravesar un pie de formación.

Esto es conocido como tiempo de tránsito, Δt , t , es el inverso de la velocidad de la onda sonora. El tiempo de tránsito para una formación determinada depende de su litología, esta depende de la porosidad, haciendo que el registro sónico sea muy útil como registro de porosidad. Los tiempos de tránsito sónicos integrados también son útiles al interpretar registros.

El principio consiste en la propagación del sonido en un pozo, está regido por las propiedades mecánicas de ambientes acústicos diferentes. Estos incluyen la formación, la columna de fluido del pozo y la misma herramienta del registro. El sonido emitido del transmisor choca contra las paredes del agujero. Esto establece ondas de compresión y de cizallamiento dentro de la formación, ondas de superficie a lo largo de la pared del agujero y ondas dirigidas dentro de la columna de fluido.

Una de las ecuaciones utilizadas con mayor frecuencia para establecer una relación entre la porosidad y el tiempo de tránsito de la onda, es la ecuación de

Wyllie del tiempo promedio, definida para formaciones consolidadas y limpias, con poros pequeños y muy bien distribuidos.

$$tp = tf\phi + tm (1 - \phi)$$

Ecuación 10 *Tiempo promedio en función de la Lentitud*

$$\phi = \frac{tp - tm}{tf - tm}$$

Ecuación 11 *Porosidad en función de la lentitud*

Dónde:

Tp = Lentitud de la Onda P.

Tf = Lentitudes de la formación

Tm = Lentitud de la matriz

φ = Porosidad

5.3. ATRIBUTOS SISMICOS

Un atributo sísmico se define como cualquier medida de datos sísmicos que pueda ayudar a mejorar la cuantificación visual o forma de interés interpretativos. Usando diferentes operaciones matemáticas aplicadas a las trazas sísmicas, lo cual no implica que todos los atributos tengan una explicación física.

Un buen atributo sísmico puede ser directamente sensible a las formas geológicas o a las propiedades del yacimiento, puede permitir definir el ambiente de deposición o estructural y así poder inferir sobre las estructuras o propiedades de interés. Un atributo es una consecuencia de una medida sísmica. Los atributos disponibles no son independientes uno del otro, simplemente son diferentes vías de presentar y estudiar una cantidad limitada de información básica. El objetivo principal de los atributos es proporcionar información precisa y detallada de los parámetros estructurales, estratigráficos y litológicos del prospecto sísmico (Marfurt y Chopra, 2007).

En gran escala un atributo sísmico se refiere a cualquier cantidad derivada de datos sísmicos de esta forma, se incluyen como atributos cantidad como, la velocidad intervállica, inversión para, impedancia acústica, predicción de presión, porosidad, determinación de reflectores, atributos de traza compleja, AVO y descomposición espectral.

Aunque son de gran ayuda y ampliamente utilizados, hay que tener en cuenta que estos atributos, que derivan de cálculos sofisticados, de alguna manera esta contaminados o asociados con errores y por ello es de suma importancia la calibración de los mismos con datos de pozos u otras técnicas de integración (Marfurt y Chopra, 2007).

En la fase exploratorio, durante la interpretación, se pueden desarrollar nuevas hipótesis sobre modelos geológicos o simplemente requerir la verificación de algunos ya existentes; es por ello que, los atributos actúan como herramientas que brindan una guía al interprete para observar el dato desde puntos de vistas diferentes asociando la respuesta física – Matemática del atributo con características estratigráficas, geológicas, petrofísicas y geomorfológicas, de manera que se pueda confirmar o desechar las hipótesis.

5.3.1. Clasificación De Atributos Sísmicos

Los atributos sísmicos pueden ser clasificados desde data pre-apilada o post-apilada, antes o después de la migración en tiempo. El procedimiento es el mismo en todos los casos. Los atributos pueden clasificarse en muchas maneras diferentes, muchos han dado sus propias clasificaciones, sin embargo a continuación se presenta una clasificación basada en las características de dominio de los atributos por TurhanTaner. M. en el 2001.

5.3.1.1. Atributo Pre-Apilamiento: Los datos entrantes son de los CDP (Common Depth Point) o de las imágenes de los *Gathers*, estos muestran información relativa direccional (Azimuth) y del offset. Este tipo de cálculo genera cantidades enormes de datos, por lo que no son recomendables para estudios iniciales. Sin embargo, contienen considerables cantidades de información que pueden ser relacionadas directamente con contenidos de fluidos y orientaciones de las fracturas.

5.3.1.2. Atributos Post-Apilamiento: el apilamiento es un proceso que promedia los registros obtenidos a partir de la información de varios disparos, el cual elimina toda información referente al offset y azimuth. Los datos de entrada pueden ser de los CDP apilados o migrados. Se sabe que la migración en tiempo mantiene la relación de tiempo, por lo tanto, variables temporales como frecuencias también mantendrán sus dimensiones físicas. Los atributos post-apilamiento están enfocados en la observación de grandes cantidades de datos.

Los atributos también pueden clasificarse por sus características computacionales (TurhanTaner, M. 2001):

5.3.1.3. Atributos Instantáneos: Representa la variación instantánea de varios parámetros y son calculados muestra por muestra.

5.3.1.4. Atributos Físicos: Los atributos físicos están relacionados con las cualidades y cantidades físicas. Las magnitudes de la traza envolvente es proporcional al contraste de impedancia acústica, las frecuencias se relacionan con el grosor de los estratos, la dispersión y adsorción de la onda, las velocidades instantáneas y *average* están directamente relacionadas con las propiedades de las rocas. Consecuentemente, estos atributos son usados mayormente para la clasificación litológica y caracterización de reservorios.

5.3.1.5. Atributos Geométricos: Los atributos geométricos describen las relaciones temporales y espaciales de todos los otros atributos. La continuidad lateral medida por semblanza es un buen indicador de las similitudes entre los estratos, así como también de discontinuidades. Son importantes también en el uso de la interpretación estratigráfica desde que gracias a estos, se puede definir las características de un evento y sus relaciones espaciales y puede ser usado para cuantificar peculiaridades que ayudan directamente a reconocer los patrones de depositación y litológicos familiares.

5.3.2. Coherencia Sísmica

Llamados también cubos de coherencia o semblanza, fueron ideados por (Bahorich y Farmer en 1996). Solos son posibles en sísmica 3D, como resultado de la aplicación de un algoritmo de estimación de similitud entre trazas sucesivas, mediante una ventana temporal fija, para finalmente obtener un volumen sísmico en el que podemos desplegar las secciones horizontales a fin de visualizar las variaciones laterales producidas por rasgos estructurales o a veces también estratigráficos.

Las magnitudes estadísticas más comunes calculadas para su construcción son la varianza y la semblanza. La Varianza es la medida del ancho de la probabilidad de distribución de una variable muestreada al azar, mientras que la covarianza involucra más de una variable y resulta de hacer el cuadrado de la desviación Normal o Standard (Chelotti, L. Acosta, N. y Foster, M. 2010).

Como se explicó anteriormente una onda sísmica es el resultado de la convolución de una ondícula sísmica con la geología del subsuelo. Esta respuesta cambia en términos de amplitudes, frecuencias y fase dependiendo de los contrastes de impedancia acústica y el espesor de las capas sobre y debajo de un límite refractivo. El atributo de coherencia mide estos cambios entre trazas vecinas de forma tal que determina que tan coherente o no es el evento. Geológicamente, alta

coherencia sísmica de las ondas indican continuidad lateral de litologías, por otra parte cambios abruptos en la forma de onda indicarían fallas o fracturas en los sedimentos (Marfurt y Chopra, 2007).

La presentación más habitual es la de blanco (buena continuidad), grises (Regular) y negro (Discontinuidades), aunque puede recurrirse a diversas escalas cromáticas.

6. EVALUACION DEL BLOQUE CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA

6.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL BLOQUE

El bloque hace parte de las actividades de exploración que realiza la empresa Pacific Rubiales Energy, el cual cuenta con un acuerdo de confidencialidad por parte de la empresa y sus socios.

El bloque se encuentra ubicado en la Cuenca de Los Llanos Orientales en el dominio Estructural Casanare, en la parte del Foreland de la cuenca, limitado hacia el oeste por el cinturón plegado de los Andes y por el Oriente por el Escudo Pre-Cámbrico de Guyana. Los límites Norte y Sur de la cuenca están definidos por los Arcos de Arauca y Vaupés respectivamente. Específicamente en la parte Centro-Oriental de la Subcuenca de Casanare.

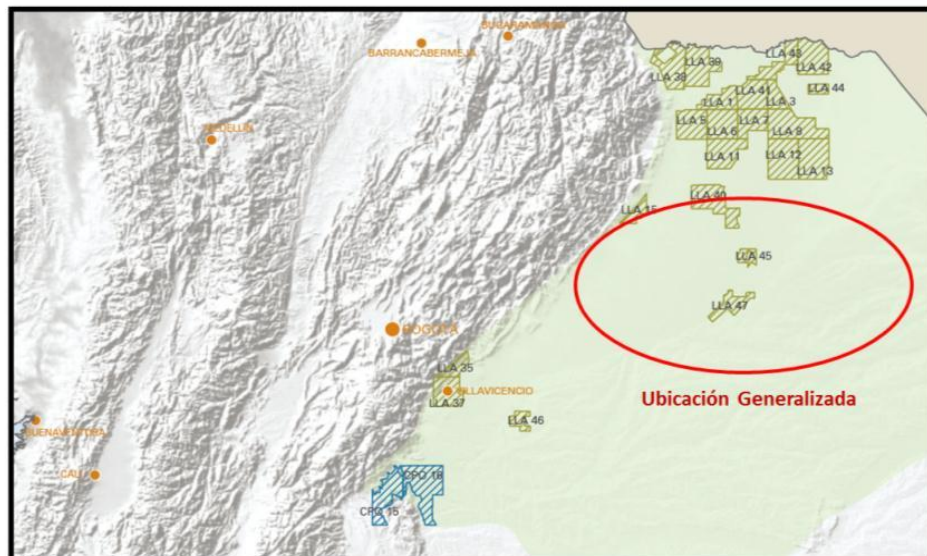


Figura 19. Figura tomada de la Ronda ANH, 2010 con los bloques puestos para la ronda, ubicación generalizada del bloque a evaluar.

6.2. MODELO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL BLOQUE 26

Las estructuras locales que forman trampas para los hidrocarburos, se desarrollan a lo largo de lineamientos reactivados del basamento (Con evidencia de fallas strike slip). Los cierres críticos o spillpoint y el salto de la falla, proporcional al espesor del reservorio, definen la extensión real y la columna de hidrocarburos en los campos vecinos actualmente en exploración.

Las fallas son el control primario en la extensión de los campos. Todos los campos de Casanare están limitados por una falla. Los saltos o rechazos de las fallas de este bloque y específicamente en la zona de interés son del orden de 20 a 100 pies, permitiendo una yuxtaposición parcial de arenas altamente permeables con arcillas (caso presente de la Unidad C7 contra las Arcillas del C6)

6.3. SISTEMA PETROLERO

Zonas de debilidad pre-existentes en el basamento, ejercen una fuerte influencia en la creación de nuevas estructuras durante el evento Andino (Mioceno Tardío) en el área del bloque 26. El mapa de basamento muestra que existen la reactivación de las estructuras con rotación y generación de fallas 'en Echelon'.

La secuencia estratigráfica local está representada por rocas del precámbrico, paleozoico Inferior, Cretácico Superior y el Terciario. Presenta las equivalentes facies sísmicas como Intra-Paleozoico, Near Guadalupe, Near C7, C5, C1.

La mayoría del petróleo descubierto ha sido generado por las roca madre de la Formación Gacheta y terciario basal, pero enterradas a gran profundidad, lo que indica que la zona principal de generación de aceite (Oil Kitchen) se encuentra localizada en la parte occidental, profunda de la cuenca situada en el dominio de los Foothills y bajo la cordillera.

6.3.1. Roca Generadora

En el bloque, la litología consiste en lutitas grises oscuras, fisiles, duras, compactas a veces moscovíticas y piritosas, con intercalaciones de arenisca blanca a gris claro, de grano fino, subangular a subredondeado, con selección media a buena, con matriz arcillosa, cemento silíceo, a veces calcáreo, con trazas de glauconita y de carbón, Formación Gacheta.

El espesor de esta formación en el área, es del orden de 200', mientras que en la parte profunda de la cuenca puede alcanzar 450'. Hacia el Oeste el espesor aumenta y la parte lutítica se desarrolla en detrimento de la arenisca; hacia el este, sucede lo contrario; esta formación se extiende en toda la cuenca de los Llanos y por consiguiente en el área de los campos que se desean explorar.

La edad de la Formación Gacheta es Cretáceo superior, posiblemente del Coniaciano tardío. Su equivalente en la Cordillera Oriental parece ser la Formación Chipaqué. Es probable también que se hayan originado hidrocarburos a partir de sedimentos terciarios, Formación Carbonera zona profunda de la cuenca bajo circunstancias similares a las prevalecientes en el cretáceo.

Hacia el borde oriental de la Cuenca de los Llanos, donde los depósitos Terciarios traslapan rocas Cretácicas, es factible que parte del petróleo haya migrado. Parte de los hidrocarburos pudieron acumularse en trampas estratigráficas y en trampas estructurales asociadas con solevantamientos intra-cretáceos y del Terciarios Inferior.

Según lo expuesto, el aceite que pudo haberse originado, se acumuló con anterioridad a los movimientos orogénicos del terciario tardío. El desarrollo de

estructuras relacionadas con estos movimientos, constituye buenas trampas que involucran a la vez acumulaciones que se ajustaron a las nuevas condiciones estructurales.

Se ha demostrado extensamente por medio de modelamientos, que el primer pulso de expulsión comenzó desde el cretáceo (Formación Gacheta y Areniscas Inferiores), dentro de la cordillera hace 25 millones de años. La migración avanzó hacia el oriente a partir del frente llanero (Bajo la Cordillera). Los estudios estructurales han demostrado que las estructuras pre-Oligocenas (Laramida) podrían haber entrampado los aceites migrados. El bloque estudiado se encuentra precisamente sobre esta vía de migración del aceite.

6.3.2. Roca Almacenadoras en el Bloque

El principal reservorio de la cuenca lo constituyen las areniscas continentales de la Formación Mirador y las Areniscas de la Formación Barco y Carbonera con porosidades de hasta 20%. Otro reservorio importante se encuentra en las areniscas de la Formación Guadalupe.

En este bloque específicamente, las principales rocas almacenadoras son las unidades C3, C7, y C4 de la Formación Carbonera.

6.3.2.1. Carbonera C3

Es una formación limo-arenosa compuesta por limolitas carmelito a gris claro, arcillosa, micro-micácea y carbonosa que pasa gradualmente a arcillas grises. En la mitad inferior se encuentran intercalaciones de areniscas, en tres cuerpos principales como; la arenisca es blanca a gris claro, de grano fino, arcillosa, carbonosa, subangular, bien calibrada.

Su espesor en el área del estudio es del orden 120´, mientras que en la parte profunda de la cuenca puede alcanzar 250´. Se encuentra en toda la cuenca con

tendencia hacia el este, la correlación con los demás pozos de la cuenca es buena. La edad de Carbonera C3, es Oligoceno Tardío.

6.3.2.2. Carbonera C4-C5

Se trata de una formación esencialmente limosa pero que en algunas partes de la cuenca, sector oriental presenta desarrollos arenosos. Las limolitas son gris claro, carmelita claro a crema, más o menos solubles, micropiritosa carbonosas, gradando DE arenisca muy fina.

La arenisca situada en la parte superior de la formación es de color carmelita clara a transparente, de grano muy fino, subredondeada, bien calibrada, con cemento calcáreo no muy abundante, microcarbonosa, a veces con matriz caolinita. Lateralmente puede desaparecer por cambio de facies. El espesor de la formación en el área del Bloque y vecindades es del orden de 130', pero puede alcanzar 300' en la parte profunda de la cuenca, su extensión es regional y correlaciona bien entre los diferentes pozos.

6.3.2.3. Carbonera C7

Esta formación es esencialmente detrítica y masiva, está compuesta por arenisca de grano fino a grueso, localmente muy grueso, friable, cuarzo translucido a hialino, angular a subangular, con sorteamiento pobre a medio. En la parte superior las intercalaciones de arcillas grises son más frecuentes que en el resto de la formación. La matriz arcillosa es escasa y el cemento pobre, por lo cual se considera como arena limpia.

Su espesor en el área del estudio es del orden de 320' mientras que en la parte profunda de la cuenca el espesor puede llegar a 370'. La correlación entre pozos es aceptable pues existe buena continuidad, sin embargo en dirección del Oeste, las facies van cambiando y de un ambiente predominantemente continental al este, van pasando a facies de ambientes marino somero, con un incremento en

arcillas y desaparición de los reservorios: por este motivo, la formación no es productora en la parte profunda de la cuenca. Carbonera, Unidad C7 es de edad Eocena Tardía.

6.3.3. Migración

Actualmente se consideran dos pulsos de migración, uno durante el Eoceno tardío -Oligoceno (Orogenia Pre andina) y otro situado después de la Orogenia Andina en el Mioceno medio. Informe Ejecutivo, ANH 2009.

6.3.4. Trampas

Se han definido 5 provincias estructurales y dentro de ellas los siguientes tipos de entrapamientos. Los cabalgamientos y pliegues proporcionan el mayor número de trampas en la provincia del Piedemonte. En la provincia del Casanare fallas antitéticas reactivadas en el Mioceno y pequeños movimientos de rumbo, por la compresión Andina, forman las trampas, además de trampas estratigráficas tipo barras y canales. La provincia de Arauca se caracteriza por un plegamiento suave y fallas de rumbo con movimiento durante el Oligoceno. En la provincia de Vichada el entrapamiento se atribuye a fallamiento normal entre el Mioceno y el Plioceno. En la provincia del Meta las trampas principales son pliegues suaves, fallas de rumbo y trampas estratigráficas.

6.3.5. Roca Sello

Sobre la Formación Mirador, uno de los principales reservorios, yacen las lodolitas de la Formación Carbonera, específicamente el miembro C8, el cual constituye la roca sello.

Además de las lutitas de la Formación Gachetá y las lutitas interestratificadas de la Formación Guadalupe.

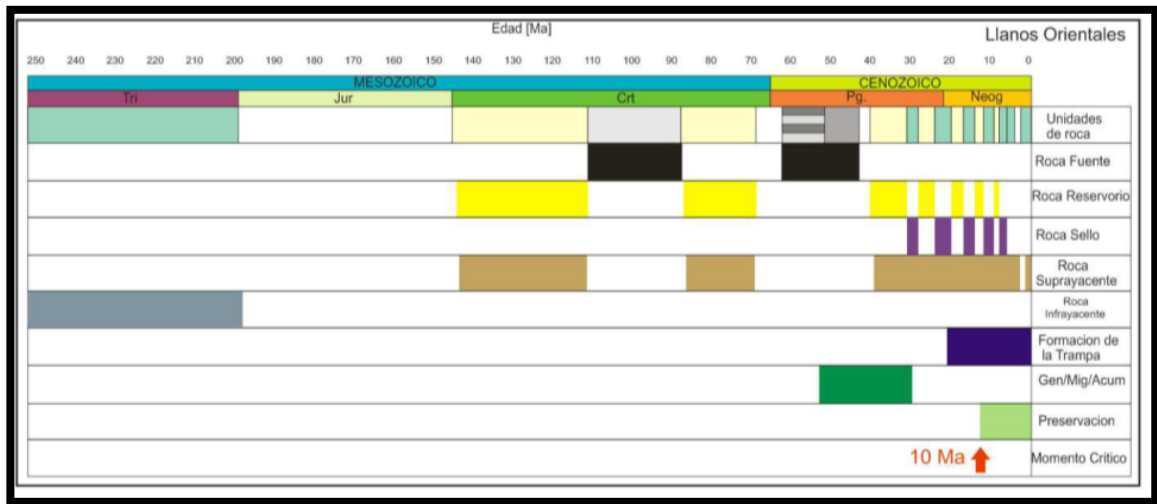


Figura 20. Carta de eventos para la Cuenca de los Llanos Orientales. Se ilustran los tiempos de los eventos en los cuales ocurrió la depositación de las rocas fuentes, reservorio, sello y de sobrecarga. El tiempo de la conformación de la trampa, como también se indica el intervalo en el cual ocurrió el proceso de generación migración, y acumulación. También se muestra el intervalo de preservación y el momento crítico. Tomado de la ANH 2010.

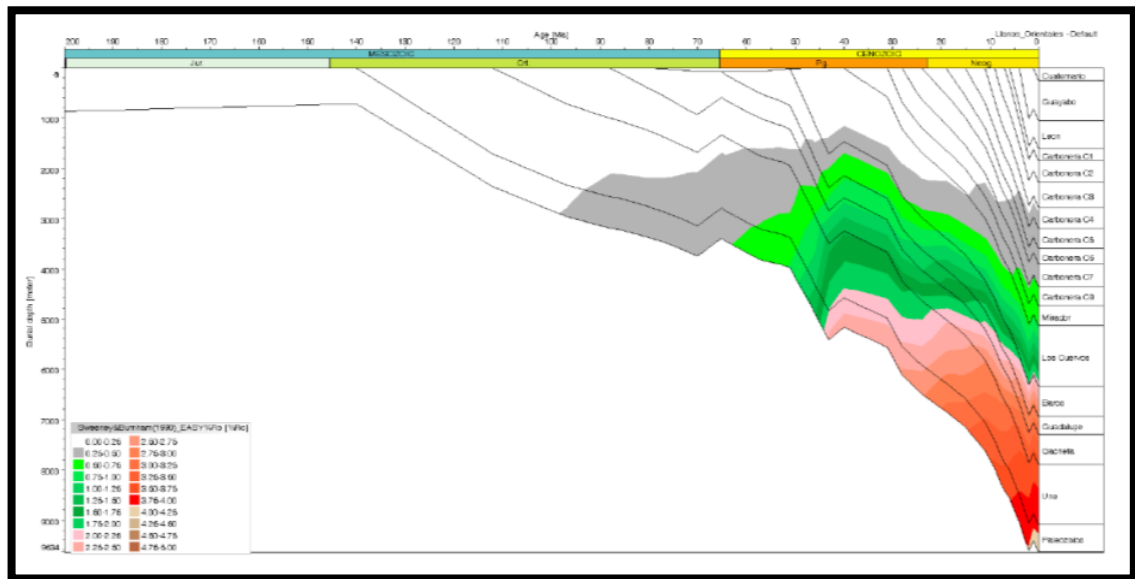


Figura 21. Diagrama de la historia de subsidencia de la Cuenca de los Llanos Orientales. En esta figura se ilustra la variación del %Ro con el tiempo. Nótese que la Formación Gachetá entró a la ventana de generación de petróleo en el Paleógeno y la Formación Barco- Cuervos entró a la ventana de petróleo en el Neógeno. Así mismo la Formación Gachetá entró a la ventana de gas al inicio del Neógeno. Tomado de la ANH 2010

7. INTERPRETACION SISMICA DEL BLOQUE

7.1. BASE DE DATOS

Para la elaboración de este proyecto se utilizaron los siguientes datos:

7.1.1. Datos Sísmicos

La sísmica 3D correspondiente al bloque C, fue representada por un cubo sísmico realizado previamente (PSTM_Fstvel_Fdecon, bri, 2011-TRICON) con una área de $(194.5772) \text{ Km}^2$ de superficie, presenta muy buena calidad, donde se puede identificar el cambio de amplitud como respuesta de las formaciones que se conocen en esta región de los Llanos Orientales, el volumen sísmico a interpretar presentan los siguientes datos:

Lines	Comienza: 1Line	Termina: 296 Line
Traces	Comienza: 19 Trace	Termina: 514 Trace

Ventana de Tiempo	56-4998 ms
-------------------	------------

7.1.2. Datos de Pozo

Se dispone información del Pozo C, que se encuentra ubicado dentro del cubo sísmico, este pozo contiene los registros sísmicos y de densidad que son los siguientes:

- Registro Sísmico: DT35:r2:v1
- Registro de Densidad: DEN:r2:v1

7.1.3. Sismograma Sintético

El sismograma sintético del Bloque_C fue realizado durante el proyecto con la herramienta de (**Syntool**) de OpenWorks, con registros que fueron sometidos a control de calidad por parte del área de Data manager.

Casi siempre un pozo presenta varios registros sónicos, en este caso se escogió el que posee mejor calidad de datos y que su correlación con el registro de densidad fuera buena.

Teniendo estos dos registros; Sónico **DT35:r2:v1** y el de densidad **DEN: r2:v1** se procedió a la construcción de un pseudo-Checkshots.

Teniendo estos dos registros en **Syntool** este programa genera como resultados un sismograma sintético preliminar, el cual se debe ajustar al mejor sintético posible probando las diferentes ondículas, para este pozo la que mejor se ajustó fue siempre la ondícula de Ricker. Posteriormente se realiza un amarre visual con las reflexiones de la sección sísmica y las reflexiones del sintético, la idea de esto es buscar el porcentaje más alto en coincidencia entre ambos como se puede apreciar en la **Figura 20**.

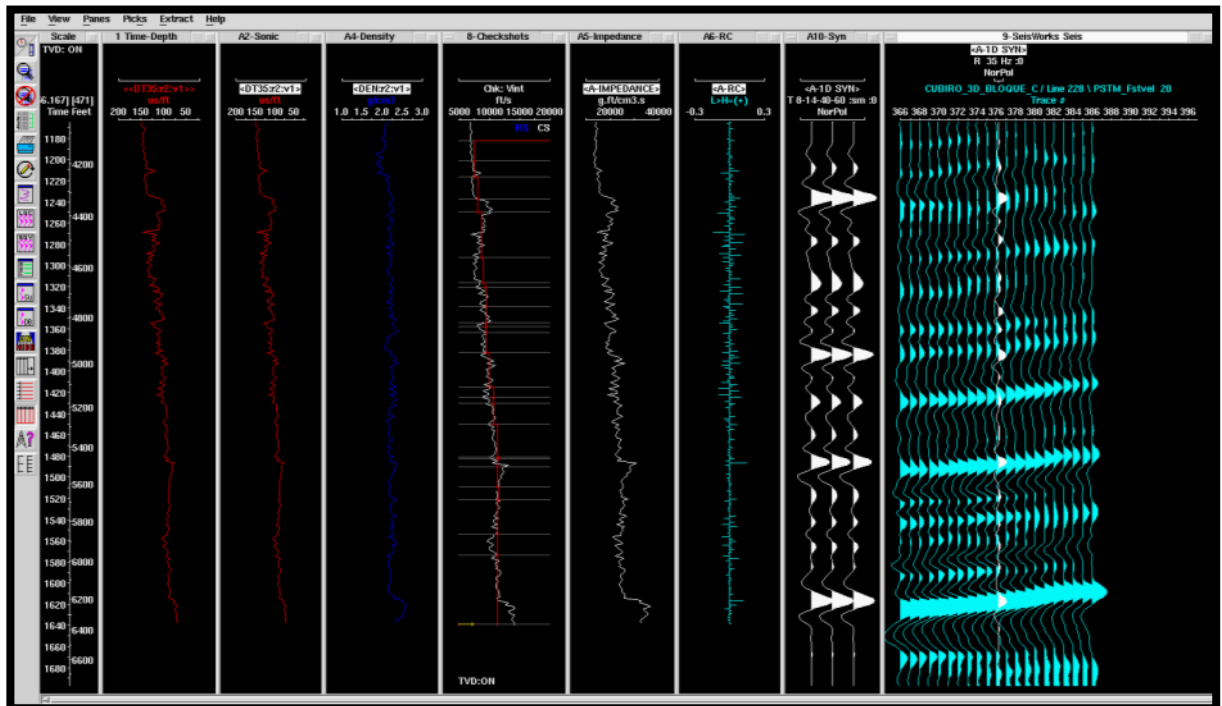


Figura 22. Construcción del Sismograma Sintético. Se aprecia los registros Sónico (Rojo) y el de densidad (Azul), igualmente se observa la serie de Reflectividad (Turquesa) y el sismograma sintético (Blanco).Elaborado AJC.

7.1.4. Calibración Sísmica – Pozo

Para comenzar la interpretación sísmica es necesario calibrar el sismograma sintético realizado en Syntool del pozo C, con la sísmica 3D del Bloque, se utilizaron los marcadores estratigráficos sugeridos y de esta manera se amarró con las líneas cercanas al pozo.

Utilizando la herramienta SeisWorks de Open Works, se logra visualizar el sintético sobre la sísmica **Ver Figura 23**, y se realizó el amarre entre la sísmica y el pozo, desplegando los marcadores estratigráficos se buscó establecer la mejor correlación entre estos y los reflectores observados en la sísmica, tomando en cuenta los máximos y mínimos registrados en el sintético.

Es bueno mencionar que muchas veces las formaciones presentan cambios litológicos que la sísmica no puede capturar por la escala y por la pérdida de resolución a profundidad, lo contrario sucede con los registros que se realizan a un pozo, estos presentan mayor detalle en el cambio de litología por lo que son tomados directamente a la pared del pozo, esto es importante en el momento de amarra el sismograma sintético con la sísmica, es muy difícil que cada ondícula del sismograma quedé en un reflector positivo o negativo.

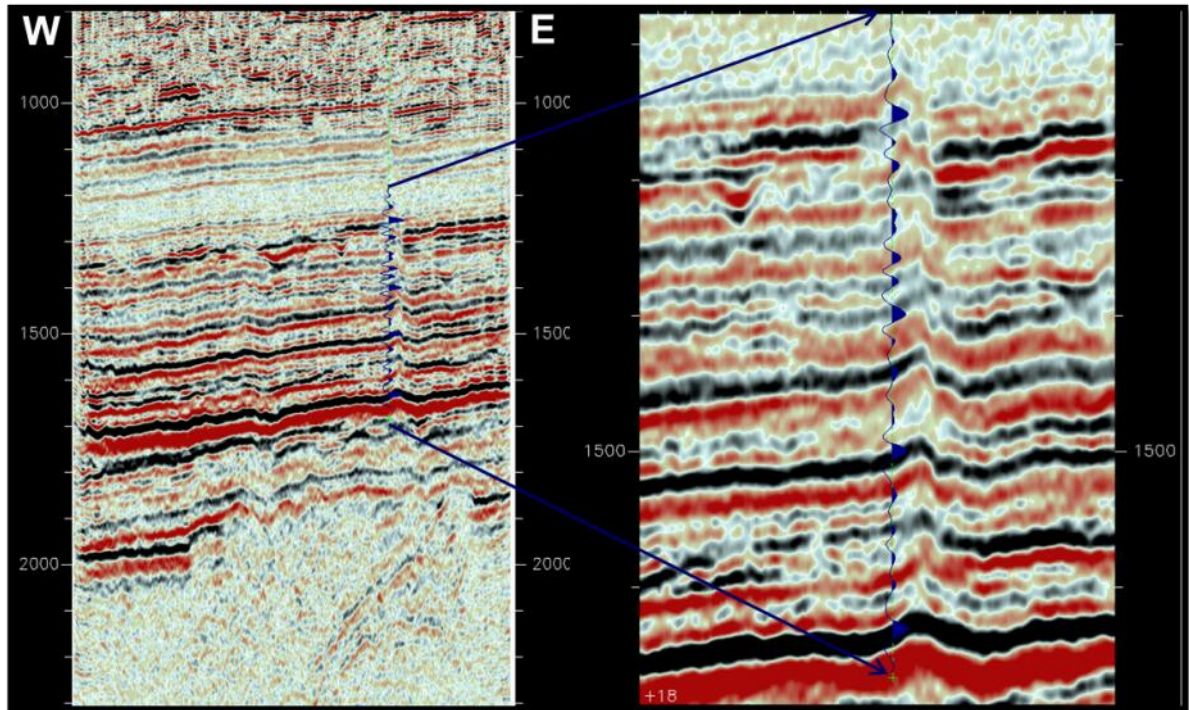


Figura 23. Calibración Sísmica – Pozo. Se puede observar en la figura como se coloca el sismograma sintético creado en Syntool, encima de la sísmica de SeisWorks y como se pueden correlacionar la ondícula con los reflectores fuertes.


7.2. METODOLOGÍA PARA LA INTERPRETACIÓN SÍSMICA

Una vez hecha la correlación sísmica – pozo. Se dispone a realizar la interpretación sísmica y con la ayuda los marcadores estratigráficos desplegados por el pozo.

Para realizar esta actividad se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Se selección 3 horizontes identificados con el sismograma, los cuales representa el limite secuencial de una superficie inundación (MFS) contacto con arena.

- No existe ningún problema de desfases entre las líneas nuevas y las anteriores, se cargó los datos SEG-Y con el mismo datum para todo el proyecto bloque 26.
- Se identificaron las fallas regionales o posibles trampas de acumulación, se identificaron los posibles trenes en el bloque con los pozos productores existente.
- Se siguieron 3 horizontes los cuales representan los topes de las siguientes formaciones: Intra - Carbonera y tope de Guadalupe.

 Near C1	Débil <u>Picking</u>	Tope de Fm. Carbonera con un paquete de reflexiones fuertes y continuas a la Formación León de reflexiones débiles.
 Near C7	Amplitud Variable	Paquetes de reflexiones con prospección.
 Near Guadalupe	Fuerte Amplitud	Buena Continuidad, Discordancia Mayor.

7.2.1. Interpretación de Horizontes

La interpretación sísmica se hizo a partir del pozo C, en la inline 228 con la crossline 377, se tomaron los 3 reflectores anteriormente solicitados, como se observa en la **Figura 24**.

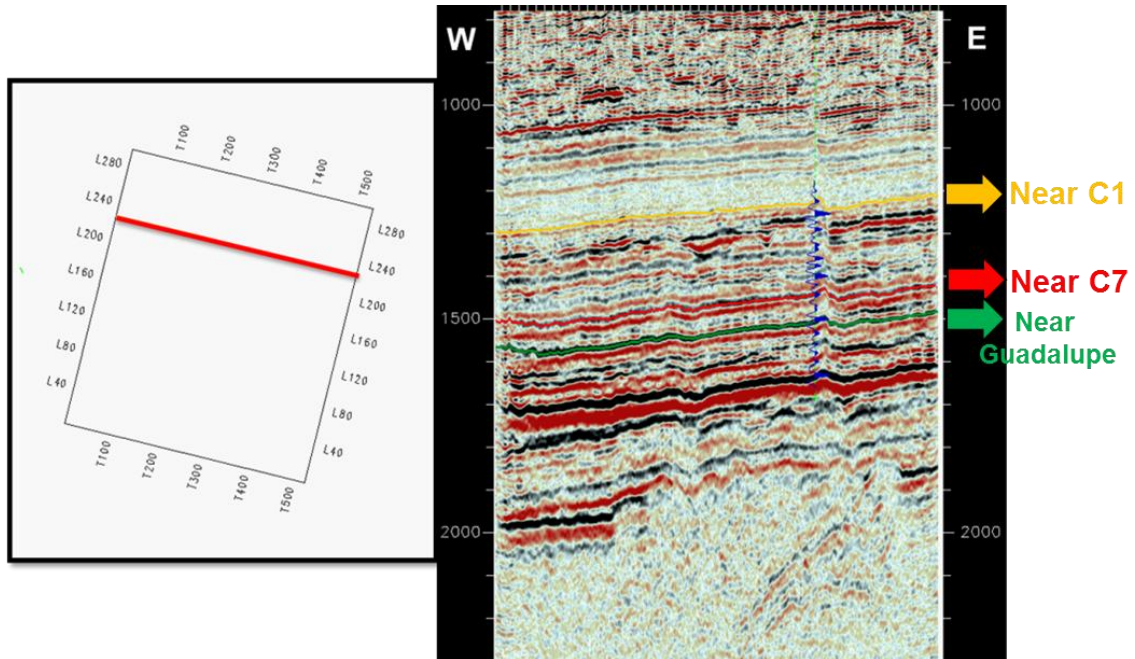


Figura 24. Inicio de interpretación de los primeros reflectores correspondientes a intra – Carbonera (C1, C7) y Near Guadalupe.

La interpretación se realizó cada 10 Líneas y en zonas de mayor dificultad se disminuyó a línea por línea, con el objetivo de visualizar mejor el cambio de amplitud de los reflectores. Es bueno mencionar que el reflector que se asignó como Near C1, no presenta en el volumen una gran amplitud, pese a esto se sugirió seguirlo ya que mantenía más continuidad y menos distorsión. Este reflector solo ayuda a poder diferenciar la terminación de la Formación León y el comienzo de la Formación Carbonera.

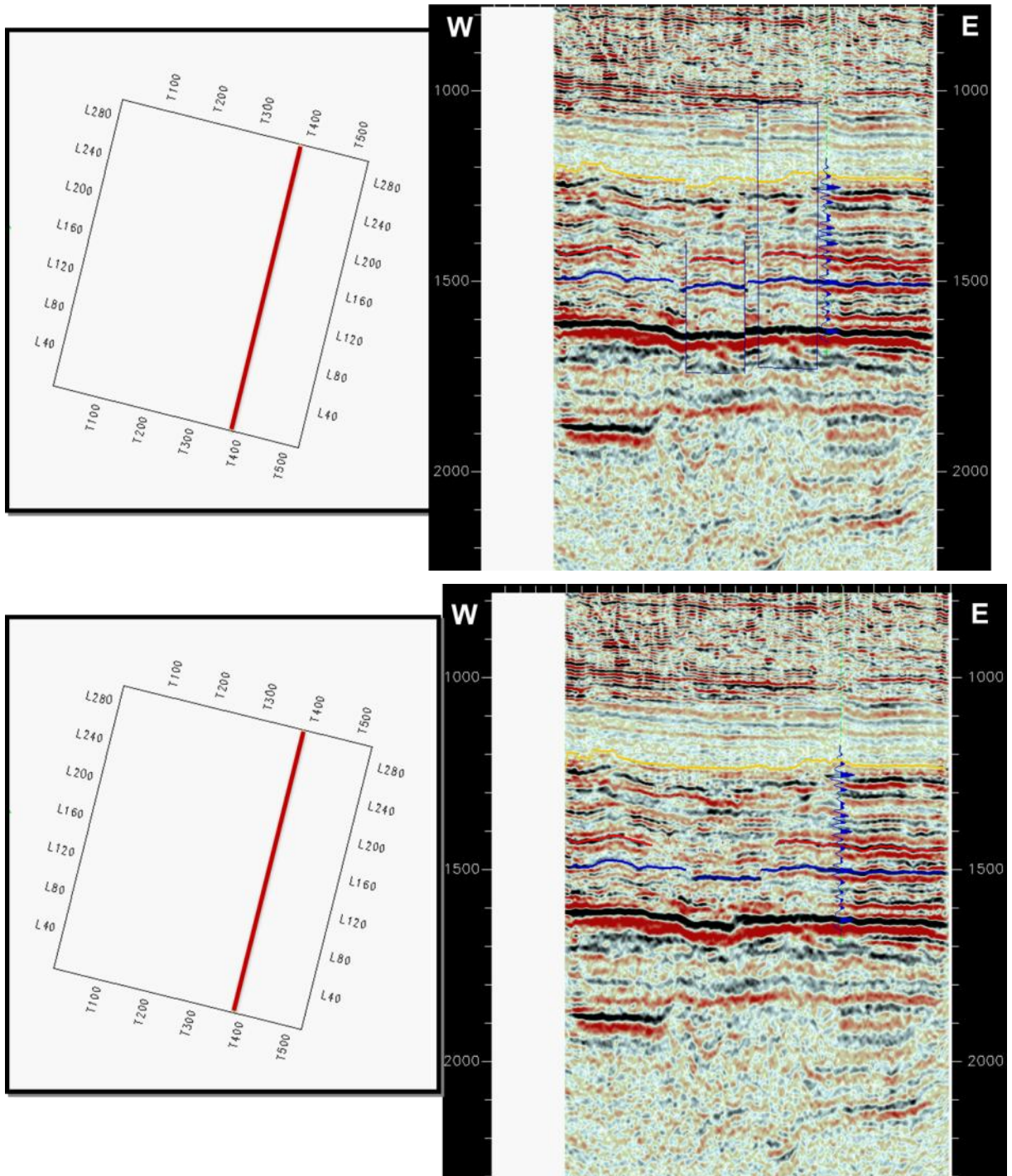


Figura 25. Inicio de interpretación de los primeros reflectores correspondientes a intra – Carbonera (C1, C7) y Near Guadalupe.

Se utilizó la herramienta de **polígono de correlación** que nos permitía extraer una sección de una línea sísmica para compararla con otra sección y así determinar por donde continuaba ese reflector, este ejercicio se puede apreciar en la **Figura 25**.

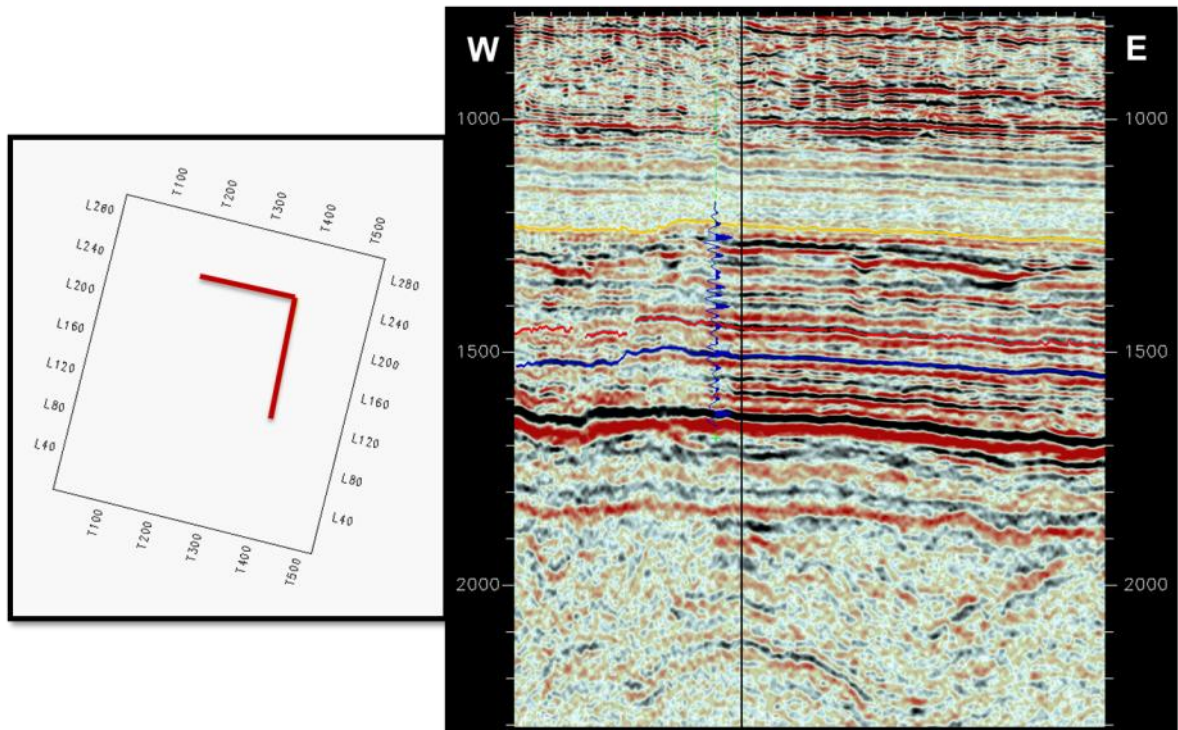


Figura 26. Interpretación de Zig – Zag. En el mapa se observa la línea amarilla como se intercalan los inlines y los crossline, mientras que en el panel derecho se observa las dos líneas sísmicas en una misma escala con su continuidad.

Igualmente en muchos casos se utilizó la ayuda de herramientas de **Zig-Zag** que permite una visualización de la intercalación de inlines y crosslines en una sola pantalla ver **Figura 26**, de manera que se pueda seguir la interpretación del horizonte en estas dos direcciones, esto es de mucha ayuda en lugares de complejidad estructural.

Esto sirve de amarre cuando se interpretan líneas 2D y posteriormente se quiere continuar su interpretación con el volumen sísmico, permite tener dos líneas de

diferente procesamiento a igual escala, ayudando identificar eventos y poder calibrar.

7.2.2. Coherencia Sísmica

Se realizó un Cubo de Coherencia utilizando herramientas como **Poststack Family Launcher**, Ver **Figura 27**, que maneja la similitud entre las formas de ondas o trazas sísmicas, siendo la onda sísmica el resultado de la Convolución de una ondícula sísmica con la geología del subsuelo.

El atributo de coherencia mide cambios entre las trazas vecinas de forma tal que determina que tan coherente o no es el evento geológico.

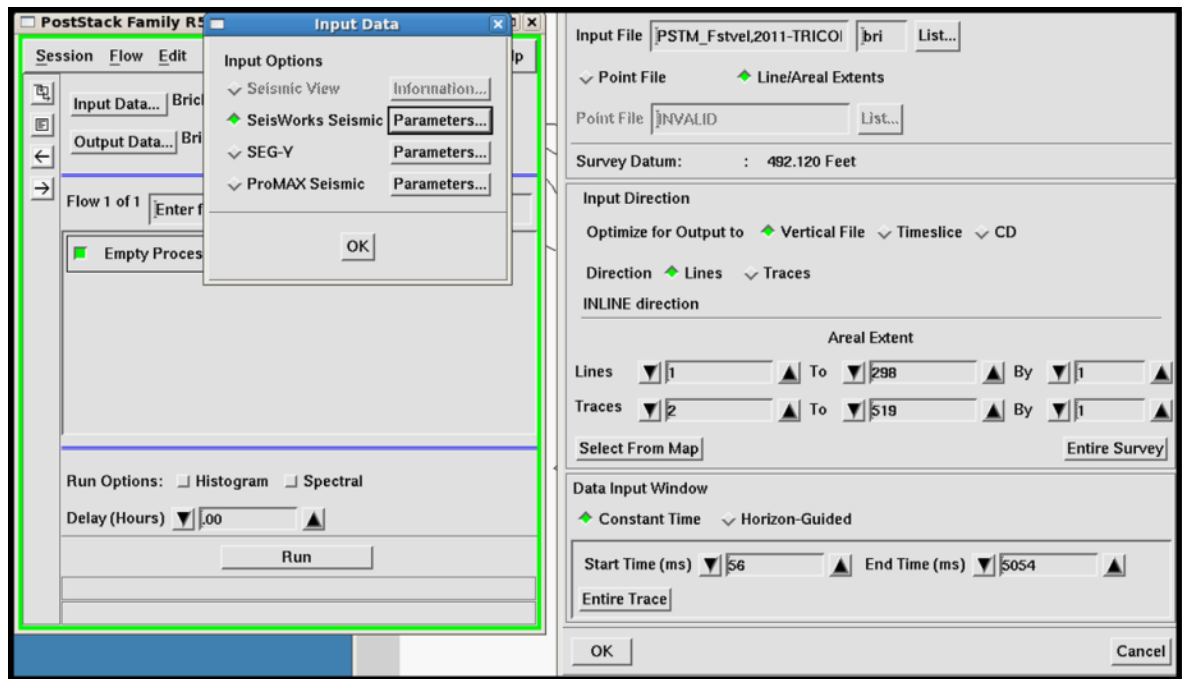


Figura 27. Imagen donde se observa procedimiento para la elaboración del cubo de coherencia.

La metodología que se utiliza para crear el Cubo de Coherencia, consiste en utilizar el volumen sísmico interpretado con los horizontes, en este caso nos referimos al ***PSTM_FSTVEL, 2011-TRICON, bri***. Que se asigna como ***Input Data***, y modificar parámetros como la ventana de velocidad. De igual manera se coloca un ***Output*** que es el nombre con el cual va a salir el nuevo archivo en este caso ***Similaridad_BloqueC***. Ver Figura 27.

El cubo de coherencia permite identificar mejor cambios en cortes de tiempo que no se aprecia en el cubo sísmico normal. Los cubos de coherencias son capaces de resaltar discontinuidades estructurales y estratigráficas y de este modo permiten generar de manera más rápida y eficaz una interpretación sísmica de alta calidad que incluye geometrías precisas de fallas y canales (Marfut y Chopra, 2007).

Estos cubos sísmicos permiten realizar otros cambios al volumen como horizontalizar reflectores, esto permite observar cómo estaba la estructura durante la depositación de dicho reflector y los cambios que sufrió hasta la actualidad, como se observa en la Figura 28 los canales en la Formación Carbonera a un tiempo de 1322 ms.

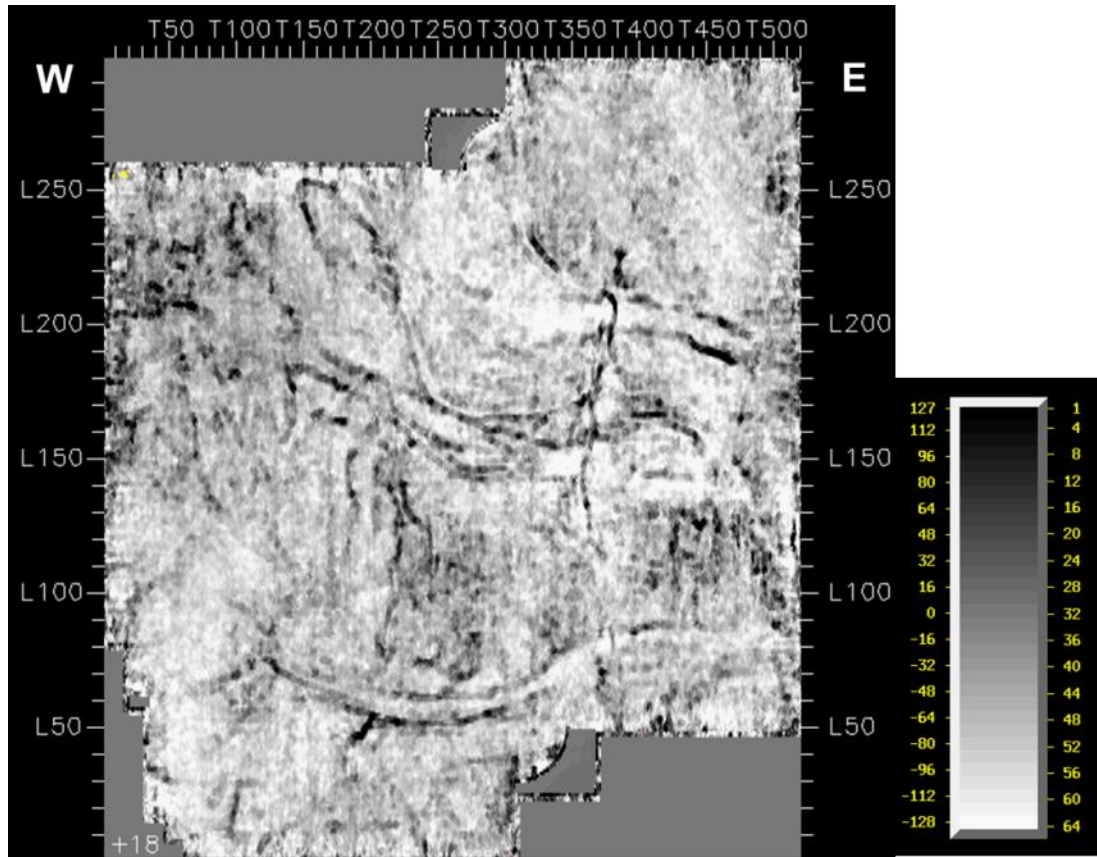


Figura 28. Imagen de un corte a profundidad 1322 en tiempo del cubo de coherencia.

7.2.3. Interpretación de Fallas

Para la interpretación de las fallas se elaboró un cubo del atributo de coherencia sísmica para lograr resaltar con cortes en tiempo las fallas importantes **Ver Figura 29**, en la sísmica. Se realizó la interpretación de las fallas principales cada 5 milisegundos.

Las fallas fueron analizadas en inlines o crosslines dependiendo de dónde tuviera mejor visualización, en algunos casos se interpretaron directamente desde la sísmica y en otros desde el cubo de coherencia por observarse con mayor claridad.

Posterior a la interpretación de las fallas en la sísmica y en el cubo de coherencia, se elaboró un mapa de saltos horizontales (Heaves), que se definen como la componente horizontal del salto sobre el buzamiento, medida sobre un plano vertical y perpendicular al rumbo de la falla, que depende de la orientación del plano de falla.

Esta componente es calculada y dependiendo del tamaño del salto en tiempo será el tamaño de salto horizontal. Posterior a esto, se construyeron los polígonos de falla, estos polígonos son los que delinearán los diferentes bloques presentes en la aérea.

Es bueno resaltar que la evidencia de la falla se identifica como un plano en el volumen, pero en la dinámica de la tierra esto no es tan lineal, son zonas de debilidad que permiten la propagación de los esfuerzos, se toma como una superficie siendo varios micro-zona de debilidad.

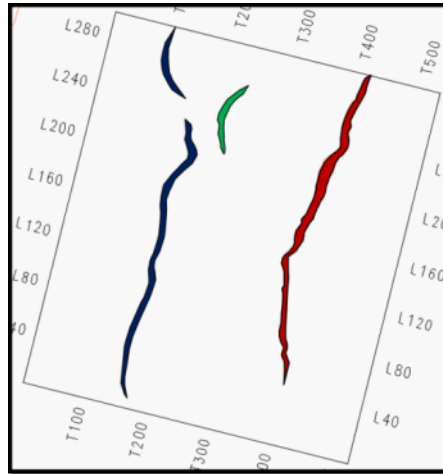


Figura 29. Polígonos de Falla, contruidos a partir de los altos interpretados en la sísmica, se marcaron 3 fallas de las cuales solo la roja llega a profundidad.

7.2.4. Superficies de Tiempo

Una vez interpretados los inlines y los crosslines, junto con las fallas presentes en la sísmica, se procedió a elaborar la superficie en tiempo correspondientes a cada horizonte. Para ello, se utilizó el módulo **Zap**, que utiliza parámetros como el mallado resultado de la interpretación de los diferentes inlines y crosslines, para convertirlo en una superficie continua, como se muestra en la **Figura 30**.

Luego la superficie sirvió como parámetros de entrada para la aplicación de Interpolación entre las líneas interpretadas, a través del módulo (**Interpólate**), el cual suaviza dichas superficies, para evitar la presencia de picos o irregularidades.

El resultado de estos procedimientos fue una superficie en tiempo, continua y suavizada por cada uno de los horizontes interpretados. **Figura 30**.

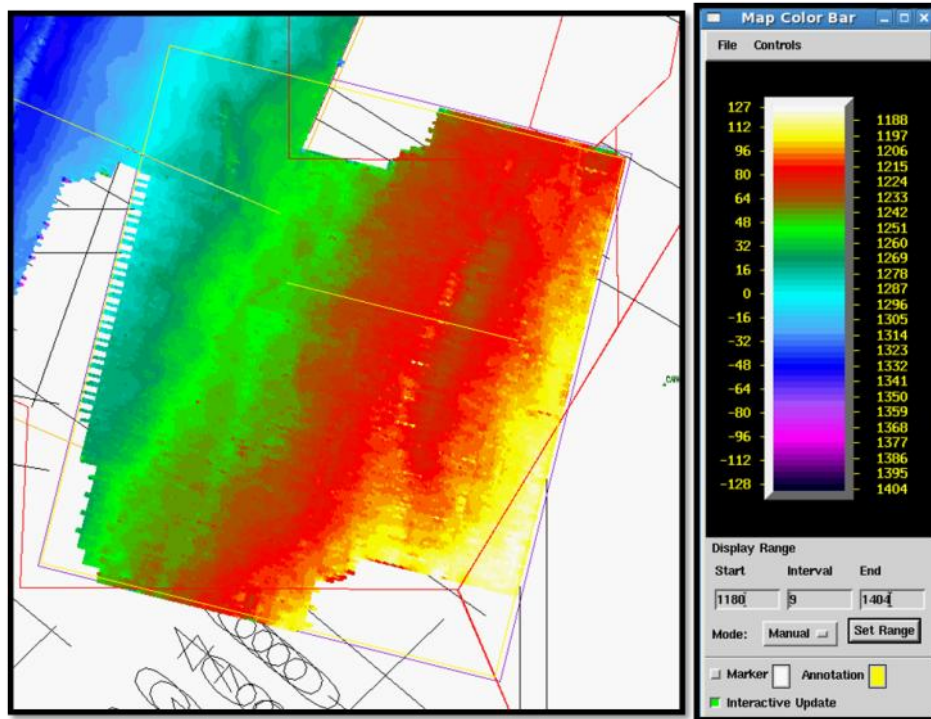


Figura 30. Mapa de tiempo del Horizonte Near C1 donde se observa el rango de tiempo en el cual se encuentra el reflector y los contrastes de amplitud.

7.2.5. Atributos Sísmicos

Para la realización de los mapas de atributos, se utilizó la aplicación de **Post Stack/Pal/ESP**, desde el cual se generaron mapas de atributos como Dip, Azimut que son de vital importancia para la interpretación estructural de la sísmica o en el cubo de coherencia. Por tal motivo, estos mapas son una herramienta más de ayuda a corroborar la efectividad de la interpretación estructural. **Ver Anexos.**

8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1. SISMOGRAMA SINTÉTICO

El primer paso antes de comenzar a interpretar fue elaborar el sismograma sintético del Pozo_C, a partir de los registros Sónico y Densidad. Los resultados obtenidos revelan reflectores muy fuertes en los cuales se pudo identificar el contacto entre la Formación León, Formación Carbonera, la Discordancia de la Formación Guadalupe.

Determinando estos como los marcadores estratigráficos del pozo_c y posteriormente realizar la interpretación asignándoles el adjetivo de (**Near**).

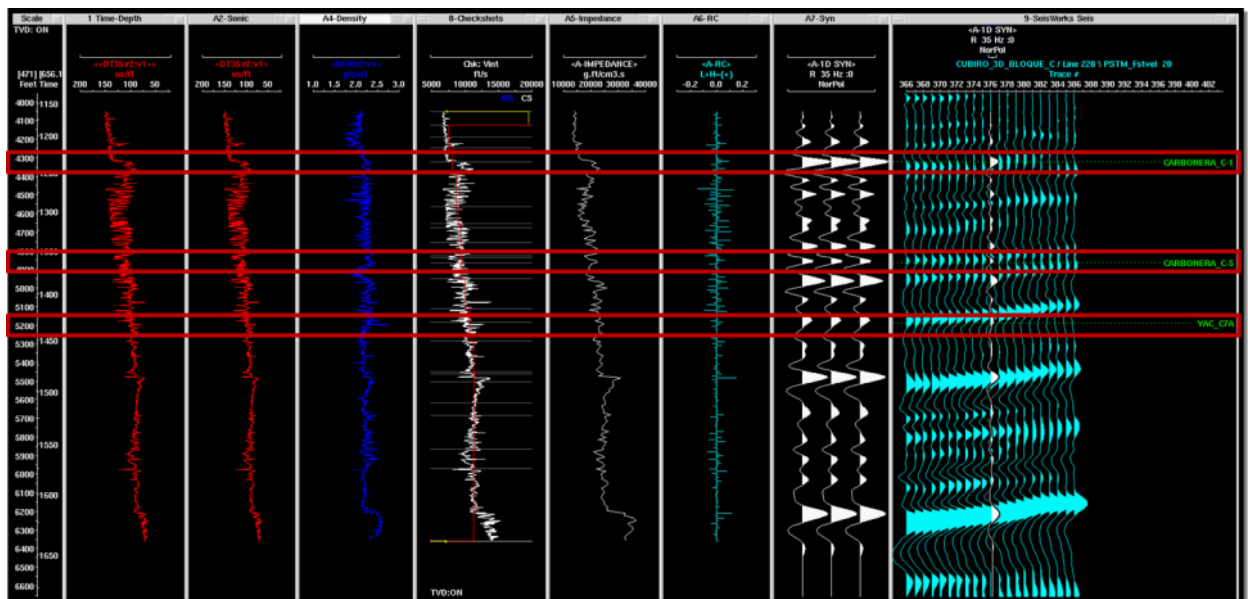


Figura 31. Sismograma Sintético para el Pozo_C, los rectángulos rojos muestran donde se ubica las reflexiones más fuertes, interpretadas como Carbonera Near (C1, C5, C7).

Se obtuvieron productos satisfactorios que pueden ser evidenciados en el empalme logrado entre la sísmica y el sismograma sintético generado **Ver Figura 31**, se tuvo la necesidad de aplicar un **shift** de (-5) para ajustar mejor los reflectores teniendo en cuenta que el sismograma sintético contiene mejor detalle de la sísmica. Pese a esto los marcadores estratigráficos de los topes coincidieron muy bien con la sísmica, Ver la **Figura 32** donde se aprecia un zoom del sismograma, la sísmica y los reflectores principales.

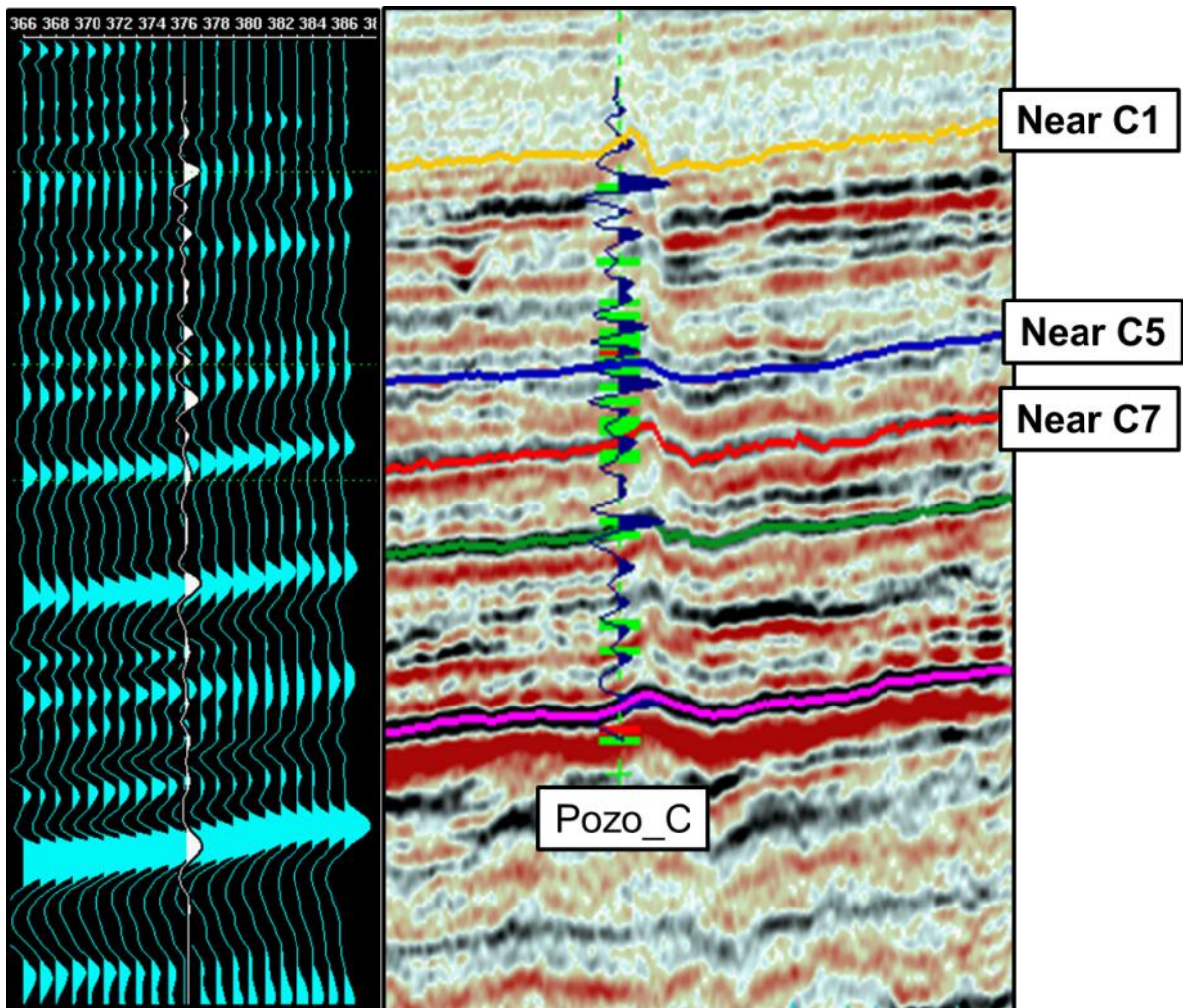


Figura 32. Syntool, elaboración del sismograma sintético para el Pozo_C. se puede observar el empalme de la sísmica con los Horizontes interpretados y el sismograma sintético.

8.2. CALIBRACIÓN SÍSMICA-POZO

La correlación de Pozo con Sísmica se realizó cargando el sintético del Pozo_C realizado en Syntool al Volumen 3D cargado en SeisWorks. El software automáticamente hace coincidir los marcadores estratigráficos desplegados en el sismograma sintético con los marcadores de los pozos.

Al mismo tiempo el software también brinda la opción de poder hacer correlación manualmente si se quiere corregir o empalmar de otra manera el sismograma, para que coincidan las amplitudes con los reflectores.

La imagen a continuación muestra el despliegue del sismograma sintético del Pozo_C, así como la posición de los marcadores estratigráficos sobre la inlines 228 la cual se tomó como línea de partida de la interpretación sísmica **Ver Figura 33.**

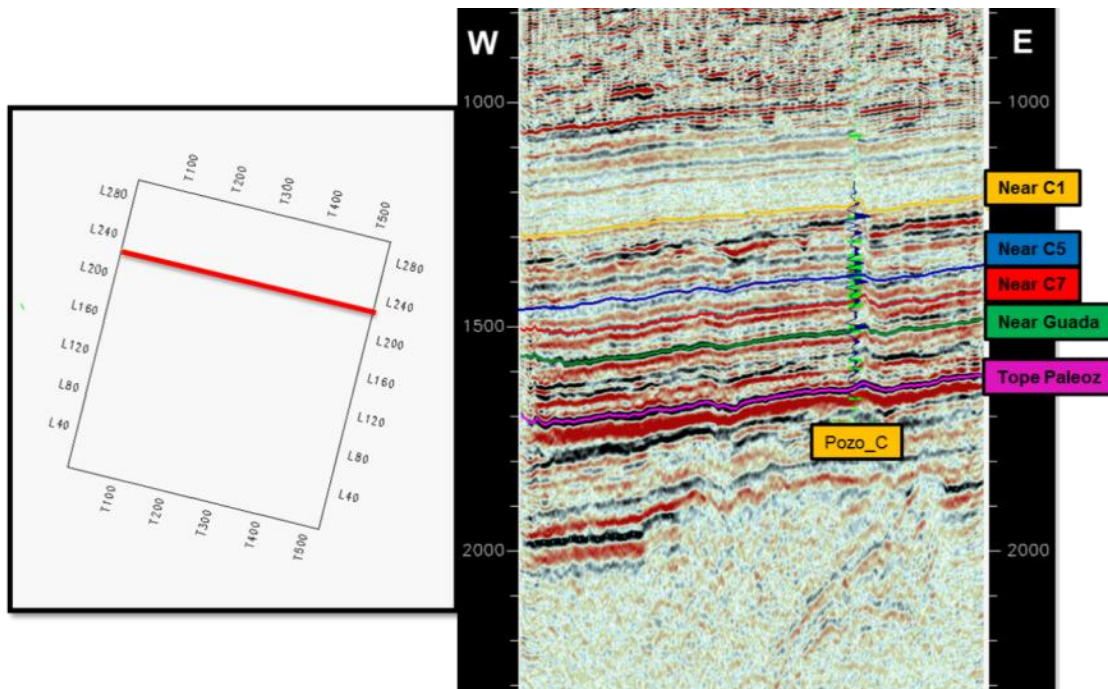


Figura 33. Sintético del Pozo_C mostrando los marcadores estratigráficos con sus respectivos Horizontes.

8.3. RESOLUCIÓN VERTICAL

En el marco teórico se explicó que la resolución vertical es fundamental para no perder la ley de velocidades si se llega a editar el sismograma en la sísmica, se utiliza la **Ecuación 12**, de Syntoll se tomaron datos de velocidad de la **Figura 31** y de frecuencia para el cálculo de λ .

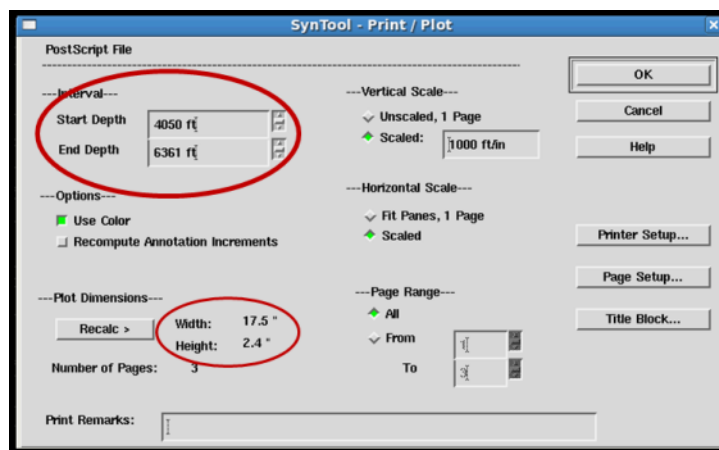


Figura 34. Datos tomados de Syntool para el cálculo de resolución Vertical.

$$R = \frac{\lambda}{4}$$

Ecuación 12 Relación para el cálculo de la resolución vertical.

Dónde:

λ = Longitud de Honda

R = Resolución Vertical

Datos:

V= 2311 ft/seg

$$2311 \frac{ft}{seg} * \frac{0.3048}{1ft} = 704.39 \frac{m}{seg}$$

f= 17.5 Hz

$$\lambda = \frac{V}{f} \rightarrow$$

$$\lambda = \frac{704.39m/seg}{17Hz} = 41.434m$$

$$R = \frac{\lambda}{4} \rightarrow$$

$$R = \frac{41.434 m}{4} = 10.358 m$$

$$R = 10.358 m \frac{1ft}{0.3048 m} = 33.985 ft$$

8.4. INTERPRETACIÓN SÍSMICA ESTRUCTURAL

Esta interpretación se contó con un volumen sísmico de buena calidad **PSTM_FSTVEL, 2011-TRICON, bri**, presenta continuidad lateral de los reflectores interpretados utilizando la Resolución Vertical calcula con un valor de 34 pies aproximado.

A continuación se muestra el resultado de toda la interpretación realizad a partir de los atributos utilizados en el volumen sísmico con base a los topes de los horizontes seguidos.

8.4.1. Interpretación de Horizontes

El primer objetivo de la interpretación se enfoca en 3 horizontes intra-Carbonera que son NearC1, NearC7, Near Guadalupe, los cuales eran importantes para diferenciar el tope de la Formación León y Formación Carbonera y Formación C7

8.4.1.1. Horizontes Near C1

Tomándolo como cerca de C1, realmente se utilizó este reflector no por ser el más fuerte sino por su continuidad en el volumen sísmico ya que en el sismograma sintético mostraba la ondícula mas fuerte debajo de este, se sugirió seguirlo por su continuidad, ya que el reflector que se entendía como C1 no presentaba continuidad como este así su amplitud fuera más fuerte.

Se tomó Near C1, Color Cremas **Figura 35**, para poder diferenciar el paso de la Formación León a la Formación Carbonera tomando el cambio de arena de C1 a Shale de León. Este reflector se tomó como Onset Máximo ya que en el sismograma concordaba con la ondícula positiva.

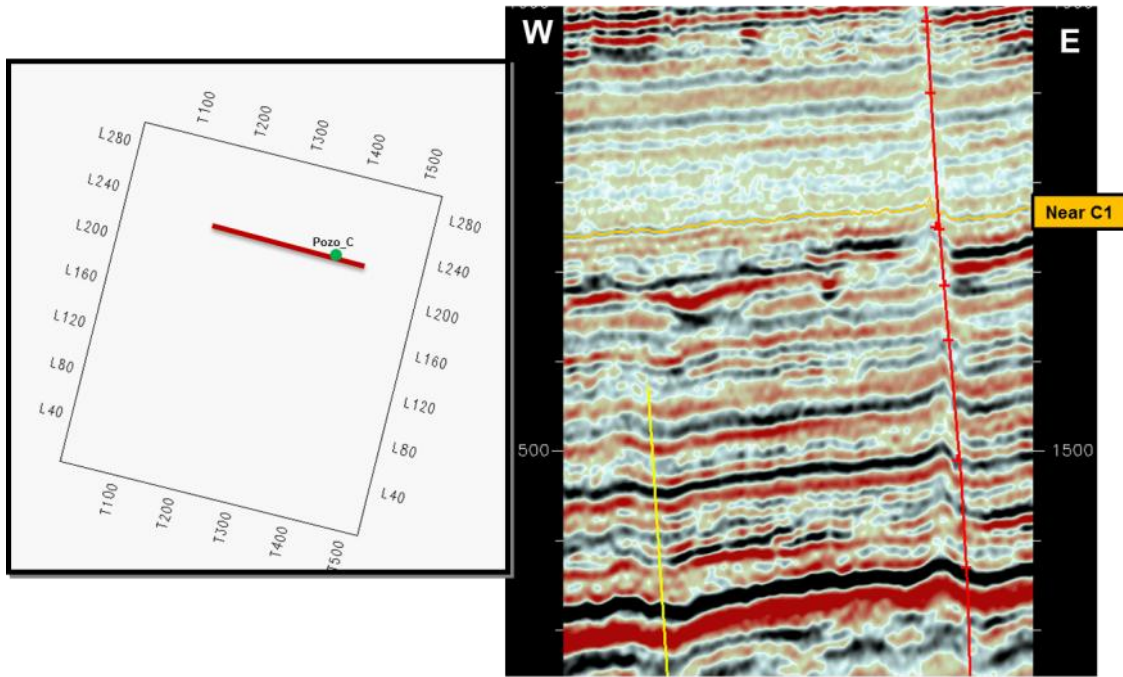


Figura 35. Reflector correspondiente al tope de la formación Carbonera asignado como NearC1, en la inlines 226, cerca al Pozo_C.

Se puede apreciar en la **Figura 35**, el reflector NearC1, se observa que el existe un reflector más fuerte en la parte inferior pero no presenta ninguna continuidad en el volumen sísmico, posiblemente se ve interrumpido por cambios laterales. NearC1 se interpretó en todo el volumen sísmico.

8.4.1.2. Horizontes Near C5

Este reflector no se tomó como primer objetivo en el trabajo pero de la misma manera se interpretó, durante la elaboración del proyecto se observó que existía una diferencia grande entre C1 y C7 que se puede diferenciar en C5, entonces se decidió interpretar este horizonte ya que en algunos campos es un segundo

objetivo productor y se encontró patrones muy interesantes en este que ayudo mucho a entender toda la sedimentación del C7 al C1.

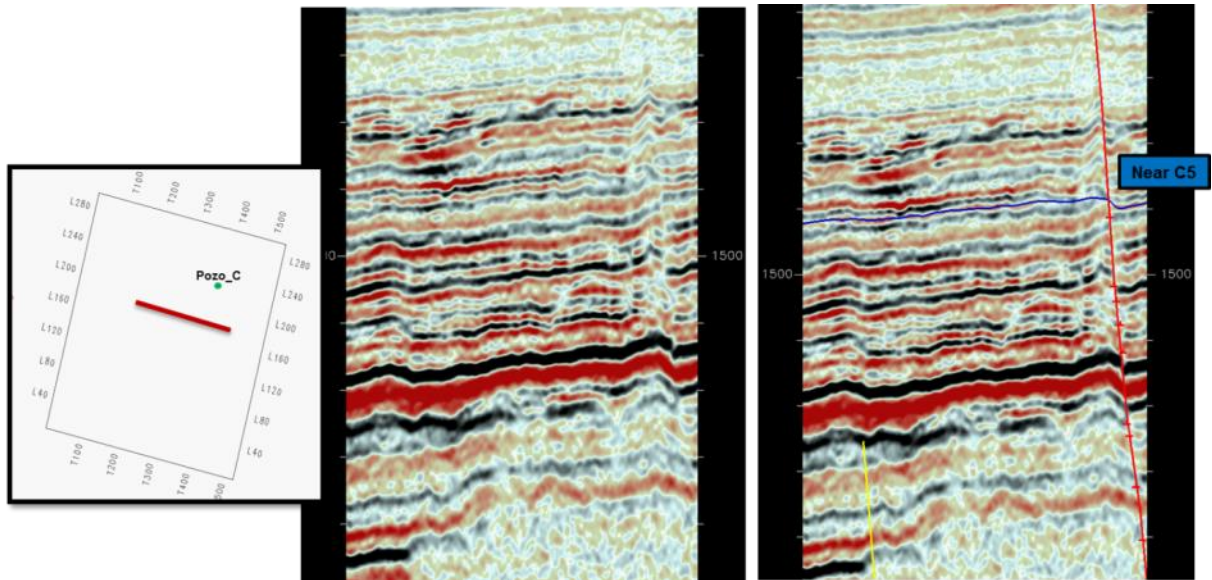


Figura 36. Reflector correspondiente de la formación intra-Carbonera asignado como NearC5, en la inlines 181.

En la Figura 36, se puede observar la misma inlines 181, con y sin interpretación, para el reflector Near C5 Color Azul, se utilizó un onset Mínimo, ya que en el sismograma sintético la ondícula no daba preciso en un reflector positivo entonces se tomó este como mínimo.

De igual manera no fue fácil interpretarlo porque en algunas zonas del volumen este reflector no tenía una buena continuidad pero de igual manera se realizó la interpretación y se trabajó con el cubo sísmico.

Esta secuencia consiste en un cambio de litología entre los Shales de C4 y las Arenas de C5, que se tomara como otra superficie de máxima inundación. Durante el terciario.

8.4.1.3. Horizonte Near C7

Este reflector representa las arenas Basales que suprayacen el paleozoico o cretácico, denominada Arenas Basales o C7 de la Formación Carbonera. Está compuesta por una secuencia masiva de arenas que contiene el primer reservorio de hidrocarburos en la parte oriental de la Cuenca de los Llanos. **Ver Figura 37**, línea Color rojo.

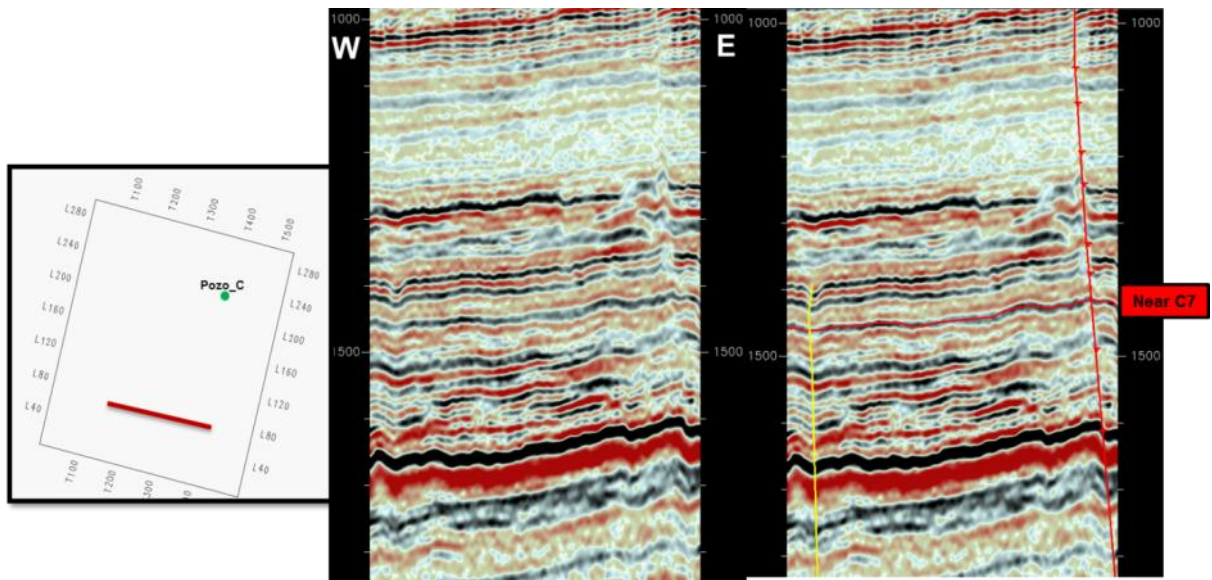


Figura 37. Reflector correspondiente de la formación intra-Carbonera asignado como NearC7, en la inlines 72.

Este reflector se tomó como un onset máximo ya que al calibrarlo con el sismograma la ondícula corresponde a un positivo, presenta buena continuidad en el volumen sísmico se observa en algunas zonas una mayor amplitud y en otras menos, esto se debe a que al Oeste, las facies van cambiando y de un ambiente predominantemente continental al este, van pasando a facies de ambientes marino somero, con un incremento en arcillas y desaparición de los reservorios: por este motivo, la formación no es productora en la parte profunda de la cuenca. Carbonera, Unidad C7 es de edad Eocena Tardía.

8.4.1.4. Horizonte Near Guadalupe

La Formación Guadalupe se compone de areniscas con intercalaciones delgadas de Shales. Depositadas en un ambiente de alta energía, en algunas zonas de la cuenca la Formación Barco del Paleoceno suprayacen la Formación Guadalupe pasando de un ambiente litoral a la discordancia con el cretácico inferior T2 a K2.

Figura 38.

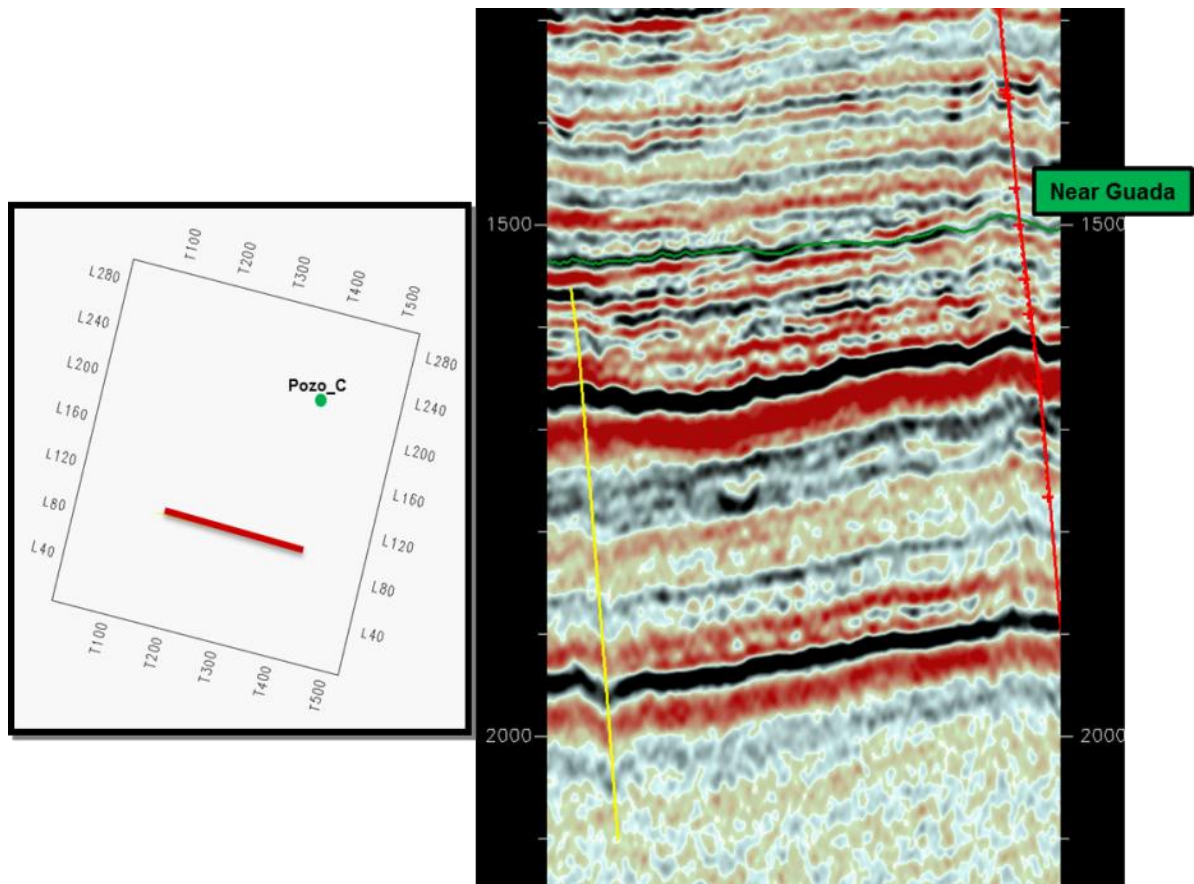


Figura 38. Reflector correspondiente de la formación Guadalupe asignado como Near Guadalupe, en la inlines 72.

En esta parte de la cuenca no se tiene registro de la Formación Mirador (Cuerpos masivos de arenas con intercalaciones de arcillas fina. Depositados en un

ambiente fluvial.) y de La Formación Cuervos y Barco (Limolitas – Arcillolitas cafés, encima de unas arenas masivas).

En la **Figura 39**, se puede observar que en las zonas altas de la cuenca no se tiene registro de las formaciones Mirador, Cuervos y Barco, se puede deducir que durante su depositación no logró alcanzar esta zona, o si la alcanzó fue erosionada.

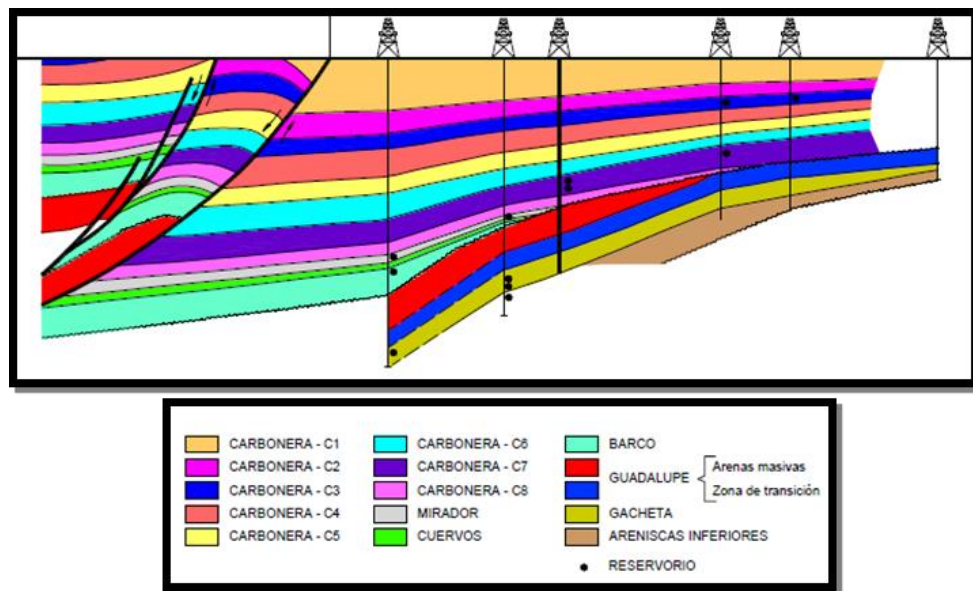


Figura 39. Corte geológico esquemático de la geología general en la cuenca de los llanos Orientales (Tomado de Trabajo de Grado L. Farooq, UIS, 2011)

La Formación Guadalupe está constituida por paquetes entre 5 a 20 pies de arenisca de grano medio a muy fino, cuarzosa, cemento silíceo, ocasionalmente calcáreo, con laminación cruzada tangencial y ripples; intercalados con intervalos de shale negro, silíceo, duro, con laminación fina plana a ligeramente ondulosa, lenticular y ocasionalmente lentes y nódulos de siderita. Hacia la base se presentan los mayores espesores y propiedades como rocas almacenadoras y una sección progradacional que se interpreta como resultado de la depositación de un ambiente deltaico con influencia de mareas. En la parte media el ambiente es estuario de dominio mareal, donde se identifica un nivel arcilloso

correspondiente a depósitos de bahía restringida y planicies de marea, donde se permite ser correlacionado con la superficie de máxima inundación (MFS) propuesta en la subcuenca Apiay. (Rojas et al, 1999).

8.4.2. Interpretación de Fallas

Para identificar las fallas existentes en la zona de interés se utilizaron dos métodos conjuntos, uno fue realizar la interpretación directamente en la sísmica pudiendo trazar las fallas que la resolución del volumen sísmico dejara ver, la otra fue utilizando el atributo sísmico ESP y mirar si aquellos planos de fallas correspondían a cambios de similaridad en el cubo de coherencia.

Durante la interpretación de los horizontes se observa una gran falla de buzamiento NE ver **Figura 29**, Mapa. Extendiéndose hasta superficie y cortando desde el paleozoico todas las unidades. Esta es la principal trampa del bloque. El Pozo_C fue el encargado de confirmar la ubicación de falla y la acumulación de hidrocarburo.

El bloque presenta un estilo estructural propio del dominio de la cuenca, contiene fallas normales de poco salto algunas que vienen desde el basamento y se extiende hasta superficie y otras que mueren antes de salir de Formación Carbonera, durante la interpretación se pudieron observar algunas fallas del basamento que durante algunos periodos estuvieron inactivas y se reactivaban con el empuje de la Orogenia Andina

8.4.2.1. Falla A

Falla normal con dirección NE y Buzamiento SE, se observa en la **Figura 40, 41**, con poco desplazamiento vertical, inicia desde el basamento y se extiende hasta superficie, presenta sinuosidad en el plano de falla, su vergencia se mantiene durante el bloque, en la parte sur presenta un comportamiento más vertical mientras en la parte norte se comporta más diagonal, este cambio en el plano de

falla se asocia a componentes transcurrentes que están afectando el bloque y lo cual hace que sea muy difícil identificarla en la sísmica por su resolución **Figura 41.**

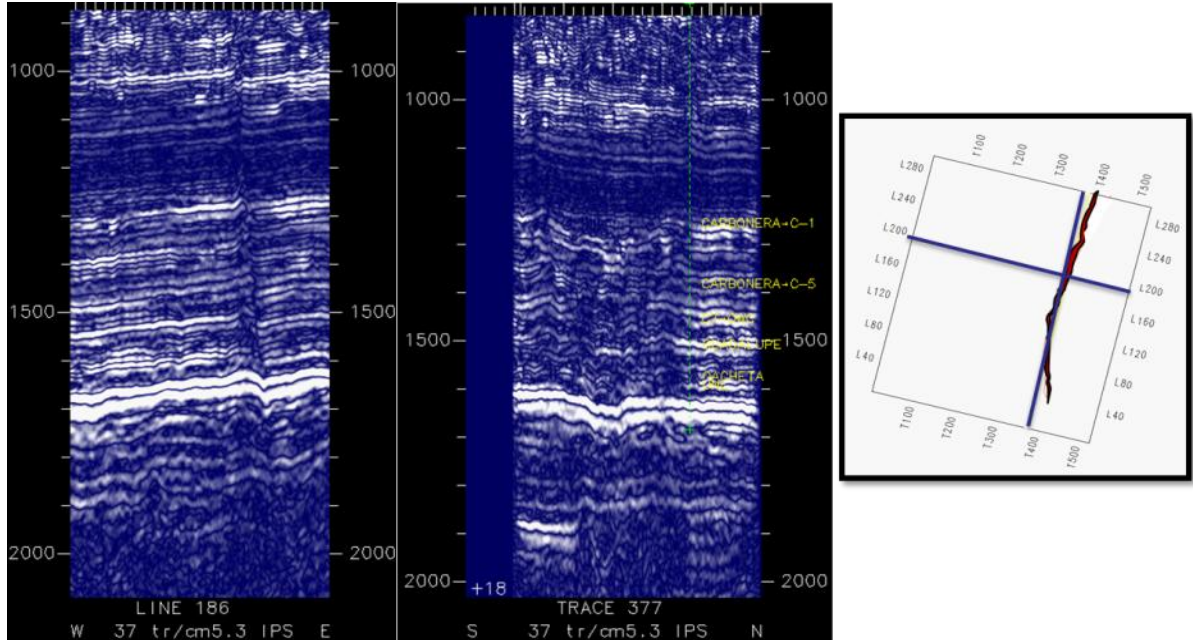


Figura 40. Inlines 186 y Crosslines 377, donde se puede apreciar el plano de falla en las zonas de discontinuidad del volumen sísmico. Sin Interpretar.

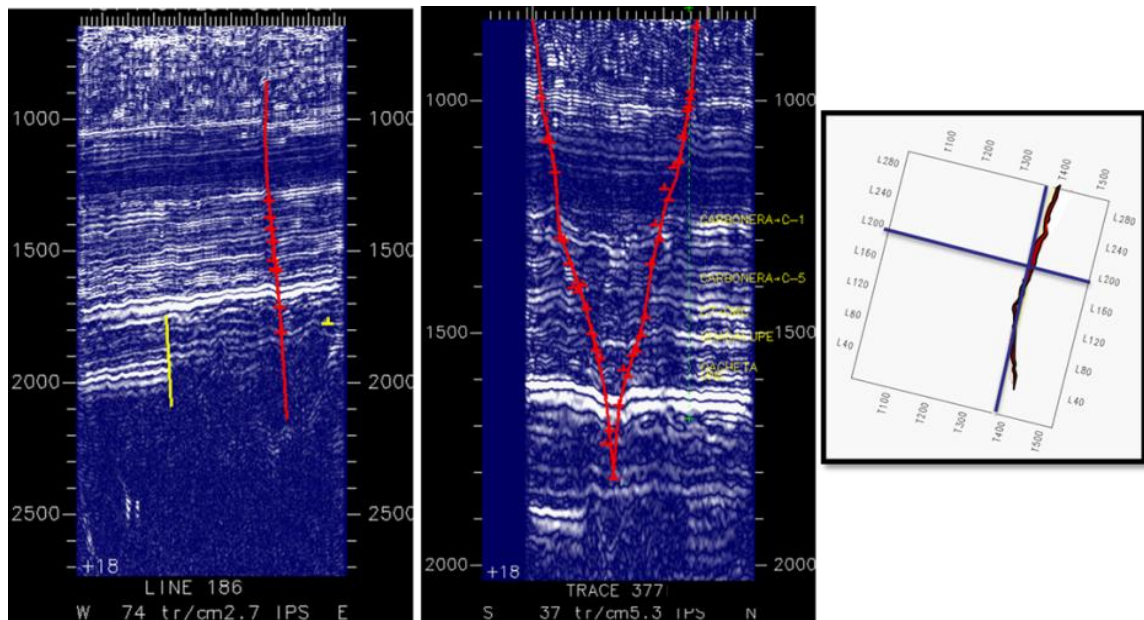


Figura 41. Inlines 186 y Crosslines 377, donde se puede apreciar el plano de falla en las zonas de discontinuidad del volumen sísmico. Interpretadas.

8.4.2.3. Falla B

Falla normal con dirección NE y buzamiento SE de color Verde en la **Figura 42**, con un pequeño desplazamiento vertical, inicia desde basamento y se extiende hasta Intra-carbonera, esta falla genera un levantamiento en algunos paquetes de La Formación carbonera, no se ha podido definir donde termina con exactitud el plano de falla, porque la sísmica no lo permite, pero si se puede identificar que llega no pasa la formación León y la Formación Guayabo. Esta falla está asociada a un alto que al parecer presenta el basamento en esta zona, como es una falla muy antigua y debe presenta evidencia de reactivación.

La falla atraviesa todo el bloque de norte a sur, en algunas partes desaparece y en otras vuelve a parecer, se deduce que existen fallas en dirección EW que no se aprecian en la sísmica en la Crosslines, pero son las responsable del salto que realiza la falla.

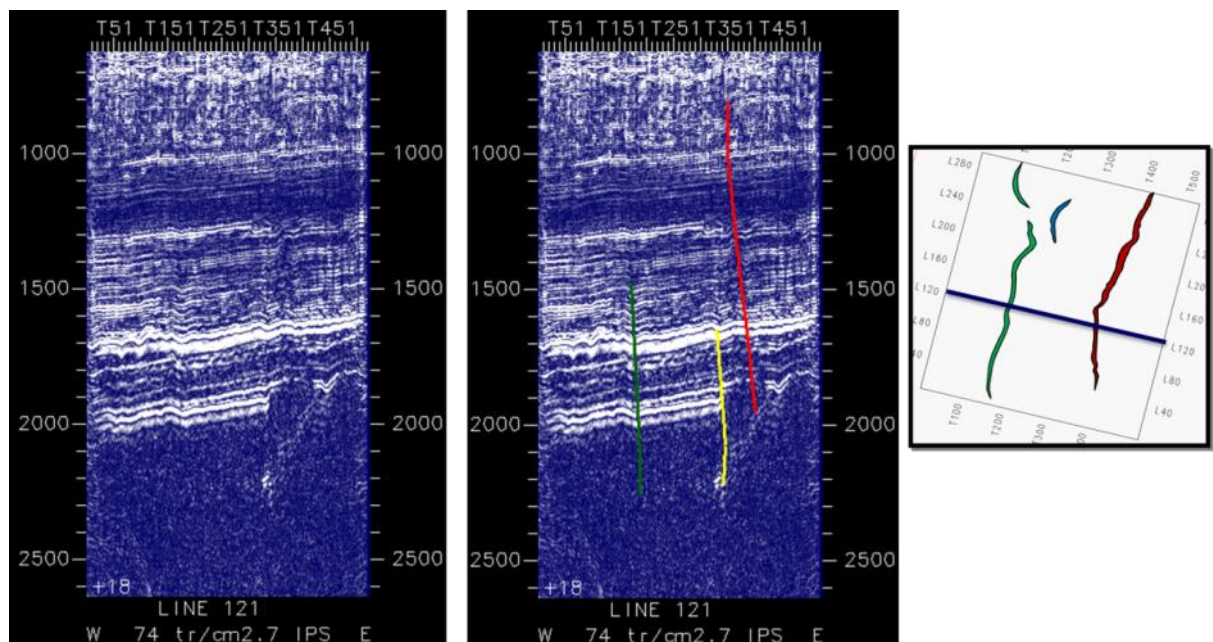


Figura 42. Inlines 121, donde se puede apreciar el plano de falla B de color verde en las zonas de discontinuidad del volumen sísmico. Interpretadas.

8.4.3. Interpretación Mapas de Tiempo

8.4.3.1. Mapa Near-C1

Luego de realizar la interpretación de horizonte Near C1 por todo el Cubo Sísmico, se puede realizar la opción de *Interpólate*, que genera una superficie de tiempo, continua y suavizada con el mallado de la interpretación, la idea con esto es poder ver cambios de amplitud, intervalos en los cuales se encuentra el horizonte y poder utilizarlos al momento de realizar una horizontalización al cubo sísmico.

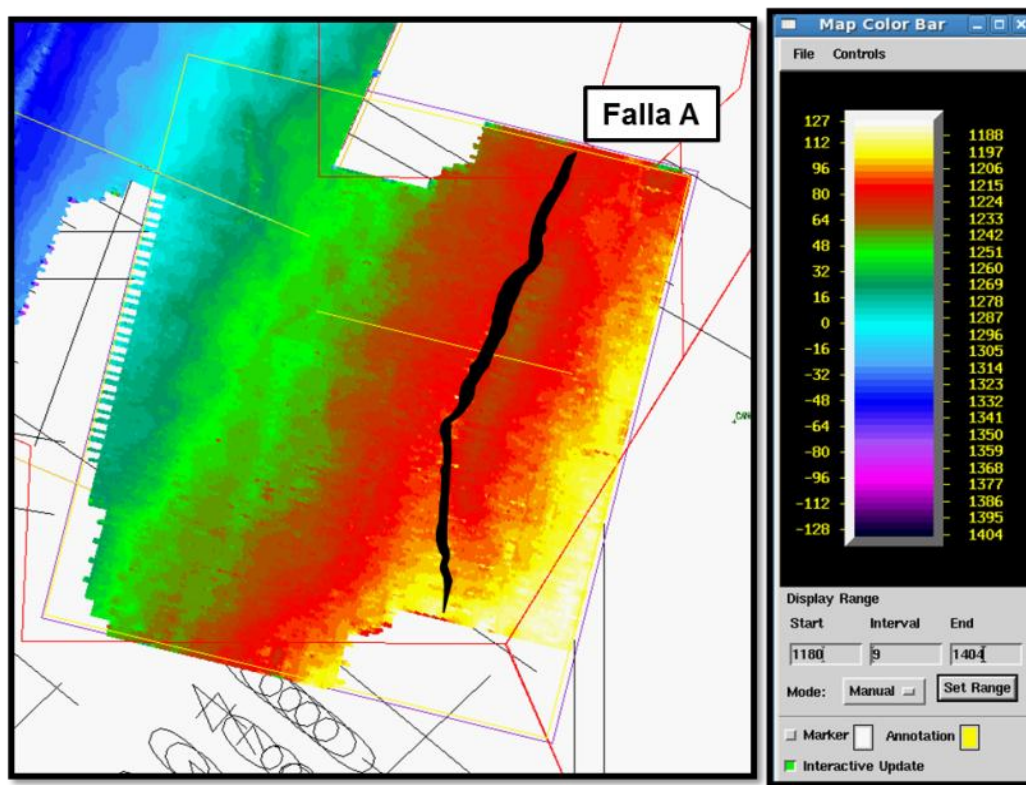


Figura 43. Mapa de Tiempo, tope C1, Intra-Carbonera, finalización Formación León y comienzo de Carbonera. Se observa Falla A, que sube hasta superficie.

En la **Figura 43** se puede observar la falla A, por el contraste de colores en la zona de falla, se puede inferir que el horizonte se encuentra en el intervalo de 1180 a 1404 ms, que la parte de tonalidad amarilla y roja es la zona más alta con relación a la verde, además observa que el horizonte buza con sentido NW.

8.4.3.2. Mapa Near-C5

Mapa del Horizonte Near-C5, se observa la Falla A y comienzo de la Falla B en la parte más W, se observa que el intervalo en el cual se encuentra el horizonte es de 1390 a 1690 ms, que la aparte de rojo es la zona más alta y la morada la más baja, el horizonte buza al NW, se observan algunas estructuras o posibles cierres, entendienddo la importancia que tiene este Horizonte para el interés de hidrocarburo.

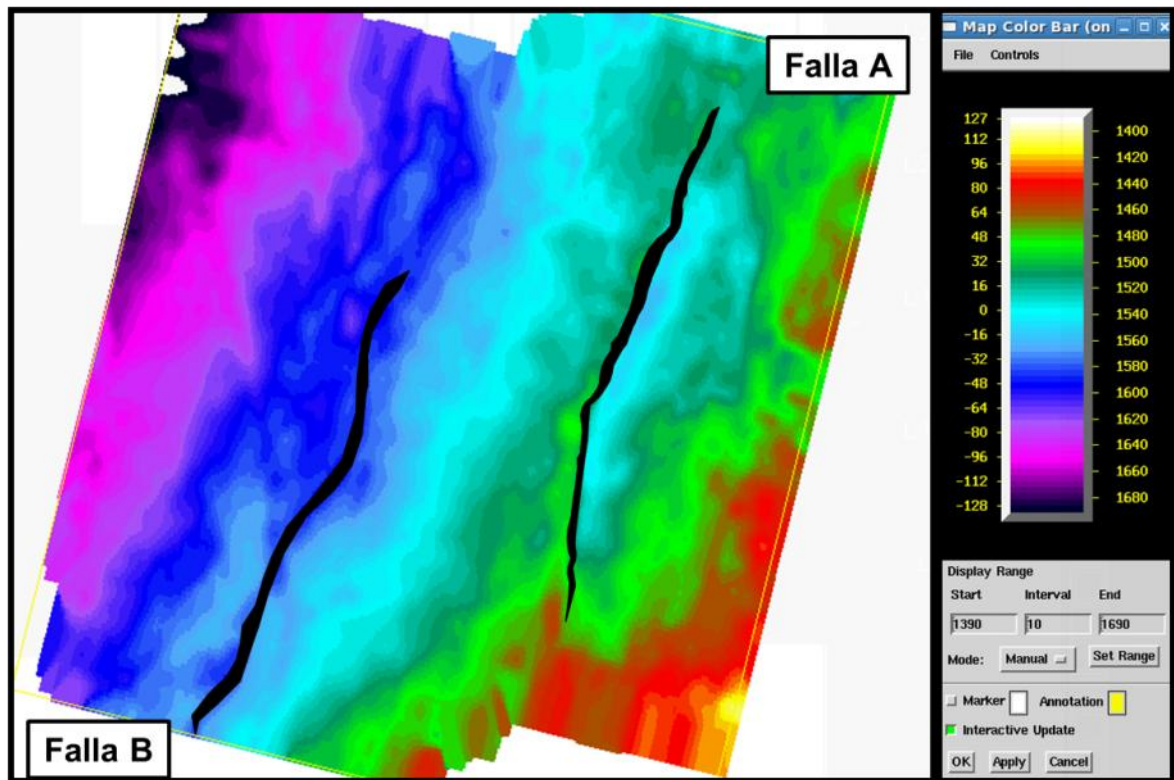


Figura 44. Mapa de Tiempo, tope NearC5, Intra-Carbonera, Se observa Falla A, que sube hasta superficie y aparece Falla B

Se observan algunos patrones de deslizamiento sentido NW inferidos por falla que de transcurrente que afectan la Falla B, esto se puede visualizar mejor en cuando se hable sobre la forma del basamento.

8.4.3.3. Mapa Near-C7

Mapa del Horizonte Near-C7, se observa en la **Figura 45** la falla A y Falla B y el intervalo en el cual se encuentra el horizonte es de 1390 y 1670 ms, aprecia mala resolución del mapa porque presenta un interpolación muy grande, existen muchas líneas en las que el horizonte no presentaba continuidad, entonces quedaban sin información para interpolar.

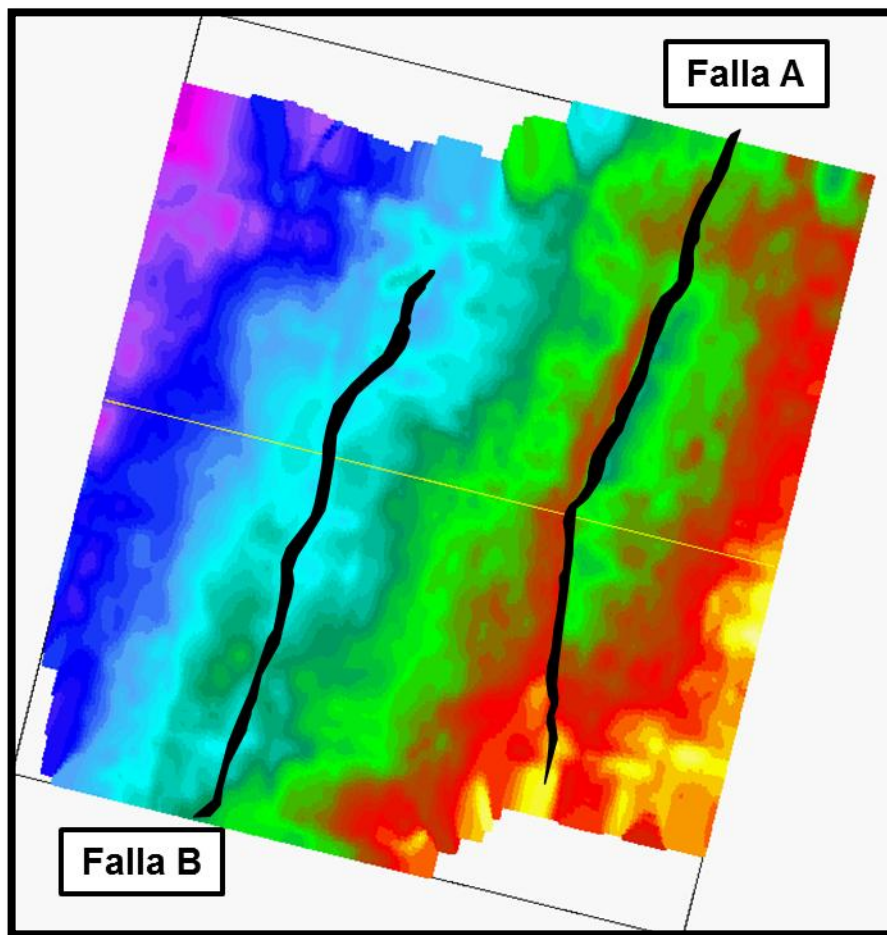


Figura 45. Mapa de Tiempo, tope Cnear7, Intra-Carbonera, Se observa Falla A, que sube hasta superficie y Falla B.

Este horizonte el primer objetivo del campo es un horizonte productor en los campos aledaños, presenta unas arenas de buena calibración que permite al almacenamiento de hidrocarburo, observa de buzamiento de sentido NW.

8.4.3.4. Mapa Tope Basamento

Mapa del Horizonte Tope-Paleozoico, se observa en la **Figura 46** la falla A y Falla B, el intervalo en el cual se encuentra el horizonte es de 1590 y 1760 ms, presenta una buena resolución del mapa se puede apreciar el salto de la Falla A, no se pueden apreciar cierres con las estructuras grande, esta interpretación se realizó cada 10 inlines y 5 Crosslines.

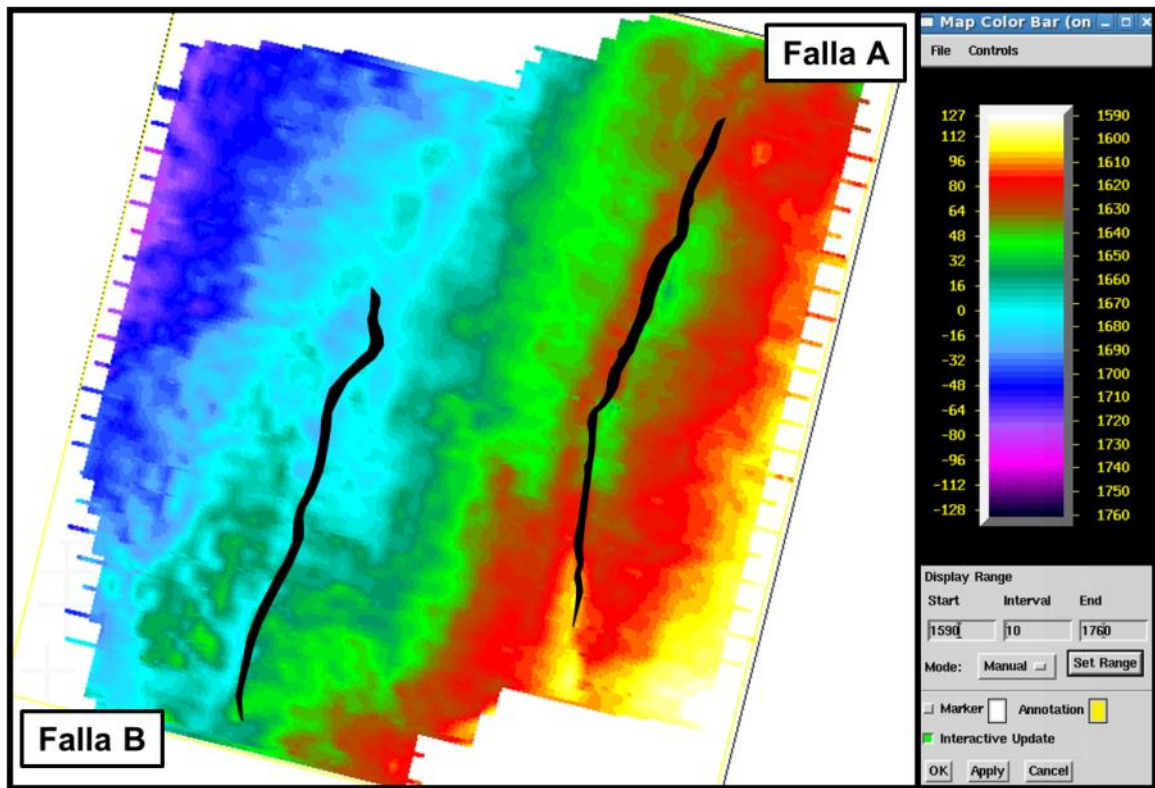


Figura 46. Mapa de Tiempo, tope Paleozoico, Se observa Falla A y Falla B.

Se observa hacia el E una mayor altura con relación al W, al mismo tiempo varios lineamientos con la Falla B, los cuales son fallas normales del paleozoico que mueren en su tope.

8.4.3.5. Mapa Intra-Paleozoico

Mapa del Horizonte Intra-Paleozoico, se observa que el intervalo en el cual se encuentra el horizonte es de 1800 y 2060 ms, se ve una mala resolución del mapa ya que la interpretación no se pudo realizar en las mayoría de las líneas entonces el programa suele interpolar todo con un promedio, no se aprecia muy bien la Falla A ya que se entiende que el contraste no es mucho ya que se encuentra en el mismo medio y la resolución a profundidad no lo permite, también se puede apreciar un pequeño salto de Falla B. en la **Figura 47**, que ayudó mucho a entender la anomalía que se observaba en la línea sísmica en la parte del paleozoico, deduciendo el alto estructural que presenta el paleozoico y la manera cómo afecta las falla en sentido NW – SE.

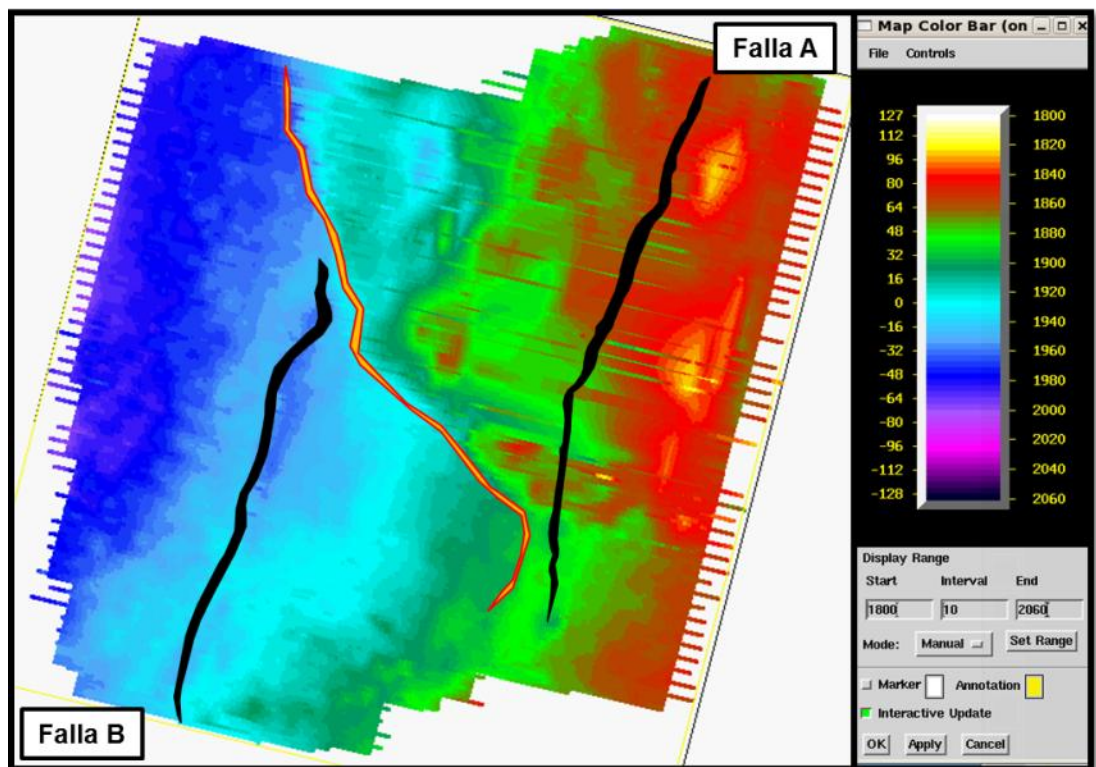


Figura 47. Mapa de tiempo, Intra-Basamento, se observa la Falla A, Falla B y el lineamiento que presenta el basamento en dirección NW.

8.5. ATRIBUTOS SISMICOS

8.5.1. Coherencia Sísmica

Como se habló anteriormente, para facilitar la interpretación de las fallas se hizo uso del atributo de Coherencia Sísmica, a través del cual se pudo realizar cortes en tiempo (time sílice) al volumen construido para la identificación de las fallas existentes. Con esta herramienta se logró corroborar la ubicación de las fallas identificadas e identificar fallas nuevas que no se podían observar en la sísmica. Se utiliza todo el volumen sísmico y se procesa la coherencia sísmica en los intervalos de interés como son C5, C7, Guadalupe y Paleozoico. De los cuales se experimenta desde lo más antiguo a lo más joven. Esto se visualiza mediante una línea sísmica diagonal que corta todo el bloque Figura 48 y 49.

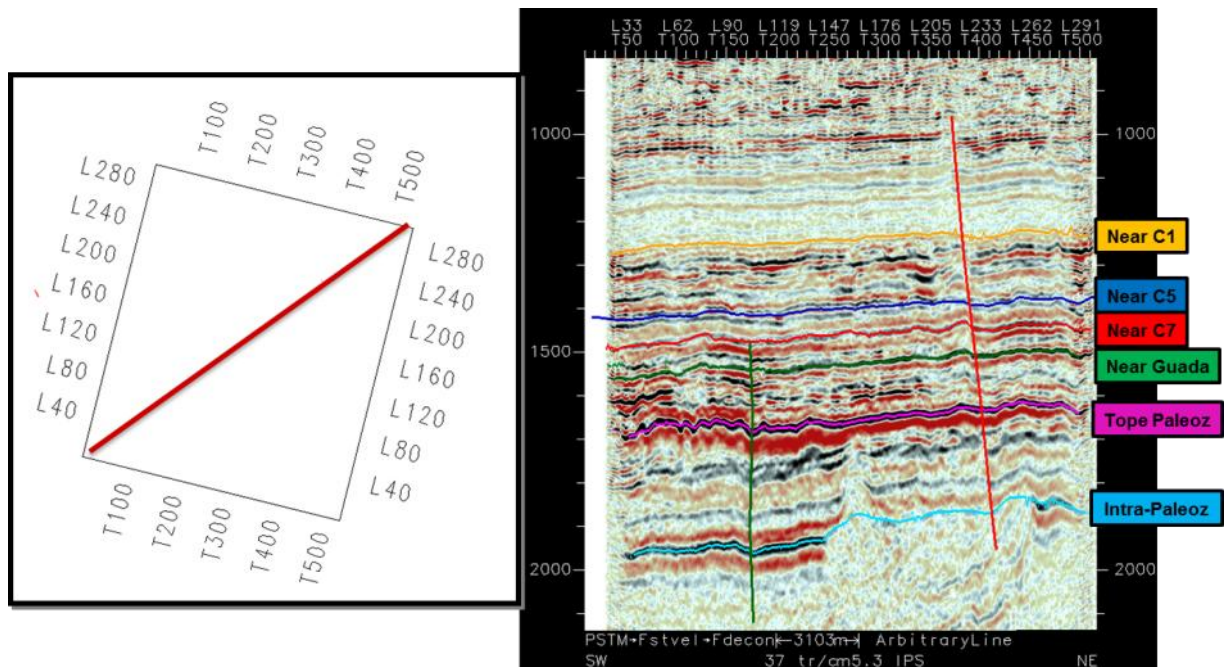


Figura 48. Línea diagonal del volumen sísmico con la interpretación de los horizontes, sin Horizontalisar.

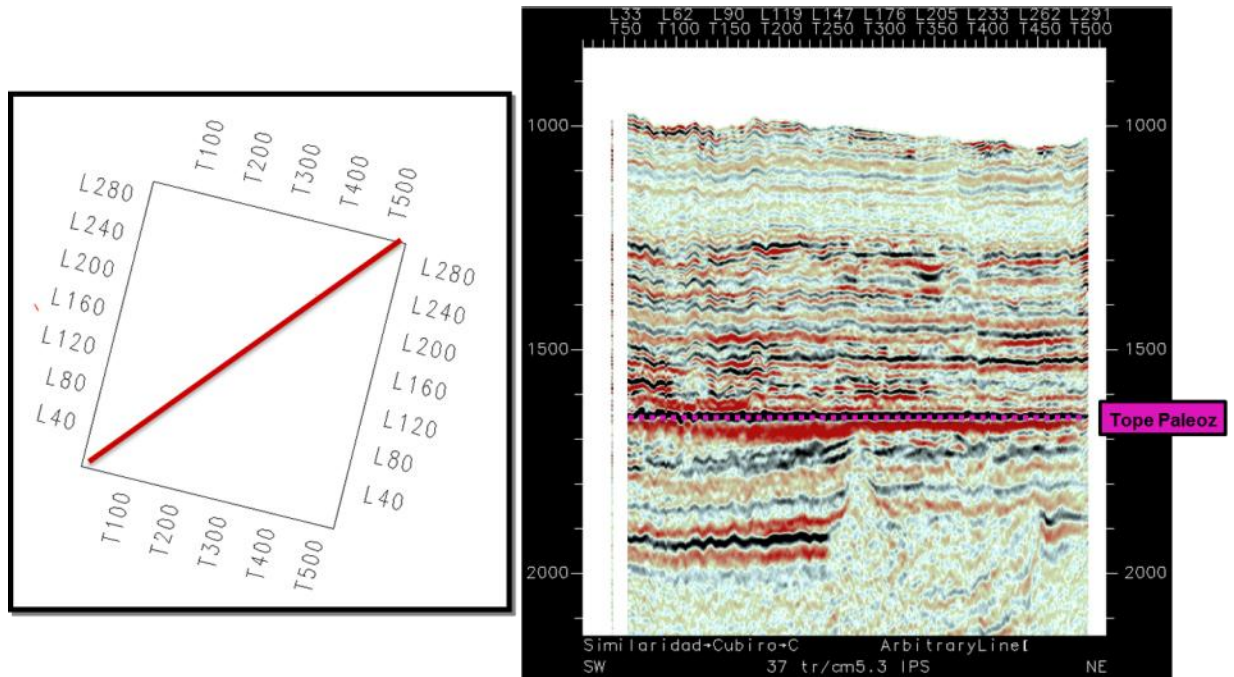


Figura 49. Línea diagonal del volumen sísmico con la interpretación de los horizontes, con Horizontalisar el Tope-Paleozoico de color Magenta.

En las **Figura 48** y **Figura 49** se quiere mostrar cómo se pueden trabajar con todos los horizontes interpretados, el Flatenizar un horizonte consiste en colocarlo horizontalmente basándonos del fundamento de que toda unidad sedimentaria fue depositada en forma horizontal, de esta manera podemos observar como unidad que homogeneidad tenían las unidades, los cambios que se producido durante el tiempo, los patrones de las fallas, forma de canales, entre otras cosas. Se pueden observar mejor los planos de falla y en este caso se quiere lograr ver como se encontraba el paleozoico cuando se comenzaron a depositar las primeras unidades Une, Ubaque y Guadalupe.

De igual manera en la **Figura 49** se puede observar la anomalía que presenta el paleozoico y que de alguna manera está controlando el bloque, se puede ver en la parte inferior un reflector fuerte que es truncado por un alto estructural de mala amplitud.

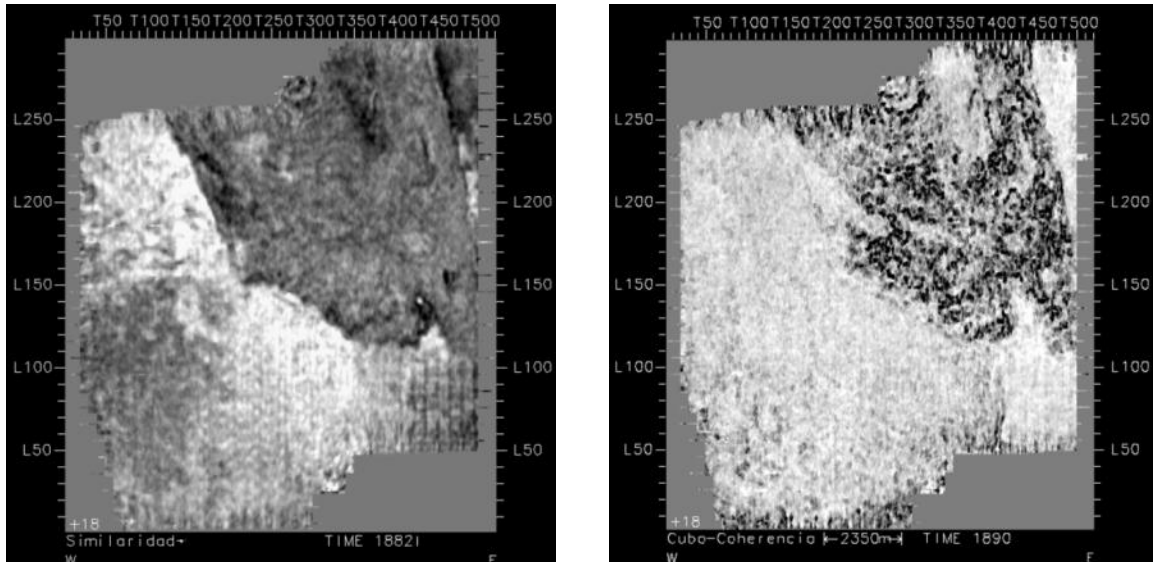


Figura 50. Corte de tiempo de 1882ms y 1890 ms a profundidad del Cubo de coherencia donde se puede apreciar el alto estructural en el Intra-Paleozoico.

En la **Figura 50** se aprecia el cubo de Coherencia con una escala de negro a blanco para poder asociar superficie de similitud entre la forma de las ondas o traza sísmica, se identifica de esta manera una zona de color gris a negro ubicada en la parte NE del bloque que presenta relieve de igual manera una zona de color blanco sin relieve y sin estructuras notorias. Se puede observar este cuerpo se extiende por fuera del bloque y que esta estructura se han identificado por toda la Cuenca de los Llanos Orientales.

Esto ayuda a imaginar que esta estructura ya existía cuando se comenzaron a depositar las primeras unidades de Los Llanos Orientales y que estas tuvieron que acomodarse de acuerdo a la geometría de esta estructura.

La idea es ver cómo se va comportando el cubo de coherencia y poder asociarlas con las líneas sísmicas interpretadas para ir correlacionando y verificando que lo interpretado no es ruido de la sísmica si no que realmente se está viendo un evento.

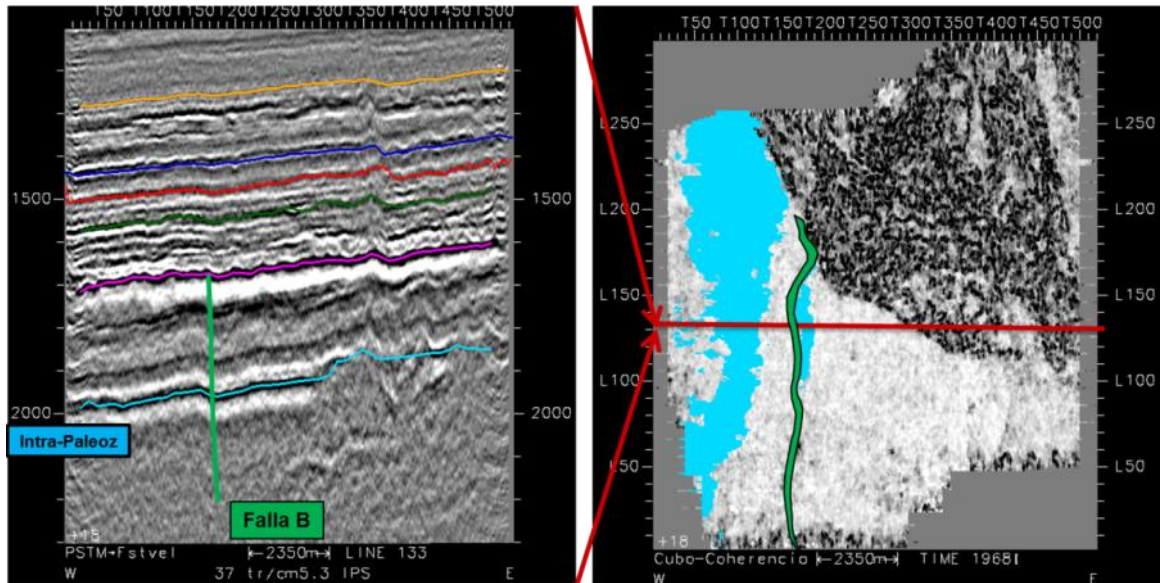


Figura 51. Línea inlines 133 y Corte a profundidad a 1968 ms del cubo de coherencia, horizonte Intra-Paleozoico de Color Azul interpretado con la Falla B. se aprecia el salto estructural.

En la **Figura 51** se observar al lado izquierdo la línea sísmica 133_ interpretada con todos los horizontes y al lado derecho el Corte a profundidad 1968 ms del Cubo de Coherencia donde se puede observar en la línea roja la ubicación de la línea sísmica.

En esta imagen se muestra como el horizonte Intra-Paleozoico se va depositando sobre el alto estructural del basamento, se puede ver que el horizonte entra en sentido W y se va moviendo hacia el E, esto se puede identificar como la dirección de depositación de igual manera se observa como el horizonte se trunca por la Falla B identificada de color verde en la línea sísmica, esta Falla muestra un salto en el horizonte y permite verificar su ubicación en el cubo sísmico, se puede deducir que es una Falla que comienza desde basamento y que es antigua.

EL Plano de Falla tiene Dirección NS y presenta sinusidad en su trayectoria, se extiende por todo el bloque y se logra identificar en los horizontes siguientes como lo es Tope – Basamento.

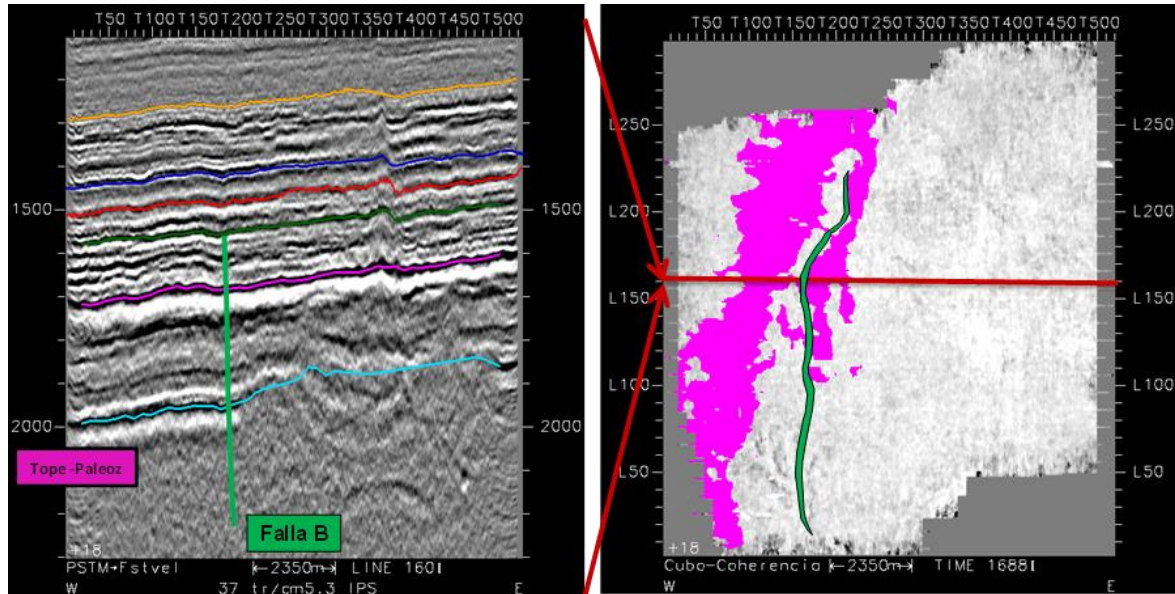


Figura 52. Línea inlines 160 y Corte a profundidad a 1688 ms del cubo de coherencia, horizonte Tope - Paleozoico de Color Magenta interpretado con la Falla B. se aprecia el salto estructural.

En la **Figura 52**, observa a la derecha la línea sísmica 160 con la interpretación y al lado derecho el corte a profundidad 1688 ms del cubo de coherencia, en esta imagen se puede observar como desaparece el alto estructural y el cubo de coherencia muestra una superficie clara la cual podemos se puede interpretar como una superficie de trazas homogéneas o de muy poco cambio en la las ondas sísmicas.

En este caso el horizonte es continuo en la línea sísmica y se puede interpretar en todo el volumen sísmico, se observa en el cubo de coherencia el salto que sufre este horizonte cuando pasa por el plano de falla y que de igual manera como el horizonte anterior Intra-Paleozoico este se deposita en dirección WE.

Se realizó seguimiento del horizonte por todo el volumen sísmico y se pudo observar el comienzo de Falla A, esto se aprecia en la **Figura 53**.

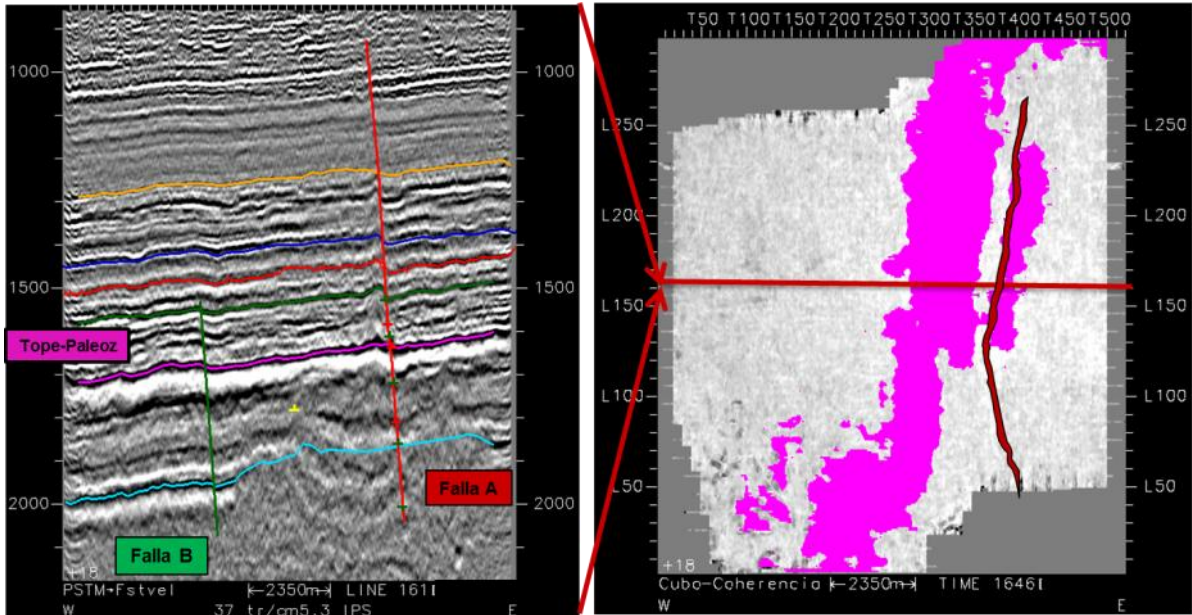


Figura 53. Línea inlines 161 y Corte a profundidad a 1646 ms del cubo de coherencia, horizonte Tope - Paleozoico de Color Magenta, aparece por primer vez la Falla A de color Rojo.

En la **Figura 53**, se puede observar el horizonte como es afectado por la Falla A, de color Rojo interpretado en la línea sísmica 161 y en el cubo de coherencia a una profundidad de 1646 ms.

Se observa como el horizonte se mueve en sentido E y al llegar al plano de falla es afectado por este. En la Falla A se encuentra el Pozo_C, EN el cual se utilizó los registros para hacer el Sismograma Sintético y poder calibrar la sísmica.

Se analizó con la sísmica la Falla A presenta en la zona Norte del Bloque un mayor salto y no es tan vertical, en cambio en la zona Sur se comporta vertical y con poco salto, esta falla presenta una zona de anisotropía en el centro donde cambio ligeramente de dirección.

Hasta el momento el cubo sísmico ha permitido identificar y verificar la ubicación de las fallas y observar mejor el alto estructural que presenta el paleozoico, esto ayuda a reconstruir como se depositaron las unidades interpretadas y cuanto se han deformado.

Esta metodología se utilizó en el todo el cubo sísmico y cada horizonte interpretado, concluyendo lo siguiente:

- La Falla A es una falla normal en dirección NE la cual comienza desde el tope del paleozoico y se prolonga hasta las Formación León, presenta un quiebre en la parte centran donde cambia ligeramente de sentido y se comporta más vertical, esta falla es la trampa de interés de este bloque ya que permite un buen cierre estructural de los Horizontes NeraC5 y NearC7.
- La Falla B es una falla normal de dirección NE nace desde el Paleozoico y se extiende hasta la Formación Guadalupe donde al parecer se mantiene inactiva, es una falla muy antigua, que no logra generar cierre en los horizontes de interés, por ahora no es considerada una trampa para la Formación Carbonera, posiblemente si para el Cretácico.
- Es bueno resaltar que el Horizonte tope Guadalupe, es una zona de discordancia en la cual existe una pérdida de registro estratigráfico de las Formaciones Barco – Cuervo y Mirador. Se tiene la idea que estas unidades posiblemente no llegaron a depositarse en esta zona o si lo hicieron fueron erosionadas. Ver **Figura 39**.
- Se observaron canales en los horizontes NearC7 de dirección SE, **Anexo 5**, algunos con brazos ocasionados por el rompimiento del dique o barrera, estos canales son estas controlados por la Falla A y se entienden que son las primeras evidencias de las superficies de inundación total, eventos

relacionados con el aumento del nivel del mar. Que permitieron la depositación de las arenas.

- De igual manera se observó en el Horizonte NearC5 3 canales de dirección SE Anexo como cause el plano de Falla A Ver **Anexo 6**, estos canales presentan menos transporte de sedimentos en relación a los observados en NearC7, son más delgados y no presentan rompimiento de dique y no presentan comportamiento de meandro. Esto se observa a profundidades de 1530 ms a 1386 ms.
- Posteriormente a una profundidad de 1332 ms en el Cubo de Coherencia Ver **Anexo 7**, se observan 3 canales de gran caudal, en dirección WE, que atraviesan todo el bloque, algunos con bahías aisladas de anteriores canales abandonados, se observa que el plano de falla está siendo traspasado por los canales y no genera ningún patrón en ellos.
- La depositación de NearC1 ocurre durante la inundación de estos canales, este es el último registro del evento de transición marino a donde se tiene un ambiente de intercalado por secuencia arcillosa, con arenas carbonatadas.

9. CONCLUSIONES

- Se confirma el modelo estructural del Bloque, se identifica la Falla normal con dirección NS, con bloque levantado hacia la cuenca, con cierre estructural en los horizontes C7 y C5.
- Se Interpretó las unidades del Terciario (Formación Carbonera) y Cretácico (Formación Guadalupe), utilizando los registros del Pozo_C y logrando la calibración de este con el volumen sísmico.
- Se identifica una pérdida de registro estratigráfico de las Formaciones Cuervo, Barco y Mirador, acuñándose antes de llegar a esta zona de la Cuenca.
- Se determina mediante el uso de atributos sísmicos la existencia de canales, meandros abandonados durante la depositación de la Formación Carbonera, esto ayudó a concluir un ambiente lacustre.
- Se realizó un mapa Z-map para calcular el área del prospecto, se identificó un cierre estructural con la Falla A con el Horizonte C7, el cual es de 71.902 acres.

BIBLIOGRAFIA

ANH., Columna Estratigráfica Generalizada, Modificada por Área de Exploración, PRE. 2010.

AYONK, D., Y ROBERT, S., 1997. Predicting density using VS and Gardner's relationships.

BROWN, A. 2001. Fifth Edition, Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data, AAPG.

BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., MARTINEZ, J., 2007. Colombia Sedimentary Basins. Colombia, ANH.

BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C., MARTINEZ, J.F. (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Bogotá.

BERNAEZ, A. 2010 Interpretación Sísmica 3D estructural. Venezuela.

CABAÑAS, M., 1996. Interpretación Geológica de Sismogramas Sintéticos. Un ejemplo Aplicado al Sondeo Rio Segura G-1.

CEDIEL, F., HILDEBRANDO LEAL – MEJIA, ROBERT, P. SHAW AND JOAN C. MELGAREJO. 2012., Petroleum Geology of Colombia. ANH.

COOPER, M., ADDISON, F., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J.S PEÑAS, R., PULHAM, A., Y TABORDA, A. (1995). Basin Development and tectonic history of the Llanos Basin, eastern cordillera and middle Magdalena valley, Colombia. AAPG.

CHOPRA, SATINDER, Arcis Corporation, Calgary, Canada; and KURT MARFURT, Seismic attributes on frequency-enhanced seismic data. The University of Oklahoma, Norman, USA. 2008.

ECOPETROL, ICP, GER. 2000. Modelo estratigráfico Llanos y Piedemonte.

ECOPETROL. BEICIP, F., 1995. Estudio Geológico Regional, Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia.

GARCIA, M., MIER, R., CRUZ, L., VASQUEZ, M., 2009. Informe Ejecutivo Evaluación del Potencial Hidrocarburífero de las Cuencas Colombianas.

GIL, C., Selección de los mejores atributos sísmicos para la estimación de propiedades de yacimientos: Aplicación de la Teoría de Información. Trabajo de Grado, Universidad Simón Bolívar. 2005.

HENAO, M. Y MOLINA, D. Evolucion Geologica de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia. Bogota. Universidad Nacional de Colombia. 2010.

HERRERA, Y., COOPER, N. Manual para la Adquisicion y Procesamiento de Sismica Terrestre y su Aplicaciones en Colombia. ANH. 2008.

INGEOMINAS, 2001. Mapa Geológico del Departamento del Meta, Memorias Explicativa. Bogotá.

JIMENEZ, G., et al 2008. Sedimentary facies and geochemical parameters for upper Paleocene interval: Casanare-Arauca transect (Llanos foothills, Colombia). Bol.geol., july/dec. 2008, vol.30, no.2, p.13-20. Issn 0120-0283.

JUSTINIANO, A., 2007. Proyecto de Grado, Adquisición y Procesamiento de Datos Geofísicos, San Cristóbal 05G-3D. Universidad Simón Bolívar.

MARFUR, K., CHOPRA, S., 2007. Seismic Attributes for prospect identification and reservoir characterization. SEG Geophysical developments series. M 11, Tulsa. OK. USA.

MORALES, C., 2010. Integración de la Cartografía Geológica de los Llanos Orientales: Departamento del Meta y sector suroccidental del Departamento de Casanare, Planchas 248, 249, 250, 251, 252, 267, 268, 270, y 271.

OLSHASKIY, A., KUZMIN, E., 2006. Informe Final de procesamiento e Interpretación.

REGUEIRO, J., 2007. Sísmica para Ingenieros y Geólogos. El método sísmico de Reflexión.

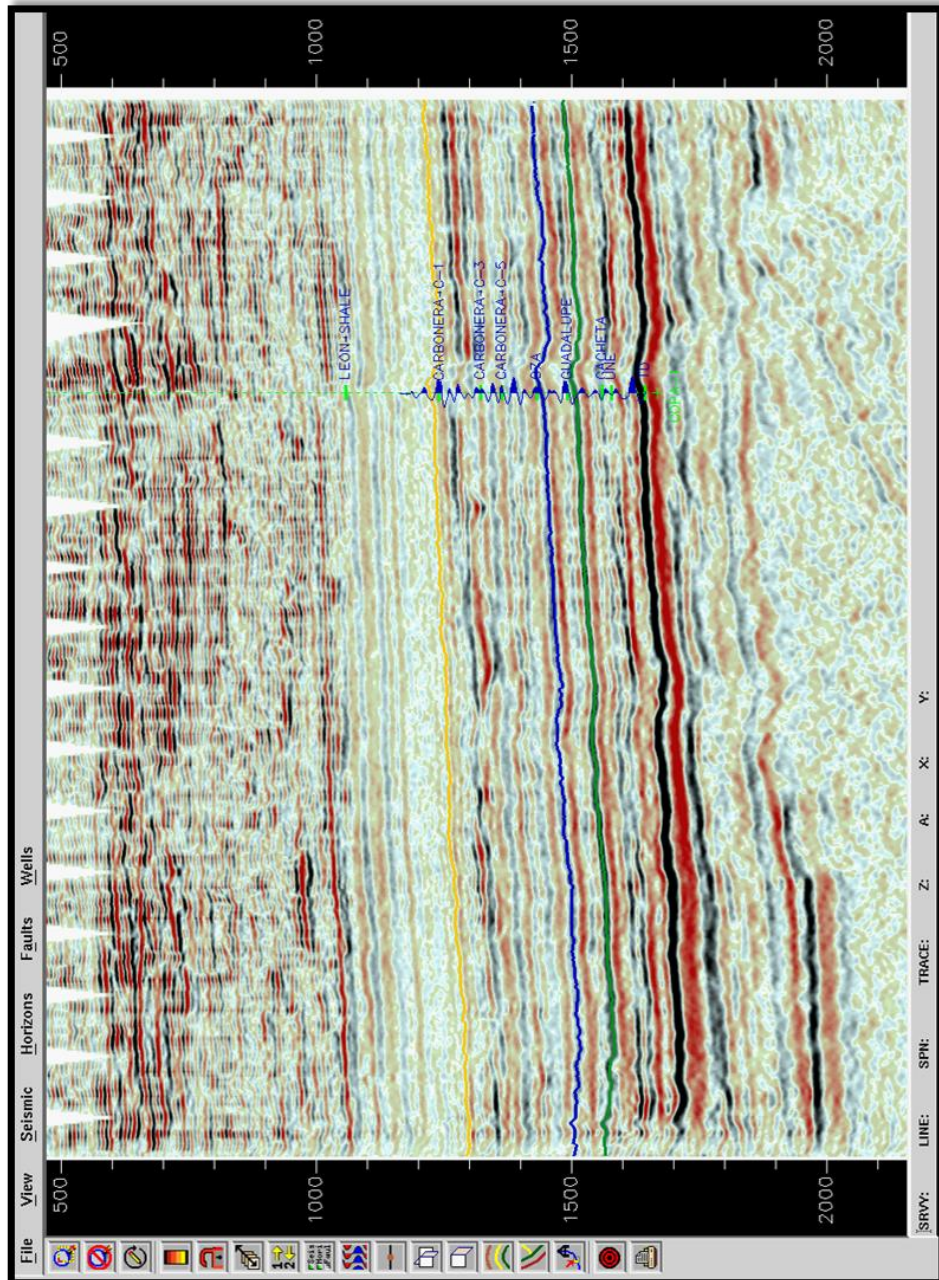
VARGAS, C., Características Cuencas De los Llanos Orientales y Descripción de Bloques. Ronda 2008.

VARGAS, C., 2009, Nuevos aportes a la estimación del potencial de Hidrocarburos en Colombia.

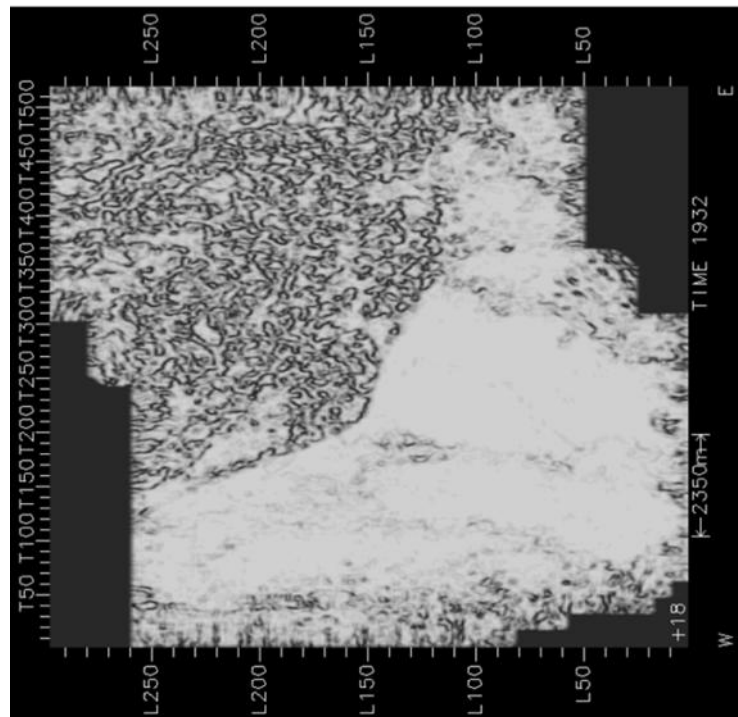
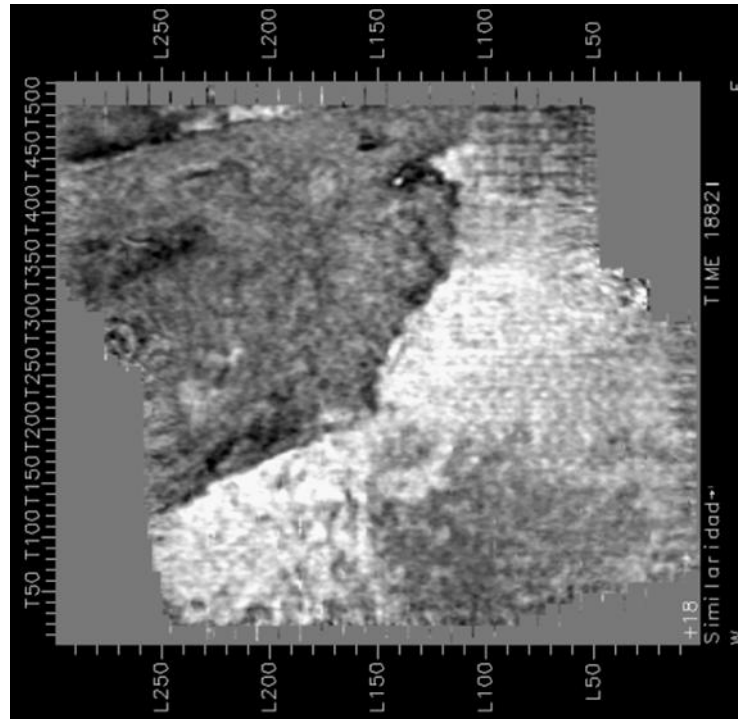
CONFIDENCIAL

DOUGLAS, J., CARSTED, P., PHILIP, W., PANTELLA, P., Evaluation Of The Oil Reserves And Estimate Of The Prospective Resources Of Remora Energy International LpIn The Cubiro Block, Llanos Basin, Colombia. SPROULE: 2012.

ANEXOS

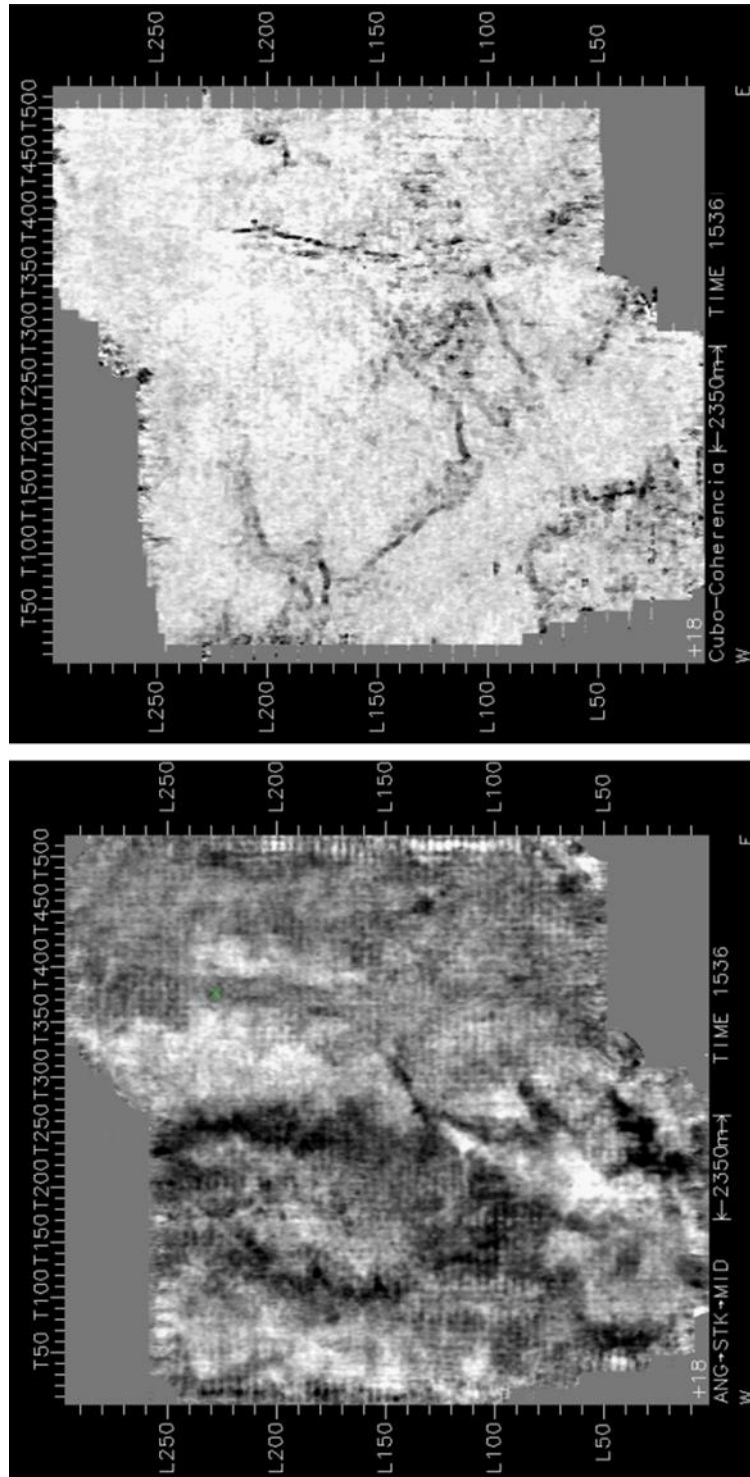


ANEXO 1 Línea sísmica 2D donde se puede observar la calibración del Pozo_C con la sísmica.

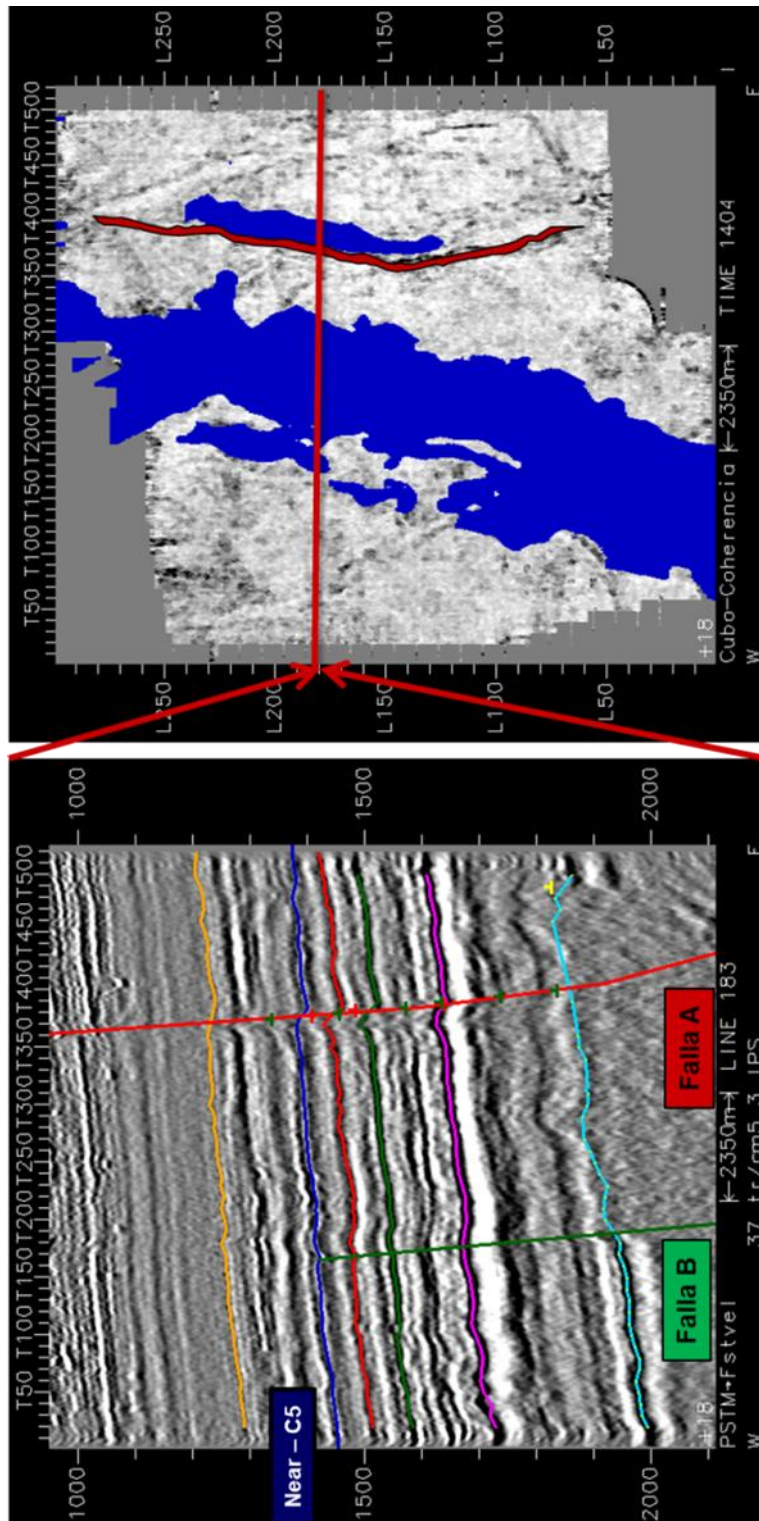


ANEXO 2 Corte a Profundidad 1938 ms del cubo de coherencia, Paleozoico.

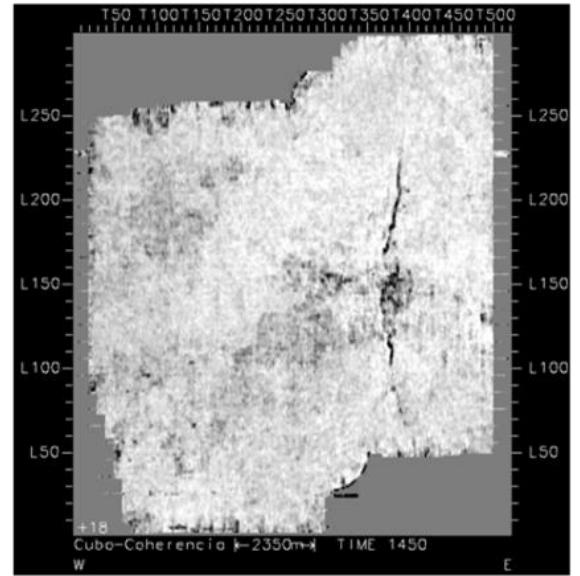
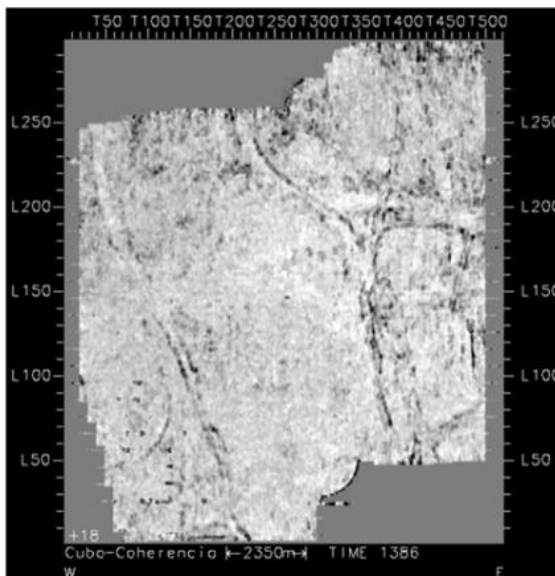
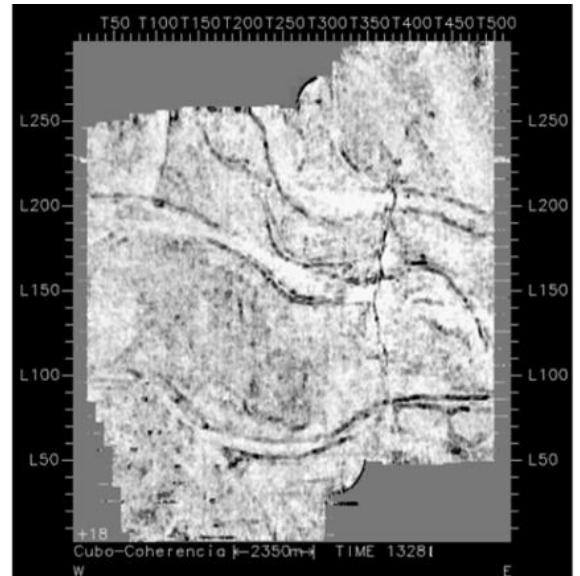
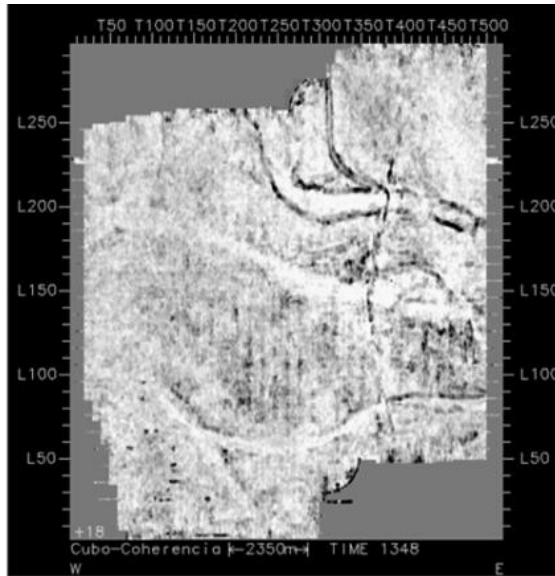




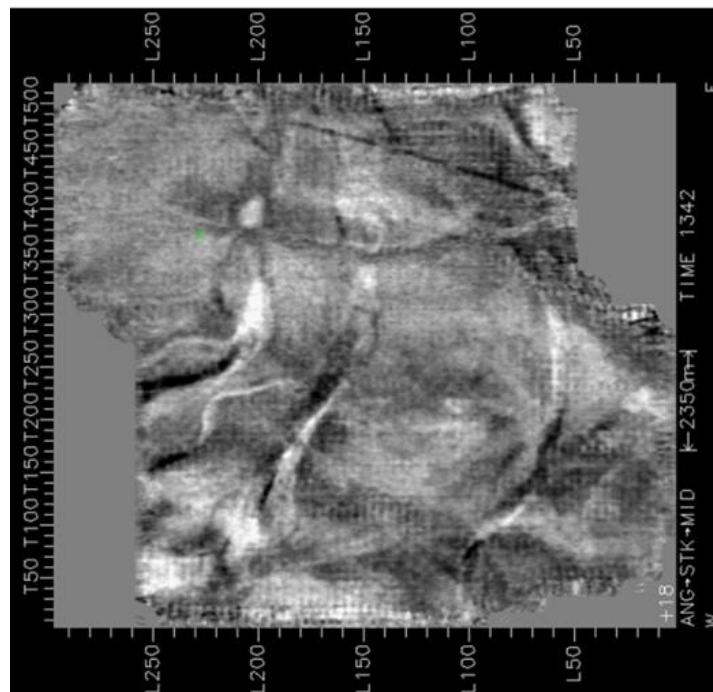
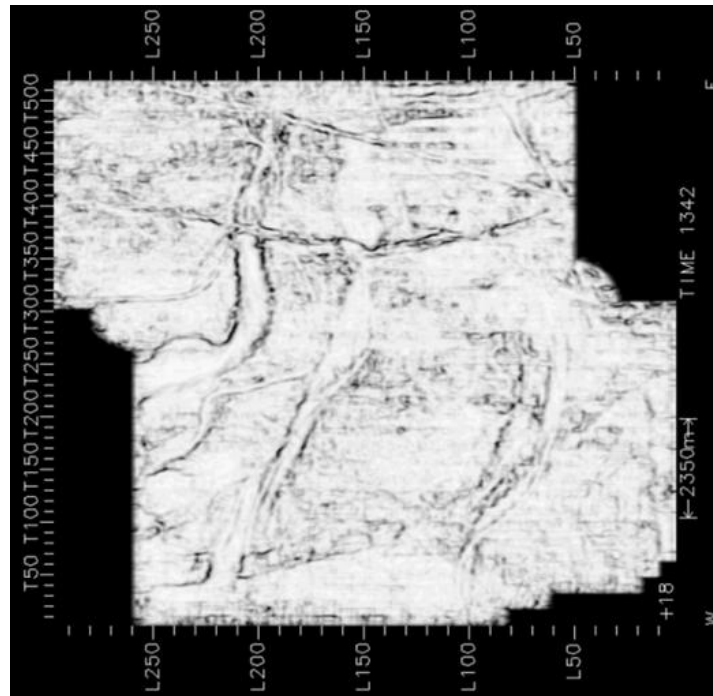
ANEXO 3 Corte a profundidad 1536 ms del Cubo del coherencia, gran canal con dirección SE



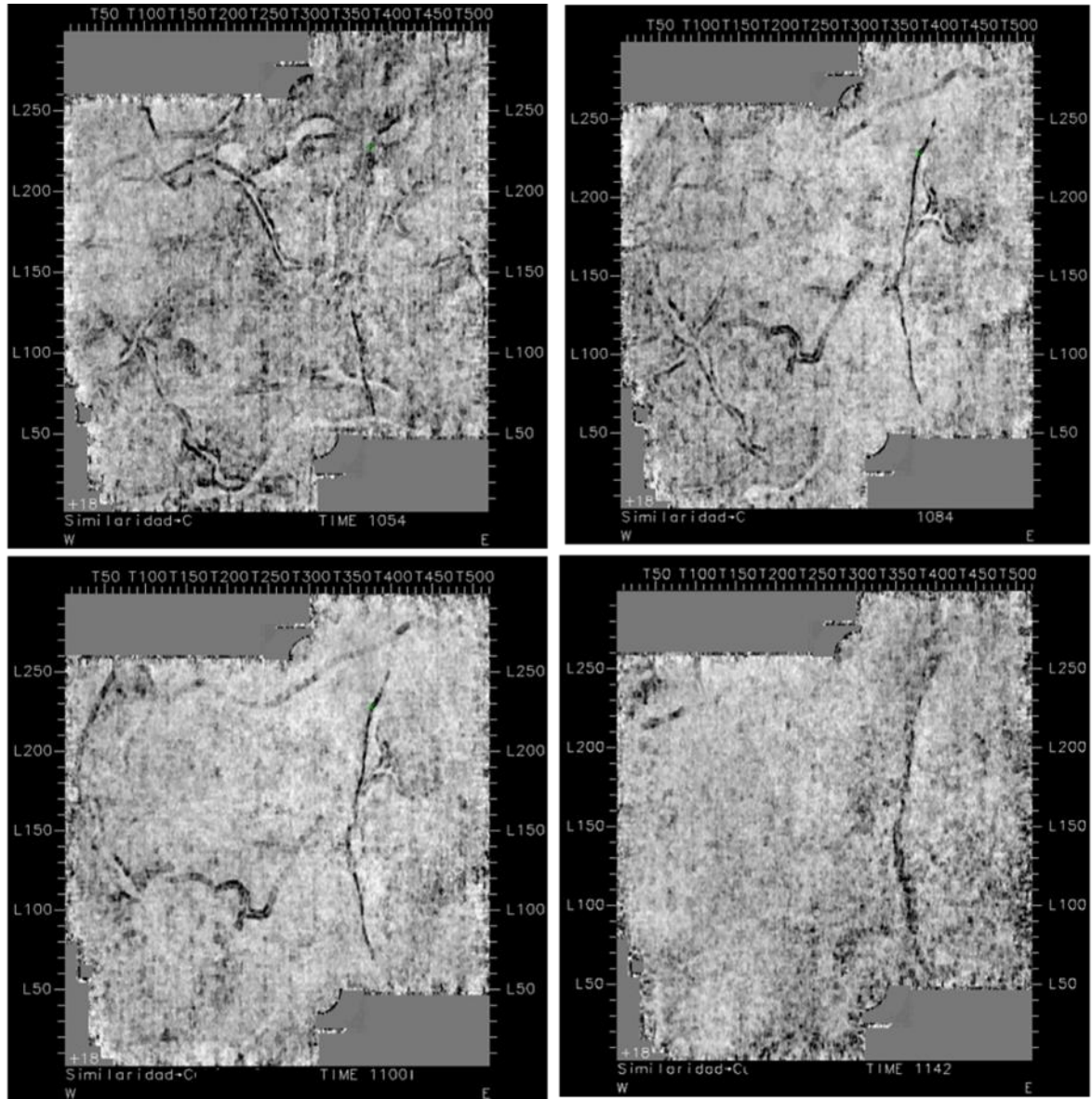
ANEXO 4 Línea inlines 183 y corte a profundidad a 1404 ms del cubo de coherencia, horizonte Near C5 de Color Azul, donde se observa el salto de la falla A.



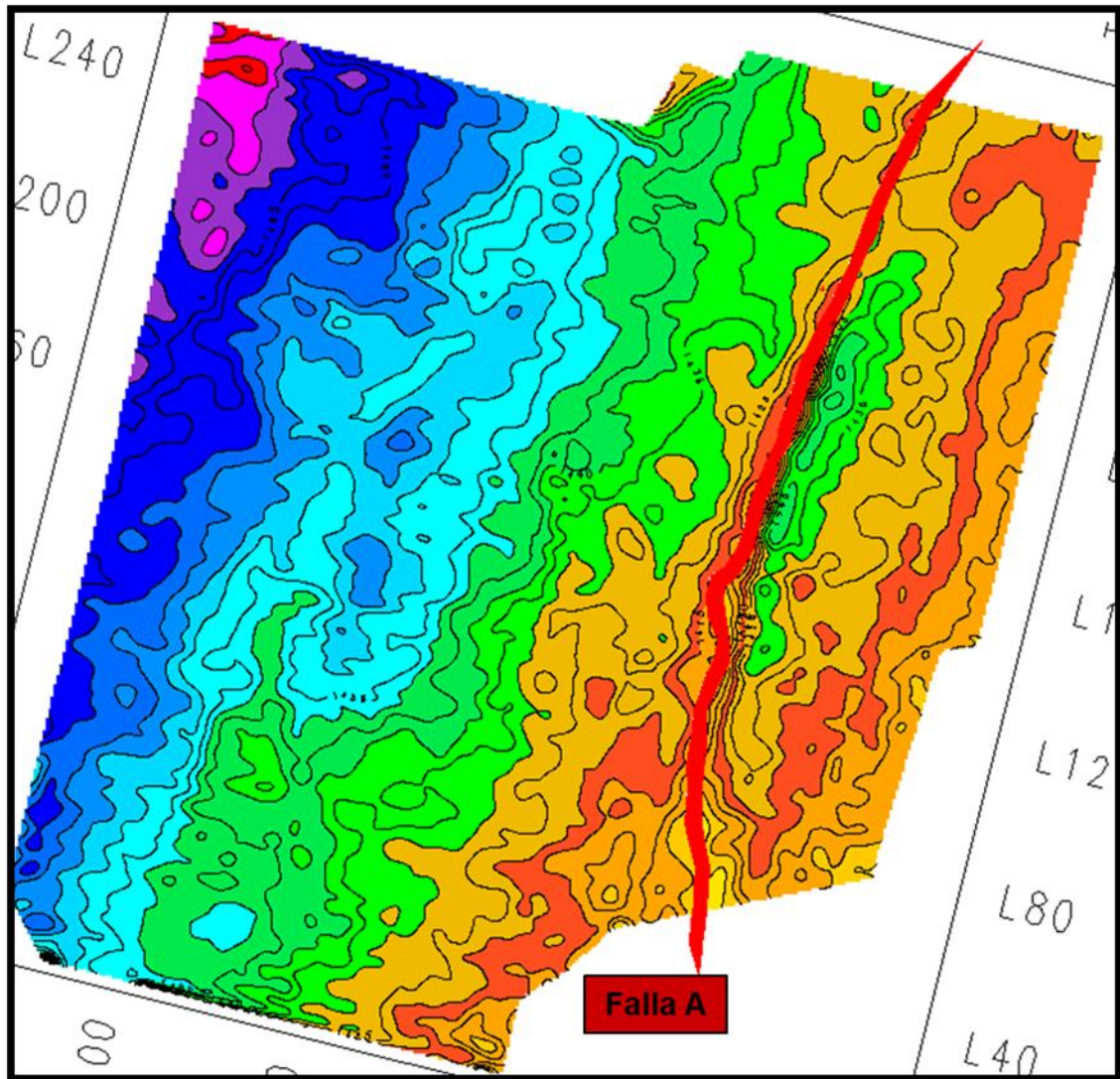
ANEXO 5 Corte a profundidad 1348 ms, 1328 ms, 1386 ms y 1450 ms, Donde se aprecia el cambio de dirección de los canales.



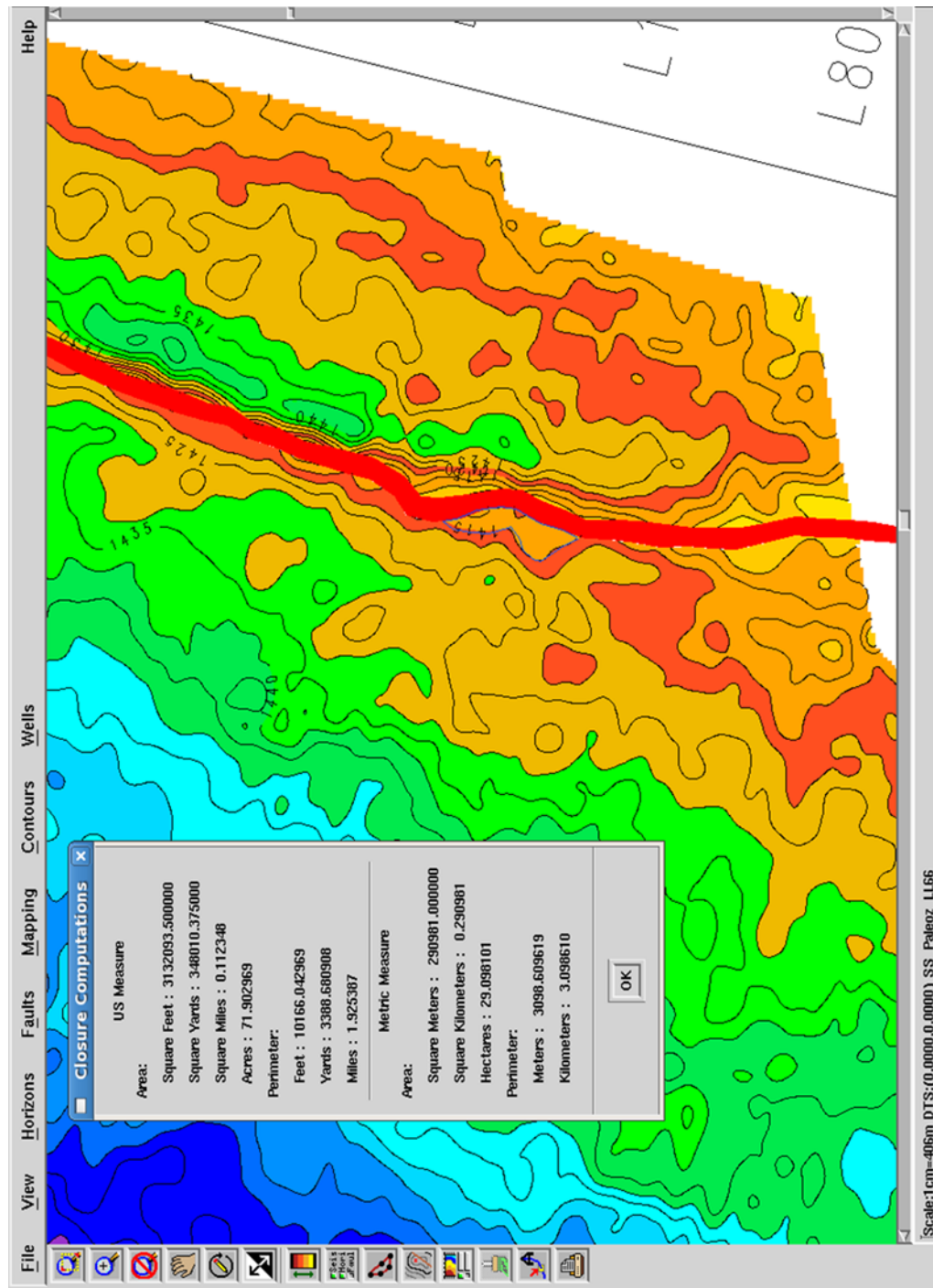
ANEXO 6 Corte a profundidad 1342 ms, del cubo sísmico procesado y el cubo de coherencia donde se puede apreciar los canales antes de la deposición de los Horizontes Near C1.



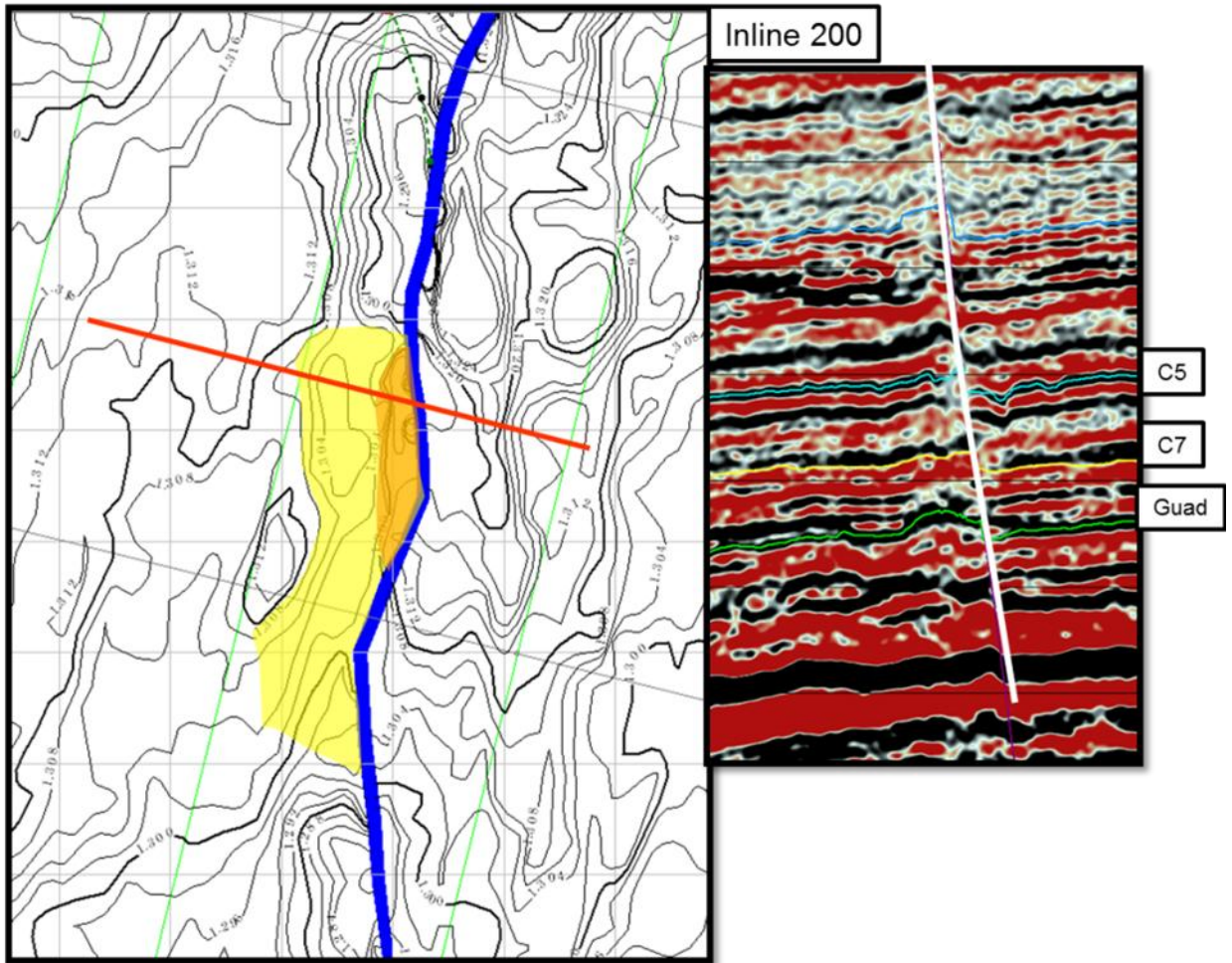
ANEXO 7 Corte a profundidad 1054 ms, 1084 ms, 1100 ms y 1142 ms, donde se aprecia el ultimo registro del evento de transicion y el cambio de la formacion carbonera a la formacion León.



ANEXO 8 Mapa de Horizonte Nera C7, realizado en Z-map, donde se puede apreciar los contornos en cada 5 ms, contiene la falla A, trampa de interés.



ANEXO 9 Zoom Mapa del Horizonte NearC7, Cargado en SeisWorks, donde se observa el cierre estructural y su área en acres. 71.902 Acres.



ANEXO 10 Inline 200 donde se puede observar la zona de interés y su área respectiva, NearC7 es el objetivo principal y NearC5 secundario.