TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS SÍSMICOS 3D TERRESTRES DEL PROYECTO BARINAS ESTE 07G 3D, BARINAS-VENEZUELA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rumbos R. Gerardo A.
Para optar a Título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, febrero 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS SÍSMICOS 3D TERRESTRES DEL PROYECTO BARINAS ESTE 07G 3D, BARINAS-VENEZUELA

TUTOR ACADEMICO: Ing. José Cavada

TUTOR INDUSTRIAL: Msc. Hugo Cerquone

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rumbos R. Gerardo A.
Para optar a Título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, febrero 2014

Caracas, Febrero 2014

Los abajo formantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de grado presentado por el Bachiller Gerardo A. Rumbos R., titulado:

"EFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS SÍSMICOS 3D TERRESTRES DEL PROYECTO BARINAS ESTE 07G 3D, BARINAS-VENEZUELA"

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

Prof. Vincenzo De Lisa

Jurado

Prof. Juan J. Infante

Jurado

Prof. José Cavada

Tutor Académico

DEDICATORIA

A mis padres, hermanas y abuelos
en quienes encontré apoyo sincero
A Dios y a Jesús

AGRADECIMIENTOS

A Tricon Geophysics de Venezuela y PDVSA por ofrecer la oportunidad de utilizar sus equipos y contar con su personal realmente experimentado.

Al profesor José Cavada por brindarme su colaboración en todo momento, Gracias!

Al Ingeniero Hugo Cercquone, Ingeniero Dimas Luna, Ingeniero Luis Rodríguez, Ingeniero Marcos Grossi, Señor Bernardo Briones, Ingeniero Norberto Padrón y Señora Yaquelin estoy agradecido por brindarme su apoyo.

A mis compañeros y amigos por complementar esta gran etapa universitaria; Iván, Ramón, Rafael, Jaime, Amaury, Willam, Katiuska, Verónica, a todos Gracias!!

A mis hermanos Adrián y Joseph.

ÍNDICE GENERAL

		pp.
LISTA DE TABLAS		ix
LISTA DE FIGURAS		x
RESUMEN		xv
INTRODUCCIÓN		1
CAPÍTULO		
I	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
	1.1 El problema de la investigación	3
	1.2 Objetivos de la investigación	5
	1.3 Justificación	6
	1.4 Ubicación de área de estudio	6
	1.5 Estudios geofísicos anteriores	9
II	MARCO GEOLÓGICO	11
	2.1 Eventos tectónicos influyentes en la formación de la cuenca Barinas-Apure	11
	2.2 Geomorfología de la cuenca Barinas-Apure	12
	2.3 Sistemas petrolíferos de la cuenca Barinas-Apure	13
	2.4 Formaciones geológicas	14
III	MARCO TEÓRICO	21
	3.1 Sísmica de reflexión	21
	3.2 Principios básicos	21
	3.3 Sísmica 3D terrestre	25
	3.4 Procesamiento sísmico	26
	3.5 Ordenamiento de datos por CMP	28
	3.6 Análisis de velocidad	29
	3.7 Corrección por NMO	31
	3.8 Apilamiento por CMP	32

3.9 Difracción…… 32
3.10 Migración sísmica…….. 35
3.11 Migración 3-D…… 36
3.12 Tipos de migración…… 39
3.13 Principios de la migración…… 42
3.14 Migración de Kirchhoff…… 43
3.15 Apertura de migración…….. 44
IV METODOLOGÍA……. 49
4.1 Fase I: información previa……... 50
4.2 Fase II: migración post apilamiento……. 55
4.3 Fase III: suavizado del cubo de velocidad……... 70
4.4 Fase IV: migración pre apilamiento……. 73
4.5 Fase V: comparaciones…… 75
V RESULTADOS Y ANÁLISIS……. 77
5.1 Apilado sin migración…….. 77
5.2 Pruebas de ruido…….. 81
5.3 Migraciones post apilamiento…….. 86
5.4 Apertura cónica vs cilíndrica……... 90
5.5 Suavizado del modelo de velocidad……. 92
5.6 Migración pre apilamiento vs migración post apilamiento……. 102
5.7 Migración óptima vs apilado inicial…… 108
5.8 Migración CGG Veritas vs migración óptima…… 114
VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…… 122
REFERENCIAS……. 125
ANEXOS…….…….…... 128
A Instrumento de recolección de información: Opinión de expertos…. .. 129
B Imágenes sísmicas sin migrar vs imagines símicas migradas…… 132

C Imágenes símicas migradas correspondientes al inline 982 CGG Veritas- Tricon Geophysics…… . 135

D Migraciones pre y post apilamiento (inline_982)…….. 138

E Migraciones pre y post apilamiento (inline_952)…….. 141

F Imágenes símicas del inline 982, de 1,25 a 2,50 s aplicando diferentes aperturas y ángulos……. 144

LISTA DE TABLAS

TABLAS		pp.
1	Parámetros……	51
2	Total de migraciones aplicadas……	70
3	Comparación cualitativa de parámetros entre migración pre apilamiento y post apilamiento.....	107
4	Comparación cualitativa de parámetros entre migración post apilamiento y apilado sin migración (ASM)……	112
5	Comparación cualitativa de parámetros entre migración Post Stack y CGG Veritas……	121

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		pp.
1	Ubicación relativa del proyecto Barinas Este 07G 3D……..	7
2	Localización del proyecto Barinas Este 07G 3D en mapa topográfico.	8
3	Mapa de elevación dentro del área del proyecto Barinas Este 07G-3D.	9
4	Mapa de anomalía de Bouguer; cuenca Barinas y cordillera de los Andes ……	10
5	Sección NO-SE de la cuenca Barinas-Apure ……	12
6	Sección S-N de la cuenca Barinas-Apure, el proyecto de adquisición se ubica hacia la parte norte del perfil ……...	15
7	Sección S-N de la cuenca Barinas-Apure……..	16
8	Frente de ondas y rayos. .……...	22
9	A la izquierda, un bosquejo de un sinclinal en profundidad y su efecto en los rayos sísmicos. A la derecha se muestra la apariencia en una sección sísmica en tiempo.……	23
10	Principio de Huygens…….**.....**	24
11	(a) Datos sísmicos adquiridos en el dominio del *shot gather*, (b) datos sísmicos ordenados por CDP. ……...	28
12	CMP *gather* con su espectro de velocidad correspondiente……..	30
13	Difracción causada por el borde de una falla…….	33
14	Superposición de respuestas a cero-offset (b) de un numero de fuentes secundarias de Huygens (a)……...	33
15	Anatomía de una curva de difracción……	34
16	Punto de reflexión…….	35
17	(a) Hipérbola de difracción en tres dimensiones, (b) proceso de migración 3D……..	38

18	(a) Sección geológica, (b) migración del segmento C´D´ a su verdadera posición CD en la sección en tiempo……	42
19	Hipérbolas de difracción, (a) bajas velocidades (2000 m/s), (b) altas velocidades (4000 m/s), (c) variación vertical de la velocidad. La apertura de migración es pequeña para cortas velocidades y grande para altas velocidades…….	45
20	Apertura de migración……...	46
21	Prueba realizada con diferentes aperturas de migración de Kirchhoff. Aperturas de migración insuficientes causan falsos eventos horizontales en profundidad. Parte ruidosa de la sección apilada……..	47
22	Distribución del proyecto Barinas Este 07G 3C……	52
23	Área enmarcada para realizar la migración post apilamiento……	53
24	Área enmarcada para realizar la migración pre apilamiento……..	54
25	Mapa de cobertura……..	55
26	Flujograma final del trabajo aplicado a los datos sísmicos para cargarlos a la base de datos de Focus 5.4……...	56
27	Flujograma de trabajo empleado para cargar el cubo de velocidad…...	57
28	Cubo de velocidad en tres dimensiones…….	59
29	Cubo de velocidad en dos dimensiones inline……...	60
30	Inline 953, gráfico de frecuencias, difracciones encerradas en cuadros rojos…….……	62
31	Prueba de ruido usando ángulo de 45° y apertura 3000 m……	63
32	Flujograma de trabajo……	64
33	Valores de entrada para Tsunami……...	66
34	Parámetros para aplicar la migración…….	66
35	Headers correspondientes al formato SEG-Y……	67

36	Geometría……..	67
37	Output…….	68
38	Flujo de trabajo para cargar los datos desde Tsunami a Focus…….	69
39	Edición del modelo de velocidad……..	70
40	Velocity scaling (izquierda), funciones de tiempo y velocidad (derecha)…….	72
41	Flujo de trabajo usado para cargar los gathers……..	73
42	Gather 1476411, contenido de frecuencias, relación señal ruido……..	74
43	Flujo de trabajo usado para cargar los gathers desde tsunami……...	75
44	Inline 932 del volumen apilado sin migración. Los cuadros rojos representan algunos defectos de la imagen sísmica….	79
45	Inline 1014 del volumen apilado sin migración. Los cuadros rojos representan difracciones y faltas de continuidad en la imagen sísmica	80
46	Operador de migración usando ángulo de 10°……..	81
47	Operador de migración usando ángulo de 20°……..	82
48	Operador de migración usando ángulo de 30°……..	82
49	Operador de migración usando ángulo de 45°……..	83
50	Operador de migración usando ángulo de 60…….	84
51	Operador de migración usando ángulo de 90°……..	85
52	Comparación entre migración 20°, 3000 m. en la parte de arriba, migración 30° 3000 m., abajo. Los cuadros representan algunas diferencias en ambas imágenes sísmicas. Inline 982……	87
53	Comparación entre migración 30°, 3000 metros en la parte de arriba, migración 30° 4500 metros abajo. Los cuadros representan algunas diferencias en ambas imágenes sísmicas. Inline 982…….	89
54	Migración cilíndrica a la izquierda, migración cónica a la derecha…..	91

55	Imagen sísmica con ángulo de 90°(izquierda) y con ángulo de 30° (derecha)……	92
56	Imagen sísmica correspondiente a apertura 3000 y ángulo 30°, hasta 3 segundos. Se observa el colapso de las difracciones en el área de interés de 1,5 a 2,25 segundos……	94
57	Registro completo de la imagen sísmica correspondiente al inline 982 usando el cubo de velocidad inicial……...	95
58	Vista en dos dimensiones del cubo de velocidad inicial……	96
59	Vista en tres dimensiones del cubo de velocidad inicial……	96
60	Vista en 2D del cubo de velocidad suavizado número uno……...	97
61	Vista en 3D del cubo de velocidad suavizado número uno……..	97
62	Registro completo de la imagen sísmica correspondiente al inline 982 usando el cubo de velocidad suavizado…….	98
63	Vista 2D del cubo de velocidad suavizado final……	99
64	Vista 3D del cubo de velocidad suavizado final……	99
65	Registro completo de la imagen sísmica correspondiente al inline 982 usando el cubo de velocidad final……..	100
66	Comparación entre imágenes sísmicas migradas en tiempo de 3 a 6 s. Parte superior, imagen migrada con el cubo de velocidad inicial, intermedio, imagen usando el cubo de velocidad suavizado por primera vez; parte inferior, imagen sísmica usando las velocidades del cubo de velocidad suavizado final……...	102
67	Inline 982. Comparación entre migración pre apilamiento y post apilamiento tiempo (1,5 s- 2,25 s). Se observa en los recuadros diferencias de continuidad de reflectores……...	104
68	Inline 932. Comparación entre migración pre apilamiento arriba y post apilamiento tiempo abajo (1,5 s - 2,25 s). Los cuadros representan diferencias entre las imágenes sísmicas…….	105
69	Inline 950. Comparación entre migración óptima e imagen sísmica inicial (1,5 s - 2,25 s). En la parte de arriba se observa el apilado sin migración, el apilado migrado abajo……	109

70 Inline 969. Comparación entre migración óptima e imagen sísmica inicial (0 s - 3 s). A la izquierda se observa el apilado sin migración, a la derecha el apilado migrado…… 110

71 Inline 1064. Comparación entre migración óptima e imagen sísmica inicial (0 s - 3 s). A la izquierda se observa el apilado sin migración, a la derecha el apilado migrado…… 111

72 Inline 948. Comparación entre migración óptima y migración Veritas (1,5 s - 2,25 s). Parte superior; migración óptima escogida en la investigación; inferior; imagen de la empresa CGG Veritas……. 115

73 Migración óptima inline 982…….. 116

74 Migración Veritas inline 982……. 117

75 Migración óptima inline 948…….. 118

76 Migración Veritas inline 948……. 119

77 Espectro de frecuencia vs amplitud; izquierda, dos gráficos de las migraciones hechas en Veritas (inline 982 arriba y 948 abajo), derecha, gráficos correspondientes a las migraciones realizadas en la investigación (inline 982 arriba y 948 abajo)……. 120

Rumbos R. Gerardo A.

EFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS SÍSMICOS 3D TERRESTRES DEL PROYECTO BARINAS ESTE 07G 3D, BARINAS- VENEZUELA

Tutor Académico: Prof. José Cavada. Tutor Industrial: Ing. Hugo Cerquone. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Geología, Minas y Geofísica. Año 2014, 171p.

Palabras Claves: migración sísmica, PSTM Kirchhoff, migración-apertura, sísmica terrestre 3D

Resumen. La presente investigación se enfoca en evaluar los efectos de la apertura de migración de Kirchhoff 3D en tiempo, en la imagen sísmica para datos terrestres adquiridos en la cuenca de Barinas, específicamente en el campo Barinas Este 07G 3D, con el fin de mejorar la calidad de la imagen producto del efecto del colapso de las difracciones encontradas en el volumen sísmico. La metodología empleada consistió en una fase previa de recopilación de datos sísmicos y de información bibliográfica para comprender los factores que intervienen en la PSTM Kirchhoff. Posteriormente se cargaron los datos sísmicos, suministrados por PDVSA, en el software de procesamiento Focus 5.4, estos estuvieron compuestos por un volumen apilado del proyecto completo y un sub volumen sin apilar para aplicar la migración pre apilamiento. Los parámetros variados fueron la apertura de migración y el ángulo, para ello se empleó el programa Tsunami encargado de aplicar migración en tiempo 3D pre y post apilamiento. Adicionalmente se modificó el modelo de velocidad suavizándolo a partir de los 3 segundos con el fin de corregir errores en la migración. En el caso del sub volumen migrado en pre apilamiento, fueron aplicados procesos como, NMO, MUTE y apilamiento para poder ser comparado con el volumen migrado en el post apilamiento. Finalmente se efectuaron comparaciones cualitativas entre las imágenes sísmicas obtenidas en el pre y post apilamiento; se seleccionó la migración de Kirchhoff post apilamiento usando 30º y 3000 metros de apertura como la migración óptima la cual cumple con factores tales como colapso de difracciones, relación señal ruido, continuidad de reflectores, definición de estructuras geológicas, entre otras. Por último se destaca la similitud entre la migración óptima escogida en el trabajo y la migración sísmica final de la empresa CGG Veritas, respaldando los resultados de esta investigación.

INTRODUCCIÓN

Durante años, Venezuela ha sido uno de los mayores abastecedores del mercado mundial de hidrocarburos. Con un planeta movilizado principalmente por energías no renovables, la exploración y explotación de recursos petroleros ha representado la principal actividad económica en el país desde hace más de cien años, esto ha generado ingresos que han llegado a ser hasta el 95% de las exportaciones del estado venezolano.

La cuenca Barinas-Apure ha representado durante décadas una de las más productiva del país y la segunda con las mayores reservas de petróleo después de la cuenca oriental, encontrándose campos de explotación tales como Barrancas, Bejucal, Obispo, Mingo, Maporal, Palmita, entre otros. Por tales razones, PDVSA ha llevado a cabo nuevos proyectos de exploración en la cuenca de Barinas, tal es el caso del proyecto Barinas Este 07G 3D.

En el proceso de exploración petrolera el método más utilizado es la sísmica de reflexión, la cual se divide en adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos; procesos realizados con el fin de identificar prospectos geológicos estructurales para ser perforados en pozos exploratorios en búsqueda del hidrocarburo.

Actualmente, la sísmica de reflexión sigue siendo el principal método geofísico empleado en la industria petrolera venezolana. Obtener una imagen sísmica que represente de manera adecuada la disposición geológica del subsuelo implica aplicar diferentes procesos a los datos sísmicos adquiridos en campo, con el fin de corregir problemas causados por estratos buzantes, fallas, estructuras geológicas, entre otras, que afectarían futuras interpretaciones. Algunos defectos en la imagen sísmica tales como difracciones, falta de continuidad en estratos, relación señal ruido, definición de fallas y estructuras geológicas pueden ser corregidos usando algoritmos

de migración, los cuales se encargan de mover los reflectores difractados a su verdadera posición en el espacio.

Hoy en día, el geofísico posee diversidad de software científico que le permite aplicar algoritmos de migración a los datos sísmicos, tales como diferencias finitas, integral de Kirchhoff, transformada F-K, entre otros. Tales programas permiten reconstruir imágenes sísmicas y así generar procesos comparativos entre imágenes de entrada e imágenes de salida.

El siguiente trabajo de grado tiene como propósito aplicar el algoritmo de migración de Kirchhoff 3D en tiempo con la finalidad de encontrar los parámetros acertados para obtener una imagen sísmica de salida con una mejor aproximación a la realidad, corrigiendo los defectos señalados anteriormente, de esta manera, se ayuda directamente a la industria petrolera en la selección de lugares donde exista un prospecto estructural real, reduciendo el número de pozos secos producto de falsas estructuras en el subsuelo, incrementándose así, la rentabilidad y confiabilidad de la sísmica de reflexión.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 El problema de la investigación.

La sísmica de reflexión se enfoca en determinar las características estratigráficas, estructurales y variaciones laterales presentes en el subsuelo prospectado. Ésta se fundamenta en que las mediciones grabadas por los receptores son producto de las llegadas de las ondas sísmicas que han sido reflejadas desde las interfaces donde existen contrastes de impedancia acústica (Sheriff, 1991). El método sísmico de reflexión se divide en tres etapas fundamentales de trabajo: adquisición de datos sísmicos, procesamiento e interpretación de los resultados finales, siendo el procesamiento una etapa esencial para obtener resultados confiables, debido a que es posible mejorar la calidad de la imagen sísmica en el subsuelo dependiendo de los parámetros aplicados en esta etapa.

Uno de los grandes problemas a resolver en el procesamiento, tiene que ver con contrarrestar el efecto causado por las difracciones. Al fenómeno que produce dispersión radial de la energía sísmica incidente se conoce como difracción y se genera en discontinuidades entre interfaces abruptas o estructuras cuyo radio de curvatura es más corto que la longitud de onda de las ondas incidentes (Kearey et al, 2002). Para contrarrestar el efecto producido por las difracciones, se aplica, en el procesamiento de los datos, el proceso de migración sísmica.

Sheriff (ob.cit), define la migración sísmica como una operación que reacomoda los reflectores sísmicos difractados a su verdadera posición en el espacio. Por su parte, Yilmaz (2001) señala que la migración tiene como objetivo mover los reflectores buzantes a su verdadera posición y colapsar las difracciones. De no aplicarse la migración sísmica, el proceso de interpretación posterior al procesamiento puede generar observaciones y resultados erróneos, pudiéndose

visualizar estructuras inexistentes; esto conllevaría a ubicaciones incorrectas en el posicionamiento de pozos de perforaciones, desencadenando perdidas económicas y disminuyendo la rentabilidad del método sísmico de reflexión. La migración sísmica representa una vía para solucionar el problema referente a la calidad de la imagen sísmica.

La migración puede llevarse a cabo mediante la integración a lo largo de la superficie de difracción, usando migración por Kirchhoff, por métodos numéricos empleando diferencias finitas de la ecuación de onda o por el dominio de la frecuencia y número de onda llamada migración F-K Sheriff (1991).

El algoritmo de migración seleccionado corresponde a la integral de Kirchhoff, la cual se basa en una sumatoria obtenida a través de la integración de la ecuación de difracción de Kirchhoff a lo largo de las curvas de migración, colapsando a los ápices de las hipérbolas de difracción, tanto las amplitudes contenidas en ellas, como las difracciones. El principal parámetro usado corresponde a la apertura de migración.

Yilmaz (2001), menciona que la apertura de migración se mide en número de trazas, a su vez, el tamaño de la apertura depende de la velocidad, donde aperturas pequeñas se usan para bajas velocidades y grandes aperturas para altas velocidades. El uso de una correcta apertura de migración ayuda a mejorar la relación señal ruido.

En vista de lo anterior, en este proyecto especial de grado se realizaron comparaciones entre la migración pre apilamiento y post apilamiento y el efecto producido por el uso de distintas aperturas de migración, con la finalidad de obtener una imagen sísmica correcta en la zona de estudio: Barinas-Este; Barinas – Portuguesa. Venezuela.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Evaluar los efectos de la apertura de migración en la calidad de imagen sísmica a partir de la migración de Kirchhoff en datos sísmicos 3D terrestres del proyecto Barinas Este 07G 3D, Barinas-Portuguesa, Venezuela.

1.2.2 Objetivos específicos

- Contrastar los resultados correspondientes al uso de diferentes aperturas de migración 3D.

- Comparar los resultados de la migración de Kirchhoff en tiempo antes y después del apilamiento.

- Obtener una imagen sísmica óptima mediante la selección de la mejor apertura de migración.

- Proponer una relación entre la geometría de adquisición y la apertura requerida para cumplir con el principio de la imagen.

1.3 Justificación

La necesidad de obtener imágenes sísmicas lo más próximas a la realidad, libres de las distorsiones producidas por las difracciones, conlleva a aplicar algoritmos de migración en el procesamiento de las secciones sísmicas. Tal es el caso para los datos sísmicos reales 3D del proyecto Barinas Este 07G 3D ubicado en Barinas-Portuguesa, Venezuela.

Este trabajo contó con la aplicación de una importante herramienta basada en la solución de la ecuación de onda, como lo es la integral de Kirchhoff, realizada antes y después del apilamiento en tiempo. Con el uso de dichas aperturas de migración, se estableció una metodología que permitirá a la industria, en un futuro, decidir cuál apertura de migración y que geometría de adquisición se deben implementar en zonas cercanas al lugar de estudio o en lugares donde los rasgos geológicos y geométricos sean similares.

Con la selección de correctos algoritmos de migración, aunado a parámetros de migración acertados, la imagen sísmica de salida tendrá una mejor aproximación a la realidad, llevando a la industria petrolera a seleccionar lugares donde exista un prospecto estructural real, ayudando a disminuir el número de pozos secos producto de falsas estructuras en el subsuelo, incrementándose así, la rentabilidad de la sísmica de reflexión.

1.4 Ubicación del área de estudio

El área del levantamiento sísmico Barinas Este 07G 3D, se encuentra ubicada en la región centro norte del Estado Barinas abarcando los municipios Obispo, Rojas y Sosa y los municipios San Genaro de Boconoito, Guanarito y Papelón, al sur del Estado Portuguesa. La figura 1 muestra el área del proyecto correspondiente a un polígono de 8 vértices.

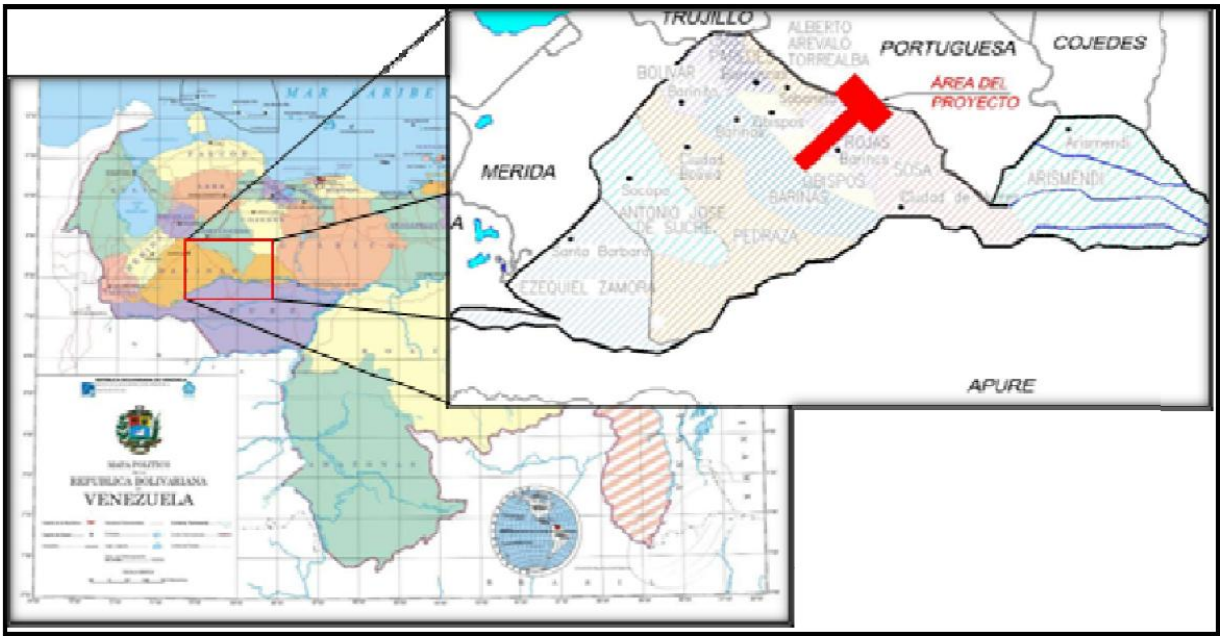


Figura 1 **Ubicación relativa del proyecto Barinas Este 07G 3D.**

El proceso de adquisición sísmica comenzó en el mes de agosto de 2011 y culminó en el mes de septiembre de 2012, con la participación de PDVSA exploración, en conjunto con DAQUING de Venezuela, C.A.

La figura 2 muestra la localización del proyecto Barinas Este 07G 3D en un mapa topográfico, siendo útil observar la geomorfología regional y local. Se observa al oeste la cordillera de Mérida, atravesando el extremo occidental del estado Barinas de noreste a sureste con sus piedemontes que entran en contacto con el alto llano hasta la ribera del rio apure. Al norte del estado se encuentra la sierra de Santo Domingo con 4.700 m de altitud. La zona de transición ocupa una franja estrecha paralela al cordón montañoso. Los altos llanos centrales se extienden a su vez en el mismo sentido que la zona anterior y comprende la mayor parte de la cuenca Barinas-Apure

Por su parte, la figura 3, muestra la delimitación del proyecto sísmico en un mapa de topografía, siendo el relieve predominantemente plano, con un valor máximo de 120 metros de elevación (color rojo) y un mínimo de 95 m (color azul).

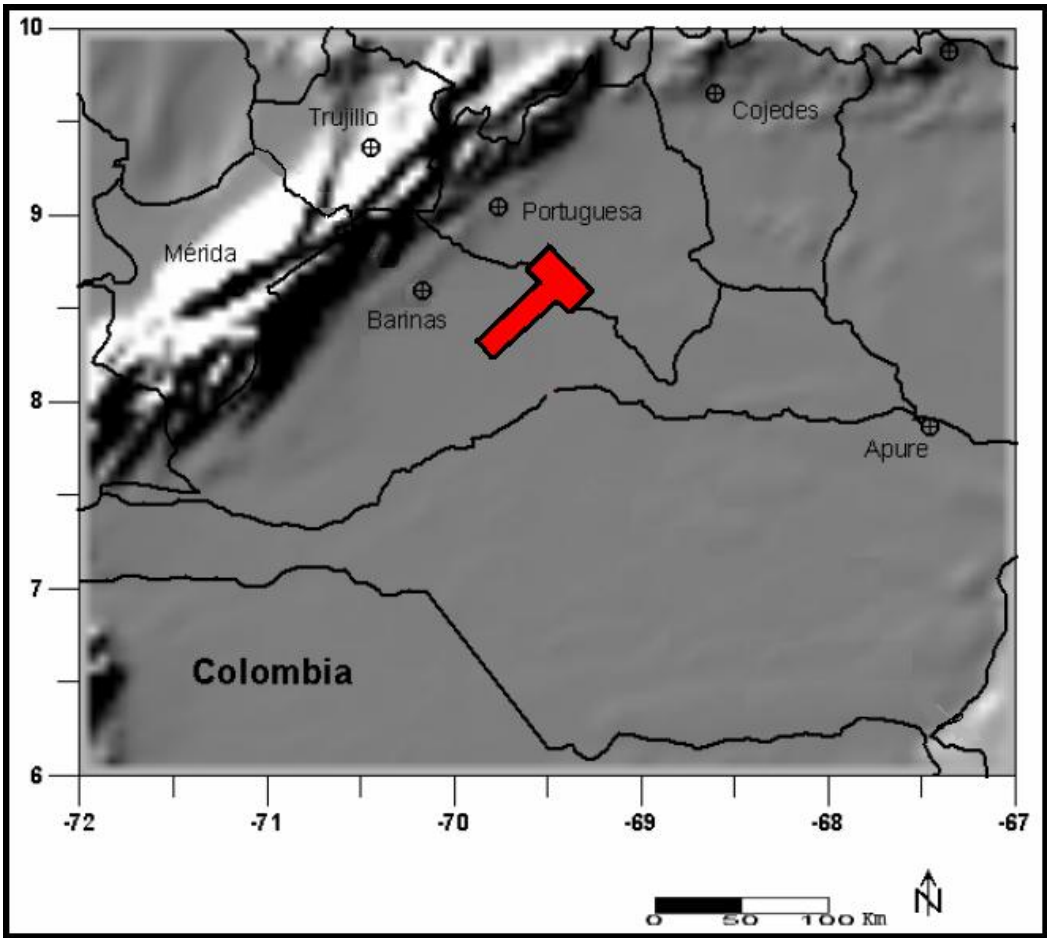


Figura 2 **Localización del proyecto Barinas Este 07G 3D en mapa topográfico.**

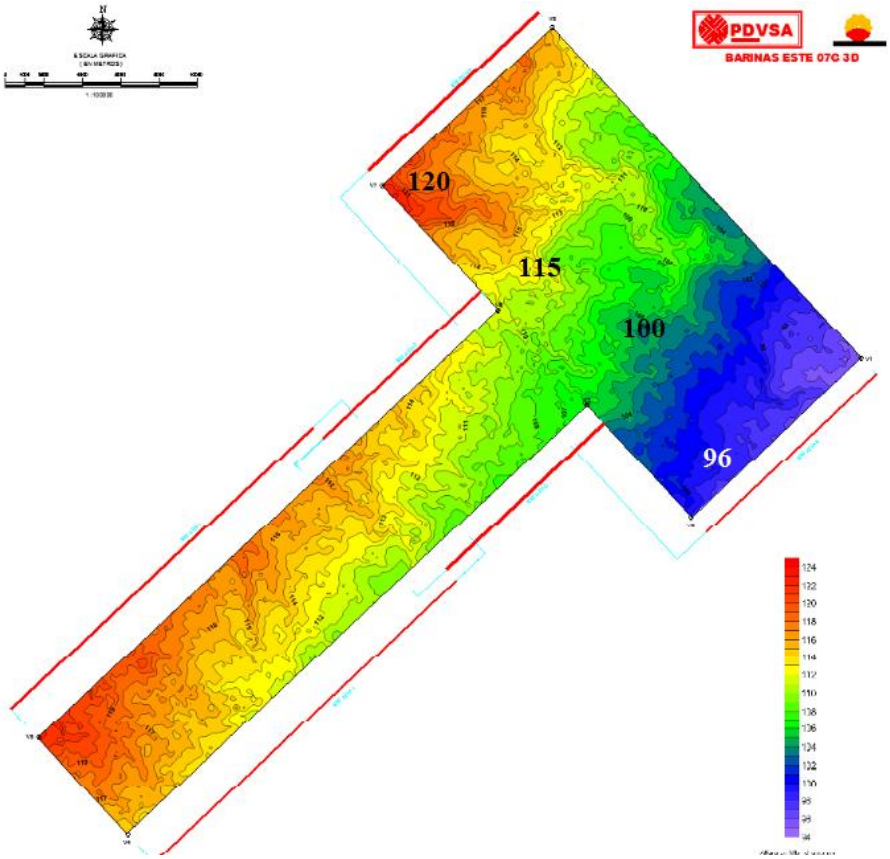


Figura 3 **Mapa de elevación dentro del área del proyecto Barinas Este 07G 3D.**

1.5 Estudios geofísicos anteriores

La cuenca petrolífera de Barinas-Apure ha sido explorada y explotada durante la mayor parte del siglo XX y XXI, realizándose perforaciones de pozos en diferentes ubicaciones de la misma. Estudios gravimétricos y sísmicos se han realizado en ese periodo de tiempo.

Se recopiló información gravimétrica que muestra un mapa de anomalías de Bouguer visto en la figura 4, que nos permiten inferir que el proyecto Barinas Este se encuentra ubicado en la zona donde el espesor de la cuenca sedimentaria se encuentra en disminución hacia el este, es decir, la cuenca se hace mas profunda hacia el oeste,

lugar donde se va ubicando el piedemonte de la cordillera de Mérida, a eso se debe que hacia el este hayan anomalías mayores a 20 mGal . Hacia la parte occidental se observa la influencia de la cordillera andina, visualizándose anomalías negativas de hasta -140 mGal .

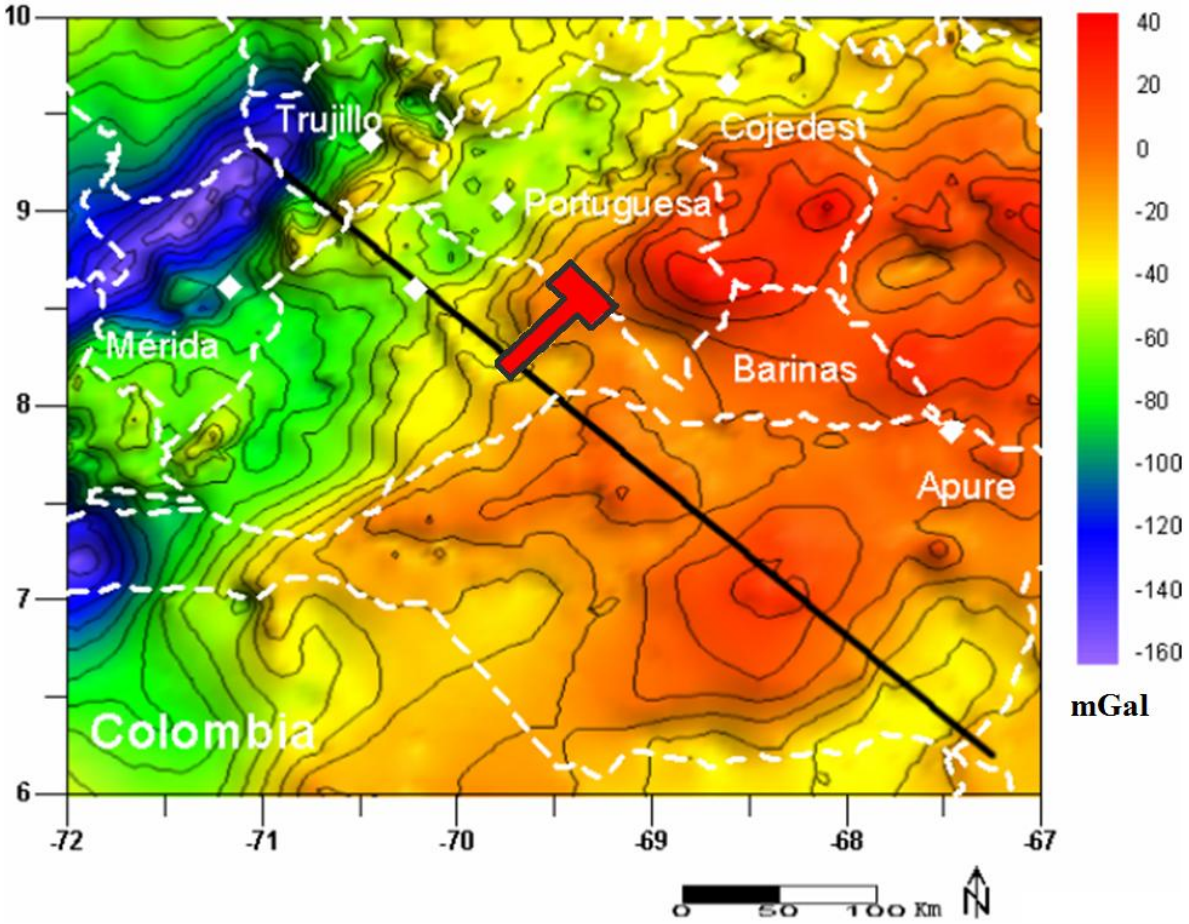


Figura 4 **Mapa de anomalía de Bouguer; cuenca Barinas y cordillera de los Andes**-.

El proyecto de adquisición sísmica Barinas Este 07G 3D se ubicó en una zona intermedia entre los valores máximos y mínimos mostrados en el mapa de la figura 4, permitiendo inferir que hacia el oeste de la adquisición debe ir la dirección del buzamiento de las estructuras producto del aumento en la profundidad del basamento.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Eventos tectónicos influyentes en la formación de la cuenca Barinas-Apure.

A partir de los principales eventos de deformación que afectaron la esquina noroccidental de Suramérica, se correlacionó el estilo estructural con los principales eventos de deformación, presentados en orden cronológico a continuación:

2.1.1 Paleozoico: caracterizado por una fase compresiva asociada a la acreción de los terrenos a Gondwana. Se evidencia por un cinturón de pliegues y corrimientos imbricados, donde el cinturón se presenta peniplandado y fosilizado bajo las secuencias transgresivas mesozoicas (De Toni, 1995).

2.1.2 Jurásico-Cretácico tardío: fase distensiva asociada a la ruptura de la Pangea. La evidencia sísmica del sistema rift se restringe al piedemonte suroccidental de Los Andes de Mérida (De Toni, ob. cit.). Esta es una etapa de margen pasivo que afecta el norte de Venezuela para ese tiempo y el fallamiento posee componente normal con orientación NE-SE (Figueroa y col.,1994). El Cretácico medio a tardío se caracterizó por la ausencia de estructuras en la cuenca. Se deposita una secuencia que se engrosa hacia el norte y noreste (De Toni, ob.cit.).

*2.1.4 Cretácico tardío-Paleoceno-Eoceno temprano***:** fase compresiva relacionada con la orogénesis de los Andes Centrales Colombianos, que origina fallas inversas de dirección noroeste- sureste, Figueroa (ob.cit.).

*2.1.5 Eoceno- Eoceno tardío***:** Figueroa (ob.cit.), señala que en el Eoceno Temprano existió una fase distensiva que afecta a las unidades cretácicas y a la parte inferior del

Eoceno medio; el fallamiento es normal con dirección noreste-suroeste. En el Eoceno Medio se tiene una fase compresiva, asociado probablemente a la formación de las napas al norte de Venezuela, originando fallas inversas de orientación noreste-sureste. Para el Eoceno Tardío, surge una fase compresiva, asociada probablemente al último empuje de las napas y al inicio del levantamiento de los Andes Orientales colombianos. El fallamiento que se origina es inverso con una orientación preferencial este-oeste, noreste-suroeste.

2.2 Geomorfología de la cuenca Barinas-Apure

La depresión estructural correspondiente a la cuenca de Barinas-Apure se extiende desde la astenosfera andina al noreste, hasta las planicies situadas entre los ríos Apure y Arauca al sureste. Posee poco espesor de la columna sedimentara con aproximadamente 5000 pies cerca de la zona de fallas de Mantecal y por otra parte el poco espesor de las formaciones cretácicas y la erosión prácticamente total de la sedimentación eocena (González de Juana y col., 1980).

Figueroa et al, 1994), mencionan que la cuenca Barinas-Apure posee la configuración actual vista en la figura 5, donde se muestra una sección NO-SE de la cuenca, en ella se pueden observar las formaciones más importantes, su composición litológica y su profundidad en segundos (tiempo doble de viaje).

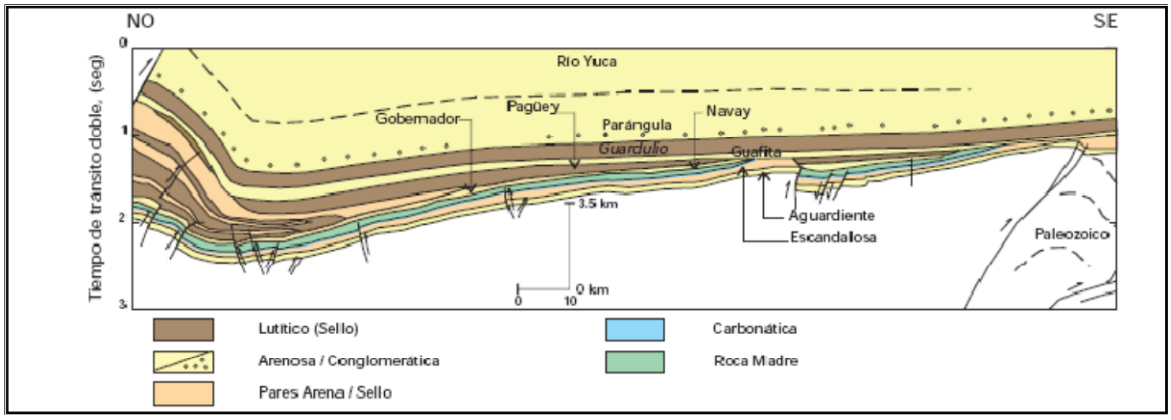


Figura 5 **Sección NO-SE de la cuenca Barinas-Apure (modif. de Parnaud y col., 1995)**

En el flanco sur de la cuenca, las curvas estructurales a diversos niveles conservan cierto paralelismo ajustado a la forma de la depresión, Feo (1972). En la parte central del área, se reconoce un alto basamento identificado como reflejo de arco de Mérida por varios autores, Feo (ob.cit). Este alto todavía se observa en el tope del Cretácico y más atenuado, en forma de declive suave hacia el norte-noreste, sobre curvas estructurales en el tope del Eoceno.

El flanco norte de la cuenca, mucho más inclinado, se desarrolla principalmente en el pie de monte suroriental de la cordillera de Los Andes. En él se conocen pliegues mejor conformados, como lo son el anticlinal de Barinitas, que muestra sedimentos eocenos en su cresta y presenta declive hacia el noreste, y el anticlinal de Quebrada Seca. Su extremo norte está cortado por la falla de la Soledad (González de Juana y col., 1980).

2.3 Sistemas petrolíferos de la cuenca Barinas-Apure.

Se han identificado dos eventos para la generación, migración y entrampamiento de los hidrocarburos en la cuenca Barinas-Apure. El primero se relaciona con el sistema La Luna-Barguita debido a la generación de petróleo en la cuenca de Maracaibo y su migración al sur-sureste. En este caso, el sello lo constituyen unidades cretácicas: el superior la lutita basal de la formación Burguita, y el inferior, las lutitas del miembro La Morita (formación Navay).

El yacimiento principal estaría constituido por unidades cretácicas, como las formaciones Aguardiente, Escandalosa y las arenas basales de la formación Burguita. Feo (1972), señala que las lutitas del miembro La Morita son el sello vertical de los yacimientos petrolíferos cretácicos en Barinas y Apure; en la zonas donde el miembro La Morita está ausente por erosión, se comunican las areniscas de la formación Escandalosa y Gobernador, supra yacente. El segundo evento se relaciona con el epicentro del flanco sur andino, el cual tiene su momento crítico hoy en día. La roca

madre sigue siendo cretácica y el yacimiento llega a incluir unidades eocenas como las formaciones Gobernador y Paguey, siendo el miembro Guárdalo de la formación Guafita el sello del Oligoceno de mayor importancia regional. En este segundo evento, pudo haber ocurrido una re-migración de crudos entrampados durante el pulso eoceno del sistema La Luna-Burguita.

2.4 Formaciones geológicas

Las formaciones geológicas que influyen en la geología local circundante al levantamiento sísmico se enumeran desde la formación somera a la más profunda, tal como se observa en las figuras 2.4.1 y 2.4.2 representadas en el léxico geológico de PDVSA, siendo la figura 6, un perfil S-N de la cuenca de Barinas en donde se bosquejan las distribuciones de las diferentes formaciones geológicas así como su relativa profundidad medida en pies. La segunda figura (7), presenta las formaciones geológicas influyentes en el sistema petrolífero de la cuenca de Barinas-Apure, basado en un perfil S-N de dicha cuenca.

El proyecto Barinas Este 3G 3D se ubicó en la parte norte de dicha cuenca sedimentaria, donde al tener un offset máximo de aproximadamente 4000 metros, nos encontramos estudiando la parte más profunda de la cuenca sedimentaria hasta llegar al basamento que en la parte más al norte de la cuenca se ubica a una profundidad de más de 14 mil pies, es decir, 4267 metros.

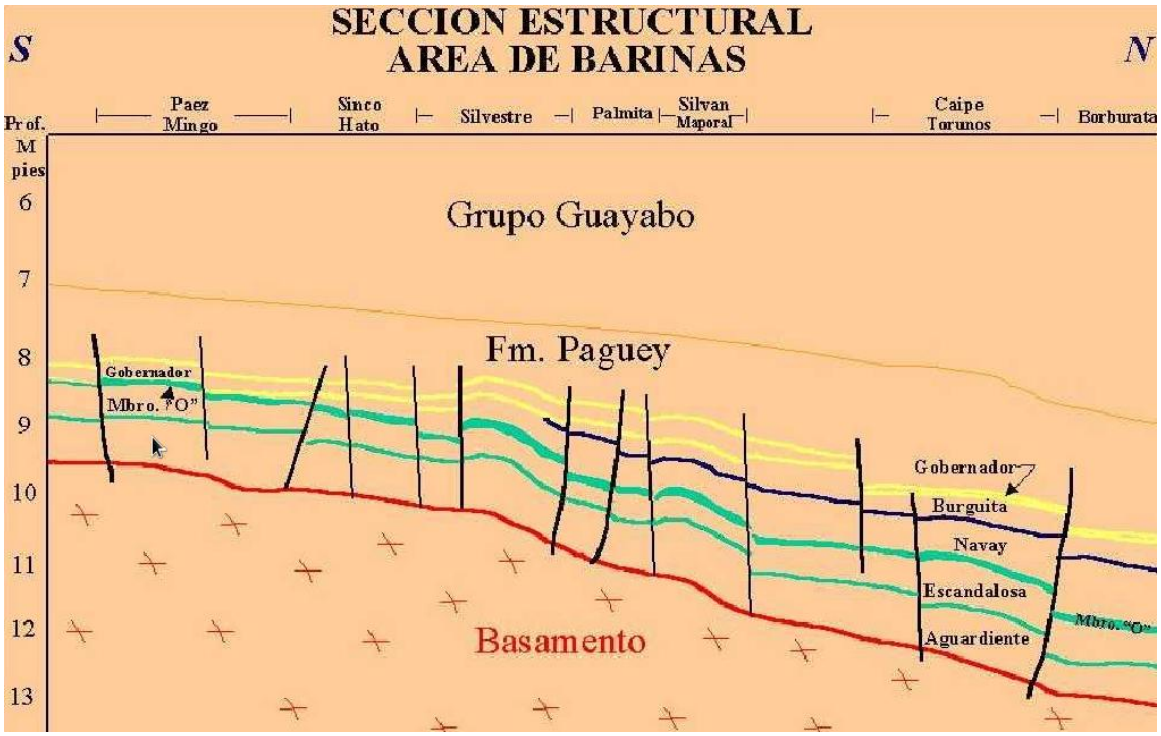


Figura 6 **Sección S-N de la cuenca Barinas-Apure, el proyecto de adquisición se ubica hacia la parte norte del perfil (PDVSA, 1997)**

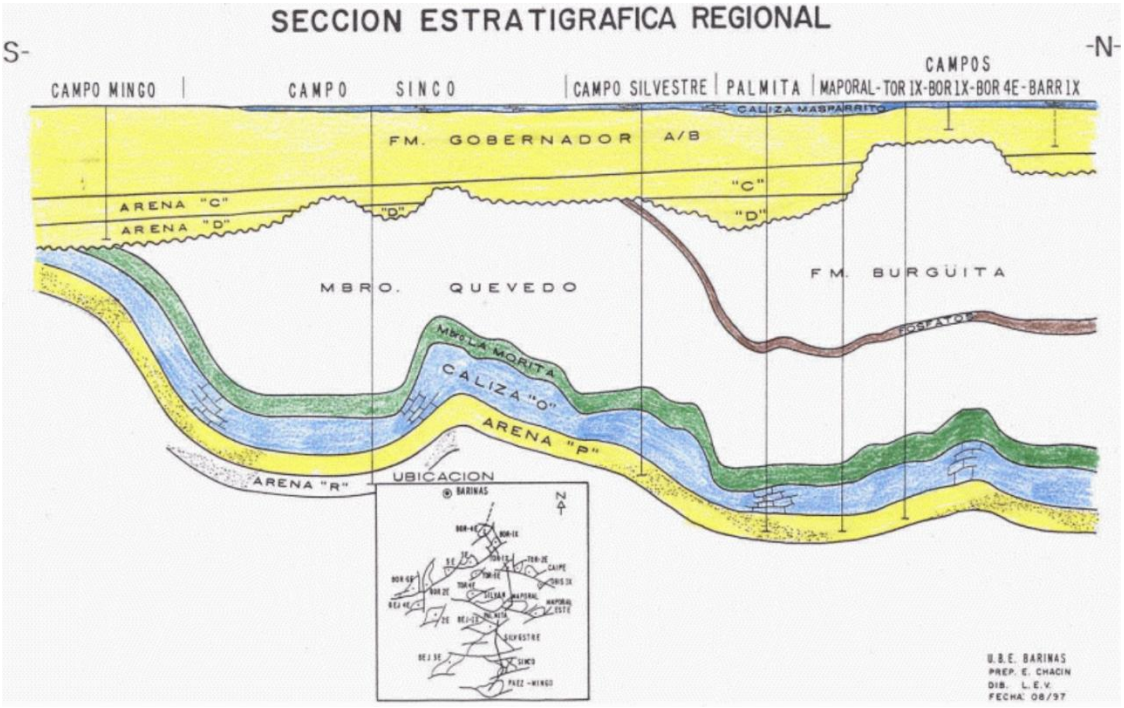


Figura 7 **Sección S-N de la cuenca Barinas-Apure (PDVSA, 1997)**

Las formaciones pertenecientes al sistema petrolero se describen a continuación:

2.4.1 Formación Gobernador: la formación Gobernador comprende las clásticas basales, depositadas discordantemente encima del Cretácico, por la transgresión marina que se inició en la cuenca de Barinas en el Eoceno medio. Pierce (1960) describe a la formación con 80% de areniscas cuarzosas, a veces cuarcíticas, friables a bien endurecidas, color gris claro a pardo, manchadas por óxido de hierro cuando están meteorizadas, localmente conglomeráticas, en capas de espesor medio a grueso, y con estratificación cruzada. Tienen un 20% de intercalaciones de limolitas en colores claros, y laminaciones lutíticas carbonáceas gris oscuro a gris azulado. Schubert (1968) describe la formación Gobernador del área de Santo Domingo, como capas macizas muy espesas de arenisca de colores gris oscuro, negro, marrón o rosado, de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, redondeado a

subredondeado, generalmente de cuarzo lechoso, con óxido de hierro intersticial. Tiene buena compactación y estratificación cruzada, con láminas finas cabonáceas de color negro. Los moldes de carga son comunes, y tubos de gusano ocurren en la base de la formación.

Diversos autores han medido diferentes espesores, pero el espesor promedio varía desde los 180 metros hasta casi 500 metros. Pierce (1960), midió unos 300 m de Gobernador en la sección tipo, 320 m en la cercana quebrada Bellaca y 450 m en el río Boconó; Schubert (1968) reporta espesores variables de 90 m a 369 m en el área Barinitas-Santo Domingo

2.4.2 Formacion Burguita: Renz (1959) describe areniscas micáceas, limolíticas, parcialmente glauconíticas y frecuentemente calcáreas, friables, de grano fino y color gris claro, con fragmentos ftaníticos e interlaminaciones de lutitas gris oscuro y arcilita de color gris claro. Incluye la presencia de una caliza conchífera en la base, en la quebrada Buenaña y tributarios del río Burgúa. Las areniscas son masivas, muy lenticulares y erráticas en su desarrollo, además, se hacen más delgadas y presentan lutitas interestratificadas de mayor espesor hacia el tope, son de color gris o marrón, plásticas o duras, carbonáticas, piríticas y no calcáreas. Van Andel (1958) estudió petrográficamente algunas areniscas de esta unidad (que él incluyó como pertenecientes a la formación Colón) y se clasifican como grauvacas y subgrauvacas. Es evidente el aumento del carácter arenoso de la formación, de base a tope.

En la sección tipo y sección de referencia (río Mucupatí) los espesores son de 420 m y 350 m respectivamente (Renz, 1959). Feo Codecido (1972) menciona que en el subsuelo tiene un espesor variable entre 0 y 177 m con un promedio de 73 m, ya que su tope ha sido erosionado desigualmente en toda su extensión.

2.4.3 Formación Navay : Pierce (1960), la describe en la localidad tipo como compuesta de lutitas silíceas, friables a no friables, blandas, duras, quebradizas, amarillo claro a crema y a blanco; lutitas tripolíticas muy porosas, pardo claro a gris

claro, y algunas ftanitas no porosas, lenticulares, pardo claro, y lutitas calcáreas, carbonáticas, gris a gris oscuro. Como constituyentes menores de la formación, se presentan areniscas lenticulares de grano angular, calcáreas a silíceas, pardo claro a gris claro. Estas areniscas, muy calcáreas a veces, se han definido como calizas clásticas, probablemente por su contenido fosilífero. En afloramientos, las lutitas carbonáceas se meteorizan y lixivian a lutitas gris a pardo. Signos característicos son su fina laminación, restos fosfatizados de peces (vértebras, escamas y espinas), común glauconita, las ftanitas y una relativamente fácil correlación de electrofacies a través de la cuenca. Ha sido repartida, en orden ascendente, en la lutita "N" (miembro La Morita") y "M" al "I" (miembro Quevedo). Tiende a ser más arenosa hacia arriba; se vuelva muy arenosa hacia el escudo de Guayana y hacia Apure y la cuenca Los Llanos. En el afloramiento, la formación se meteoriza comúnmente a colores claros: gris claro, blancuzco, beige, marrón clara y con una textura silícea porosa, "tripolítica" o "porcelanizada".

El miembro Quevedo fue introducido por Renz (1959.), para designar una secuencia de rocas silíceas, duras, quebradizas, de fractura concoidea, predominantemente lutíticas, de color gris claro que meteorizan a blanco, que incluye además intercalaciones de areniscas gruesamente estratificadas, con estructura flaser en su parte media, lutitas negras, calizas fosfáticas y capas de ftanita que constituyen hasta un 40, de la sección. Los restos de peces forman más del 50% de las capas de areniscas, y aunque la formación es en general muy fosilífera, las faunas están muy mal preservadas y por consiguiente son de difícil identificación.

Kiser (1961), describe la parte inferior (La Morita) como compuesta de lutitas arcillosas suaves, gris claro a oscuro, con abundancia local de restos de peces. El límite superior estaría en la base de la lutita, limolita o caliza silícea, dura y quebradiza más inferior de la sección suprayacente (formación Quevedo). Esta última sección la describe como compuesta de lutitas silíceas, calizas silíceas y ftanitas con areniscas, lutitas y limolitas interestratificadas, y se caracteriza por rápidas

variaciones laterales en la posición estratigráfica, y porcentaje de varios de sus componentes litológicos.

En la localidad tipo, el espesor es de 940 m (3.084') (Pierce, 1960), y de 610 m (2000 pies) en el área de Burgua (Kiser, 1989). Tiende a aumentar rápidamente al acercarse al surco de Uribante, y se acuña hasta extinguirse hacia el sur de Apure y los llanos colombianos (Kiser, *op. cit.*), así como localmente sobre el arco de Mérida.

2.4.4 Miembro "O" Guayacan: el miembro Guayacán consiste en capas gruesas de calizas bioclásticas macizas, muy fosilíferas, de color gris, intercaladas con lutitas no calcáreas gris oscuro a negro, micáceas y cantidades menores de limolita arcillosa gris (González de Juana, et al, 1980). Según Renz (1959) hacia el norte de Mérida, las capas individuales de caliza disminuyen en número y se hacen gradualmente más gruesas. Entre las Cruces y La Carbonera, a lo largo de la carretera de Ejido a la Azulita, dos capas con litología típica de Guayacán encierran una intercalación de caliza densa, gris oscuro, y concreciones con "litología La Luna". Más hacia el noreste, en los estados Trujillo y Lara, el miembro Guayacán desaparece completamente y es reemplazado por la formación La Luna, que es más pelágica. En el subsuelo de Barinas las calizas del miembro Guayacán marcan el límite entre las formaciones Escandalosa y la Morita infrayacente y suprayacente.

En la sección de referencia de Venezuela, el miembro Guayacán tiene un espesor de 60 metros; en Táchira, esto varía normalmente entre los 40 y 50 metros. En el río Santo Domingo y en la quebrada Bellaca (estado Barinas) el espesor del miembro Guayacán aumenta hasta alcanzar los 125 m a expensas de las lutitas de Seboruco, el cual practicamente desaparece (Renz, *op. cit.*). Según González de Juana, (*op. cit.*) este miembro constituye en Barinas un horizonte guía en los perfiles de reflexión sísmica y registros de pozos, y se conoce informalmente como caliza "O" de la formación Fortuna.

2.4.4 Formación Escandalosa: la formación está compuesta por areniscas macizas, cuarzosas y muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas.

Las areniscas son de color gris, gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidas, micáceas y carbonáceas. Se presentan en capas delgadas a masivas, con estratificación cruzada en las capas más gruesas. Las lutitas son gris oscuro, algo arenosas, calcáreas y carbonáceas. En el tope de la sección, se encuentra una caliza de unos 4 m de espesor, gris oscura, masiva, aura, cristalina y coquinoidea, con manchas de dolomita micro cristalina. Emite olor a petróleo al ser golpeada, y se ha correlacionado con la caliza Guayacán del piedemonte andino (Kiser, 1989).

El espesor varía de 300 m en la sección tipo, entre 150 y 427 m en otras localidades. Desde el arco El Baúl, la formación aumenta su espesor desde el acuñamiento hasta unos 100 m en los pozos de Guanarito, 216 m en el pozo Nutrias-1, un promedio de 150 m a través de la cuenca, 150 m en el campo Guafita, 120 m en el campo La Victoria, 240 m en el afloramiento del área de Nula y 244 m en el pozo Burgua-4.

2.4.5 Formación Aguardiente: Notestein et al, 1944) mencionan areniscas calcáreas duras, de color gris a verde claro, grano variable y estratificación cruzada, localmente glauconíticas, con intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas y algunos lechos de caliza en la parte inferior; localmente las areniscas son tan calcáreas que se aproximan a calizas arenosas. En Táchira, Trump y Salvador (1964) escribieron areniscas de colores claros, duras, en capas de espesor variable, intercaladas con limolitas y lutitas carbonáceas. Señalan que al norte y oeste de Táchira la unidad se hace más calcárea y las capas de caliza constituyen un elemento litológico característico. Según Salvador (1961), en Táchira, Mérida y Trujillo, esta formación "presenta una litología muy uniforme, compuesta predominantemente por areniscas cuarzosas, a veces glauconíticas, con capas de caliza distribuidas en varios niveles". Renz (1959) acertadamente insistió sobre el carácter cuarzoso y los colores claros de meteorización de las areniscas, las intercalaciones de lutitas oscuras, y la presencia de caliza fosilífera de varios tipos.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Sísmica de reflexión

La sísmica de reflexión es un método geofísico que fundamenta sus bases en la reflexión del frente de ondas generado por una fuente inducida, dichas reflexiones ocurren en las interfaces de los estratos, debido a los cambios en las propiedades físicas de los mismos, permitiendo determinar la ubicación y los espesores de las estructuras geológicas que contengan yacimientos de interés exploratorio.

El principio básico es la medición del tiempo que demora la onda en viajar desde el punto donde fue generada (coordenada de la fuente) hasta el lugar donde se encuentra el receptor (coordenada del geófono) (Solano, 2006).

La sísmica de reflexión se divide en tres aéreas metodológicas importantes: la adquisición de datos, el procesamiento y la interpretación de los resultados finales.

3.2 Principios básicos

La teoría de la reflexión sísmica permite generar los datos necesarios para caracterizaciones y delineamientos de zonas en el subsuelo con intereses económicos. Algunos de los principios básicos del cuerpo teórico de la misma se presentan a continuación

3.2.1 Propagación de ondas: la teoría del movimiento ondulatorio, considerada como la propagación de energía de un lugar al otro sin transferencia de materia, mediante ondas mecánicas (propagándose en un medio material) o electromagnéticas (no

requieren propagarse en algún medio material), es el principio teórico de los estudios de prospección sísmica.

Onda elástica: deformación que viaja a través de un medio elástico.

Onda sísmica: deformación que viaja a través del subsuelo.

Frente de ondas: conjunto de puntos en el espacio que son alcanzados simultáneamente por una onda. Si se trazan líneas perpendiculares a los frentes de onda, se observa que dichas líneas indican la dirección en la que viajan las ondas. Estas líneas son denominadas *rayos* y son útiles para describir las trayectorias de la energía sísmica. La figura 8 muestra la propagación de un frente de ondas y los rayos sísmicos.

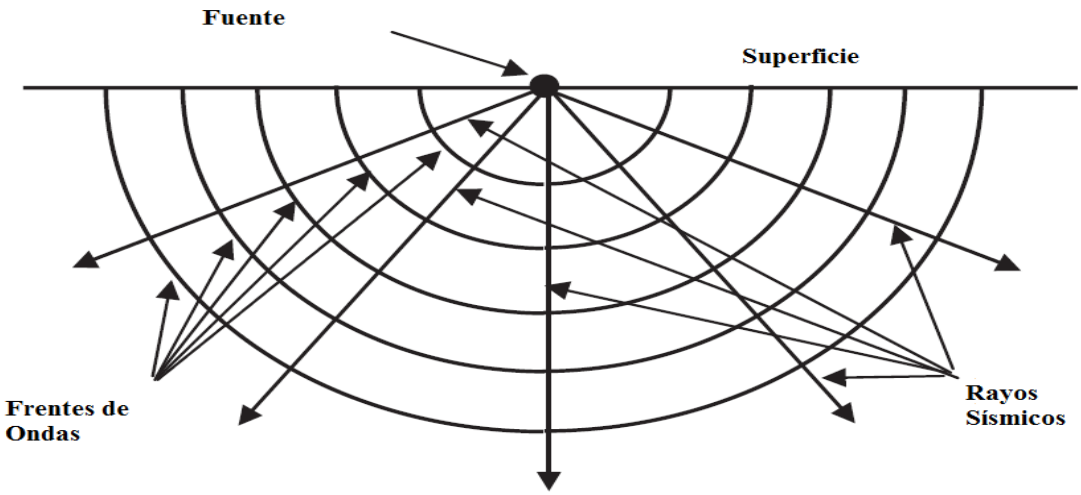


Figura 8 **Frente de ondas y rayos. Modificado Gadallah y Fisher (2009).**

3.2.2 Principio de Fermat: un pulso sísmico que viaja en un medio sigue un camino conectado entre la fuente y un recetor en particular. Sin embargo, de acuerdo con el principio de Fermat, existe la posibilidad de varias rutas de viaje de la onda. Esto se

traduce en que puede existir más de una fuente de reflexión primaria (Gadallah y Fisher, 2009).

En la figura 9 a la izquierda se observa la representación de un sinclinal con diferentes rayos emitidos desde la fuente hasta el receptor, existen dos caminos tomados para los rayos 2, 3, 5 y 6 y tres caminos para el rayo 4. Por otro lado, a la derecha de la figura, los tiempos de llegada son trazados en una sección sísmica, se puede observar que el cruce podría ser confundido con un anticlinal, resultado en un pozo seco al momento de perforar.

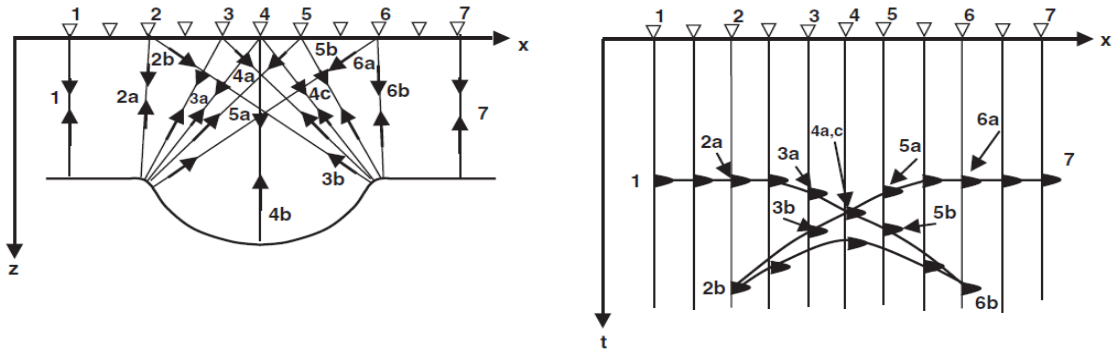


Figura 9 **A la izquierda, un bosquejo de un sinclinal en profundidad y su efecto en los rayos sísmicos. A la derecha se muestra la apariencia en una sección sísmica en tiempo. Gadallah y Fisher (2009).**

3.2.3 Principio de Huygens: este principio señala que todo punto alcanzado por un frente de onda actúa como fuente de nuevas ondas" (Huygens). Gadallah y Fisher, (2009), señalan que este postulado proporciona un método geométrico para determinar, a partir de un frente de onda de forma conocida, la forma que adoptará

este frente de onda en un instante posterior. La figura 10 muestra el principio de Huygens.

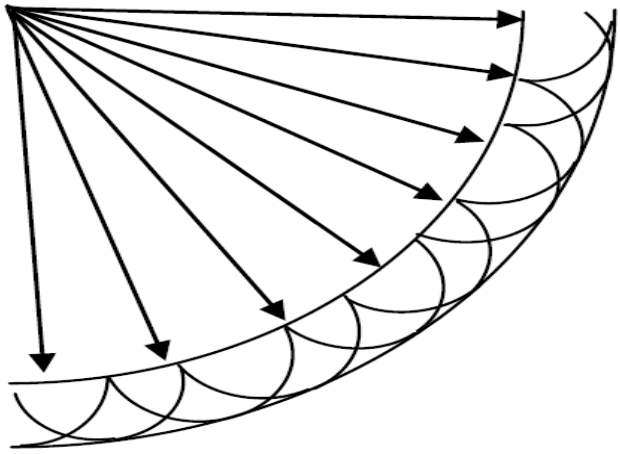


Figura 10 **Principio de Huygens.**

*3.2.4 Ley de Snell***: l**a ley de Snell describe como las ondas se refractan. Simplemente, esta considera que el seno del ángulo incidente de un rayo, sen *i*, dividido por la velocidad del intervalo recorrido *V1*, equivale al seno del ángulo de refracción de un rayo, sen *r*, dividido por la velocidad *V2* (ecuación 4.1). Esto señala:

$$\text{sen } i / V1 = \text{sen } r / V2 \ldots\ldots (4.1)$$

*3.2.5 Atenuación de las ondas sísmicas***:** una onda sísmica se propaga a lo largo de grandes distancias, generando que las amplitudes se tornen de grandes a pequeñas a medida que avanza por el medio. Esto indica que las ondas sísmicas se ven atenuadas por la distancia recorrida. En un registro sísmico, se observa como la atenuación se acentúa con el tiempo. Incluso en un medio perfecto, las ondas sísmicas se atenúan con la distancia (Gadallah y Fisher, 2009).

Las amplitudes sísmicas son proporcionales a la raíz cuadrada de la energía por unidad de área, así que la amplitud se vuelve más pequeña cuando el área que se encuentra en el denominador va creciendo. Este tipo de atenuación se denomina divergencia esférica o divergencia geométrica.

3.3 Sísmica 3D terrestre.

Muchas de las características geológicas del subsuelo que son de interés en la exploración de hidrocarburos se encuentran, por naturaleza, en tres dimensiones; tal es el caso de diapiros de sal, pliegues, inconformidades, arenas deltaicas, corrimientos, entre otros. Una sección sísmica 2-D es, en realidad, un corte en una dirección preferencial de un estudio 3-D. Existen problemas que la sísmica 2-D no puede solucionar, por ejemplo, al momento de realizar la migración, se ha determinado que se pierde información sobre la propagación de las ondas sísmicas debido a que solo se tiene un plano en dos dimensiones, obteniéndose una imagen sísmica distorsionada. El problema la migración 2-D puede generar una visualización de la imagen del subsuelo inadecuada cuando la migración 2-D es usada para sustituir la migración 3-D en un estudio sísmico.

La migración tridimensional requiere más densidad de muestreo espacial del subsuelo de la que es requerida en estudios 2-D (Dobrin y Savit, 1988). Tener una imagen detallada del subsuelo ciertamente conlleva a una interpretación más segura. En aéreas de geología compleja, la aplicación de la sísmica 3D es esencial para la exploración en búsqueda de hidrocarburos.

Dobrin y Savit, (ob.cit), señalan que se debe tener atención especial en el diseño de adquisición en tierra. Una adquisición marina 3-D típica, es llevada a cabo haciendo disparos en líneas paralelas que están cercanamente espaciadas (línea de tiro). Una adquisición sísmica en tierra 3-D por su parte, es llevada a cabo trazando un número de líneas receptoras paralelas entre ellas y localizando los puntos de

disparos a lo largo de líneas receptoras perpendiculares a las líneas fuentes, este tipo de adquisición sísmica es denominado geometría ortogonal.

En el procesamiento sísmico 3-D es parecido al procesamiento de líneas 2-D, se aplican procesos de filtrado, ganancias, etc. En datos 3-D por su parte, se agrupan las trazas por CMP, para realizar el análisis de velocidad y apilado. Luego un paso importante es realizar la migración sísmica en tres dimensiones. Al tratarse de un volumen, primero, la migración es aplicada a lo largo de la dirección *in line*. Luego, una segunda migración sísmica es realizada en la dirección *cross line* respectivamente.

Al final, el volumen de datos 3-D está listo para ser interpretado, pudiendo ser visto en secciones verticales en dirección *in line* o *cross line* y también en secciones horizontales, usualmente denominadas *time slices*. Los *time slices* ayudan a los intérpretes a generar mapas de contornos para determinar horizontes de manera más concisa.

3.4 Procesamiento sísmico.

A fin de obtener una imagen sísmica que se asemeje en lo posible a la realidad, todos los datos sísmicos deben pasar por la etapa del procesamiento. El procesamiento es una rama que no puede ir desligada de la adquisición y la interpretación. Para realizar el procesamiento se deben conocer factores variables presentes en la adquisición de los datos, que van desde las condiciones climáticas, la duración de los registros, condición de los registros, cantidad y tipos de ruidos, entre otros. Por su parte, el conocimiento de parámetros de adquisición también es indispensable para realizar el procesamiento de los datos, algunos de ellos son el intervalo de muestreo, relación señal-ruido, apertura de migración, tamaño del bin, cobertura, etc.

Yilmaz (2001) señala que una secuencia convencional de procesamiento debe de tener tres grandes ramas, marcadas por los procesos de deconvolución, CMP

stacking y migración. Dentro de estas tres vertientes existen procedimientos internos ejecutados que completan el procesamiento de los datos.

La transformada de Fourier constituye la fundamentación teórica de muchos de los procesos aplicados en el procesamiento.

Yilmaz (2001), comenta que antes de realizar la deconvolución, se debe examinar las características de la señal sísmica, así como, considerar las reflexiones primarias, ruido aleatorio y coherente, reverberaciones, ruido lineal asociado con ondas dispersas, es decir, es importante realizar un control de calidad de la señal, esta etapa es conocida como el pre procesamiento de los datos marcada generalmente por:

- Pre-procesamiento:
  - Conversión del formato de grabación al formato de procesamiento
  - Demultiplexado (carga de archivos SPS).
  - Geometría.
  - Ganancia.
  - Edición de trazas.
  - Calculo de estáticas.

Por su parte, la aplicación de la deconvolución ayuda a mejorar la resolución temporal producto del colapso de la onda sísmica, permite mitigar el efecto de la ondícula, por otro lado, procedimientos posteriores como la corrección NMO y la migración completan la etapa del procesamiento:

- Deconvolución
- Ordenamiento de datos por CMP
- Análisis de velocidad
- Corrección por NMO y MUTE
- Apilamiento
- Migración

En algunos casos, procesos como la deconvolución, análisis de velocidad y migración, son aplicados varias veces en el procesamiento, dependiendo que tan acercada se encuentra la imagen sísmica de la realidad

3.5 Ordenamiento de datos por CMP.

Para poder realizar la migración sísmica se deben tener los datos ordenados por CMP (*common mid point)*. Yilmaz (2001), señala que la adquisición de datos sísmicos multicobertura, se realiza en el ordenamiento fuente-receptor, es decir, en el dominio del *shot gather*. Por su parte, el procesamiento sísmico es realizado en el dominio del CMP, estos dos ordenamientos se observan en la figura 11.

Basados en la geometría establecida, cada traza individual es asignada al punto medio entre la fuente y el receptor asociados a la misma ,figura 11(b). Aquellas trazas con el mismo punto medio común son agrupadas juntas, formando así un CMP *gather*.

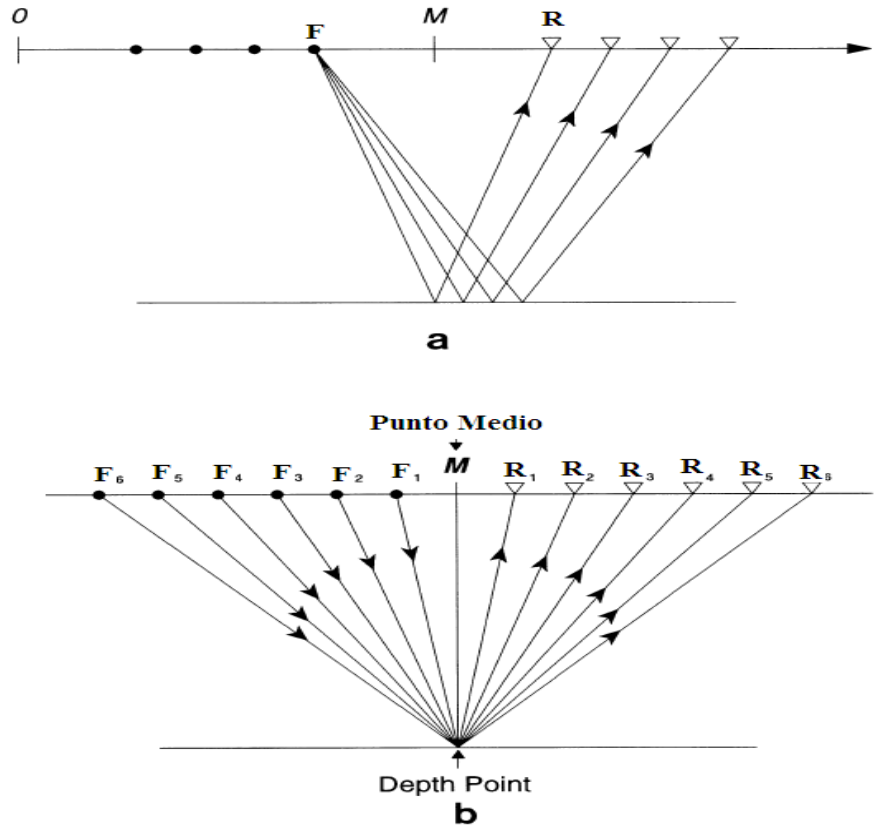


Figura 11 **(a) Datos sísmicos adquiridos en el dominio del *shot gather*, (b) datos sísmicos ordenados por CDP. Modificado Yilmaz (2001)**

En la figura 11 (a), se observa la adquisición realizada en coordenadas fuente-receptor suponiendo un reflector horizontal, en ese caso, el ángulo de incidencia será igual al ángulo de reflexión. Por su parte, en la figura 11 (b), observamos el ordenamiento por CMP de todas las trazas, cabe destacar que para reflectores horizontales el CMP (*common mid point*) corresponde a la proyección en superficie del CDP (*common depth point*) o punto común en profundidad. Al tener capas buzantes, el CDP se desplaza de su posición original generando que el CMP y CDP no sean equivalentes, siendo solo usado el término CMP *gather*.

El número de trazas de campo que contribuyen a una traza apilada corresponde a la cobertura del *fold*. El *fold* indica el total de número de trazas en el *bin*, a su vez es un atributo importante debido a que el análisis de velocidad depende de la existencia de una cobertura adecuada.

3.6 Análisis de velocidad.

En sintonía con Sheriff (2002), en general, el análisis de velocidad se basa en determinar la velocidad asociada con el mejor ajuste de la hipérbola de reflexión en los datos ordenados por CMP, es decir, en esta etapa del procesamiento de los datos sísmicos, se calcula la velocidad NMO (*normal move out)*.

Yilmaz (2001), señala que el análisis de velocidad es aplicado a los CMP *gathers*. El resultado del análisis de velocidad es una tabla de números donde se denota la velocidad en función del tiempo doble de los datos cero-offset (espectro de velocidad). Estos valores representan algunas mediciones de coherencia de la señal a lo largo de las trayectorias hiperbólicas gobernadas por velocidad, offset y tiempo de viaje.

El análisis de velocidad a partir de los datos sísmicos es una manera indirecta de determinar las velocidades de propagación de las ondas en los diversos tipos de rocas en el subsuelo (Cabello, 2007). La figura 12 muestra un análisis de velocidad realizado a un CMP *gather*, siendo la velocidad cuadrática media la que mejor ajusta para realizar la corrección por NMO.

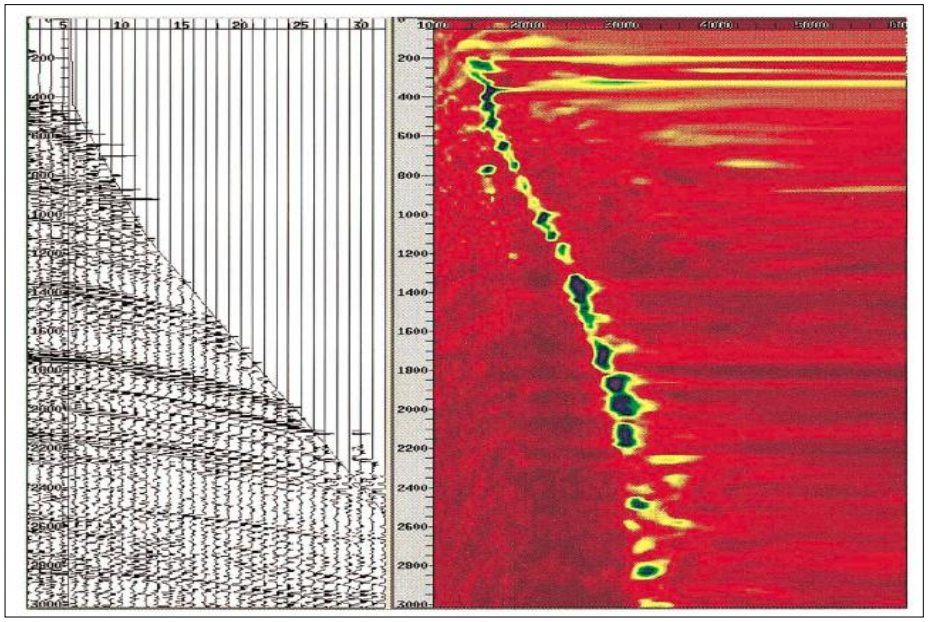


Figura 12 **CMP *gather* con su espectro de velocidad correspondiente.**

Las fases del procesamiento que dependen del análisis de velocidad se comprenden por:

- Corrección por *normal noveout* (NMO): Proceso que consiste en horizontalizar las trazas previamente ordenadas por punto medio común (CMP).

- Apilamiento de las trazas: Se refiere a la suma de las amplitudes de todas las trazas que estén en el mismo bin, es decir, que contengan el mismo punto común en profundidad o CDP.

- Migración después del apilamiento: consiste en migrar los datos previamente apilados a su posición original de manera de obtener una imagen del subsuelo que se asemeje a la geomorfología existente. Para realizar la migración en profundidad, es necesario utilizar la velocidad de apilamiento.

3.7 Corrección por NMO

Con el fin de corregir el retraso temporal causado por la distancia fuente receptor, se aplica la corrección por *normal move out*. La corrección NMO depende de la velocidad calculada por encima del reflector, offset, tiempo doble de viaje en cero-offset, buzamiento del reflector, ángulo entre la fuente y el receptor con respecto a la dirección del verdadero buzamiento y el grado de complejidad de la superficie cercana y el medio por encima del reflector (Yilmaz, 2001).

Suponiendo una capa ideal, es decir, una interfaz plana, homogénea, con espesor lateral constante y no dispersivo, la ecuación para realizar la corrección por NMO corresponde a la de una hipérbola, dada por:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{rms}^2}.$$

Donde x es la distancia (offset) entre la fuente y el receptor, Vrms es la velocidad del medio por encima de la interface, y t0 es el tiempo doble de viaje a lo largo del medio hasta dicho punto. (Yilmaz, ob. cit) señala que en este caso cuando el reflector es horizontal la proyección vertical del CDP coincide con la del CMP en superficie.

3.8 Apilamiento por CMP.

El apilamiento corresponde a uno de los tres pasos fundamentales en el procesamiento sísmico (deconvolucion, apilado y migración), las cuales juegan un papel importante en la mejora de la relación señal-ruido S/R en el procesamiento de datos sísmicos (Yilmaz, 2001).

Una sección sísmica procesada contiene trazas que han sido sumadas de diferentes registros, esto mejora la calidad de los datos. El número de trazas que han sido sumadas juntas en el proceso de apilado corresponden con la cobertura. Un apilado CMP provee una imagen cruda, que algunas veces pueden ser interpretadas sin necesidad de aplicar algoritmos de migración en caso de tener geología sencilla.
Con la suma de muchas trazas sísmicas en una, se puede atenuar el ruido e incrementa la calidad de la señal (Gupta, 2011).

3.9 Difracción.

En discusiones acerca de los principios de la sísmica de reflexión, se supone que la energía se transmite en interfaces planas y aproximadamente continuas, sin embargo, esto no es siempre lo que sucede. En discontinuidades entre interfaces abruptas, o estructuras cuyo radio de curvatura sea más corto que la longitud de onda de las ondas incidentes, las leyes de reflexión y refracción no tienen aplicación. Este fenómeno produce una dispersión radial de la energía sísmica incidente conocida

como difracción. Una de las fuentes de difracciones más comunes se forma en los bordes de las fallas (figura 13) (Kearey, Brooks y Hill, 2002).

En resumen, conseguimos que esos reflectores en el subsuelo puedan ser visualizados como un conjunto de muchos puntos que actúan como fuentes secundarias de Huygens tal como se ve en la figura 14 (Yilmaz, 2001).

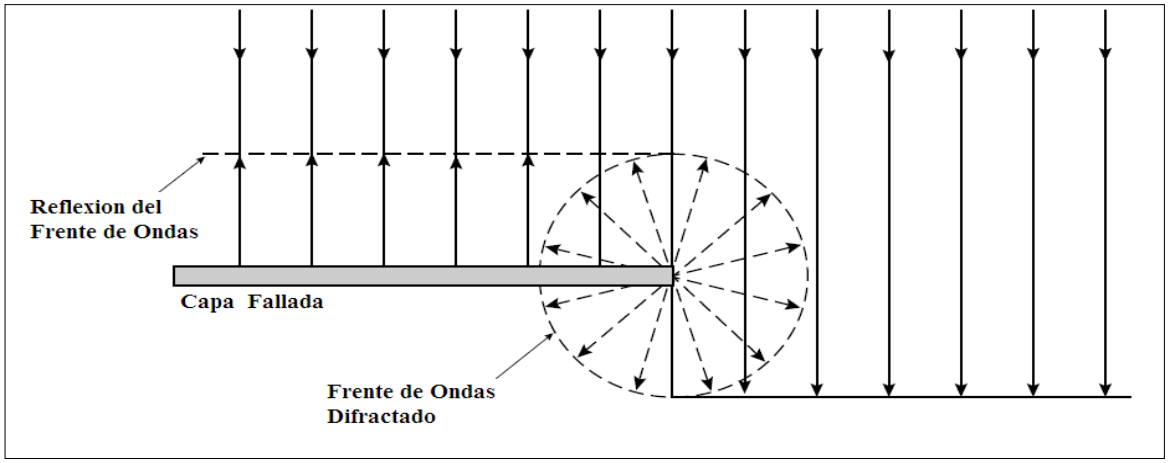


Figura 13 **Difracción causada por el borde de una falla, (modificado Kearey, Brooks y Hill, 2002)**

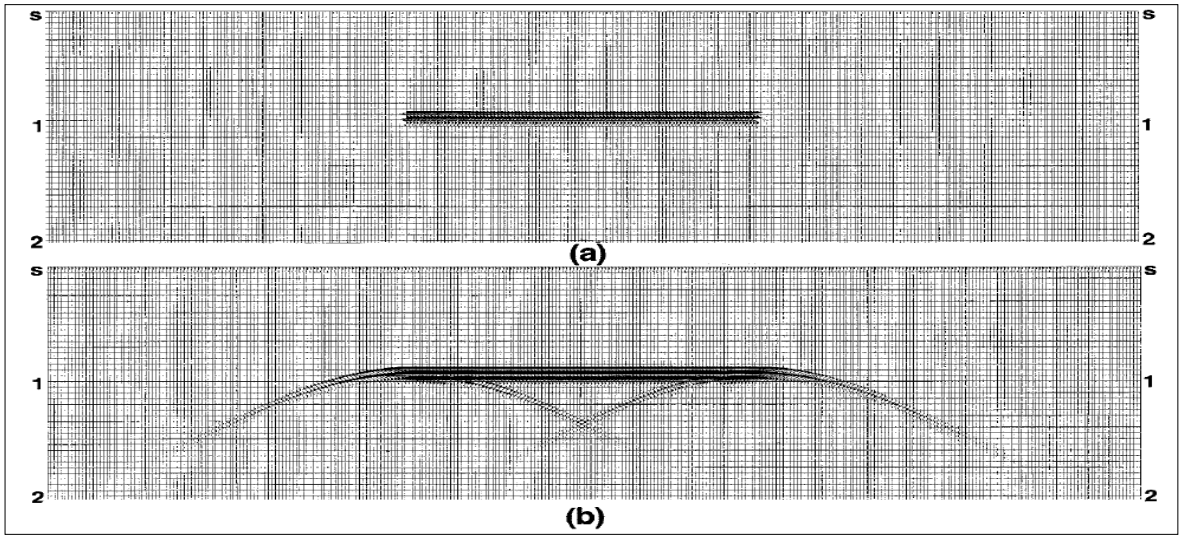


Figura 14 **Superposición de respuestas a cero-offset (b) de un numero de fuentes secundarias de Huygens (a).**

Cordsen et al (2000), señalan que cuando la energía fuente alcanza un punto de discontinuidad en el subsuelo (punto difractor), la energía reflejada logra la superficie desde distintos ángulos del punto. Cualquier receptor ubicado en la superficie, registra una reflexión correspondiente al tiempo que toma la energía en viajar desde la fuente al punto difractor, más el tiempo que toma en viajar hacia arriba, hasta la superficie. La agrupación de estas varias reflexiones a lo largo de la línea del receptor crea una curva de difracción (figura 15).

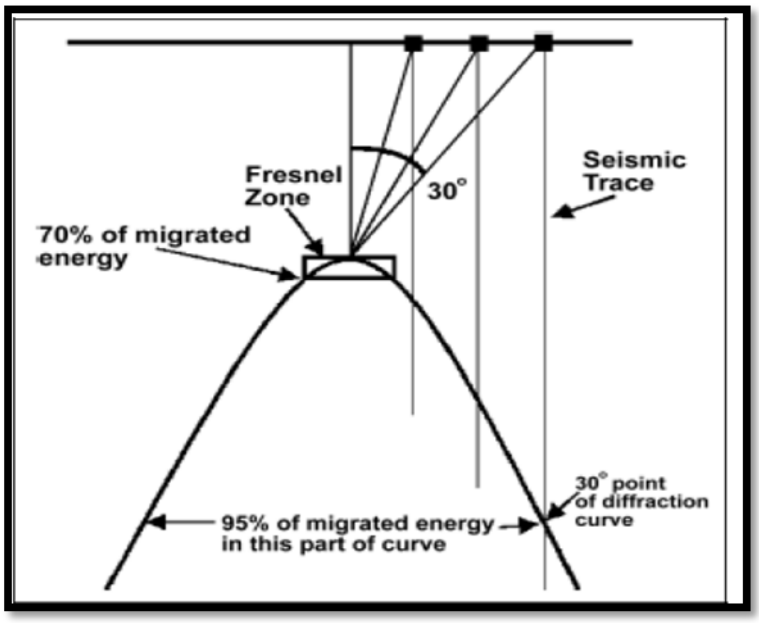


Figura 15 **Anatomía de una curva de difracción, (fuente: Cordsen et al, 2000).**

El área en el tope de la curva de difracción que tiene un espesor igual a un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia dominante es comúnmente llamada la primera zona de Fresnel o ápice de la hipérbola. Cada punto sobre la curva de difracción corresponden a diferentes rayos trazados desde el difractor a la superficie a distintos ángulos. Por lo tanto, la parte de la curva cerca de su ápice corresponde a

ángulos bajos de dispersión (*scattering*), mientras que las partes de la curva a tiempos dobles de viaje mayores corresponden a ángulos mayores (Cordsen et al).

Usando sólo la porción de la primera zona de Fresnel de una curva de difracción, resulta aproximadamente 70% de la energía completamente migrada (la zona de Fresnel corresponde aproximadamente a un ángulo de *scattering* de 15°). Usando ambos lados de la difracción a un ángulo de "scattering" de 30° da aproximadamente 90% de la energía completamente migrada (figura 15). El porcentaje exacto depende de las velocidades y las profundidades de los puntos difractores.

3.10 Migración sísmica

Toda señal sísmica grabada por un receptor se encuentra relacionada con un punto reflejado en profundidad denominado punto común de reflexión, en donde si se trata de reflectores horizontales, este punto común de reflexión debe coincidir con el punto medio en común (CMP), esto es debido a que el ángulo de incidencia del frente de ondas es igual al angulo de reflexión, figura 16

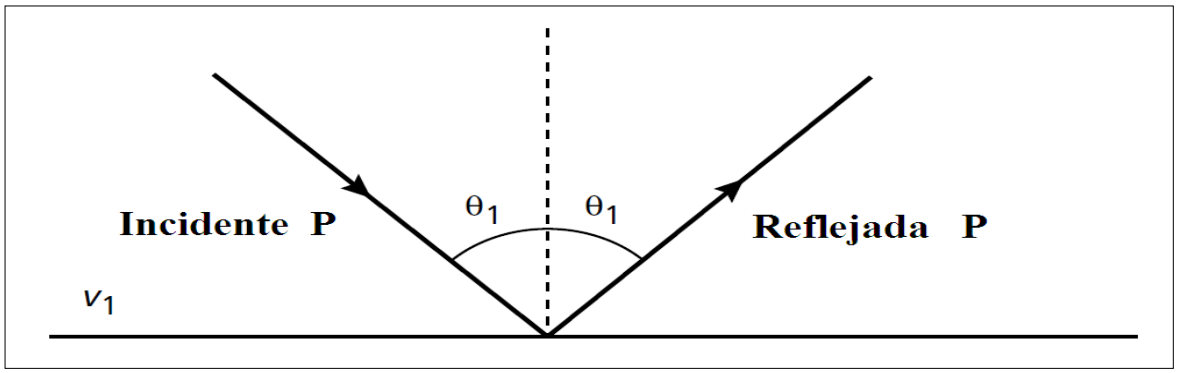


Figura 16 **Punto de reflexión (modificado Kearey, Brooks, Hill, 2002)**

Encontrar capas completamente horizontales resulta poco probable, siendo más factible encontrar variaciones estructurales en el subsuelo que generen

inclinaciones y capas buzantes, ya sean fallas geológicas, pliegues, discordancias, entre otras, que complican el fundamento teórico del punto medio en común (CMP). Es allí donde surge un gran problema al momento de interpretar la imagen sísmica, siendo factible la aplicación de algoritmos matemáticos que desplacen los reflectores a su verdadera posición, incorporándose el concepto de migración sísmica.

Yilmaz (2001) en su capítulo introductorio, señala que la migración mueve los reflectores buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y colapsa las difracciones, esto incrementa la resolución espacial y produce una mejor imagen sísmica del subsuelo.

Visto de manera simple, la migración está destinada a corregir de manera certera las distorsiones presentes en los campos de ondas grabados. Las distorsiones son causadas por las difracciones producidas dentro de la tierra, las cuales dispersan la energía incidente; efectos geométricos causados por reflectores buzantes; y efectos de velocidad, ocasionando que las ondas sísmicas cambien la dirección en las cuales se deberían propagar desde la fuente al reflector y del reflector al receptor (Gupta, 2011).

3.11 Migración 3-D

Para comprender el principio básico de la migración 3-D, Dobrin y Savit (1988), considera un punto difractor ubicado en un medio de velocidad constante. El tiempo de viaje de la curva desde el punto difractor en 2-D describe una trayectoria hiperbólica. Uno puede visualizar que la respuesta en tres dimensiones vendría dada por un hiperboloide como se muestra en la figura 17, sección a. La migración 2-D se encarga de sumar las amplitudes a lo largo de la hipérbola de difracción y coloca el resultado en el ápice de la hipérbola. La misma idea puede ser extendida en 3-D. La migración en 3-D se encarga de sumar las amplitudes sobre la superficie del hiperboloide y colocar el resultado en el ápice del hiperboloide tal y como se ilustra en la figura 17, sección b. Típicamente, en el caso de la migración 2-D, los valores

provenientes de las intersecciones de la hipérbola con al menos, por ejemplo, 300 trazas las cuales deben ser sumadas para producir un punto migrado. Esto implica que en datos 3-D, más de 70.000 por valores deben ser incluidos en esa suma.

Afortunadamente, existe una alternativa mucho más práctica que la suma de todos los puntos en la superficie de un hiperboloide. Como se observa en la figura 17,b. primero se debe sumar a lo largo de la sección de corte en dirección del eje y, es decir, en dirección in-line, y localizar las amplitudes resultantes en ápices locales como A0, A1, A2, A3. El resultado parcial suma y colapsa el hiperboloide a una hipérbola en el plano perpendicular a la dirección de las primeras sumatorias. Esta hipérbola consiste en un número de ápices locales y se encuentran contendidas en el eje x, es decir, en dirección cross-line. El segundo paso corresponde con la suma de la energía a lo largo de la hipérbola compuesta por los ápices locales y localizándolos en el ápice A0 final. A0, el cual es el ápice final del hiperboloide, representa la posición correcta de la suma final de la figura 17, b.

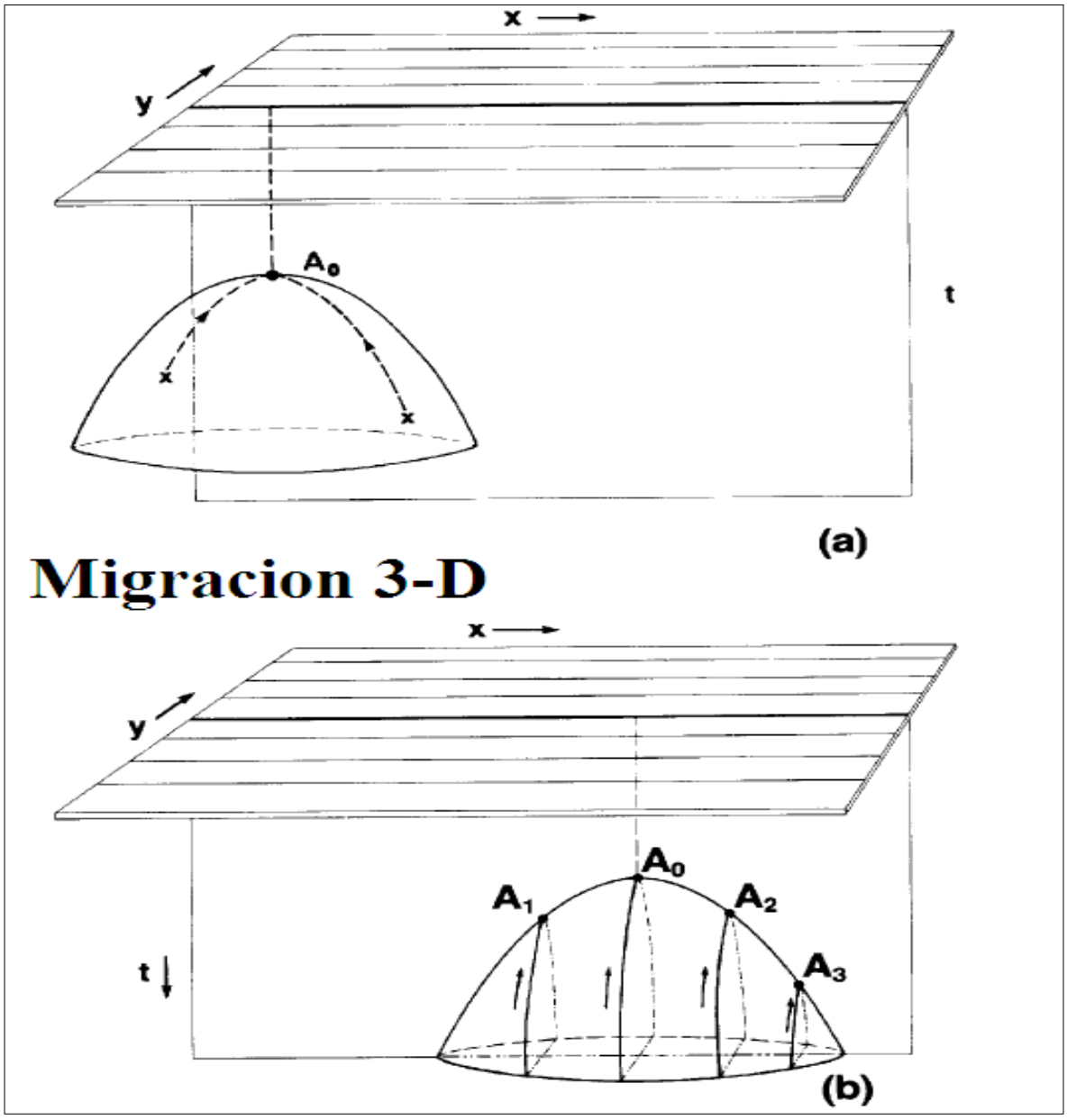


Figura 17 **(a) Hipérbola de difracción en tres dimensiones, (b) proceso de migración 3D**

Existe un problema práctico que debe tenerse encuentra al momento de realizar la migración 3-D. Una adquisición 3-D típica posee espacios lineales (los cuales son equivalentes al espaciamiento de trazas en dirección cross-line), que es

normalmente en el espaciamiento de trazas en dirección in-line. Ese espaciamiento da lugar a que se genere aliasing espacial en dirección cross-line. Es por eso que la interpolación de trazas debe ser incorporada en un estudio de migración 3-D, este procedimiento elimina dicho problema.

3.12 Tipos de migración.

El proceso de migración sísmica puede realizarse en dos fases; antes y después del apilado, siendo posible obtener una imagen en tiempo o en profundidad en ambas fases. Dependiendo de los objetivos planteados, se puede escoger cual migración se adapta mejor al estudio realizado. Yilmaz (2001), recomienda la aplicación del uso de diferentes migraciones dependiendo de los buzamientos y estructuras geológicas presentes en el lugar, por ejemplo, zonas con buzamientos las cuales generalmente son asociadas con domos de sal y planos de fallas, requieren la aplicación de migración 3-D pre apilamiento en tiempo. Por su parte, en zonas con geología compleja donde existan cabalgamientos tectónicos, corrimientos, pliegues, entre otras, se debe aplicar migración 3-D pre apilamiento en tiempo.

3.12.1 Migración en tiempo: todos los algoritmos de migración pueden producir secciones sísmicas en tiempo. Muchos geofísicos basan sus interpretaciones y juicios en secciones sísmicas vistas en tiempo como eje de referencia. Hubral y Krey (1980), señalan que la migración en tiempo puede ser vista como un tipo particular de reconstrucción de la imagen que transforma el registro sísmico en una imagen del subsuelo terrestre. El apilado CDP es otro tipo de reconstrucción de la imagen.

La calidad de la imagen sísmica se degrada progresivamente a medida que la geología se torna más compleja. Gadallah y Fisher, (2009), señalan que la migración en tiempo es una alternativa apropiada siempre y cuando las variaciones de velocidad

sean moderadas. Cuando esas variaciones son substanciales, la migración en profundidad se necesita para obtener una imagen del subsuelo más aproximada a la realidad.

*3.12.2 Migración en profundidad***:** secciones migradas en tiempo pueden ser estiradas de manera simple de acuerdo con una función vertical de velocidad para crear secciones donde la escala vertical esté en profundidad en vez de estar en tiempo (Sheriff y Geldart, 1995). Sin embargo, donde la velocidad varíe apreciablemente en dirección horizontal, se genera una complicación adicional que la migración en profundidad debe solucionar.

La migración en profundidad es más conveniente cuando el campo de velocidad esté correctamente estimado (Bancroft, 2007)

Hubral y Krey (1980) observaron que el ápice de una curva de difracción se localiza donde ocurre la reflexión de los rayos sísmicos, para luego dirigirse a la superficie en diferentes ángulos, sin embargo, en profundidad el ápice de la curva de difracción no se encuentra en el mismo lugar. Sherif y Geldart (1995) señalan que la migración convencional en tiempo colapsa las difracciones a la posición del ápice de la curva de difracción, así que un paso importante adicional que se necesita realizar es mover esos elementos a su verdadera posición en el subsuelo.

*3.12.3 Migración pre apilado***:** la migración pre apilamiento es un proceso que necesita mucho más tiempo de computo debido a que el número de trazas migradas es mucho mayor, puesto que no se encuentran apiladas en una traza matriz. Para esto se necesitan computadores de alto nivel para que la migración no tarde meses en ejecutarse. La migración pre apilado se aplica usando un modelo de velocidad que represente una acertada propagación del frente de ondas sísmicas dentro de estructuras complejas, estas velocidades usadas se estiman antes de realizar el análisis de velocidad de apilamiento. (Gupta, 2011). Es recomendable realizar migración pre apilamiento para estructuras complejas, debido a que la migración post apilamiento

arrastra errores de velocidad, debido a que se ignora la variabilidad lateral de la velocidad al ser apiladas las trazas por cada CMP.

3.12.4 Migración post apilado: las primeras migraciones digitales fueron realizadas en computadoras con limitaciones en procesador y memoria, es por eso que se volvió necesario aplicar migración después del apilamiento por CMP, el cual reduce el número de trazas a ser migradas, reduciendo el tiempo de computo en comparación con la migración pre apilamiento (Gupta, 2011).

Antes de la migración, este proceso lleva implícito realizar correcciones en tiempo (corrección por "normal moveout" o NMO) a las trazas respectivamente. La calidad del proceso de normal-moveout depende de la velocidad de apilamiento, la cual determina el tiempo que debe ser aplicado para corregir cada traza. Cuando todas las trazas en un CMP gather sean sumadas, el CMP gather será reemplazado por una traza simple llamada traza cero-offset.

Si bien la migración post apilamiento tarda menos tiempo que la migración pre apilamiento, existen factores que deben ser tomados en cuenta. Gupta (2011), señala que el proceso de apilado por CMP realiza varias aproximaciones que son incompatibles con la propagación física de la onda sísmica dentro de la tierra, por ejemplo, al ordenar por CMP, se supone que la velocidad sísmica no varía para todas las trazas dentro de la traza cero-offset, ignorando la variabilidad lateral de la velocidad, por ende, las aproximaciones que pueden realizarse en la migración post apilado usualmente no afectan la imagen en tiempos cortos de viaje, entonces, cuando el objetivo se encuentre relativamente superficial y la geología del lugar no sea compleja, la migración post apilado es una buena opción. Para objetivos profundos, y lugares con geología compleja, existen muchos cambios en la velocidad lateral que podrían afectar el proceso de migración post apilamiento, siendo recomendable aplicar migración pre apilamiento.

3.13 Principios de la migración.

Yilmaz 2001, señala un ejemplo que ayuda a entender el principio básico que rodea el proceso de migración:

Considerar el reflector buzante CD de la sección geológica simple en la figura (18, sección a). Se quiere obtener una sección de distancia a la fuente cero a lo largo del perfil Ox. Cuando se mueve el par fuente-receptor (s,g) a lo largo de Ox, la primera llegada de incidencia normal del reflector buzante se graba en la posición A. En esta discusión, se supone una velocidad constante media normalizada v = 1 para que ese tiempo y coordenadas de profundidad se puedan intercambiar. La llegada de la reflexión a la posición A se indica por el punto C´ sobre la sección de tiempo de cero-desplazamiento en la figura (18, sección b). Como nos movemos de la posición, se graban las llegadas de incidencia normal del reflector buzantes CD. La última llegada se graba en la posición B que se indica por el punto D´ en la figura 18 (b). En este experimento, se excluyen difracciones fuera de los bordes de CD del reflector para simplificar la discusión.

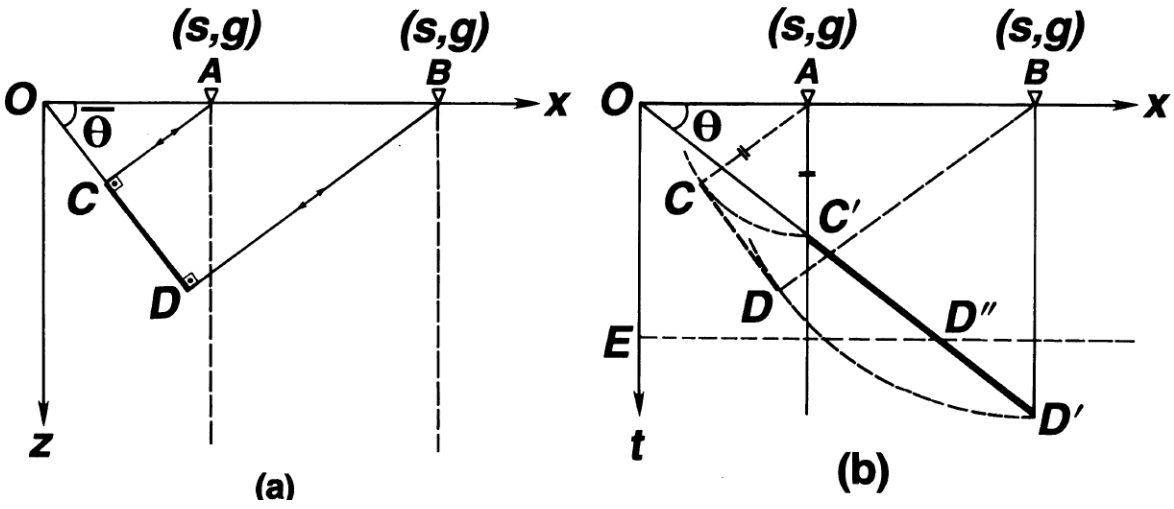


Figura 18 **(a) Sección geológica, (b) migración del segmento C´D´ a su verdadera posición CD en la sección en tiempo.(Yilmaz, 2001)**

Comparar la sección geológica en la figura 18 a que es en profundidad con la sección sísmica de cero-desplazamiento en la figura 18 b que es en tiempo. Las verdaderas posiciones en el subsuelo del reflector CD se sobreponen hacia la sección de tiempo para la comparación. Claramente la verdadera posición geológica del reflector CD no está igual que la posición del evento de reflexión C´D´. De esta construcción geométrica simple, se nota que la reflexión en sección de tiempo C´D´ debe migrarse a su verdadera posición del subsuelo CD en la sección de profundidad. Las siguientes observaciones pueden hacerse de la descripción geométrica de la migración en la figura 18.

(a) El ángulo de buzamiento del reflector en la sección geológica es mayor que en la sección de tiempo; así, la migración aumenta el buzamiento de los reflectores.

(b) La longitud del reflector, como se ha visto en la sección geológica, es más corto que en la sección de tiempo; así, la migración acorta los reflectores.

(c) Mueve los reflectores en la dirección ascendente del buzamiento.

3.14 Migración de Kirchhoff

La migración de Kirchhoff representa el método más utilizado en los últimos tiempos. Está basado en la suma de Kirchhoff obtenida a través de la integración de la ecuación de difracción de Kirchhoff (Ec. 3.14.1) a lo largo de las curvas de la migración, colapsando las amplitudes contenidas en ellas y su vez posicionando los resultados en la cimas de las difracciones. Según Yilmaz (2001), la apertura de migración es un parámetro crítico en caso de aplicar una migración Kirchhoff.

$$\psi\ x_0, t\ = \int_{\partial V} \frac{1}{r}\ \frac{\partial \psi}{\partial n}\ _{t+r/v_0} - \frac{1}{v_0 r}\frac{\partial r}{\partial n}\ \frac{\partial \psi}{\partial t}\ _{t+r/v_0} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial r}{\partial n}\ \psi\ _{t+r/v_0}\ ds \qquad \text{Ec (3.14.1)}$$

La anterior ecuación se conoce como integral de difracción de Kirchhoff y sus términos son evaluados en el tiempo avanzado$(t + r/v_0)$. Dondeψes el desplazamiento de la onda,v_0 es la velocidad, r es la distancia entre el receptor y el puno de dispersión y es el vector a la superficie∂V.

3.15 Apertura de migración:

La migración de Kirchhoff involucra una suma de amplitudes a lo largo de las hipérbolas de difracción. En teoría, una hipérbola de difracción se extiende hasta el infinito en tiempo y distancia. En la práctica, se tiene que tratar con una hipérbola truncada o limitada. La extensión espacial en la cual queremos extender la sumatoria es llamada apertura de migración, esta es medida en términos de números de trazas que intervienen.

Schultz, (1998), comenta que la apertura de migración se relaciona con la distancia horizontal sobre la cual un operador de migración abarca los datos con el fin de mover los reflectores. La apertura se torna más amplia con el aumento de la profundidad.

Yilmaz (2001), menciona que la curvatura de una hipérbola de difracción está gobernada en función de la velocidad. La figura 19-a muestra un número de hipérbolas de difracción con baja velocidad, mientras que la figura 19-b, muestra un número de hipérbolas con alta velocidad. Las hipérbolas con baja velocidad tienen una apertura reducida al compararlas con las hipérbolas con velocidades más altas. En práctica, se trabaja con una función de velocidad que aumenta en profundidad. Las hipérbolas de difracción pueden tener diferentes curvaturas dependiendo del valor de velocidad a medida que se profundiza en el subsuelo, lo que lleva a indicar que la apertura de migración es generalmente variante en el tiempo. La figura 19-c muestra la variación vertical de la velocidad en las hipérbolas de difracción.

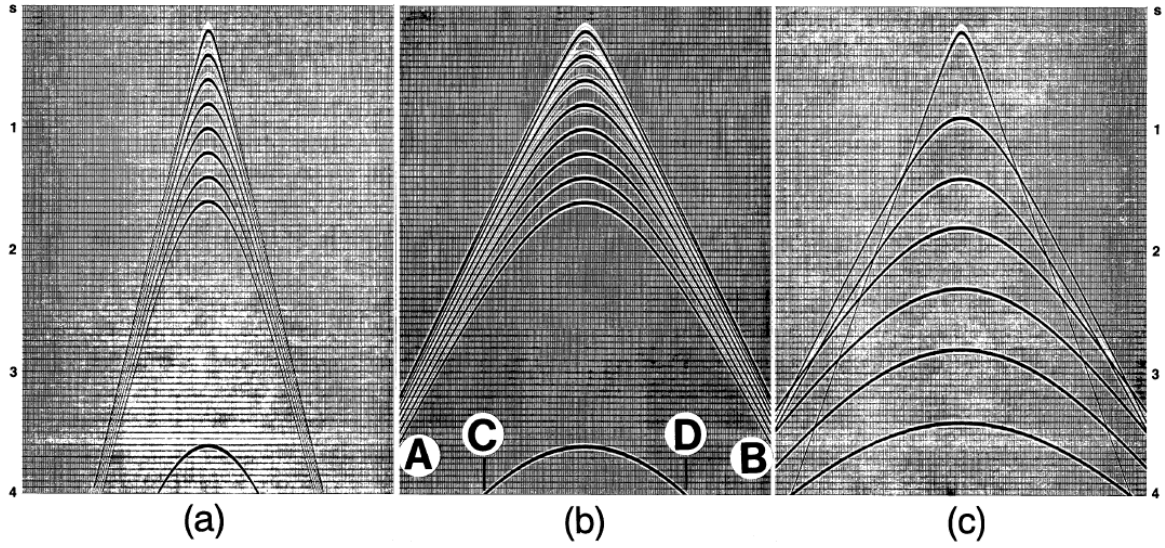


Figura 19 **Hipérbolas de difracción, (a) bajas velocidades (2000 m/s), (b) altas velocidades (4000 m/s), (c) variación vertical de la velocidad. La apertura de migración es pequeña para cortas velocidades y grande para altas velocidades. (Yilmaz, 2001)**

Para casos usuales, en la cual la velocidad aumenta con la profundidad, la migración de la parte más superficial de la sección requiere una apertura de migración angosta, mientras que la migración de la porción en profundidad requiere una apertura más ancha.

Sheriff (2002), señala que el colapso de las hipérbolas de difracción a sus ápices es inversamente proporcional a la apertura de migración. La apertura de migración se relaciona cercanamente con el espaciamiento horizontal d*x*, que toma lugar en la migración, donde el número de trazas de un evento a migrar es $nx = dx / \Delta x$, por lo tanto la apertura de migración que es requerida es de $2nx + 1$.

La figura 20 muestra la apertura de migración de un ejemplo donde se tiene una distancia horizontal medida en número de trazas y existe una profundidad truncada máxima abarcada por la apertura de migración de Kirchhoff.

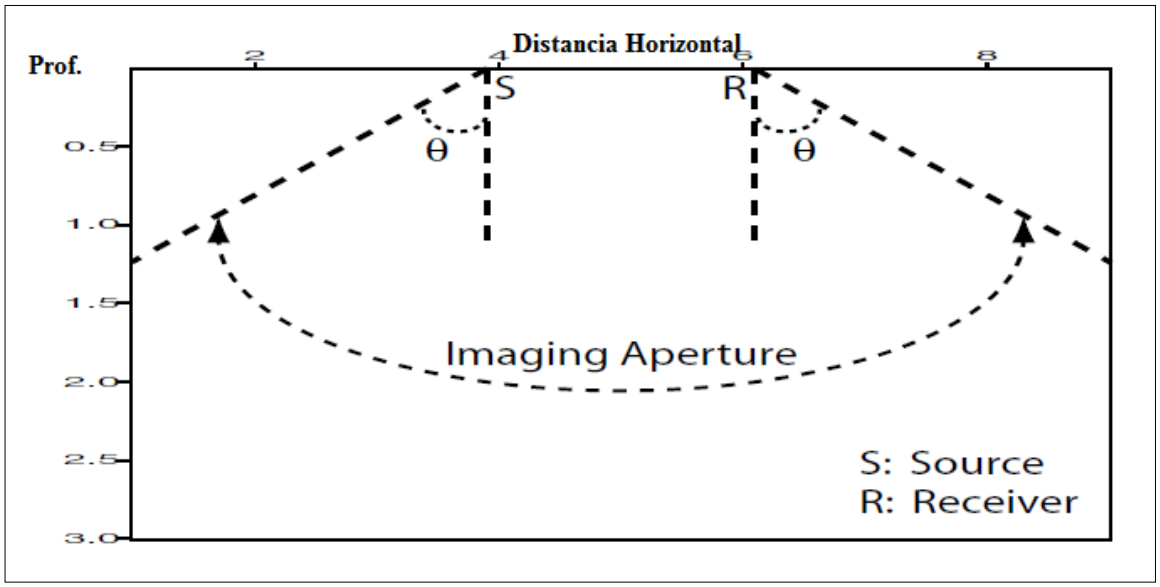


Figura 20 **Apertura de migración**

La figura 21 muestra la migración de Kirchhoff para eventos buzantes usando cuatro diferentes aperturas de migración. Cortas aperturas de migración eliminan buzamientos para eventos pronunciados vistos en la sección. Incrementar la apertura de migración permite una migración apropiada para eventos abruptos más profundos.

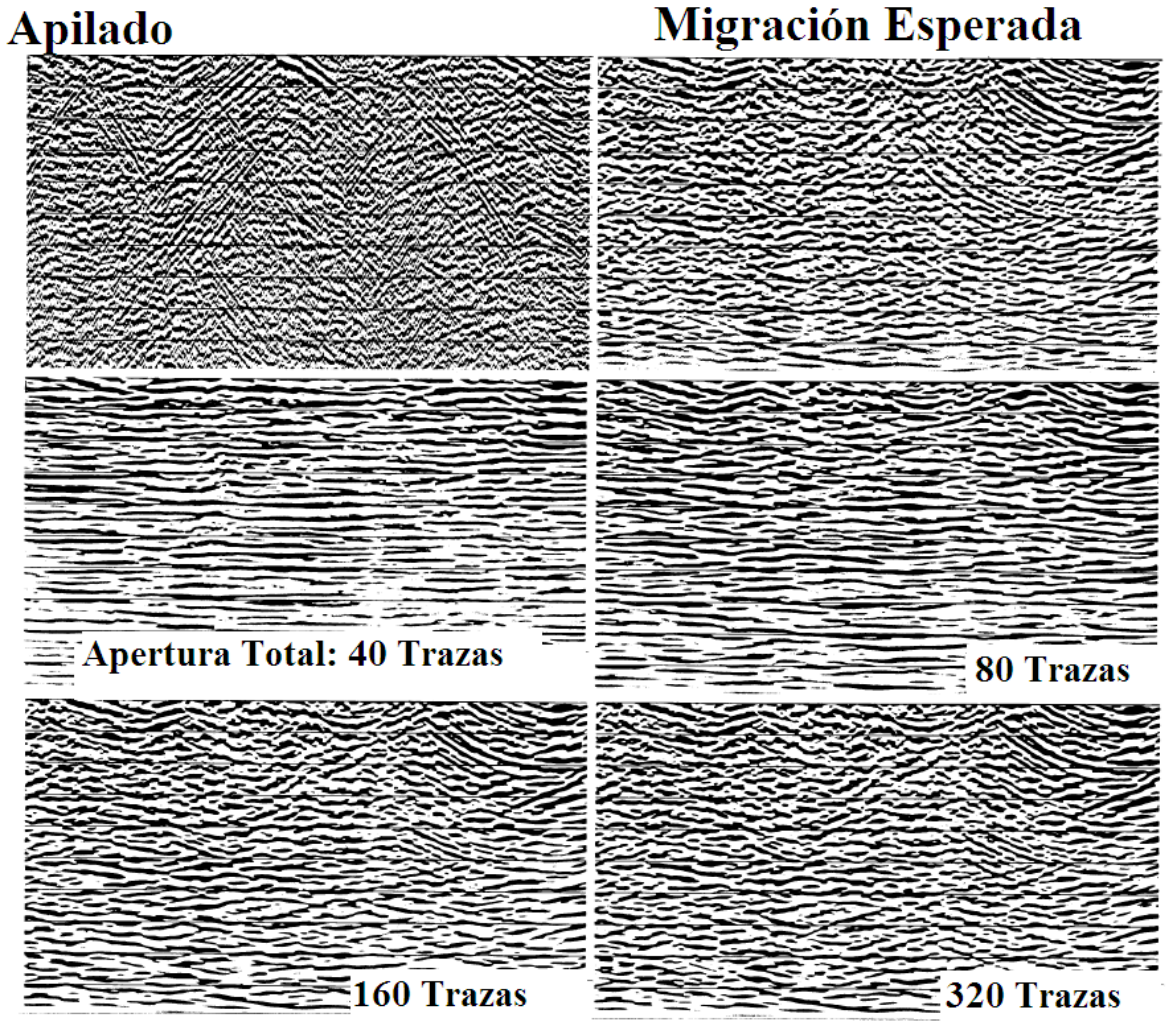


Figura 21. **Prueba realizada con diferentes aperturas de migración de Kirchhoff. Aperturas de migración insuficientes causan falsos eventos horizontales en profundidad. Parte ruidosa de la sección apilada. (Yilmaz, 2001).**

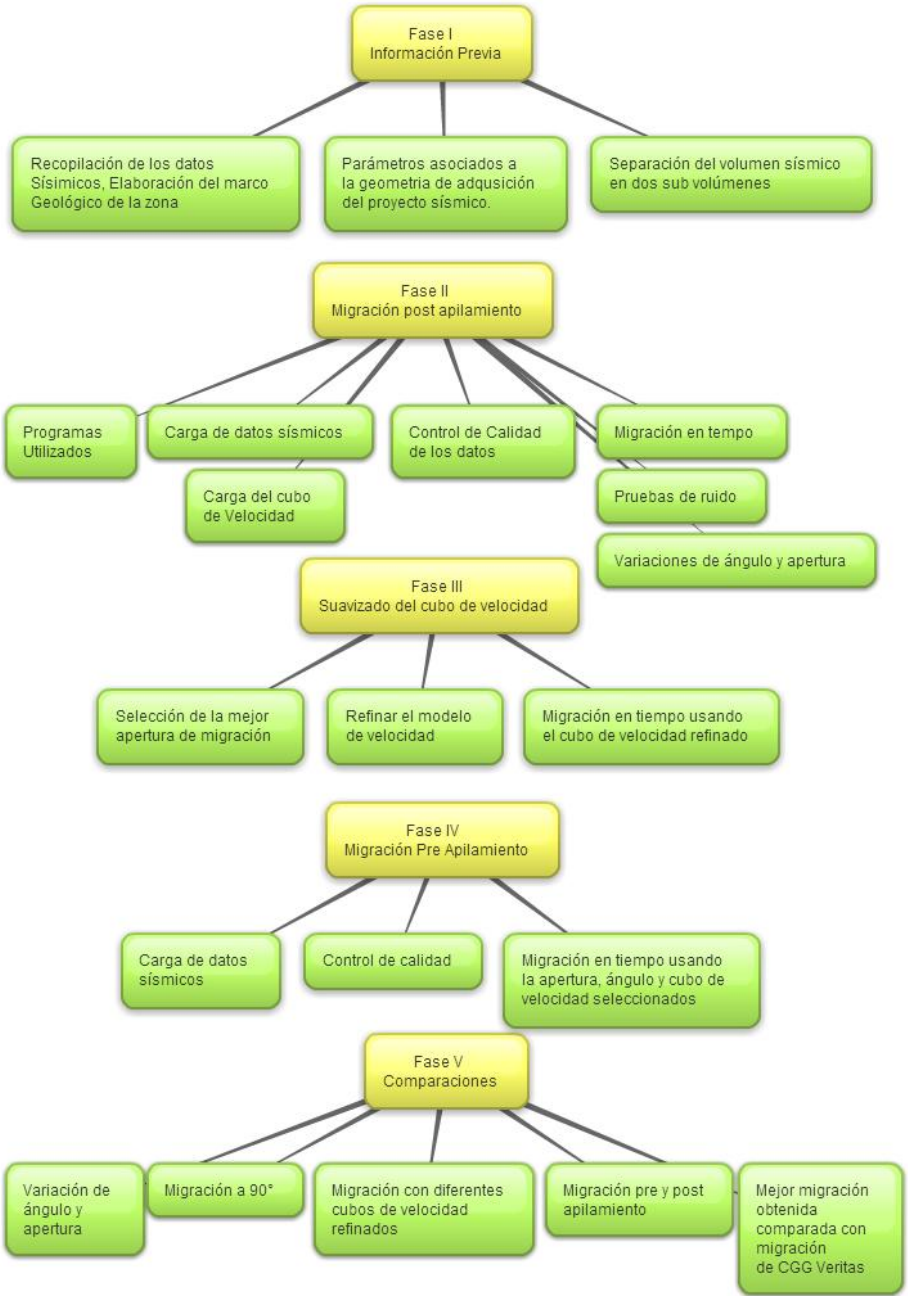
Yilmaz (2001), ofrece una serie de recomendaciones en base a la evaluación y escogencia de apertura de migración.

- Aperturas de migración cortas causan la destrucción de eventos con buzamientos bruscos y cambiando rápidamente las variaciones de amplitudes
- Aperturas de migración cortas organizan el ruido aleatorio, especialmente en la parte más profunda de la sección.

- Aperturas de migración largas conllevan a tiempos de cómputo más largos. Amplitudes largas pueden degradar la calidad de la migración empobreciendo la relación señal ruido. El uso de largas aperturas de migración puede causar que el ruido aleatorio en tiempos largos se desplacen dentro de los datos superficiales que se encuentren en buen estado. La apertura de migración siempre está relacionada al ruido.
- Algunas veces es mejor usar una apertura de migración pequeña que en teoría podría ser requerida para evitar el efecto adverso del ruido del evento migrado.
- Es recomendado que la apertura de migración se mantenga constante en el proceso de migración de todas las líneas de un estudio particular, esto proveerá una total uniformidad en las amplitudes en las secciones migradas.
- La combinación de una máxima apertura de migración, aunada a un máximo límite de buzamiento, determina la apertura de migración más efectiva en la migración por Kirchhoff.

CAPÍTULO IV
METODOLOGÍA

La metodología aplicada para el desarrollo de la investigación estuvo enmarcada bajo el siguiente flujo de trabajo:



4.1 Fase 1: información previa

4.1.1 Recopilación de datos sísmicos y elaboración del marco geológico de la zona: La recopilación de información comenzó con la búsqueda bibliográfica referente a comportamiento geológico de la zona de estudio, siendo de mayor interés la información correspondiente a formaciones geológicas predominantes, para determinar su litología, profundidad y espesores, así como la evolución tectónica de la cuenca Barinas Apure. Así, fue posible apreciar el contexto geológico predominante en el lugar de estudio, permitiendo reconocer diferentes aspectos tales como rumbo, buzamientos, estructuras geológicas, etc.

En cuanto a la información científica que ilustraría de manera teórica los efectos y el uso de la migración sísmica, ésta se encontró en textos y artículos utilizados en la elaboración del marco teórico del presente trabajo, conformando la base científica del proyecto.

Los datos sísmicos suministrados corresponden al proyecto de adquisición sísmica Barinas Este 07G 3D llevado acabo por PDVSA exploración en conjunto con DAQING DE VENEZUELA C.A. Este proyecto fue ejecutado a mediados del año 2012, teniendo como finalidad continuar con la localización de hidrocarburos y zonas de interés estratigráfico en la cuenca Barinas Apure mediante la adquisición sísmica de alta resolución. El proyecto se desarrolló dentro de un polígono de ocho vértices, abarcando un área total de 934,6 km^2

*4.1.2 Geometría de adquisición: l*os parámetros de adquisición sísmica se resumen en las tablas presentadas a continuación:

Tabla 1

Parámetros

Nombre	Parámetros
NÚMERO DE CANALES	2048
NÚMERO DE LÍNEAS	16
CANALES POR LÍNEA	128
BIN SIZE	25*50
COBERTURA	64
OFFSET MÁXIMO	4472 m
DIST. ENTRE RECEPTORES	50 m
DIST. ENTRE FUENTES	100 m
DIST. ENTRE L. RECEPTORAS	400 m
DIST. ENTRE L. FUENTES	400 m
LONGITUD DEL REGISTRO	10 s
INTERVALO DE MUESTREO	2 ms

4.1.3 Selección de sub volúmenes: debido a las grandes dimensiones del proyecto Barinas Este 07G 3D, se decidió separar los datos sísmicos en dos sub volúmenes. La figura 22 muestra las dimensiones completas del proyecto, comprendido por un área total de 956 kilómetros cuadrados.

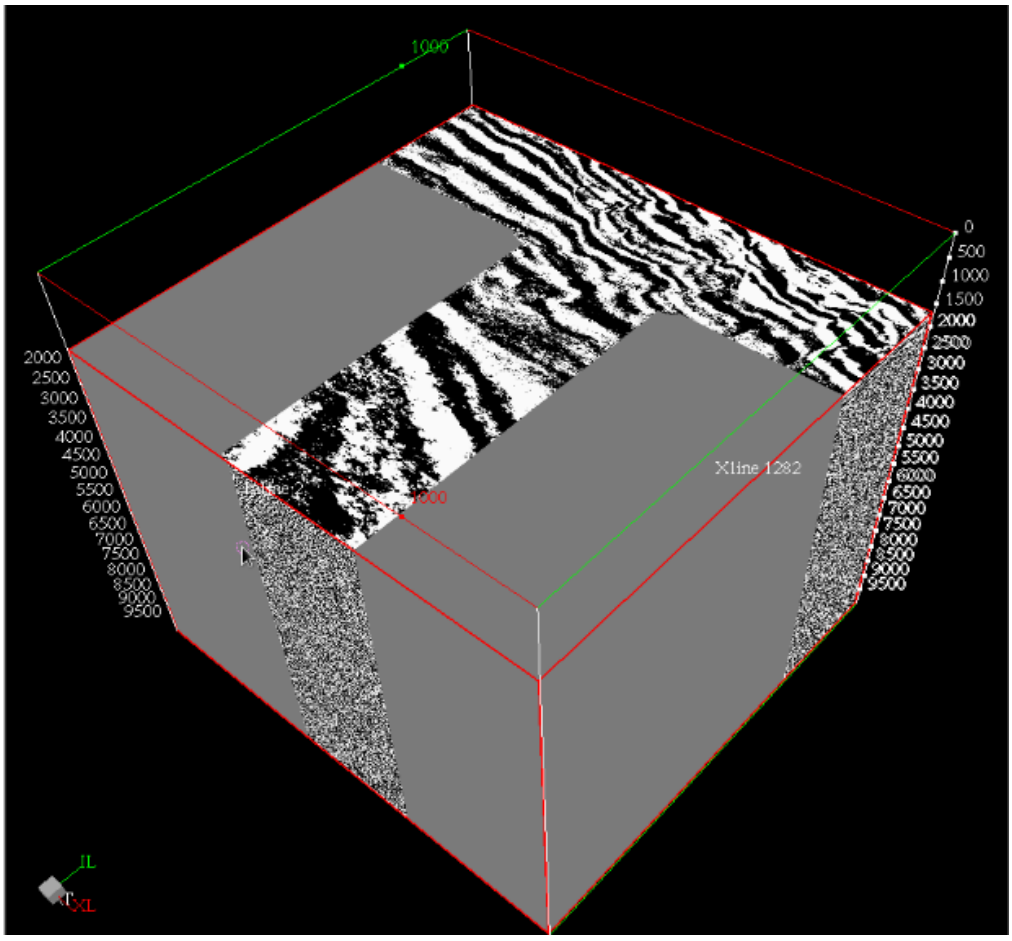


Figura 22 Distribución del proyecto Barinas Este 07G 3C

Para la migración de Kirchhoff post apilamiento se utilizó el volumen limitado por las inline (890 - 1217) y las crossline (3 – 1282) visto en la figura 23; este sub volumen abarca un área de 510 kilómetros cuadrados

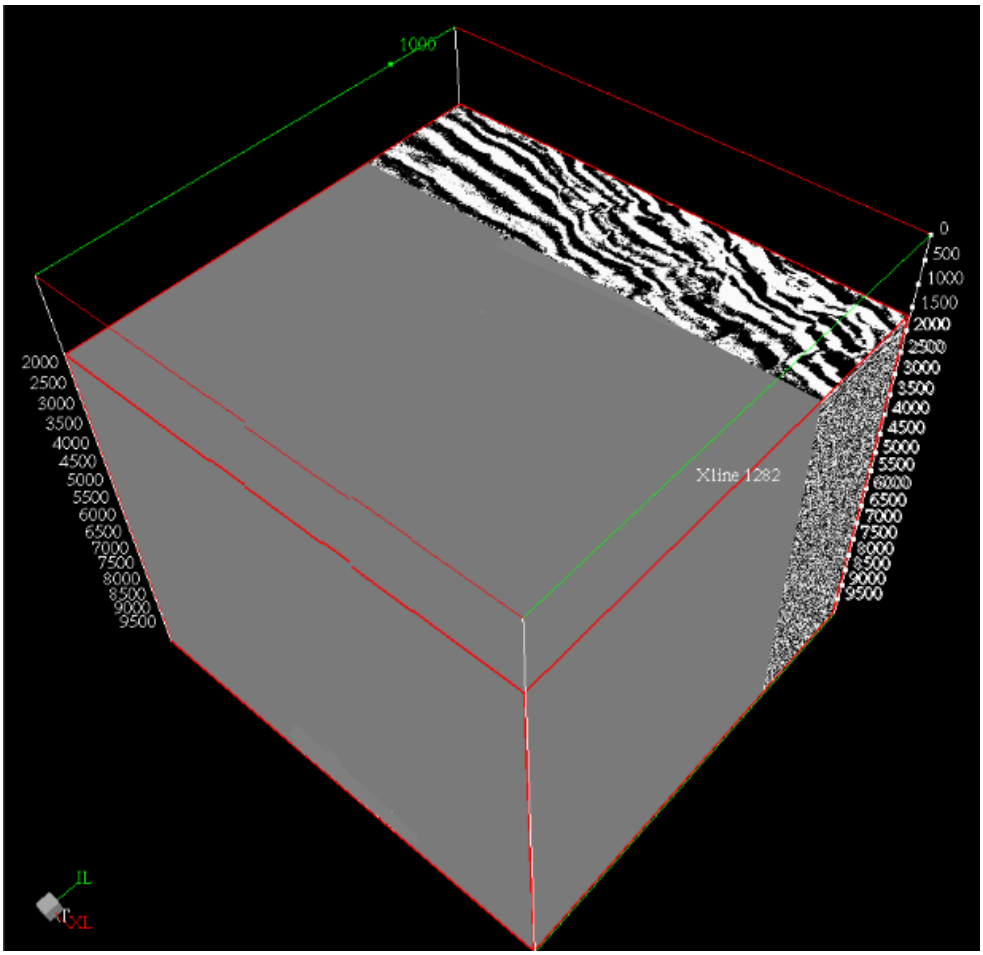


Figura 23 Área enmarcada para realizar la migración post apilamiento

Por su parte, para el proceso migración de Kirchhoff con datos pre apilamiento, se trabajó con un sub volumen más pequeño visto en la figura 24, esto se debe a que los tiempos de cómputo son considerablemente mayores en comparación con la migración post apilado. El sub volumen se vio limitado por los inline (890 - 1217) y crossline (3 – 460) y abarco un área de 330 kilómetros cuadrados.

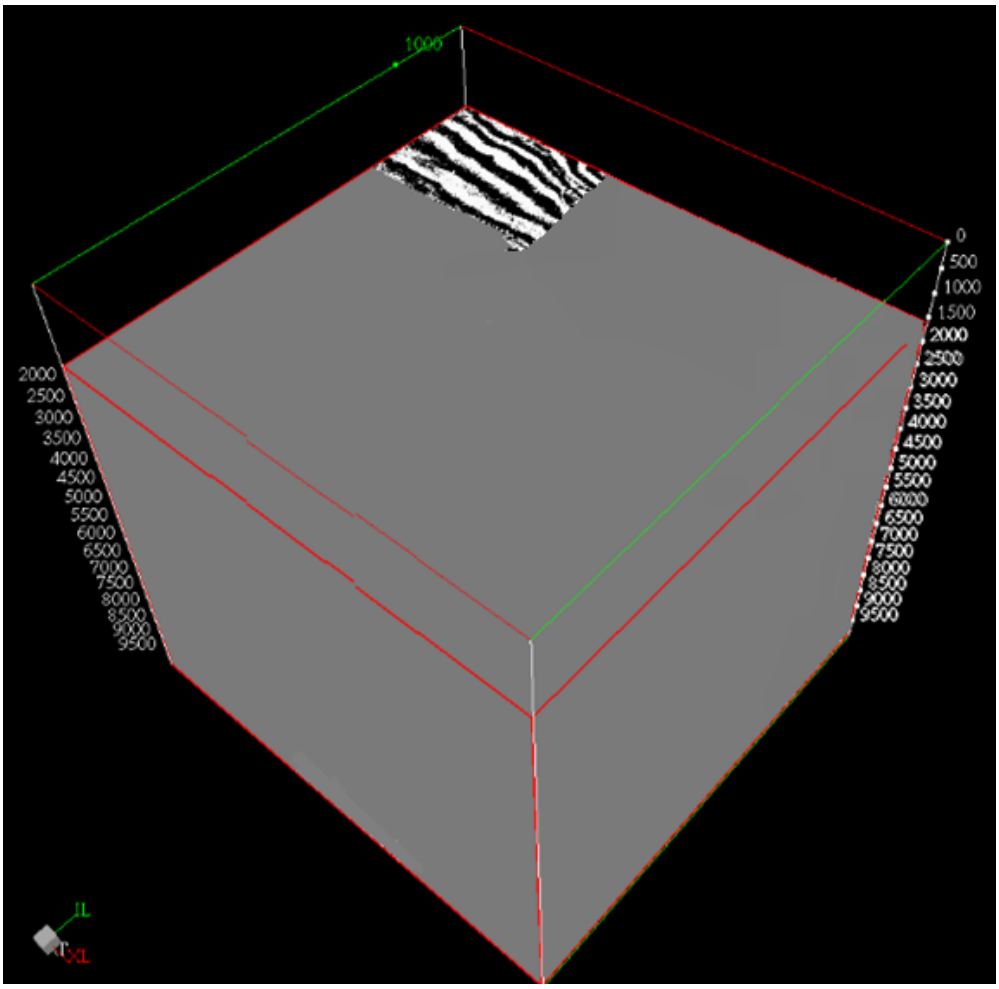


Figura 24 Área enmarcada para realizar la migración pre apilamiento

La figura 25 muestra en planta el área del sub volumen utilizada para aplicar la migración de Kirchhoff en tiempo pre apilamiento, este mapa presenta la cobertura distribuida a lo largo del área, siendo relativamente baja en los vértices norte, aumentando la cobertura en el resto del volumen.

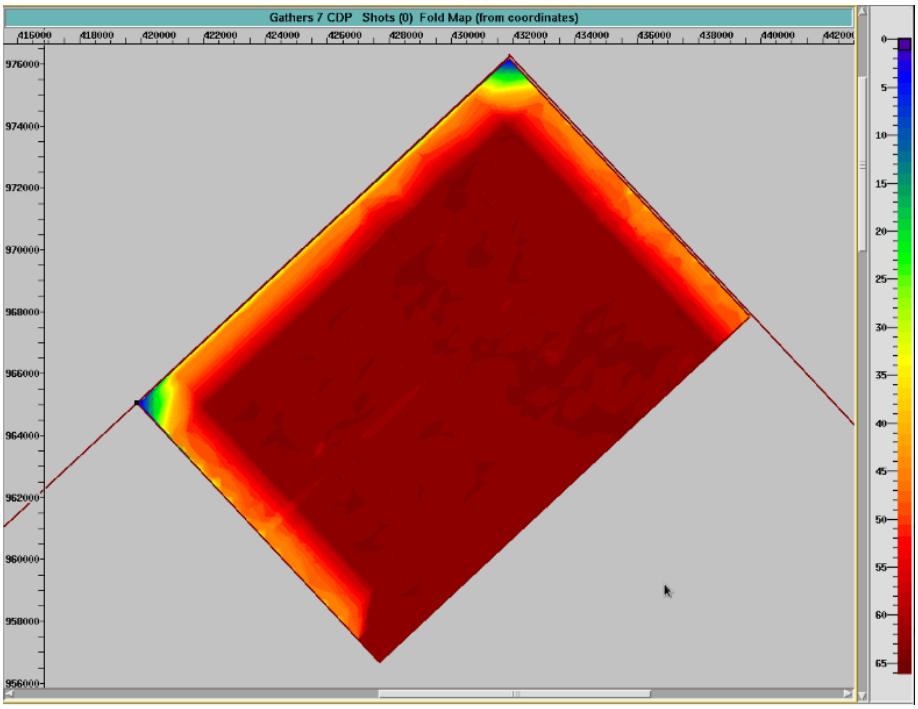


Figura 25 **Mapa de cobertura**

4.2 Fase II: migración post apilamiento

4.2.1 Programas: se utilizaron dos programas para realizar el procesamiento de los datos sísmicos 3D: el programa FOCUS Paradigm 5.4 y el Tsunami versión 2012.

Focus Paradigm 5.4 es un software de procesamiento sísmico ampliamente empleado en la industria petrolera. Fue utilizado principalmente para cargar datos sísmicos, cargar y editar el modelo de velocidad, generar el archivo.SEGY para procesar en Tsunami, visualizar y analizar las migraciones, entre otros.

Por su parte, el software de procesamiento Tsunami 2012, fue empleado para aplicar las distintas migraciones de Kirchhoff 3D antes y después del apilamiento, variando los parámetros de apertura, ángulo y velocidades.

4.2.2 Carga de datos sísmicos: los datos sísmicos SEGY suministrados para realizar la migración post apilamiento correspondieron a un apilado sin post procesos de todo el volumen sísmico desde inline (2 - 1217) y crossline (3 -1282), estos fueron re

muestreados a 6 ms para disminuir el peso de los datos y optimizar el tiempo de la migración post apilamiento.

Para llevar a cabo la carga de los datos sísmicos en Focus 5.4, se definió un nuevo flujograma de trabajo mostrado en la figura 26.

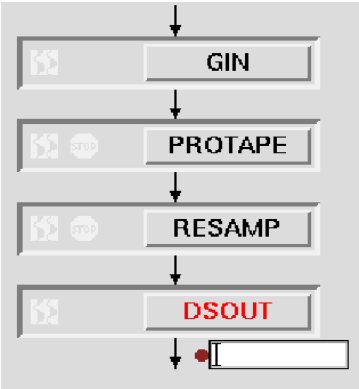


Figura 26 **Flujograma final del trabajo aplicado a los datos sísmicos para cargarlos a la base de datos de Focus 5.4.**

GIN: Programa usado para leer datos sísmicos en cualquier formato de procesamiento y transformarlo a formato interno de Focus para poder procesar los datos. En el caso de los datos del proyecto Barinas Este 07G 3D, se debe colocar cierta información de entrada:

- LENGTH: longitud del registro sísmico medido en milisegundos.
- DT: tasa de muestreo, en milisegundos.
- MAXNTR: número de trazas máximas por arreglo.
- ENSEMBL: relacionado con el orden o tipo de arreglo en el cual los datos de entrada se encuentran dispuestos.
- DIR: especifica el orden numérico en el cual se encuentra arreglado.
- FORMAT : identifica el formato de la cinta.

PROTAPE: al aplicar protape a los datos sísmicos, el programa crea, asocia o actualiza los *headers* comprendidos en el formato SEG-Y. Con la opción UPDAT=CDP el programa lee los datos por CDP, siendo esta la opción correcta debido a que se trabaja con un apilado.

RESAMP: el remuestreo es un proceso aplicado para disminuir la cantidad de datos sísmicos, se pasó de un intervalo de muestreo de 2 ms a un intervalo de 6 ms, de esta manera, al tener datos sísmicos menos pesados, es posible disminuir los tiempos de cómputo.

DSOUT: este programa es el proceso final asociado a la carga del volumen sísmico 3D apilado, siendo necesario aplicar varios pasos:

- AREA: se define el cubo sísmico manualmente, colocando el inline y crossline inicial y final así como la separación entre ellas.

- LABEL**:** define el nombre con el cual será guardado el nuevo proceso creado.

4.2.3 Cubo de velocidad: el cubo de velocidad correspondió a un volumen limitado por los inline (2 - 1217) y crossline (3 - 1282). Este fue cargado en focus con el siguiente flujograma de trabajo que se muestra en la figura 27:

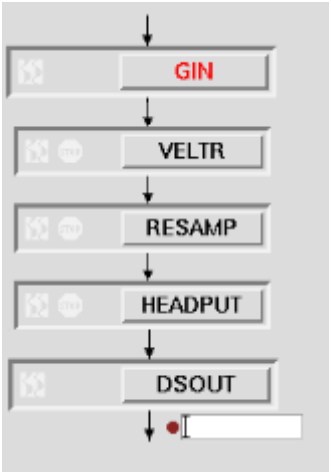


Figura 27. **Flujograma de trabajo empleado para cargar el cubo de velocidad**

GIN: al igual que para la carga de los datos sísmicos 3D, el programa GIN fue utilizado para leer funciones de velocidades almacenadas en formato SEG-Y y a partir de allí guardarlas dentro de la base de datos de Focus 5.4. A fin de relacionar el cubo de velocidad con la geometría del proyecto, debió colocarse el inline y crossline inicial y final.

VELTR: es un programa utilizado para almacenar funciones de velocidad y profundidad en la base de datos de Focus 5.4. Al aplicar VELTR, debe indicarse qué tipo de velocidad por la cual está compuesto el cubo de velocidad. Se definieron parámetros tales como:

- VNAME: define el nombre que tendrá el cubo de velocidad en la base de datos de Focus 5.4.

- VDEFTYP: tipo de velocidad asociada al cubo de velocidad, en este caso, la velocidad corresponde a la RMS.

RESAMP: debido al gran peso del cubo de velocidad, se decidió remuestrearlo a 20 milisegundos para disminuir los tiempos de cómputo.

HEADPUT: por sus siglas en ingles “Trace Header Modification”, este programa asigna valores a los headers de entrada con formato SEG-Y, también se pueden actualizar o reemplazar dichos valores. Los parámetros del HEADPUT aplicados fueron los siguientes:

- HDRNAM: comprueba los encabezados de las trazas para determinar si el header de entrada existe. Al encontrar los valores predeterminados correctamente entonces se usó el parámetro OPER

- OPER: determinó la relación entre valores nuevos y antiguos.

- FORMAT: especificó el formato por el cual los valores del HDRNAM debieron ser guardados.

DSOUT: este programa guardó en formato interno de focus, el SEG-Y de velocidad cargado mediante los procesos descritos anteriormente. Se usaron las opciones LABEL y AREA explicados anteriormente en la carga de datos sísmicos.

Finalmente, el cubo de velocidad RMS fue manipulado en Focus. La figura 28 muestra el volumen de velocidad mientras que la figura 29 define el modelo de velocidad visto en dos dimensiones por inline y crossline.

La velocidad mínima RMS fue de 1430 m/s y aumentó progresivamente alcanzando su máximo valor a los 10 segundos de 5170 m/s. Este modelo inicial de velocidad fue refinado para obtener una imagen sísmica óptima.

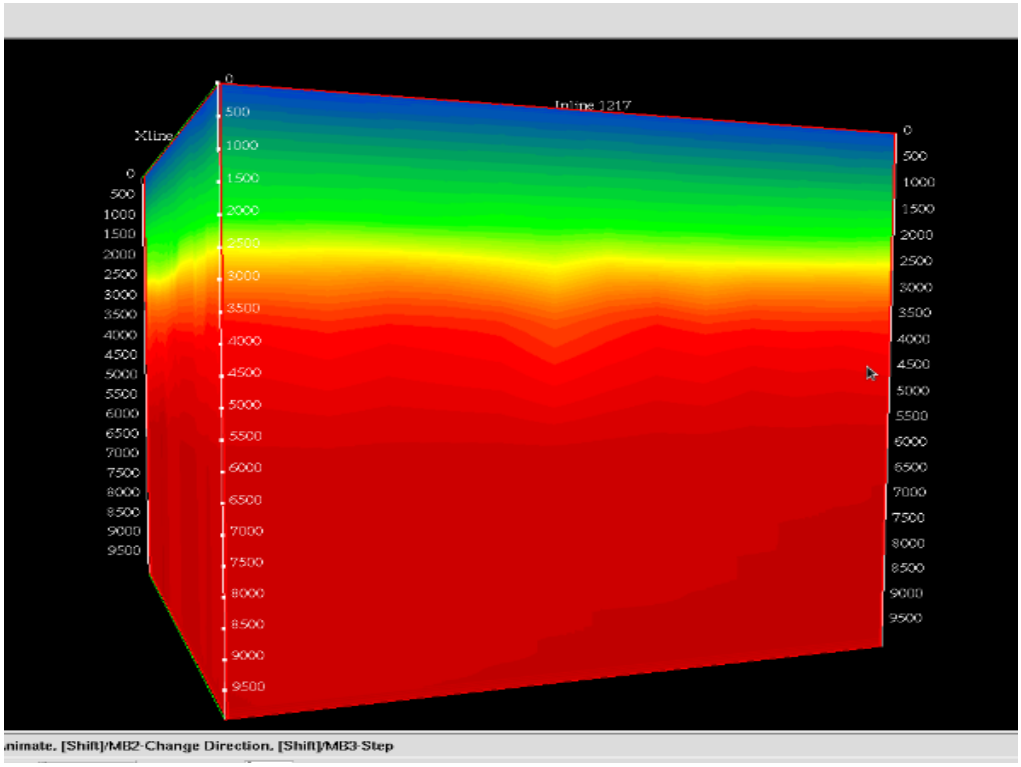


Figura 28 **Cubo de velocidad en tres dimensiones**.

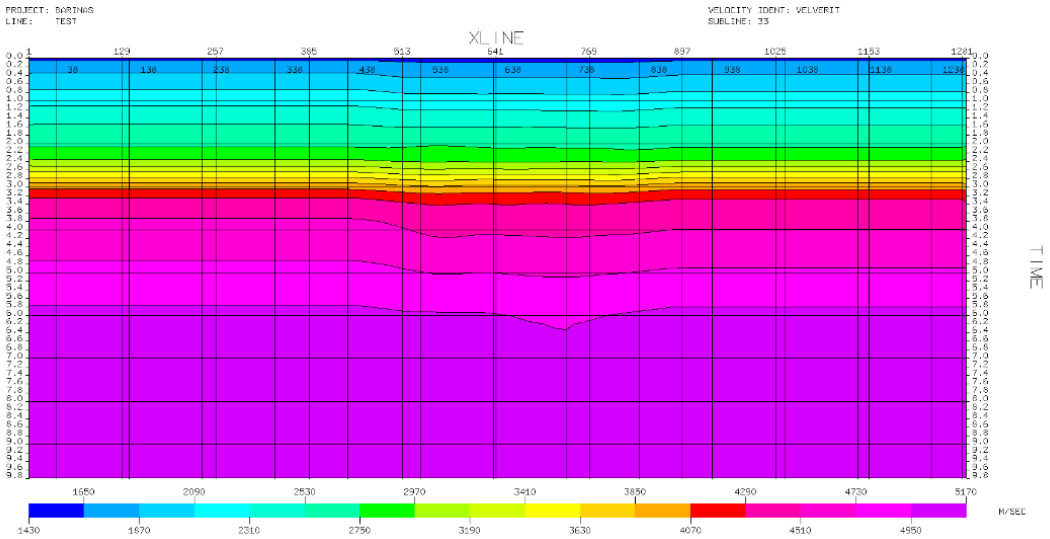


Figura 29 **Cubo de velocidad en dos dimensiones inline**.

4.2.4 Control de calidad de los datos: evaluar el estado de los datos fue un proceso primordial; debe recordarse que al tratarse de un apilado, procesos como deconvolución, cálculo de estáticas, ganancias y filtros ya fueron aplicados para generar una imagen sísmica con el menor ruido posible.

El control de calidad tiene que ver con la evaluación de los contenidos de frecuencias asociados al estudio, por su parte, al ser un apilado sin post procesos, si presenta difracciones, estas deben ser corregidas por un proceso de migración sísmica.

Se inspeccionó la calidad de varios inline y crossline del cubo sísmico 3D, la figura 30 muestra el inline 952 con su análisis de frecuencias; en ésta se observa un contenido de frecuencias variable de 10 a 80 Hz, lo que indica que fueron filtradas las frecuencias mayores a 80 Hz y menores a 10 Hz, por su parte, se subrayan en cuadros rojos los distintos lugares donde existe el efecto de las difracciones producto de fallas y buzamientos, provocando a su vez una disminución en la continuidad de los estratos. Efectos como difracciones y continuidad de horizontes pueden ser corregidos aplicando parámetros adecuados en una migración de Kirchhoff 3D.

A lo largo de todos los inline y crossline del cubo sísmico apilado, se determinó el mismo contenido de frecuencias, siendo la relación señal ruido muy buena, a su vez en todos los registros se observaron difracciones, falta de continuidad y otros fenómenos asociados al efecto producido por fallas, estructuras y buzamientos.

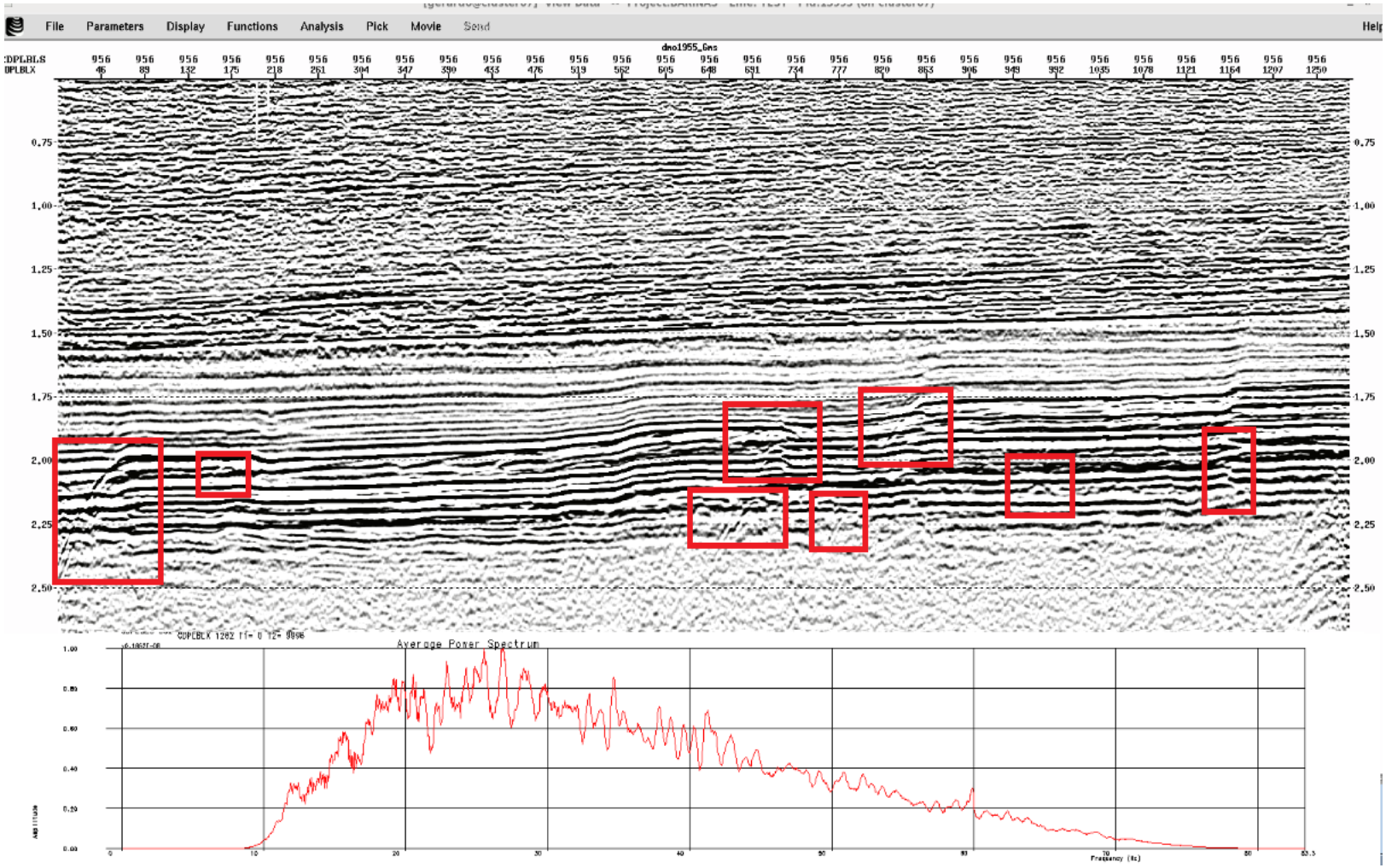


Figura 30 **Inline 953, gráfico de frecuencias, difracciones encerradas en cuadros rojos**

4.2.5 Pruebas de ruido: a fin de comprender el comportamiento de la migración de Kirchhoff en los datos sísmicos de entrada, se realizaron diferentes pruebas de ruido, basadas en la aplicación del algoritmo de migración de Kirchhoff 3D en una traza piloto, variando ángulo y apertura de migración; de esta manera, se pudo conocer, para diferentes tipos de datos, los valores óptimos que debía tener la migración de Kirchhoff antes y después del apilamiento. La figura 31 muestra un ejemplo de la prueba de migración en una traza sísmica, donde se pudo observar el efecto limitante del ángulo y la apertura.

Las pruebas de ruidos comprendieron una parte esencial de la migración de Kirchhoff 3D, esto se debió a que mediante la aplicación de las mismas pudo determinarse visualmente si el ángulo o la apertura afectaba la imagen sísmica distorsionándola e introduciendo ruido.

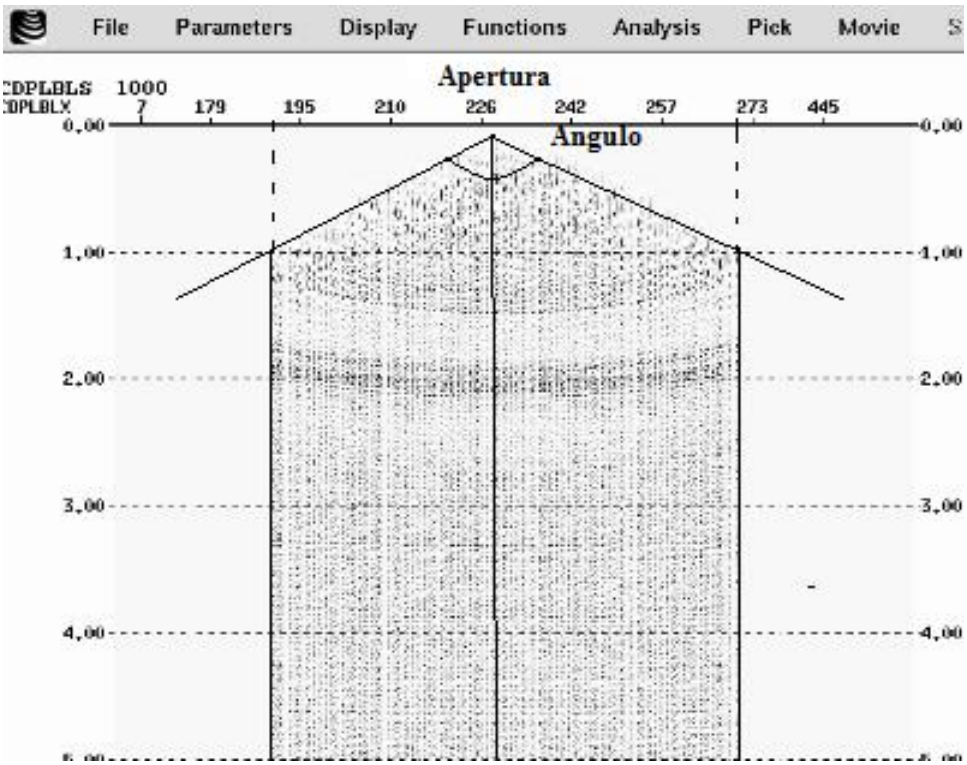


Figura 31. **Prueba de ruido usando ángulo de 45° y apertura 3000 m**

4.2.6 Migración en tiempo: la metodología enmarcada para aplicar la migración de Kirchhoff en tiempo se presenta en el siguiente flujo de trabajo, éste cuenta con tres partes principales. La parte uno relaciona los datos que se encuentran en el programa Focus 5.4 con los parámetros necesarios para migrar en el software de migracion Tsunami 12, la parte dos comprende los parámetros y acciones aplicadas en Tsunami 12 y la posterior carga de datos a Focus 5.4 para poder visualizarlos:

Parte I

Antes de realizar la migración en el software de procesamiento Tsunami, el SEG-Y del apilado se debió pasar por varios procesos en Focus, siendo el flujograma de trabajo el especificado en la figura 32, donde se empleó el módulo DSIN para seleccionar como archivo de entrada el correspondiente al apilado previamente cargado.

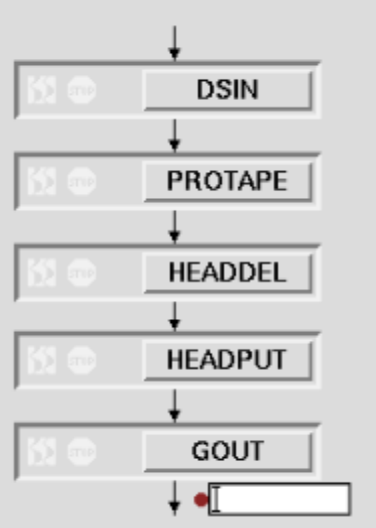


Figura 32 **Flujograma de trabajo**

PROTAPE: este módulo fue utilizado para actualizar los parámetros y corroborar su correcto funcionamiento, el submodulo usado fue

- UPDATE: actualizó los headers cdp-x y cdp-y.

HEADDEL: este programa se encargó de borrar los headers innecesarios en algún momento. Para este caso, se usó el comando ENTIRES, para borrar los headers completamente del formato. Los headers eliminados fueron shot-(x,y) y receiver-(x,y), esto se debió a que en el software de migración Tsunami, era necesario tener dichos encabezados para aplicar la migración 3D de Kirchhoff.

HEADPUT: mediante este módulo, fue posible actualizar el apilado para que el orden primario de lectura fuera por CDP usando el parámetro INPUT.

GOUT: a diferencia del DSOUT, este programa guardó el archivo de Focus en otro formato de procesamiento, los parámetros usados fueron los siguientes:

- FORMAT: especificó el formato de salida en el cual fue guardado el archivo, en este caso, Tsunami leyó los archivos en formato .SGY

- STKFLG: este parámetro tuvo que ver con reconocer si el archivo guardado de salida era un pre o post stack. Se seleccionó la opción PRESTK.

Parte II

Una vez generado el SEG-Y del apilado, se procedió a aplicar las migraciones en el software de procesamiento Tsunami 2012, para ello se adaptaron los parámetros indicados en el flujograma de trabajo reseñado seguidamente.

La pestaña imput se relacionó con los datos de entrada que fueron leídos en Tsunami, allí se abordaron tres opciones importantes; colocar los rangos de inline y crossline iniciales y finales, así como el incremento entre ellos, especificar el tipo de formato de entrada y la tasa de muestreo del cubo de velocidad, esto se observa en la figura 33.

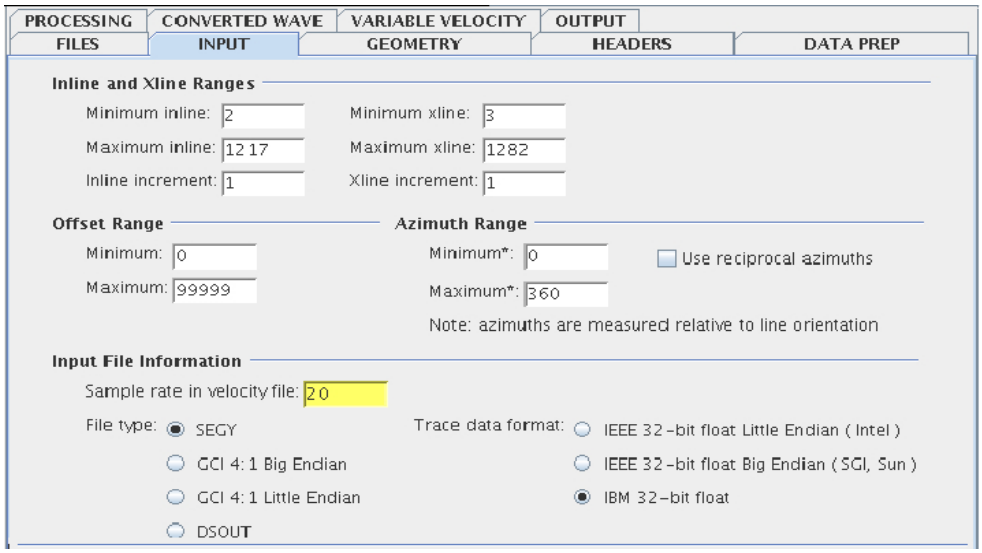


Figura 33 **Valores de entrada para Tsunami**

Posteriormente, en la pestaña processing, se indicaron los parámetros importantes para aplicar la migración de Kirchhoff 3D post apilamiento. La figura 34 muestra la opción aperture, donde se colocaron los valores de apertura y ángulo para cada migración, adicionalmente se especificó el tipo de migración a realizar en la opción migration type, siendo en este caso migración post apilamiento en tiempo y por último se colocaron los parámetros de funcionamiento del programa en la opción processing settings.

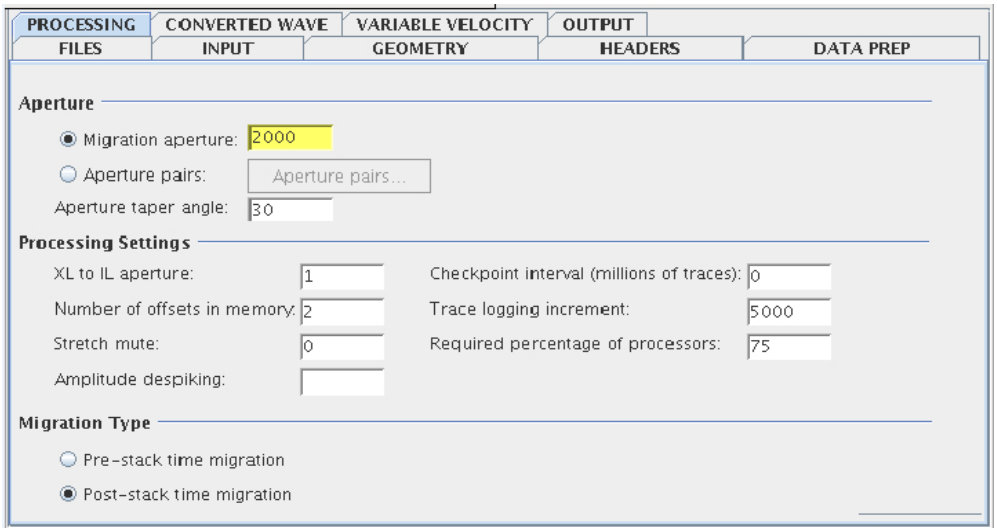


Figura 34 **Parámetros para aplicar la migración**

Por su parte, se colocaron los headers a leer dentro del formato de procesamiento para los datos del apilado y el cubo de velocidad, esto se realizó llenando las opciones data file, velocity file y CDP coordinates; sus valores se visualizan en la figura 35

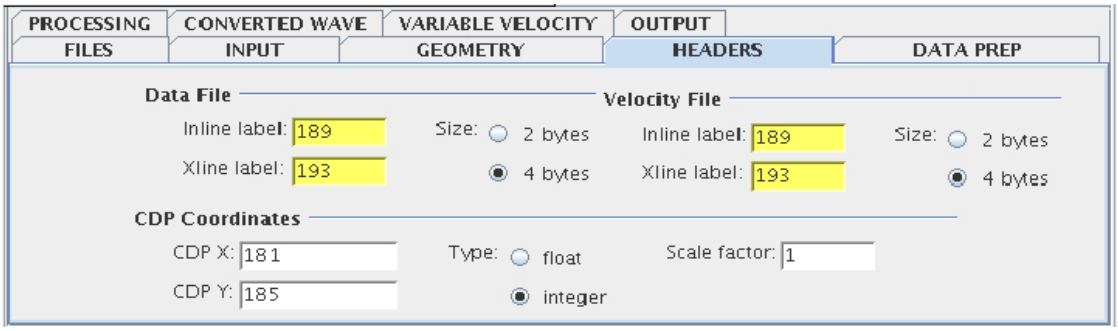


Figura 35 **Headers correspondientes al formato SEG-Y.**

Otro parámetro importante se relacionó con la geometría del levantamiento sísmico, para ello se colocaron las coordenadas (x,y) de tres puntos importantes, donde el punto uno correspondió al origen en coordenadas del proyecto y el dos y tres referentes a dos vértices del mismo; luego de colocar las coordenadas, al oprimir el botón calculate geometry, el programa automáticamente calculó los valores de inline y xline spacing (figura 36). De haber estado errada alguna coordenada, al oprimir calculate geometry no se habrían calculado dichos valores.

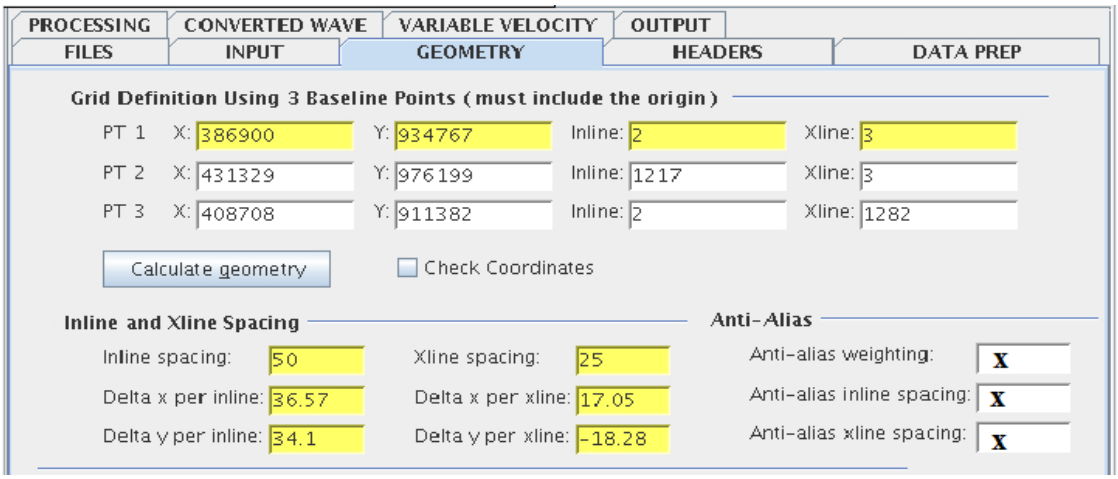


Figura 36 **Geometría**

Por último, se guardó un archivo de salida en la pestaña output, donde se separó el apilado en un volumen más pequeño limitado por las inline (890 - 1217) y crossline (3 - 1282). Se debió colocar el orden primario de ordenamiento por el cual fue guardado el archivo, en este caso se decidió ordenar por inline.

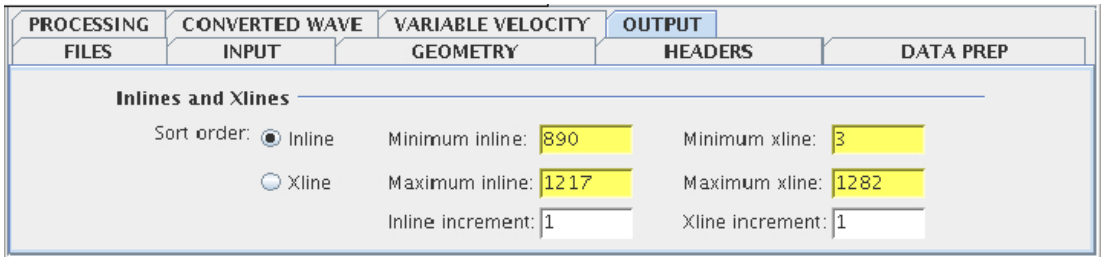


Figura 37 **Output**

Parte III

Como proceso final, luego de aplicada la migración al apilado sísmico se visualizaron los datos para su posterior análisis. Tsunami generó un nuevo archivo en formato SEG-Y con los procesos aplicados, entonces se creó un flujo de trabajo para cargar los datos sísmicos migrados a Focus, este flujograma se observa en la figura 38, en donde se usaron varios procesos explicados anteriormente, siendo en resumen el GIN para cargar los datos en formato SEG-Y, HEADPUT para actualizar individualmente los headers correspondientes a cdp-y, cdp-x y on time, por su parte el PROTAPE se utilizó para actualizar todos los demás headers, y el DSOUT para generar el archivo focus de salida. Los demás parámetros se describen a continuación:

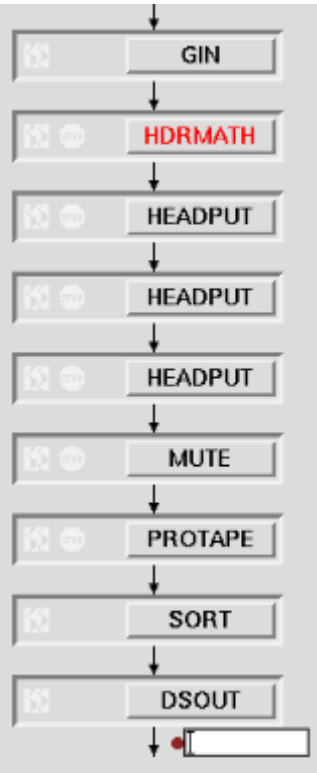


Figura 38 **Flujo de trabajo para cargar los datos desde Tsunami a Focus.**

MUTE: este programa redujo la amplitud de porciones de trazas a cero con el fin de eliminar componentes no deseados en el dato sísmico. Este "muting" se pudo aplicar de manera automática asignándole un valor en tiempo a la rampa lineal y también definiendo la rampa lineal manualmente. En este caso la rampa usada manualmente fue de 20 ms, llevando a cero la amplitud de las trazas desde un tiempo cero a 20 ms, de esta manera se la parte distorsionada de la traza luego de la aplicación de la migración, separando interpolaciones entre trazas donde no existían datos sísmicos

SORT: al tratarse de un apilado migrado importado desde otro programa, el cual ordenó el cubo sísmico por inline, ese utilizó este programa para cambiar dicho orden primario para organizarlos por CDP.

4.2.7 Variaciones de ángulo y apertura: para cumplir con los objetivos del trabajo, se aplicó el proceso de migración para el post apilado variando el ángulo y la apertura,

para luego hacer comparaciones que ayudarían a demostrar cual migración es la representa una opción óptima, esto basado en criterios explicados más adelante. La tabla 2 muestra todas las migraciones de Kirchhoff pre apilamiento aplicadas al apilado, variando en ángulo y apertura.

Tabla 2

Total de migraciones aplicadas.

ID Migración	Angulo (°)	Apertura (m)
1	**10**	**500**
2	**10**	**1000**
3	**10**	**3000**
4	**10**	**4500**
5	**20**	**500**
6	**20**	**1000**
7	**20**	**3000**
8	**20**	**4500**
9	**30**	**500**
10	**30**	**1000**
11	**30**	**3000**
12	**30**	**4500**
13	**90**	**500**
14	**90**	**1000**
15	**90**	**3000**
16	**90**	**4500**

4.3 Fase III: suavizado del cubo de velocidad

4.3.1 Selección de la mejor apertura de migración: luego de ejecutar diferentes pruebas de migración de Kirchhoff, variando el ángulo y apertura en el post apilado, se escogió la mejor apertura de migración. Dicha migración fue realizada con un cubo

inicial de velocidad. En base a esa migración con apertura óptima, se procedió a aplicar operadores de velocidad refinados con la finalidad de optimizar la imagen sísmica de salida, a fin de mejorar una posible interpretación en un futuro.

4.3.2 Refinación del modelo de velocidad: para refinar el modelo de velocidad, se seleccionó la opción Tools, Velocities, donde se abrió un cuadro visto a la derecha de la figura 39, allí se seleccionó el modelo de velocidad usado en las migraciones anteriores llamado VELVERIT.

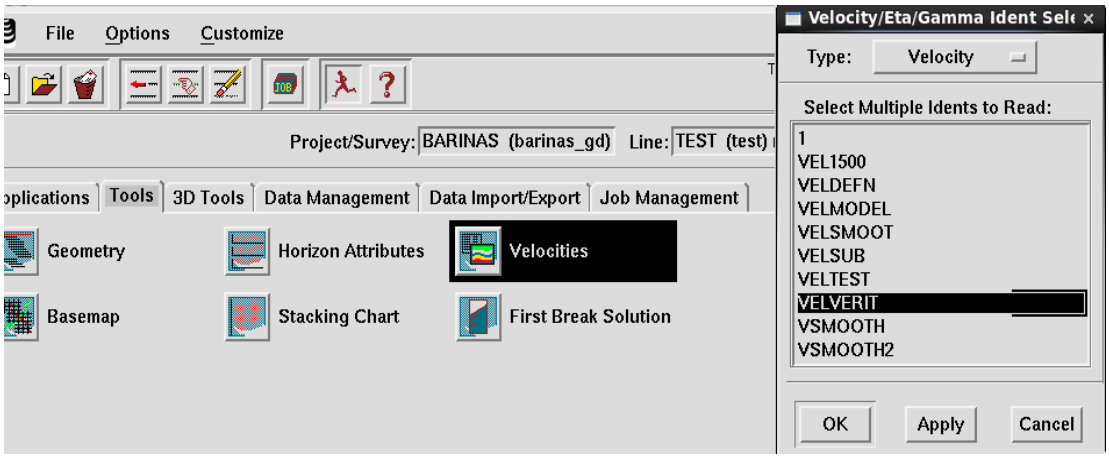


Figura 39 **Edición del modelo de velocidad**

Posteriormente, se abrió una ventana donde se mostraron valores de tiempo, velocidad RMS, interválica y promedio, siendo la velocidad RMS la utilizada para aplicar la migración de Kirchhoff. El refinamiento comenzó por observar la sección migrada, y delimitar lugares en tiempo donde el operador de velocidad no logró corregir el efecto de las difracciones. El colapso de las difracciones puede ser parcial; provocando que la hipérbola de difracción no se colapse a su ápice en su totalidad, o se genere una sobre migración, ocasionando el efecto inverso; crecimiento de la hipérbola de difracción hacia arriba. Luego de delimitar esas zonas, donde el efecto de la migración no fue el esperado, mediante la opción Functions, *Velocity scaling*, se logró re escalar el valor de las velocidades. A la derecha de la figura 40 se muestra el cuadro de *velocity scaling*, del lado izquierdo se selecciona el intervalo de tiempo y

del lado derecho el porcentaje de velocidad a escalar, por ejemplo, para el tiempo 1000 a 1500, se suaviza el cubo de velocidad en 15%, quedando el 85% de la velocidad inicial, es decir si la velocidad era de 1000 m/s al 15%, la velocidad final será de 850 m/s. En la opción CDP se puede modificar el intervalo de CDP por el cual será aplicado el suavizado, de esta manera es posible editar un modelo de velocidad sin tener los gathers referentes a dichas trazas.

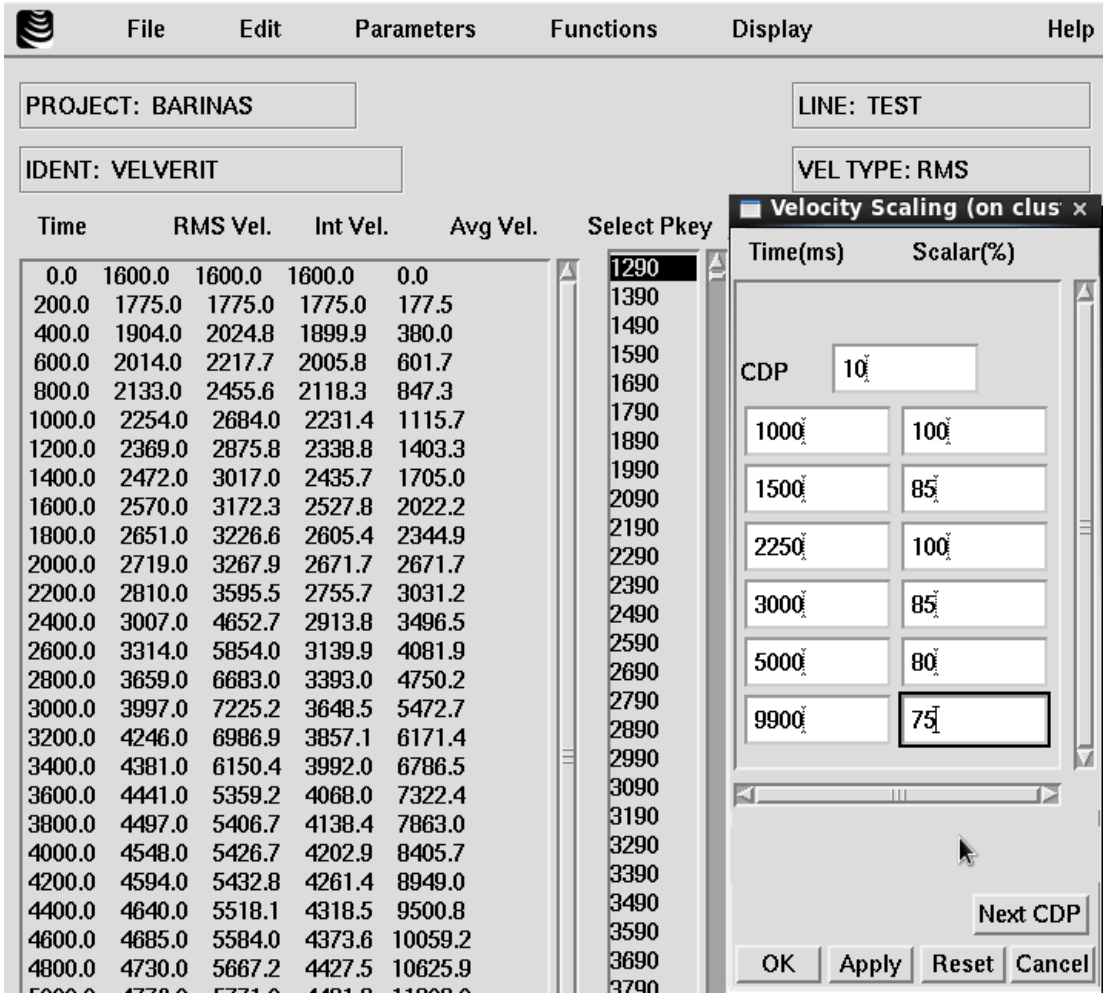


Figura 40 **Velocity scaling (izquierda), funciones de tiempo y velocidad (derecha)**

Al final, el cubo de velocidad fue refinado dos veces para obtener una imagen sísmica satisfactoria.

4.4 Fase IV: migración pre apilamiento

Uno de los objetivos de aplicar las migraciones post apilamiento variando apertura y ángulo fue el de seleccionar la mejor imagen sísmica ahorrando tiempo de cómputo, esto se debe a que en datos pre apilamiento al tener cobertura igual a 64, el software de procesamiento debe migrar las 64 trazas para luego apilarlas, en cambio en el post apilamiento, al tener cobertura igual a uno (1), es decir, datos apilados, los tiempos de cómputo se reducen significativamente, siendo útil la migración post apilamiento en ayudar a encontrar la mejor apertura y ángulo en un tiempo más corto para luego aplicar dichos parámetros en una migración pre apilamiento.

4.4.1 Carga de datos sísmicos y control de calidad: los gathers cargados en Focus correspondieron al área delimitada por los inline (890 - 1217) y crossline (3 - 460), estos fueron cargados con el flujo de trabajo visto en la figura 41

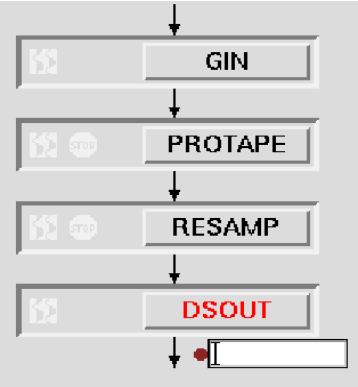


Figura 41 **Flujo de trabajo usado para cargar los gathers**

Se analizaron varios CDP, observando que el contenido de frecuencias variaba de 10 Hz a 80 Hz, es decir, los datos fueron filtrados anteriormente, eliminando el ruido mayor a 80 Hz y menor a 10 Hz, esto se observa en la figura 42, donde se visualiza el CDP número 1476411.

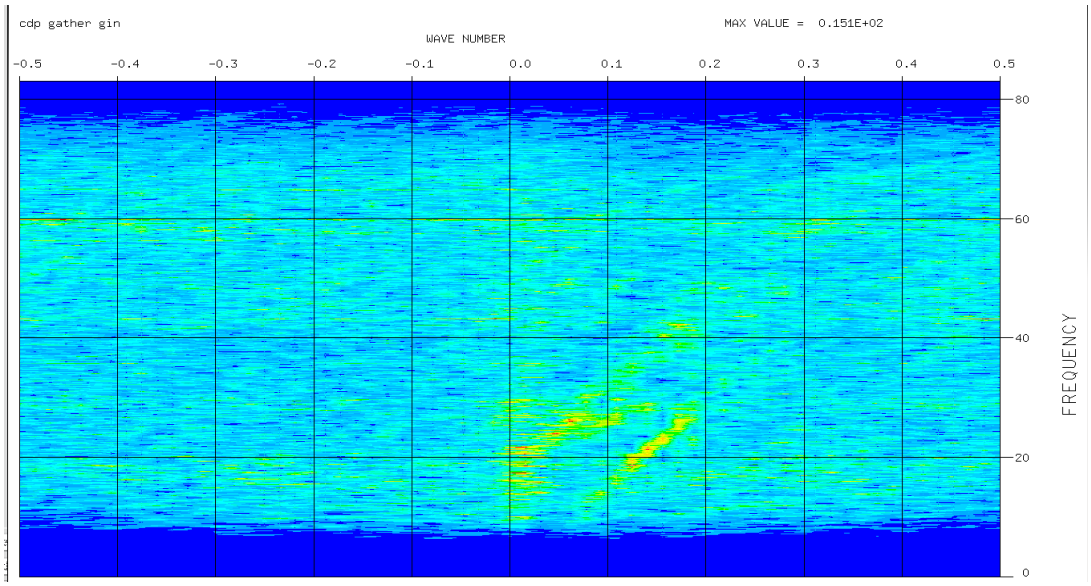


Figura 42 **Gather 1476411, contenido de frecuencias, relación señal ruido**

4.4.3 Migración en tiempo usando la apertura, ángulo y cubo de velocidad óptimos: después de varias pruebas realizadas en la migración post apilamiento, se lograron seleccionar los mejores parámetros en base al análisis y comparaciones de los resultados, usando los parámetros comparativos explicados en la fase V. De esta manera, la migración pre apilamiento se aplicó con una apertura de 3000 metros, un ángulo 30 grados y un cubo de velocidad suavizado. Como parte importante de este trabajo, uno de los principales objetivos a cumplir fue el de conocer en qué se diferencia la imagen sísmica en la migración de Kirchhoff pre apilamiento y post apilamiento y cual representa la mejor opción.

La metodología empleada en Tsunami para realizar la migración pre apilamiento fue parecida a la utilizada para el post apilamiento (figuras 31 hasta 37). Recordando que el volumen migrado en el pre apilamiento es más pequeño, se cambiaron los inline (890 - 1217) y crossline (3 - 460) para el input y output.

La metodología para cargar los gathers migrados se refleja en la imagen 43, siendo el programa STACK el encargado de apilar dichos gathers.

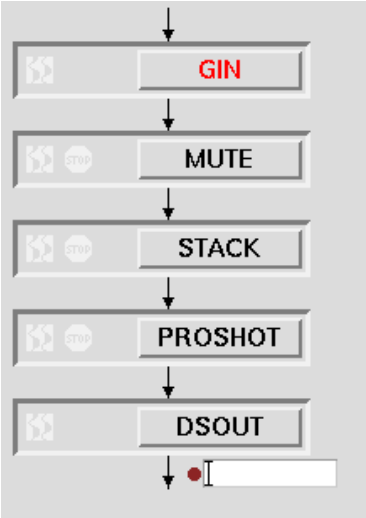


Figura 43 **Flujo de trabajo usado para cargar los gathers desde tsunami**

STACK: este programa se encarga de sumar las amplitudes de un número determinado de trazas. En este caso, en promedio se trató con 64 trazas.

4.5 Fase V: comparaciones

Para conocer cual migración de Kirchhoff 3D representa la mejor opción a la hora de realizar una interpretación, se deben estudiar una serie de factores que van desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo. El estudio visual o cualitativo es el más importante y abarca los puntos mostrados a continuación:

- Continuidad re reflectores
- Colapso de difracciones
- Visualización de estructuras geológicas
- Relación señal / ruido
- Corrección de deformaciones por buzamientos
- Realzamiento de amplitudes
- Tiempo de cómputo

Desde el punto de vista cuantitativo, el análisis espectral de frecuencias representa una opción verdadera, puesto que el operador de migración de Kirchhoff 3D puede degenerar la imagen sísmica aumentando la cantidad de ruido, es decir, frecuencias no asociadas con los reflectores.

Las comparaciones realizadas en este trabajo corresponden a las siguientes:

- Variación de ángulo y apertura
- Migración a 90°
- Migración con diferentes cubos de velocidad refinados
- Migración pre y post apilamiento
- Mejor migración final comparada con migración de CGG Veritas

CAPÍTULO V
RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados finales obtenidos luego de llevados a cabo diferentes procesos de migración de Kirchhoff en tiempo antes y después del apilamiento con variación de ángulo y apertura con el fin de construir una imagen sísmica óptima. Adicionalmente se muestran los dos modelos de velocidad suavizados obtenidos a partir del modelo inicial y las pruebas de ruido empleando el algoritmo de migración.

Para cada una de las comparaciones presentadas en este capítulo, se seleccionaron diferentes inline y crossline de referencia y se visualizan los cambios generados en todo el volumen sísmico producto de la aplicación de los procesos descritos anteriormente.

5.1 Apilado sin migración.

Para justificar el uso de la migración en tiempo en los datos del proyecto Barinas Este, se analizó visualmente la imagen sísmica de los datos sin apilar, determinándose la existencia de numerosas hipérbolas de difracción y otros problemas que pueden ser solucionados usando diferentes algoritmos de migración. Dichas hipérbolas de difracción se extienden a lo largo de todos los inline y crossline del proyecto.

Así, en la figura 44 se observa el inline 932 perteneciente al volumen apilado sin migración. En éste se captan diferentes aspectos que deben ser corregidos, a saber: algunas difracciones se pueden observar en los recuadros en rojos; en la mayoría de los casos, las hipérbolas de difracción se forman en lugares donde existen estructuras geológicas. En la figura los rectángulos “B”,”E” y “F” conforman fallas que no han podido ser bien delimitadas. Otro problema tiene que ver con la continuidad de los reflectores, en el rectángulo “A” se visualiza un reflector poco continuo producto de una serie de difracciones.

Las deformaciones por buzamiento también afectan la imagen sísmica, al tratarse de datos adquiridos en la cuenca de Barinas, los buzamientos no son muy altos, de aproximadamente de 8° el buzamiento máximo, siendo ángulos y aperturas muy grandes poco necesarias para colapsar dichas difracciones, en los recuados “D” y “E” se puede localizar el máximo buzamiento del volumen sísmico.

Por otro lado, se tiene una buena relación señal ruido en el volumen sísmico, pudiendo visualizarse con mucha claridad los reflectores de interés localizados en los intervalos de tiempo de 1,5 hasta 2,3 segundos. Desde el inicio del registro hasta los 1,5 segundos y desde los 2,5 segundos hasta 10 segundos existe ruido considerable en el registro sísmico, siendo muy difícil identificar reflectores claros, en especial en los primeros tiempos.

Referente al intervalo de frecuencias presentes en el cubo sísmico, éstas fueron filtradas en procesos anteriores, dejándose solo las frecuencias relacionadas con la respuesta de reflectores geológicos de 10 Hz a 80 Hz, la misma figura 44 muestra el análisis espectral del inline 932.

Por su parte, en la figura 45, también se visualiza otro inline correspondiente al cubo sísmico apilado; en los rectángulos “A” hasta “D” es posible observar una serie de difracciones, siendo las fallas geológicas el primer factor influyente para la generación de las mismas. Al igual que la figura 45, la relación señal ruido es buena en todo el cubo sísmico para la capa de interés del proyecto.

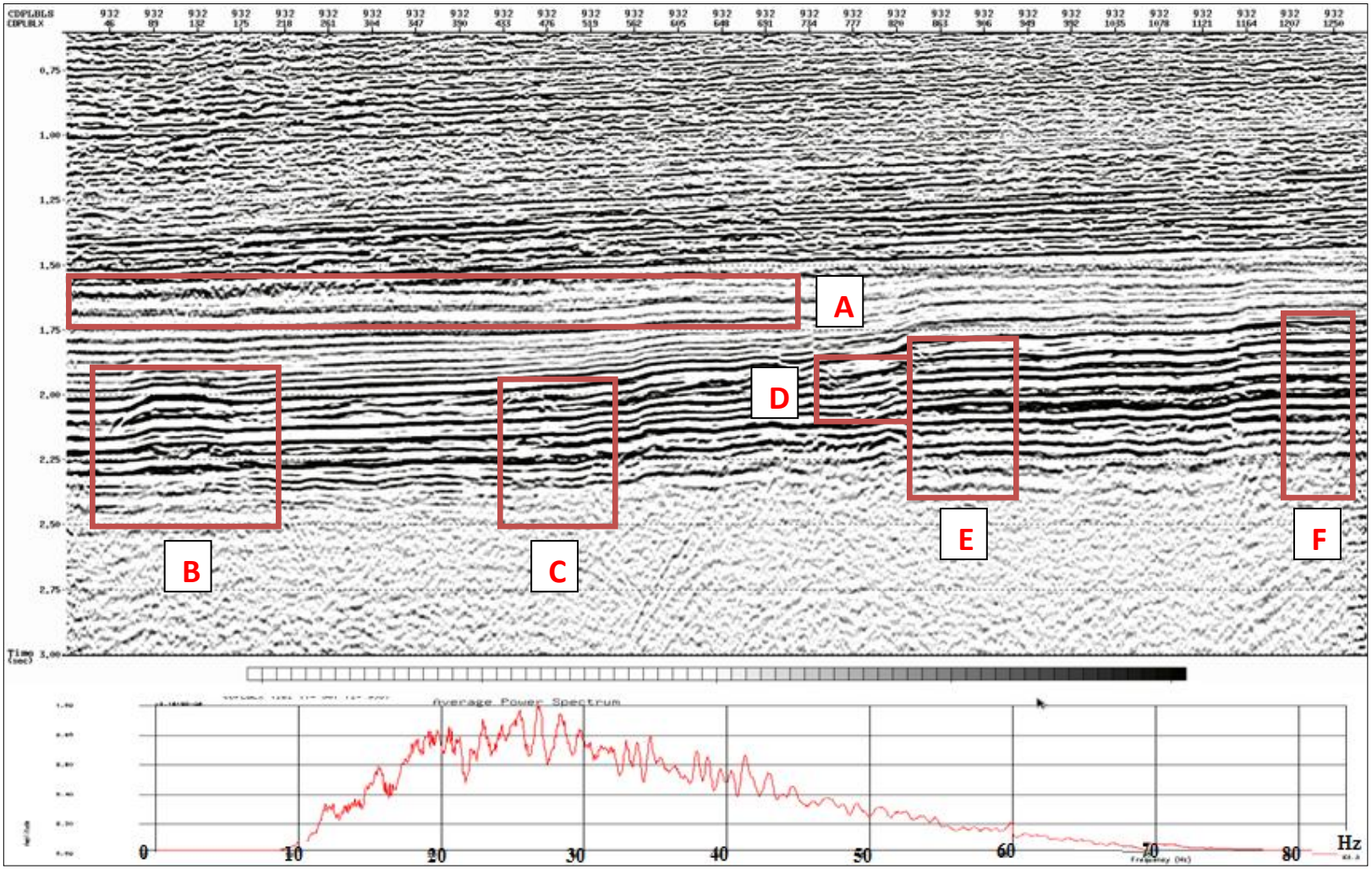


Figura 44 **Inline 932 del volumen apilado sin migración. Los cuadros rojos representan algunos defectos de la imagen sísmica.**

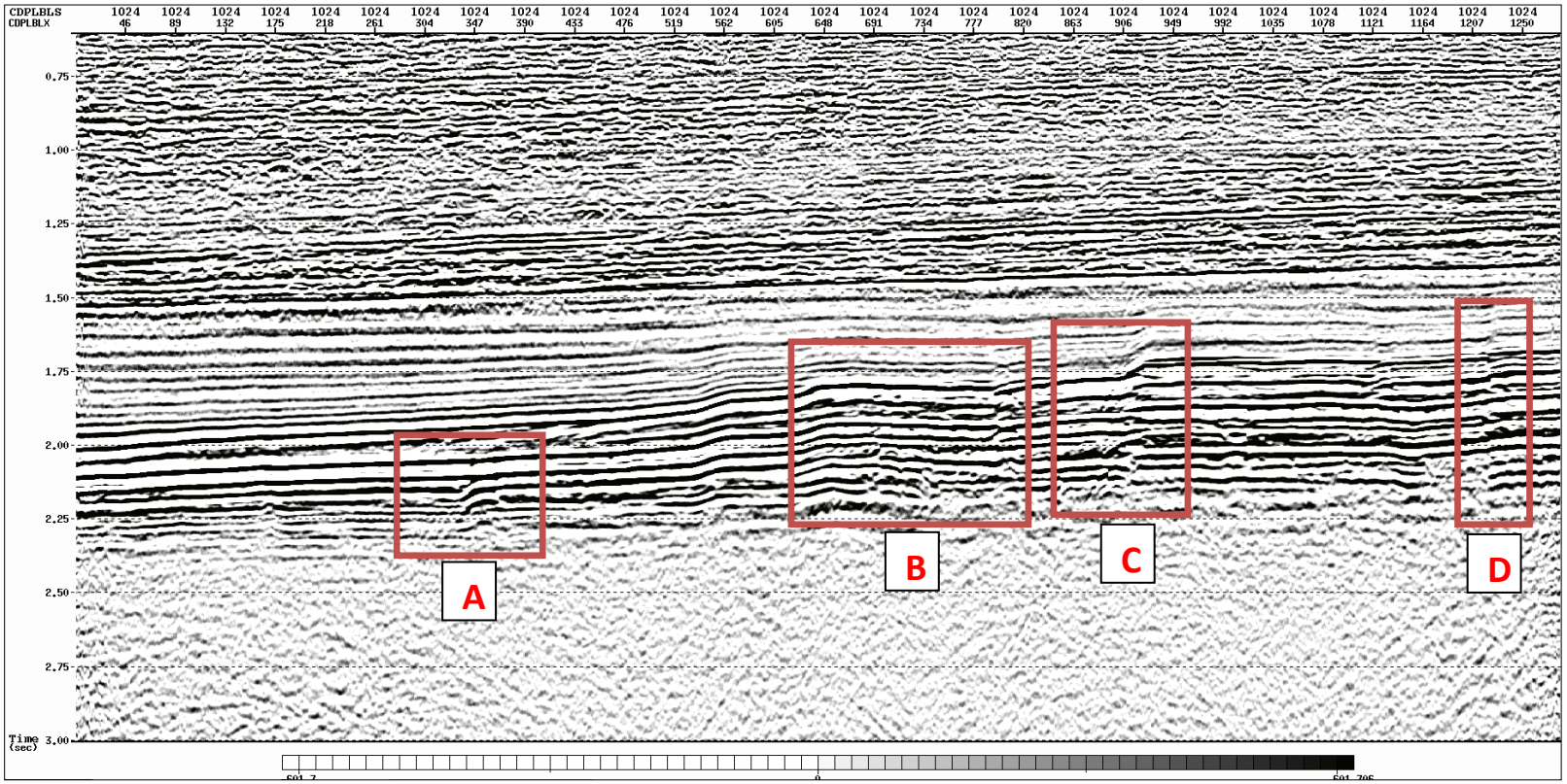


Figura 45 **Inline 1014 del volumen apilado sin migración. Los cuadros rojos representan algunas difracciones y faltas de continuidad en la imagen sísmica.**

5.2 Pruebas de ruido

Las pruebas de ruido fueron empleadas con la finalidad de conocer el efecto de la apertura y el ángulo de migración en una traza sísmica. Estas son pruebas aplicadas a una muestra para luego suponer que dicho comportamiento se espera en todo el volumen sísmico. Las figuras 46, 47 y 48 muestran los operadores de migración empleando ángulos de 10°, 20° y 30°, todos con apertura igual a 3000 metros. En estas tres imágenes se muestra como a medida que aumenta el ángulo, el cono se comienza a truncar lateralmente. Así, al tener ángulo 20°, el cono se trunca lateralmente al alcanzar un tiempo de 8 segundos en el registro, al igual que sucede al tener ángulo de 30°, truncándose el mismo a los 6 segundos; esto es debido a que justo en ese tiempo se alcanzó la apertura máxima sugerida por el usuario, en este caso fue de 3000 metros respectivamente.

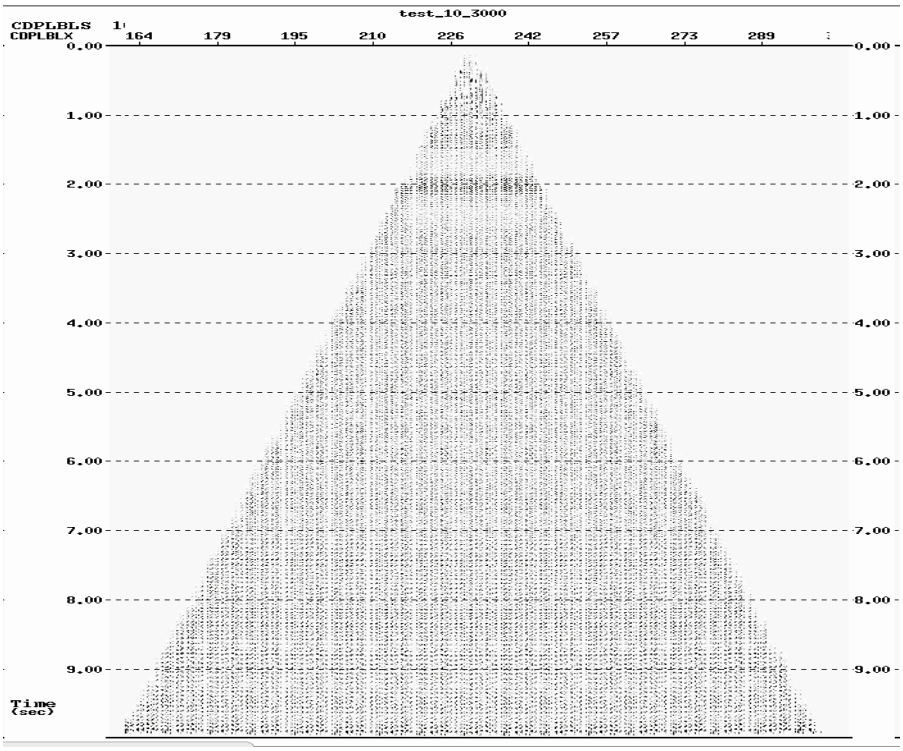


Figura 46 **Operador de migración usando ángulo de 10°**

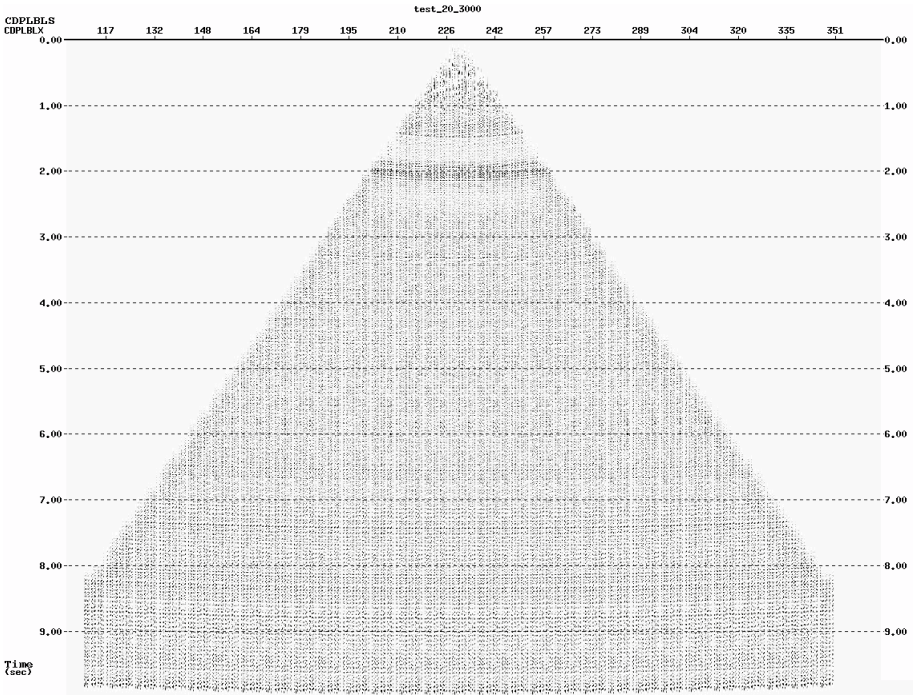


Figura 47 **Operador de migración usando ángulo de 20°**

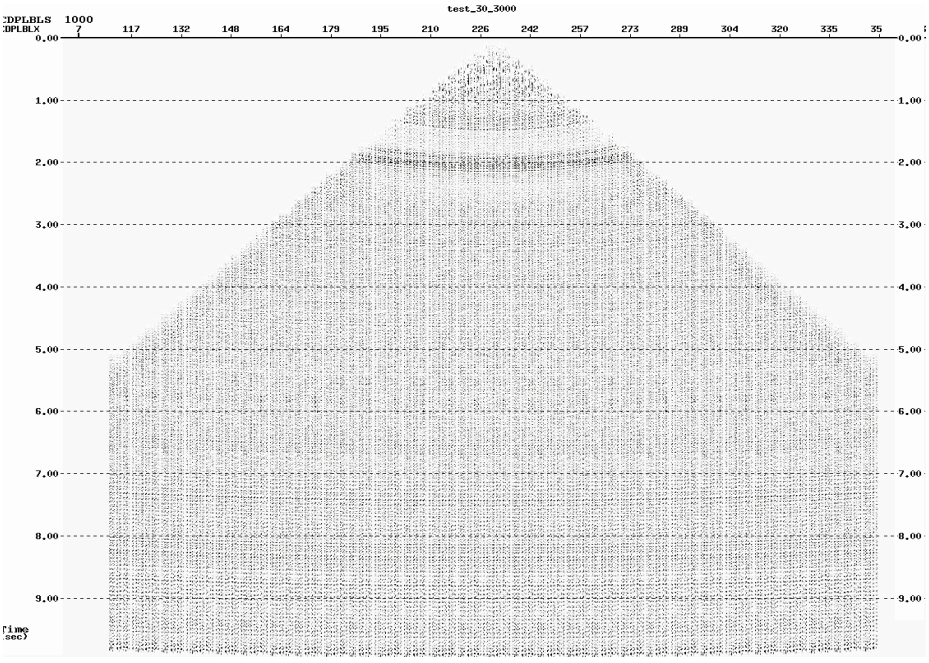


Figura 48 **Operador de migración usando ángulo de 30°**

Por su parte, se aplicaron pruebas a 45° y 60°, las cuales son vistas en las figuras 49 y 50; en éstas se puede observar como se alcanza la apertura máxima de 3000 metros a los 3 y 2 segundos. Es importante mencionar que a partir de los 40° comienza a afectarse la imagen sísmica producto del estiramiento generado a la traza sísmica por inducir a abrir más el ángulo, lo cual se traduce en desmejoramiento de la relación señal ruido; esto concuerda con lo señalado por Yilmaz (2001), quien señala que aperturas de migración largas pueden degradar la calidad de la migración empobreciendo la relación señal ruido. Mediante estas pruebas de ruido se demuestra que el uso de grandes aperturas de migración pueden causar que el ruido aleatorio se desplace dentro de los datos someros alterando la relación señal ruido y empobreciendo la imagen sísmica. En la figura 50 se puede observar con mayor claridad la acción del ruido generado por someter a la traza sísmica seleccionada a un ángulo de 60°

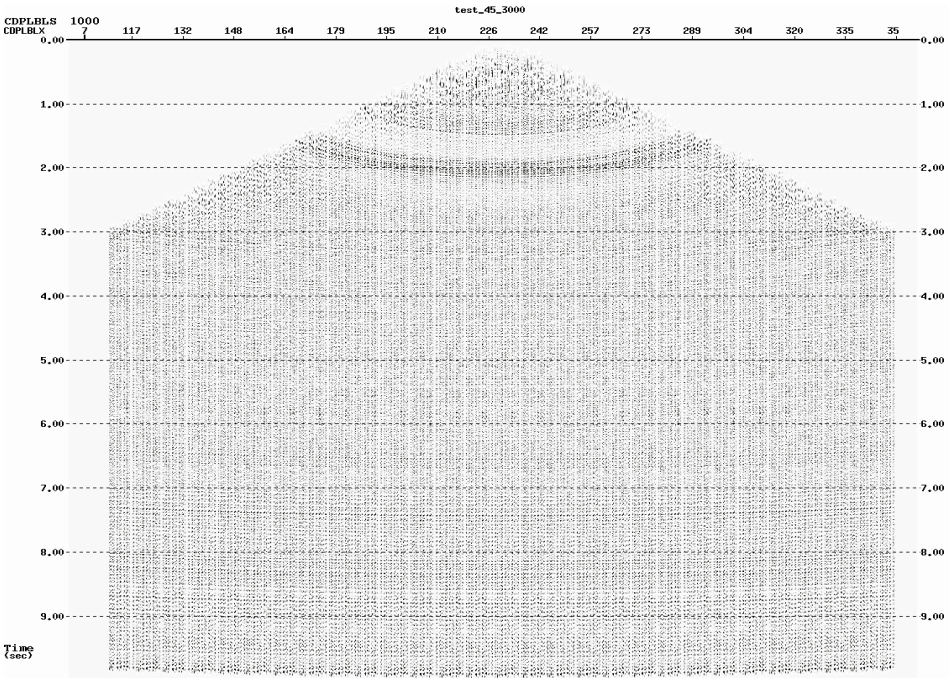


Figura 49 **Operador de migración usando ángulo de 45°**

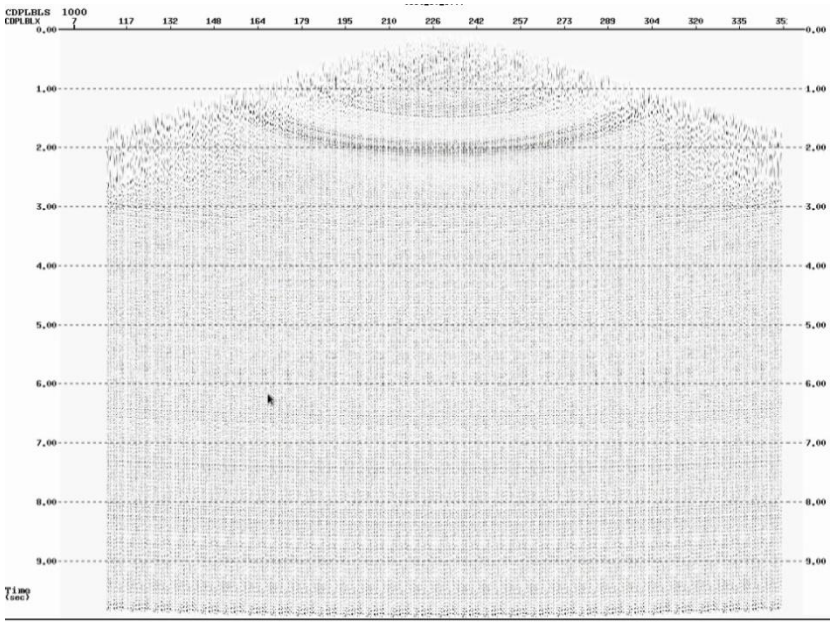


Figura 50 **Operador de migración usando ángulo de 60°**

La figura 51 muestra el comportamiento de un operador de migración usando un ángulo de 90°, lo que cambia el tipo de migración de cónica a cilíndrica. Como se observa en las figuras 49 y 50, abrir tanto el ángulo de migración produce empobrecimiento de la relación señal ruido, aumentando los efectos de borde y deformando la imagen sísmica real.

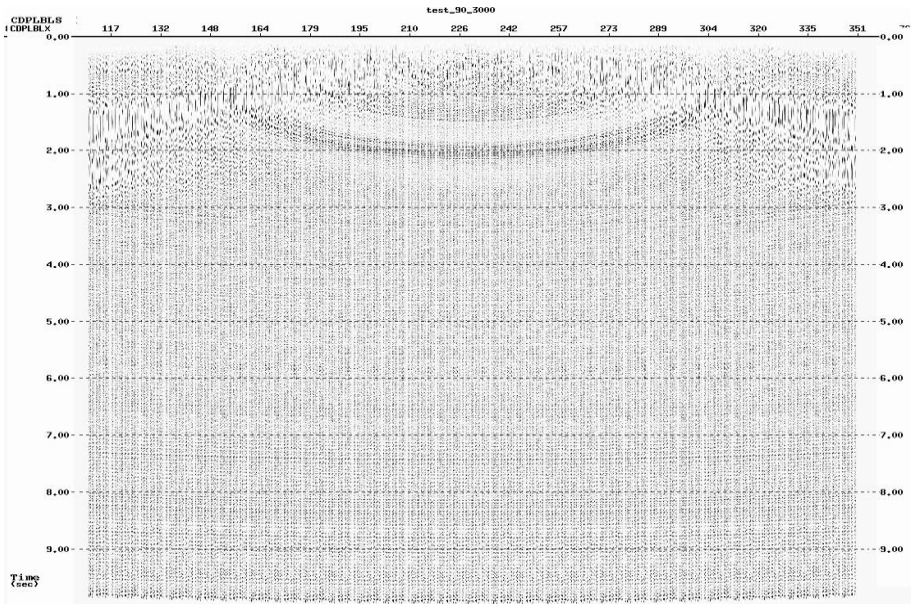


Figura 51 **Operador de migración usando ángulo de 90°**

En sintonía con Yilmaz (2001), resulta mejor usar una apertura de migración pequeña, que en teoría podría ser requerida para evitar el efecto adverso del ruido del evento migrado, esto se demostró con las pruebas de ruido visualizadas en las imágenes 50 y 51, obteniéndose que para el caso de la cuenca de Barinas - Apure resulta conveniente usar aperturas no mayores de 40° producto de los bajos buzamientos de las estructuras geológicas. Considerando lo planteado como base para la selección de la mejor apertura y ángulo de migración, se decidió estudiar el efecto de la migración de Kirchhoff en tiempo con ángulos de 10°, 20° y 30°.

Es importante resaltar que aperturas de migración cortas causan la destrucción de eventos con buzamientos bruscos y cambiando rápidamente las variaciones de amplitudes. En tal sentido, Yilmaz (2001), indica que debe realizarse una combinación de una apertura máxima aunada a un máximo límite de buzamiento, éste determinará la migración más efectiva al momento de aplicar la integral de Kirchhoff. Con estas primeras pruebas, se descartaron ángulos muy grandes mayores a 45° y se evaluaron ángulos pequeños de 10°, 20° y 30°, combinándolos con diferentes distancias de aperturas en metros.

5.3 Migraciones post apilamiento.

Una vez realizadas las pruebas de ruido que indicaron que para ángulos mayores a 45° el algoritmo de migración introduce ruido en la imagen sísmica, se procedió a migrar usando ángulos de 10°, 20° y 30°, incorporando una nueva variable como lo fue la apertura de migración, en valores de 500, 1000, 3000 y 4500 metros, de esta manera se logró establecer el ángulo y apertura que proporcionaron mejor imagen sísmica.

La imagen 52 muestra el inline 982 en la capa de interés ubicada en los tiempos (1.25 s hasta 2.5 s), en cuya parte superior se muestra la imagen sísmica en la cual se empleó el ángulo de 20° con apertura 500 metros, mientras que en la parte inferior se observa el mismo inline pero con ángulo de 30° y 3000 metros. En el rectángulo “A” y “B” se encontró como en la imagen inferior se observan mayor número de reflectores comparados con la imagen superior. Para aperturas cortas como 500 metros, usando ángulos de 10°, 20° y 30° se encontró que, por abarcar poca información lateral para migrar, algunos reflectores no aparecen en la imagen sísmica, siendo necesario aumentar la apertura de migración.

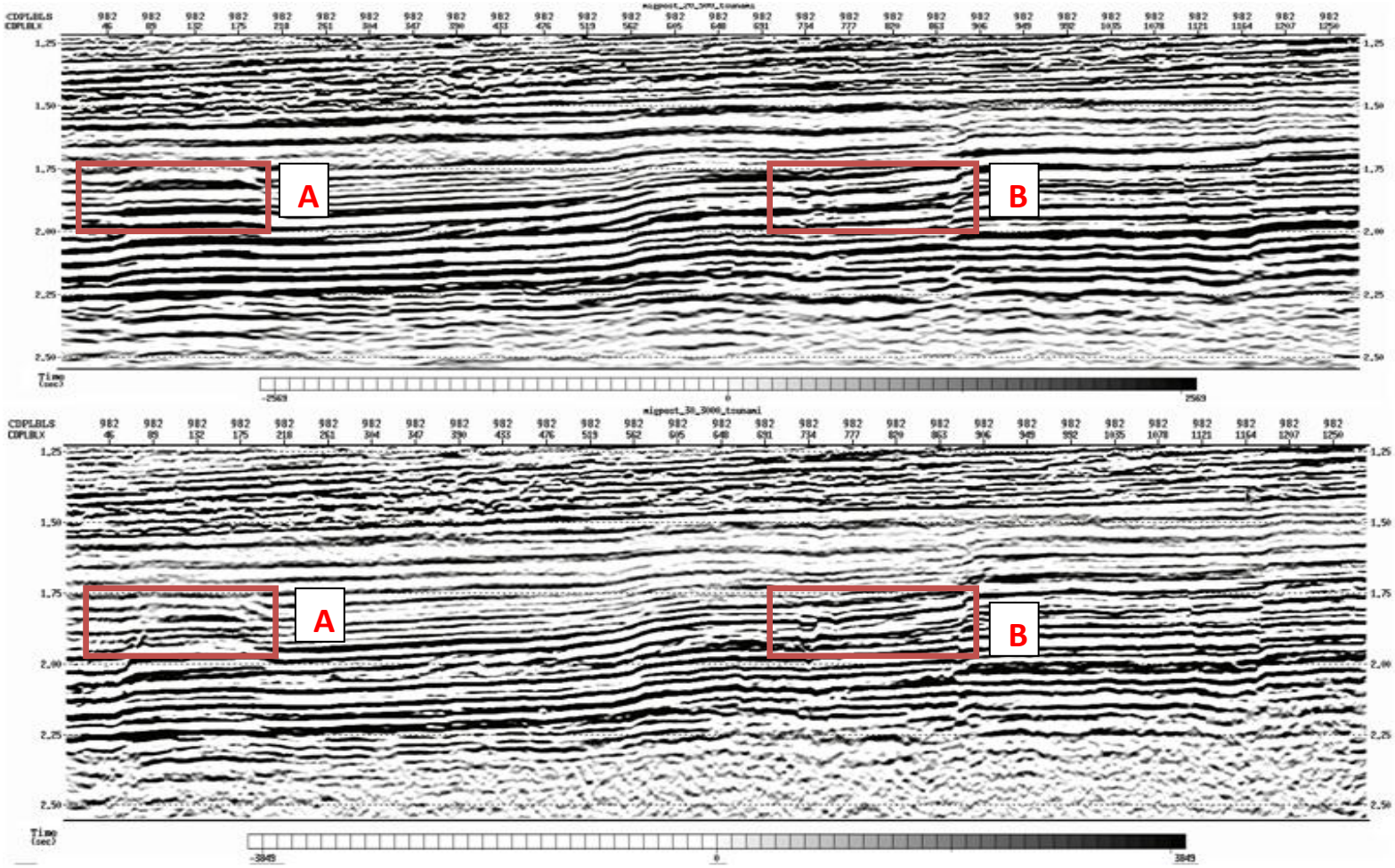


Figura 52 **Comparación entre migración 20°, 3000 metros en la parte de arriba, migración 30° 3000 metros abajo. Los cuadros representan algunas diferencias en ambas imágenes sísmicas. Inline 982**

A partir de los 3000 metros se define la capa de interés, cumpliendo con los parámetros de: colapso de difracciones, continuidad de reflectores, entre otros, pero al seguir aumentando la apertura se sobremigra la imagen sísmica en tiempos mayores a 2,5 segundos, hecho que indica que la apertura máxima puede estimarse en 3000 metros.

La imagen 53 muestra en la parte superior la imagen sísmica correspondiente al uso de un ángulo de 30° y apertura 3000 m, mientras que la imagen inferior usa un ángulo de 30° pero con apertura 4500 m . Se observa como en la capa de interés no existe prácticamente cambio, esto se debe a que el efecto del ángulo ya alcanzó su apertura más amplia, variando así en tiempos superiores a los 3 segundos.

La totalidad de las imágenes se encuentran en el anexo F, en las mismas se observa la variación de ángulo entre 10°, 20° y 30°, empleando aperturas de 500, 1000, 3000 y 4500 metros.

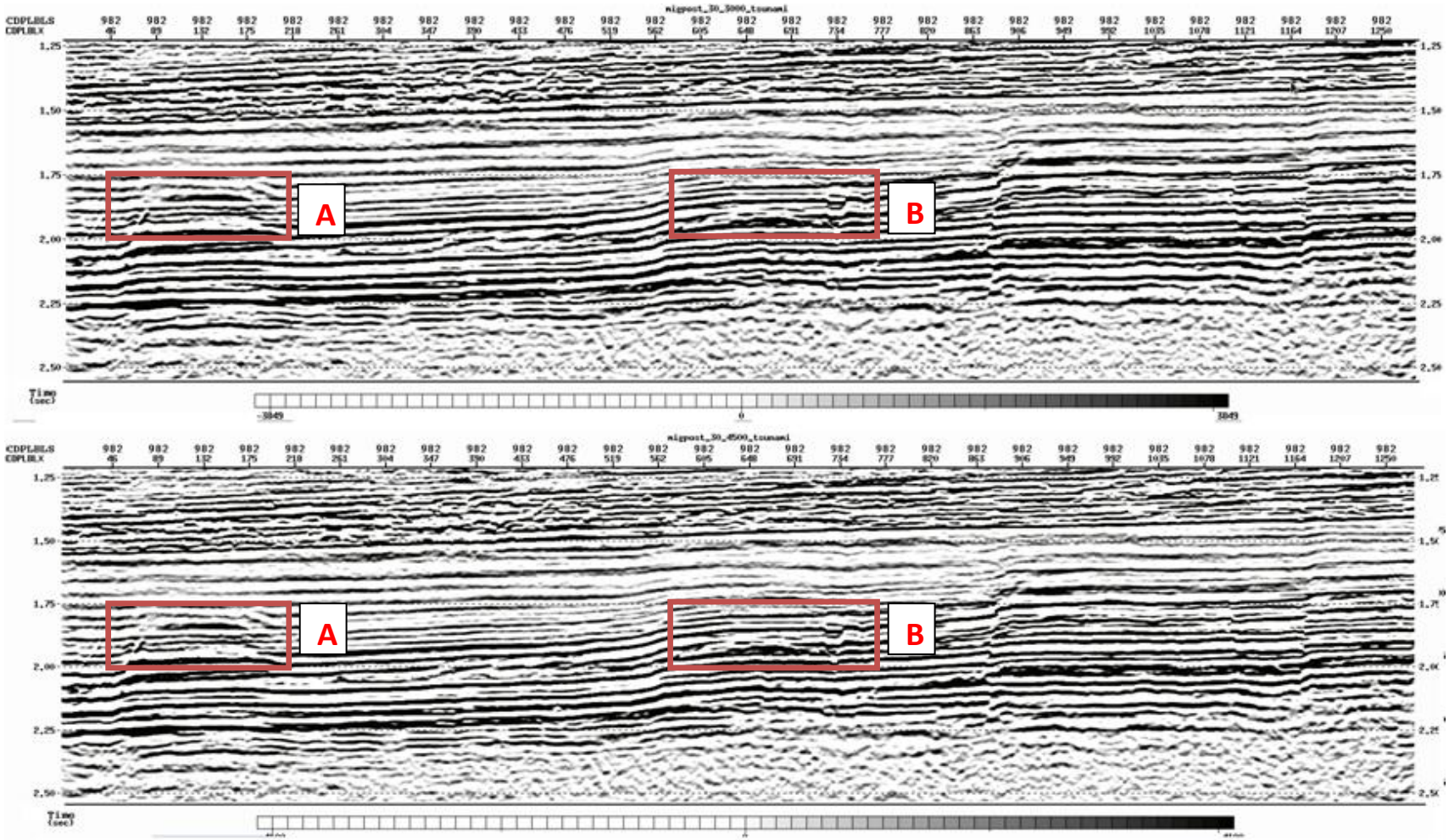


Figura 53 **Comparación entre migración 30°, 3000 metros en la parte de arriba, migración 30° 4500 metros abajo. Los cuadros representan algunas diferencias en ambas imágenes sísmicas. Inline 982.**

5.4 Apertura cónica vs cilíndrica

Con motivos experimentales, se planteó aplicar el algoritmo de migración de Kirchhoff en tiempo para el volumen sísmico post apilamiento y así, empleando un ángulo de 90º, conocer el efecto de este último en la imagen sísmica. Dicha migración fue luego comparada con una de ángulo igual a 30°. La imagen 54 muestra a su izquierda una prueba de apertura de 3000 metros con ángulo de 90°; se observa el ruido generado por sobre abrir el ángulo, a su derecha es factible visualizar una migración con la misma apertura en metros de 3000 y un ángulo mucho menor de 30°, esta imagen sísmica de bajo ángulo se encuentra mas limpia que la del lado izquierdo, presentando menos contenido de ruido.

Al momento de visualizar la imagen sísmica es posible encontrar algunos detalles relacionados con la apertura exagerada del ángulo. La figura 55 demuestra algunos problemas visibles que pueden afectar la imagen sísmica al utilizar ángulos muy elevados. En el rectángulo “A” correspondiente a la migración a 90° se muestra lo que parecen efectos de borde o estiramientos, donde al compararlos con el rectángulo “A” de la migración de 30° a la derecha, dicho efecto disminuye en buena medida; por otra parte el rectángulo “B” muestra como a la izquierda (migración a 90°) no aparece un reflector bastante marcado en el mismo lugar del rectángulo “B” de la migración a 30°, el cuadro “C” también muestra de igual manera como el reflector aparece más atenuado del lado izquierdo que del lado derecho. Respecto al colapso de las difracciones, ambas aperturas fueron capaces de colapsar las hipérbolas de difracción a su ápice, pero correspondiente a la continuidad de reflectores la migración a 30° resulta más confiable que la de 90°, en especial por lo ocurrido en el rectángulo “B” de ambas migraciones.

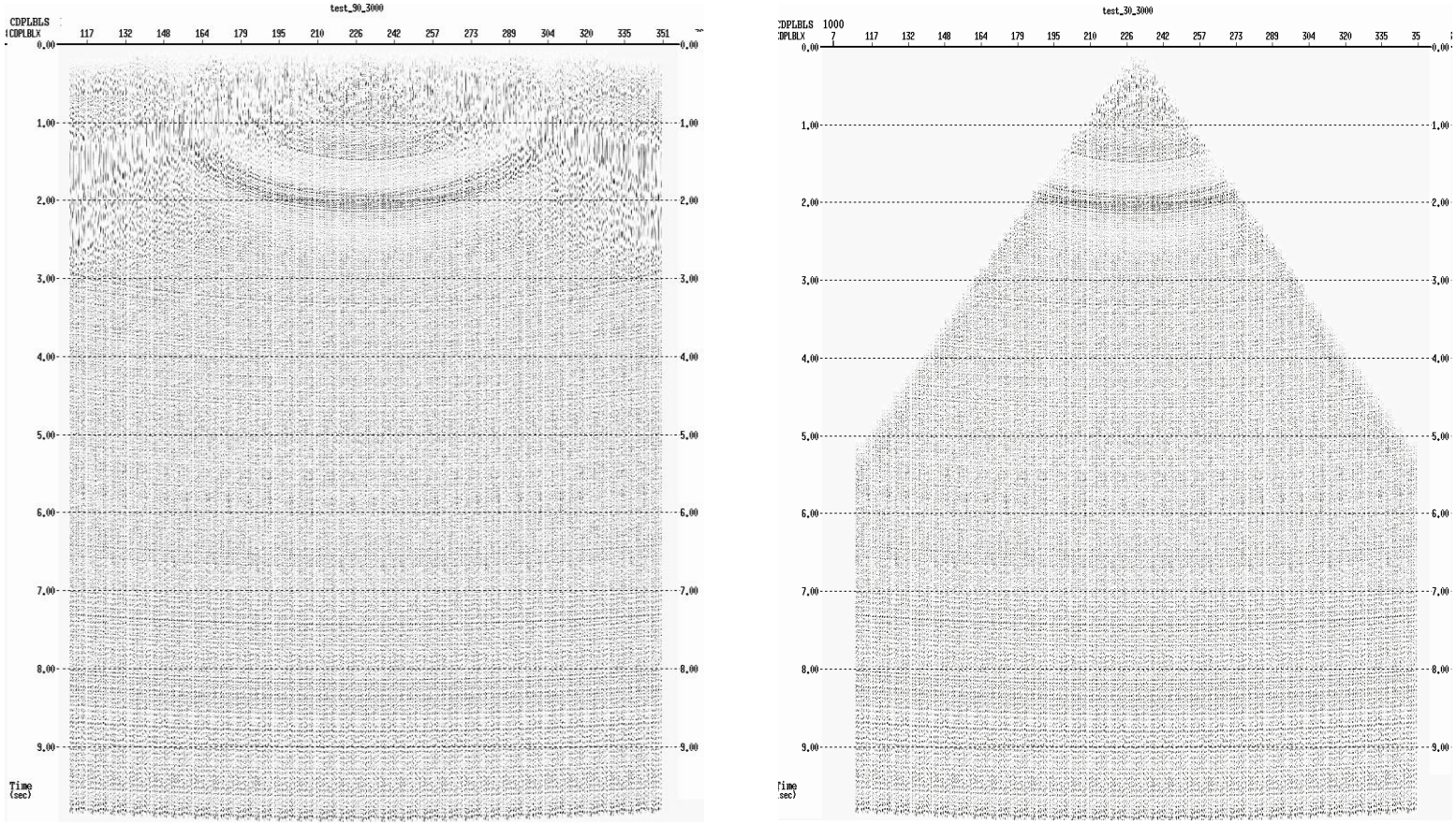


Figura 54 **Migración cilíndrica a la izquierda, migración cónica a la derecha**

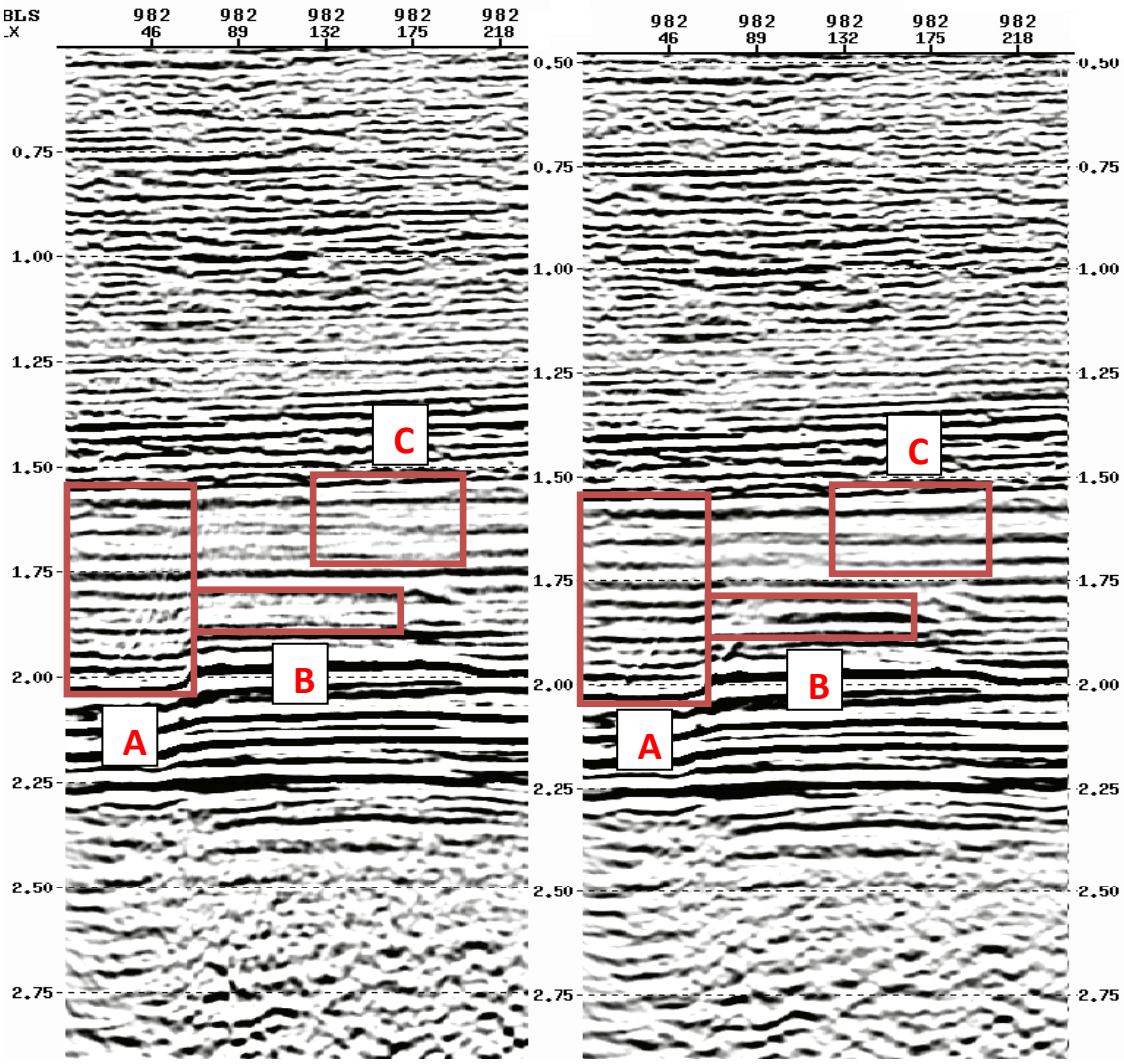


Figura 55 **Imagen sísmica con ángulo de 90°(izquierda) y con ángulo de 30°(derecha)**

5.5 Suavizado del modelo de velocidad.

Luego de evaluar bajo el algoritmo de migración de Kirchhoff en tiempo diferentes ángulos y aperturas, se escogió la apertura de migración de 3000 metros y el ángulo de 30°. La imagen sísmica se muestra a continuación, bajo la muestra en el inline 982 en la figura 56. Por su parte, la figura 57 muestra el registro sísmico completo, es decir, de 0 s a 10 s, en el cual se observa una sobremigración a partir de los 2,5 segundos. Con motivo de corregir el efecto de velocidades tan altas, se

suavizó el modelo de velocidad en dos ocasiones para aplanar a los reflectores a profundidades mayores a los 2.5 segundos. De esta manera, usando la apertura y el ángulo óptimos escogidos anteriormente, se migró el cubo sísmico con los dos diferentes cubos de velocidad suavizados hasta aplanar los reflectores infra yacentes

.

La figura 58 y 59 muestran el modelo de velocidad utilizado para migrar el cubo sísmico del proyecto Barinas Este, mostrando velocidad mínima de 1650 m/s y máxima de 5170 m/s, siendo a partir de los 6 s la velocidad constante, lo que no cumple con el principio de aumento de velocidad a medida que se profundiza. Si bien la capa de interés ubicada en los tiempos 1,5 s hasta 2,3 s se pudo definir de manera correcta, suprimiendo mediante la migración los defectos de la imagen sísmica, a partir de los 2,3 segundos hasta el final del registro no se pudieron colapsar las difracciones, es decir, colapsar las hipérbolas y horizontalizar los reflectores en especial en el intervalo de tiempo ubicado entre los 4 y 6 s.

El programa Focus Paradigm 5.4 posee herramientas muy útiles para suavizar el modelo de velocidad sin la necesidad de poseer los gathers para aplicar un análisis de velocidad. Usando la opción velocity scaling se pudo reescalar la velocidad rms en ciertos lugares donde el reflector sísmico lo necesitara. Luego de aplicar varias pruebas, se logró encontrar estabilizar los reflectores en la migración de Kirchhoff usando el cubo de velocidad de las figuras 63 y 64, en este cubo las velocidades aumentan a medida que se profundiza, variando hasta llegar hasta 4700 m/s

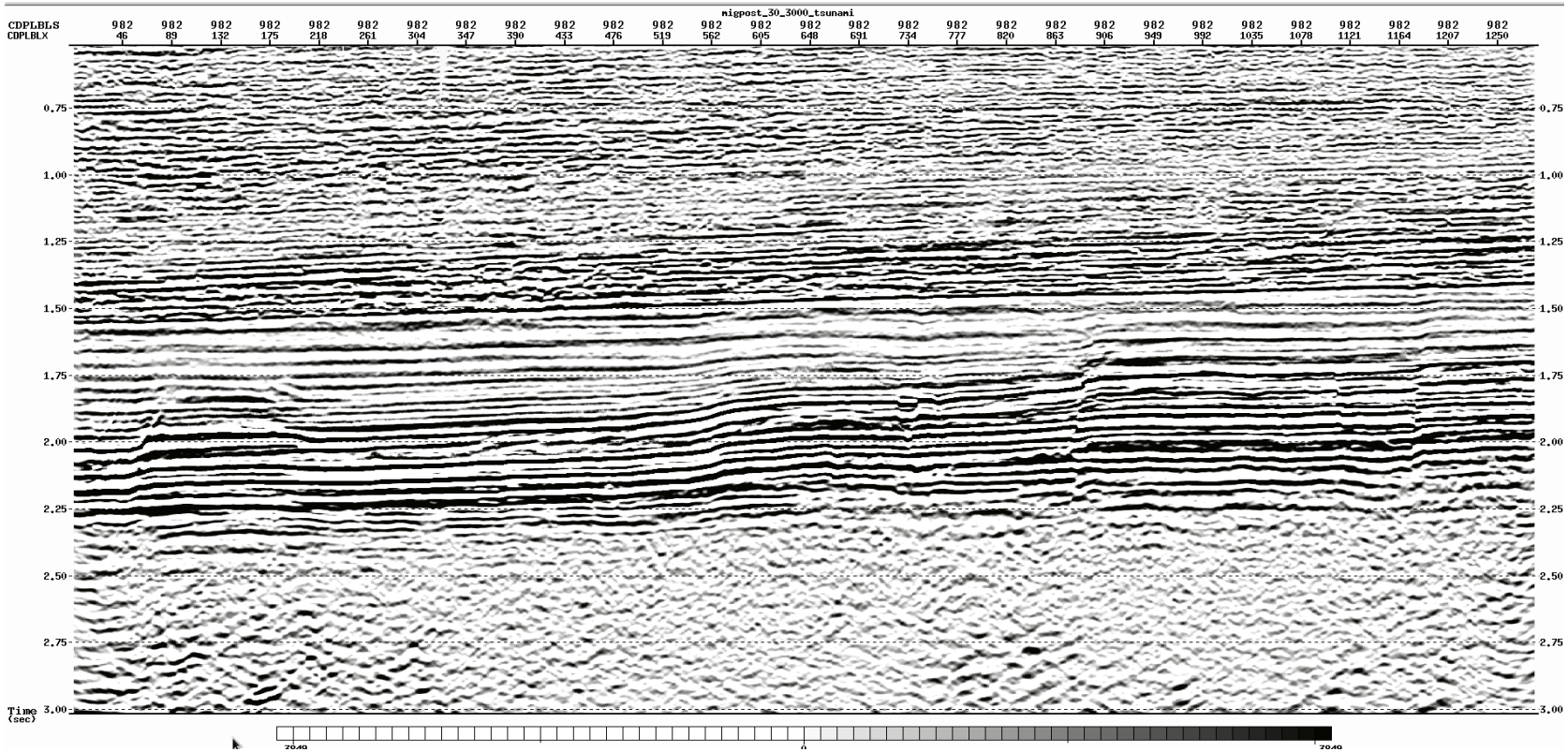


Figura 56 **Imagen sísmica correspondiente a apertura 3000 y ángulo 30°, hasta 3 segundos. Se observa el colapso de las difracciones en el área de interés de 1,5 a 2,25 segundos**.

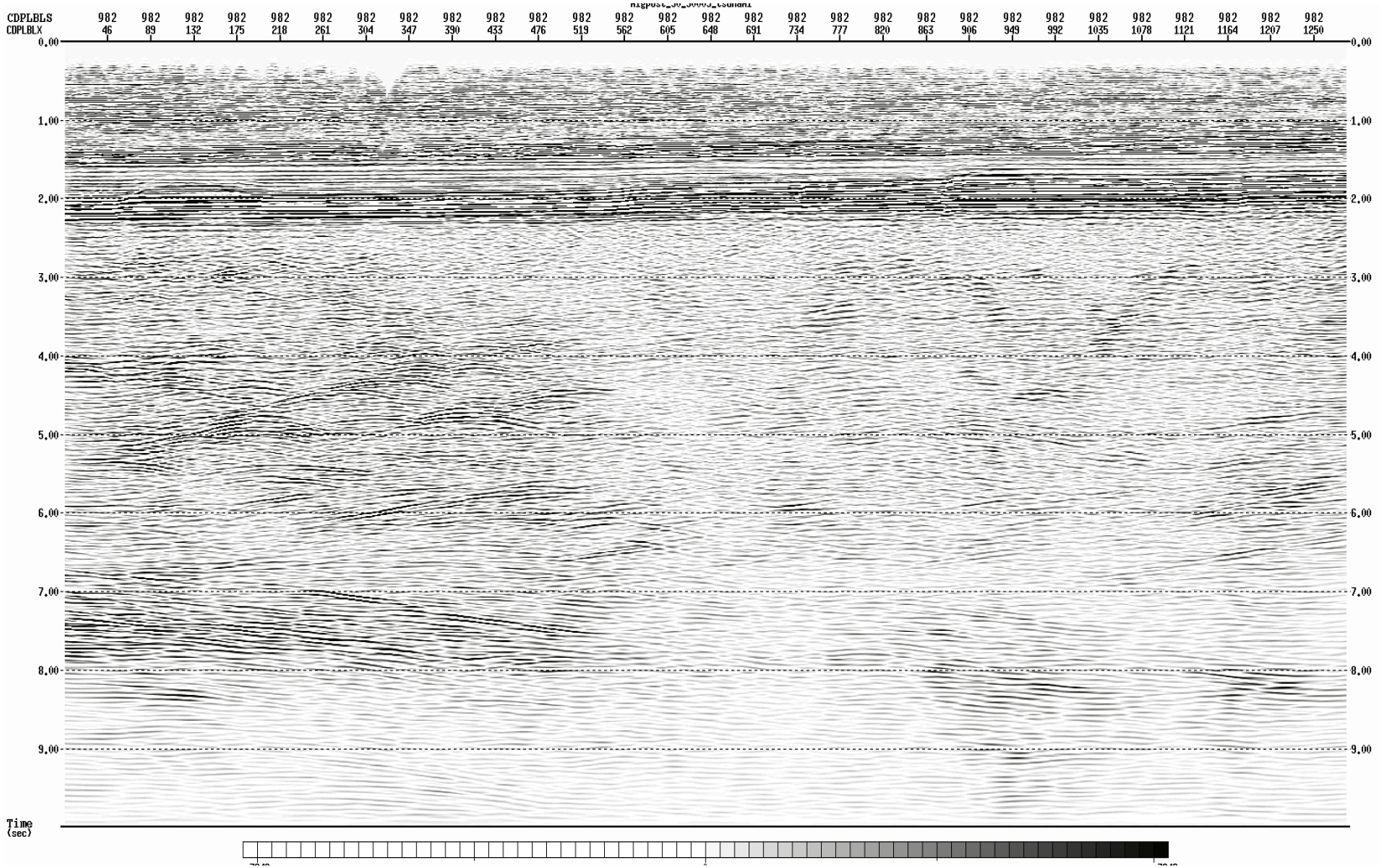


Figura 57 **Registro completo de la imagen sísmica correspondiente al inline 982 usando el cubo de velocidad inicial**.

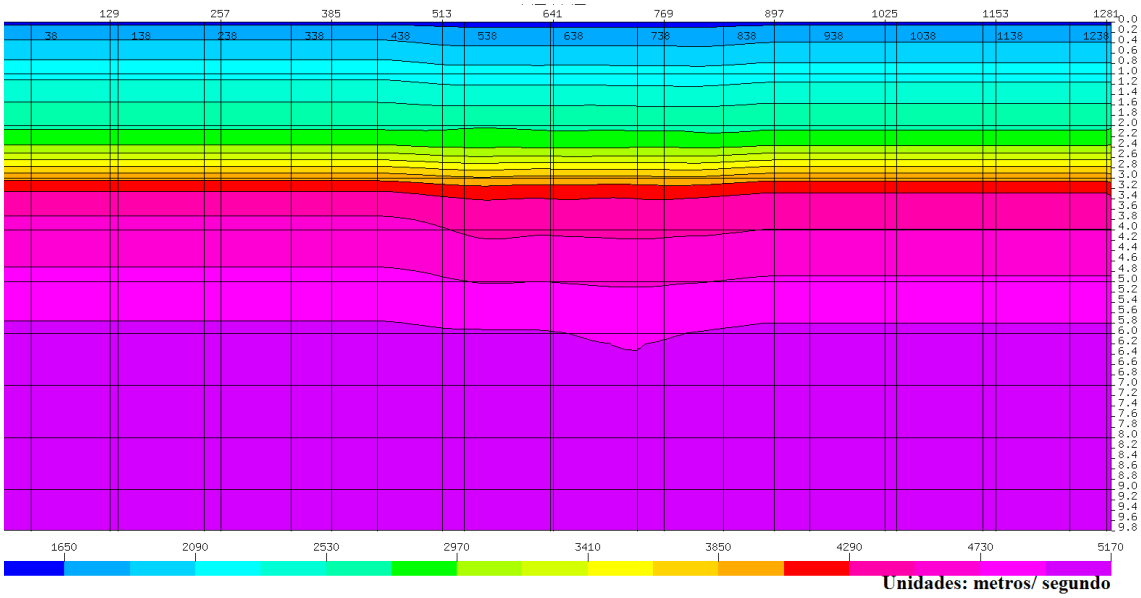


Figura 58 **Vista en dos dimensiones del cubo de velocidad inicial.**

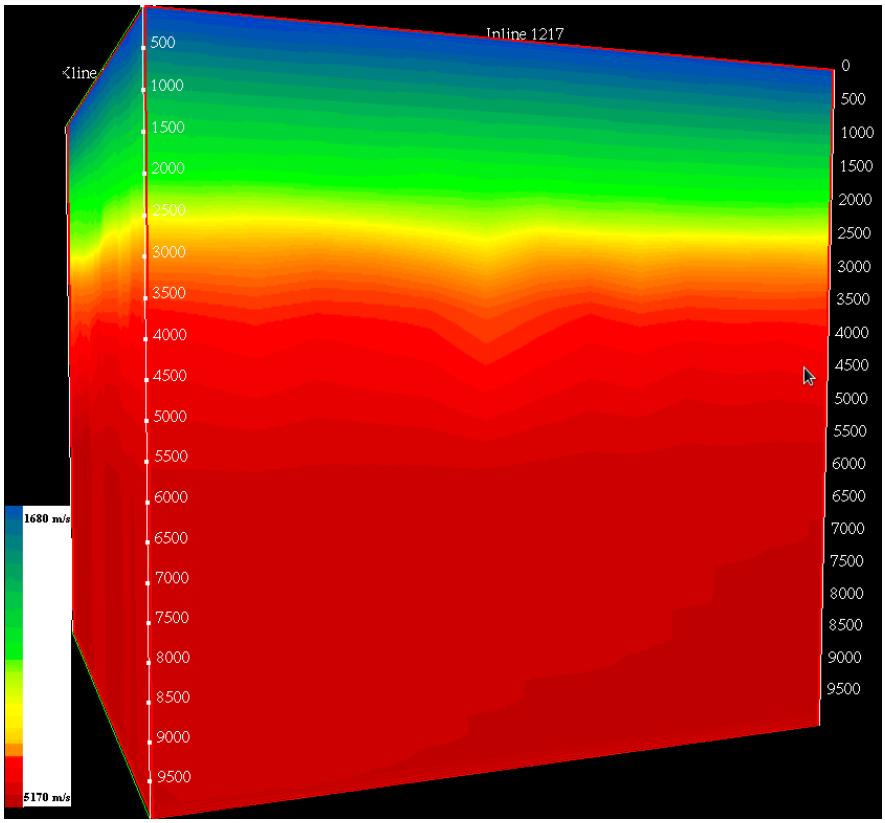


Figura 59 **Vista en tres dimensiones del cubo de velocidad inicial.**

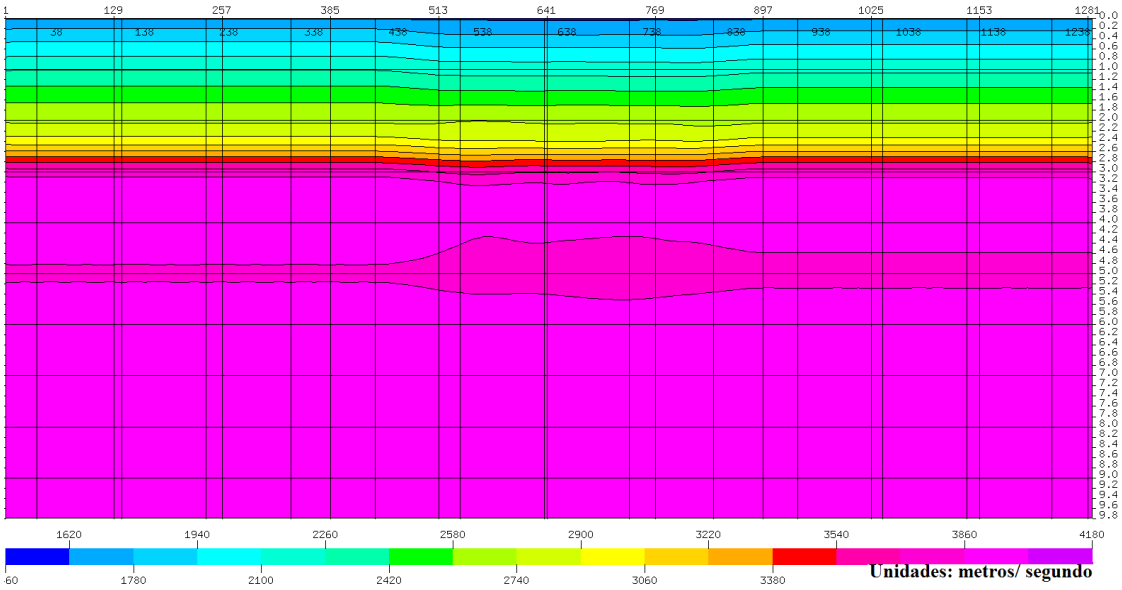


Figura 60 **Vista en 2D del cubo de velocidad suavizado número uno.**

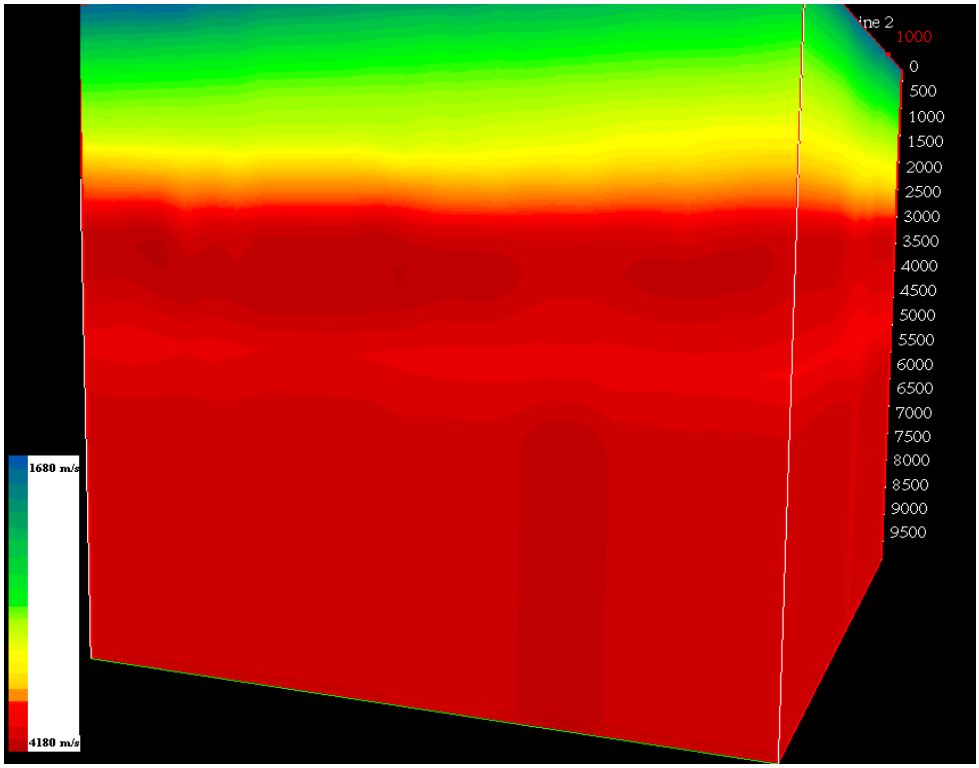


Figura 61 **Vista en 3D del cubo de velocidad suavizado número uno.**

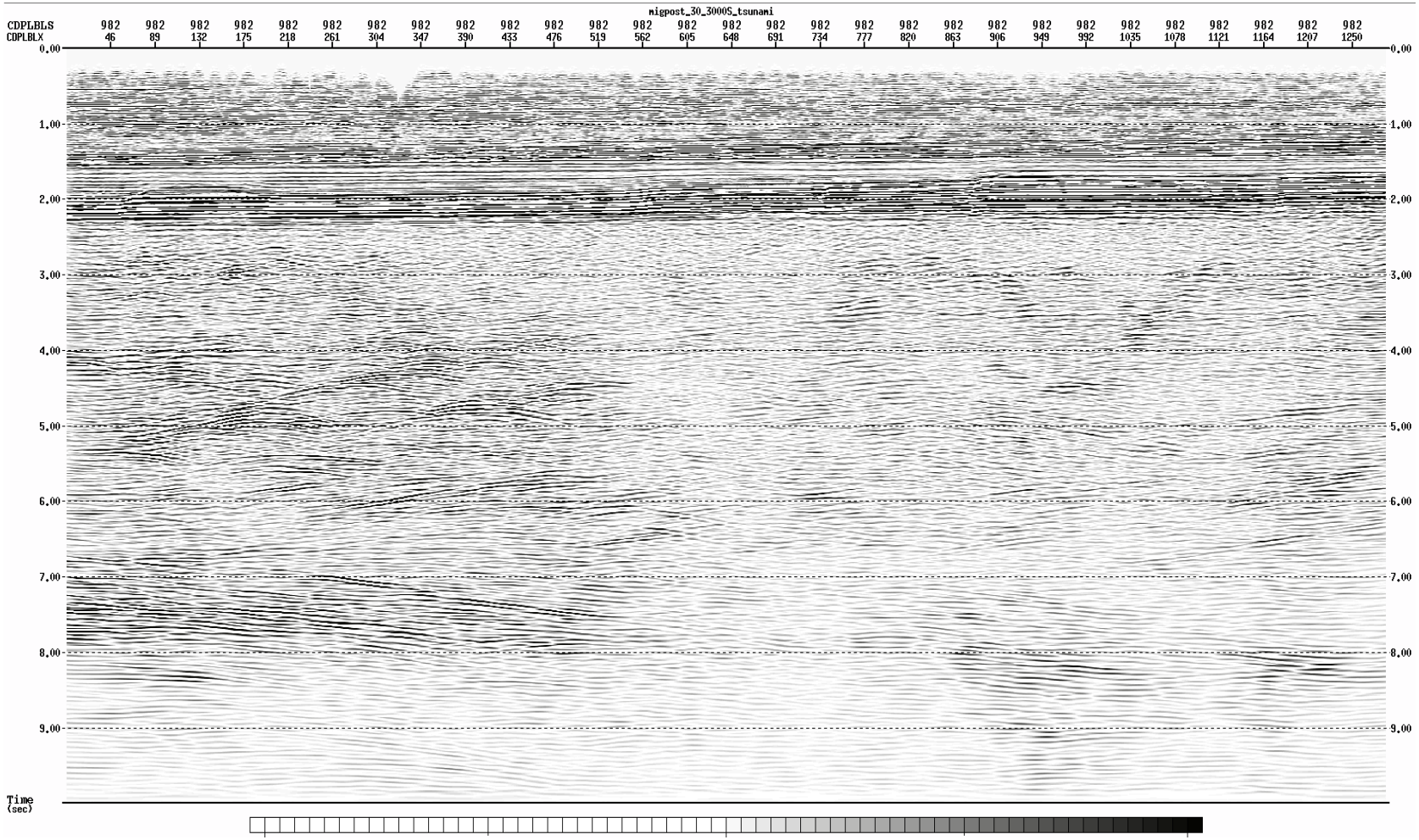


Figura 62 **Registro completo de la imagen sísmica correspondiente al inline 982 usando el cubo de velocidad suavizado**.

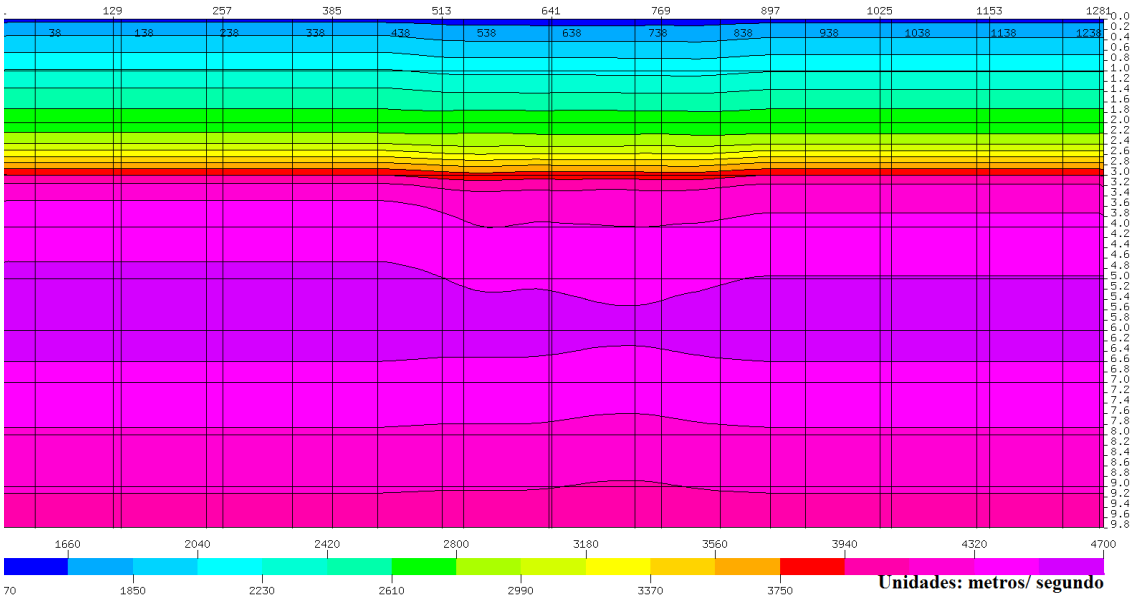


Figura 63 **Vista 2D del cubo de velocidad suavizado final.**

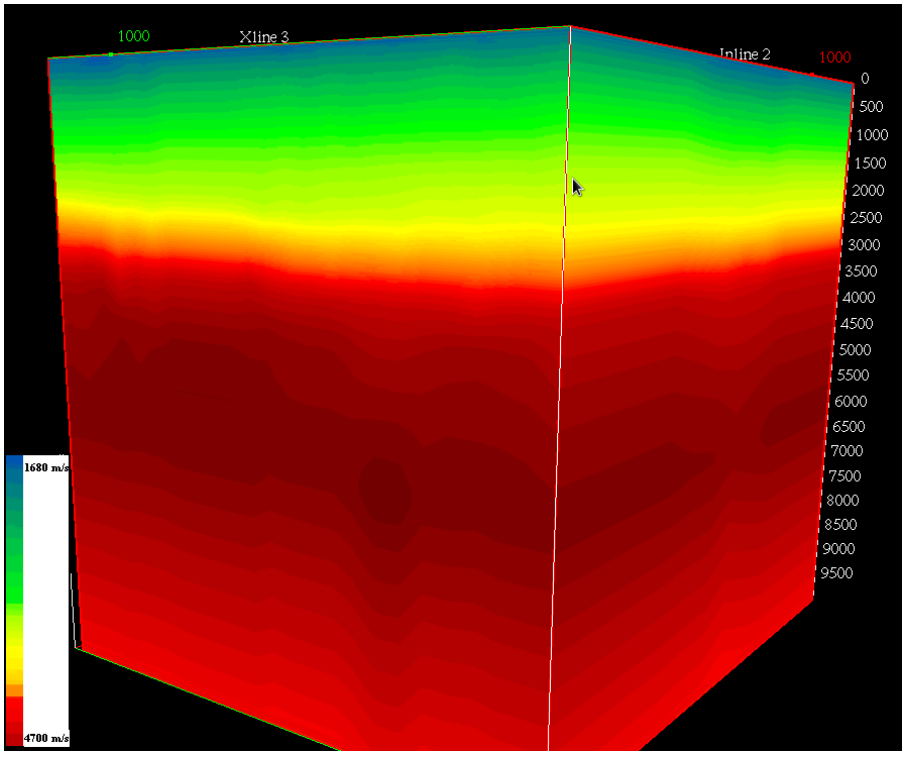


Figura 64 **Vista 3D del cubo de velocidad suavizado final**

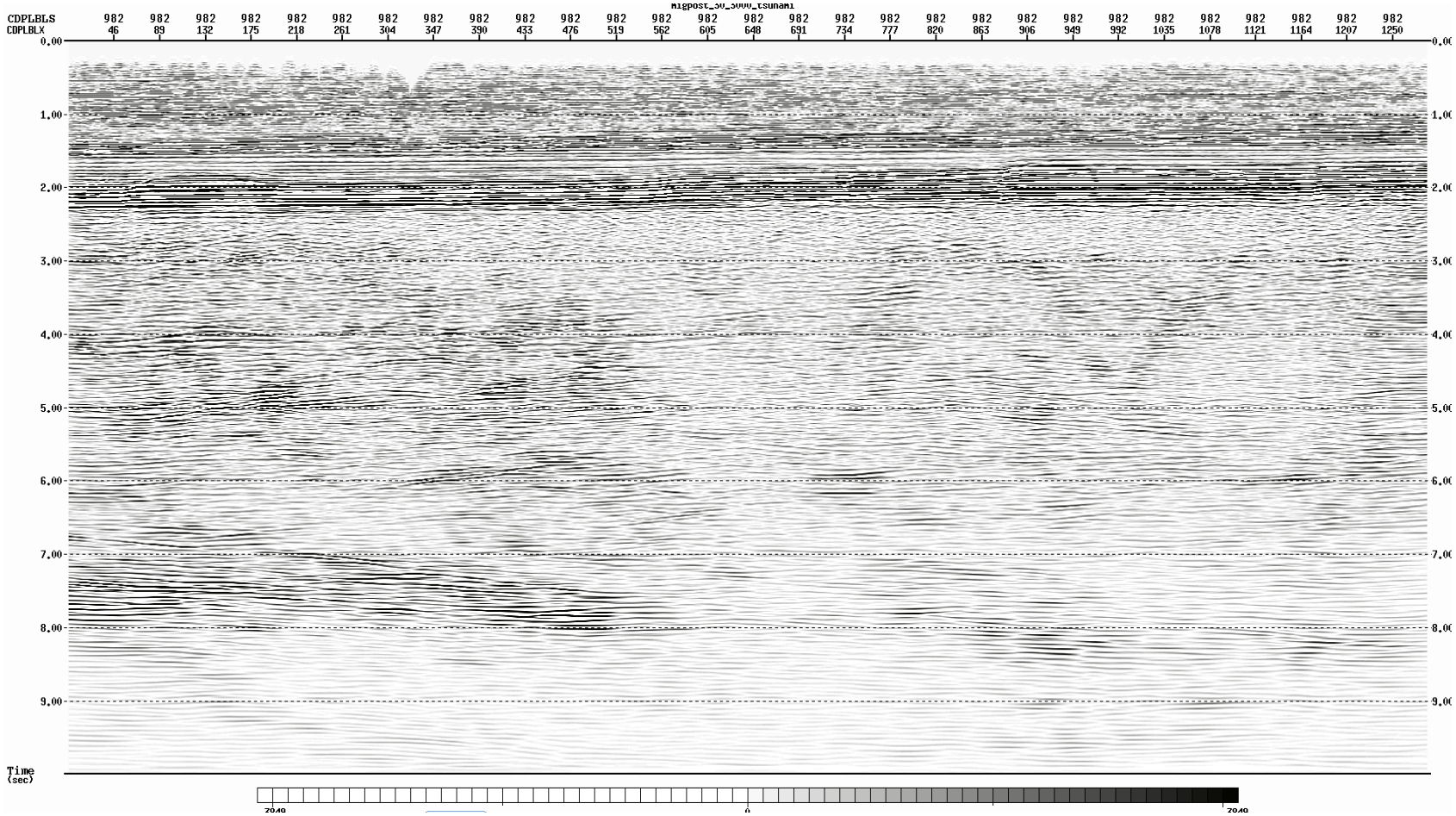


***Figura 65*. Registro completo de la imagen sísmica correspondiente al inline 982 usando el cubo de velocidad final.**

Comparando las secciones sísmicas migradas de las figuras 57, 62 y 65, con diferentes cubos de velocidades usando la misma apertura y ángulo de migración, se observa como los reflectores se comportan de manera más continua a medida que se va suavizando el cubo de velocidad, terminando en la figura 65 donde se observa la mejor disposición de los reflectores comparados con las figuras 62 y 57.

La figura 66 muestra un acercamiento en tiempo de 3 a 6 segundos de las imágenes sísmicas migradas con los tres diferentes cubos de velocidades. En la parte superior se visualiza la imagen migrada con el cubo de velocidad inicial, en ésta se observa como existe ruido en la imagen y se encuentran hipérbolas a lo largo de la misma que afectarían una interpretación en el futuro; en la imagen intermedia se utilizó el cubo de velocidad suavizado, una sección de dicho volumen se observa en la figura 60, en dicha imagen se observa como todavía se encuentran dichas hipérbolas pero más suavizadas, por último, en la parte inferior, se muestra la imagen sísmica obtenida empleando las velocidades mostradas en la sección del cubo de velocidad suavizado final de la figura 63, la cual representó la mejor imagen sísmica obtenida, siendo seleccionados los parámetros del cubo de velocidad para continuar con la investigación.

Finalmente, se escogió el cubo de velocidad de la figura 63, el ángulo de 30° y apertura de 3000 metros como los parámetros óptimos para migrar usando Kirchhoff en tiempo en los datos del proyecto Barinas Este.

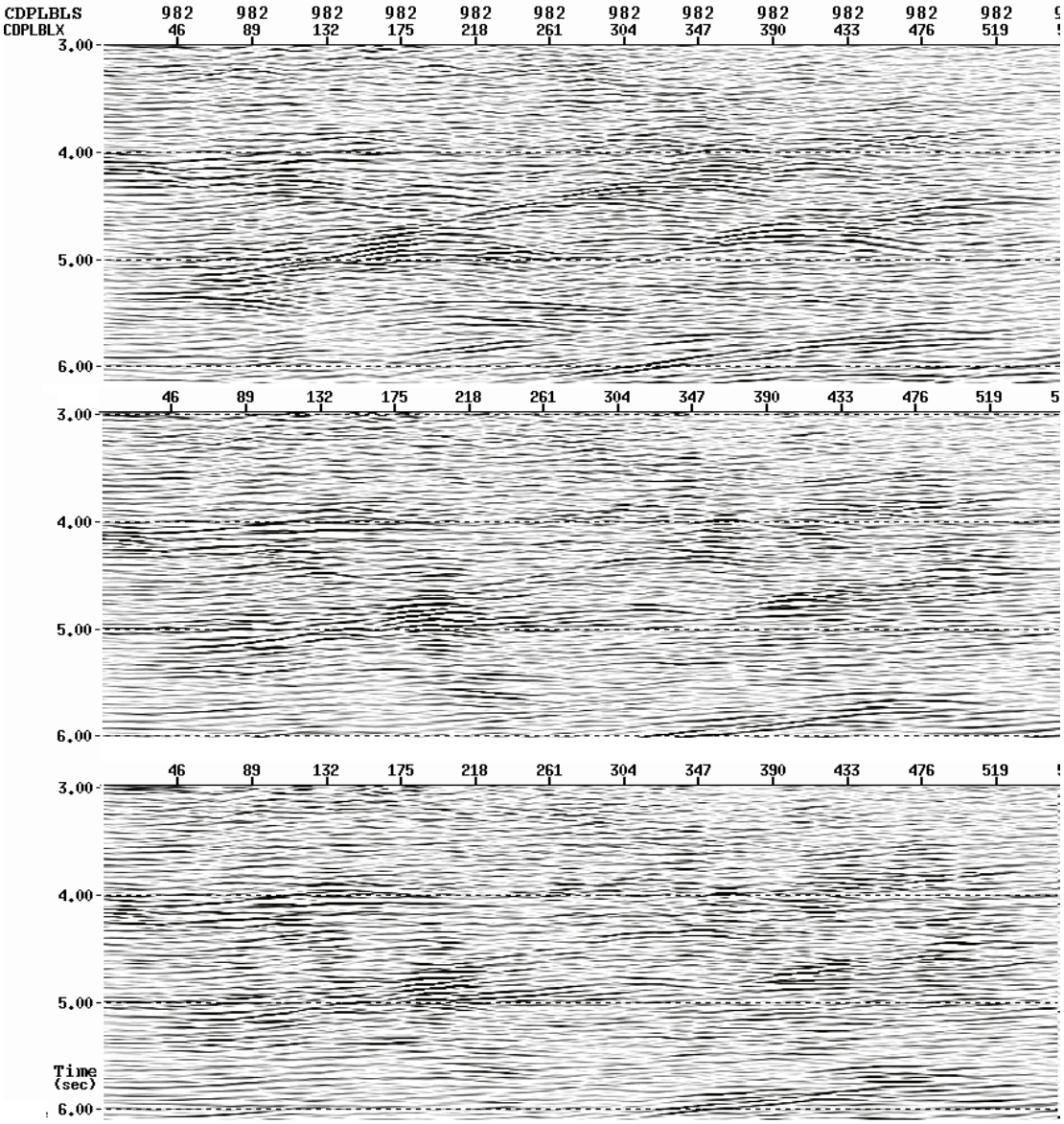


Figura 66 **Comparación entre imágenes sísmicas migradas en tiempo de 3 a 6 s. Parte superior imagen migrada con el cubo de velocidad inicial, intermedio, imagen usando el cubo de velocidad suavizado por primera vez; parte inferior, imagen sísmica usando las velocidades del cubo de velocidad suavizado final.**

5.6 Migración pre apilamiento vs migración post apilamiento.

Luego de seleccionar la mejor apertura y ángulo de migración en el post apilamiento, se procedió a migrar los gathers no apilados. Los gathers usados para

realizar la migración pre apilamiento estuvieron limitados por los crossline (3 - 460) e inline (890 -1217) y para el post apilamiento, la migración se aplicó a todo el volumen sísmico.

Las figuras 67 y 68 muestran comparaciones de dos inline seleccionados para dicho propósito. Es importante señalar que debido al tamaño de las imágenes, no es posible presentarlas completas en formato carta, por ello se analizaron secciones, en especial de la capa de interés. En la figura 67 se observa en la parte superior la imagen sísmica correspondiente al inline 982 de la migración post apilado usando los parámetros de 30° de ángulo, 3000 metros de apertura y el cubo de velocidad refinado, mientras que en la parte inferior, se muestra el mismo inline, migrado pre apilamiento bajo los mismos parámetros. En ambas imágenes sísmicas, fueron colapsadas las difracciones, esto es un punto a favor para ambas migraciones de Kirchhoff 3D en tiempo antes y después del apilamiento. Por otro lado, se observa en los cuadros "B" y "C", una mayor continuidad de reflectores en la imagen superior, mientras que en la imagen inferior, correspondiente al pre apilamiento, tal continuidad es menor. También puede observarse en el cuadro "D" una diferencia de amplitudes en las dos imágenes, siendo la imagen inferior la de menor amplitud. En el cuadro "A" se observa efecto de bordes, aumentando en la imagen inferior y disminuyendo en la imagen sísmica superior. Referente a la visualización de estructuras geológicas, ambas migraciones nos permiten observar con claridad la pequeña estructura en el recuadro "C", siendo un poco más confiable la imagen superior. Las deformaciones por buzamiento y fallas pudieron ser corregidas por ambas migraciones. La figura 68 muestra la migración post apilamiento en la parte superior y pre apilamiento en la inferior, ambos del inline 932. Al analizar la imagen sísmica, se observan algunos defectos de continuidad por parte de la migración pre apilamiento delimitados en los cuadros "C", "D" y "E", problemas de amplitud de reflectores que impiden ver su disposición visto en el cuadro "B" y el efecto de borde en el cuadro "A", por otro lado, las difracciones fueron colapsadas correctamente y se definieron de manera positiva las fallas en las dos imágenes.

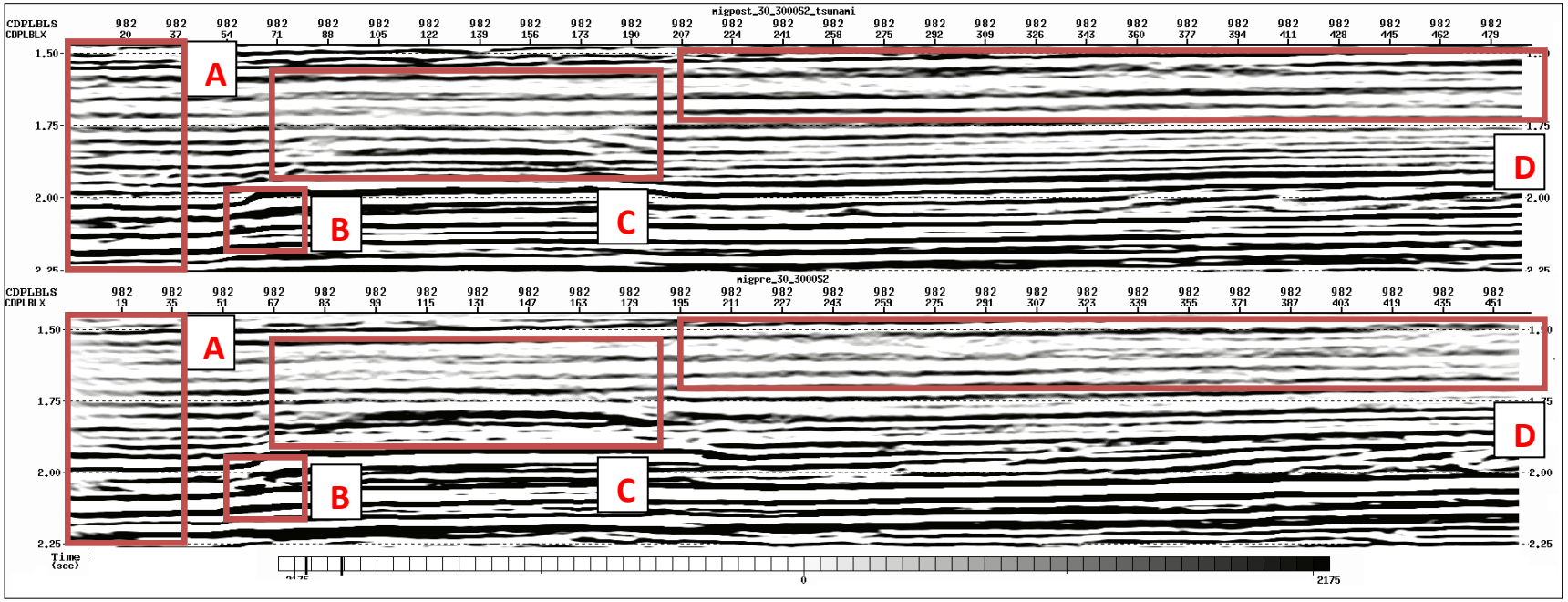


Figura 67 **Inline 982. Comparación entre migración pre apilamiento y post apilamiento tiempo (1,5 s- 2,25 s). Se observa en los recuadros diferencias de continuidad de reflectores.**

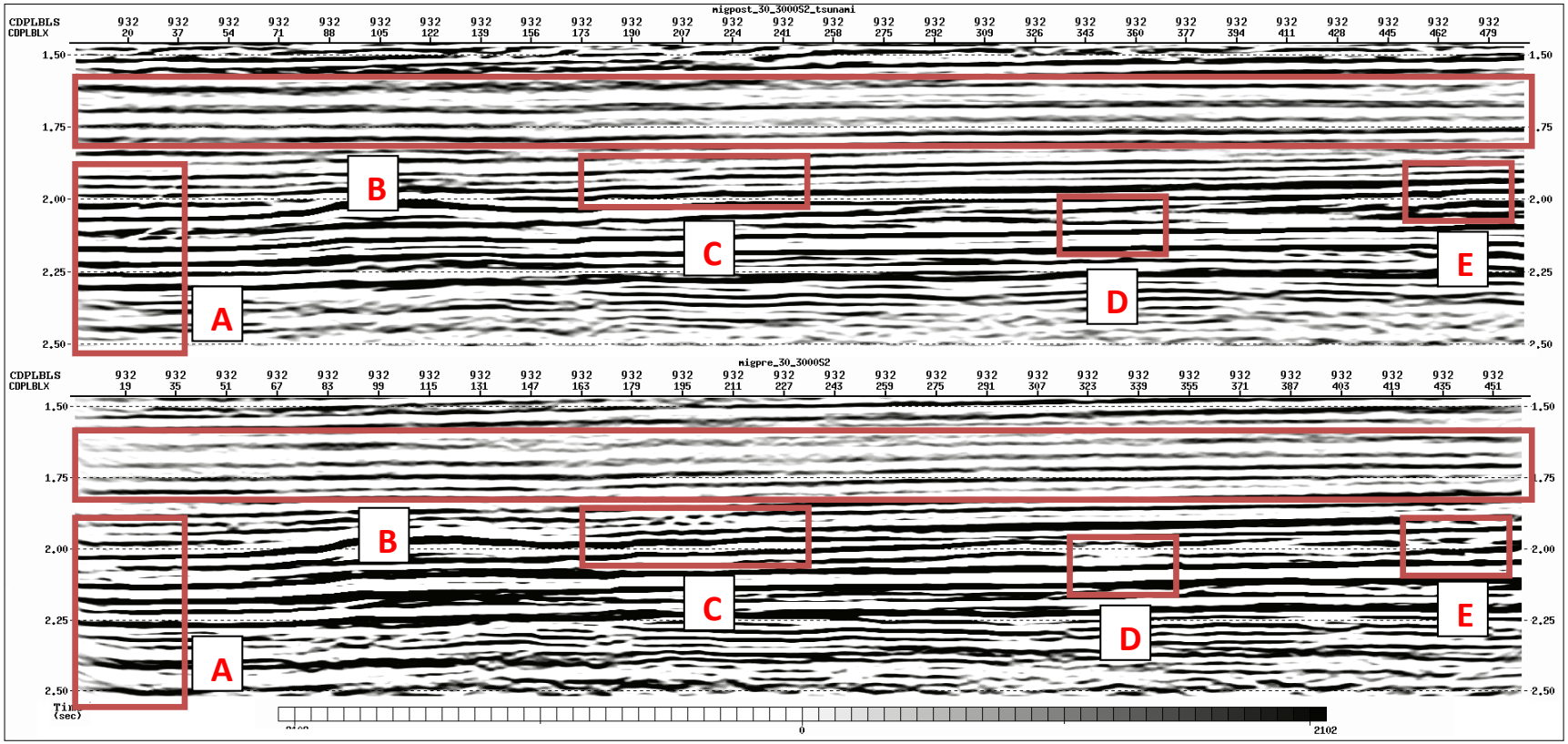


Figura 68 **Inline 932. Comparación entre migración pre apilamiento arriba y post apilamiento tiempo abajo (1,5 s - 2,25 s). Los cuadros representan diferencias entre las imágenes sísmicas.**

En teoría, la migración pre apilamiento debería brindar una imagen sísmica con mejor relación señal ruido, resaltando estructuras que se extiendan arealmente ocasionando variaciones laterales de velocidad; por otra parte, al migrar cada CMP para luego apilar dichas trazas en una traza cero-offset, se amplifica el efecto de la migración. En el caso de los datos del proyecto Barinas Este, se decidió escoger el cubo sísmico migrado en el post apilamiento sobre el cubo sísmico migrado en el pre apilamiento, esto es debido a varios factores:

1. La migración pre apilamiento se aplicó a un sub volumen muy pequeño de datos, correspondiente al inline (890 - 1217) y crossline (3 - 460) mientras que en la migración post apilamiento se trabajó con los inline (2 - 1217) y crossline (3 - 1282), esto proporciona a la migración post apilamiento una mayor continuidad lateral que se ve afectada en la migración pre apilamiento, generando sobre migraciones llamadas efectos de bordes en los crosslines cercanos al 460, esto desmejora la calidad de la imagen sísmica

2. Gupta, (2011), señala que cuando el objetivo se encuentre relativamente superficial y la geología del lugar no sea compleja, la migración post apilado es una buena opción. Para objetivos profundos, y lugares con geología compleja, existen muchos cambios en la velocidad lateral que podrían afectar el proceso de migración post apilamiento, siendo recomendable aplicar migración pre apilamiento. En este caso, el objetivo se encuentra a una profundidad bastante somera, teniendo pocas estructuras geológicas con buzamientos elevados, de manera tal que es preferible escoger la migración post apilamiento

3. El tiempo de cómputo es un factor importante al momento de seleccionar la mejor migración de Kirchhoff; se recuerda que al tener coberturas altas en el pre apilamiento la migración puede tardarse más que en el post apilado. Por tener cobertura de más de 60 trazas, la migración pre apilamiento tardó un total de 2003 minutos de cómputo, mientras que la migración post apilamiento tardó en promedio 130 minutos de cómputo, esto se traduce en 15 migraciones post apilamiento por cada migración pre apilamiento.

La tabla 5.1 muestra un resumen que resalta las diferencias encontradas en ambos volúmenes sísmicos y analizadas anteriormente, se escogió la migración post stack con dicho ángulo, apertura y modelo de velocidad como el más adecuado para ser interpretado.

La tabla 3 muestra un una comparación cualitativa acerca de algunos factores influyentes que fueron mejorados al aplicar la migración de Kirchhoff. El símbolo "✓" representa cual de ambas opciones resulta la mejor alternativa.

Tabla 3

Comparación cualitativa de parámetros entre migración pre apilamiento y post apilamiento.

Aspecto a analizar	**Post Stack**	**Pre Stack**
Continuidad de reflectores	✓	
Colapso de difracciones	✓	✓
Visualización de estructuras geológicas	✓	✓
Relación señal / ruido	✓	✓
Corrección de deformaciones por buzamientos	✓	✓
Tiempo de cómputo	✓	

Con respecto a la opinión de expertos, estos coincidieron que en este caso, ambas imágenes tienen aspectos en común tales como colapso de difracciones, visualización de estructuras, relación señal ruido y corrección de deformaciones producidas por buzamientos, pero en la migración post apilamiento observa mejor continuidad. El tiempo de cómputo influye negativamente en la migración pre

apilamiento al ser de 2000 minutos en comparación con los 120 minutos de la migración post apilamiento. La imagen migrada en el pre procesamiento generalmente genera resultados mejores que las obtenidas en la migración post apilamiento, en este caso los expertos escogieron la post apilamiento al analizar los aspectos señalados anteriormente.

5.7 Migración óptima vs apilado inicial.

Las figuras 69, 70 y 71 muestran los inlines 950, 569 y 1064, contrastando la migración óptima seleccionada anteriormente versus el apilado inicial sin migración, con el fin de evaluar las diferencias entre ambas imágenes sísmicas y conocer que tan eficiente resultó la aplicación del algoritmo de migración de Kirchhoff 3D en el volumen sísmico.

Al observarse buena cantidad de reflectores y fallas, es posible determinar el cambio ocurrido luego de migrar. La figura 69 muestra el reflector principal, en la misma se visualiza, en la imagen sin migrar, efectos producidos por difracciones, falta de continuidad de reflectores, definición de fallas pobres, entre otros, que sin duda interesan al intérprete al momento de analizar el volumen sísmico, pudiéndose tomar decisiones incorrectas sobre conclusiones geológicas y estructurales de la zona. Por su parte, la imagen sísmica migrada muestra como el efecto de la migración colapsó las difracciones, mejorando la continuidad de reflectores, y definiendo las fallas geológicas de mejor manera, esto también puede visualizarse en las figuras 70 y 71, donde a simple vista se cumple con el objetivo de la migración.

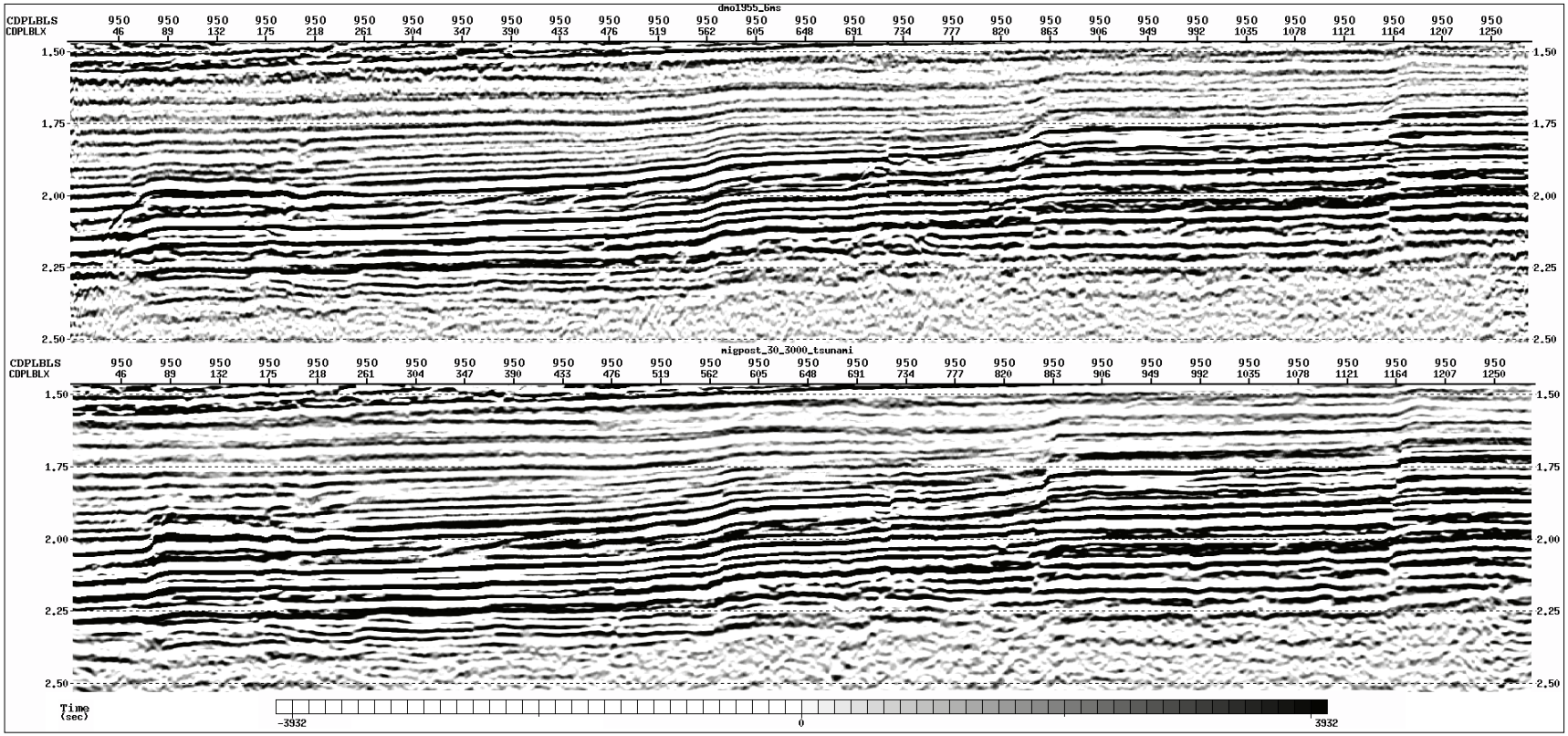


Figura 69 **Inline 950. Comparación entre migración óptima e imagen sísmica inicial (1,5 s - 2,25 s). En la parte de arriba se observa el apilado sin migración, el apilado migrado abajo.**

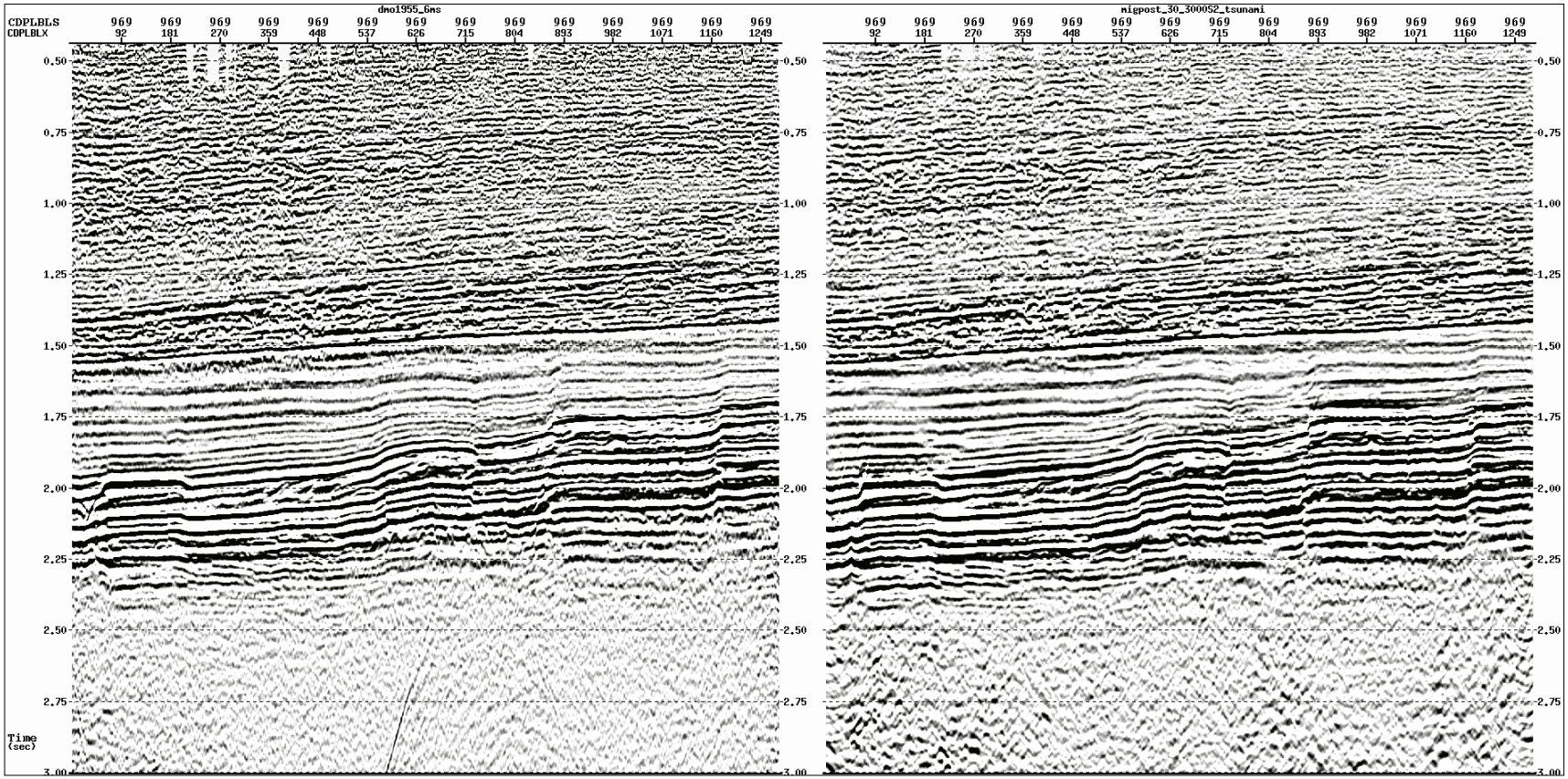


Figura 70 **Inline 969. Comparación entre migración óptima e imagen sísmica inicial (0 s - 3 s). A la izquierda se observa el apilado sin migración, a la derecha el apilado migrado.**

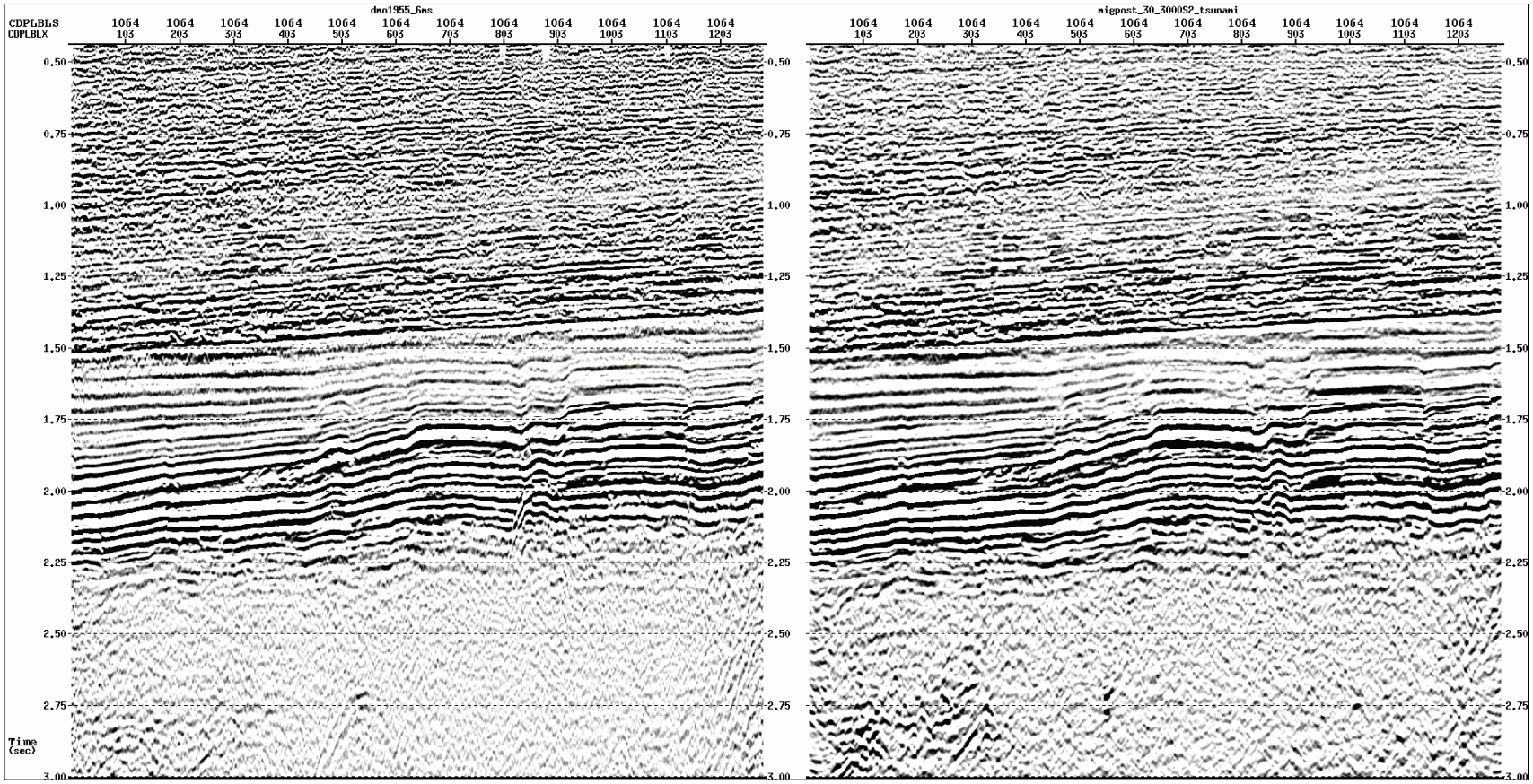


Figura 71 **Inline 1064. Comparación entre migración óptima e imagen sísmica inicial (0 s - 3 s). A la izquierda se observa el apilado sin migración, a la derecha el apilado migrado.**

La tabla 4 muestra las comparaciones finales de ambos cubos sísmicos, viéndose como en todos los aspectos planteados se seleccionó la migración óptima del post stack sobre el apilado inicial, suponiendo la utilidad e indispensabilidad de la migración en cualquiera de sus métodos para optimizar la imagen sísmica. . El símbolo "✓" representa cual de ambas opciones resulta la mejor alternativa.

Tabla 4

Comparación cualitativa de parámetros entre migración post apilamiento y apilado sin migración (ASM).

Aspecto a analizar	Post Stack	ASM
Continuidad de reflectores	✓	
Colapso de difracciones	✓	
Visualización de estructuras geológicas	✓	
Relación señal / ruido	✓	
Corrección de deformaciones por buzamientos	✓	

En base al análisis cualitativo, en el cual se consideraron elementos tales como: colapso de difracciones, continuidad de reflectores, definición de fallas y estructuras, relación señal ruido, entre otros, se seleccionó como más adecuada una apertura de 3000 m y 30°, estos parámetros utilizados al momento de migrar, empleando el algoritmo de Kirchoff 3D en tiempo, proporcionaron una imagen sísmica de salida de mejor calidad.

Al poseer la imagen sísmica migrada de estudio, fue posible obtener y calcular información relacionada con algunos parámetros que fueron empleados en la geometría, tales como frecuencia máxima, insumo necesario para el cálculo de la

resolución lateral, vertical, tamaño del bin, entre otros. De igual forma, buzamientos y profundidad máxima del objetivo geológico, mencionados en este trabajo como la zona de interés, representan dos insumos importantes en el cálculo de la geometría tales como apertura de migración de adquisición, resolución vertical y lateral, ancho de la zona de Fresnel, entre otros. Estos tres parámetros obtenidos luego de la migración se encuentran asociados a la geología del lugar de estudio.

La confidencialidad de las características de la geometría de adquisición de los datos suministrados por la empresa PDVSA Pto La cruz, impidió conocer que parámetros fueron utilizados para la geometría del proyecto Barinas Este, siendo proporcionados sólo los aspectos básicos vistos en la tabla 4.1.

Sin embargo, al tener valores de frecuencias máximas, buzamientos y offset máximo, obtenidos de la imagen sísmica, puede sugerirse una reconstrucción teórica, basada en formulaciones y principios, para recrear las características probables de la geometría empleada en la adquisición de los datos sísmicos, esto en caso de poseerse datos adicionales de geometría, de esta manera podrían utilizarse en adquisiciones futuras parámetros corroborados.

El 100% de los expertos consultados resaltan que la migración logró mejorar la imagen sísmica, destacando que en el peor de los casos, la migración genera una imagen sísmica sin cambios significativos igual al apilado, en este caso si se observan diferencias entre las imágenes suministradas en la encuesta reseñada en el anexo A.

5.8 Migración CGG Veritas vs migración óptima.

Por último, las comparaciones entre la migración de Kirchhoff en tiempo 3D realizada en la empresa Veritas CGG y la migración que representó la mejor opción en este trabajo de grado produjeron resultados muy parecidos. En cuanto a los aspectos similares, en ambos cubos sísmicos migrados se observa el colapso correcto de las difracciones, mejorando al definir la continuidad de fallas y reflectores considerablemente, esto se observa en las comparaciones mostradas en las figuras 73 vs 74, 75 vs 76. La figura 72 muestra la comparación entre ambas zonas de interés, ubicados en los tiempos 1,5 s hasta 2,25 segundos, viéndose pequeñas diferencias de amplitudes y definición de reflectores.

Respecto al análisis espectral utilizado para buscar diferencias entre el contenido de frecuencias y amplitudes, se encontró que se tienen las mismas frecuencias enmarcadas entre 10 Hz Y 80 Hz pero con variación en el comportamiento de las amplitudes, esto se observa en la figura 77 donde se muestran los espectros de frecuencias correspondientes al inline 948 y 982 de la migración realizada en Veritas y la generada en este trabajo, observándose picos de aumento amplitud en los inline migrados por la empresa Veritas en frecuencias de 40 Hz y 60 Hz, mientras que el decaimiento de las amplitudes en las migraciones aplicadas en esta investigación fue gradual, esto puede traducirse en pequeños cambios en la imagen sísmica, donde reflectores que posean frecuencias de 40 y 60 Hz podrán resaltar producto de su aumento en la amplitud.

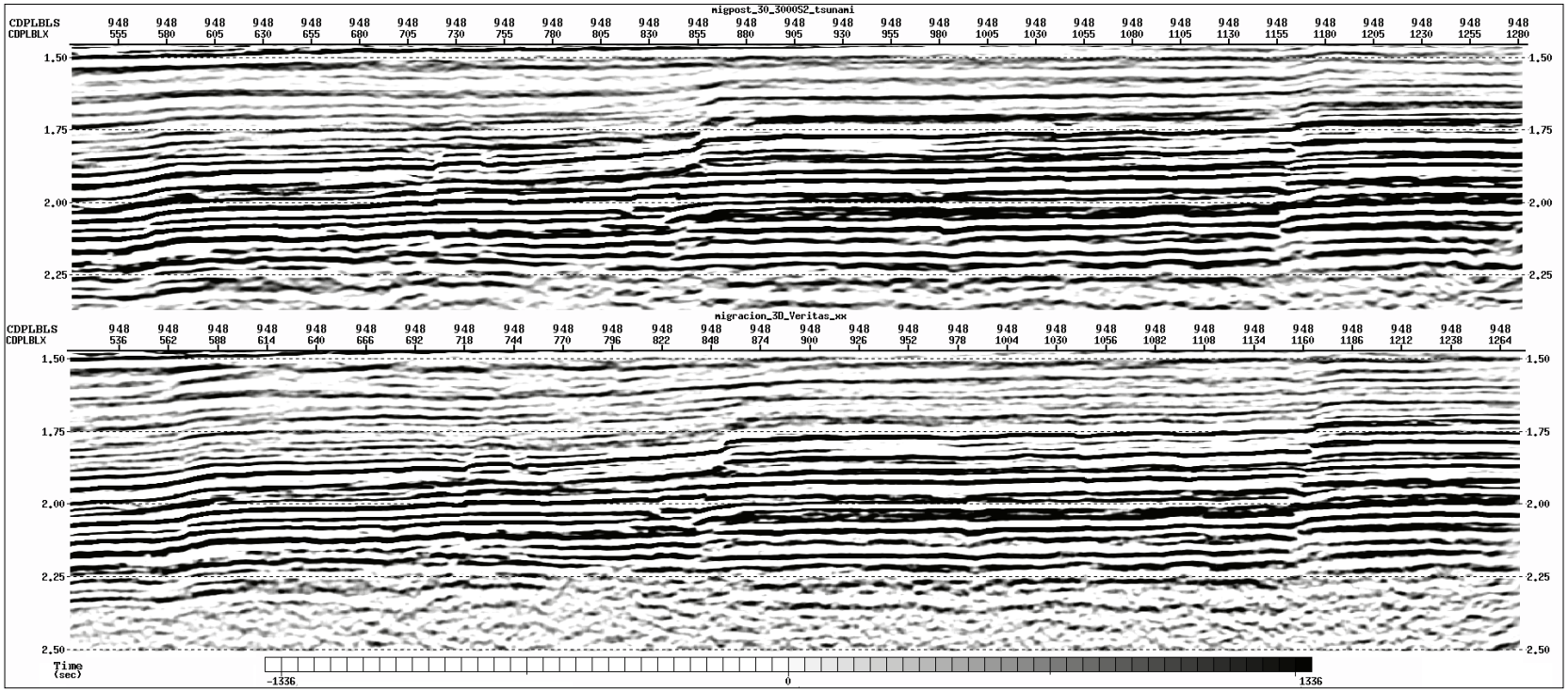


Figura 72 **Inline 948. Comparación entre migración óptima y migración Veritas (1,5 s - 2,25 s). En la parte superior se observa la migración óptima escogida en la investigación, en la inferior la imagen de la empresa CGG Veritas.**

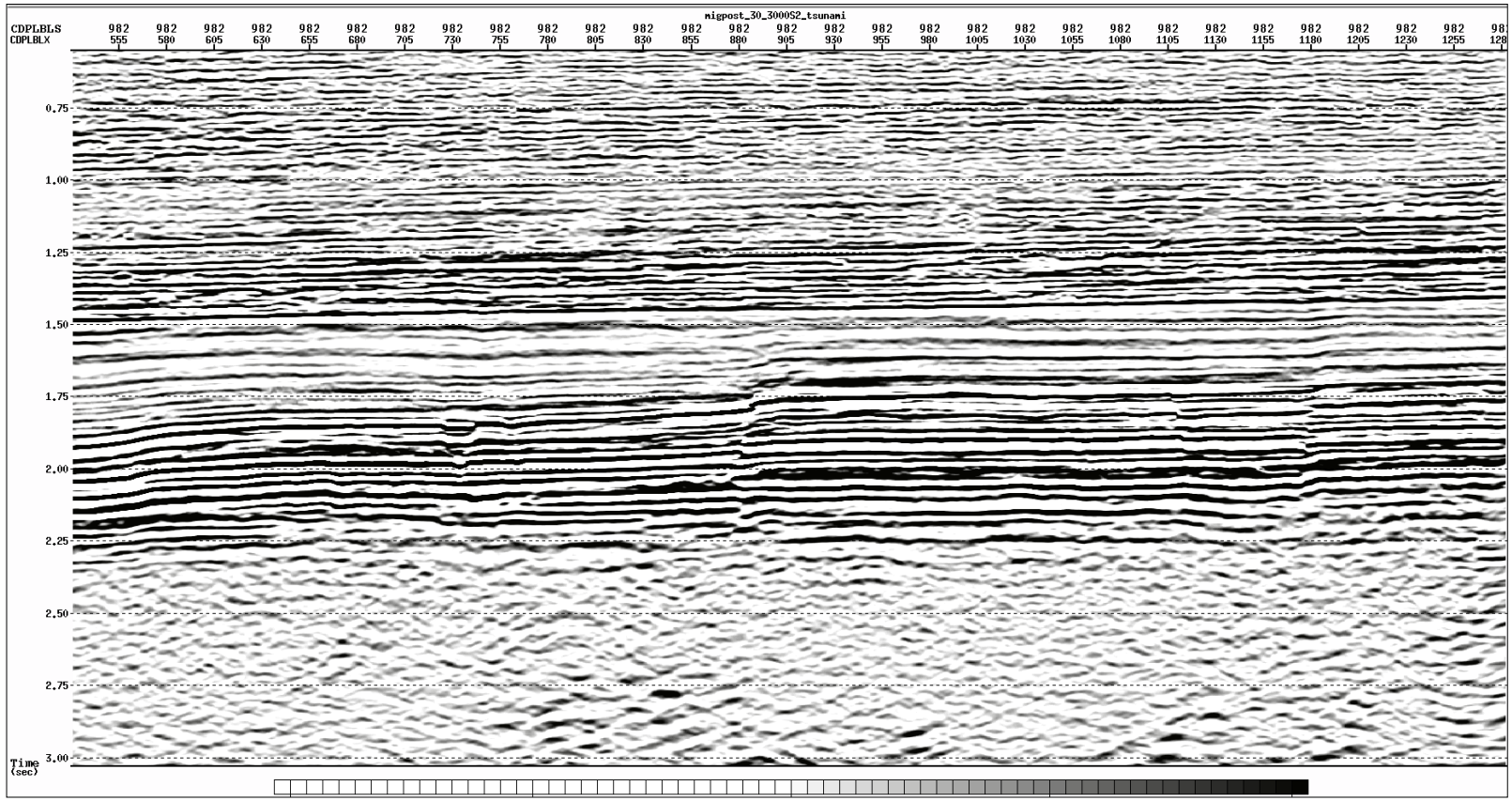


Figura 73 **Migración óptima inline 982**

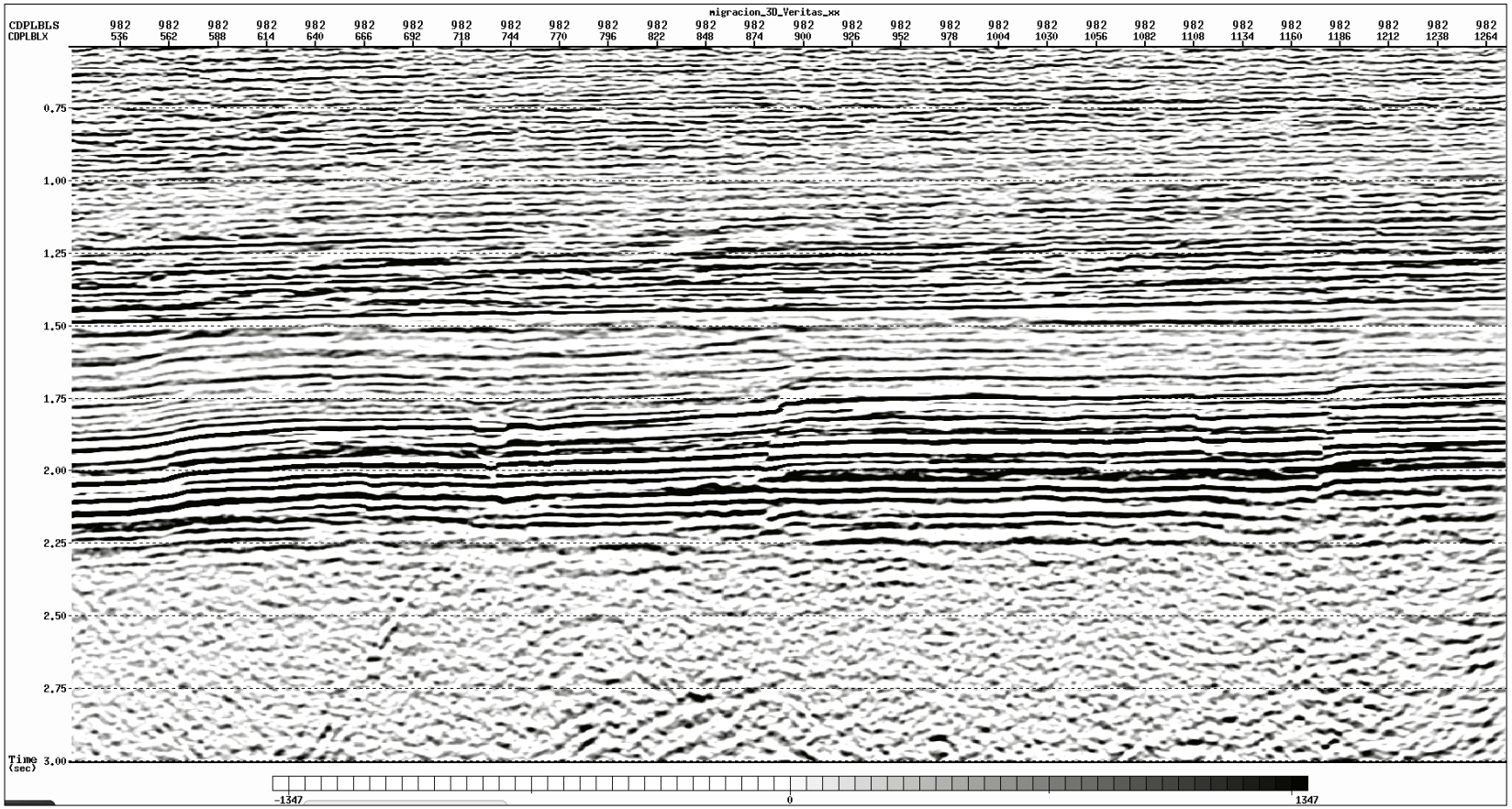


Figura 74 **Migración Veritas inline 982**

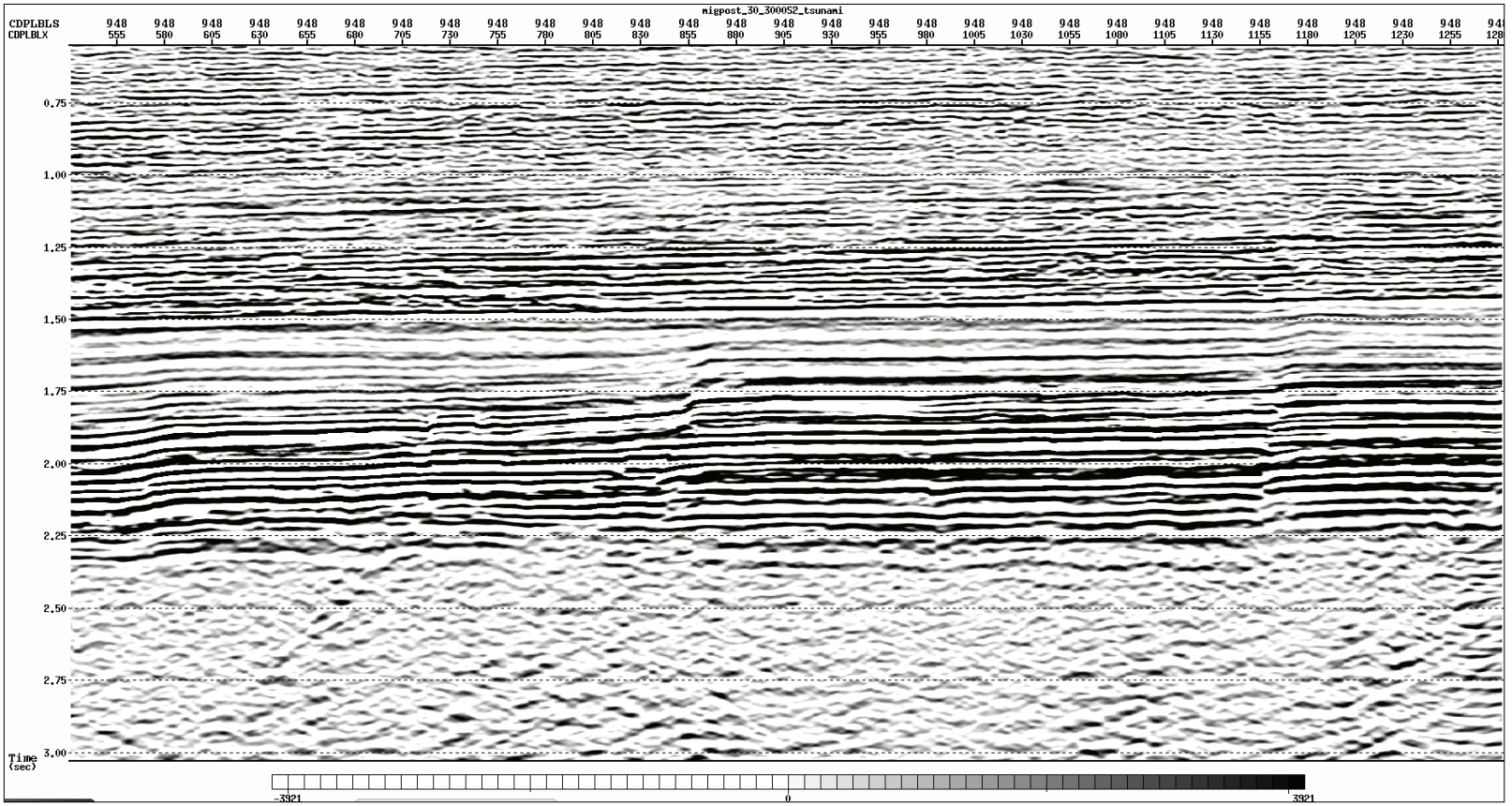


Figura 75 **Migración óptima inline 948**

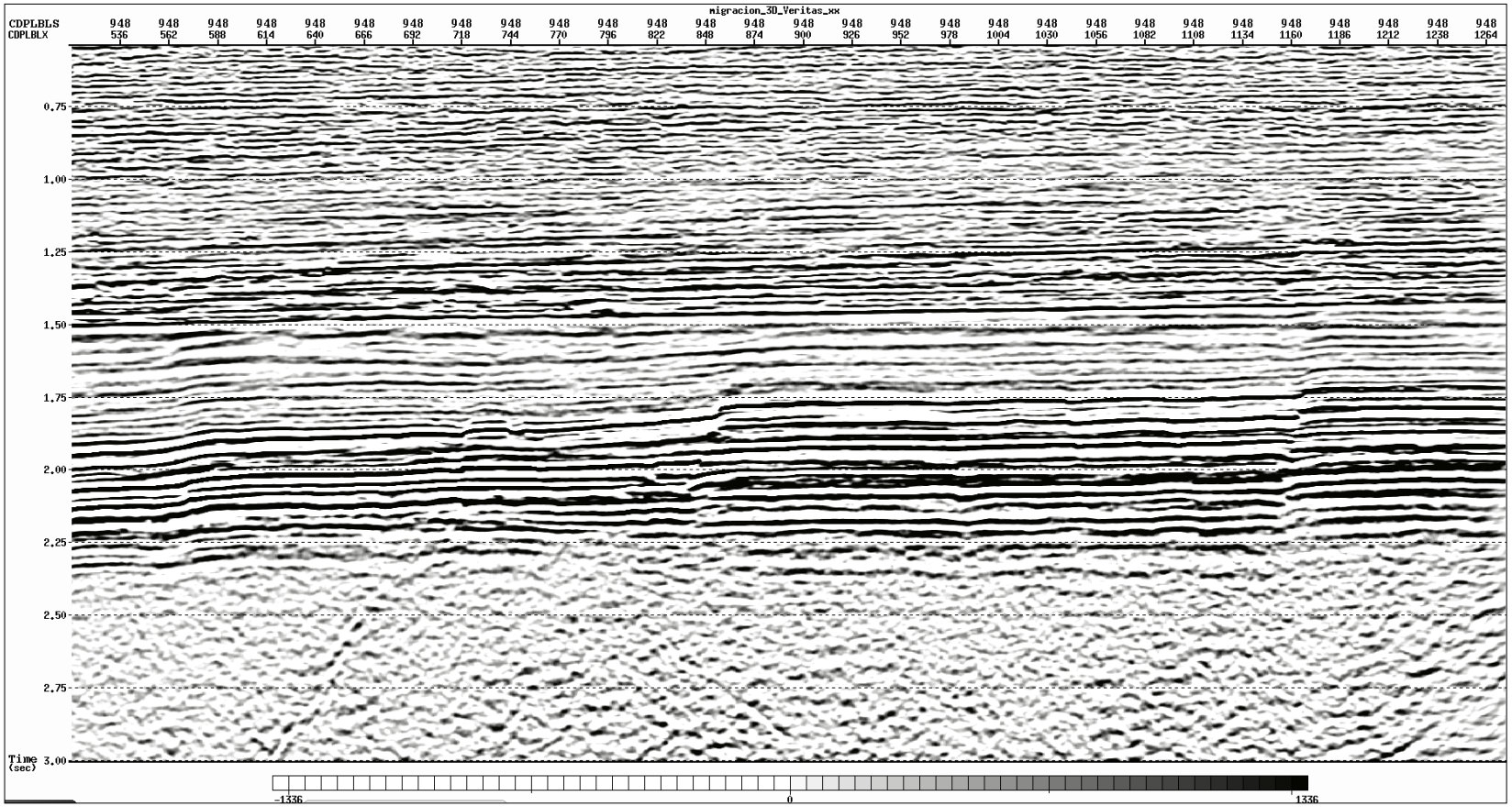


Figura 76 **Migración Veritas inline 948.**

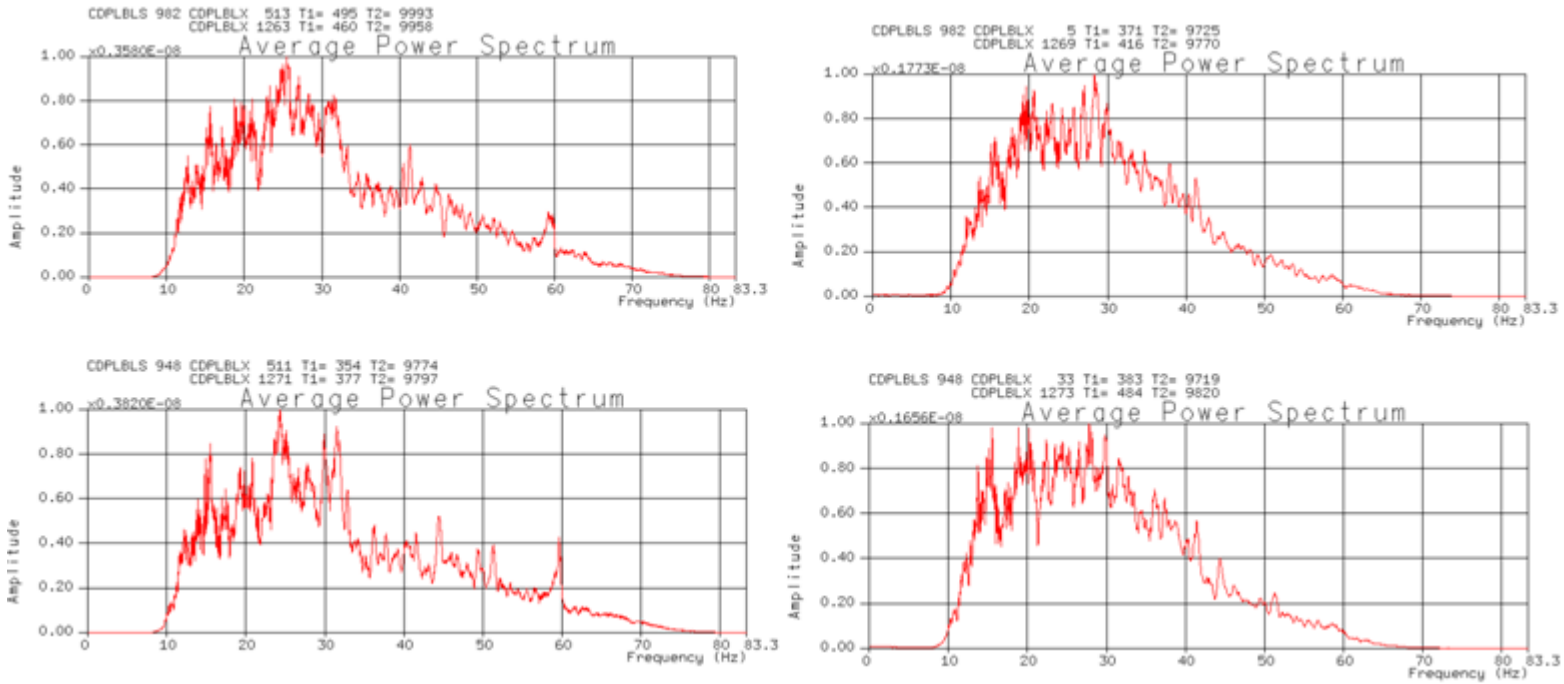


Figura 77 **Espectro de frecuencia versus amplitud, a la izquierda dos gráficos correspondientes a las migraciones realizadas en Veritas (inline 982 arriba y 948 abajo), a la derecha los gráficos correspondientes a las migraciones realizadas en la investigación (inline 982 arriba y 948 abajo).**

Es importante destacar que el nivel de similaridad encontrada al comparar cualitativamente ambos cubos sísmicos migrados en dos empresas diferentes demuestra que la migración de Kirchhoff en tiempo escogida en este trabajo correspondiente al uso de 3000 metros y 30° representó una opción competitiva. La tabla 5 muestra la comparación cualitativa de ambas migraciones.

Tabla 5

Comparación cualitativa de parámetros entre migración Post Stack y CGG Veritas

Aspecto a analizar	**Post Stack**	**CGG Veritas**
Continuidad de reflectores	✓	✓
Colapso de difracciones	✓	✓
Visualización de estructuras geológicas	✓	✓
Relación señal / ruido	✓	✓
Corrección de deformaciones por buzamientos	✓	✓

Respecto a la opinión de los expertos visto en el anexo A, expertos mencionan que las imágenes sísmicas analizadas en el apéndice C son similares, con igual contenido de frecuencias, ganancia y continuidad de reflectores. Si el objetivo está entre 0,00 y 2,5 segundos, cualquiera de las dos secciones son consideradas buenas para la interpretación. Se conoce que la migración optima fue de 30º de ángulo y 3000 metros de apertura, más los parámetros usados en Veritas CGG son confidenciales, de manera que no fue posible contrastar dichos parámetros.

CAPÌTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Luego de aplicar las pruebas de ruido a una traza perteneciente al volumen sísmico de estudio, se pudo determinar, los parámetros correspondientes a ángulo de migración, en los cuales el operador sobre migra la traza sísmica ocasionando una distorsión, definida como ruido. Así, ángulos mayores a 45º representaron aperturas excesivas para los datos utilizados en este trabajo. Ángulos menores o iguales a 30º no generaron ruido en la imagen de la traza migrada individualmente. La prueba de ruido representó una alternativa ideal para ahorrar tiempos de cómputo.

- Las pruebas de migración llevadas a cabo variando apertura y ángulo sujieren que para ángulos de 10º y 20º los reflectores no se definen en su totalidad, esto ocurre debido al bajo ángulo de migración el cual no permite migrar mayor información lateral en metros.

- La comparación cualitativa de migración de Kirchhoff realizada por la empresa CGG Veritas y la migración optima seleccionada en este trabajo aportó como resultado un nivel de semejanza bastante alto debido al cumplimiento de ambas imágenes sísmicas con los parámetros de comparación.

- La migración post apilamiento fue seleccionada como la mejor al momento de ser comparada con la migración pre apilamiento, en este caso, debido al mayor tamaño del volumen apilado, fue posible migrar mayor volumen de datos, generando una imagen sísmica más continua al contrastarla con la migración del sub volumen pre apilamiento. Adicionalmente, los tiempos de cómputo para las migraciones post apilamiento fluctuaron entre los 120 minutos, mientras que la migración pre apilamiento del sub volumen tardó

2000 minutos en total. Debido a los buenos resultados obtenidos en la migración post apilamiento, en futuros estudios puede ser conveniente aplicarla.

- La apertura cónica con ángulo de 30º produce una imagen sísmica con menos ruido y efectos de borde al ser comparada con la apertura cilíndrica que emplea un ángulo de 90º.

- Fue posible suavizar el modelo de velocidad en Focus sin tener los gathers en el pre apilamiento, generando una imagen más continua del subsuelo en tiempos mayores a los tres segundos.

- La comparación entre el apilado sin migración y el apilado con migración de Kirchhoff 3D en tiempo post apilamiento, usando los parámetros óptimos de 30º y 3000 metros de apertura, confirmó la eficiencia de aplicar dicho algoritmo en el dato sísmico, optimizando la veracidad de la imagen sísmica al lograr colapsar con éxito las difracciones causadas por estratos buzantes, fallas geológicas, relación señal ruido, falta de continuidad de reflectores, entre otros.

- Con la finalidad de comparar una imagen más extensa, donde se encuentren mayor cantidad de estructuras geológicas, se recomienda aplicar la migración de Kirchhoff 3D pre apilamiento en tiempo a todo el volumen sísmico y no al sub volumen utilizado en la investigación.

- Se recomienda aplicar el algoritmo de migración de Kirchhoff 3D en tiempo en datos con mayores buzamientos con el fin de comprobar su efectividad en geología más compleja y compararlo con los resultados obtenidos en esta investigación.

- Se recomienda correlacionar la imagen sísmica con registros de pozo para generar un modelo de velocidad real del subsuelo, de esta manera se puede realizar migración de Kirchhoff 3D en profundidad, facilitando futuras interpretaciones al momento de ubicar rasgos geológicos en el subsuelo.

- Al ser suministrados los *gathers* correspondientes a los *inline*(982 - 1217) y *crossline*(3 - 460), no fue posible realizar un nuevo análisis de velocidad en todo el volumen sísmico correspondiente a los *inline* (2 - 1217) y *crossline* (3 - 1282), por ende, se recomienda en un futuro ajustar el modelo de velocidad RMS de todo el volumen sísmico mediante el análisis de velocidad de los *gathers*, de esta manera puede compararse el cubo de velocidad obtenido mediante el *picking* en el pre apilamiento y los cubos de velocidad suavizados en el post apilamiento.

- Se recomienda aplicar otro algoritmo de migración al volumen sísmico con el propósito de comparar el desempeño de la migración de Kirchhoff 3D en tiempo.

REFERENCIAS

Bancroft, J. (2007). A practical understanding of pre and poststack migration. Society of exploration geophysicists. Tulsa, Oklahoma, U.S.A.

Cabello, Y. (2007).Análisis de velocidad en un medio anisótropo de tipo VTI para ondas PP y PS. Tesis de grado. USB, Caracas.

Cordsen, D., Galbraith M. and Peirce, J. (2000). Planning Land 3-D Seismic Surveys. Geophysical Developments series No.9.Society of Exploration Geophysicists.

De Toni, B. (1995). *Eventos y Estilos Tectónicos de la cuenca Barinas-Apure*.

Dobrin, M. y Savit, C. (1988). *Introdution to Geophysical Prospecting.* McGraw-Hill International Editions. Singapore

Feo Codecido, G. (1972). Contribución a la estratigrafía de La Cuenca de Barinas-Apure. Mem., *IV Congreso Geológico de Venezuela.*

Figueroa, L., E., Gil, A., Daal y H., Peraza. (1994). Análisis Estructural-Estratigráfico del Área de Barinas Norte (Cuenca de Barinas) y su importancia en la Exploración de Hidrocarburos. *Memorias de V Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*. Puerto La Cruz, Venezuela.

Gadallah, M. y Fisher, R. (2009). *Exploration Geophysics, An Introduction*. Springer. Deblik, Berlín.

González de Juana, C., J. Iturralde de Arozena y Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas.* Foninves, Caracas, Venezuela.

Gupta, H. (2011). *Encyclopedia of solid earth Geophysics*. Springer. Hyderabad, India.

Hubral, P. y Krey,T. (1980). Interval velocities from seismic reflection time measurements. Western Geophysical Company. Houston, Texas.

Kearey, P., Brooks, M. y Hill, I. (2002). An introduction to Geophysical Exploration. Oficces.

Kiser, G. (1961). Review of the Cretaceus stratigraphy of the soutwest Barinas mountain front. *Asoc. Venez. Geol., Min y Petról.*

Kiser, G. (1989) Electrofacies de Parángula basal y sus equivalentes de la Formación Carbonera, Cuenca Apure-Barinas. VII Congreso Geológico Venezolano, 1989, Memoria Tomo I.

Notestein, F., Hubman, C., y Bowler, J. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America, *Geol. Soc. Am.*

Parnaud, F., Gou, Y., Pascual J., M., Capello, Y., Truskowinski y Passalcqua, H. (1995). Stratigraphic sintesis of Western Venezuela. AAPG, memoir 62.

PDVSA (1997). Léxico Geológico

Pierce, G., (1960). Geología de la Cuenca de Barinas. *Mem. III Congr. Geol. Venez.*

Renz, O., (1959). Estratigrafía del cretáceo en Venezuela occidental. *Bol. Geol.*, Caracas

Salvador, A., (1961). Nomenclature of the Las Piedras and related formations in eastern Venezuela. *Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról.*

Schubert, C., (1968). Geología de la región de Barinas- Santo Domingo, andes venezolanos surorientales. Bol. Geol. Caracas, Venezuela.

Solano, J. (2006). Secuencia de procesamiento convencional hasta migración pre – apilamiento en tiempo del levantamiento sísmico Arecuna oeste 04G – 3D. Proyecto de grado. Universidad Simón Bolívar, Caracas.

Schultz, P. (1998). *The seismic velocity model as an interpretation asset. Society of Exploration Geophysicists.* Tulsa, OK USA.

Sheriff, R. (1991). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics.* Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.

Sheriff, R. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics.* Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.

Sheriff, R. y Geldart, Ll. (1995). *Exploration Seismology.* Cambrisge University Press.

Trump, G., y Salvador, A., (1964). *Guidebook to the geology of western Táchira.* Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról.

Van Andel (1958). Origen and classification of cretaceus, paleocene and eocene sandstones of Western Venezuela. American Asoc. Pet. Geol.

Yilmaz, O. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing Inversion and Interpretation of Seismic Data*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists

ANEXOS

ANEXO A

Instrumento de recolección de información: opinión de expertos

A continuación se muestra la encuesta aplicada a 4 expertos en el procesamiento e interpretación sísmica, cada uno de ellos forjo una opinión acerca de los resultados obtenidos en este trabajo, tomándose en cuentas sus opiniones como profesionales con experiencia en el área de trabajo en la cual se enmarco la tesis de grado.

Universidad Central de Venezuela

Departamento de Geofísica

Trabajo de Grado: " Efectos de la apertura de migración de Kirchhoff en la calidad de la imagen en datos sísmicos 3D terrestres del proyecto Barinas este 07G 3D, Barinas Venezuela"

Bachiller: Gerardo Rumbos

Opinión de Expertos

1.-) Considerando aspectos tales como: colapso de difracciones, relación señal ruido, continuidad de reflectores, definición de fallas y estructuras geológicas, entre otros, ¿ayuda la migración de Kirchhoff 3D en tiempo a mejorar la interpretación de la imagen?

1,A) Imagen sísmica correspondiente al inline 1064 (imagen sin migrar vs migrada)

1,B) Imagen sísmica correspondiente al inline 1088 (imagen sin migrar vs migrada)

2.-) A continuación se presentan dos imágenes sísmicas correspondientes a migraciones efectuadas en dos empresas diferentes:

2, A-) Imagen sísmica Migrada correspondiente al inline 982, CGG Veritas

2, B-) Imagen sísmica migrada correspondiente al inline 982, Tricon Geophysics

Entre las imágenes mostradas, indique en forma argumentada cual considera mas adecuada para ser interpretada:

3 y 4-) A partir de las siguientes imágenes, correspondientes a datos pre y post apilamiento, señale cual de las dos representa la mejor opción para ser seleccionada en una futura interpretación. Argumente su respuesta

3, A-) Migración Pre apilamiento (inline_982_pre_stack)
3, B-) Migración Post apilamiento (inline_982_post_stack)

4, A-) Migración Pre apilamiento (inline_952_pre_stack)
4, B-) Migración Post apilamiento (inline_952_post_stack)

5.-) Luego de realizar pruebas de apertura y ángulo, se seleccionaron los mejores parámetros. Las imágenes mostradas anteriormente se obtuvieron al emplear un ángulo de 30° y apertura de 3000 m., Utilizaría usted estos mismos parámetros u otros? Por que?

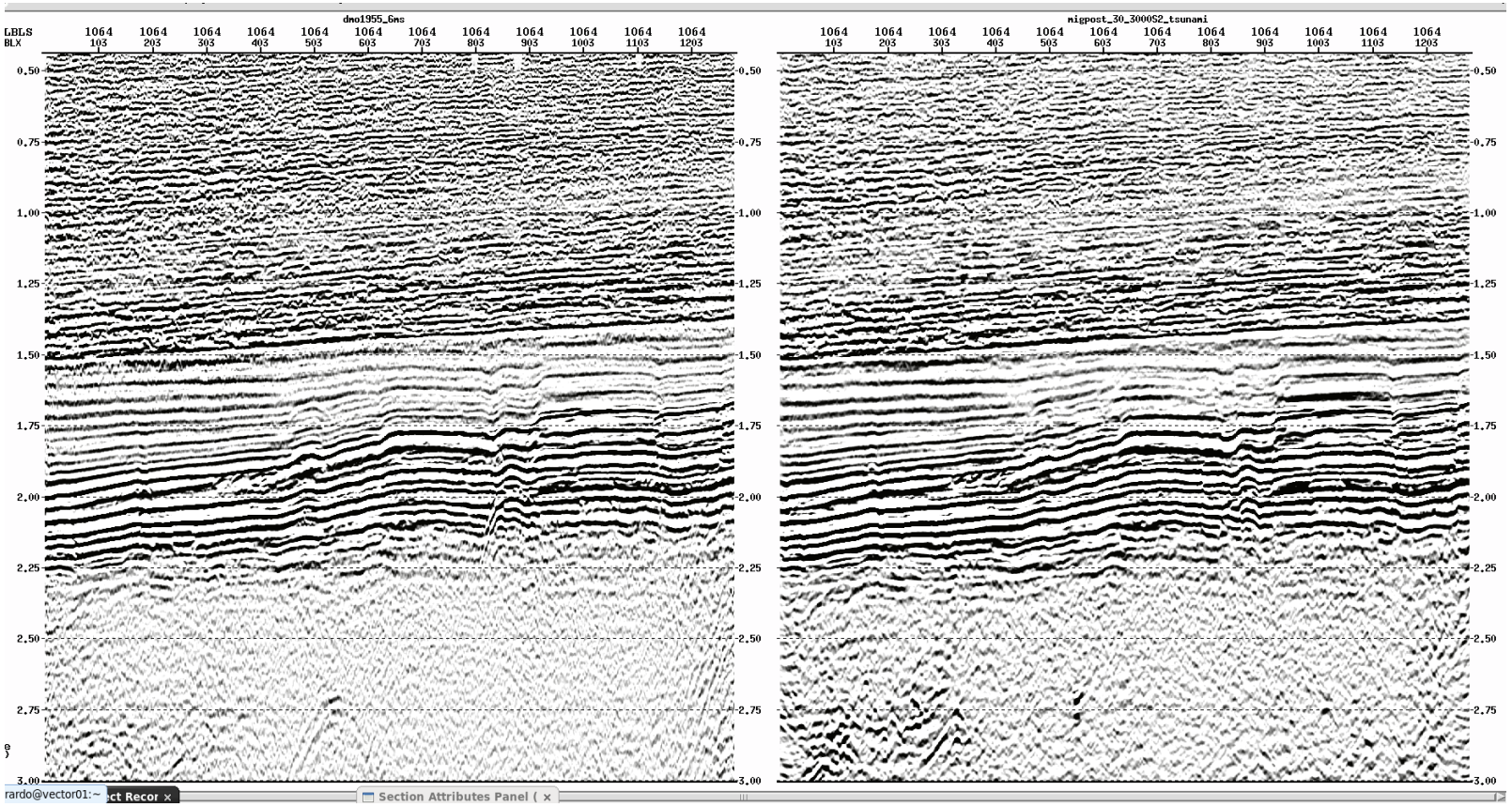
¡Gracias por su aporte!

ANEXO B

Imágenes sísmicas sin migrar vs imágenes sísmicas migradas

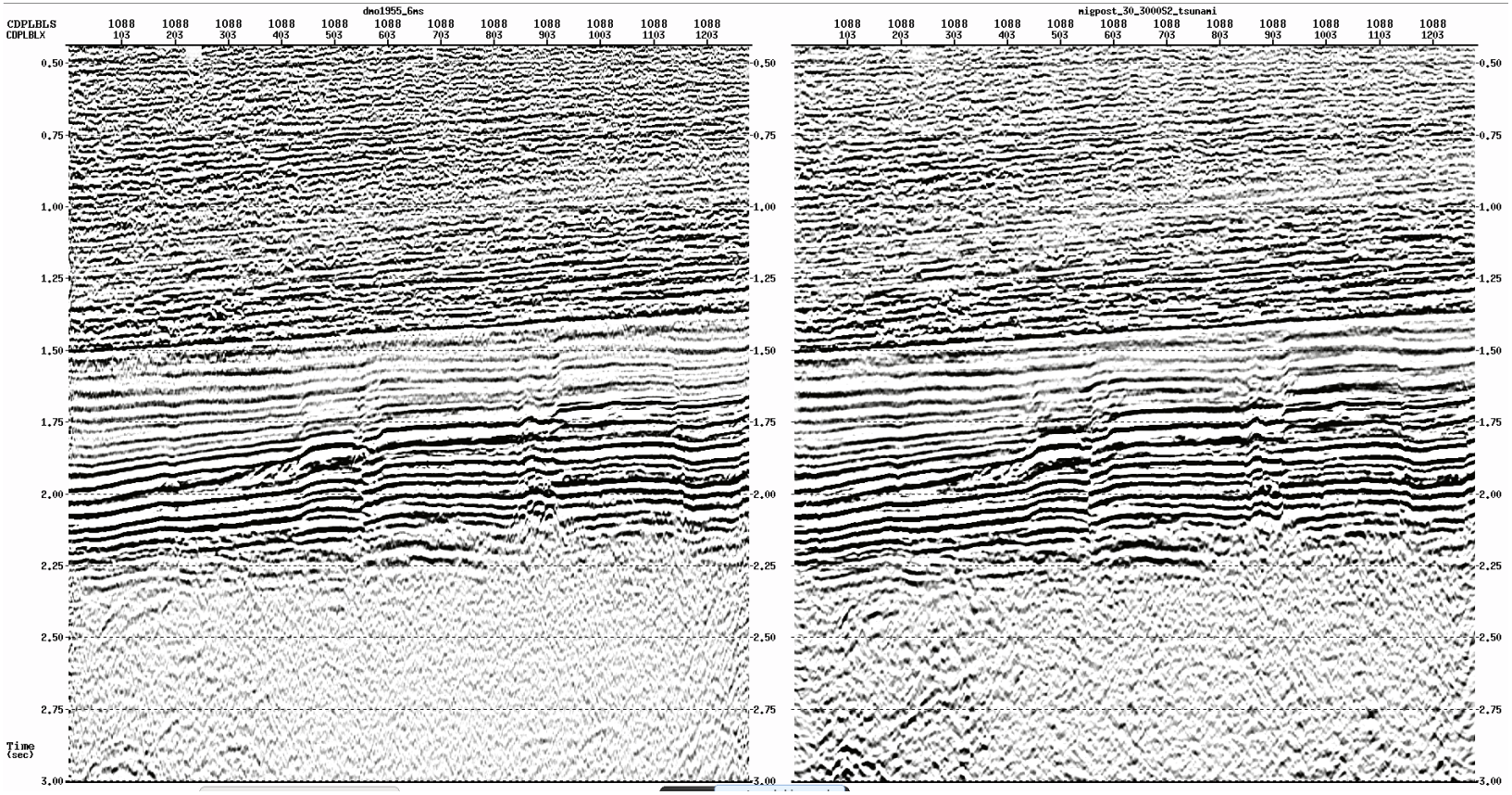
[ANEXO B-1]

[Imagen sísmica, sin migrar vs migrada, correspondiente al inline 1064)]



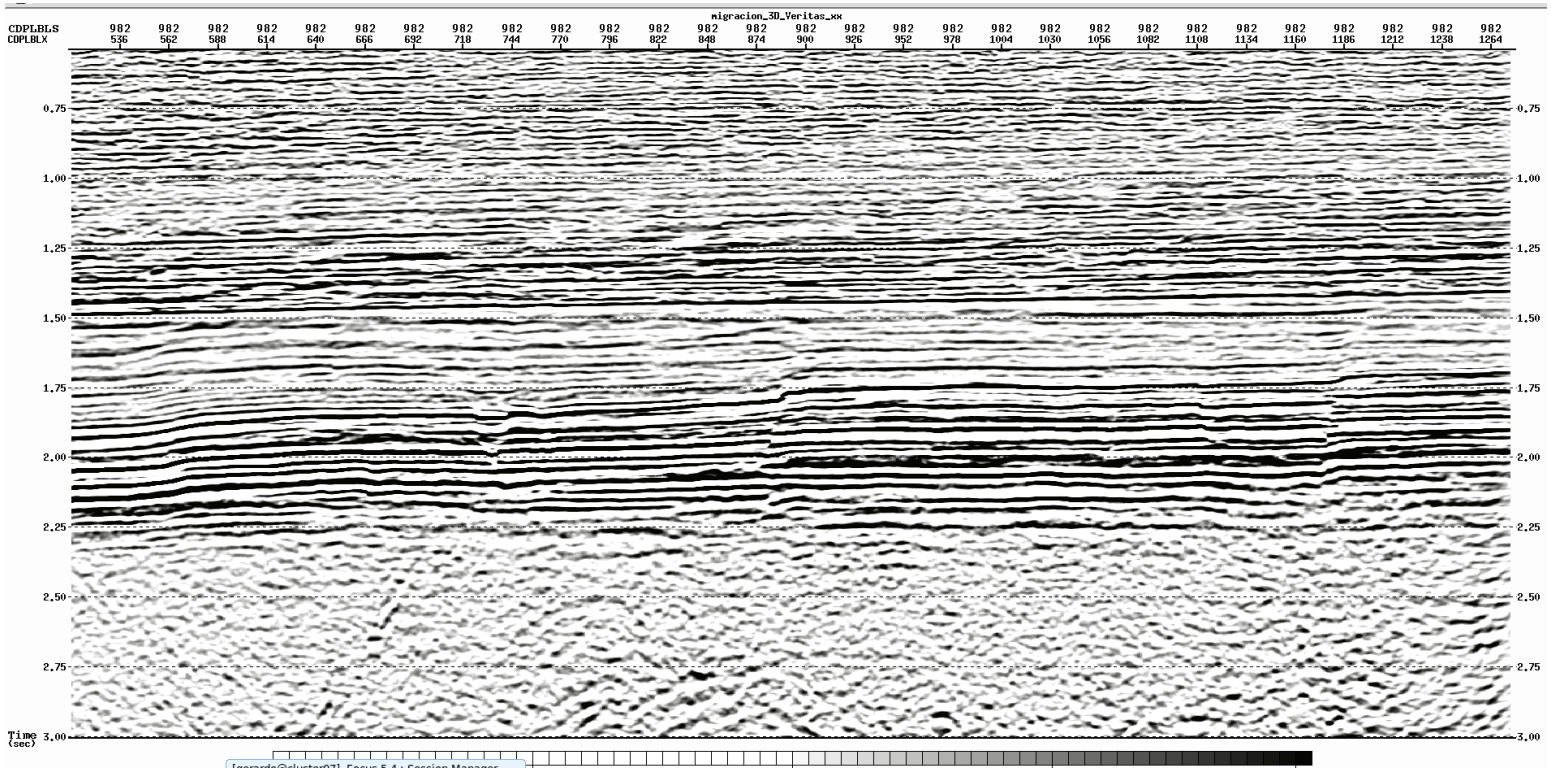
[ANEXO B-2]

[Imagen sísmica, sin migrar vs migrada, correspondiente al inline 1088]



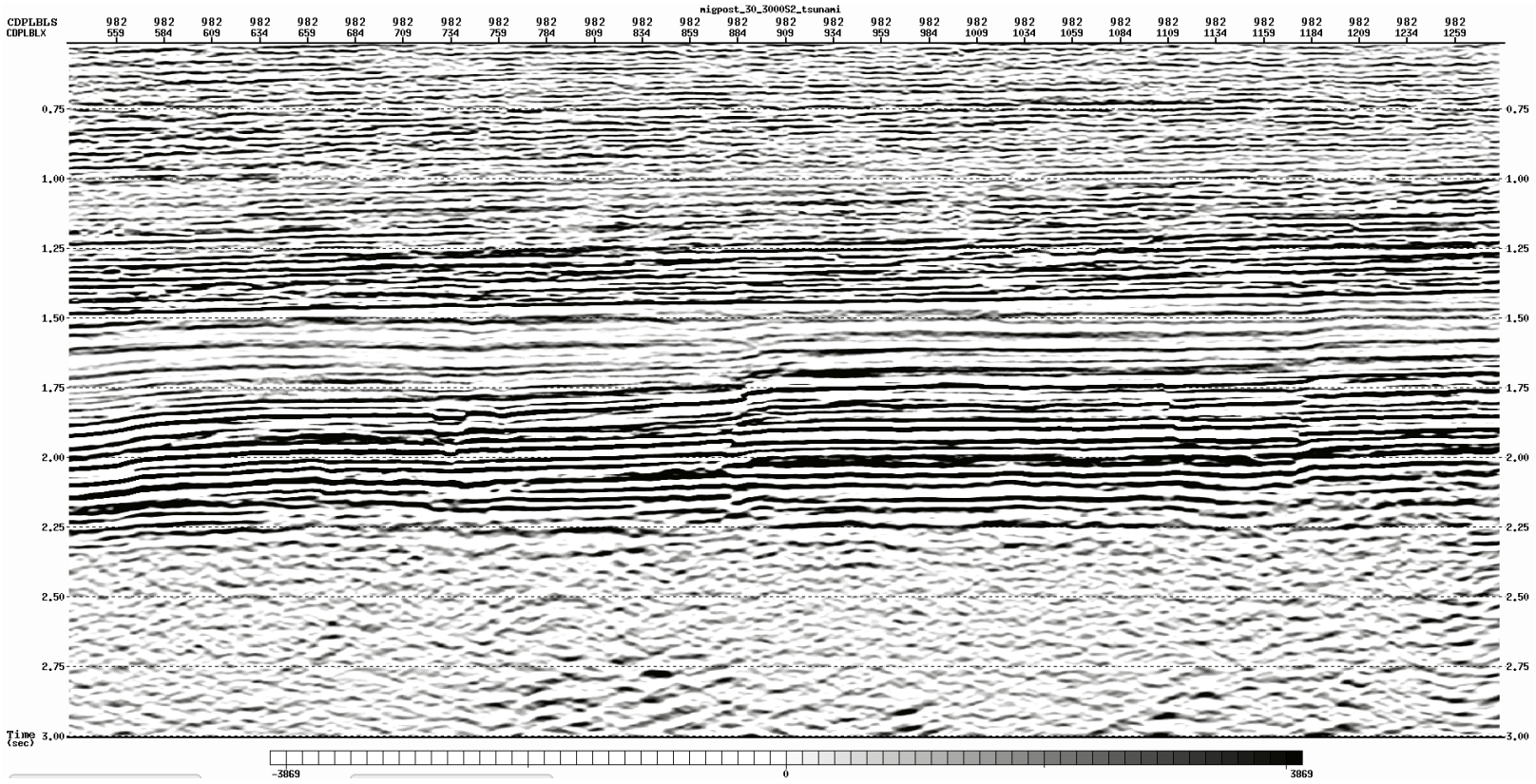
ANEXO C
Imagenes sísmicas migradas correspondientes al inline 982
CGG Veritas -Tricon Geophysics

[ANEXO C-1]
[Imagen sísmica migrada correspondiente al inline 982, CGG Veritas]



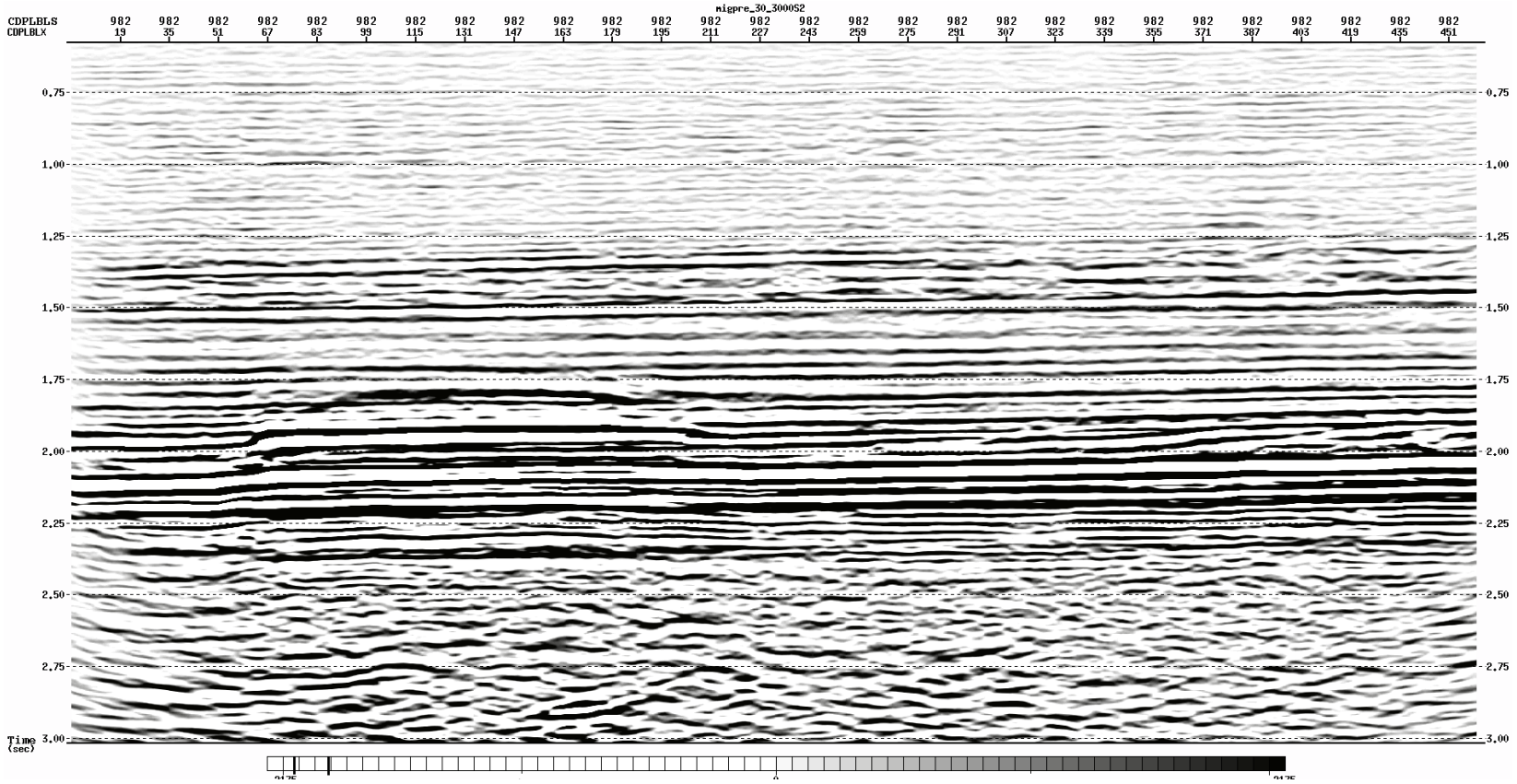
[ANEXO C-2]

[Imagen sísmica migrada correspondiente al inline 982, Tricon Geophysics]

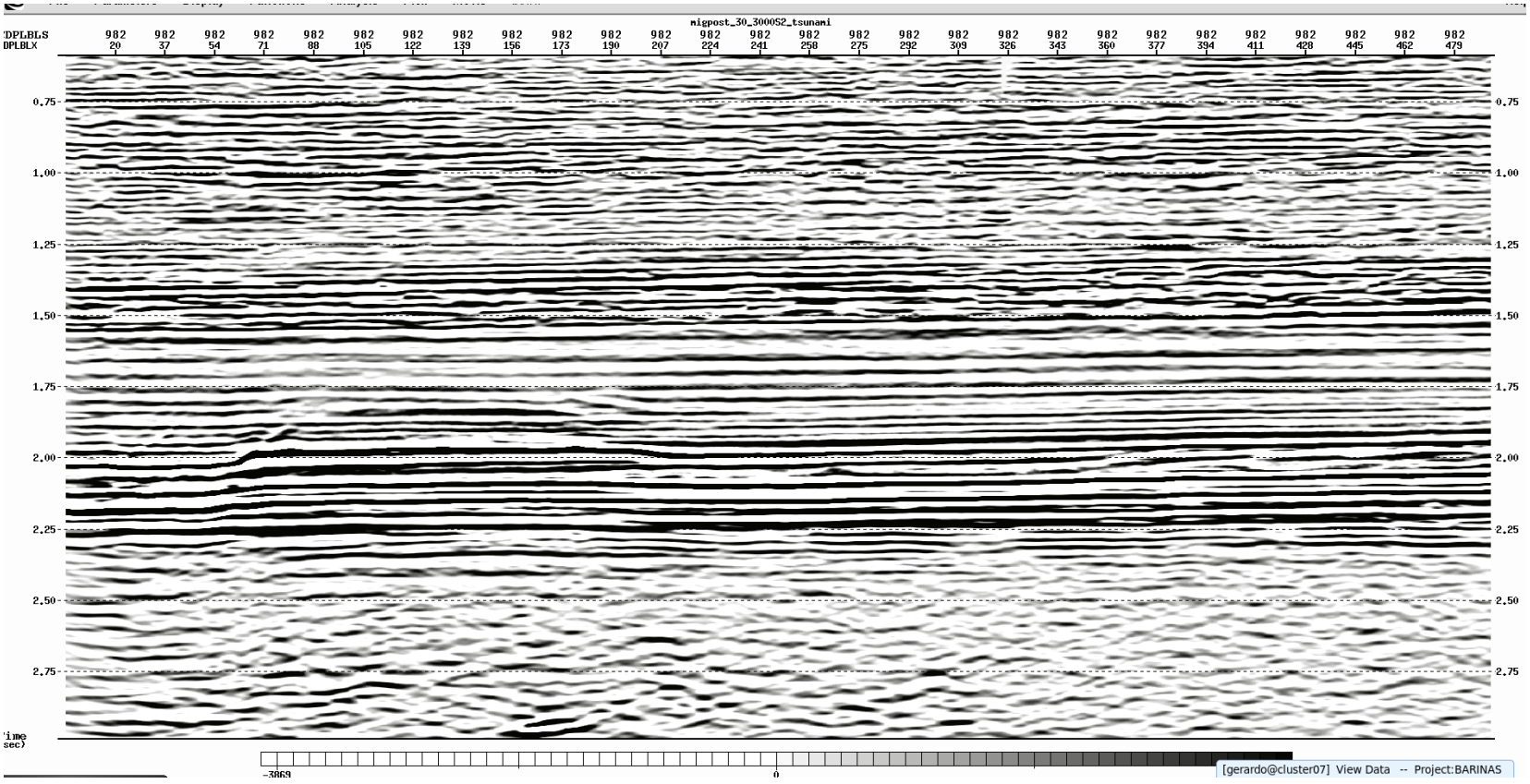


ANEXO D
Migraciones pre y post apilamiento (inline_982)

[ANEXO D-1]
[Migración pre apilamiento (inline_982_pre_stack)]



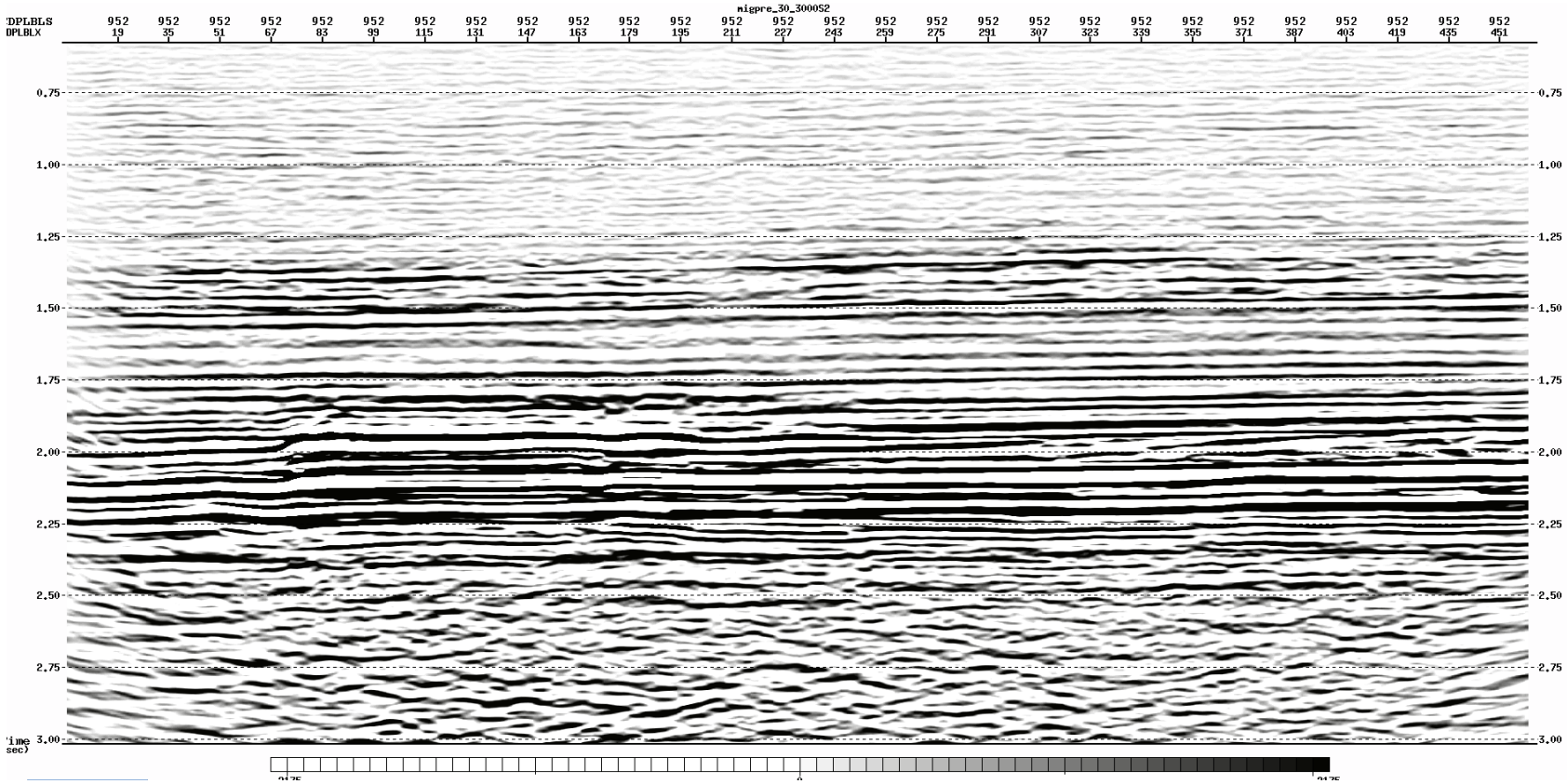
[ANEXO D-2]
[Migración post apilamiento (inline_982_post_stack)]



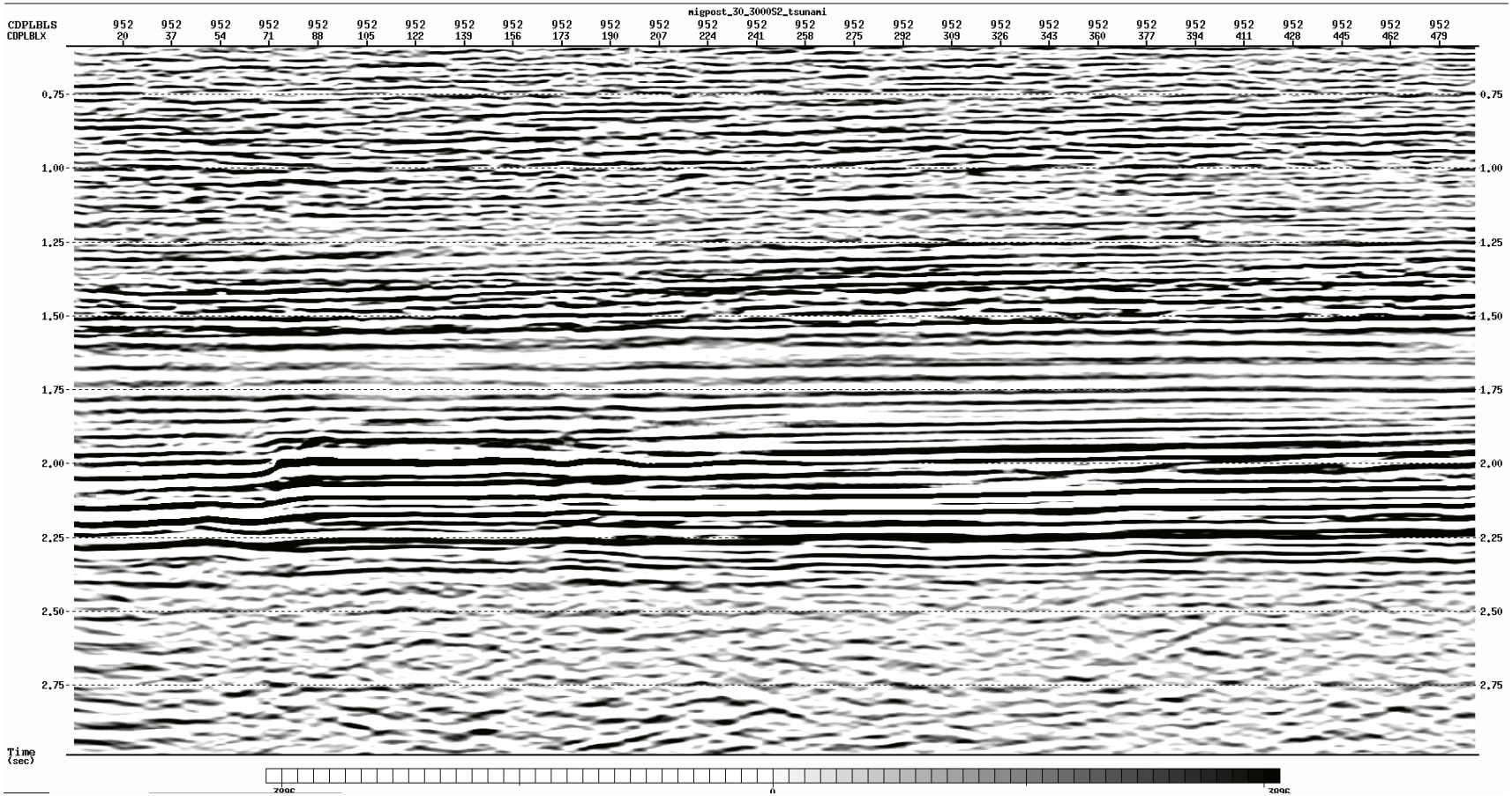
ANEXO E

Migraciones pre y post apilamiento (inline_952)

[ANEXO E-1]
[Migración pre apilamiento (inline_952_pre_stack)]



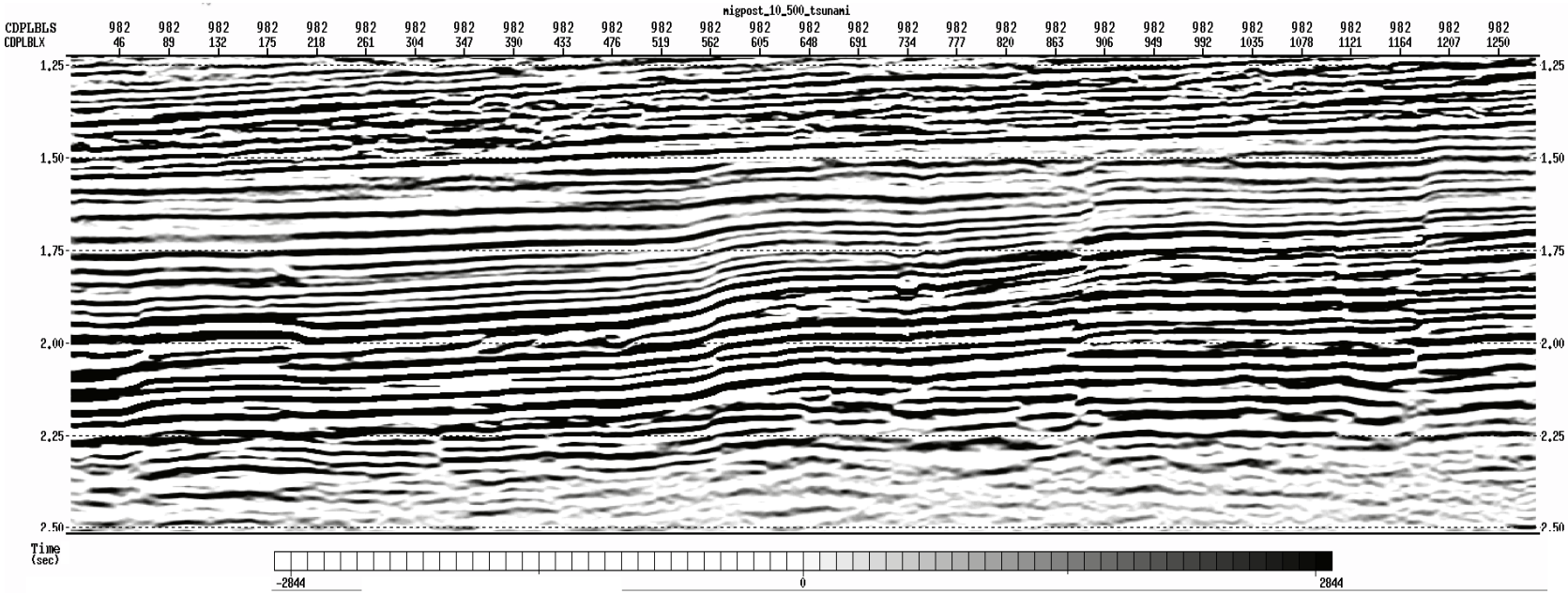
[ANEXO E-2]
[Migración post apilamiento (inline_952_pre_stack)]



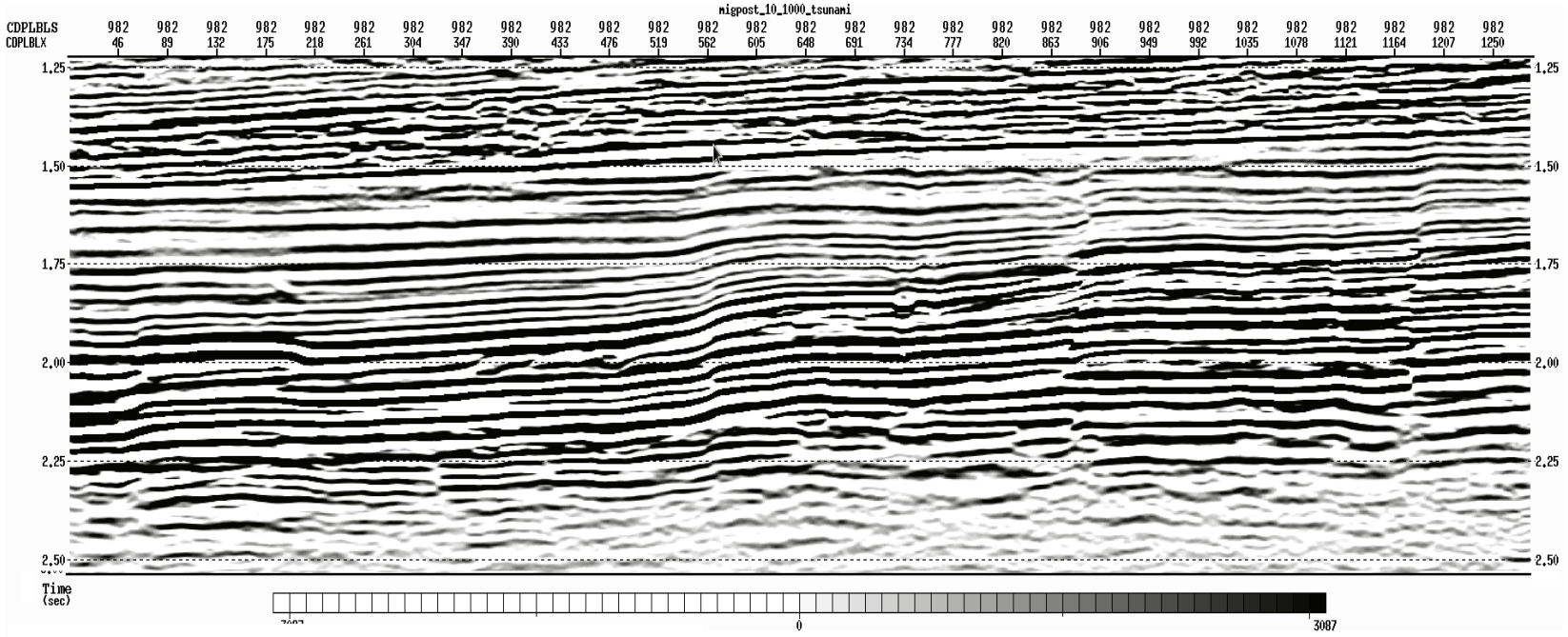
ANEXO F

Imágenes sísmicas del in line 982, de 1,25 a 2,50 s, aplicando diferentes apertura y ángulo

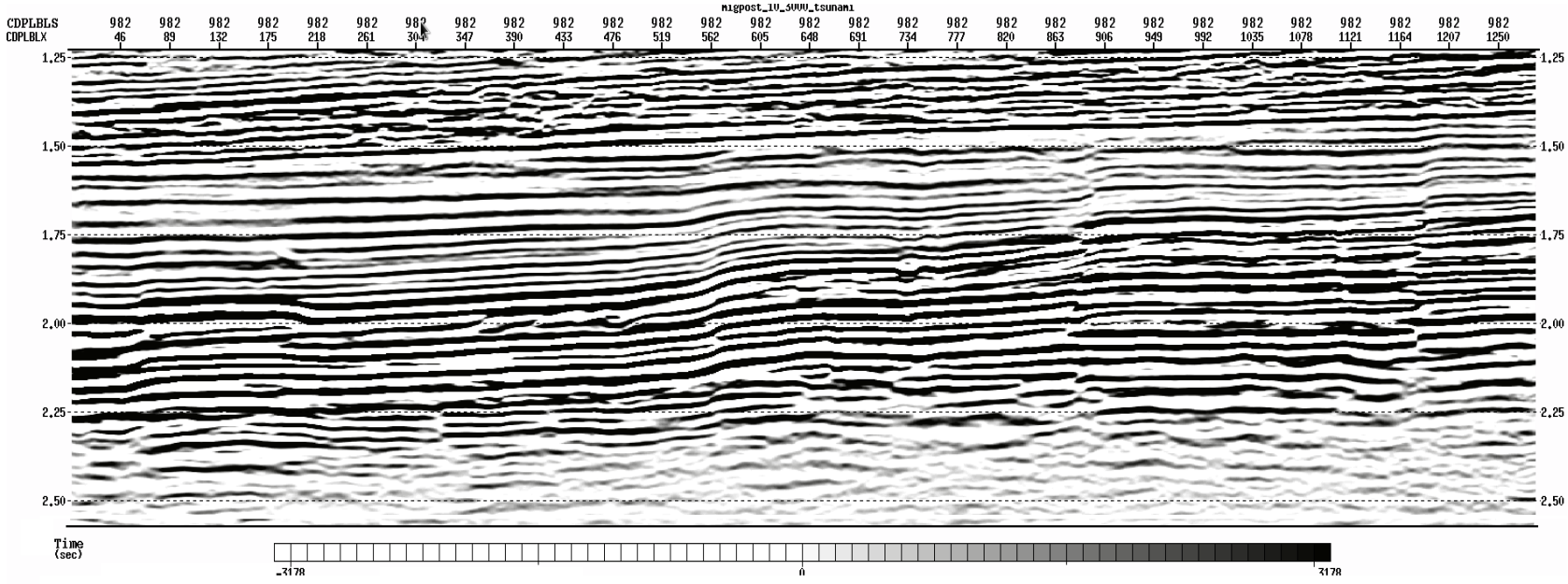
[ANEXO F-1]
[Migración post apilamiento, ángulo= 10°, apertura= 500m]



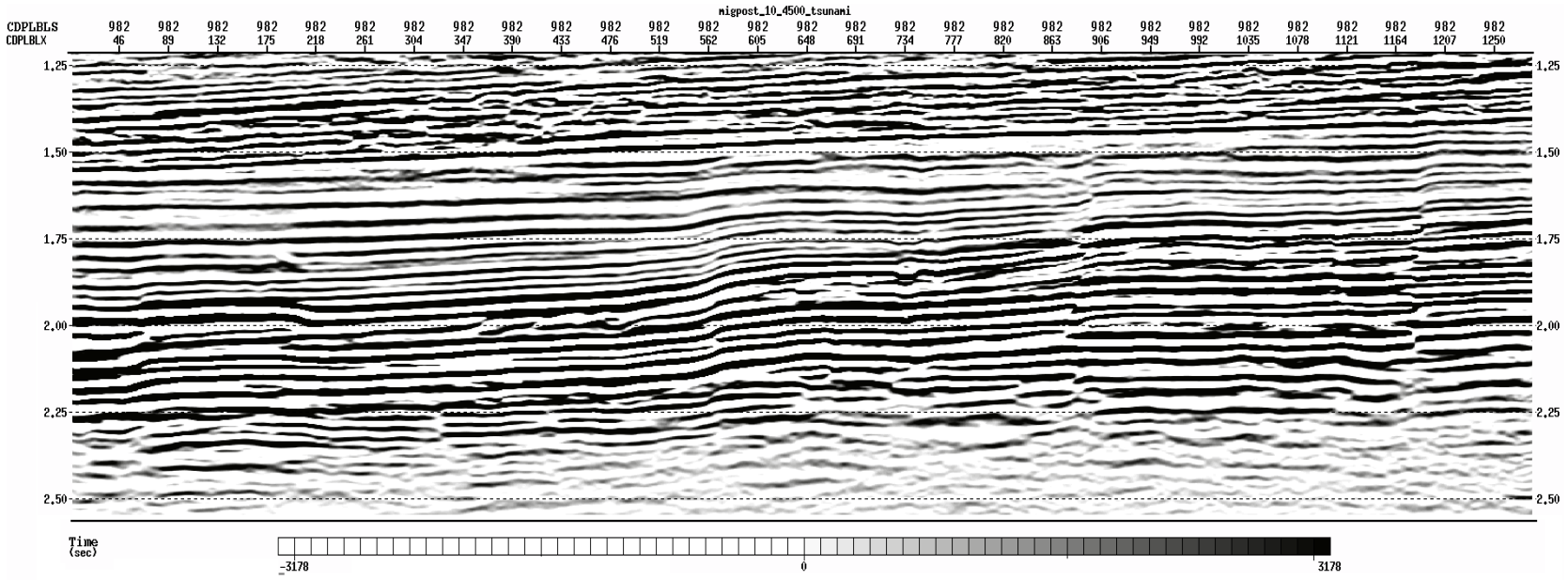
[ANEXO F-2]
[Migración post apilamiento, ángulo= 10°, apertura= 1000m]



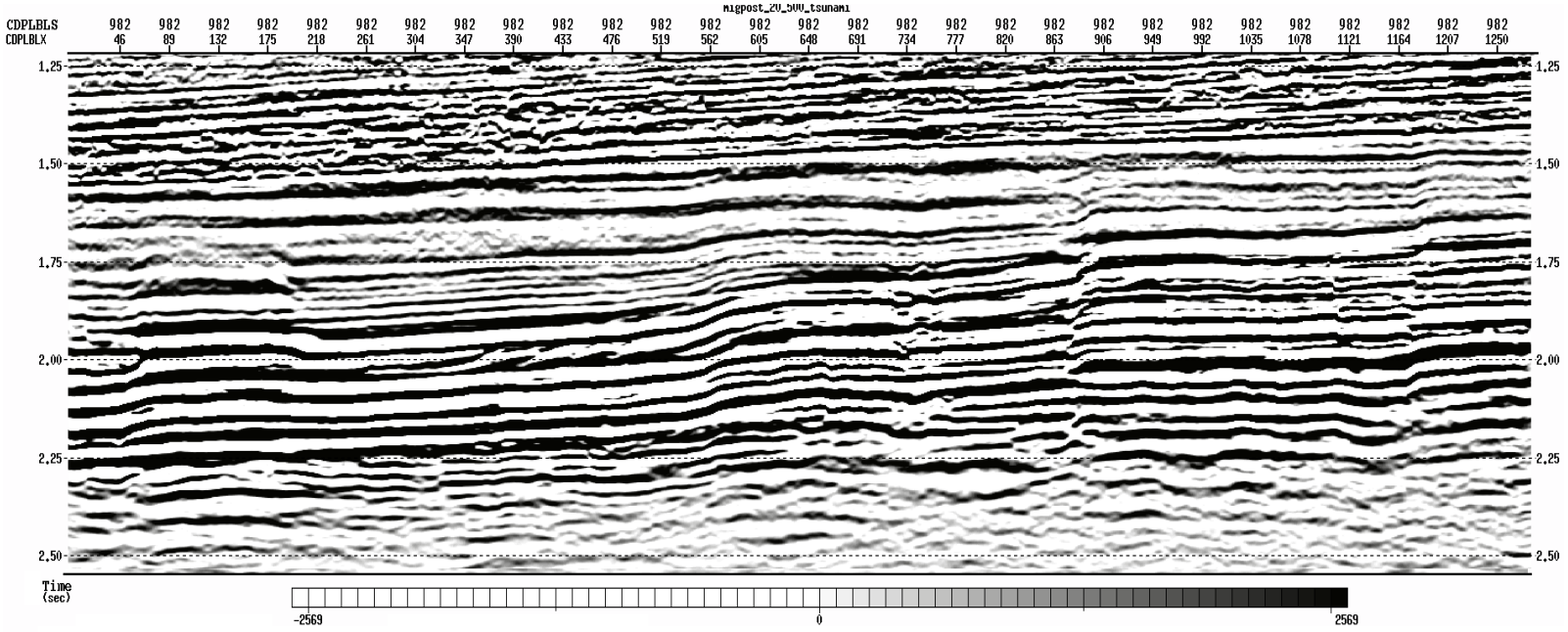
[ANEXO F-3]
[Migración post apilamiento, ángulo= 10°, apertura= 3000m]



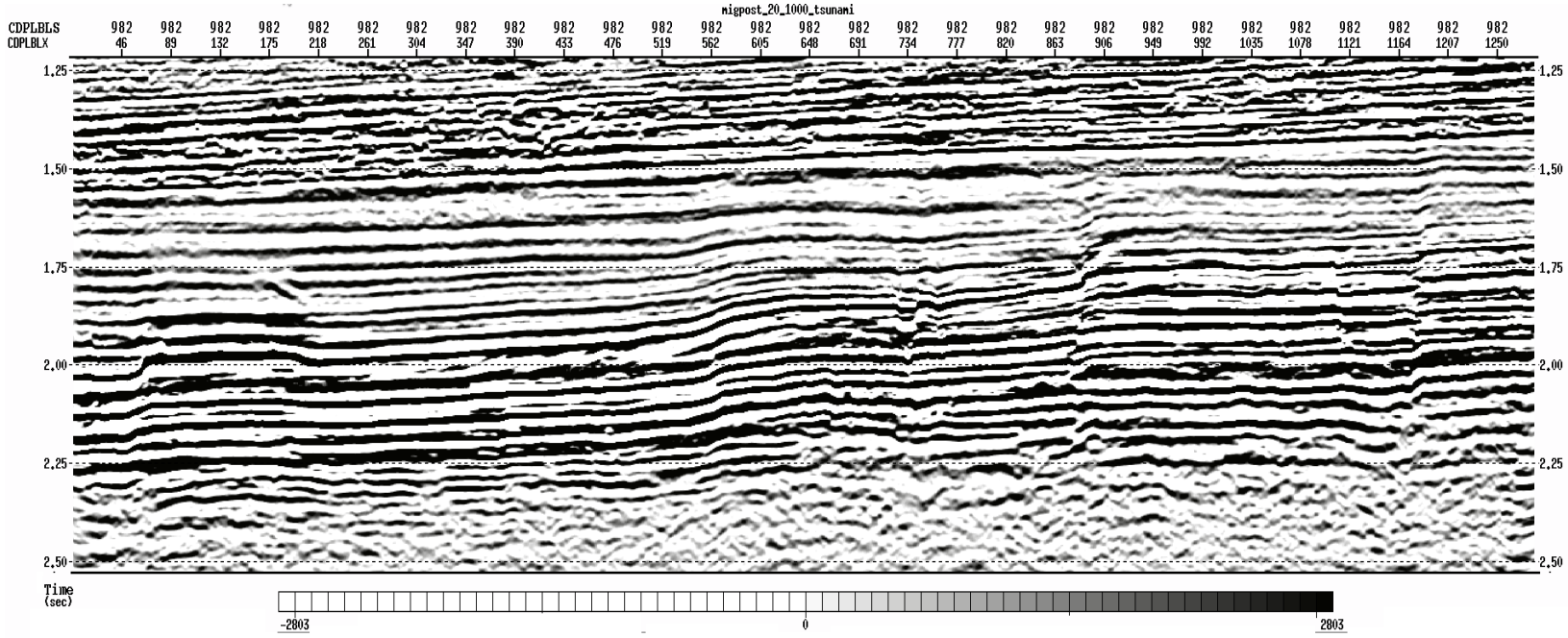
[ANEXO F-4]
[Migración post apilamiento, ángulo= 10°, apertura= 4500m]



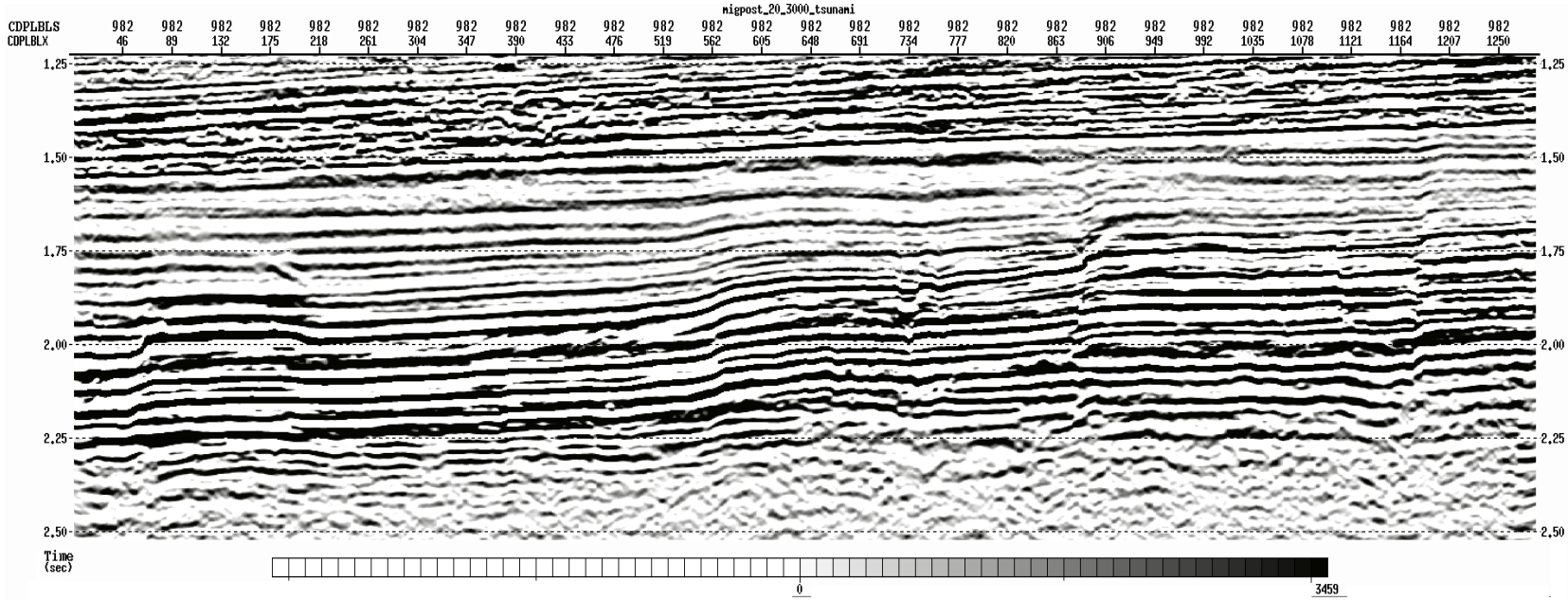
[ANEXO F-5]
[Migración post apilamiento, ángulo= 20°, apertura= 500m]



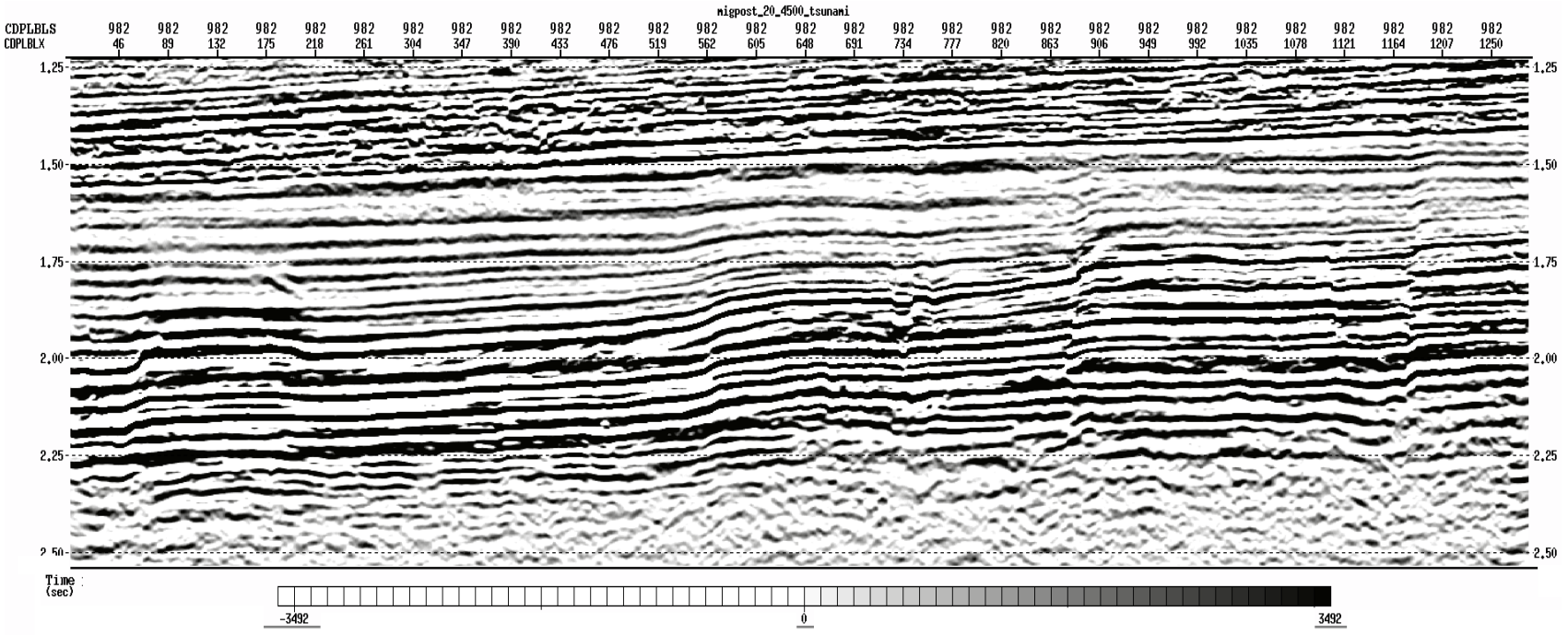
[ANEXO F-6]
[Migración post apilamiento, ángulo= 20°, apertura= 1000m]



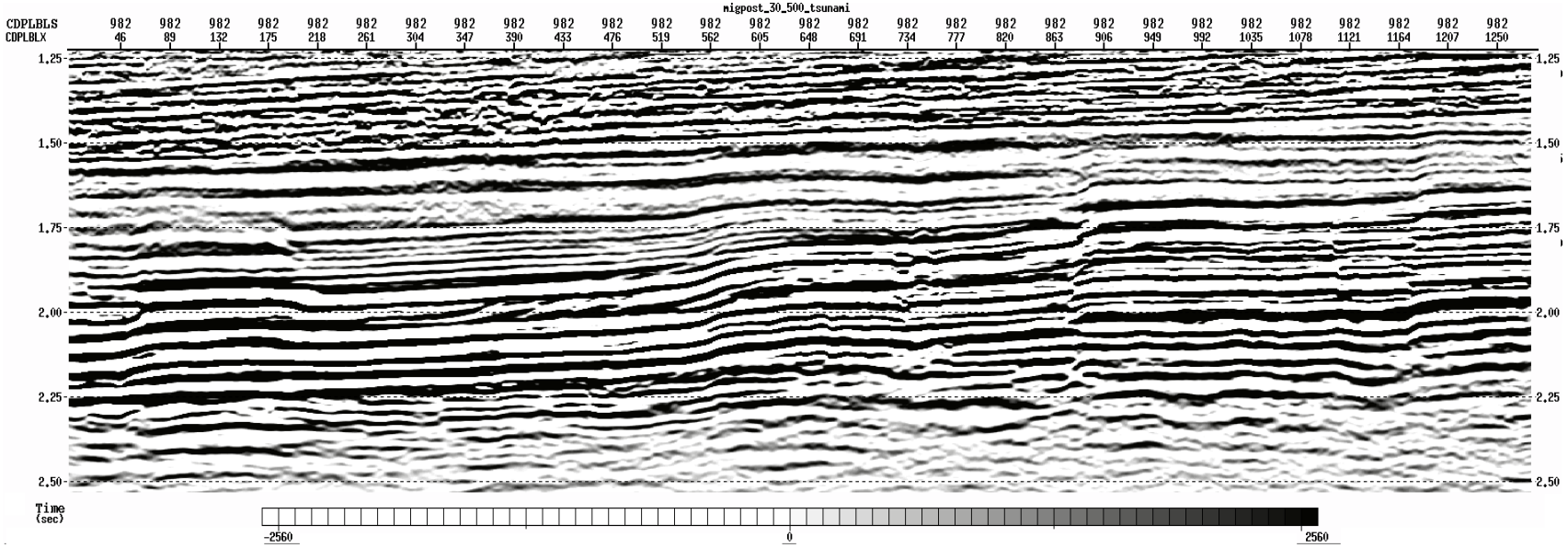
[ANEXO F-7]
[Migración post apilamiento, ángulo= 20°, apertura= 3000m]



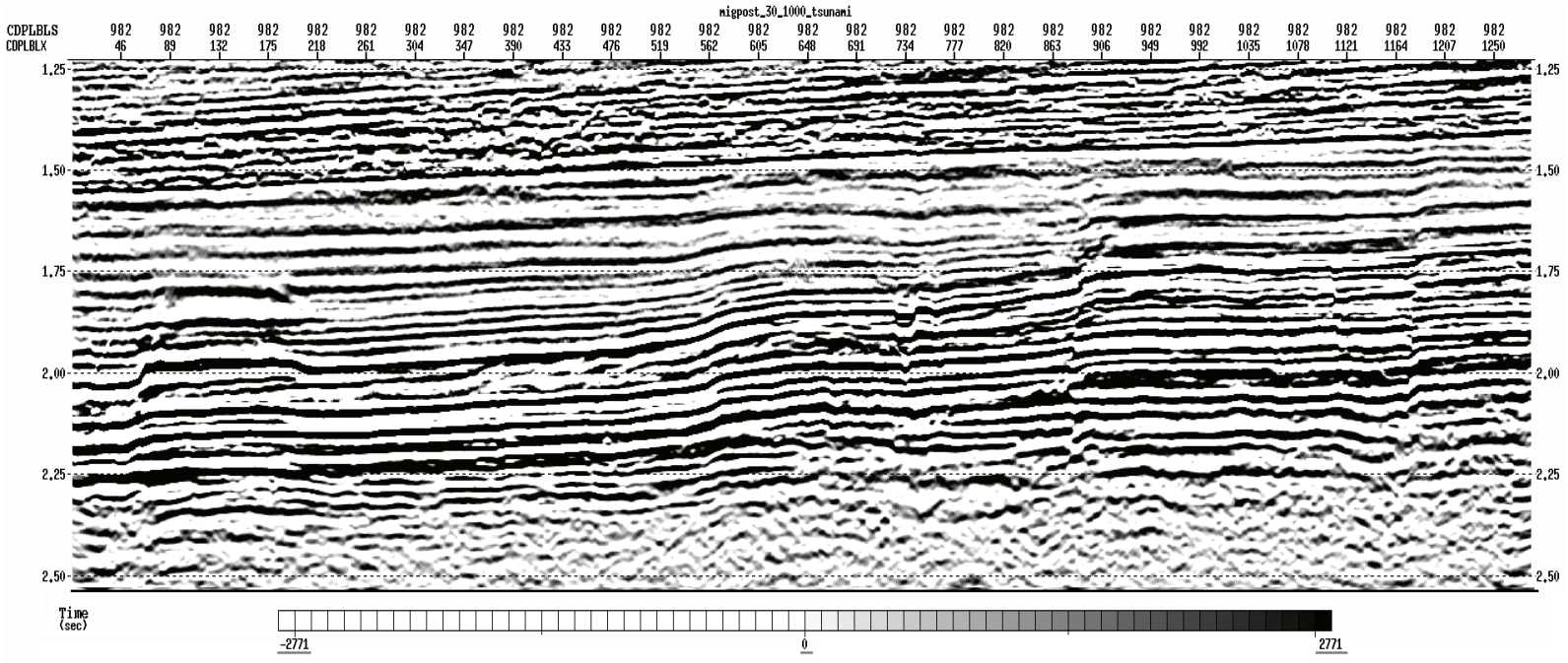
[ANEXO F-8]
[Migración post apilamiento, ángulo= 20°, apertura= 4500m]



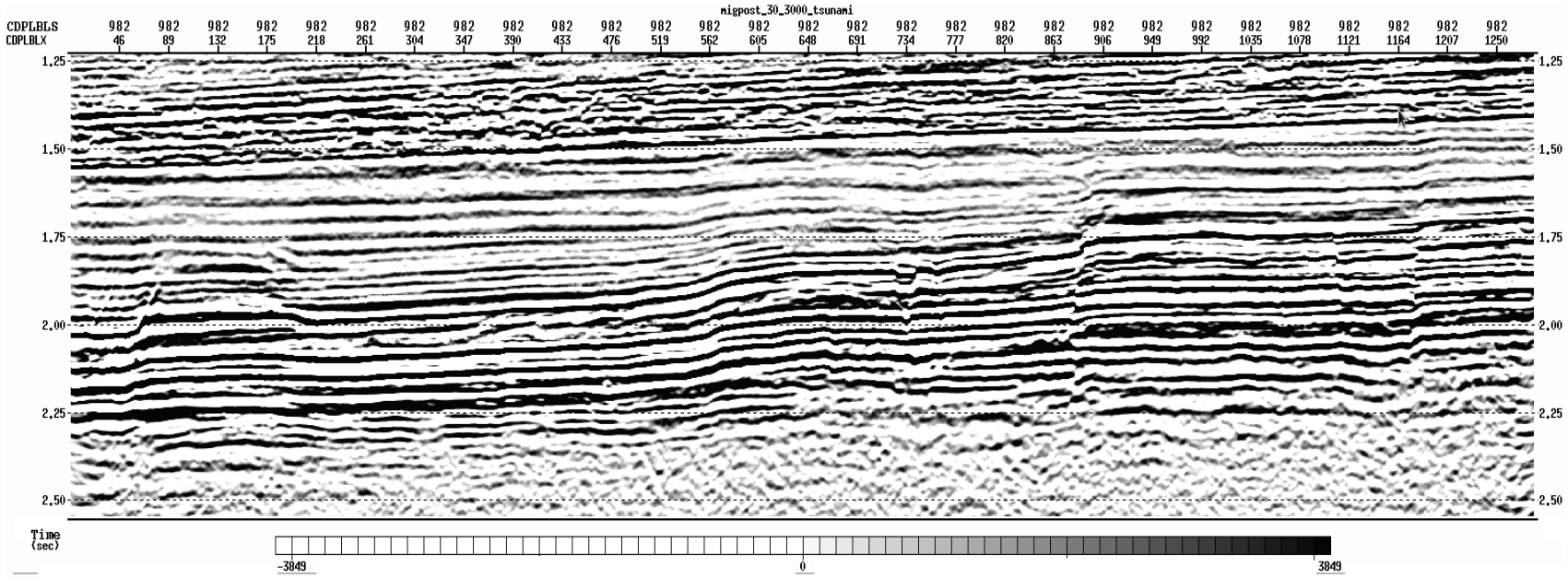
[ANEXO F-9]
[Migración post apilamiento, ángulo= 30°, apertura= 500m]



[ANEXO F-10]
[Migración post apilamiento, ángulo= 30°, apertura= 1000m]



[ANEXO F-11]
[Migración post apilamiento, ángulo= 30°, apertura= 3000m]



ANEXO F-12]
[Migración post apilamiento, ángulo= 30°, apertura= 4500m]