

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**REPROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS
COMPRESIONALES DEL PROYECTO CERRO NEGRO 96B 3D
UBICADO EN EL BLOQUE 5 DEL ÁREA CARABOBO EN LA
FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Sotillo P. Daniel A.
Para optar al título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2016

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

REPROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS COMPRESIONALES DEL PROYECTO CERRO NEGRO 96B 3D UBICADO EN EL BLOQUE 5 DEL ÁREA CARABOBO EN LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

TUTOR ACÁDEMICO: Prof. José Cavada
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Abraham Balaguera

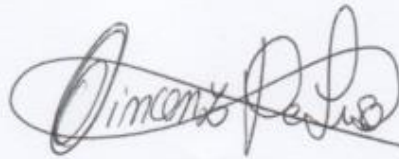
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Sotillo P. Daniel A.
Para optar al título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2016

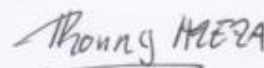
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Daniel Alejandro Sotillo Peña, titulado:

“REPROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS COMPRESIONALES DEL PROYECTO CERRO NEGRO 96B 3D UBICADO EN EL BLOQUE 5 DEL ÁREA CARABOBO EN LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO”

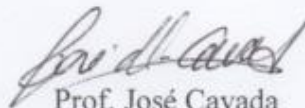
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Vincenzo de Lisa
Jurado



Prof. Ronny Meza
Jurado



Prof. José Cavada
Tutor Académico

DEDICATORIA

A lo más grande ypreciado que Dios me dio...

Mis padres

AGRADECIMIENTOS

A Dios, gracias por darme tanta vida y salud, por cuidar de esas personas que son tan importantes para mí y encaminarme por el buen camino.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, quien abrió sus puertas para que yo pudiese cumplir mis metas. Gracias eternamente.

A mi tutor José Cavada, por ser un ejemplo a seguir y enseñarme tanto durante la carrera. Quien con sus chistes hace amenas las clases, y en su momento, compartía sus conocimientos con mis compañeros y conmigo, siempre teniendo una solución para los problemas. No podría estar más agradecido de la ayuda que me proporcionó durante la realización de mi Trabajo Especial de Grado.

Al Ing. Abraham Balaguera, quien como tutor industrial me apoyó incondicionalmente desde el principio a pesar de no haberme conocido antes. Siempre motivándome a ser mejor y no conformarme con los resultados obtenidos, y además de ello, me enseñó que debemos ver más allá de lo que tenemos como propósito. También, gracias por compartir tus conocimientos aprendidos con estos años de experiencia y con la exigencia que tuviste desde un principio para poder completar este T.E.G.

A los profesores de la U.C.V. quienes me ayudaron a agarrarle amor a la carrera: Juan José Infante, Nuris Orihuela, Vincenzo De Lisa, Michael Schmitz, Andrés Espeso, Jesús González y Antonio Ughi.

A la empresa mixta Petroindependencia S.A. y PDVSA INTEVEP por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

Al Lic. Orlando Contreras por su disposición en todo momento en ayudarme para realizar el reprocesamiento de los datos, transmitió sus conocimientos en el área explicándome cada uno de los procesos que realizábamos y era quien me aconsejaba que debería colocar en mis presentaciones aunque cuando estaba nervioso por presentar resultado. Terminó siendo una gran persona a quien estimo mucho, muchas gracias.

Al Ing. Asdrubal Ovalles por haberme prestado su ayuda siempre que la necesitaba, explicándome reiteradamente los temas para que yo los entendiese cuando no hubiese quien pudiera ayudarme.

A Vanessa Ruíz (Petroindependencia S.A.) por darme su ayuda siempre que la necesitaba y al equipo del CPDG: el señor Enrique, Rubén, Samuel, Yenny, Juan, quienes siempre después de cada presentación sus críticas constructivas permitían mejorar.

A mis padres. Mary Soray Peña de Sotillo y Carlos José Sotillo Peña, su crianza fue lo que me formó en la persona que soy hoy en día. Gracias por su apoyo y amor incondicional, por su eterno sacrificio y preocupación para que nada me faltase y pudiera superarme como persona, ustedes son las personas a las que les debo todo. Los amo profundamente.

A mis hermanos Andrea y Carlos, quienes siempre han sido un reflejo de lo que yo puedo llegar a ser, son mi ejemplo a seguir. Son personas triunfadoras merecedoras de éxitos porque nunca se rinden, siempre podemos llegar a tener nuestras diferencias pero a pesar de eso somos hermanos y no los cambiaría por nada. Los amo muchísimo.

A mis amigos del colegio José Antonio Navia, Victor Meneses y David Oliva; se convirtiendo en mis hermanos a medida que los años pasaron. Hemos estado en las buenas y en las malas, gracias por todo. Siempre estaré ahí para ustedes como ustedes lo han estado para mí.

A mis amigos de la universidad John Petersen, Willdave Brandt, Jorge Román, Oliver De Muzio, Kleibert Díaz, quienes hicieron de la universidad un mundo completamente diferente a estudiar, se comportaron como una familia desde el principio y me quisieron como un hermano menor. Gracias por todo.

A Alejandro Portas, Aaron Gamboa, Christian Christian, Yuniev Martinez y Alan Gamboa quienes se convirtieron en mis otros hermanos, gracias por haber estado siempre ahí muchachos, no puedo pedir mejores amigos de los que la vida me dio. Siempre cuenten conmigo. El mundo no sólo se centró en fiestas sino también en la amistad, jamás les voy a perder ese gran cariño que les he agarrado. Gracias por todo,

hermanos. Un agradecimiento especial al sitio de reuniones del DT: la casa de los Gamboa.

A esos amigos que conocí en el camino y que durante todos estos años hicieron de ésta experiencia de vida algo distinto. Hubo discusiones, risas, preocupaciones, borracheras, caimaneras, entre miles de cosas. Cada uno de ustedes formó parte de algún momento importante en mi vida: Mavi, Johana De Abreu, Katherine S., Nieves, Kerly, Ericka, Bárbara F., Gabriela, Fadhia, Richard, Diego, José M. Rivero, Amarillo, Julio, Sebastián, Lisfer, Alejandra O., Diorlen, Kelly, Ángela, Alex, Daniela, Fiorella, Katuska, José Campos, Amaury, Aurora, Dionisio, Henry, Aurora. ¡Gracias!

Sotillo P., Daniel A.

**REPROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS COMPRESIONALES DEL
PROYECTO CERRO NEGRO 96B 3D UBICADO EN EL BLOQUE 5 DEL
ÁREA CARABOBO EN LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO**

Tutor académico: Prof. José Cavada Tutor industrial: Ing. Abraham Balaguera

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería

Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2016, 200p

Palabras claves: Sísmica – Procesamiento de datos, sísmica reflexión, Bloque Carabobo, Faja Petrolífera del Orinoco, deconvolución, migración sísmica - PSTM Kirchhoff.

En el presente trabajo se realizó el procesamiento de datos sísmicos compresionales del proyecto Cerro Negro 96B 3D ubicados en la Faja Petrolífera del Orinoco, en el Centro de Procesamiento de Datos Geofísicos (CPDG) de PDVSA INTEVEP para la empresa mixta Petroindependencia S.A., enfocada en resaltar los rasgos estratigráficos del campo a través de la preservación de amplitudes. La secuencia abarca desde el proceso de asignación de la geometría hasta la migración pre – apilamiento y post – apilamiento en tiempo con sus post – procesos asociados, incluyendo las etapas intermedias, tales como: cálculo de estáticas de refracción, construcción de modelos de velocidades, corrección por divergencia esférica, atenuación de ruido coherente y aleatorio, balanceo de amplitudes, deconvolución, cálculo de estáticas residuales y acondicionamiento de los registros; con sus respectivos controles de calidad. En esas etapas intermedias, los procesos tales como deconvolución, balanceo de amplitudes y estáticas residuales eran consistentes con superficie para incluir el efecto del posicionamiento de fuentes y receptores para realizar las correcciones. Finalmente, a los datos se les aplicó una migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo para reconstruir la imagen sísmica en su verdadera posición. Esto se realizó con la finalidad de resaltar rasgos estratigráficos que no pudieron ser definidos en su reprocesamiento en el año 2005.

ÍNDICE GENERAL

	Página
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación	3
1.4. Ubicación del área de estudio	4
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO	6
2.1. Cuenca oriental de Venezuela	6
2.2. Faja Petrolífera del Orinoco (FPO)	7
2.3. Evolución tectónica de la Faja Petrolífera del Orinoco	8
2.3.1. Paleozoico	9
2.3.2. Jurásico	9
2.3.3. Cretácico	10
2.3.4. Oligoceno	11
2.3.5. Mioceno Temprano	12
2.3.6. Mioceno Medio	13
2.3.7. Mioceno Tardío – Plioceno	13
2.3.8. Pleistoceno hasta la actualidad	14
2.4. Área Carabobo	15
2.4.1. Estratigrafía del área Carabobo	15
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	20
3. Generalidades	20
3.1. Procesamiento de datos sísmicos	20
3.2. Asignación de geometría	22
3.3. Edición de trazas	22
3.4. Correcciones estáticas	23
3.4.1. Estáticas de elevación	24
3.4.2. Estáticas de refracción	25

	Página
3.5. Tipos de estáticas de refracción	28
3.5.1. Estáticas de periodo corto	28
3.5.2. Estáticas de periodo largo	28
3.6. Recuperación de amplitudes	28
3.7. Corrección por divergencia esférica	29
3.8. Correlación	30
3.9. Autocorrelación	30
3.10. Autocorrelograma	31
3.11. Deconvolución	31
3.12. Parámetros para la deconvolución	33
3.12.1. Ventana de diseño	34
3.12.2. Operador de deconvolución	34
3.12.3. Longitud del operador	34
3.12.4. Distancia predictiva o <i>gap</i>	34
3.13. Deconvolución impulsiva	35
3.14. Deconvolución predictiva	35
3.15. Deconvolución consistente con superficie	35
3.16. Ordenamiento por punto medio en común (CMP)	36
3.17. Tipos de velocidades	38
3.18. Análisis de velocidad	39
3.19. Tipos de análisis de velocidad	40
3.19.1. Apilamiento por velocidades constantes (CVS)	40
3.19.2. Análisis t^2-x^2	40
3.19.3. Espectro de velocidad	41
3.20. Corrección <i>normal moveout</i> (NMO)	42
3.21. Semblanza	44
3.22. Enmudecimiento	47
3.23. Apilamiento	47
3.24. Estáticas residuales	48
3.25. Correcciones consistentes con superficie	49

	Página
3.26. Correcciones estáticas residuales consistentes con superficie	53
3.27. Migración	54
3.28. Migración de Kirchhoff	58
3.29. Apertura de migración	61
CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO	64
4.1. Información previa del proyecto	65
4.2. Software utilizado	65
4.3. Carga de la geometría	66
4.4. Revisión de la geometría	70
4.5. Edición de trazas	72
4.6. Cálculo de datum flotante y datum de procesamiento	73
4.7. Construcción: 1er modelo de velocidades	76
4.8. Cálculo de las estáticas de refracción	79
4.9. Construcción: 2do modelo de velocidades	84
4.10. Corrección por divergencia esférica	86
4.11. Filtrado de ruido coherente y aleatorio	87
4.12. Balanceo de amplitudes – 1er paso	94
4.13. Deconvolución	98
4.14. 1er paso – Estáticas residuales (consistentes con superficie)	101
4.15. 2do paso – Balanceo de amplitudes (balanceo residual)	105
4.16. 2do paso – Estáticas residuales (no consistentes con superficie)	107
4.17. Construcción: 3er modelo de velocidades	109
4.18. Acondicionamiento de los registros	110
4.19. Migración de Kirchhoff antes del apilamiento en el dominio del tiempo	113
4.20. Migración de Kirchhoff después del apilamiento en el dominio del tiempo	
4.21. Post – procesos y producto final	118
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS	122
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	184
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	194

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación del área del proyecto, bloque 5, Petroindependencia S.A. – campo Carabobo	5
Figura 2. Provincias geológicas de Venezuela	6
Figura 3. Ubicación de la Faja Petrolífera del Orinoco	7
Figura 4. Mapa de rasgos estructurales de la FPO	8
Figura 5. Configuración geológica de la FPO durante el Paleozoico	9
Figura 6. Configuración geológica de la FPO durante el	10
Figura 7. Configuración geológica de la FPO durante el Cretácico	11
Figura 8. Configuración geológica de la FPO durante el Oligoceno al Mioceno Temprano	12
Figura 9. Configuración geológica de la FPO durante el Mioceno Temprano	12
Figura 10. Configuración geológica de la FPO durante el Mioceno Medio al Tardío	13
Figura 11. Configuración geológica de la FPO desde el Mioceno Tardío hasta el Plioceno	14
Figura 12. Configuración geológica desde el Pleistoceno hasta la actualidad	14
Figura 13. Corte esquemático de S – N dentro del área Carabobo	15
Figura 14. Columna estratigráfica tipo para el área Carabobo	16
Figura 15. Secuencia básica de procesamiento	21
Figura 16. Ejemplo de un tiro de campo (a) en el que se observan trazas con alto contenido de ruido que deben ser eliminadas (b) en la etapa de edición	23
Figura 17. Registro sísmico donde (a) representa el efecto de la topografía en los tiempos de viaje de la onda y (b) la aplicación de estáticas de elevación llevando los tiempos de viaje a un datum fijo	24
Figura 18. Representación de un modelo de correcciones estáticas cuando los disparos se encuentran debajo de la capa no consolidada	25
Figura 19. Registro de disparos que exhibe la onda directa y refractada, y la geometría asociada a las llegadas de la onda refractada	27
Figura 20. Comportamiento de las amplitudes en función del tiempo	29
Figura 21. Modelo convolucional, (a) ondícula de la fuente (b) respuesta impulsiva del subsuelo (c) ruido ambiental (d) sismograma grabado	33

Figura 22. Trayectoria de rayos asociado con un registro agrupado por CMP ubicados en un punto medio común definido a través de las coordenadas del punto medio y la distancia fuente - receptor	37
Figura 23. Análisis de velocidad $t_2 - x^2$ aplicado a un gather sintético	41
Figura 24. Espectro de velocidad de un registro agrupado por punto medio común	42
Figura 25. Tendido sísmico con registro sísmico respectivo para una capa plana	43
Figura 26. (a) CMP gather representando un solo evento (b) CMP gather corregido por NMO usando la velocidad NMO apropiada (c) CMP gather sobre corregido debido al uso de una velocidad NMO baja (d) CMP gather subcorregido debido al uso de una velocidad NMO alta	44
Figura 27. Registro sintético agrupado por punto medio en común (a) y (b) semblanza convencional	45
Figura 28. Apilado de trazas para un mismo CMP	48
Figura 29. CMP gathers de un perfil en tierra, donde (a) representa el perfil sin estáticas residuales aplicadas y (b) representa el perfil con estáticas residuales aplicadas	49
Figura 30. Ubicación de fuentes y receptores; (a) a lo largo de la línea sísmica y (b) en el diagrama de superficie	50
Figura 31. Diagrama de superficie y organizaciones principales de las trazas	51
Figura 32. Estrategias adecuadas de migración según contexto geológico para su aplicación	56
Figura 33. Principio de la migración de Kirchhoff, (a) Una sección cero offset no migrada compuesta de una sola muestra no nula en el centro de la misma. (b) Sección migrada, mostrando que el spike se distribuye en las ubicaciones en los posibles puntos de reflexión	58
Figura 34. Secciones migradas con distintas aperturas de migración (a) apertura angosta	62
Figura 36. Carga del archivo .RPS en la base de datos	67
Figura 37. Carga del archivo .XSP en la base de datos	67
Figura 38. Carga del archivo .SPS en la base de datos	68
Figura 39. Acoplamiento de la información de la base de datos a los registros sísmicos a través del módulo PROSHOT	70
Figura 40. Cobertura del proyecto Cerro Negro 96B 3D	71
Figura 41. Distribución de puntos comunes en profundidad asociado a la geometría de adquisición	71

Figura 42. Revisión de geometría en el disparo 11621	72
Figura 43. Módulo interactivo VELDEF (A) registro ordenado por offset y CDP (B) apilamiento por velocidad constante y (C) semblanza	79
Figura 46. Dromocrónica tiempo – offset de los primeros quiebres	83
Figura 47. Módulo REFSOL para calcular el modelo del refractor a través de la selección de primeros quiebres	84
Figura 49. Separación del cono de ruido de los datos para filtrar únicamente en dicha área del disparo 13513	91
Figura 50. Integración del cono de ruido filtrado al disparo 13513 y aplicación de filtros AMPSCAL y TFCLEAN para atenuación de ruido aleatorio	92
Figura 51. Distribución de energía en un grupo de disparos	94
Figura 52. Mapas de escalares calculados por el módulo SURFAN para (A) receptores y (B) fuentes	97
Figura 55. IL - 600 del cubo piloto tras aplicarse los módulos COHERE y FXY	103
Figura 56. Distribución de la energía con (A) 1er paso de balanceo de amplitudes y (B) 2do paso de balanceo de amplitudes (residual)	106
Figura 57. Parámetros utilizados para la migración de Kirchhoff después del apilamiento en el dominio del tiempo	114
Figura 58. Definición de rango de offsets para estandarizar la cobertura	116
Figura 59. Cálculo de pesos	117
Figura 60. Parámetros utilizados para la migración de Kirchhoff antes del apilamiento en el dominio del tiempo	118
Figura 61. Mapa de elevaciones de las fuentes	123
Figura 62. Mapa de elevaciones de las estaciones receptoras	124
Figura 63. Cobertura del proyecto Cerro Negro 96B 3D	125
Figura 64. IL – 180 del modelo de velocidades regional	129
Figura 65. IL – 600 con estáticas de elevación con su perfil topográfico en dirección S – N	130
Figura 66. IL – 600 con estáticas de refracción con su perfil topográfico en dirección S – N	131
Figura 67. IL – 710 del 2do modelo de velocidades	135
Figura 68. Distribución de las funciones verticales de velocidad para el segundo modelo de velocidad con un incremento de 56 líneas	136

Figura 69. Disparo 13513 con espectros de ganancias asociados (A) antes de aplicar corrección por divergencia esférica (b) después de aplicar corrección por divergencia esférica	137
Figura 70. Disparo 21738 (A) antes de filtrar el registro de disparo (B) después de filtrar el registro de disparo	138
Figura 71. IL – 600 antes de realizar filtrado	140
Figura 72. IL – 600 después de haber sido filtrada	141
Figura 73. Autocorrelograma para el cálculo de escalares del balanceo de amplitudes	143
Figura 74. IL – 600 con balanceo de amplitudes consistente con superficie	144
Figura 76. Autocorrelogramas después de (A) balanceo de amplitudes (B) deconvolución predictiva (C) deconvolución impulsiva	147
Figura 77. IL – 600 después de deconvolución predictiva	148
Figura 78. IL – 600 después de deconvolución impulsiva	149
Figura 79. Análisis de frecuencia de (A) deconvolución predictiva y (B) deconvolución impulsiva	150
Figura 80. IL – 600 con estáticas residuales consistentes con superficie	155
Figura 81. IL – 600 con estáticas residuales consistentes con superficie	156
Figura 82. IL – 600 con estáticas TRIM - 2do modelo de velocidades	157
Figura 83. IL – 598 del tercer modelo de velocidad	158
Figura 84. IL – 598 del modelo anisotrópico del parámetro ETA	159
Figura 85. IL – 600 con estáticas TRIM - 3er modelo de velocidades	160
Figura 86. IL – 600 con estáticas TRIM - 3er modelo de velocidades e integración de parámetro ETA	161
Figura 87. Registros agrupados por CDP antes de realizar acondicionamiento	164
Figura 88. Registros agrupados por CDP después de realizar acondicionamiento (sin función de MUTE aplicada)	165
Figura 89. Velocidades RMS generadas a partir del 3er modelo de velocidades (IL – 567, XL – 91)	166
Figura 90. Funciones de verticales de velocidades residuales interpoladas (IL – 1083, XL – 485)	167
Figura 91. Velocidades RMS integradas con las funciones verticales de velocidad residuales (IL – 1174, XL – 485)	168

Figura 92. Registros agrupados por CDP migrados antes del apilamiento sin funciones de residuos	169
Figura 93. Registros agrupados por CDP migrados antes del apilamiento con funciones de residuos	170
Figura 94. Aperturas de migración de (A) 1600 m, (B) 1200 m, (C) 800 m y (D) 500 m	176
Figura 95. IL – 600 apilada después de aplicar la migración de Kirchhoff post – apilamiento en tiempo sin post - procesos	177
Figura 96. IL – 600 apilada después de aplicar migración de Kirchhoff post – apilamiento en tiempo con post – procesos	178
Figura 97. IL – 600 apilada después de aplicar migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo sin post - procesos	179
Figura 98. IL – 600 apilada después de aplicar migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo con post – procesos	180
Figura 99. Comparación de la IL – 600 reprocesada en el 2005 y 2006 del proyecto Cerro Negro 96B 3D	181
Figura 100. Espectro de frecuencia de (A) volumen sísmico antes de migrar, (B) volumen sísmico migrado después del apilamiento y (C) volumen sísmico migrado antes del apilamiento	182
Figura 101. Espectro de frecuencia del volumen sísmico reprocesado en el 2005 por WesternGeco	183
Figura 102. Comparación de la XL – 408 reprocesada en el 2005 y 2016 del proyecto Cerro Negro 96B 3D	184
Figura 103. Rasgos estructurales en la IL – 315 con post - procesos	185
Figura 104. Corte en tiempo (<i>time – slice</i>) a nivel de basamento con atributo de varianza	186
Figura 105. Corte en tiempo (<i>time – slice</i>) a nivel de basamento con atributo de amplitud RMS	187
Figura 106. Rasgos estratigráficos en la XL – 270 sin post - procesos	188
Figura 107. Corte en tiempo (<i>time – slice</i>) a los 725 ms con atributo de amplitud RMS	189

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Leyenda para las edades geológicas en la evolución tectónica de la FPO	9
Tabla 2. Parámetros de adquisición	65
Tabla 3. Geometría del proyecto Cerro Negro 96B 3D	69
Tabla 4. Disparos eliminados del proyecto Cerro Negro 96B 3D	73
Tabla 5. Parámetros de los módulos HMAP3D y HMATH3D	75
Tabla 6. Parámetros para el diseño de la malla de procesamiento para el 1er modelo de velocidades.	78
Tabla 7. Parámetros para el diseño de la malla de procesamiento para el 2do modelo de velocidades	85
Tabla 8. Parámetros para la corrección por divergencia esférica	87
Tabla 9. Parámetros para el módulo SUPPRES (1)	92
Tabla 10. Parámetros para el módulo SUPPRES (2)	93
Tabla 11. Parámetros para el módulo LFAF (1), (2) y (3)	93
Tabla 12. Parámetros para el módulo AMPSCAL	93
Tabla 13. Parámetros para generar el autocorrelograma a nivel de shot y receptor para el balanceo de amplitudes	96
Tabla 14. Parámetros para realizar la deconvolución predictiva	100
Tabla 15. Parámetros para realizar la deconvolución impulsiva	100
Tabla 16. Parámetros para módulo COHERE y FXY	102
Tabla 17. Parámetros del módulo FILTER	104
Tabla 18. Parámetros para el módulo STAT3D	105
Tabla 19. Parámetros del módulo BALAN	107
Tabla 20. Parámetros para TRIM3D	109
Tabla 21. Parámetros para el diseño de la malla de procesamiento para el 3er modelo de velocidades en el módulo VELDEF y ETADEF	110
Tabla 22. Parámetros para el módulo FILTER	111
Tabla 23. Parámetros para el módulo RADNPAR (1)	112
Tabla 24. Parámetros para el módulo RADNPAR (2)	112
Tabla 25. Parámetros para el módulo COHERE	112
Tabla 26. Parámetros para generar el modelo de velocidades residuales	115

	Página
Tabla 27. Parámetros para los módulos COHERE (1) y COHERE (2)	119
Tabla 28. Parámetros para el módulo GAIN	120
Tabla 29. Parámetros para el módulo BALANCE	121

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Venezuela se encuentra diligente a la intensificación de procesos de estudio y conocimiento de sus reservas petroleras para generar un crecimiento económico sostenible y, a su vez; dejar constar la soberanía nacional sobre dichas reservas. Por ello, yace la importancia de enfocar los conocimientos tecnocientíficos para mejorar la exploración y producción de los hidrocarburos localizados en la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO), delimitada al sur por los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro. La FPO se encuentra dividida en cuatro bloques: Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo, siendo el área a estudiar el bloque 5 de esta última.

Según Yilmaz (2001), en la prospección de hidrocarburos se requiere la identificación y delimitación de estructuras geológicas presentes en el subsuelo que puedan almacenar volúmenes de gas y petróleo. Los estudios y métodos geofísicos de prospección aportan información estructural y estratigráfica del interior del subsuelo, complementados con otros estudios de índole geológica. Uno de los métodos más utilizados con este fin es la sísmica de reflexión, la cual se fundamenta en el estudio de propagación de ondas reflejadas por los estratos presentes en el subsuelo.

La prospección por sísmica de reflexión comprende tres etapas principales: adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos. El procesamiento sísmico consiste principalmente en la evaluación, selección y aplicación de técnicas y algoritmos que incrementen la calidad de los datos para su posterior interpretación geológica. El objetivo del procesamiento sísmico está orientado a resaltar rasgos estratigráficos o estructurales, dependiendo del marco geológico establecido en la cuenca petrolífera a explorar.

Hasta ahora, el procesamiento sísmico realizado en la mayoría de los campos de la FPO, ha sido enfocado a dilucidar estructuras; sin embargo éste, no ha permitido resaltar a cabalidad la complejidad geológica estratigráfica presentes en los yacimientos de esta zona al no vincular el procesamiento de los datos sísmicos con la preservación relativa de las amplitudes de las ondas reflejadas y a su vez, impidiendo visualizar anomalías acústicas y elásticas del medio, producto de esos cambios laterales y verticales de los distintos sedimentos acumulados.

Uno de los principales problemas que presenta el volumen sísmico 3D del área de Cerro Negro, es que se desconoce el flujo de procesamiento aplicado, al revisar el histórico que dejó la operadora Cerro Negro, se puede observar que hubo varios procesamientos sísmicos de los mismos datos para diferentes necesidades. El volumen con el cual se ha venido trabajando se desconoce de dónde salió. Esto dificulta la caracterización geológica-estratigráfica del medio.

En virtud que dicho procesamiento sísmico ejecutado hasta el momento, de escaso aporte estratigráfico, no proporciona valores reales roca-fluido del medio, siendo ficticios los contrastes de propiedades acústicas y elásticas, es por lo cual surge la oportunidad de realizar este trabajo especial de grado con el propósito de aplicar un reprocesamiento de datos sísmico compresionales, preservando la relatividad de las amplitudes, con el fin de establecer parámetros apropiados que resalten rasgos estratigráficos presentes en la zona de estudio.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Reprocesar los datos sísmicos compresionales del proyecto Cerro Negro 96B 3D con la intención de resaltar rasgos estratigráficos, mediante la preservación de amplitudes y la incorporación de nuevos datos geológicos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar y organizar la correspondencia existente entre los archivos que contienen la geometría del levantamiento (.SPS) con los archivos de registro de los disparos (SEG-D).
- Aplicar las correcciones estáticas (elevación, refracción y residuales) para mitigar los efectos de las variaciones topográficas y, a su vez, variaciones laterales de la capa meteorizada, dado la profundidad somera del objetivo geológico.
- Fijar el modelo de velocidades cuadráticas medias (RMS) que permita horizontalizar los reflectores, asociados a eventos geológicos de interés.
- Filtrar el ruido coherente y aleatorio para mejorar la relación señal – ruido, y así coadyuvar al realce de la componente estratigráfica del objetivo geológico.
- Balancear las amplitudes vertical y lateralmente para mitigar la pérdida de energía debido al efecto de propagación e interacción de la onda con el medio.
- Aplicar deconvolución consistente con superficie para la eliminación de reverberaciones y uniformizar las características espectrales de las trazas e incrementar la resolución temporal de los datos sísmicos.
- Definir los parámetros óptimos para la migración de preapilamiento en tiempo (Kirchhoff) y así establecer el posicionamiento real de las reflexiones.
- Comparar la resolución, variabilidad espacial de las amplitudes y características espectrales del volumen sísmico reprocesado en el año actual con su predecesor reprocesado en el año 2005.

1.3. Justificación

El presente Trabajo Especial de Grado (T.E.G.) dotará a la empresa mixta Petroindependencia S.A. de un volumen sísmico compresional reprocesado del proyecto Cerro Negro 96B 3D, ubicado en el área de Carabobo en la Faja Petrolífera

del Orinoco. El reprocesamiento de los datos sísmicos del proyecto tiene como propósito principal, probar y establecer los procesos y parámetros más adecuados para resaltar rasgos estratigráficos, conservando las amplitudes e instrumentando la integración de nuevos elementos, tanto de capacidades computacionales como de información geológica adquirida hasta el momento, para así optimizar la secuencia de procesamiento hasta ahora realizada.

Así mismo este T.E.G. tendrá un valioso aporte en el área de producción dentro de la empresa mixta Petroindependencia S.A., partiendo de la interpretación del volumen 3D reprocesado, ya que se podrán realizar estudios para caracterización de yacimientos e inversión sísmica, permitiendo ampliar las capacidades de exploración y explotación de petróleo en el bloque 5 con el fin de mejorar la economía y soberanía nacional.

1.4. Ubicación del área de estudio

La empresa mixta Petroindependencia S.A tiene asignada un área de 534 km² comprendida por los bloques 2 Sur, 3 Norte y 5 del área Carabobo en la Faja Petrolífera Orinoco los cuales se ubican entre los municipios Independencia del estado Anzoátegui y Libertador del estado Monagas (figura 1). El área de estudio se encuentra delimitada al bloque 5, representada por un área aproximada de 126 km².

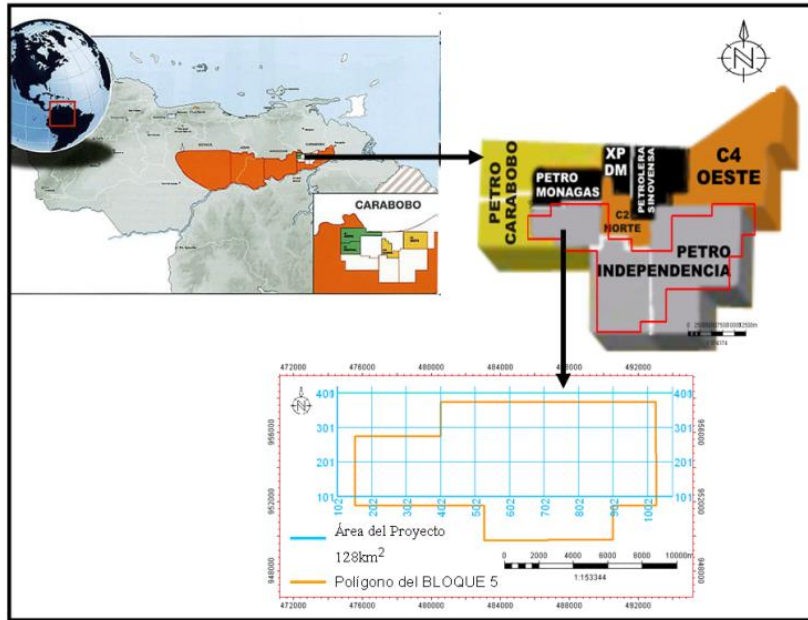


Figura 1. Ubicación del área del proyecto, bloque 5, Petroindependencia S.A. – campo Carabobo

El proyecto Cerro Negro 96B 3D para el área de Petroindependencia cuenta con un total 128 km². El proyecto contó con un total de 36078 fuentes y 44578 receptores, cuya separación entre elementos fuentes de 40 metros y entre elementos receptores es de 40 metros, el intervalo entre líneas fuentes es de 240 metros y el intervalo entre líneas fuentes es de 200 metros, la cobertura nominal de proyecto corresponde con 35 trazas por bin.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1. Cuenca oriental de Venezuela

La cuenca oriental de Venezuela es una depresión estructural y sedimentaria con tendencia este – oeste, situada en la parte norcentral y noreste de Venezuela, dividida a su vez en subcuenca de Guárico y subcuenca de Maturín (Renz et al, 1955). Está limitada al norte por el cinturón de la serranía del Interior Central y Oriental, al sur por el río Orinoco desde la desembocadura del río Arauca hacia el este hasta Boca Grande, al sur y oeste por el cratón de Guayana, al este de la cuenca continúa por debajo del golfo de Paria, incluyendo la parte situada al sur de la cordillera Septentrional de la isla de Trinidad y se hunde en el Atlántico al este de la costa del delta del Orinoco y al oeste, limita con el levantamiento de El Baúl y su conexión con el cratón de Guayana, que sigue los cursos de los ríos Portuguesa y Pao (Di Croce, 1999).

Posee un área total de 55.314 km² de superficie, comprendiendo los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro (González de Juana *et al* , 1980).



Figura 2. Provincias geológicas de Venezuela (modificado de Yoris y Ostos, 1997)

Desde el Cretácico en adelante, el este de Venezuela, específicamente, al norte del escudo de Guayana y al este del levantamiento de El Baúl, forman parte de un geosinclinal cuyo eje se desplazó hacia el sur. La ubicación del eje controló la deposición y características de los sedimentos, siendo éstos de índole marina, en su mayoría, de sur a norte y de oeste a este. Durante el Mioceno – Plioceno, movimientos orogénicos y epirogénicos transformaron la cuenca oriental en dos subcuencas, la subcuenca de Maturín al este y la subcuenca de Guárico al oeste (figura 2) (Renz et al, 1955).

2.2. Faja Petrolífera del Orinoco (FPO)

La Faja Petrolífera del Orinoco está ubicada en el borde meridional extremo de la cuenca Oriental de Venezuela; específicamente al norte del río Orinoco, abarcando parte de los estados Monagas, Anzoátegui, Guárico y Delta Amacuro (figura 3) (Talwani, 2002).



Figura 3. Ubicación de la Faja Petrolífera del Orinoco (modificado de Talwani, 2002).

La FPO es definida como un homoclinal suave, con un buzamiento de 3 a 4 grados hacia el norte, dividido por el sistema de fallas de Hato Viejo en dos provincias geológicas, al este se encuentran las áreas correspondientes a Ayacucho y Carabobo, y al oeste las áreas correspondientes a Junín y Boyacá (figura 4) (Talwani, 2002).

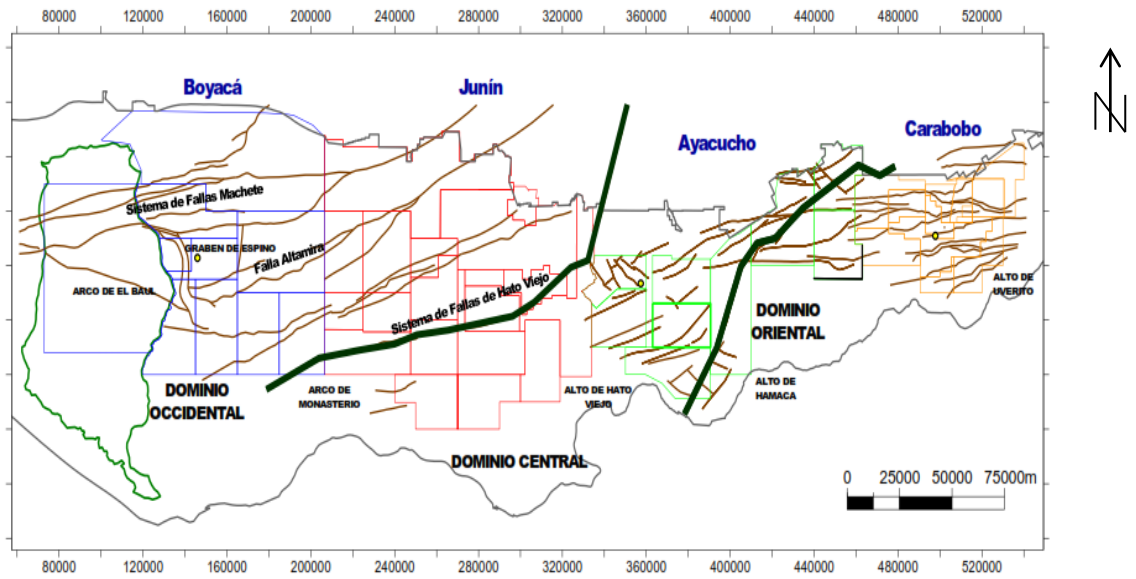


Figura 4. Mapa de rasgos estructurales de la FPO (tomado de PDVSA, 2006)

2.3. Evolución tectónica de la Faja Petrolífera del Orinoco

A continuación se presentará la evolución tectónica y estratigráfica de la Faja Petrolífera del Orinoco, basada en el informe elaborado para el proyecto Orinoco Magna Reserva (PDVSA, 2006). En la tabla 1, se presentará la leyenda para ubicar las edades geológicas en las configuraciones geológicas presentadas como figuras.

Tabla 1. Leyenda para las edades geológicas en la evolución tectónica de la FPO

		Pre - Cámbrico	
	Paleozoico		Mioceno Temprano
	Jurásico		Mioceno Medio
	Cretácico		Mioceno Tardío - Plioceno
	Oligoceno		Pleistoceno - Actualidad

2.3.1. Paleozoico

Inicia con el proceso de sedimentación de las formaciones Hato Viejo y Carrizal, las cuales yacen de manera discordante sobre la roca proterozoica del basamento ígneo – metamórfico. La configuración geológica para dicho periodo geológica se puede visualizar en la figura 5.

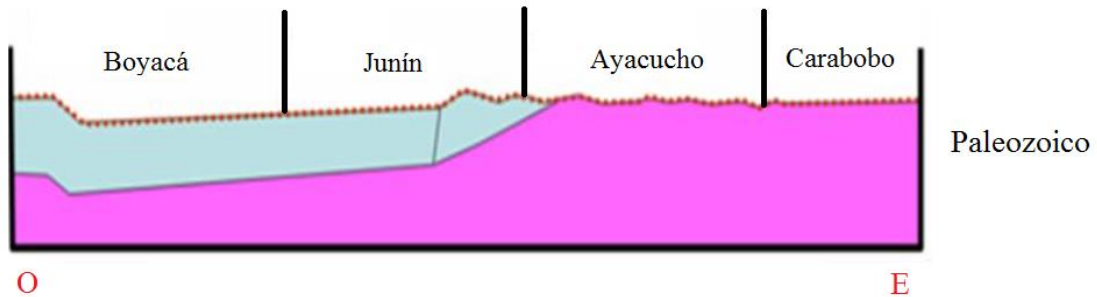


Figura 5. Configuración geológica de la FPO durante el Paleozoico (modificado de PDVSA, 2006).

2.3.2. Jurásico

Durante la separación de Norte América respecto a Gondwana, una parte de esta abertura incluyó la formación del margen norte de Suramérica, separando Yucatán de la parte norte de Suramérica. En la cuenca Oriental, se forma el graben de Espino llenado por las capas rojas de la formación Ipire y basaltos durante el Jurásico Tardío.

La configuración geológica para dicho periodo geológico se puede visualizar en la figura 6.

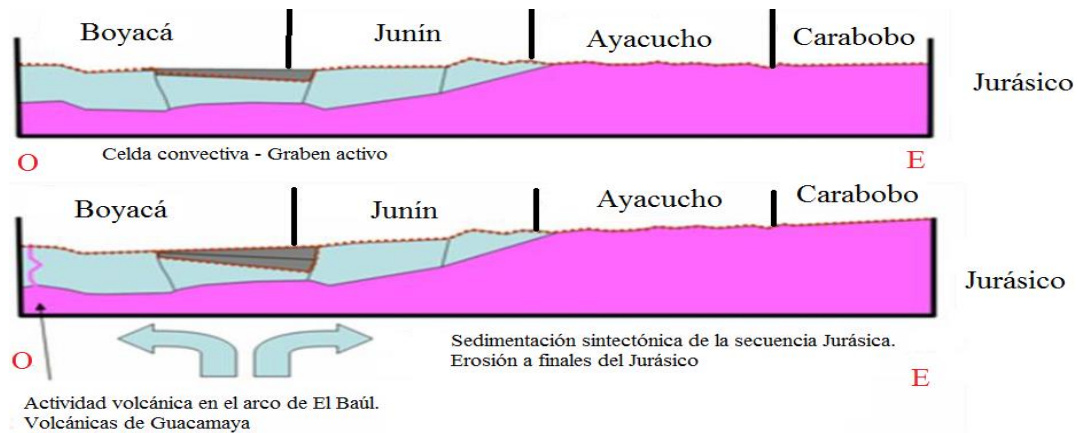


Figura 6. Configuración geológica de la FPO durante el Jurásico (modificado de PDVSA, 2006).

2.3.3. Cretácico

La configuración de la cuenca estaba asociada a la de un margen pasivo donde el ciclo transgresivo es sellado por una discordancia regional conocida en Venezuela como K-T (Cretácico Tardío).

Esta fase se caracterizó por la subsidencia pasiva del margen septentrional del Suramérica desde el Jurásico Tardío o Cretácico Temprano hasta el Eoceno. Durante este periodo, fueron depositadas alrededor de 3 o 4 kilómetros de rocas clásticas marinas, incluyendo varias unidades carbonáticas en los bloques Boyacá y Junín.

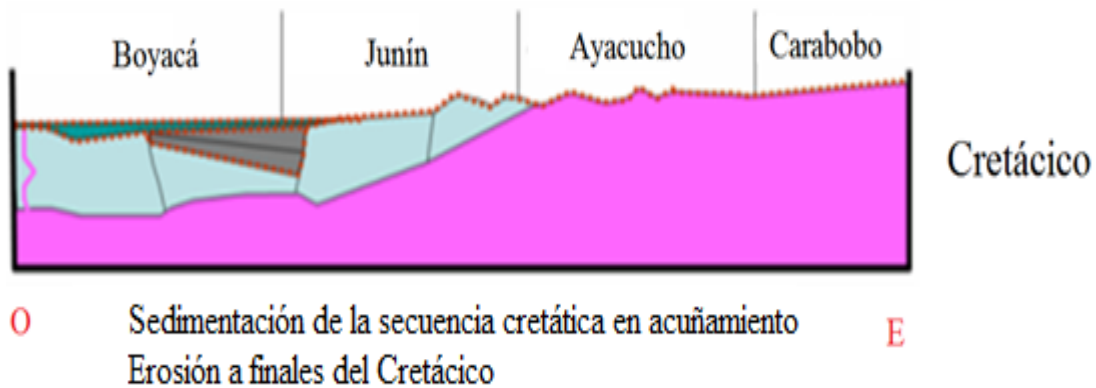


Figura 7. Configuración geológica de la FPO durante el Cretácico (modificado de PDVSA, 2006)

Posterior a la discordancia del Cretácico Tardío, la zona occidental de la FPO deja de preservar sedimentos por un período aproximado de 20 millones de años, posiblemente, causado por un cambio eustático a gran escala, haciendo que dicho sector permaneciese por encima del nivel medio del mar, impidiendo la acumulación y preservación de los sedimentos que pudieron haber formado la roca de la secuencia Paleocena – Eocena en la FPO (figura 7).

2.3.4. Oligoceno

La colisión oblicua entre la placa del Caribe con la Suramericana a través de una falla transcurrente en simultáneo con factores tectónicos de transpresión y compresión desarrollaron una cuenca antepaís que se dividió en tres zonas: (1) un área al sur de Cerro Negro a Oritupano que corresponde a la zona de plataforma (2) una zona central (de Acema – Casma a Pirital) correspondiente al *foredeep* y (3) un área al norte (al norte de la falla de Pirital) correspondiente al área de cabalgamiento. La cuenca vuelve a crear espacio, y sobre la discordancia cretácica, se comienza un ciclo transgresivo y regresivo para la sedimentación en las zonas noroccidental y occidental de la cuenca, confinándose a las áreas Junín y Boyacá. La configuración geológica para dicho periodo geológico se puede visualizar en la figura 8.

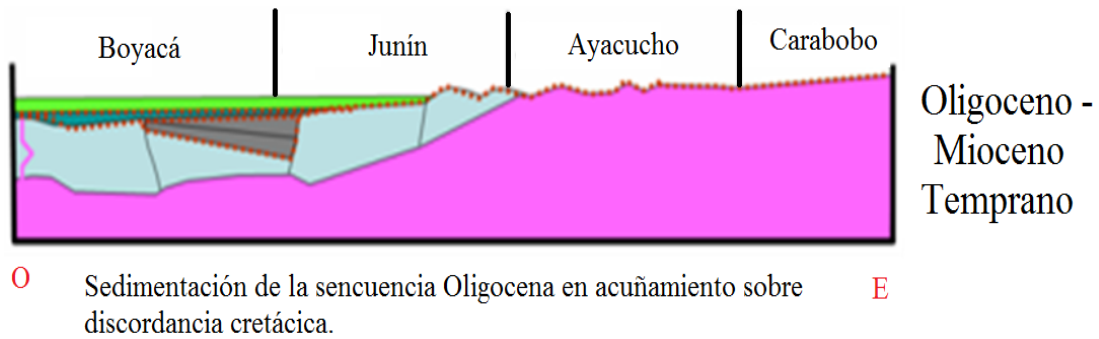


Figura 8. Configuración geológica de la FPO durante el Oligoceno al Mioceno Temprano (modificado de PDVSA, 2006)

2.3.5. Mioceno Temprano

El proceso comprensivo – transpresivo entre la placa Caribe y la Suramericana causaron el cabalgamiento y levantamiento de la serranía del Interior, deformación de la parte central de la subcuenca de Maturín y el levantamiento isostático en partes de la subcuenca de Guárico, este proceso migró paulatinamente el depocentro de la cuenca en esta dirección, contribuyendo en la parte occidental y un remanente de la parte central donde el sistema de fallas de Hato Viejo permaneció activa y limitó el avance de la secuencia hacia el este y sur. La configuración geológica para dicho periodo geológico se puede visualizar en la figura 9.

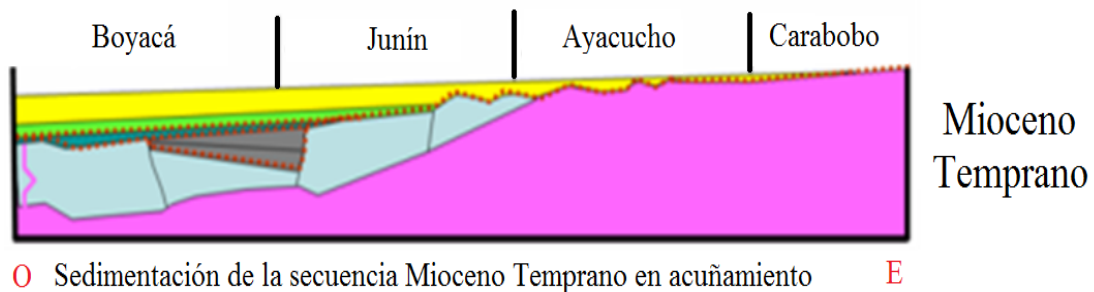


Figura 9. Configuración geológica de la FPO durante el Mioceno Temprano (modificado de PDVSA, 2006)

2.3.6. Mioceno Medio

En el centro y este de la FPO, acontece la sedimentación del miembro Morichal de la formación Oficina, haciéndose granodecreciente gradualmente hasta ser sellada por el miembro Yabo, separando Jobo y Morichal. Esta secuencia abarca, fundamentalmente, Ayacucho y Carabobo (figura 10).

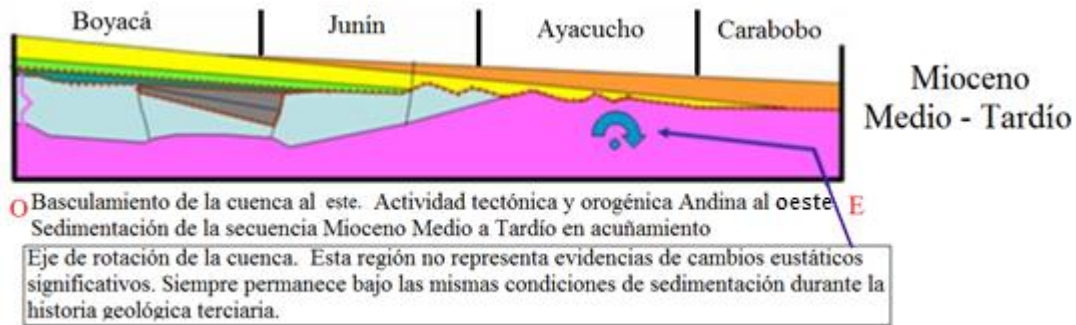


Figura 10. Configuración geológica de la FPO durante el Mioceno Medio al Tardío (modificado de PDVSA, 2006).

La placa Caribe subduce la placa Suramericana al este de Venezuela. Sin embargo, la tectónica convergente en el borde septentrional de la placa no afecta compresivamente la FPO, por el contrario, reactiva el sistema de fallas normales ya existentes de tiempos geológicos anteriores. En dicha época, se produce un basculamiento al este, provocando la sedimentación de arenas de grano grueso, migrando gradualmente de oeste a este a medida que cambia su inclinación.

2.3.7. Mioceno Tardío – Plioceno

El miembro Yabo es depositado transicionalmente (clastos lutíticos). Suprayace de manera concordante al miembro Morichal, al mismo tiempo, pasa a través del miembro Jobo sufriendo cambios en sus tamaños de grano, a su vez, pasa verticalmente de manera transicional al miembro Pilón. Estas secuencias están limitadas a los bloques Carabobo y Ayacucho; en el límite oeste de Junín se encuentra parcialmente erosionada (figura 11).

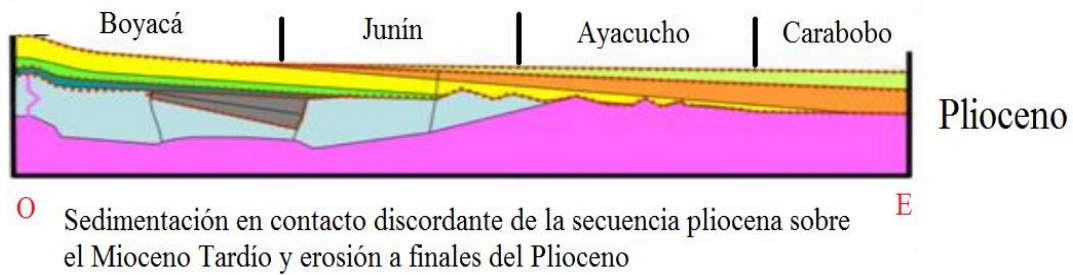


Figura 11. Configuración geológica de la FPO desde el Mioceno Tardío hasta el Plioceno (modificado de PDVSA, 2006)

2.3.8. Pleistoceno hasta la actualidad

Acontece un cambio isostático marino a finales del Plioceno y comienzos del Pleistoceno, provocando una exposición de la cuenca, la cual erosiona en proporciones regionales toda el área. Posterior a la erosión, se deposita de manera discordante la formación Las Piedras, esta pasa de forma transicional a la formación Mesa en el Pleistoceno. Los sedimentos de la formación Mesa constituyen la unidad sedimentaria más nueva en el área de la FPO (figura 12).

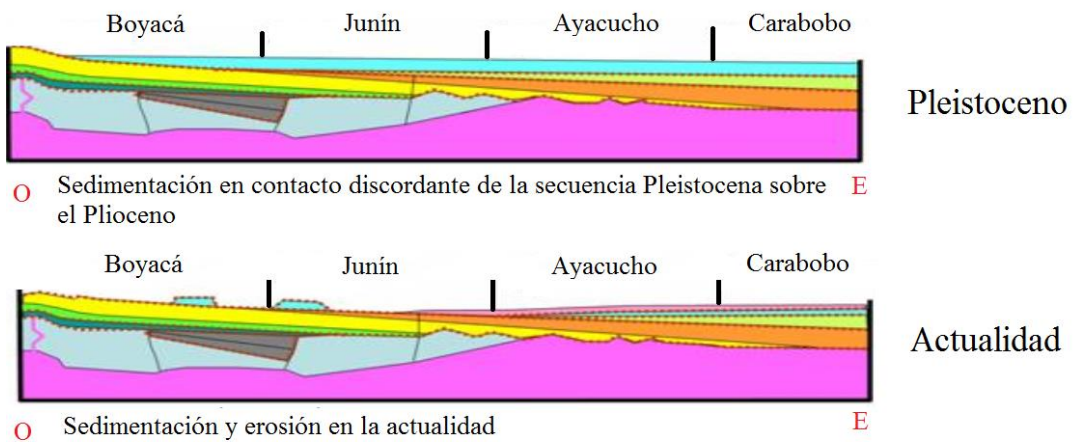


Figura 12. Configuración geológica desde el Pleistoceno hasta la actualidad (modificada de PDVSA, 2006)

2.4. Área Carabobo

Se encuentra ubicada, específicamente, en la subcuenca de Maturín, la parte más al este de la FPO. Posee rasgos estructurales sobresalientes tales como: alto de Uverito al este, alto de Hamaca al oeste, campos tradicionales de la formación Oficina separados por grupos de fallas subverticales con orientación este-oeste (saltos menores a 50 pies). Las arenas de interés comercial en el área abarcan las unidades de la formación Oficina (miembros Morichal, Jobo y Pilón), estableciendo el miembro Morichal como la arena de interés económico para los campos al sur como el caso de estudio.

2.4.1. Estratigrafía del área Carabobo

La columna estratigráfica referente al área Carabobo se estructura, de base a tope, con un complejo ígneo – metamórfico de edad precámbrica que constituye el basamento. La formación Oficina (miembros Morichal, Yabo, Jobo y Pilón) yace discordante sobre el basamento desde el Mioceno Inferior al Mioceno Medio. Seguido, se encuentra la formación Freites datada en el Mioceno Superior. Posterior a ello, la formación Las Piedras y formación Mesa depositadas durante el Plioceno hasta el Pleistoceno (figura 13). Está se encuentra descrita en la columna estratigráfica presente a continuación (figura 14).

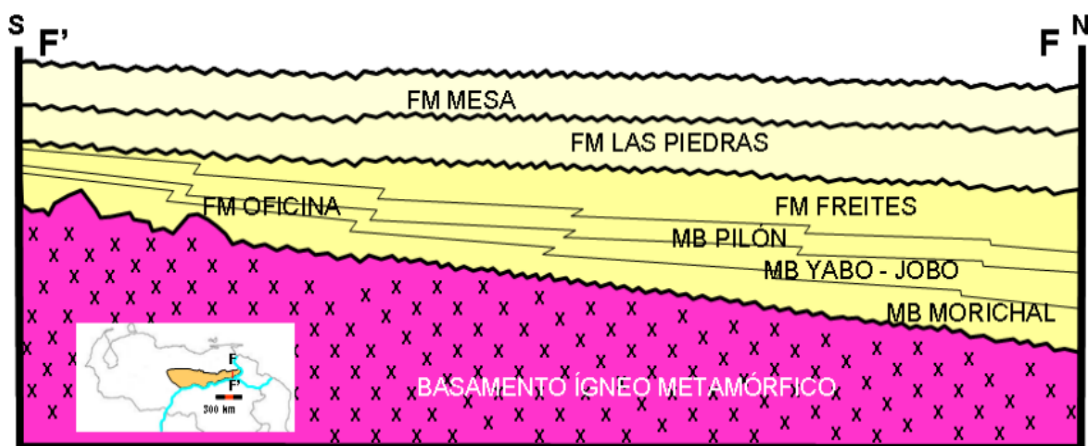


Figura 13. Corte esquemático de S – N dentro del área Carabobo (tomado de PDVSA, 2006)

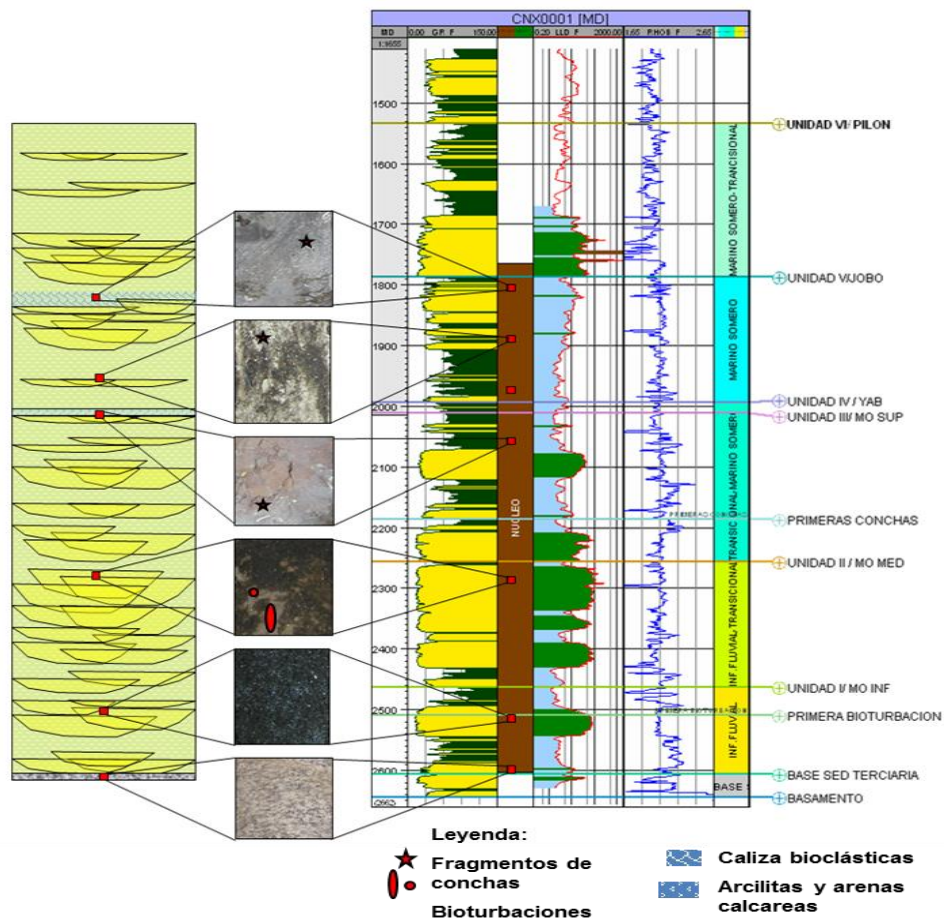


Figura 14. Columna estratigráfica tipo para el área Carabobo (tomada de PDVSA, 2006)

A continuación, son descritas las formaciones presentes en el área Carabobo:

- Basamento (complejo ígneo – metamórfico)

Compuesto por granitos, gneises, anfibolitas y esquistos, formando parte del complejo de Imataca de edad Precámbrica (PDVSA, 1983). En la zona de Uverito se ha comprobado un alto en el basamento, el cual marca una diferencia de sedimentación al este y oeste del mismo. Al este del sector Uverito, las arenas de la formación Oficina desaparecen (Salazar, 2014).

- Formación Oficina

La formación Oficina ha sido reconocida en el subsuelo de los estados Anzoátegui y Monagas. Muller et al. (1987; 1985) y Campos et al. (1988), concuerdan que la formación Oficina pertenece al Mioceno Temprano y Mioceno Medio. El contacto inferior de la formación puede ser discordante sobre unidades cretácicas (Hedberg et al, 1947) o más antiguas como el complejo ígneo – metamórfico (Audemard et al, 1985). La formación está descrita como una alternancia de lutitas grises, gris oscuro y gris marrón, intercaladas e interestratificadas con areniscas y limolitas de color claro y grano fino a grueso, estas áreas constituyen los principales yacimientos petrolíferos en la mayoría de los campos de la cuenca oriental, las lutitas han sido consideradas como posible roca generadora de hidrocarburos (Hedberg, 1950; Méndez, 1985).

En el área Carabobo, se estableció una subdivisión estratigráfica que consiste en 4 miembros, de base a tope: Morichal, Yabo, Jobo y Pilon.

- Miembro Morichal

Key (1977) describe a Morichal como un miembro formado por arenas macizas de grano fino a grueso y escogimiento variable, que forman partes de 100 a 200 pies (30 a 60 metros), separados por delgados intervalos lutíticos. El miembro yace discordantemente sobre los sedimentos cretácicos del grupo Temblador. Hacia arriba, es concordante bajo la lutita del miembro Yabo. Existe la posibilidad de que el tramo inferior del miembro Morichal, caracterizado por areniscas feldespáticas y lignitos gruesos, pudiera corresponder a la formación Merecure.

- Miembro Yabo

Depositado durante el Mioceno Medio, Key (1977) designa el miembro Yabo como un intervalo predominantemente lutítico que separa los miembros Jobo y Morichal, de la formación Oficina; en el campo Jobo, sur de Monagas, consiste en lutitas gris a gris oscuro, macizas a estratificadas, fosilíferas, carbonáceas y micáceas, con capas

delgadas de areniscas de grano fino y color gris. El miembro Yabo ocupa el intervalo de 3518 a 3561 pies (1072 a 1086 m), con 14 m de espesor, suprayace concordante al miembro Morichal de la formación Oficina, y pasa hacia arriba transicionalmente al miembro Jobo.

- Miembro Jobo

Key (1977) lo define como el segundo miembro, en orden descendente, de la formación Oficina, en el sur de Monagas. Está compuesto de arenas color gris poco consolidadas, de grano fino a medio, las cuales son importantes productoras de petróleo pesado, lutitas macizas o laminadas y algunas capas de lignito. Posee un espesor aproximado de 31 m. El miembro Jobo yace concordantemente sobre el miembro Yabo. Hacia arriba, pasa transicionalmente al miembro Pílon.

- Miembro Pílon

Depositado durante el Mioceno Medio, Key (1977) lo introduce como un miembro compuesto de lutitas gris oscuro, arenosas, calcáreas, glauconíticas y piríticas, con delgadas intercalaciones de caliza, constituyen el tope de la formación Oficina en el campo Jobo, en el sur de Monagas. Ésta posee un espesor de 11.5 m, yace concordante sobre el miembro Jobo. Hacia arriba, pasa concordantemente a la formación Freites.

- Formación Freites

La formación Freites suprayace concordantemente a la formación Oficina. Las zonaciones de Isea (1987) y Audemard et al. (1985) ubican la formación en el Mioceno. El espesor varía entre 800 a 3000 pies.

Esta formación constituye el sello principal de los reservorios petrolíferos de la formación Oficina. Hedberg (1950) describen lutitas físciles verdes, con areniscas en el tope y la base, que permiten la subdivisión de la unidad en tres intervalos: (1) intervalo superior compuesto de capas delgadas de areniscas arcillosas de grano fino,

(2) intervalo intermedio compuesto predominantemente lutítico y (3) intervalo inferior compuesto de lutitas intercaladas con areniscas de grano medio a grueso.

Representa el máximo de la segunda transgresión mayor en el Mioceno. El carácter de la formación es nerítico. Hacia el extremo sur de la cuenca, área Carabobo de la FPO, la formación Freites disminuye su espesor al paso que se hace más arenosa, dificultando su diferenciación de las formaciones Oficina y Las Piedras (PDVSA, 1983).

- Formación Las Piedras – Mesa

Debido a la dificultad que presenta su diferenciación litológica, ambas formaciones han sido tomadas como una sola unidad. Su litología es homogénea, compuesta principalmente de paquetes de gran tamaño de arenas con tamaño de grano grueso y gravas con cemento ferruginoso. En menores cantidades existe la presencia de limolitas carbonosas y lutíticas. Estas arenas no contienen hidrocarburos. Sin embargo, su importancia radica en la presencia de reservas de agua dulce (acuíferos) almacenados dentro de intervalos conglomeráticos que conforman la roca (PDVSA, 1983).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3. Generalidades

La sísmica de reflexión es un método geofísico que fundamenta sus bases en la reflexión del frente de ondas generadas artificialmente por una fuente inducida (explosivos, impactos mecánicos, vibraciones), dichas reflexiones ocurren en las interfases de los estratos, debido a los cambios en las propiedades físicas de los mismos, siendo registradas por un sismógrafo. El objetivo básico de la sísmica de reflexión es obtener información sobre la arquitectura interna del subsuelo, deducir información acerca de las estructuras (rocas) en profundidad, especialmente de las distintas capas que los constituyen y sus características físicas asociadas (litología, fluidos, etc.), a partir de los tiempos de llegada y amplitudes de las ondas, y así, extraer una imagen que lo represente. También es posible obtener información de las fases y frecuencias de estas ondas (De la Peña, 2002).

El método de sísmica de reflexión ha sido empleado para la delimitación de la geología superficial con el propósito de exploración mineral y estudios para la ingeniería, así como también ha sido utilizado para delimitar la estructura cortical hasta la discontinuidad de Mohorovicic (Yilmaz, 2001).

La prospección por sísmica de reflexión comprende tres etapas: la adquisición de datos, el procesamiento y la interpretación de los resultados finales. Habiendo mencionado las etapas, el marco teórico del presente T.E.G. se centrará en el procesamiento de datos sísmicos y cada una de las etapas incluidas dentro del mismo.

3.1. Procesamiento de datos sísmicos

El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de los parámetros y algoritmos matemáticos, para el tratamiento adecuado de los datos sísmicos adquiridos en el campo (datos brutos) con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad (figura 15). El objetivo fundamental de todo procesado multicanal es aislar, en los registros, las reflexiones de los eventos sísmicos de eventos sísmicos que se

superpongan a dichas reflexiones y altere la imagen (ruido ambiental, cono de ruido, onda de tubo, etc.). Actualmente, debido al gran incremento del volumen de datos (mayor capacidad instrumental) y al desarrollo de nuevos algoritmos (mayor potencia de cálculo), el dominio de las técnicas de procesado es uno de los pilares de la prospección geofísica (Gayá, 2004).

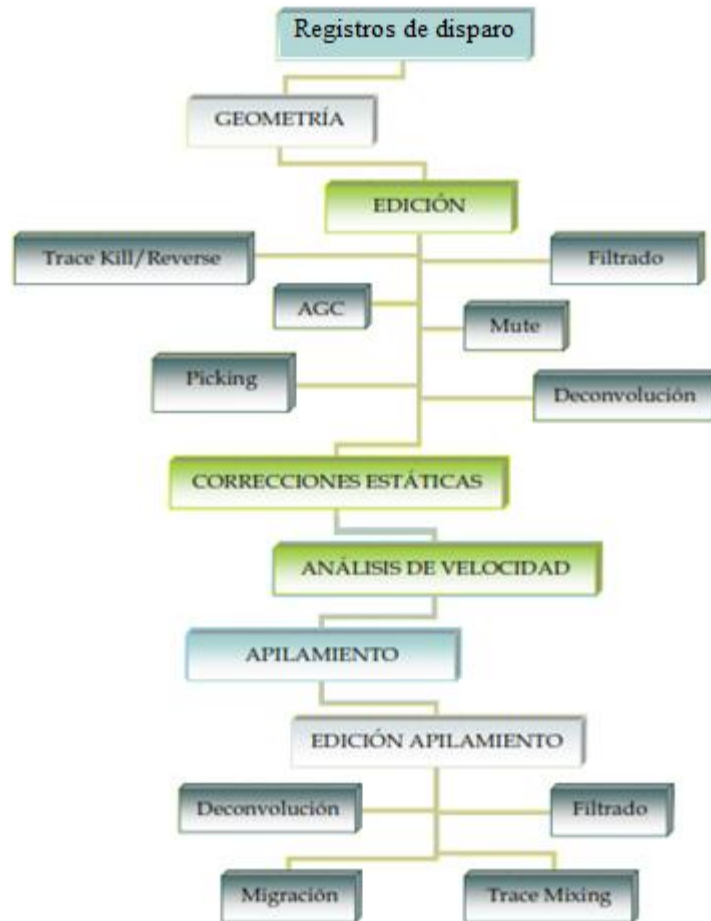


Figura 15. Secuencia básica de procesamiento (modificado de Gayá, 2004)

En otras palabras, consiste en la manipulación de la señal sísmica para reconstruir la imagen del subsuelo. Para realizar esto de manera apropiada, hay que entender los procesos físicos que están involucrados en dichos experimentos sísmicos. Por ejemplo, la fuente sísmica introduce una señal (es decir, la ondícula fuente) en el subsuelo. Sin embargo, la estructura del subsuelo no depende de la señal que se

coloque. Por tanto, se desea remover la señal fuente de nuestros datos para poder visualizar la imagen del subsuelo, dicho proceso es definido como deconvolución. Las ondas que viajan a través de la superficie (ondas superficiales) se consideran ruido en el método sísmico de reflexión, se filtran los datos con el fin de remover las incoherencias que suministran a los datos sísmicos. Los retardos en los tiempos de viaje de las ondas sísmicas debido a los efectos causados por las condiciones superficiales asociados a los estratos someros y topografía pueden variar abruptamente de un punto a otro. Compensar dicho efecto es definido como corrección estática (Drijkoningen y Verschuur, 2003)

3.2. Asignación de geometría

Es el proceso de acoplar los datos sísmicos grabados con la geometría de adquisición (distintas distancias fuentes – receptor) basado en la información del levantamiento para datos terrestres o información de navegación para datos marinos, donde la información asociada a las coordenadas de las ubicaciones y elevaciones de las distintas fuentes y receptores (geometría) para todas las trazas están almacenados en los encabezados (*headers*) de cada traza o en archivos separados de tipo planos (Yilmaz, 2001).

El formato establecido por la SEG (*Society of Exploration Geophysicists*) en el año 1993 denominado SPS (*Shell Processing Support*) termina siendo un estándar al momento de intercambiar datos de posicionamientos geofísicos.

Cambios en las ubicaciones de fuentes y receptores son manipulados debidamente basados en la información disponible en los registros del observador (Yilmaz, 2001).

3.3. Edición de trazas

Consiste en corregir o eliminar trazas mal grabadas, con polaridad invertida (producto de cambios de sitio o de intercambio de conexiones al momento de conectar los geófonos), trazas ruidosas, trazas con fallas transitorias, aquellas con un contenido de frecuencia único (monofrecuencia) o que posean una baja relación señal – ruido, con el objetivo de obtener una señal de mejor calidad al momento de realizar el

apilamiento (apartado 2.21), de no ser así, dichas trazas pueden distorsionar la imagen final (Yilmaz, 2001) (figura 16).

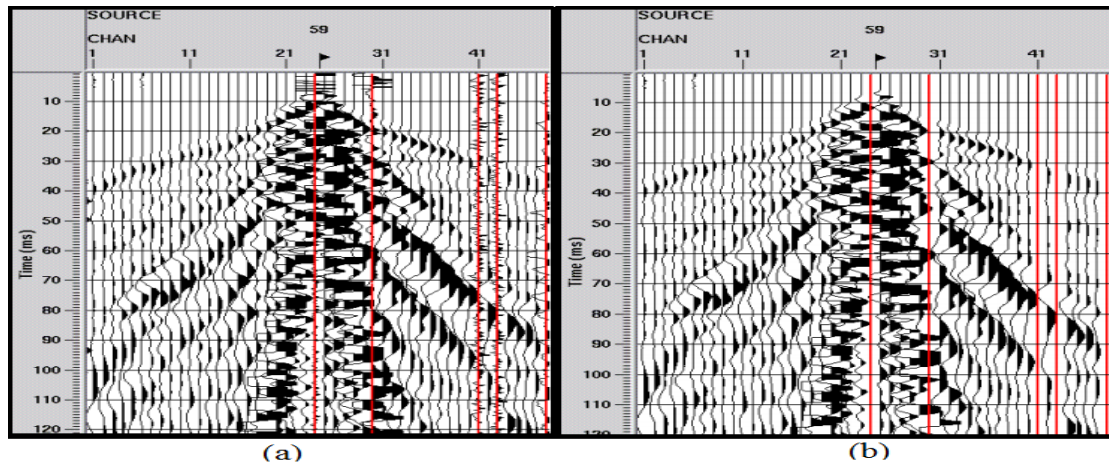


Figura 16. Ejemplo de un tiro de campo (a) en el que se observan trazas con alto contenido de ruido que deben ser eliminadas (b) en la etapa de edición (tomado de Gayá, 2004)

3.4. Correcciones estáticas

Los datos sísmicos adquiridos en tierra se ven afectados en el dominio del tiempo debido a las diferencias de elevaciones asociada a la ubicación de fuentes y receptores (topografía), y además, distorsiones en los tiempos de viaje causadas por heterogeneidades, espesor y velocidad de la capa meteorizada (Yilmaz, 2001).

Las correcciones estáticas se aplican a los datos sísmicos para compensar los efectos de las variaciones de cotas o elevación, espesor y velocidad de capa meteorizada y/o referentes a un *datum*. Tienen como objetivo determinar los tiempos de arribo de las reflexiones, como si estas mediciones hubiesen sido observadas en un (usualmente) plano de referencia sin la presencia de material meteorizado o de baja velocidad (Sheriff y Geldart, 1995). El término estático implica que es un desplazamiento constante en el tiempo para toda una traza (Yilmaz, 2001).

3.4.1. Estáticas de elevación

Las estáticas de campo o estáticas de elevación calculan los tiempos de grabación de las trazas sísmicas respecto a un plano imaginario o de referencia, comúnmente llamado datum fijo, a un plano de referencia de una altura variable llamado datum flotante (figura 17). El datum flotante es el resultado de un suavizado de la superficie topográfica de la zona de estudio (Velásquez, 2008).

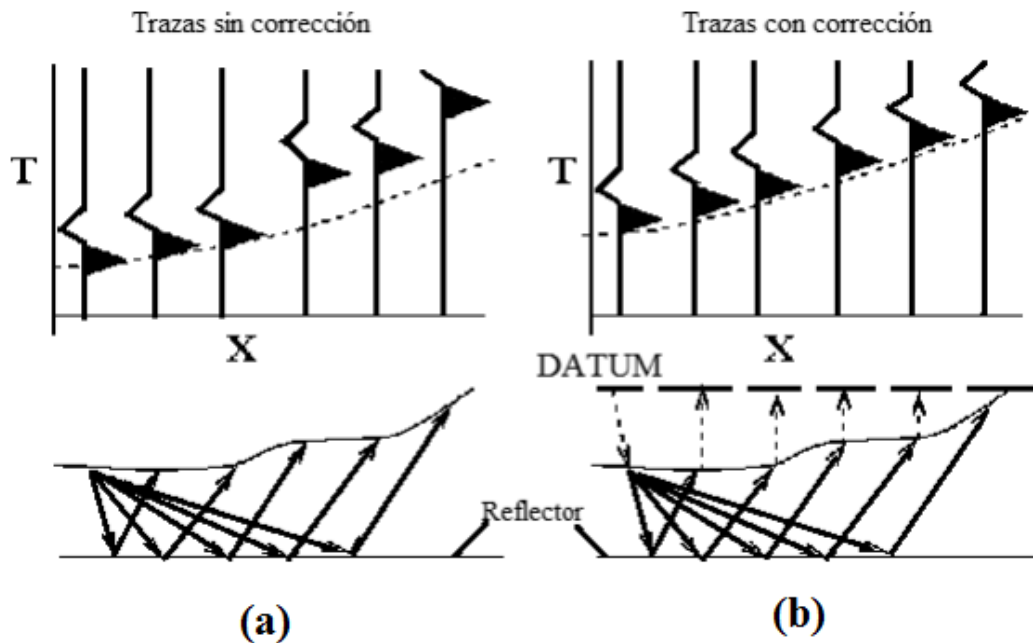


Figura 17. Registro sísmico donde (a) representa el efecto de la topografía en los tiempos de viaje de la onda y (b) la aplicación de estáticas de elevación llevando los tiempos de viaje a un datum fijo (modificado de Schuster y Quintuz-Bosz, 1993).

Es posible eliminar el efecto de las irregularidades del relieve o superficie topográfica visualizado como un desplazamiento en tiempo sobre las trazas sísmicas al llevar las fuentes y receptores a un datum fijo. El método apropiado para realizar esto es aplicando una velocidad de reemplazo para producir migraciones verticales estáticas en los datos sísmicos para alinearlos con un nivel de referencia común.

3.4.2. Estáticas de refracción

La presencia de anomalías de baja velocidad y carácter somero asociadas a la capa meteorizada puede causar serios problemas en el procesamiento de los datos sísmicos. Dos de los mayores efectos que resultan de las condiciones someras son el deterioro del apilado debido al desarreglo dentro de los CDP, y la distorsión de los tiempos estructurales de los reflectores profundos. Ambos efectos resultan de los retardos en tiempo introducidos por capas geológicas de baja velocidad y espesor variante (Hampson y Russell, 1984).

Las soluciones consistentes con superficie resuelven los cambios estáticos de longitud de onda corta (menor que la longitud del tendido), los cuales causan distorsiones en los tiempos de viaje en los CMP gathers, generando una mejor respuesta en el apilamiento. Sin embargo, mejorar un poco la respuesta del apilamiento al corregir las estáticas de longitud de onda corta no es suficiente, por tanto, es necesario corregir la componente de longitud de onda larga. Si las componentes de longitud de onda larga son grandes, la geometría de los reflectores inferida por el apilamiento asociado por punto común en profundidad puede verse distorsionado significativamente. Las estáticas de refracción son utilizadas al igual que las estáticas de elevación para corregir las componentes de longitud de onda larga (Yilmaz, 2001).

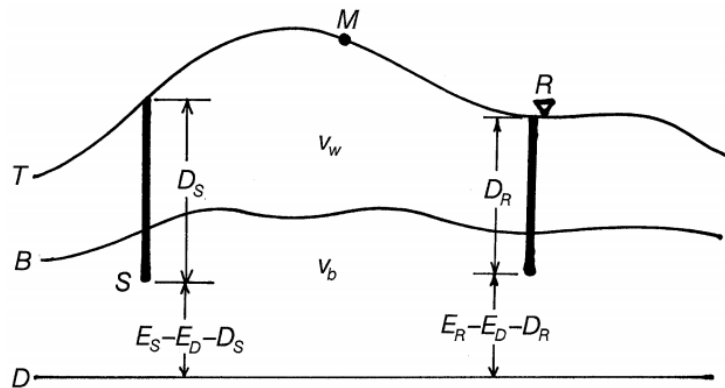


Figura 18. Representación de un modelo de correcciones estáticas cuando los disparos se encuentran debajo de la capa no consolidada (tomado de Yilmaz, 2001).

Dónde:

S: Disparo

E_S : Elevación de la estación de disparo con respecto al suelo

R: Receptor

E_R : Elevación del receptor con respecto al suelo

T: Topografía

D: Datum

E_D : Elevación del datum

V_w : Velocidad de la capa meteorizada

V_b : Velocidad de la roca sólida

D_S : Profundidad del hoyo bajo las estaciones de disparo

t_{UH} : Tiempo que tarda la onda directa en recorrer la distancia D_S

D_R : Profundidad del hoyo bajo las estaciones receptores

La energía refractada asociada con la base de la capa meteorizada, comúnmente constituye las primeras llegadas en un registro de disparos; a éstas se le conocen como primeros quiebres. Los primeros quiebres ocurren en variados grados de calidad, dependiendo del tipo de fuente y de las condiciones someras. Los primeros quiebres están asociados con los tiempos de llegadas de la onda refractada, los cuales son utilizados después en un esquema de inversión para estimar los parámetros del modelo de la capa superficial (Yilmaz, 2001).

En la figura 18, los disparos (denotados por S) están ubicados por debajo de la capa meteorizada, entonces la corrección estática total que se debe aplicar a la traza con punto medio en común M es:

$$t_D = t_S + t_R \text{ (Ecuación 1)}$$

Dónde t_S y t_R son las correcciones estáticas para fuente y receptor, respectivamente, para un datum (D) específico. De la geometría establecida en la figura 18, las correcciones estáticas pueden ser calculadas, por la ecuación 2.

$$\Delta\tau_D = -\frac{E_S - E_D - D_S}{V_b} - \frac{E_R - E_D - D_R}{V_b} - t_{UH} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde, E_D es la elevación del datum, E_s y E_r son las elevaciones de superficie de las estaciones fuentes y receptoras, D_s es la profundidad del hoyo del disparo debajo de la estación de disparo y t_{UH} es el tiempo *uphole* (tiempo para la primera onda de una explosión para llegar a la superficie en o cerca del punto de disparo) medido en la estación receptora. Finalmente, V_b es la velocidad de la roca sólida que será obtenida de la adquisición de un *uphole* profundo en el área de estudio.

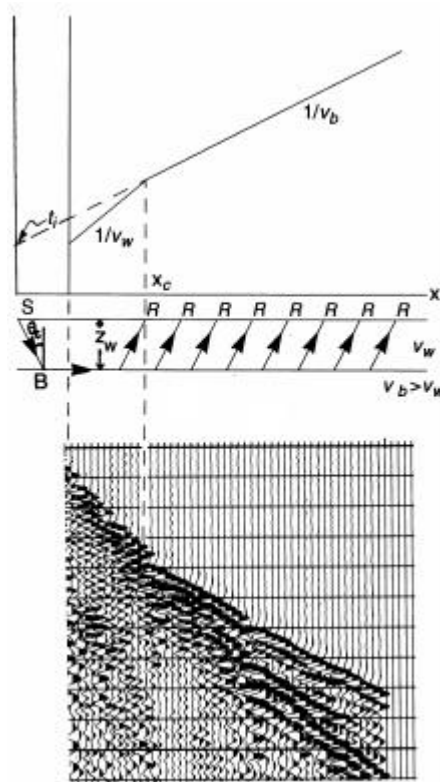


Figura 19. Registro de disparos que exhibe la onda directa y refractada, y la geometría asociada a las llegadas de la onda refractada (tomado de Yilmaz, 2001).

La selección de primeros quiebres, las velocidades de la capa de roca sólida y capa meteorizada son estimadas. En la figura 19, al extender la línea asociada con los tiempos de llegada de las refracciones a la posición cero offset (la distancia entre fuente y receptor es cero), se estima el tiempo de intercepto en $x=0$. Con estos tres

parámetros, es posible calcular la profundidad de la capa de roca sólida z_w , dada por la ecuación 3 (Yilmaz, 2001).

$$Z_w = \frac{v_b \cdot v_w \cdot t_i}{2 \sqrt{v_b^2 - v_w^2}} \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde, $V_b > V_w$. De manera alternativa, se puede medir la distancia de cruce correspondiente con el cambio de la llegada de la onda directa a la llegada de la onda refractada en el gráfico de los tiempos de llegada, y utilizarlo para calcular la profundidad de la capa de roca sólida, a través de la ecuación 4.

$$z_w = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_b - V_w}{V_b + V_w}} \cdot x_c \text{ (Ecuación 4)}$$

Después de calcular z_w , la corrección estática total al datum específico puede ser calculada por la ecuación 5.

$$\Delta\tau_D = -\frac{2z_w}{v_w} + \frac{2(E_d - E_s + z_w)}{v_b} \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde E_d es la superficie de elevación.

3.5. Tipos de estáticas de refracción

3.5.1. Estáticas de periodo corto

Las estáticas de periodo corto son causadas por rápidos cambios laterales que introducen variaciones de tiempo dentro de las trazas individuales en un punto común en profundidad (Vásquez, 2010).

3.5.2. Estáticas de periodo largo

Las estáticas de periodo largo son causadas por cambios laterales graduales y estos introducen estructuras aparentes en la sección sísmica (Vásquez, 2010).

3.6. Recuperación de amplitudes

Un registro de campo representa un tren de ondas que es generado por un disparo. Conceptualmente, un disparo es considerado como un punto fuente que crea un campo de ondas esférico, que se propaga por un medio anisotrópico y elástico. Siendo

la Tierra el medio, por excelencia, para los métodos sísmicos de reflexión. El subsuelo tiene dos efectos en la propagación del frente de ondas (Yilmaz, 2001):

- En un medio homogéneo, la densidad de energía decae proporcionalmente a razón de $1/r^2$, donde r representa el radio del frente de onda. La amplitud de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de energía ($1/r$).
- El contenido de frecuencia de la señal inicial perteneciente a la fuente cambia variablemente en el tiempo a medida que se propaga. En particular, las señales de altas frecuencias son absorbidas de manera más rápida que las señales de baja frecuencia debido a la atenuación intrínseca de las rocas.

Entonces, la recuperación de amplitudes es un proceso que busca compensar, matemáticamente, el decaimiento de la energía debido a la divergencia esférica del frente de ondas y las pérdidas por el comportamiento parcialmente inelástico del subsuelo (atenuación), dispersión (*scattering*) y la partición de la energía, representado en la figura 20 (Chelotti et al, 2009).

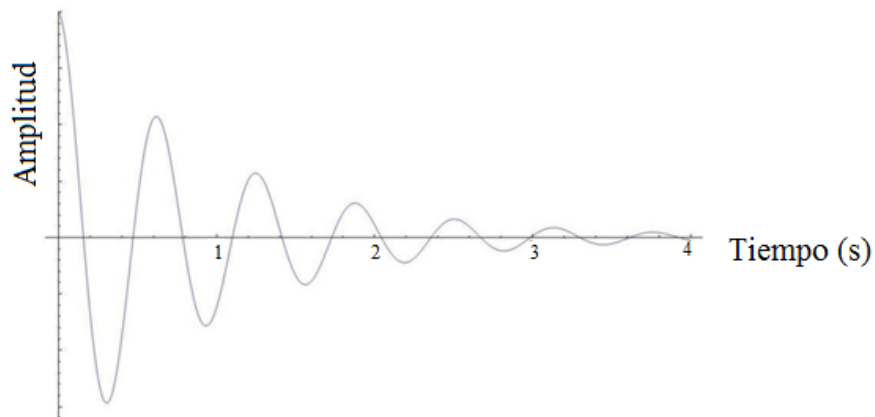


Figura 20. Comportamiento de las amplitudes en función del tiempo (tomado de Fernandez, 2005; modificado de Vila, 2005).

3.7. Corrección por divergencia esférica

La divergencia esférica es el decrecimiento en la fuerza de la onda (energía por unidad de área) asociada a la distancia, como resultado del arreglo geométrico, donde

una onda esférica que viaja a través del subsuelo continuamente se dispersa, de tal manera que la densidad de la energía decrece (Sheriff y Geldart, 1995).

El factor $1/r$ (donde r es el radio del frente de ondas) describe el decaimiento de las amplitudes de las ondas como una función del radio. El frente de ondas esféricos es válido para medios homogéneos que no posean atenuación (Yilmaz, 2001). Para un medio estratificado, el decaimiento de la amplitud puede ser descrito aproximadamente proporcional a $1/[v^2(t) \cdot t]$, donde t es el tiempo de viaje doble y $v(t)$ es la raíz media cuadrática de la velocidad de las reflexiones primarias (aquellas que son reflejadas una sola vez) en el área de estudio (Newman, 1973).

Así, la función de ganancia para compensar la pérdida de energía debido al arreglo geométrico asociado a la divergencia esférica, se define a través de la ecuación 6.

$$g(t) = \frac{v^2(t) \cdot t}{v_0^2 \cdot t_0} \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde, v_0 es la velocidad de referencia a un tiempo específico t_0 .

3.8. Correlación

En términos matemáticos, es una operación en el dominio del tiempo, entre dos o más funciones, para evaluar el grado de similitud entre dos o más señales, expresada a través de la ecuación 7 (Yilmaz, 2001).

$$\rho_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(\tau + t) dt \text{ (Ecuación 7)}$$

Para datos digitales, viene dada por la ecuación 8.

$$C(g, h)_j \equiv \sum_{k=0}^{N-1} g_{j+k} h_k \text{ (Ecuación 8)}$$

3.9. Autocorrelación

Es la correlación de una función de la onda consigo misma. La función de autocorrelación normalizada para una función continua de onda estacionaria, es definida por la ecuación 9.

$$\phi_{11}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} f(t) \cdot f(t+\tau) dt}{\int_{t_1}^{t_2} f^2(t) dt} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde $f(t)$ representa la función de la onda (o traza sísmica) y τ es el desplazamiento en tiempo o retardo. La función de autocorrelación es una medida de la dependencia estadística de la traza sísmica en un tiempo posterior τ en el valor presente, o el grado en que valores futuros pueden predecirse a partir de los valores pasados. La función de autocorrelación contiene toda la información asociada a frecuencias y amplitudes de la función de la onda (Sheriff, 2002).

El contenido de altas frecuencias en las reflexiones más profundas es menor que en las reflexiones someras, entonces para definir un operador promedio (empleado en la deconvolución) se necesita obtener una estimación promedio de las ondículas contenidas en una traza sísmica. Un buen método para efectuar esto es seleccionar una ventana en tiempo sobre una traza sísmica y autocorrelacionarla consigo misma, dentro de la ventana seleccionada (Vásquez, 2010)

3.10. Autocorrelograma

Representación gráfica de la mitad de la función de autocorrelación (la mitad positiva de los desplazamientos en tiempo) de las trazas sísmicas, usualmente definida en una ventana en tiempo (Sheriff, 2002).

El autocorrelograma es una herramienta útil para detectar las reverberaciones o múltiples asociados a una traza sísmica (Yilmaz, 2001).

3.11. Deconvolución

El subsuelo está compuesto de estratos con litologías y propiedades físicas diferentes. Sísmicamente, las ondas reaccionan a las variaciones de las propiedades en los estratos, tales como la densidad y velocidad, mientras se propagan a través del medio. El producto de la velocidad y la densidad se define como impedancia acústica. El contraste de impedancia (I_n) (ecuación 10) entre estratos adyacentes provocan las reflexiones que son registrados a lo largo del perfil en superficie (Yilmaz, 2001).

$$C_{I_n} = \frac{I_{n+1} - I_n}{I_{n+1} + I_n} = \frac{v_{n+1} \cdot \rho_{n+1} - v_n \cdot \rho_n}{v_{n+1} \cdot \rho_{n+1} + v_n \cdot \rho_n} \text{ (ecuación 10)}$$

El sismograma grabado puede ser modelado como la convolución (operador matemático que transforma dos funciones en una tercera función que en cierto sentido representa la magnitud en la que se superponen la primera función y una versión trasladada e invertida de la segunda función) de la respuesta impulsiva del subsuelo con la ondícula sísmica (figura 21). Esta ondícula posee varias componentes, tales como: firma de la fuente, filtro de grabación, reflexiones superficiales y respuesta del arreglo de receptores. La respuesta impulsiva del subsuelo es lo que se hubiese grabado si la ondícula fuese un *spike* o pico. La deconvolución comprime las reflexiones primarias (serie de reflectividad) y todos los posibles múltiples (Yilmaz, 2001).

El modelo convolucional se basa en 5 suposiciones:

1. El subsuelo está compuesto de capas horizontales con velocidades constantes.
2. La fuente genera un frente de onda plano compresional, el cual incide sobre los estratos horizontales (incidencia normal del rayo), impidiendo así la generación de ondas de cizalla.
3. La forma de la ondícula fuente no es alterada a medida que viaja en el subsuelo: es estacionaria.
4. La componente de ruido coherente es cero (aplica en el modelo convolucional en el dominio del tiempo).
5. La forma de la ondícula es conocida.

Matemáticamente hablando, el modelo convolucional está dado por la ecuación 11.

$$x(t) = w(t) * s(t) + n(t) \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde, $w(t)$ es la ondícula sísmica básica, $s(t)$ es la serie de reflectividad, $n(t)$ es el ruido aleatorio, $x(t)$ es el sismograma grabado y “*” indica la convolución.

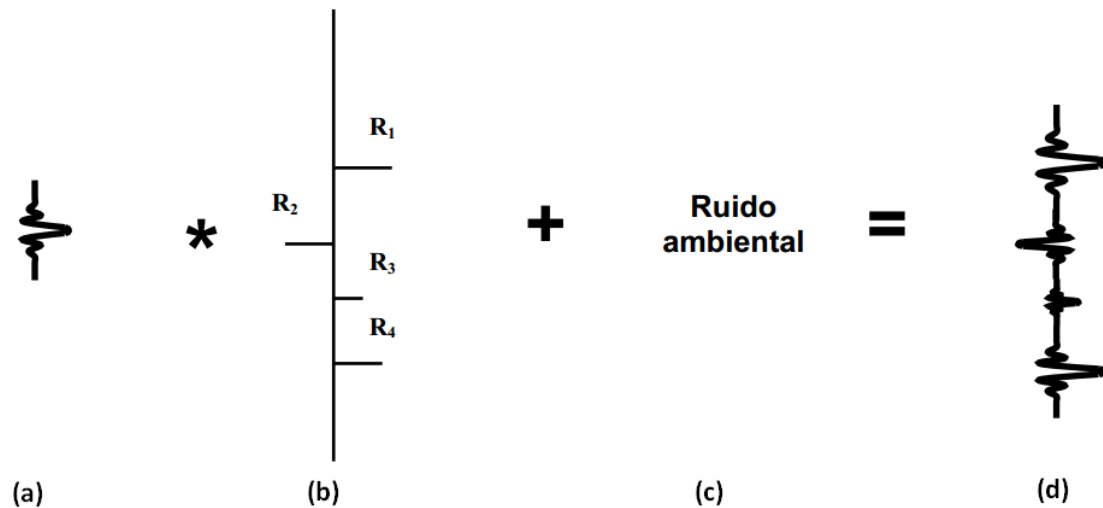


Figura 21. Modelo convolucional, (a) ondícula de la fuente (b) respuesta impulsiva del subsuelo (c) ruido ambiental (d) sismograma grabado (modificado de González y Velásquez, 2008)

La deconvolución permite compensar o revertir las convoluciones previas; en otras palabras, es el proceso inverso a la convolución. En procesamiento de datos sísmicos se suele utilizar para idealmente obtener la función de reflectividad, y adicionalmente, en el caso de adquisición en agua, reducir las reverberaciones y/o múltiples.

Yilmaz (2001) establece que la deconvolución intenta recuperar la serie de reflectividad (estrictamente hablando, la respuesta impulso) del sismograma grabado tras la aplicación de un filtro inverso.

Así mismo, este proceso contribuye a la supresión de múltiples y reverberaciones presentes en los datos sísmicos, y a su vez, recupera el contenido de frecuencia atenuado por la tierra debido a su actuación como filtro.

3.12. Parámetros para la deconvolución

A continuación, se definirán los parámetros requeridos para poder realizar la deconvolución.

3.12.1. Ventana de diseño

Es el intervalo de tiempo de grabación sobre la que se evalúa una función (tales como autocorrelación o correlación cruzada) (Sheriff, 2002). Por lo general, es definida de forma rectangular, expresada en milisegundos (ms), donde se calculará la autocorrelación de las trazas. Obteniendo así, un autocorrelograma empleado para definir la longitud del operador de deconvolución y la distancia predictiva (Di Giulio, 1999).

3.12.2. Operador de deconvolución

El operador de deconvolución indica que porción representa la autocorrelación de la ondícula, es decir, hasta donde existe un parecido en la ondícula a medida que se compara consigo misma. Las ondas directas y el cono de ruido o *ground roll* no dependen del operador (González y Velásquez, 2008).

3.12.3. Longitud del operador

Es el intervalo, en tiempo (ms), a partir del origen del autocorrelograma, correspondiente a la ondícula de mayor coherencia (señal) hasta el último valor similar en intensidad desplazado en tiempo asociados al múltiple dentro de los datos sísmicos (Di Giulio, 1999).

El criterio empleado para definir la longitud del operador es que el ancho de banda del contenido de frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de operador efectiva (Yilmaz, 2001).

3.12.4. Distancia predictiva o *gap*

Empleado cuando la deconvolución es de carácter predictivo. Representa el tiempo en el cual la autocorrelación de una traza cruza por segunda vez el eje del tiempo (Di Giulio, 1999).

Matemáticamente, es un operador de deconvolución que tiene un grupo de elementos de filtro distintos de cero apreciablemente separados uno de otros por ceros (Sheriff, 2002).

3.13. Deconvolución impulsiva

El proceso donde la ondícula sísmica es comprimida como un impulso de retardo cero (*zero-lag spike*) es llamado deconvolución impulsiva (Yilmaz, 2001).

Este tipo de deconvolución equilibra el espectro de amplitud de la componente coherente de la señal, así como la componente del ruido. Sin embargo, la componente nivelada del ruido se soluciona mediante la aplicación de un filtro. Es decir, se filtra la mayor cantidad de ruido antes de la deconvolución, o después de haber balanceado los espectros, tanto de la señal como del ruido (Rodríguez, 2004).

3.14. Deconvolución predictiva

La deconvolución predictiva emplea la información de la parte inicial perteneciente a la traza sísmica para predecir y deconvolucionar la parte posterior de la traza (Sheriff, 2002). Peacock y Treitel (1969) establecen que la deconvolución predictiva intenta eliminar los efectos de los múltiples y/o reverberaciones, los cuales pueden ser predichos desde el conocimiento de los tiempos de llegada de las reflexiones principales, asociados a los mismos reflectores. Los operadores de la deconvolución predictiva se asocian al *gap* o distancia de predicción, definido como el tiempo doble de viaje del primer reflector generador de múltiples (Sheriff y Geldart, 1995).

3.15. Deconvolución consistente con superficie

Taner y Koehler (1981) definen los procesos consistentes con superficie como una descomposición de los efectos convolucionales en la señal (fuente, receptor, offset). La suposición de una deconvolución consistente con superficie establece que la forma de la ondícula depende, únicamente, de la ubicación de la fuente y receptores.

La deconvolución consistente con superficie, posee tres usos reconocidos (Levin, 1989):

- I. Reducción del ruido: la confiabilidad de la estimación se incrementa al utilizar más estadísticas. El modelo consistente con superficie suministra el valor estadístico adicional e indica que efectos deben ser descifrados para obtener estas estadísticas.

- II. Estimación de estáticas: una clave detrás de la determinación de estáticas es que la correlación cruzada de dos eventos de reflexión se maximiza cuando dichos eventos están alineados. La deconvolución actúa con el fin de balancear las trazas sísmicas, mejorando la similitud de las ondículas. Un inconveniente de la deconvolución es que normalmente se desplaza la ubicación de la ondícula a medida que mejora la similitud. Este cambio presenta un problema para la descomposición estática consistente con superficie, la cual supone que los cambios traza a traza se ajustan a un modelo consistente con superficie. Al usar deconvolución consistente con superficie, se obtiene un balanceo espectral sin sacrificar el ajuste de las estáticas a un modelo consistente con superficie.
- III. Extracción de amplitudes: la variación de amplitud con la distancia puede ser un indicador de hidrocarburos entrampados muy útil. El balanceo de amplitudes consistente con superficie es utilizado con el fin de compensar los efectos sobre las amplitudes ajenos a los cambios de los coeficientes de reflexión respecto al ángulo de incidencia. El inconveniente de la deconvolución convencional es que altera la energía de las trazas sísmicas. Reducciones en las amplitudes alrededor del 90% no son poco comunes para la deconvolución spike. Dichas reducciones son compensadas a través del reescalamiento de cada traza después de la deconvolución para corresponder con la energía que poseía previamente. La mejor manera de preservar las amplitudes relativas es balancear el espectro asociado con una deconvolución consistente con superficie para mantener las correcciones de amplitudes consistentes con superficie.

3.16. Ordenamiento por punto medio en común (CMP)

La adquisición de los datos sísmicos con cobertura múltiple es realizada en las coordenadas de fuente-receptor. El método del punto medio común es la técnica empleada con mayor uso en la actualidad ya que provee redundancia en los datos, medida como cobertura (número de trazas por bin) en el levantamiento, mejorando la calidad de la señal (Yilmaz, 2001).

El procesamiento de datos sísmicos, por otro lado, es realizado convencionalmente en las coordenadas del punto medio común – offset (distancia fuente – receptor), mostrado en la figura 22. La transformación de coordenadas requeridas se logra a través del ordenamiento los datos en registros agrupados por CMP. Basados en la información de la geometría de campo, cada traza individual es asignada al punto medio entre las ubicaciones de la fuente y el receptor asociado con esa traza. Esas trazas con la misma ubicación del punto medio son agrupadas juntas, generando así un registro agrupado por CMP (Yilmaz, 2001).

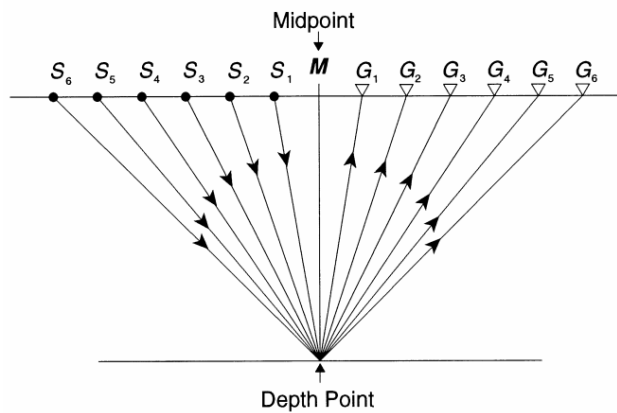


Figura 22. Trayectoria de rayos asociado con un registro agrupado por CMP ubicados en un punto medio común definido a través de las coordenadas del punto medio y la distancia fuente - receptor (tomado de Yilmaz, 2001).

El agrupamiento por punto común en profundidad difiere del agrupamiento por punto medio en común si existe buzamiento o cambio lateral de velocidades (Sheriff, 2002).

A pesar de que este método permite incrementar la relación señal – ruido a través del apilamiento de las trazas correspondientes a un mismo punto medio en común, cuantitativamente, altera el coeficiente de reflectividad de la traza resultante, evitando una preservación en las amplitudes sísmicas, pudiendo así generar falsos eventos sísmicos.

3.17. Tipos de velocidades

La “velocidad” producida en procesamiento posee las dimensiones de velocidad reales del medio. Sin embargo, dicha velocidad de procesamiento está vagamente asociada a la del subsuelo. El tipo de “velocidad de procesamiento” comúnmente empleada es conocida en la industria como velocidad de apilamiento. Aunque este término es genérico, usualmente, se refiere al parámetro que produce el apilamiento con mayor coherencia, el cual es el valor utilizado como un estimado de la velocidad RMS en el subsuelo. Sin embargo, valerse del término velocidad de apilamiento es poco concluyente. El término correcto a emplear es velocidad de máxima coherencia o velocidad MCS. Esta velocidad sirve para el apilamiento de secciones sísmicas, procesamiento preliminar de migración y/o estimación de velocidad RMS (Al-Chalabi, 1979).

La velocidad RMS se define para una serie de estratos paralelos de velocidad V_i , donde el tiempo de viaje para la energía sísmica perpendicular a través de cada velocidad es t_i . Ésta se define a través de la ecuación 12 cuando la trayectoria de viaje es perpendicular a los estratos (Sheriff, 2002).

$$V_{rms} = [(\sum V_i^2 t_i) / \sum t_i]^{1/2} \text{ (Ecuación 12)}$$

Esta es la primera aproximación a la velocidad de máxima coherencia de apilamiento (MCS, sus siglas en inglés), y está simple y directamente relacionada al intervalo de promedio de las velocidades (Al-Chalabi, 1979).

Otro tipo de velocidad es la promedio. La velocidad promedio (ecuación 13) para una profundidad particular es simplemente la profundidad dividida por el tiempo. Esta es requerida al momento de convertir los datos sísmicos de tiempo a profundidad (Al-Chalabi, 1979).

$$\bar{V} = \frac{\int_0^t V(t) dt}{\int_0^t dt} \text{ (Ecuación 13)}$$

Finalmente, se tiene la velocidad interválica. Dicha velocidad corresponde con la velocidad medida en un intervalo en el subsuelo al determinar el tiempo de viaje de la

onda sobre un intervalo de profundidad a lo largo de la trayectoria de un rayo (Sheriff, 2002).

3.18. Análisis de velocidad

Para poder proporcionar una relación señal – ruido optimizada, la sísmica de cobertura multicanal requiere información acertada sobre la velocidad del subsuelo, obtenida mediante un análisis de velocidad (Rodríguez, 2012)

El análisis de velocidad es realizado utilizando un registro de trazas agrupadas por punto medio en común (CMP gather) o un conjunto de los mismos. La salida de un análisis de velocidad es una tabla de números representada como una función de velocidad versus el tiempo doble zero – offset, conocido como espectro de velocidad. Estos números representan alguna medida de la coherencia de la señal a lo largo de las trayectorias hiperbólicas gobernadas por la velocidad, distancia fuente – receptor y tiempos de viaje. Las funciones de velocidad seleccionadas para el análisis, luego, son interpoladas espacialmente entre dichas ubicaciones para crear un campo de velocidad. Este campo de velocidad es luego utilizado para proveer una función de velocidad para cada registro por punto medio en común a lo largo del perfil (Yilmaz, 2001).

En áreas donde existe complejidad estructural, el espectro de velocidad usualmente falla en proporcionar precisión en la selección de velocidades. En este caso, los datos son apilados con un rango de velocidades constantes, y los apilados por velocidades constantes (CVS) son empleados en la selección de velocidades (Yilmaz, 2001).

Las velocidades de apilamiento se estiman a partir de los registros agrupados por puntos medio en común (CMP gather) a través de la evaluación del evento apilado respecto a la amplitud y continuidad, cuando una única velocidad es usada para la corrección NMO en todos los tiempos de grabación. De manera tal, se usa un rango definido de varias velocidades. Teniendo los resultados, la velocidades de apilamientos son seleccionadas directamente de estos paneles, en donde la selección

depende de la mejor coherencia y de las más fuertes amplitudes para la velocidad en determinados tiempos (Gadallah y Fisher, 2009).

3.19. Tipos de análisis de velocidad

3.19.1. Apilamiento por velocidades constantes (CVS)

El método consiste en realizar apilados de prueba suponiendo varias velocidades de prueba que son constantes en tiempo y espacio, para determinar las velocidades de apilamiento que generen el mejor resultado (Sheriff, 2002).

Debe ser empleado con cuidado el método de apilamiento por velocidad constante. Existen dos aspectos a considerar además del rango esperado de velocidades en el subsuelo:

1. El rango de velocidades necesario para apilar los datos.
2. El intervalo de las velocidades de prueba para el apilamiento.

En la elección del rango, se debe considerar el hecho que los eventos buzantes deberían tener velocidades de apilamiento anormalmente grandes. En la elección del espaciamiento de velocidades constantes, se debe mantener en mente el desplazamiento (*moveout*), no la velocidad, la cual es la base para la estimación de la velocidad (Yilmaz, 2001).

3.19.2. Análisis t^2 - x^2

El método t^2 - x^2 es una manera confiable para estimar las velocidades de apilamiento. La precisión del método depende de la relación señal – ruido, afectando directamente la calidad de la selección de velocidades (Yilmaz, 2001).

La ecuación 14 describe la línea en el plano $t^2 - x^2$ (figura 23):

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{t^2}{v_{NMO}^2}, \text{ (Ecuación 14)}$$

La pendiente de la línea es $\frac{1}{v_{NMO}^2}$ y el valor de intercepto, cuando $x = 0$ es igual a t_0 .

Para encontrar la velocidad de apilamiento para un evento dado, los puntos correspondientes a dicho evento deben estar conectados por una línea recta. El inverso de la pendiente corresponde con la velocidad de apilamiento (Yilmaz, 2001).

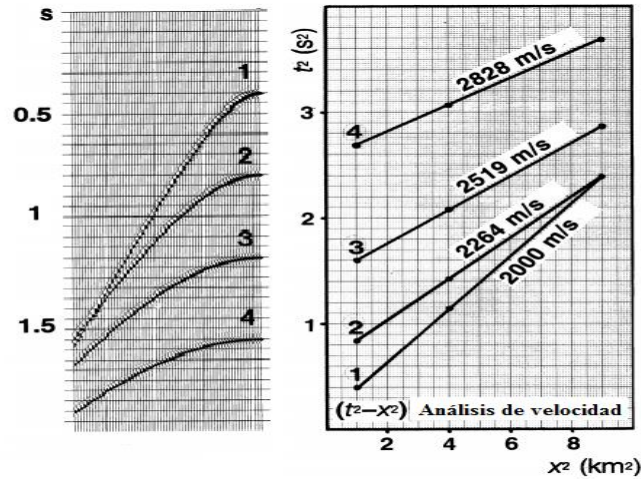


Figura 23. Análisis de velocidad $t^2 - x^2$ aplicado a un gather sintético (modificado de Yilmaz, 2001)

En este método, los tiempos T seleccionados de reflexiones principales sobre cada traza son elevados al cuadrado y graficados contra el cuadrado de la distancia offset (fuente – receptor), correspondiente a las trazas en las cuales fueron tomados (Sánchez, 2014)

3.19.3. Espectro de velocidad

A diferencia del método CVS, el espectro de velocidad se basa en la correlación cruzada de la trazas en un registro agrupado por puntos medios común (Yilmaz, 2001)

Es una representación gráfica del valor de coherencia como una función del tiempo variando a lo largo de un eje de las ordenadas y la velocidad variando en el eje de las abscisas. A su vez, suelen estar acompañados por tablas numéricas de los valores de coherencia medida para verificar la velocidad de máxima afinidad estimada en la imagen (figura 24) (Al-Chalabi, 1994). El proceso corresponde con la identificación

de la mayor coherencia asociada a las reflexiones primarias. En la figura 24, las velocidades cuya coherencia está asociada a las reflexiones primarias es reflejada en la escala de colores, donde el color rojo establece la coherencia adecuada para la selección de la velocidad mientras que el color azul define todo lo contrario. (Yilmaz, 2001).

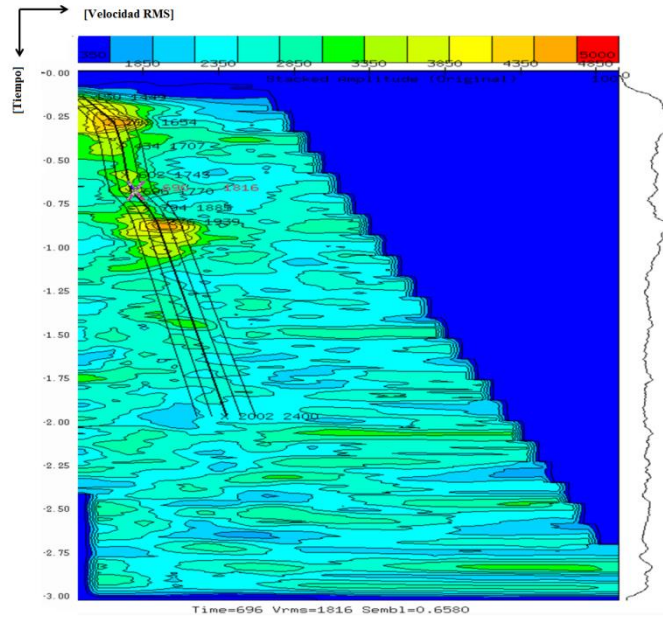


Figura 24. Espectro de velocidad de un registro agrupado por punto medio común

3.20. Corrección *normal moveout* (NMO)

El *normal moveout* (NMO) es la diferencia en el tiempo de llegada de la reflexión debido a la distancia fuente – receptor (offset), donde el receptor no está ubicado sobre el punto fuente (Sheriff, 2002).

Ésta depende de la velocidad por encima del reflector, distancia fuente receptor, tiempo doble de viaje zero – offset asociado con el reflector, buzamiento del reflector, azimuth de la fuente respecto a la verdadera dirección de buzamiento, grado de complejidad cerca de la superficie y el medio por encima del reflector (Yilmaz, 2001).

Suele ser aplicada a registros agrupados por puntos medio en común (CMP gathers), donde es el tiempo de viaje adicional requerido debido al offset, suponiendo que el reflector no esté buzando y la trayectorias de los rayos sean líneas rectas, donde esto lleva a reflexiones con formas de hipérbola a una posición plana (figura 25) (Sheriff, 2002).

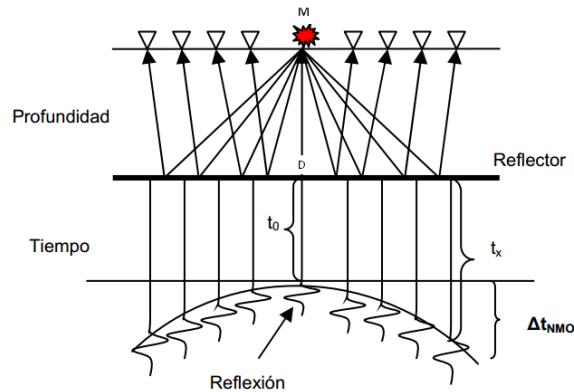


Figura 25. Tendido sísmico con registro sísmico respectivo para una capa plana (tomado de González y Velásquez, 2008)

Para un reflector plano, partiendo del teorema de Pitágoras, la ecuación del tiempo de viaje en función de la distancia fuente – receptor (offset) está dada por la ecuación 15.

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \text{ (Ecuación 15)}$$

Donde x es el offset, v es la velocidad del medio encima del reflector y t_0 es el doble del tiempo de viaje a lo largo de la trayectoria vertical MD. La ecuación 16 describe una hipérbola en el plano de tiempo doble de viaje versus offset.

Por tanto, la corrección NMO está dada por la diferencia entre t y t_0 (ecuación 16):

$$\Delta t_{NMO} = t - t_0 \text{ (Ecuación 16)}$$

O, por su homólogo (ecuación 17),

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{v_{NMO} \cdot t_0} \right)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 17})$$

Para un reflector plano con un medio homogéneo superpuesto, la hipérbola de reflexión puede ser corregida para cierto offset si es utilizada la velocidad correcta del medio en la ecuación de la corrección NMO. Si la velocidad NMO utilizada es muy alta, subcorrige la hipérbola de reflexión, y si la velocidad es baja, sobrecorrige la hipérbola de reflexión (figura 26) (Yilmaz, 2001).

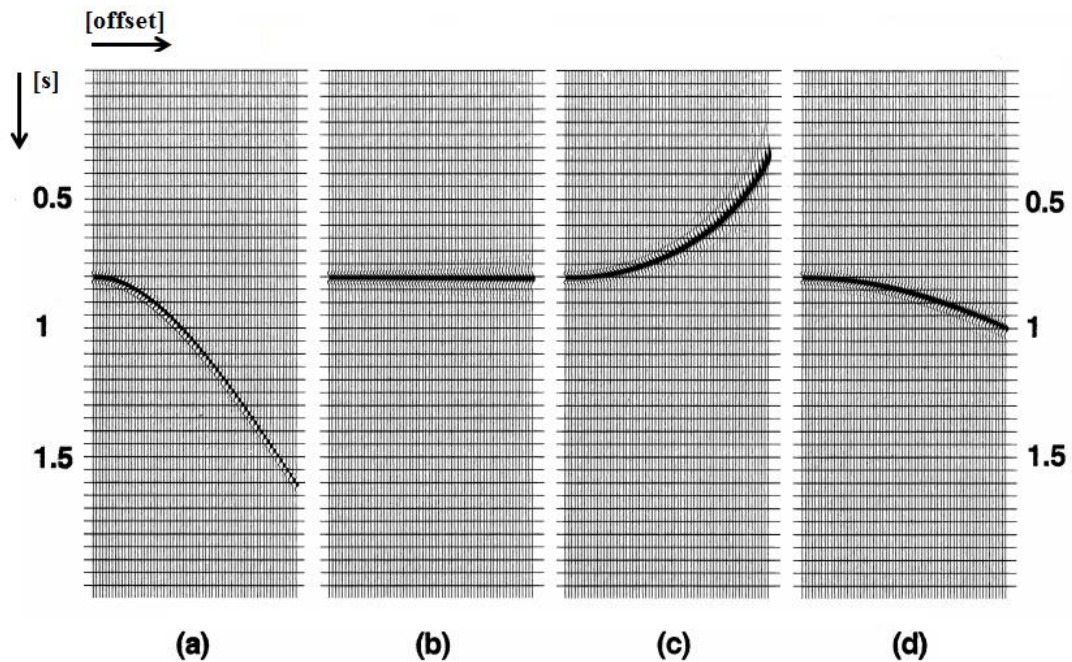


Figura 26. (a) CMP gather representando un solo evento (b) CMP gather corregido por NMO usando la velocidad NMO apropiada (c) CMP gather sobrecorregido debido al uso de una velocidad NMO baja (d) CMP gather subcorregido debido al uso de una velocidad NMO alta (tomado de Yilmaz, 2001).

3.21. Semblanza

El análisis de velocidad para la corrección NMO utilizando el espectro de semblanza (Taner y Koehler, 1969) es un paso primordial para la construcción del modelo de velocidades.

La semblanza es una medida de coherencia en el dominio del tiempo asociada directamente a una relación de energía de entrada y salida apropiadamente definida. En la figura 27, la escala de colores es similar a la figura 24, las velocidades que poseen mayor coherencia están asociadas al color rojo mientras que el color azul está asociado a las velocidades con menor coherencia. Dichas medidas de coherencia expresan en forma cuantitativa el parecido de los datos entre los canales. Claramente, deben proveer información relevante acerca del objetivo, ya sea del objetivo o algún elemento asociado a los datos que permita cumplir la meta, tal como: energía, entropía, estadística, entre otros (Neidell y Taner, 1971).

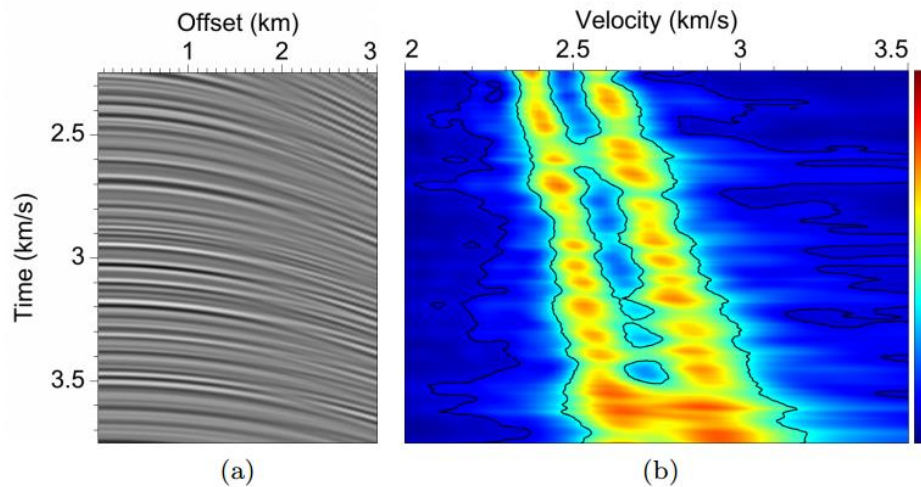


Figura 27. Registro sintético agrupado por punto medio en común (a) y (b) semblanza convencional (modificado de Luo y Hale, 2012).

Es un coeficiente de coherencia normalizado cuya sensibilidad a los cambios en la velocidad puede incrementar la resolución del espectro de velocidad correspondiente (Luo y Hale, 2012). La semblanza es usada rutinariamente para estimar la velocidad NMO como una función de tiempo cero-offset. Tomando en cuenta la corrección NMO de un CMP gather, la semblanza definida por Neidell y Taner puede ser calculada por la ecuación 18.

$$s_{NT}[i] = \frac{\sum_{j=i-M}^{i+M} (\sum_{k=0}^{N-1} q[j,k])^2}{N \cdot \sum_{j=i-M}^{i+M} \sum_{k=0}^{N-1} q[j,k]^2} \quad (\text{ecuación 18})$$

Donde i y j son índices de las muestras de tiempo, k es el número de la traza y $q[j, k]$ es la amplitud de la traza en el índice de tiempo j y el número de la traza k del gather corregido por NMO. Las sumas internas sobre k corresponden a la cantidad N de trazas corregidas por NMO en un CMP gather, mientras que las sumas externas corresponden la ventana de suavizado en tiempo que poseen una longitud de $2M + 1$ centrado en el índice de tiempo i . El suavizado en tiempo es realizado con un filtro de caja (Luo y Hale, 2012).

El filtro para suavizar en el dominio del tiempo puede ser representado a través de la adición de una función de peso $h[j]$. Por tanto, se puede reescribir la ecuación 18 de semblanza definida por Neidell y Tanner en la ecuación 19.

$$s_c[i] = \frac{\sum_j h[i-j] (\sum_k q[j,k])^2}{N \cdot \sum_j h[i-j] \sum_k q[j,k]^2} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde se supone que los límites no especificados de las sumatorias incluyen todos los índices para los cuales los términos de la sumatoria están definidos.

El valor de la semblanza refleja cuan bien el desplazamiento de la trayectoria hiperbólica (*moveout*) se ajusta tras la aplicación de la velocidad NMO (\vec{v}_{NMO}) correspondiente. La selección de una velocidad NMO correcta produce un ajuste en el espectro de semblanza, y de manera contraria, produce valores de semblanza cercanos a cero. Suponiendo las ausencias de ruido y variaciones en amplitudes respecto al offset, la semblanza es maximizada cuando los valores de $q[j, k]$ no varían respecto al índice k . Siendo así, $s[i] = 1$ cuando los eventos corregidos por NMO representados por las trazas están alineados en un tiempo de índice i (Luo y Hale, 2012).

3.22. Enmudecimiento

Es un proceso que permite cambiar la contribución relativa de las componentes de un apilado con tiempo de grabación. En general, las trazas de offset largo son enmudecidas en la parte inicial del registro debido a que están dominadas por las llegadas de ondas refractadas o porque su contenido de frecuencia luego de la corrección NMO es, apreciablemente, menor comparada a las demás trazas. Enmudecer puede ser un proceso tanto gradual como abrupto, y puede distorsionar el diseño para la deconvolución u otros operadores. También puede ser aplicado a ciertos intervalos de tiempo para mantener al cono de ruido, ondas de aire o el ruido, fuera de la sección apilada (Sheriff, 2002).

3.23. Apilamiento

Una característica típica de los datos obtenidos para la exploración de petróleo y/o gas, es la presencia de una relación señal – ruido muy pobre debido no solamente a los eventos coherentes como ondas superficiales sino también a ruido sin relación alguna. Una tarea importante en el procesamiento sísmico es incrementar la relación señal ruido a través del ordenamiento por puntos medios en común (CMP) y el apilamiento. Con el apilamiento (figura 28), se suman las trazas corregidas por NMO en un mismo CMP gather para generar una traza de salida con menor ruido y mayor cantidad de señal. Sin embargo, se promedian los diferentes ángulos de incidencia de las ondas, incluso en medios estratificados horizontalmente, lo que conlleva a una pérdida de información en el coeficiente de reflexión, ya que el mismo es dependiente de dichos ángulo. Por tanto, la sección apilada contendrá la información del ángulo de incidencia promedio dependiente en la reflexión (Drijkoningen y Verschuur, 2003).

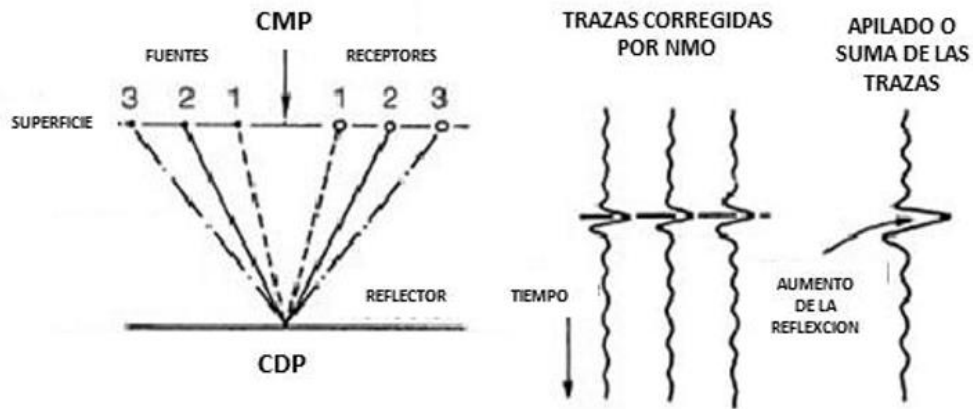
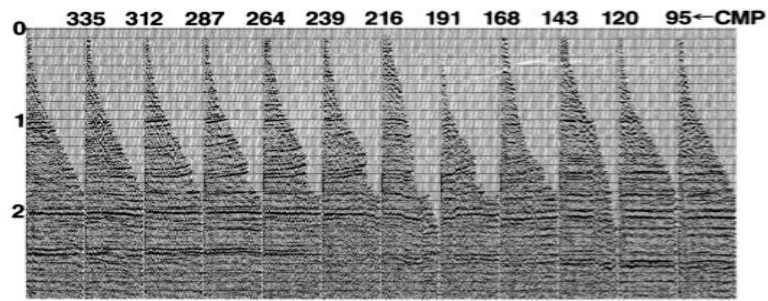


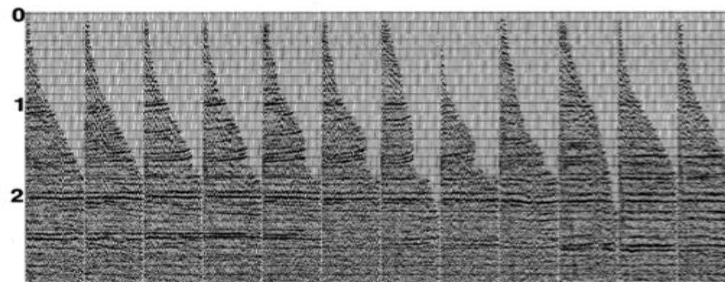
Figura 28. Apilado de trazas para un mismo CMP (tomado de Benítez, 2012)

3.24. Estáticas residuales

Se les suele llamar “estáticas residuales” a los tiempos anómalos presentes en los registros sísmicos, originados por gradientes laterales de velocidad cercanos a la superficie, así como aquellos causados por irregularidades en la topografía de la capa meteorizada, y que no pudieron ser eliminados mediante las correcciones estáticas de campo. El efecto de este fenómeno superficial se refleja en una pérdida de la coherencia de los eventos apilados en las secciones sísmicas, introduciendo estructuras geológicas ficticias, así como falsos indicadores de la presencia de hidrocarburos (figura 29) (Quiroga-Goode y Fernández, 1990)



(a)



(b)

Figura 29. CMP gathers de un perfil en tierra, donde (a) representa el perfil sin estáticas residuales aplicadas y (b) representa el perfil con estáticas residuales aplicadas (tomado de Yilmaz, 2001).

Las correcciones estáticas residuales, a diferencia de las correcciones estáticas de campo, se basan en un proceso computacional automatizado que logra su efectividad debido a la estadística de un problema (en los tiempos de reflexión), por lo que este proceso mejora conforme mayor sea la multiplicidad, esto es, conforme aumente el porcentaje de apilamiento del levantamiento sísmico (Quiroga-Goode y Fernandez, 1990).

3.25. Correcciones consistentes con superficie

Las amplitudes de las reflexiones en los registros sísmicos han sido investigadas a lo largo de las décadas. Cualquier cambio de amplitud o comportamiento anómalo es considerado significativo, entonces es importante que las zonas de interés definidas

en los registros sísmicos estén libres de perturbaciones externas, tales como las causadas por las capas someras (Taner y Koehler, 1981).

Sheriff (1973) examinó los factores que afectan las amplitudes de los datos sísmicos, dividiéndolos en: fuente, receptor, offset y componentes en el subsuelo, y a su vez estos pueden ser divididos a su vez en factores de amplitud y fase.

Es conocido que las características cercanas a la superficie no generan únicamente retardos o decaimiento en las amplitudes sino también un efecto complejo de filtrado dependiente de la frecuencia variante en el tiempo. Dicho efecto no está confinado a la parte somera de la sección sísmica, sino también a lo largo de los datos como energía reflejada de capas profundas que atraviesan la superficie dos veces mientras viajan de la fuente al reflector y del reflector al geófono (Taner y Koehler, 1981).

Para realizar el análisis de los efectos superficiales es necesario organizar las trazas asociado a un sistema de coordenadas donde cada traza está definida por las coordenadas de su fuente y receptor, conocido como diagrama de superficie y utilizado por Morgan (1970), Shah (1973) y Taner et al (1974).

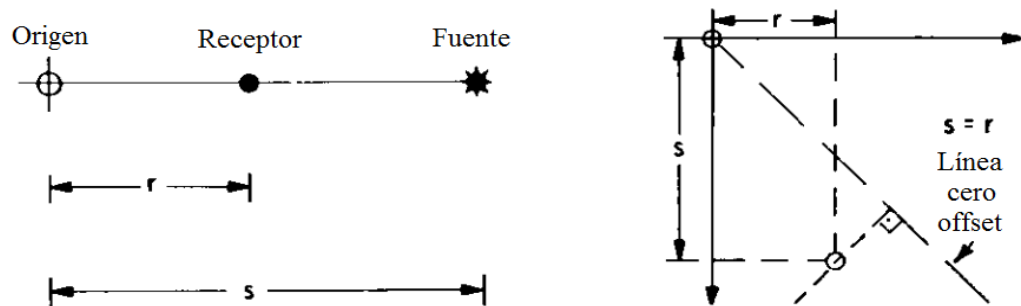


Figura 30. Ubicación de fuentes y receptores; (a) a lo largo de la línea sísmica y (b) en el diagrama de superficie (modificado de Taner y Koehler, 1981).

Normalmente, los datos sísmicos son grabados a lo largo de líneas, en tal caso, es sencillo utilizar únicamente las distancias a lo largo de la línea desde el origen a la fuente y al receptor como dos coordenadas de la traza. La figura 30 muestra las

posiciones de la fuente y receptor a lo largo de la línea que corresponden como un punto (s,r) en el diagrama de superficie establecido en la figura 31,

En la figura 31, se definen las organizaciones de trazas principales para correcciones consistentes con superficie.

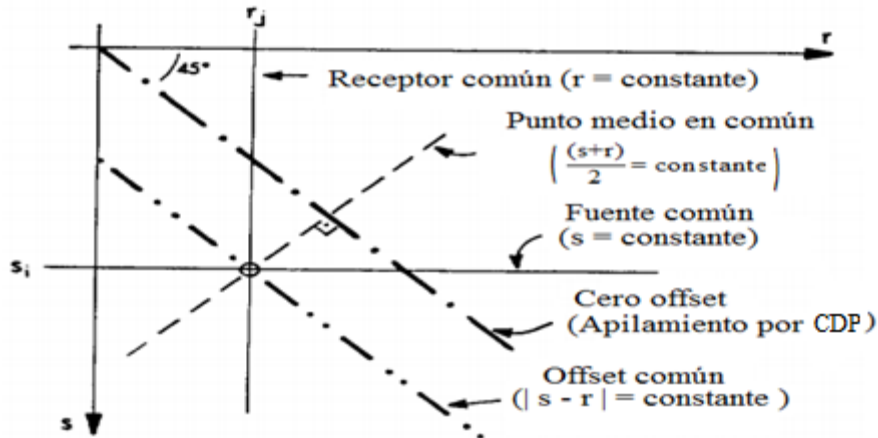


Figura 31. Diagrama de superficie y organizaciones principales de las trazas (modificado de Taner y Koehler, 1981)

Dónde:

1. Trazas con fuente común donde s (fuente) es constante y r (receptor) varía, las trazas son una línea paralela al eje de los receptores.
2. Trazas con receptor común donde r (receptor) es constante y s (fuente) varía, las trazas son paralelas al eje de las fuentes.
3. Trazas con offset común donde $l = (s - r)$ es constante, las trazas se encuentran en líneas que forman ángulo de 45 grados con los ejes.
4. Trazas con punto medio en común donde $k = \frac{(s+r)}{2}$ es constante, las trazas estarán sobre líneas perpendiculares a las líneas con offset común.

Las correcciones consistentes con superficie buscan corregir los efectos sobre las amplitudes de las trazas por los diversos factores mencionados anteriormente. Y por

ello, se establecen las siguientes suposiciones con el fin de realizar dichas correcciones con grado de razonabilidad y facilidad computacional (Taner y Koehler, 1981):

1. Factores debido a los efectos someros son constantes a lo largo del tiempo de grabación, estos incluyen la respuesta de la fuente, acoplamiento de la fuente, atenuación de las capas superficiales, sensibilidad del geófono y acoplamiento del geófono.
2. Factores que se mantienen constantes en el tiempo también son consistentes con superficie. Esto quiere decir que los efectos asociados a una posición particular en la superficie se mantiene constante a pesar de la trayectoria de la onda.
3. El agrupamiento de puntos comunes en profundidad (CDP) es válido. Todas las trazas agrupadas por CDP en una posición en particular contienen la misma información del subsuelo.
4. Las correcciones por divergencia esférica, NMO (*Normal Moveout*) y estáticas de campo (elevación y refracción) deben ser aplicadas para eliminar la mayoría de las correcciones de amplitud y tiempo de llegadas para que dentro de la ventana de tiempo todas las trazas agrupadas por CDP satisfagan las suposiciones previas.

Basado en las suposiciones previas, se pueden separar los factores consistentes con superficie en las siguientes categorías:

1. $S_n(\omega)$: Respuesta de la fuente en una posición n de la superficie. También corresponde con los efectos someros impuestos sobre el frente de ondas que viaja hacia abajo.
2. $R_m(\omega)$: Respuesta del receptor en una posición m de la superficie. También corresponde con la influencia de la superficie en el viaje hacia arriba del frente de onda reflejado.

3. $C_k(\omega)$: Respuesta del subsuelo debajo de una posición k en la superficie. Representa la respuesta de todas las trazas con un punto medio en común $k = (\frac{m+n}{2})$
4. $D_l(\omega)$: Respuesta del offset en una posición l , donde $l = m - n$. Esto representa respuestas asociadas al offset tal como respuesta del cable de grabación, efectos de divergencia geométrica asociadas a offset o efectos residuales NMO.

Basado en las suposiciones anteriores, una traza sísmica grabada en una posición m de un receptor con la posición n de una fuente puede ser descrita en el dominio de la frecuencia como el producto de los siguientes factores (ecuación 20):

$$F_{nm}(\omega) = S_n(\omega) \cdot R_m(\omega) \cdot C_k(\omega) \cdot D_l(\omega) \text{ (Ecuación 20)}$$

Donde, el objetivo de las estáticas consistentes con superficie es determinar $C_k(\omega)$, la respuesta del subsuelo deseada con el fin de realizar una corrección de amplitudes al multiplicar dicho factor sobre cada una de las trazas.

3.26. Correcciones estáticas residuales consistentes con superficie

El término consistente con superficie establece que los cambios estáticos son retrasos en el tiempo dependientes de la localización en superficie de la fuente y receptor, no guarda relación con la trayectoria del rayo a través del subsuelo. Tal suposición es válida si todos las trayectorias de los rayos, sin importar la distancia fuente – receptor, son verticales dentro de la capa meteorizada. La suposición consistente con superficie es buena, usualmente, debido a que la baja velocidad de la capa superficial y su fuerte refracción en la base de la capa favorecen trayectorias de viaje verticales. Sin embargo, no es correcto suponer lo anterior si existe una capa de alta velocidad ya que puede hacer que la trayectoria del rayo se desvíe de la vertical (Yilmaz, 2001).

El tiempo de viaje seleccionado t_{ij} corresponde con la j -ésima estación fuente, i -ésima estación receptora y la k -ésimo punto medio ($[k = \frac{i+j}{2}]$) a lo largo de un

horizonte con tiempo de reflexión en específico (h) puede ser modelado por la ecuación 21 (Taner et al., 1974).

$$t'_{ij} = s_j + r_i + G_k + M_k x_{ij}^2 \text{ (Ecuación 21)}$$

Donde s_j es el desplazamiento estático residual en tiempo asociado con la j-ésima estación fuente, r_i es el desplazamiento estático residual en tiempo asociado con la i-ésima estación receptora, G_k es la diferencia en el tiempo doble de viaje en una ubicación CMP de referencia a lo largo del h-ésimo horizonte y $M_k x_{ij}^2$ es el *moveout* residual de trayectoria parabólica.

Las correcciones estáticas residuales consistentes con superficie involucran tres fases (Yilmaz, 2001):

- a. Desviaciones en la selección de los tiempos de viaje (t_{ij}), basadas en la correlación cruzada de las trazas en un CMP gather con una traza de referencia o traza piloto que necesita ser definida de alguna manera.
- b. Modelar t_{ij} a través de la ecuación 21 y la descomposición de la misma en sus componentes (estáticas de fuentes y receptores, término *moveout* estructural, término *moveout* residual)
- c. Aplicar los términos de fuente y receptor derivados a los tiempos de viaje en los CMP gathers antes de ser corregidos por NMO.

3.27. Migración

La energía sísmica de reflexión no migrada grabada en la superficie del subsuelo, por ejemplo en forma de registros por offset común, a menudo suministra una imagen notablemente coherente de la estructura del subsuelo. A pesar de parecer coherente, esta imagen no es correcta debido a la distorsión por varios efectos, por ejemplo, aquellas difracciones generadas por truncaciones en los estratos geológicos o el movimiento natural de la energía entre dos puntos de reflexión sobre estratos buzantes y la superficie, por ende, es necesario corregir dichas distorsiones (Gray, 2001).

La migración es el proceso que se encarga de mover los reflectores buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y colapsar las difracciones, así mismo, esto incrementa la resolución espacial y genera una imagen sísmica aproximada al arreglo geológico en el subsuelo (Yilmaz, 2001). En procesamiento, se supone que los estratos son interfaces planas homogéneas e isotrópicas, no obstante, esto no representa la realidad en el subsuelo, dando como resultado reflexiones que no se encuentran en su verdadera posición ni en su verdadero tiempo (Jones et al, 2008).

Por tanto, el objetivo de la migración es hacer que la sección apilada se parezca a la sección geológica en profundidad a lo largo de un perfil sísmico. La sección migrada, usualmente, es presentada en tiempo debido a la limitación que existe para calcular la velocidad a partir de la sísmica y otros métodos, por ende, realizar una migración en profundidad no es completamente exacta. Otra razón para presentar una migración en tiempo corresponde con la validación de las secciones migradas al compararla con los datos antes de haber sido migrados (Yilmaz, 2001).

Existen varios tipos de migración, las cuales cubren diferentes necesidades, ya sea por: ruido, aliasing, complejidad estructural y/o geológica, cambio variable de velocidad, etc (Bancroft, 2007).

Este proceso depende de la selección apropiada de una estrategia de migración, un algoritmo compatible con dicha estrategia, establecer los parámetros apropiados para el algoritmo, los datos de entrada y las velocidades de migración (Yilmaz, 2001). Las estrategias de migración se pueden clasificar en dos (2) criterios: en función a como se aplica el modelo de velocidades (migración en tiempo o en profundidad) o en función al dominio que se realiza la migración (migración antes del apilamiento o migración después del apilamiento) (Tolozá, 2014).

No obstante, estos criterios están desligados uno del otro, permitiendo su combinación para establecer cuatro posibles estrategias, dependiendo de la situación, tales como (figura 32):

- Migración aplicada antes del apilamiento en el dominio del tiempo

- Migración aplicada antes del apilamiento en el dominio de la profundidad
- Migración aplicada después del apilamiento en el dominio del tiempo
- Migración aplicada después del apilamiento en el dominio de la profundidad

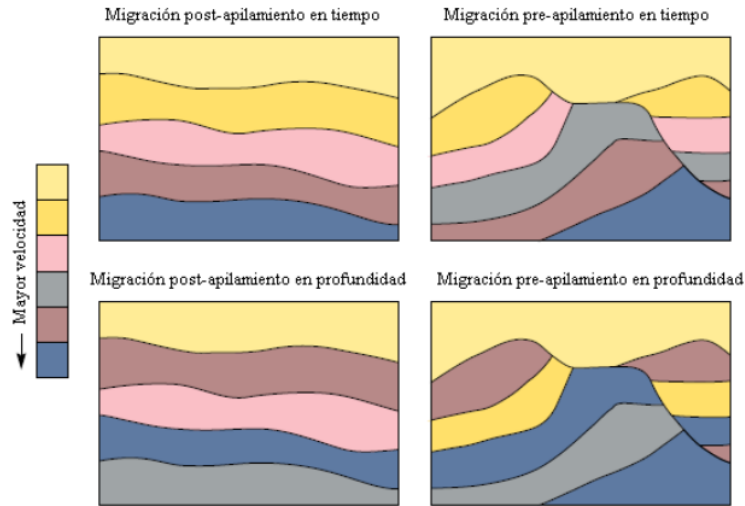


Figura 32. Estrategias adecuadas de migración según contexto geológico para su aplicación (Albertin et al, 2002)

A pesar de que es correcta la idea de trabajar en el dominio de la profundidad, esto puede dificultar la habilidad del geofísico al momento de interpretar. Por ejemplo en áreas carentes de información es difícil relacionar los reflectores no migrados con sus contrapartes en el registro migrado. Por tanto, se tiene la migración en el dominio del tiempo (migración en tiempo) y la migración en el dominio de la profundidad (migración en profundidad), su diferencia entre ellas es más que superficial. La migración en tiempo, normalmente es más sencilla de realizar que la migración en profundidad debido a que ésta requiere menos precisión al momento de especificar las velocidades de migración, lo que permite emplear métodos para realizar una migración menos costosa y menos precisa. Por otro lado, suministra menos apilamiento que la migración en profundidad no solo para generar una imagen del subsuelo sino también para estimar velocidades sísmicas del subsuelo (Gray, 2001).

La diferencia resaltante entre las acciones asociadas a la migración en tiempo y profundidad reside en como utilizan las velocidades. La migración en tiempo, siguiendo la metodología tradicional de NMO y apilamiento, emplea un campo de velocidades para la formación de imágenes, es decir, un campo que enfoque mejor la imagen migrada en cada línea a procesar. Este campo de velocidad es libre de cambiar punto a punto, permitiendo que en el dominio del tiempo, en esencia, sea realizada una migración con velocidad constante en cada punto de la imagen, donde la constante varía a medida que avanza. Por otro lado, la migración en profundidad utiliza un campo de velocidad interválico, es decir, un modelo del subsuelo. Las velocidades interválicas son promedios de las velocidades reales del subsuelo, dicho promedio es obtenido sobre cierta distancia característica, como por ejemplo, la longitud de onda, permitiendo que la migración modele el comportamiento de la onda sísmica dentro del subsuelo con mayor precisión que la migración en tiempo. En particular, puede emplearse como una herramienta para la determinación de velocidades (Gray et al., 2001).

En el dominio del pre – apilamiento, la migración genera una imagen de la reflectividad del subsuelo directamente de los datos sísmicos antes de ser apilados, tomando en cuenta los frentes de ondas que bajan y suben en el subsuelo para poder ubicar los eventos en su verdadera posición (Claerbout, 2009). Dicha migración puede manejar modelos con alto grado de complejidad tanto en la parte estructural como en el campo de velocidades (Farmer et al, 1996). Por otro lado, la migración aplicada después del apilamiento ha sido una técnica utilizada para reducir el volumen de los datos, reduciendo tiempo de cómputo y costos operacionales a través de la realización de las correcciones por NMO y buzamiento en un número amplio de trazas para luego sumarlas y convertirla en una sola traza referenciada a un punto en superficie. Este proceso de apilar un gran número de trazas en una sola simula el reemplazamiento del experimento multi-offset con uno zero-offset con un volumen de datos que puede ser migrado económicamente. Este procedimiento ha sido exitoso con el tiempo, especialmente, en áreas con una moderada complejidad estructural. Sin

embargo, se ha reconocido que la calidad de la imagen se estropea en áreas donde fuertes refracciones en la trayectoria del rayo violan las reglas para realizar el proceso de apilamiento; por ende, lo más adecuado sería la aplicación de una migración antes del apilamiento.

3.28. Migración de Kirchhoff

El método más destacado, en la actualidad, y quizás el más sencillo de entender corresponde con la migración de Kirchhoff, el cual opera sobre los datos sísmicos en el dominio del espacio – tiempo. Puede ser usado como un algoritmo para migrar en tiempo o profundidad, ostentando una versatilidad al momento de migrar cualquier conjunto de muestras en un registro previo a la aplicación de dicho proceso. Sin embargo, esto no quiere decir que sea el método más rápido o más preciso al momento de trabajar con datos que presenten aliasing (figura 33) (Gray, 2001).

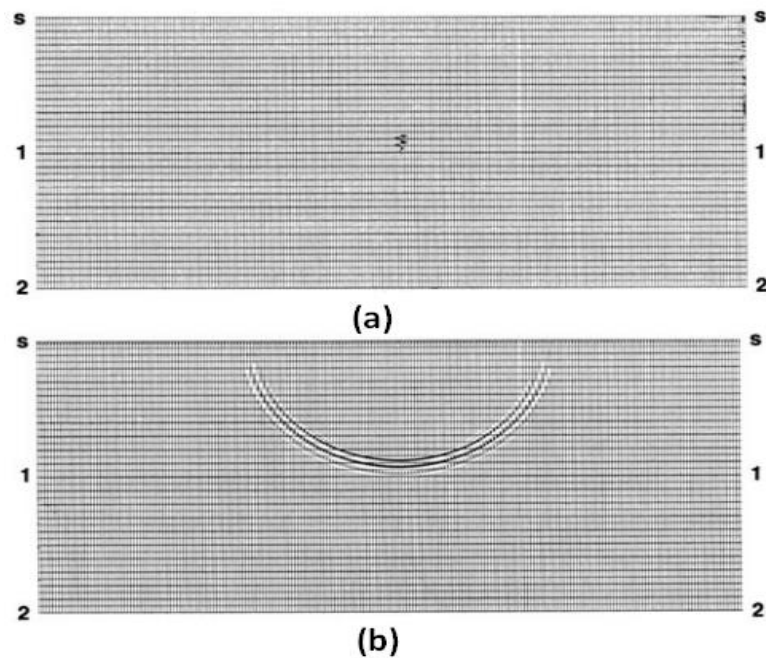


Figura 33. Principio de la migración de Kirchhoff, (a) Una sección cero offset no migrada compuesta de una sola muestra no nula en el centro de la misma. (b) Sección migrada, mostrando que el spike se distribuye en las ubicaciones en los posibles puntos de reflexión (Gray et al, 2001).

Dada la ubicación de fuentes y receptores, se tiene una muestra en un tiempo t referente a las reflexiones primarias. Suponiendo un subsuelo con velocidad constante, la ubicación de estos puntos es la mitad inferior de un elipsoide en tres dimensiones (o una elipse en dos dimensiones) con un foco en fuente como en receptor, en caso de coincidir ambos focos, el elipsoide se convierte en una esfera. Teniendo un *spike* (un solo máximo de amplitud en la traza), la migración de Kirchhoff extiende dicho valor a lo largo de todos los posibles puntos de reflexión (la parte inferior del elipsoide). Donde el algoritmo opera repetitivamente este proceso para todas las muestras en las trazas de entrada no migradas, sumando cada contribución resultante dentro del elipsoide y generando una imagen de salida (Gray et al, 2001).

Schneider (1978) facilitó una firme base de la ecuación de la onda (ecuación 22) para la migración de Kirchhoff, y Bleistein (1987) desarrolló esa teoría para incluir la capacidad de resolver la reflectividad, preparando el camino para la estimación de los parámetros después de la migración. Hablando en términos cinemáticos, lo anterior es una descripción precisa de una migración de velocidad constante.

Matemáticamente, generar imagen como salida comprende la suma de todos los datos en las ubicaciones de entrada. Por ejemplo, una migración en el dominio después del apilamiento (post-apilamiento) a nivel volumétrico (3-D) con velocidad constante genera una imagen en el punto (x,y,z) dada la siguiente ecuación:

$$P(x, y, z, t = 0) = \int W(x - x', y - y', z) \times P' \left(x', y', z = 0, t = \frac{r}{v} \right) dx' dy'$$

(Ecuación 22)

Donde W es una función de peso, v es la velocidad media, r es la distancia entre la ubicación en superficie $(x', y', 0)$ y la ubicación de la imagen (x, y, z) (Gray et al, 2001)

Los pesos (ó *weights*) en migración corresponden con los números que multiplican los valores de amplitud con el fin de destacar algunos valores por encima de otros aplicando distintas operaciones (Sheriff, 2002).

Schneider (1978) establece las ventajas y desventajas del algoritmo para realizar la migración de Kirchhoff, donde:

1. Los datos pueden ser migrados hasta 90 grados. Sin embargo, requiere precisión en las velocidades y capacidad computacional alta.
2. El algoritmo puede actuar sobre datos bidimensionales (2-D) y tridimensionales (3-D) sin aproximar a la ecuación escalar de la onda.
3. El algoritmo está desvinculado de la relación señal – ruido.

En el caso de una migración antes del apilamiento (pre-apilamiento), una salida esperada es una imagen de los reflectores del subsuelo donde el máximo de amplitud es proporcional a la reflectividad de la amplitud verdadera (Gray, 1997).

En una migración pre-apilamiento en tiempo o profundidad, los tiempos de viaje para la superficie que generan las difracciones pueden ser definidos sobre un conjunto de trazas, dividido, luego, en subconjuntos acondicionados previamente para idealizar las configuraciones de adquisición (registros por offset o disparo en común), cada uno suministrará una apertura limitada y una dependencia al ángulo u offset dada por la reflectividad del subsuelo. Entonces, una suma sobre la superficie de difracción es un promedio de la reflectividad estimada de un registro con offset o disparo en común migrado (Geiger, 2002).

Bleistein et al. (2001) presentan la migración de Kirchhoff 3-D en la ecuación 23.

$$R(x, y, z) \sim \frac{1}{8\pi^3} \iiint i\omega e^{-i\omega(\tau_s + \tau_r)} W_m \hat{U}(\xi, \eta; \omega) d\xi d\eta d\omega$$

(Ecuación 23)

Donde W_m corresponde con el peso para la migración, definida por la ecuación 24.

$$W_m = \frac{h}{A_s A_r |\nabla(\tau_s + \tau_r)|^2}$$

(Ecuación 24)

A su vez, A_s y A_r (ecuaciones 25 y 26) son las amplitudes de las funciones de Green desde la fuente y receptor, respectivamente, hasta el punto de la imagen, τ_s y τ_r corresponden con los tiempos de viaje entre la fuente y receptor, respectivamente, hasta el punto de la imagen, h es el determinante de Beylkin.

$$A_s = \sqrt{\frac{v \cdot v_0}{\cos \alpha_{s0} \psi_s \sigma_s}}$$

(Ecuación 25)

$$A_r = \sqrt{\frac{v \cdot v_0}{\cos \alpha_{r0} \psi_r \sigma_r}}$$

(ecuación 26)

Siendo α_{s0} y α_{r0} los ángulos de los rayos de fuente y receptor relativos a la vertical en superficie.

3.29. Apertura de migración

La región espacial sobre la cual se realiza el apilamiento de una hipérbola de difracción es denominada apertura de migración (figura 34) (Sun, 2000), dicho parámetro afecta la calidad y el rendimiento del algoritmo de Kichhoff al momento de migrar los datos para generar la imagen sísmica.

Sumar trazas a lo largo de una curva de difracción o apilarlas bajo una apertura es el principio de la migración de Kirchhoff. La migración debe incluir la apertura (trazas de salida) en todas las profundidades, incluso si no hay energía presente en la superficie de grabación en esas ubicaciones (Gray et al, 2001).

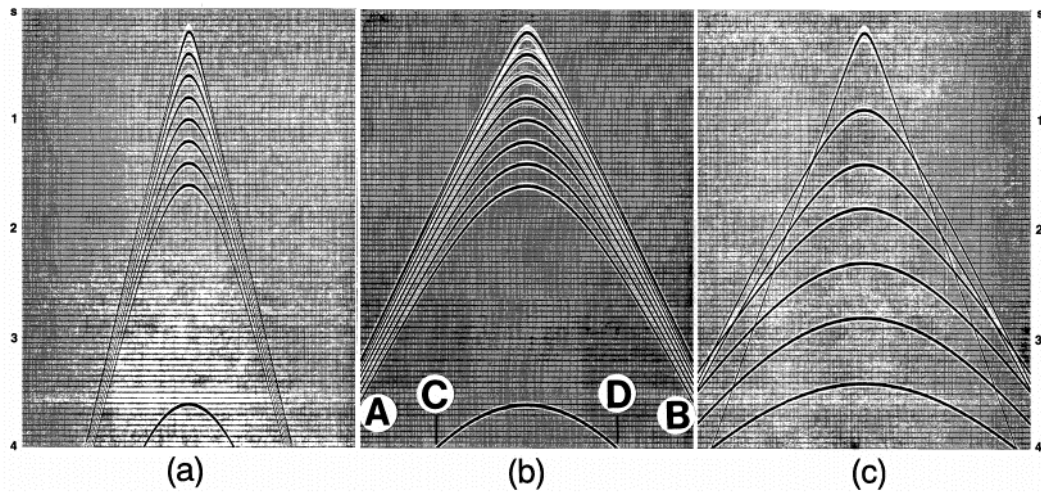


Figura 34. Secciones migradas con distintas aperturas de migración (a) apertura angosta (b) apertura ancha (c) apertura intermedia

Si la migración se lleva a cabo empleando una apertura finita, se le denomina apertura de migración limitada (LAM, siglas en inglés). Por tanto, un operador LAM da como resultado una imagen migrada que depende del tamaño y ubicación de la apertura de migración. Si la apertura de migración está posicionada incorrectamente y no posee el tamaño suficiente, una reconstrucción en amplitud verdadera es imposible de lograr. Igualmente, la función de pesos, descrita en la literatura, con el fin de recuperar amplitudes verdaderas, en los puntos finales de la apertura dichos valores debe establecerse en cero. Finalmente, la apertura de migración debe ser dividida en dos partes: la parte central corresponde a la función de pesos y en sus laterales, la función de pesos debe poseer una función que establezca valores cero con el fin de delimitar dicha apertura, ya que de no hacerse, esta se extiende al infinito en tiempo y profundidad. Ambas partes son controladas por la duración del pulso de la señal reflejada tomada a consideración (Sun, 2000).

Sun (1998) establece que la función de pesos debería:

1. Escalar la amplitud del campo de ondas reconstruido.
2. Elimina la contribución de los límites en la apertura de migración

3. Aísala la contribución del punto estacionario (difracción) de interés de los demás puntos estacionarios. Si el de interés es aislado inicialmente, de lo contrario, aislarlo sería imposible (Yarygin, 1979).

Los criterios para elegir la apertura de migración son (Kabbej, Baina y Duquet, 2007):

1. El costo computacional, relacionado directamente con el tamaño de la apertura.
2. La relación señal - ruido de una apertura de migración cuyo tamaño sea muy grande, introducirá mayor cantidad de ruido a la imagen.
3. La apertura debería estar limitada por la zona de Fresnel a lo largo de la reflexión.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En el esquema (figura 35), se presenta el flujo de trabajo empleado para realizar el reprocesamiento de los datos sísmicos del proyecto Cerro Negro 96B 3D.

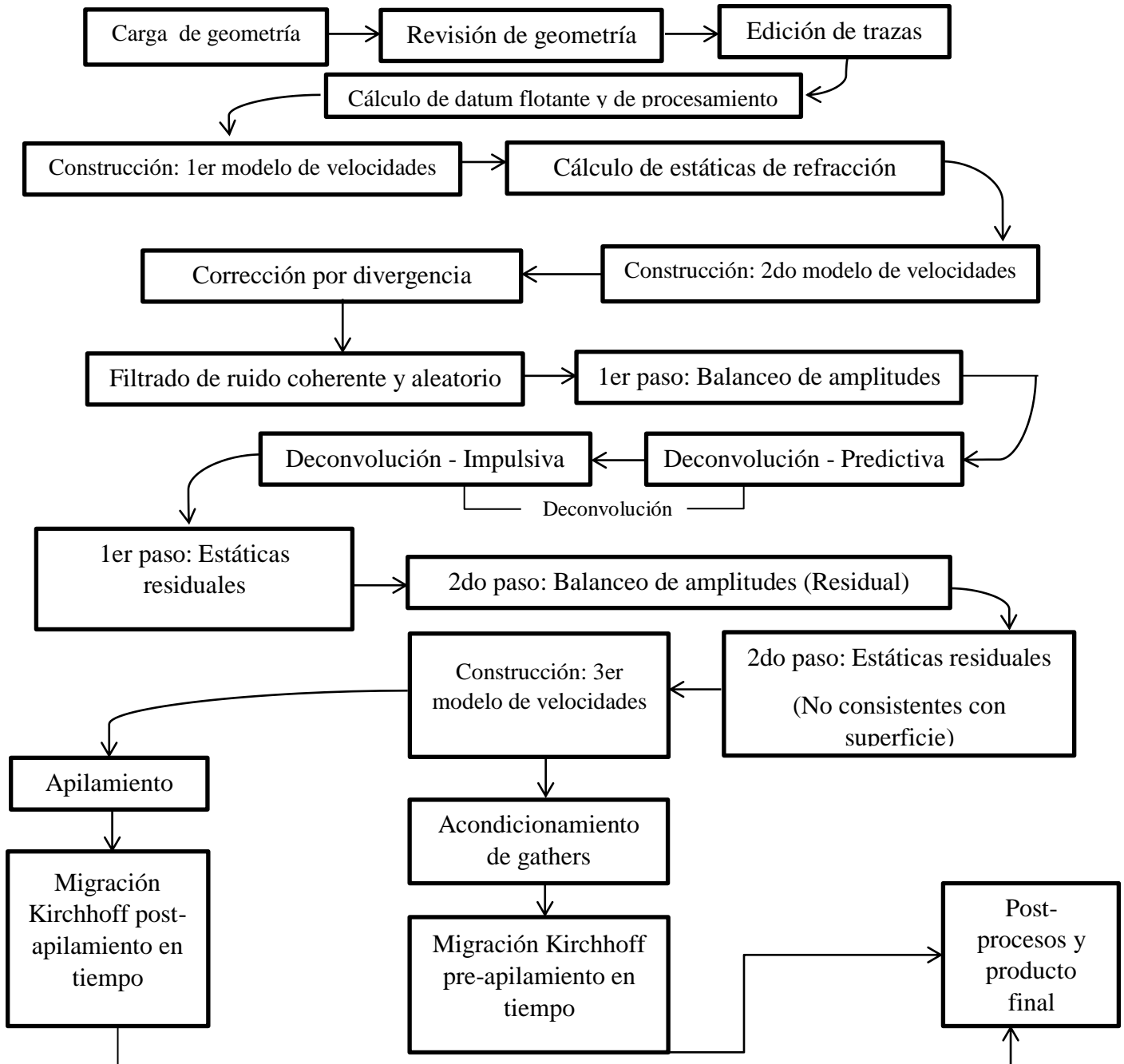


Figura 35. Esquema general de la metodología empleada en la investigación

4.1. Información previa del proyecto

En la tabla 2, se presentarán los parámetros de adquisición empleados para realizar el proyecto Cerro Negro 96B 3D.

Tabla 2. Parámetros de adquisición

Año	Piloto: 1995; Cerro Negro 96B 3D: 1996
Disposición de líneas receptoras	10 líneas paralelas, 78 trazas por línea
Intervalo entre líneas receptoras	200 m
Intervalo entre elementos receptores	40 m
Intervalo entre líneas fuentes	200 m
Intervalo entre elementos fuentes	40 m
Disposición de las líneas fuentes	Entre líneas receptoras 5 y 6
Información de la fuente de energía	
Tipo de fuente	Dinamita
Tamaño de la carga	1 kg
Profundidad de la carga	20 m
Trazas por disparo	780
Información de grabación	
Longitud de grabación	3 segundos
Tiempo de muestreo	2 milisegundos
Número de canales	780 (10x78)
Formato de grabación	SEG – D

4.2. Software utilizado

Para el procesamiento de los datos sísmicos compresionales del proyecto Cerro Negro 96B 3D se utilizaron dos paquetes de procesamiento: Echos[®] y GeoDepth[®], diseñados por la empresa Paradigm[®]. El paquete de procesamiento denominado Echos[®] fue utilizado para realizar el tratamiento de la señal sísmica y GeoDepth[®] fue

empleado para generar el volumen RMS de velocidades y la migración antes y después del apilamiento.

4.3. Carga de la geometría

Previo a la carga de los datos para realizar el procesamiento, es importante asignar la geometría del proyecto, con el fin de tomar en cuenta el posicionamiento y elevaciones de las fuentes y receptores para poder ordenar los datos en diferentes dominios: número de disparo, punto común en profundidad (CDP), offset (distancia fuente – receptor). Esta información suele venir integrada en los encabezados de las trazas. Sin embargo, el proyecto Cerro Negro 96B 3D tiene asignada la geometría en archivos con formato SPS (*Shell Processing Support*).

Los archivos se subdividen en tres (3) tipos:

- Archivos .RPS: información de las estaciones receptoras.
- Archivos .XPS: relacional de las estaciones receptoras con las estaciones fuentes.
- Archivo .SPS: información de los puntos de disparo.

Esta etapa permite observar la organización de los puntos de disparo, estaciones receptoras, líneas receptoras, líneas de disparo y disposición de los puntos comunes en profundidad (CDP), con ello, verificar que no existan incongruencias en la geometría de los datos, tales como: disparos con la geometría acoplada incorrectamente, disparos con canales muertos, etc.

Para cargar la información de las estaciones receptoras y puntos de disparo en la base de datos, se abre el módulo *Spreadsheet* al levantar el paquete de procesamiento Echos[®]. En la opción *Function* y luego *Input text file*, se procede a cargar en orden los archivos SPS. El primero corresponde con el archivo .RPS (figura 36).

File	Parameters	Functions	Format	QC Macros
Operations: 0.8				
Copy				
Clear				
Move				
Delete				
Insert				
Interp				
Extrap				
Sort				
Go to..				
Mode				
Station				
Shot				
Pattern				
CDP				
Relation				
Geometry				
3d				
Undo				
Undo All				
Send				

Rec-Line	Rec-Stn	Receiver X	Receiver Y	Elev	Rec Static
1	1001	5000	474549.81	952310.12	89.00
2	1001	5001	474549.81	952349.88	88.90
3	1001	5002	474549.69	952390.00	89.10
4	1001	5003	474549.69	952430.12	89.00
5	1001	5004	474549.81	952470.00	88.80
6	1001	5005	474549.69	952510.12	88.70
7	1001	5006	474549.81	952550.00	88.50
8	1001	5007	474549.81	952589.88	88.30
9	1001	5008	474549.81	952630.12	88.40
10	1001	5009	474549.81	952670.12	88.10
11	1001	5010	474549.69	952710.38	87.90
12	1001	5011	474549.69	952750.12	88.10
13	1001	5012	474549.81	952790.00	88.70
14	1001	5013	474549.81	952829.88	89.10
15	1001	5014	474549.69	952870.00	89.40
16	1001	5015	474549.81	952910.19	89.80
17	1001	5016	474549.81	952949.88	90.20
18	1001	5017	474549.81	952989.88	90.60
19	1001	5018	474549.81	953030.31	90.60
20	1001	5019	474549.69	953070.12	90.90
21	1001	5020	474549.81	953110.12	91.10
22	1001	5021	474549.81	953150.31	91.40
23	1001	5022	474549.81	953190.19	91.80
24	1001	5023	474549.81	953230.00	92.10
25	1001	5024	474549.81	953270.00	92.40
26	1001	5025	474549.81	953310.12	92.70
27	1001	5026	474549.81	953350.31	92.80
28	1001	5027	474549.81	953390.00	93.00
29	1001	5028	474549.81	953429.88	92.90
30	1001	5029	474549.81	953470.12	93.00
31	1001	5030	474549.81	953510.19	93.20
32	1001	5031	474549.81	953550.38	93.20

Figura 36. Carga del archivo .RPS en la base de datos

El segundo archivo para cargar en la base de datos corresponde con el .XPS (figura 37), posee detalles acerca del FFID (el número de identificación del archivo de campo), relacionando así, los receptores con la fuente al momento de ejecutar el disparo.

File	Parameters	Functions	Format	QC Macros
Operations: 1				
Copy				
Clear				
Move				
Delete				
Insert				
Interp				
Extrap				
Sort				
Go to..				
Mode				
Station				
Shot				
Pattern				
CDP				
Relation				
Geometry				
3d				
Undo				
Undo All				
Send				

Shot	Channe1	Rec-Line	Rec-Stn	Channe1	Rec-Line	Rec-Stn
1	1	1001	5000	40	1001	5039
2	2	1001	5000	40	1001	5039
3	3	1001	5000	40	1001	5039
4	4	1001	5000	40	1001	5039
5	5	1011	5000	40	1011	5039
6	6	1021	5000	40	1021	5039
7	7	1021	5000	40	1021	5039
8	8	1031	5000	40	1031	5039
9	9	1036	5000	40	1036	5039
10	10	1046	5000	40	1046	5039
11	11	1046	5000	40	1046	5039
12	12	1056	5000	40	1056	5039
13	13	1056	5000	40	1056	5039
14	14	1071	5000	40	1071	5039
15	15	1071	5000	40	1071	5039
16	16	1081	5000	40	1081	5039
17	17	1081	5000	40	1081	5039
18	18	1091	5000	40	1091	5039
19	19	1096	5000	40	1096	5039
20	20	1106	5000	40	1106	5039
21	21	1106	5000	40	1106	5039
22	22	1116	5000	40	1116	5039
23	23	1116	5000	40	1116	5039
24	24	1131	5000	40	1131	5039
25	25	1131	5000	40	1131	5039
26	26	1141	5000	40	1141	5039
27	27	1141	5000	40	1141	5039
28	28	1151	5000	40	1151	5039
29	29	1156	5000	40	1156	5039
30	30	1166	5000	40	1166	5039
31	31	1166	5000	40	1166	5039
32	32	1176	5000	40	1176	5039
33	33	1176	5000	40	1176	5039

Figura 37. Carga del archivo .XSP en la base de datos

El último archivo concierne al de los puntos de disparo (.SPS) (figura 38), a diferencia de los anteriores, dentro del módulo se selecciona *Update shot sheet from relation sheet* ubicado en *Function*. Así, el módulo cargará la información de la geometría de los puntos de disparo a partir del archivo relacional previamente introducido.

Shot	FFID	Shot-Line	Shot-Stn	Shot X	Shot Y	Depth	Up-hole	Elev
1	5746146	5000	1007	474810.09	952320.00	20.00	26.00	89.30
2	5750146	5000	1008	474850.00	952340.00	20.00	24.00	89.50
3	5783146	5000	1019	475290.31	952319.38	20.00	30.00	91.50
4	5787146	5000	1020	475329.81	952339.19	20.00	28.00	91.50
5	6246148	5000	1031	475770.00	952320.19	20.00	29.00	89.70
6	6592149	5000	1043	476250.09	952319.69	20.00	24.00	86.80
7	6591149	5000	1044	476290.31	952339.81	20.00	24.00	86.80
8	6642150	5000	1055	476730.59	952319.62	20.00	27.00	85.80
9	6870151	5000	1056	476770.59	952339.62	20.00	17.00	85.70
10	7149152	5000	1067	477210.00	952319.88	20.00	27.00	84.60
11	7150152	5000	1068	477250.00	952340.00	20.00	30.00	84.60
12	7310153	5000	1079	477689.91	952319.88	20.00	25.00	81.90
13	7315153	5000	1080	477729.91	952339.88	20.00	24.00	80.50
14	7857155	5000	1091	478169.91	952319.88	20.00	24.00	78.10
15	7863155	5000	1092	478210.09	952340.12	20.00	26.00	79.00
16	8279156	5000	1103	478650.09	952320.00	20.00	29.00	83.30
17	8277156	5000	1104	478690.00	952340.00	20.00	30.00	83.60
18	8548157	5000	1115	479130.00	952320.12	20.00	28.00	83.80
19	8551157	5000	1116	479170.19	952340.12	20.00	26.00	83.60
20	45158	5000	1127	479610.00	952319.88	20.00	31.00	83.40
21	50158	5000	1128	479650.00	952340.00	20.00	0.00	84.00
22	507159	5000	1139	480090.00	952320.12	20.00	30.00	83.40
23	510159	5000	1140	480129.91	952339.81	20.00	29.00	83.90
24	824161	5000	1151	480570.09	952320.12	20.00	33.00	87.00
25	829161	5000	1152	480610.31	952340.12	20.00	29.00	87.20
26	1132162	5000	1163	481050.19	952320.12	20.00	31.00	89.40
27	1134162	5000	1164	481089.81	952340.00	20.00	32.00	88.00
28	1464164	5000	1175	481529.91	952320.19	20.00	33.00	86.10
29	1477164	5000	1176	481570.00	952340.19	20.00	32.00	85.60
30	1893165	5000	1189	482090.00	952320.00	20.00	23.00	75.40
31	1895165	5000	1190	482130.09	952340.00	20.00	22.00	75.60
32	2027166	5000	1199	482490.00	952320.00	20.00	29.00	82.60
33	2034166	5000	1200	482530.00	952340.00	20.00	30.00	82.90
34	2386167	5000	1211	482970.00	952319.81	20.00	34.00	87.40

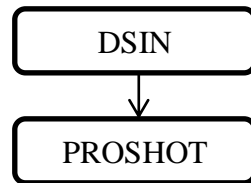
Figura 38. Carga del archivo .SPS en la base de datos

Completada la carga de la información del posicionamiento de fuentes y receptores, se procede a asignar la geometría del proyecto. Se abre el módulo *Geometry 3D*, se definen los parámetros tales como: líneas receptoras, líneas de disparo, dimensiones del bin, entre otros. Se asignaron los mismos valores que empleó la compañía Western GeCo en el 2005, en los parámetros de la geometría, con el fin de mantener un control de calidad en el producto durante el reprocesamiento actual. La tabla 3 presenta los parámetros para la geometría del procesamiento.

Tabla 3. Geometría del proyecto Cerro Negro 96B 3D

Valor de la primera estación receptora	1	Etiqueta de la primera línea receptora	1
Valor de la última estación receptora	44534	Etiqueta de la última línea receptora	1174
Origen del eje X (UTM) (m)	472520.0	Incremento de etiqueta en la línea receptora	1
Origen del eje Y (UTM) (m)	950310.0	Etiqueta de la primera línea de disparo	1
Ángulo de rotación en sentido antihorario del levantamiento (°)	90.0	Etiqueta de la última línea de disparo	969
Distancia entre líneas fuentes (m)	20.0	Incremento de etiqueta en línea de disparo	1
Distancia entre líneas receptoras (m)	-20.0	CDP inicial	1
Números de CDP a lo largo de una línea receptora	969	CDP final	1137606
Números de CDP a lo largo de una línea de disparo	1174		

Se procede a guardar los parámetros en la opción *Save fold* ubicado en *File*. Finalmente, se procede con el acoplamiento de la información del posicionamiento de las fuentes y receptores con la geometría de adquisición del proyecto. Se inicia el módulo de *Production* en el paquete de procesamiento, donde se establecerá un esquema de trabajo, presentado de la siguiente manera:



El módulo DSIN define (a través del usuario) el conjunto de datos que van a ser procesados. El módulo PROSHOT acopla la información cargada a la base de datos previamente, con los registros sísmicos a través del FFID (valor único para cada disparo)(figura 42), con ello, se podrán reorganizar los datos en los distintos dominios

(CDP, offset, etc) y poder aplicar distintos procesos para el tratamiento de los datos sísmicos.

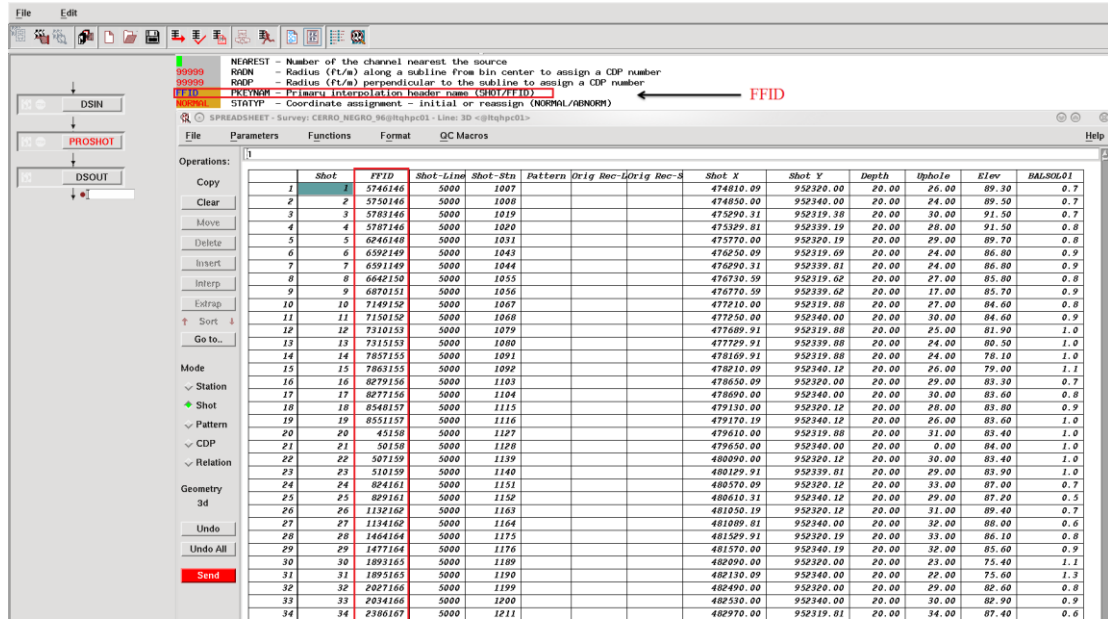


Figura 39. Acoplamiento de la información de la base de datos a los registros sísmicos a través del módulo PROSHOT

El módulo DSOUT visualizado en la figura 39 genera la salida de los datos a los que se les ha aplicado algún proceso.

4.4. Revisión de la geometría

Revisar la geometría permite verificar la correcta integración de la información de la geometría almacenada en los archivos .SPS del proyecto Cerro Negro 96B 3D a los datos cargados previamente dentro del paquete de procesamiento Echos® para su posterior tratamiento.

Para llevar un control de la geometría en la ventana del módulo *Geometry 3D*, se define en *Mode* el parámetro *Binning* para revisar la cobertura del proyecto piloto (1995) y proyecto Cerro Negro (1996), posterior se hace clic en *Fold display* (figura 40).

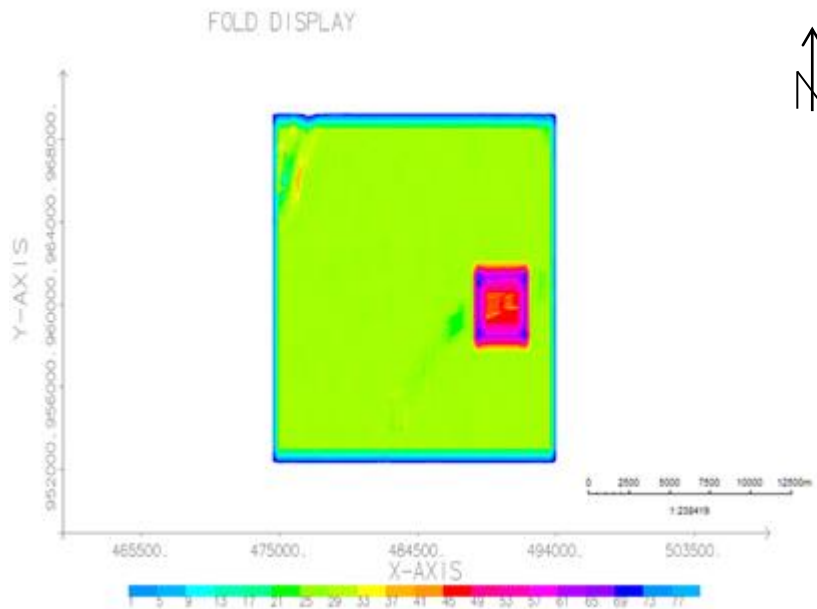


Figura 40. Cobertura del proyecto Cerro Negro 96B 3D

De igual manera, se puede verificar la distribución de los puntos de disparo, estaciones receptoras y puntos comunes en profundidad (CDP) a través de sus mapas. En la ventana de *Geometry 3D*, se selecciona cualquiera de los mapas de interés y luego se hace clic sobre la opción *Maps* (figura 41).

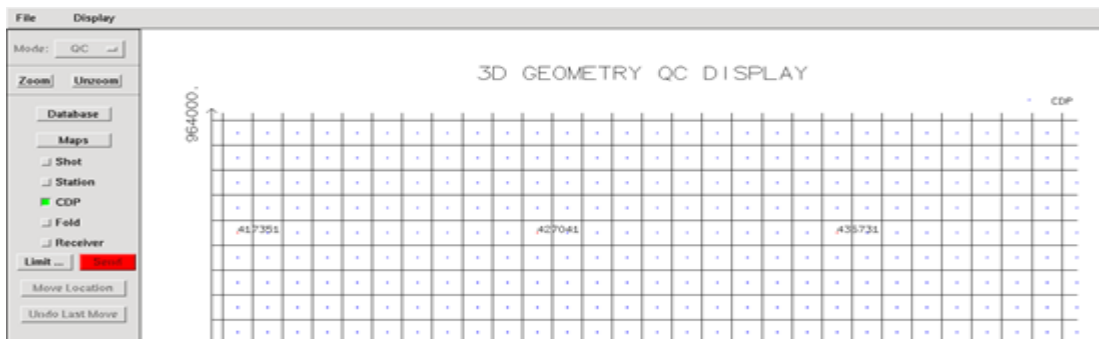


Figura 41. Distribución de puntos comunes en profundidad asociado a la geometría de adquisición

A través del módulo *View Data*, se elige el conjunto de datos del proyecto para visualizar los registros de disparos. Después de haber sido cargados el conjunto de

datos referentes a los registros de disparo, en la opción *Display* se hace clic en *Plot headers* y se define parámetro *offset* dentro de la interfaz. El programa solicitará trazar una línea correspondiente con la distancia fuente – receptor en el registro. Habiendo sido realizado este paso, en pantalla se visualizará líneas en formas de cono de color rojo (geometría) sobre los registros de disparo (figura 42). Si las líneas se ubican simétricamente sobre los registros, la geometría ha sido cargada correctamente. Este proceso se realiza en todos los disparos para definir si la geometría fue establecida o no correctamente.

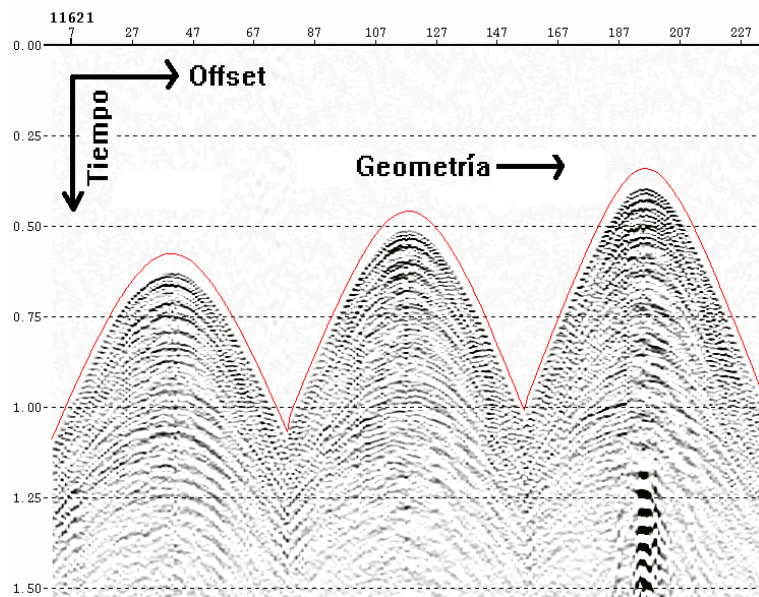
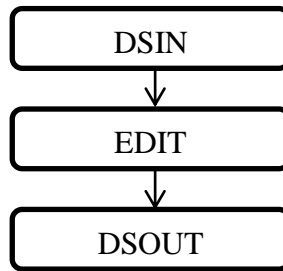


Figura 42. Revisión de geometría en el disparo 11621

4.5. Edición de trazas

Durante la revisión de geometría en el punto 4.4., también se evaluó el estado de los registros de disparos en cuanto al contenido de ruido presente en sus trazas, disparos con trazas muertas, disparos malos, entre otros.

Por ello, se empleó el siguiente esquema de trabajo:



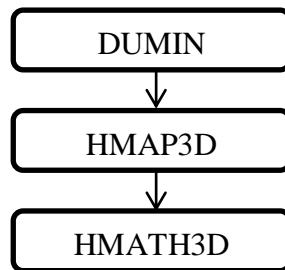
EDIT tiene como función editar los datos en función de un dominio especificado por el usuario, en este caso, en el dominio del disparo (*SHOT*). Existen un total de 36078 disparos, modificar las trazas ruidosas dentro de cada disparo requiere tiempo de proyecto que podría ser utilizado en otro proceso. Por eso, se identificaron los disparos “malos” donde existiese un porcentaje alto de trazas ruidosas, así como disparos con varios canales muertos, y procedieron a ser extraídos de los datos del proyecto. En la tabla 4 se indican los disparos que fueron extraídos.

Tabla 4. Disparos eliminados del proyecto Cerro Negro 96B 3D

Disparos							
267	346	348	349	427	477	520	677
678	740	1717	1856	11225	12774	13383	15169
16476	16477	17677	17785	20027	20571	21900	23610
24769		26161		26391		28041	

4.6. Cálculo de datum flotante y datum de procesamiento

El proceso inicia mitigando el efecto de la superficie topográfica sobre los tiempos de llegada. Posterior a ello, esos tiempos se referencian a un datum de procesamiento o fijo para suponer que fuentes y receptores están en una misma cota. Por ello, se estableció un esquema de trabajo para realizar dicha tarea.



Echos[®] requiere de una entrada de datos, en este caso, corresponden con los registros de disparo. Sin embargo, el cálculo del datum flotante es independiente de los registros. Después de haber cargado y revisado la geometría del levantamiento, los mapas de elevaciones de fuentes y receptores son asignados directamente a la base de datos. El módulo DUMIN genera una entrada falsa en la ventana de *Production*. Posterior a ello, el módulo HMAP3D importa de la base de datos la información del mapa de elevaciones de los disparos, el cual es reestructurado en el dominio del CDP. En el módulo *Attributes*, en la opción de CDP se ubica el mapa obtenido de HMAP3D, en *Function* se selecciona la opción *Smooth* y se aplica un filtro para suavizar la topografía en el dominio del CDP. El resultado de este proceso es el datum flotante. Finalmente, se calcula el datum de procesamiento al cual van a estar referenciados fuentes y receptores en las próximas etapas del reprocesamiento. El módulo HMATH3D realiza operaciones matemáticas en los datos, en este caso, a partir de los atributos en los que han sido almacenados la información de la topografía en el dominio del CDP y se aplica la ecuación 27 para trasladar del datum flotante al datum de procesamiento. El valor del datum final elegido corresponde con 120 m sobre el nivel del mar ya que corresponde con el valor más próximo a la cota más alta de la topografía de la zona.

$$TM = 2 \times 1000 \times \frac{(\text{Datum final} - \text{Datum flotante})}{V_{\text{reemplazo}}} \text{ (ecuación 27)}$$

En la tabla 5 se presentan los parámetros empleados en los módulos HMAP3D y HMATH3D para la definición del datum flotante y de procesamiento.

Tabla 5. Parámetros de los módulos HMAP3D y HMATH3D

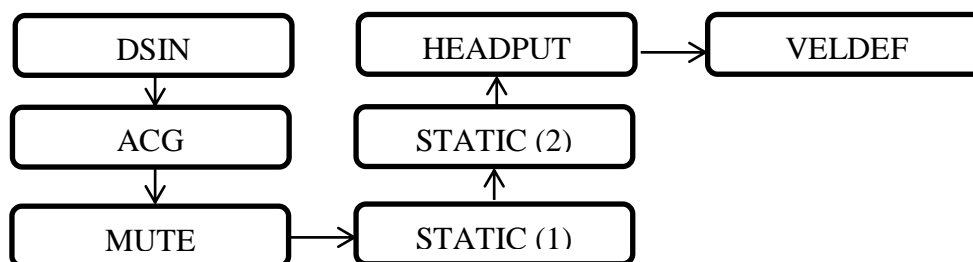
Módulo		HMAP3D	
<i>XMODEL</i> (nombre del modelo)	STATION	<i>YMODEL</i> (nombre del modelo de salida)	CDP
<i>XEVENT</i> (nombre del evento)	SURFACE	<i>YEVENT</i> (nombre del evento de salida)	SURFACE
<i>XATTRB</i> (nombre del atributo)	ELEV	<i>YATTRB</i> (nombre del atributo de salida)	ELEV
Módulo		HMATH3D	
Sustracción			
<i>MODNAME</i> (nombre del modelo)		CDP	
<i>XEVENT</i> (evento A)	DPROC	<i>YEVENT</i> (evento para sustraer del evento A)	SURFACE
<i>XATTRB</i> (datum de procesamiento)	120	<i>YATTRB</i> (atributo que sustraerá del atributo A)	CDP.ELEVS
<i>ZEVENT</i> (nombre del evento de salida)	SURFACE	<i>ZATTR</i> (atributo de salida)	DIFF
División			
<i>XEVENT</i> (evento A)	SURFACE	<i>YEVENT</i> (evento para dividir el evento A)	Velocidad de reemplazo
<i>XATTRB</i> (diferencia entre el datum de procesamiento y flotante)	DIFF	<i>YATTRB</i> (atributo para dividir el atributo A)	1100
<i>ZEVENT</i> (nombre del evento de salida)	Corrección estática en segundos	<i>ZATTR</i> (atributo de salida)	PTIMESEC
Multiplicación			

<i>XEVENT</i> (evento A)	Factor escalar	<i>YEVENT</i> (evento para multiplicar el evento A)	Velocidad de reemplazo
<i>XATTRB</i> (factor escalar para llevar a milisegundos)	1000	<i>YATTRB</i> (atributo para multiplicar el atributo A)	1100
<i>ZEVENT</i> (nombre del evento de salida)	Corrección estática en ms	<i>ZATTR</i> (atributo de salida)	PTIME

4.7. Construcción: 1er modelo de velocidades

La construcción del modelo de velocidades depende de la geometría de adquisición, y consiste en diseñar una malla (cuadrada, por lo general) para escoger las funciones de velocidad vertical a través de los métodos de semblanza y apilamiento por velocidad constante, y así, definir las velocidades cuyos valores puedan horizontalizar los eventos (corrección NMO) para generar secciones apiladas con mejor relación señal – ruido. El 1er modelo de velocidades es considerado regional para poder tener un control de calidad inicial de la imagen sísmica del proyecto, ya que no se han aplicado procesos que permitan destacar los rasgos estratigráficos y/o estructurales del subsuelo estudiado.

Todos los esquemas de trabajo para el procesamiento de la señal se diseñan en el módulo principal *Production* de Echos®. El esquema de trabajo empleado para generar el modelo de velocidades es el siguiente:



A continuación, se hará una breve descripción de la función de cada módulo para el esquema de trabajo utilizado:

- DSIN: Define el conjunto de datos sobre los cuales se elegirán las funciones de velocidad vertical, así como también los dominios en que se tratarán los datos y las dimensiones de la malla de procesamiento para seleccionar dichas funciones.
- AGC ó Control de Ganancia Automático: Es utilizado para mantener un nivel de señal de salida fijo, reduciendo los efectos de las variaciones en las amplitudes de la señal de entrada para resaltar eventos sísmicos dentro de los datos. Sin embargo, este módulo no preserva relativamente las amplitudes.
- MUTE: Realiza el enmudecimiento sobre las trazas sísmicas para reducir la amplitud de ciertas porciones de las mismas a cero (0) con el fin de eliminar componentes no deseadas en los datos.
- HEADPUT: Exporta de la base de datos información almacenada en atributos (formatos internos del programa) para su posterior aplicación sobre las trazas.
- STATIC: Su función es añadir o remover la información importada por el módulo HEADPUT en los encabezados de las trazas. En este caso, el proceso del módulo STATIC está asociado a la aplicación de las correcciones estáticas.
- VELDEF: Módulo interactivo que realiza análisis de velocidad mediante la semblanza y apilamiento por velocidad constante. Permite al usuario especificar, en un espectro de velocidad, las funciones de velocidad en cada CDP. Las velocidades seleccionadas son almacenadas en el archivo de salida establecido y en la base de datos como pares tiempo – velocidad. El archivo en la base de datos que contiene las funciones de velocidad puede ser accesado por otras secuencias del programa que emplean dichas funciones, como por ejemplo, la aplicación de la corrección NMO.

El conjunto de datos es cargado en el programa a través de DSIN, se aplica una función de ganancia para destacar las amplitudes. La función MUTE enmudece el

efecto de *stretching* en los bordes. HEADPUT llama el valor de las estáticas de elevación, STATIC (1) y STATIC (2) son definidos en el modo *remove* (remover) para trasladar los tiempos de viaje a datum flotante (son aplicados dos veces por el tiempo doble de viaje) y en VELDEF se hará la selección de funciones de velocidad para el modelo.

Los parámetros empleados para diseñar la malla de procesamiento se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros para el diseño de la malla de procesamiento para el 1er modelo de velocidades.

Orden – Parámetros para organizar las trazas			
Orden primario		CDP	
Orden secundario		OFFSET	
Dimensiones de la malla			
Primera inline	100	Primera crossline	100
Última inline	1060	Última crossline	940
Incremento en dirección inline	80	Incremento en dirección crossline	80
Números de registros en cada grupo para análisis		7	

En la ventana interactiva se procederá a seleccionar las funciones verticales de velocidad. De forma predeterminada, el número de registros empleados para realizar la semblanza es uno (1). Por ello, lo ideal es establecer el número adecuado de registros para que la semblanza optimice la coherencia dentro del espectro de velocidad y elegir los pares tiempo – velocidad adecuados para poder realizar una corrección NMO adecuada para el apilamiento.

En *Function*, se activa la opción *Form supergather* para optimizar el espectro de velocidad antes mencionado. El objetivo es formar un *supergather* que aporte la información de las trazas de los bins adyacentes para generar un espectro de velocidad que resalte únicamente las reflexiones primarias.

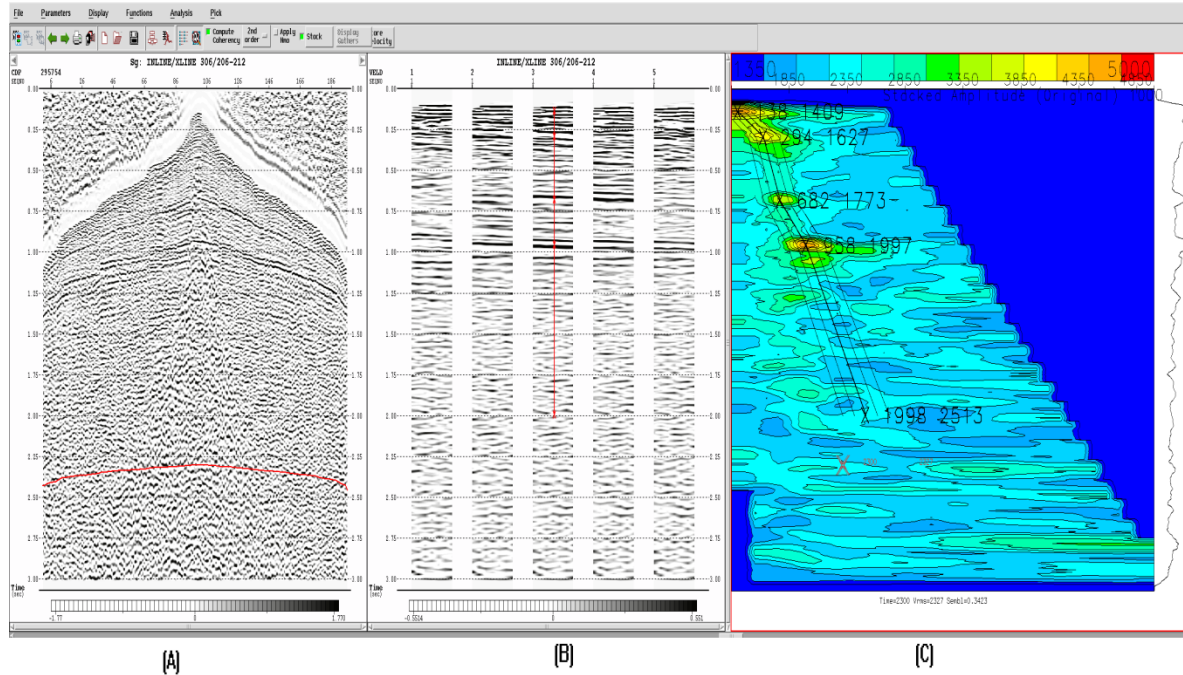


Figura 43. Módulo interactivo VELDEF (A) registro ordenado por offset y CDP (B) apilamiento por velocidad constante y (C) semblanza

Seguido a la verificación de los parámetros del mallado, se procede la selección de los pares tiempo – velocidad en el espectro de velocidad para generar el modelo de velocidades. En la barra superior del módulo, se activan las opciones aplicar NMO (*Apply NMO*) y apilar (*Stack*) para visualizar la horizontalización de los eventos y el apilamiento producido por la selección de las funciones de velocidad vertical en el espectro de velocidad. Aquellos que horizontalicen de manera correcta los eventos, serán las funciones de velocidad que estarán definidas para el modelo.

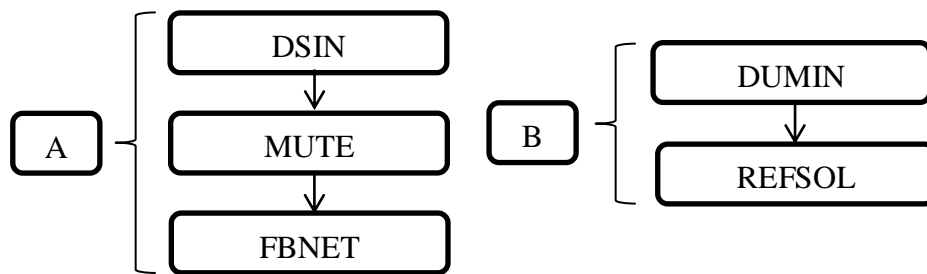
4.8. Cálculo de las estáticas de refracción

En la mayoría de los paquetes de procesamiento existen módulos que se encargan de eliminar los tiempos de retardo provocados por la presencia de la capa meteorizada.

Existen distintos métodos para realizar este proceso, en este caso se utilizó la inversión lineal generalizada (GLI).

El método GLI está basado en un algoritmo de inversión lineal generalizada, por medio del cual trata de reducir las diferencias entre los quiebres observados y los quiebres teóricos calculados por el modelo. Dicho modelo es calculado a través de trazados de rayos, su función es construir un modelo geológico consistente con los tiempos de las primeras llegadas. Los parámetros necesarios para el modelo inicial son extraídos de las primeras llegadas provenientes de la información de los registros sísmicos adquiridos en campo.

Los esquemas de trabajo utilizado para calcular las estáticas de refracción fueron los siguientes:



El esquema de trabajo A corresponde con la selección de los primeros quiebres (o primeras llegadas) para ser utilizado en el esquema de trabajo B con el fin de generar el modelo del refractor para eliminar los tiempos de retardo ocasionados por la capa meteorizada.

En A:

- DSIN: Conjuntos de datos a los cuales se les definirán los primeros quiebres.
- MUTE: Éste módulo enmudece las distorsiones en los bordes de los datos debido al *stretching* o estiramiento. Así como también para enmudecer áreas que no sean de interés para el análisis.

- FBNET: El módulo se encarga de cargar los registros de disparo al programa, y de manera interactiva, se procede a seleccionar los primeros quiebres en la ventana de visualización.

En B:

- DUMIN: Crea una entrada falsa de los datos, dado que la información requerida para aplicar en módulos como REFSOL, en este caso, se encuentra en la base de datos y no en los encabezados de las trazas.
- REFSOL: Genera el modelo del refractor a partir de los primeros quiebres calculados en el módulo FBNET para eliminar los tiempos de retardo producidos por la capa meteorizada. Emplea la información de las dromocrónicas tiempo – offset para calcular la velocidad del refractor y la información de los tiempos de llegada de los primeros quiebres para calcular los retrasos en tiempo.

En la interfaz gráfica del módulo, se estableció la opción *Training mode* para entrenar una red neuronal de primeros quiebres cada 100 disparos y ser aplicada a los 36078 disparos (figura 44). Finalizado el entrenamiento de la red neuronal, en la ventana de Production se desactiva el botón *Stop* y aplica el proceso para todos los datos.

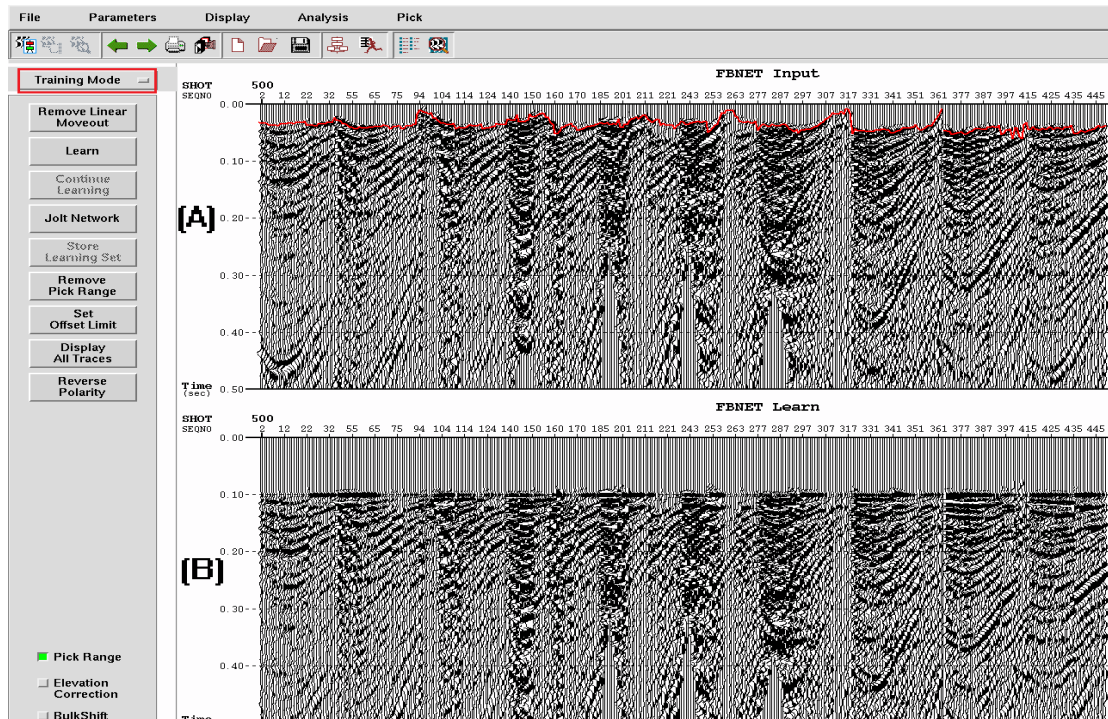


Figura 44. Módulo FBNET (A) línea roja corresponde con la selección de primeros quiebres en el disparo 500 y (B) horizontalización con velocidad lineal de 1700 m/s para llevar el control de calidad de los primeros quiebres

Se procedió a cargar las dromocrónicas asociadas a los primeros quiebres calculados por la red neuronal (figura 46). El comportamiento de las dromocrónicas debió tener una tendencia lineal para definir el rango de offset necesario para calcular la velocidad del refractor. Sin embargo, haber realizado una selección de primeros quiebres cada 100 disparos no generó un resultado deseado dentro de los datos al momento de que la red neuronal haya aplicado el análisis en los disparos. Por ello, se realizó una selección de primeros quiebres en cada disparo, del 1 al 11.000, para optimizar el resultado del proceso computarizado para asegurar la máxima corrección estática de refracción en el área perteneciente a Petroindependencia.

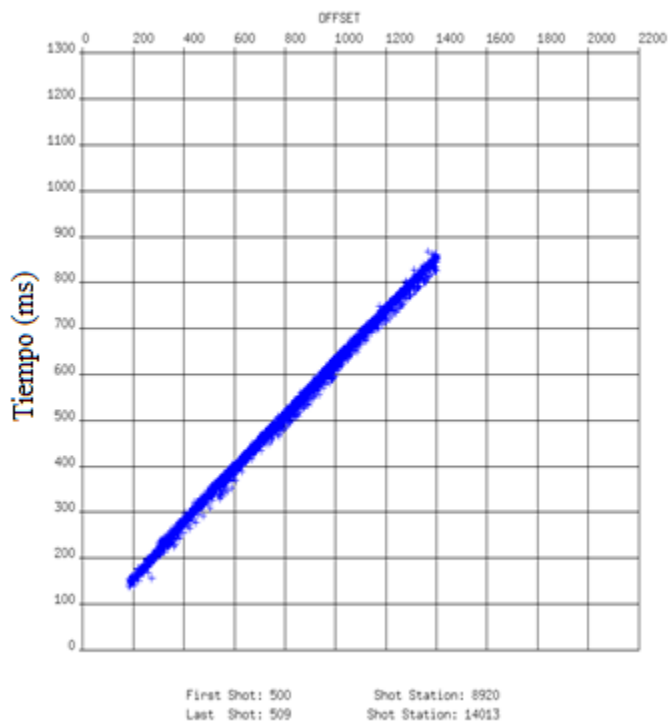


Figura 46. Dromocrónica tiempo – offset de los primeros quiebres

Finalizado el refinamiento de los primeros quiebres, se procede a generar el modelo del refractor, y se emplea el esquema de trabajo B. Donde, el módulo REFSOL emplea la información de los primeros quiebres para calcular los tiempos de llegada de los datos sin tener la presencia de la capa meteorizada (figura 47). El rango de offset empleado fue 203 m y 559 m para delimitar la primera capa del paquete sedimentario asociado a la capa de baja velocidad a través del cual se calculó la velocidad del refractor.

Se utilizó una velocidad de reemplazo de 1100 m/s para llevar los tiempos de un datum flotante al datum final (120 m), las correcciones estáticas de refracción son almacenadas en un atributo para ser utilizadas posteriormente por el módulo QUIXTAT para llamar dichos valores.

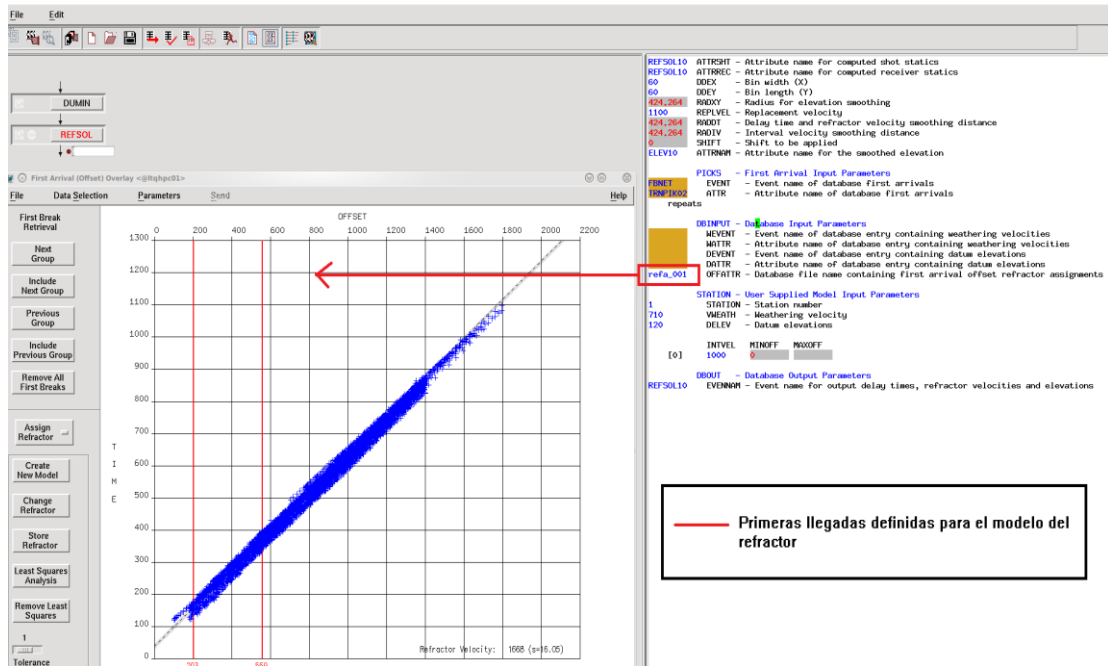
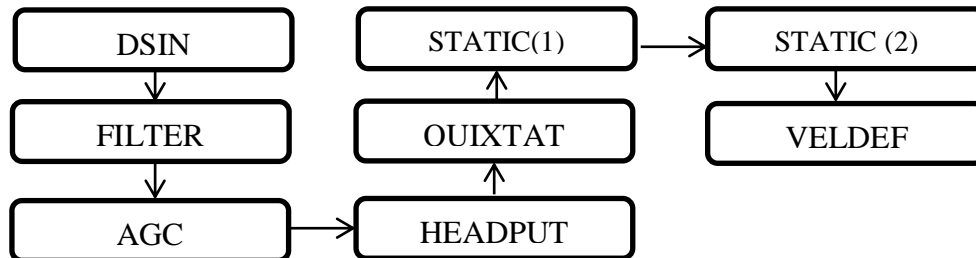


Figura 47. Módulo REFSOL para calcular el modelo del refractor a través de la selección de primeros quiebres

4.9. Construcción: 2do modelo de velocidades

En el punto 4.7 fue explicada la metodología para la construcción del modelo de velocidades a través del módulo de selección de funciones verticales de velocidad. Sin embargo, el esquema de trabajo varía respecto al anterior, por tanto, se presenta de la siguiente manera:



Son introducidos los módulos FILTER y QUIXTAT. El primero permite al usuario diseñar, en una banda de frecuencia establecida, filtros que atenuarán el ruido dentro

de los datos, tales como: pasa-bajo, pasa-alto, pasa-banda. El segundo módulo llama los atributos donde se encuentran almacenadas las estáticas (refracción, residuales consistentes con superficie, residuales no consistentes con superficie) para aplicárselas al conjunto de datos sobre el cual se está trabajando. En este caso, QUIXTAT aplica las correcciones estáticas de elevación y de refracción. La aplicación de STATIC (1) y STATIC (2) es para trasladar los datos de datum fijo a datum flotante.

Estos últimos procesos son aplicados para mejorar la relación señal – ruido dentro de los registros, y así, tener óptimos espectros de velocidad para la selección de funciones de velocidad verticales.

Este modelo de velocidad varía las dimensiones del mallado de procesamiento para poder realizar una distribución más cercana al momento de interpolar las funciones de velocidad. En la tabla 7, se presentan los parámetros.

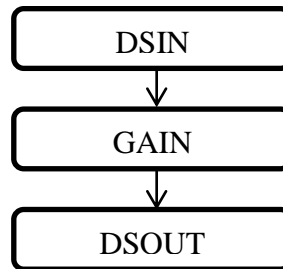
Tabla 7. Parámetros para el diseño de la malla de procesamiento para el 2do modelo de velocidades

Orden – Parámetros para organizar las trazas			
Orden primario		CDP	
Orden secundario		OFFSET	
Dimensiones de la malla			
Primera inline	150	Primera crossline	150
Última inline	1046	Última crossline	950
Incremento en dirección inline	56	Incremento en dirección crossline	56
Números de registros en cada grupo para análisis		7	

4.10. Corrección por divergencia esférica

En teoría, al generar el frente de ondas, este se propaga de manera esférica a través de un subsuelo homogéneo. El inverso del radio ($1/r$) describe el decaimiento de las amplitudes como una función del radio del frente de ondas esférico. La distribución de la energía a través del subsuelo no es igual en todas las direcciones debido a la atenuación inelástica, desperdigamiento (*scattering*) y la partición de la energía.

Para redistribuir la energía lo más uniforme posible, se empleó el siguiente esquema de trabajo.



El módulo GAIN permite compensar la pérdida de energía a través de distintos submódulos dentro del mismo. En este caso, fue aplicado SPHDIV correspondiente a la corrección por divergencia esférica independiente del offset, representada por el primer término de la expansión de Taylor. Las muestras pertenecientes a cada traza en un tiempo T son multiplicadas por un escalar para compensar la pérdida de energía de manera esférica a través de la ecuación 28.

$$ESCALAR(T) = \frac{V_{RMS}(T)^{V_{option} \cdot T_{option}}}{V_0 \cdot SCMAX} \text{ (Ecuación 28)}$$

Donde V_{RMS} es la velocidad RMS en un tiempo T, T es la muestra de tiempo, V_0 es la velocidad RMS en T=0, V_{option} es el valor de impulso para la velocidad, T_{option} es el valor de impulso para el tiempo y $SCMAX$ es el inverso del escalar en un tiempo máximo.

Dicho proceso consistió en la realización de pruebas para los distintos parámetros principales que comprenden esta ecuación: V_{option} , T_{option} y $Factor$ (escalar general). En la tabla 8, se presenta los valores óptimos para la corrección por divergencia esférica.

Tabla 8. Parámetros para la corrección por divergencia esférica

V_{option}	1
T_{option}	2
$Factor$	2

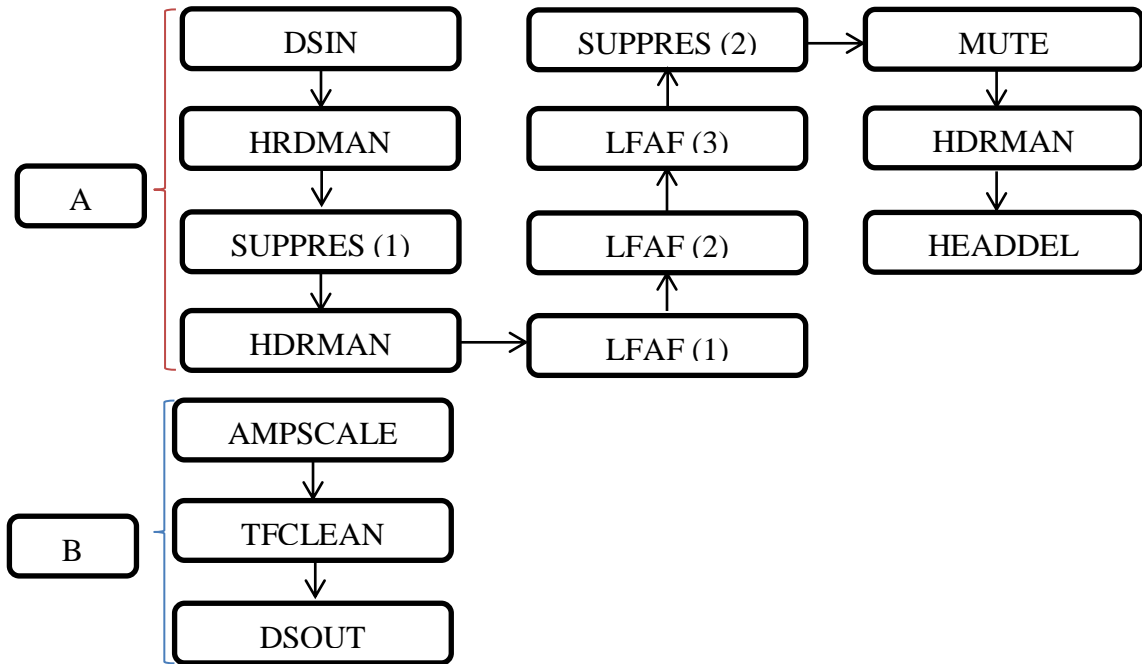
Una vez aplicada la corrección por divergencia esférica en los registros, se realiza un análisis de ganancia y se compara el antes y después de haber aplicado el proceso, con el fin de establecer uniformidad tras la aplicación de la corrección.

4.11. Filtrado de ruido coherente y aleatorio

Durante el análisis de la señal sísmica es necesario filtrar el registro de forma que se pueda resaltar los eventos de interés y eliminar el ruido que distorsiona la imagen al momento de generar una sección apilada. El ruido puede ser clasificado en: coherente y aleatorio. El ruido coherente posee características conocidas tales como: contenido de frecuencia y amplitudes. Un ejemplo de ruido concierne al cono de ruido cuyo contenido de frecuencia no excede 25 Hz (frecuencias bajas) y altas amplitudes. El ruido aleatorio es aquel cuyo comportamiento en sus características no posee patrón alguno, por tanto, el trato durante su filtrado requiere sumo cuidado.

El flujo establecido se divide en A (atenuación de ruido coherente) y B (atenuación de ruido aleatorio). Sin embargo, este proceso se ejecuta en el orden de A y luego B, estableciendo una salida de los datos filtrados.

El esquema de trabajo empleado para la atenuación del ruido coherente y aleatorio es el siguiente:



A continuación se dará una descripción de los módulos que no hayan sido mencionados previamente.

- HDRMAN: El módulo almacena información de los datos sísmicos en encabezados, y así, realizar operaciones matemáticas (suma, resta, entre otras opciones) para tratar los datos.
- SUPPRES: Lleva a cabo una supresión de ruido de banda limitada variante en el tiempo. Los datos se descomponen en bandas de señal separadas en buenas y malas, la atenuación se realiza mediante la umbralización de la envolvente del ruido con la envolvente de la señal. Este proceso descompone la traza sísmica en componentes de ruido y de señal mediante el filtrado de la traza para la banda de frecuencia especificada por el usuario para el ruido. La componente del ruido es extraída de la traza de entrada para separarla de la componente de la señal. Las envolventes de la componente del ruido y de la señal son calculadas, la envolvente de componente del ruido se compara con la

envolvente de la componente de la señal. Las zonas donde el ruido supera el nivel de la señal especificada, son determinadas, y sólo en ellas la componente es reducida para coincidir con el valor de la envolvente de la señal.

- LFAF: Atenúa el ruido de las ondas superficiales a través de un arreglo de baja frecuencia. Dada la velocidad más somera y una banda de frecuencia baja, el algoritmo transforma los datos del dominio del espacio – tiempo al dominio de la frecuencia – tiempo. Luego, cada componente de la frecuencia es convolucionada con una función de caja, la cual corresponde con arreglo apropiado calculado para cancelar el ruido generado por el disparo asociado al cono del ruido a través de la velocidad calculada en los registros de disparo.
- HEADDEL: Eliminar los encabezados creados por el módulo HDRMAN que ocupan espacio en la memoria del proyecto.
- TFCLEAN: A cada registro de entrada se aplica una transformada rápida de Fourier (dominio frecuencia – tiempo) dentro de pequeñas ventanas de tiempo centradas en cada muestra. Dichas ventanas, en conjunto con una función de peso Gaussiana, se centrarán en cada traza de entrada para aplicar la transformada. La supresión de ruido se realizará en las sub-bandas de frecuencia y en zonas de tiempo especificadas por el usuario a través de un método de balanceo espectral en los datos de entrada. Una vez transformado los datos, se descomponen en diferentes sub-bandas de frecuencia, en ellas se calculará la media, y luego, se calculara el valor de la media en cada sub-banda, con ello, se hará una media de las medias de cada sub-banda y se definirá como un límite. Finalmente, se compara el valor límite con las amplitudes en el dominio de la frecuencia – tiempo, si dicha amplitud excede el valor límite, se reducirá su valor al mismo que el del límite, de lo contrario, no será alterada. Se devuelven los datos al dominio del espacio – tiempo.
- AMPSCALE: Los datos se analizan a través de pequeñas ventanas espaciales y temporales superpuestas mediante la comparación de la amplitud de la ventana

con la amplitud de la ventana correspondiente en trazas vecinas en el conjunto de datos. Para cada ventana se calcula una media de la amplitud RMS a partir de las amplitudes de las ventanas correspondientes a las trazas vecinas. La media es comparada con la amplitud de la ventana en la traza. Si la amplitud de la ventana en la traza excede el límite, entonces, este valor se reduce a la amplitud especificada como objetivo. El límite es la media multiplicada por un factor.

Inicia con la carga de los datos a través del DSIN (figura 48).

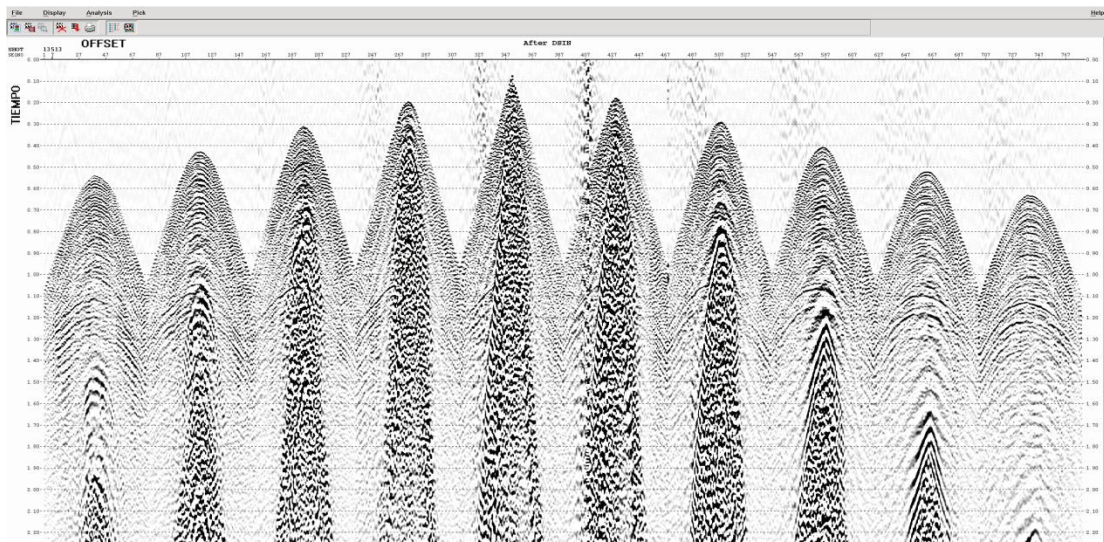


Figura 48. Disparo 13513 sin la aplicación de filtros

Los registros son guardados como encabezados en el módulo HDRMAN. Es aplicado un filtrado de ruido coherente SUPPRES, actuando únicamente sobre el cono de ruido a través de una ventana definida por el usuario definiendo valores de offset y tiempo. El resultado filtrado es guardado en un encabezado diferente para sustraer el cono de ruido de los datos iniciales (figura 49).

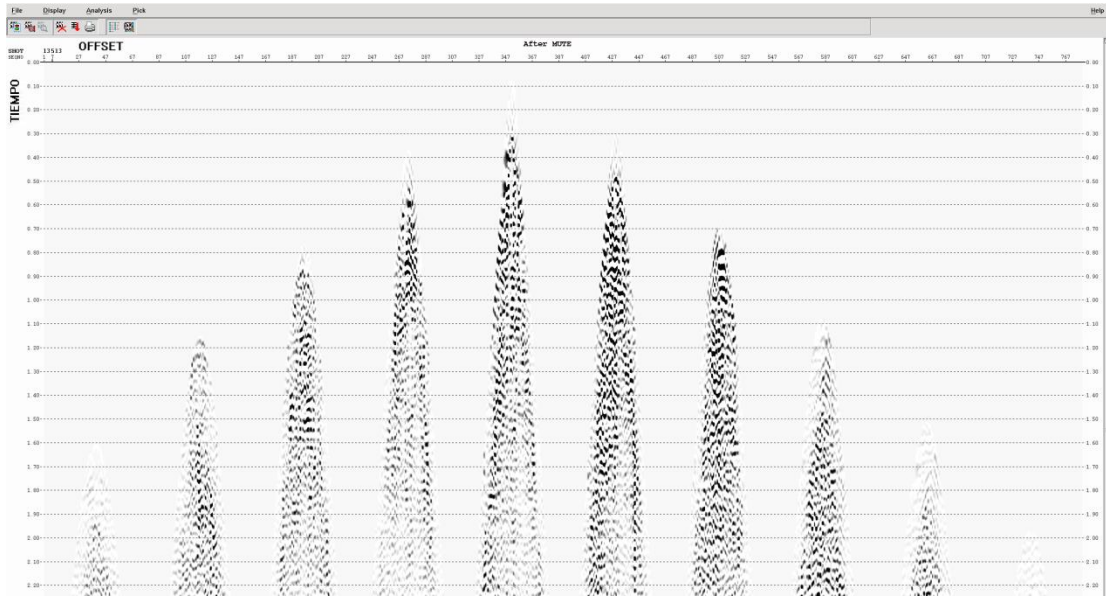


Figura 49. Separación del cono de ruido de los datos para filtrar únicamente en dicha área del disparo 13513

Directamente sobre el cono de ruido se aplican tres (3) módulos de LFAF con velocidades diferentes asociadas a las características del elemento distorsionador, y luego, se aplica otro SUPPRES, se aplica un MUTE para eliminar los efectos de borde inducidos por los módulos para filtrar, posterior a ello, se utiliza un HDRMAN para agregar nuevamente el área sustraída a los datos iniciales. Finalizado el filtrado del cono de ruido, se definen ventanas para la aplicación del AMPSCAL y consecutivamente el TFCLEAN para atenuar el ruido aleatorio dentro de los datos. (figura 50)

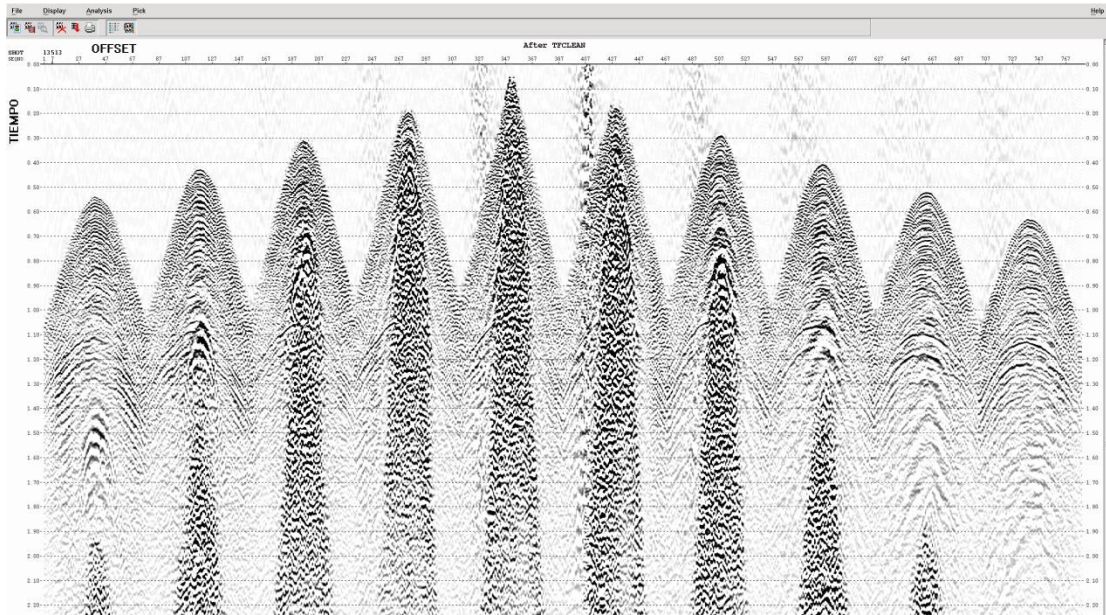


Figura 50. Integración del cono de ruido filtrado al disparo 13513 y aplicación de filtros AMPSCAL y TFCLEAN para atenuación de ruido aleatorio

Los parámetros utilizados para los módulos SUPPRES, LFAL, AMSCAL y TLCLEAN están en las tablas 9, 10, 11 y 12.

Tabla 9. Parámetros para el módulo SUPPRES (1)

Disparo donde se realizará el filtrado (<i>PKEY</i>)			8345		
Ventana de aplicación (<i>gate</i>)					
<i>Offset</i>	<i>TBEG (ms)</i>	<i>TEND (ms)</i>	<i>Offset</i>	<i>TBEG (ms)</i>	<i>TEND (ms)</i>
36	372	3000	313	444	3000
810	1526	3000	820	1834	3000
948	1904	3000	1332	2590	3000
1433	2904	3000	1530	2964	3000
<i>FBAND (Hz)</i>			25		

Tabla 10. Parámetros para el módulo SUPPRES (2)

Disparo donde se realizará el filtrado (<i>PKEY</i>)			8345		
Ventana de aplicación (<i>gate</i>)					
<i>Offset</i>	<i>TBEG (ms)</i>	<i>TEND (ms)</i>	<i>Offset</i>	<i>TBEG (ms)</i>	<i>TEND (ms)</i>
36	372	3000	313	444	3000
810	1526	3000	820	1834	3000
948	1904	3000	1332	2590	3000
1433	2904	3000	1530	2964	3000
<i>FBAND (Hz)</i>			21		

Tabla 11. Parámetros para el módulo LFAF (1), (2) y (3)

<i>LFAF</i>	F1 (frecuencia menor para ser atenuada) (Hz)	F2 (Frecuencia mayor para ser atenuada) (Hz)	VEL (velocidad de la onda superficial) (m/s)
(1)	0	18	439
(2)	0	18	829
(3)	0	18	1300

Tabla 12. Parámetros para el módulo AMPSCAL

Longitud de la ventana en tiempo definida por número de muestras	11
Tiempo donde se realizará el análisis	
<i>TBEG (ms)</i>	<i>TEND (ms)</i>
200	1500
1500	3000

El módulo TFCLEAN trabajó con la misma longitud de ventana en tiempo que el módulo AMPSCALE. Sin embargo, el tiempo donde se realizó el análisis fue de 0 a 3000 ms.

4.12. Balanceo de amplitudes – 1er paso

De igual manera que la corrección por divergencia esférica, existe otro proceso involucrado en la recuperación de amplitudes denominado “balanceo lateral de amplitudes”. La energía del frente de ondas no se propaga de manera uniforme en el subsuelo, tanto en dirección vertical como horizontal (figura 51). El punto 4.10 compensó la pérdida de energía verticalmente. Sin embargo, la distribución de energía lateralmente no fue compensada. Por ende, es requerido aplicar un balanceo lateral consistente con superficie para tomar en cuenta la contribución de elementos tales como: posición de fuentes y receptores, offset, componentes del subsuelo; en el levantamiento para la recuperación de amplitudes.

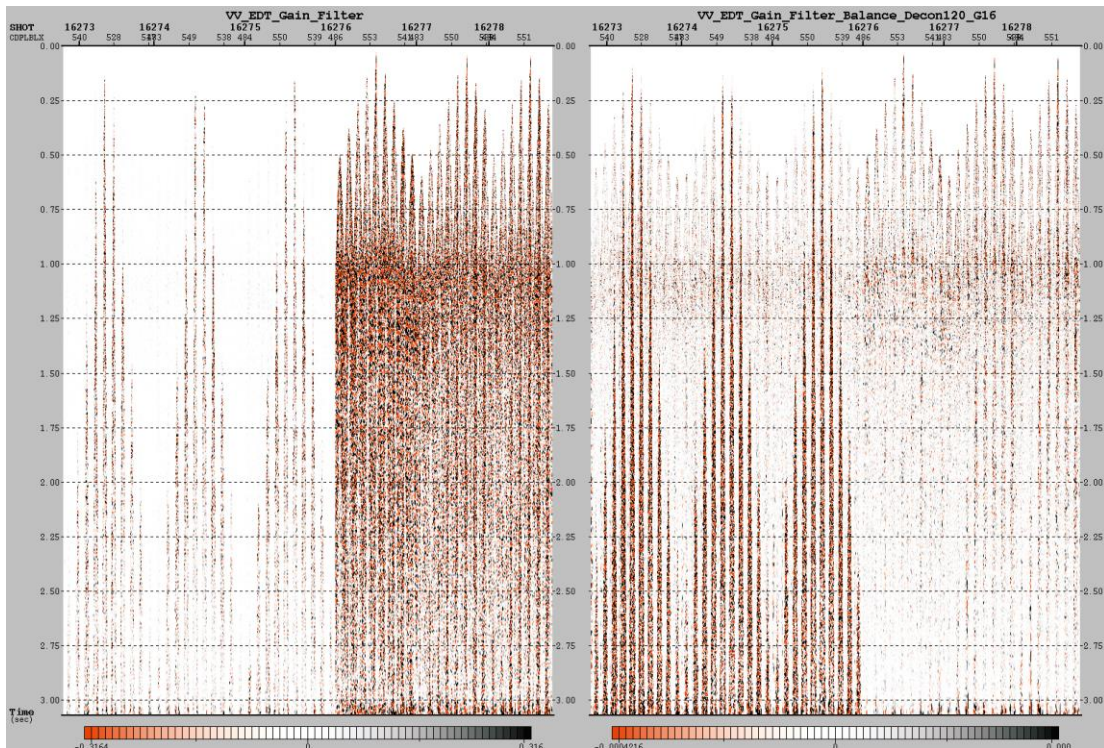
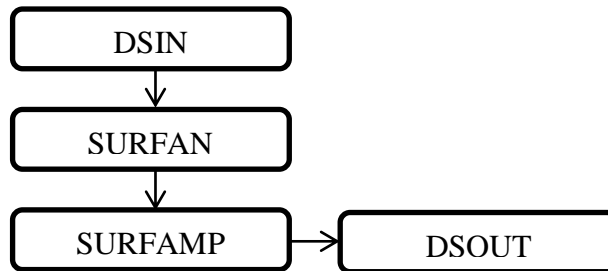


Figura 51. Distribución de energía en un grupo de disparos

El siguiente esquema de trabajo establece los pasos en que se realizó el balanceo en el paquete de procesamiento Echos[®]:



A continuación, se hará una breve descripción de los módulos SURFAN y SURFAMP:

- SURFAN: Se encarga de diseñar y aplicar escalares de amplitud, así como también, operadores de deconvolución consistentes con superficie. El módulo fue diseñado para acumular y descomponer espectros de potencia hasta en cinco dominios (definido por el usuario) suministrados por los encabezados de las trazas. Estos valores consistentes con superficie son modelados en términos de la ubicación de fuentes y receptores (componentes de agrupamiento de los datos). La razón para permitir más de dos componentes en el proceso de acumulación y reducción se debe a la acumulación de ruido y remover su influencia del dominio de fuentes y receptores durante el proceso de reducción. Resumiendo lo anterior, SURFAN calcula el espectro de potencia, reduce el espectro de potencia a consistente con superficie (las componentes deben poseer un espectro de potencia que coincida con las variaciones someras, y que no posea ruido), y finalmente, crea los autocorrelogramas que corresponden a cada dominio donde se realizó el análisis (fuente, receptor, etc).
- SURFAMP: Tiene como función hacer un escalamiento consistente con superficie para compensar las variaciones superficiales (diferencias en la potencia de la fuente, acomplamiento de receptores, así como también, cambios

laterales de propiedades) que afectan las amplitudes de las trazas a partir de los escalares calculados por el módulo SURFAN.

El proceso inicia parametrizando el módulo SURFAN para generar los autocorrelogramas y calcular los escalares en los dominios de fuente (*shot*) y receptor (*rec-stat*) (tabla 13).

Tabla 13. Parámetros para generar el autocorrelograma a nivel de shot y receptor para el balanceo de amplitudes

Longitud de la ventana de autocorrelación (ms)		400	
Parámetros de la ventana de análisis (autocorrelograma)			
<i>PKEY</i> (disparo)		5312	
<i>SKEY1</i> (valor de la primera traza asociada al <i>SKEYNAM</i>)	202	<i>SKEY2</i> (valor de la última traza asociada al <i>SKEYNAM</i>)	1655
<i>TDS1</i> (tiempo inicial en ms)	334	<i>TDS2</i> (tiempo inicial en ms)	1894
<i>TDE1</i> (tiempo final en ms)	1160	<i>TDE2</i> (tiempo final en ms)	2742
<i>PAKEY</i> (1er dominio)	<i>SHOT</i>	<i>SAKEY</i> (2do dominio)	<i>REC-STAT</i>

Los escalares son almacenados en atributos denominados “*SHT_SLC2*” y “*REC_SCL2*”, respectivamente, para fuentes y receptores. (El módulo *Attributes* del paquete de procesamiento permite la visualización de los mapas de escalares) (figura 52) y los autocorrelogramas son guardados en la base de datos en una dirección definida por el usuario.

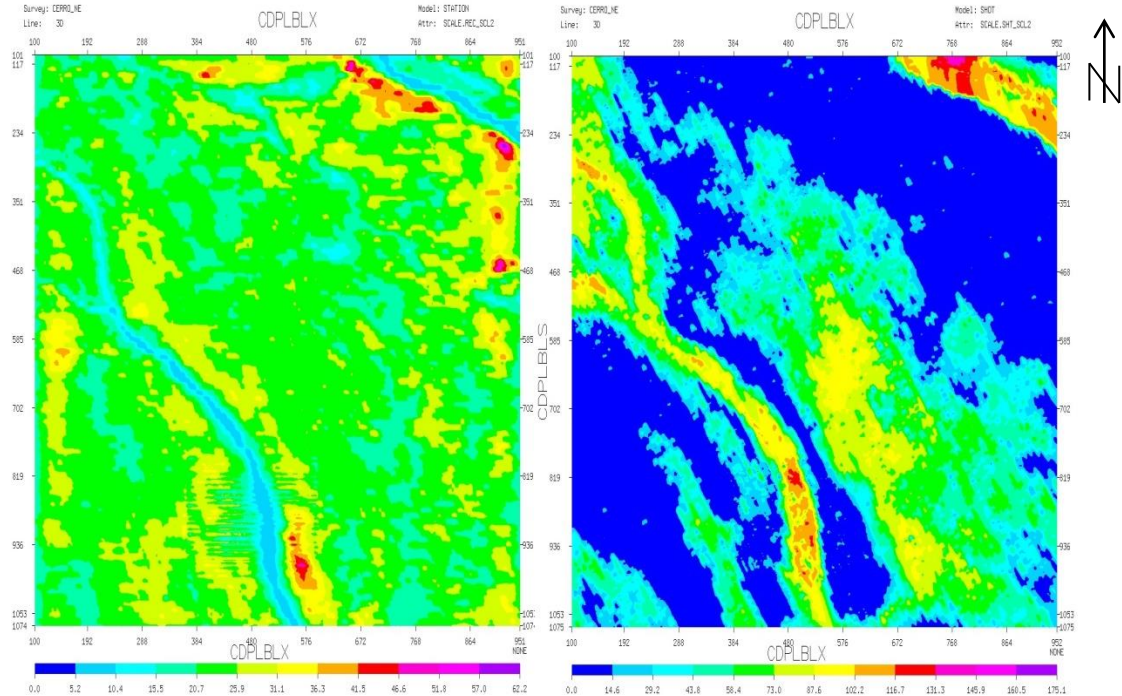
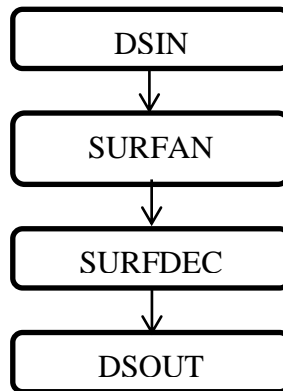


Figura 52. Mapas de escalares calculados por el módulo SURFAN para (A) receptores y (B) fuentes

Finalizado el cálculo de los escalares y autocorrelogramas de los datos de entrada. SURFAMP procede a realizar un balanceo de energía consistente con superficie tomando como entrada los autocorrelogramas de fuentes y receptores. El factor escalar es calculado a partir de la expresión $1/\sqrt{ZLV}$, el denominador corresponde con el valor de mayor coherencia de una autocorrelación. Luego, una traza entra al programa y es leído el valor del escalar de amplitud del encabezado correspondiente a fuente y receptor referente a la figura 52, se aplica el escalar correspondiente, repitiendo el proceso hasta que la última traza haya sido balanceada. El hecho de que estos escalares sean consistentes con superficie es que toman en cuenta la contribución de las fuentes y los receptores para la preservación de las amplitudes en la traza sísmica.

4.13. Deconvolución

La deconvolución tendrá como objetivo, anular los efectos producidos por la acción del subsuelo como filtro sobre la señal emitida al subsuelo que es recibida, de manera alterada, en superficie. Por tanto, los procesos aplicados en este punto buscarán restaurar la forma de la ondícula (recuperar contenido de frecuencia) y eliminar los múltiples a través del siguiente esquema de trabajo.



Al igual que el balanceo de amplitudes, la deconvolución aplicada en el reprocesamiento de los datos del proyecto Cerro Negro 96B 3D es consistente con superficie para remover, selectivamente, las componentes convolucionales que contribuyen en la ondícula sísmica.

El módulo SURFDEC realiza una deconvolución consistente con superficie, traza a traza, en la cual se establece un operador (ondícula que encaje con los datos) definido como el inverso de fase mínima de la componente de la ondícula asociada a la ubicación de la fuente convolucionada con la componente de la ondícula asociada a la ubicación del receptor. Este operador es diseñado en los autocorrelogramas generados por SURFAN para los dominios establecidos (fuentes y receptores). El operador diseñado para cada dominio es aplicado a cada traza en dos pasos. Primero, el operador diseñado para el dominio de las fuentes disparo es aplicado su autocorrelograma, y luego, el operador para el dominio de los receptores al autocorrelograma del mismo.

La deconvolución fue dividida en dos procesos:

- Deconvolución predictiva
- Deconvolución impulsiva (o *spike*)

Para iniciar, son empleados los mismos parámetros establecidos en la tabla 12 para ser aplicados sobre los datos balanceados para generar los autocorrelogramas en el dominio de las fuentes y receptores a través de SURFAN. Luego, se procede a diseñar el operador estableciendo los valores óptimos para la longitud del mismo y la distancia predictiva.

La longitud del operador es igual a la distancia que existe entre el punto de mayor correlación ubicado en el centro y la correlación de igual polaridad asociada al último múltiple dentro del autocorrelograma. La distancia predictiva es la distancia que existe entre la mayor correlación ubicada en el centro y la correlación de polaridad invertida adyacente a la central dentro del autocorrelograma (figura 53).

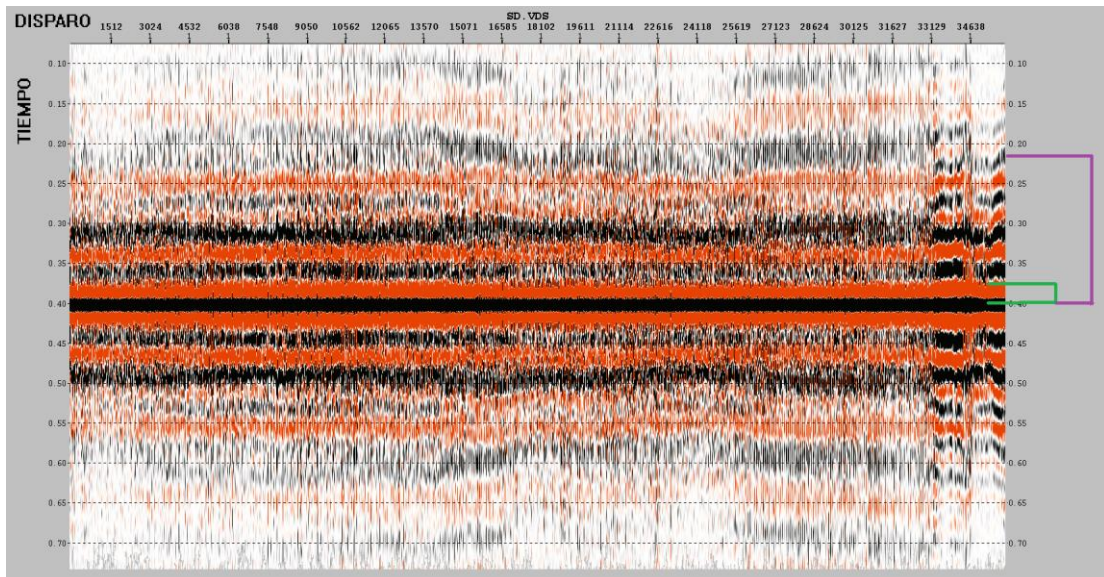


Figura 53. Autocorrelograma en el dominio de las fuentes para determinar los parámetros del operador: La distancia predictiva (delimitada por la línea verde) y longitud del operador (delimitada por la línea morada).

Después de diseñar el operador de deconvolución, se procede a parametrizar el módulo SURFDEC. La primera tarea que cumplió el módulo recayó en la

eliminación de múltiples a través de la deconvolución predictiva (o *gap*). La tabla 14 presenta los parámetros empleados.

Los dominios de fuentes (*Primary analysis key*) y receptores (*Secondary analysis key*) fueron establecidos para realizar los análisis consistentes con superficie para generar los autocorrelogramas. Y de ahí, definir los parámetros óptimos para los operadores en dichos dominios. Sin embargo, en este proyecto se emplearon los mismos parámetros

Tabla 14. Parámetros para realizar la deconvolución predictiva

<i>PAKEY/SAKEY</i>	<i>Shot/Rec-Stat</i>	Distancia predictiva (ms)	16
Tipo	<i>Gap</i>	Límite inferior de la banda de frecuencia (Hz)	5
Longitud de operador (ms)	120	Límite superior de la banda de frecuencia (Hz)	80

Los archivos .VDS de los autocorrelogramas en el dominio de fuentes y receptores forman parte de los parámetros para realizar la deconvolución.

Luego de haber sido aplicada la deconvolución predictiva, el siguiente paso es aplicar el proceso impulsivo o *spike*. Para ello, es necesario volver a generar el autocorrelograma a cada uno de los dominios (fuentes y receptores). En este caso, se presentan los parámetros en la tabla 15.

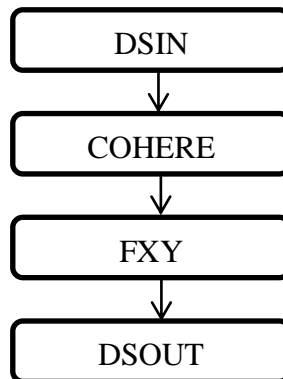
Tabla 15. Parámetros para realizar la deconvolución impulsiva

<i>PAKEY/SAKEY</i>		<i>Shot/Rec-Stat</i>	
Tipo	<i>Spike</i>	Límite inferior de la banda de frecuencia (Hz)	5
Longitud de operador (ms)	120	Límite superior de la banda de frecuencia (Hz)	80

4.14. 1er paso – Estáticas residuales (consistentes con superficie)

Al principio del proyecto, se aplicaron las correcciones estáticas de refracción para eliminar el efecto de la capa meteorizada en los tiempos de llegada. Sin embargo, estas pudieron no corregir completamente dicho efecto debido a los gradientes de velocidad someros y las características de la capa meteorizada. La consecuencia de esto es visible después de apilar los datos haciendo que no exista una coherencia con los eventos sísmicos o generación de eventos ficticios.

El primer paso de estáticas residuales consistente con superficie depende, inicialmente, de la generación de un volumen piloto sobre el cual se calculará el salto estático máximo permitido dentro de los datos para corregir los efectos remanentes que no fueron corregidos previamente. El siguiente flujo de trabajo fue empleado para la generación de dicho volumen.



- COHERE es un filtro bidimensional (frecuencia – número de onda) de tamaño definido por el usuario aplicado a los datos de entrada donde remueve energía coherente con un comportamiento buzante dentro de un rango de pendientes.
- FXY diseña e implementa un filtro predictivo espacial (3D) basado en eventos localmente planos y cuyas características referentes a la ondícula presentan variaciones graduales en el espacio para emplear un filtro de mínimos cuadrados para proveer mayor continuidad en los eventos

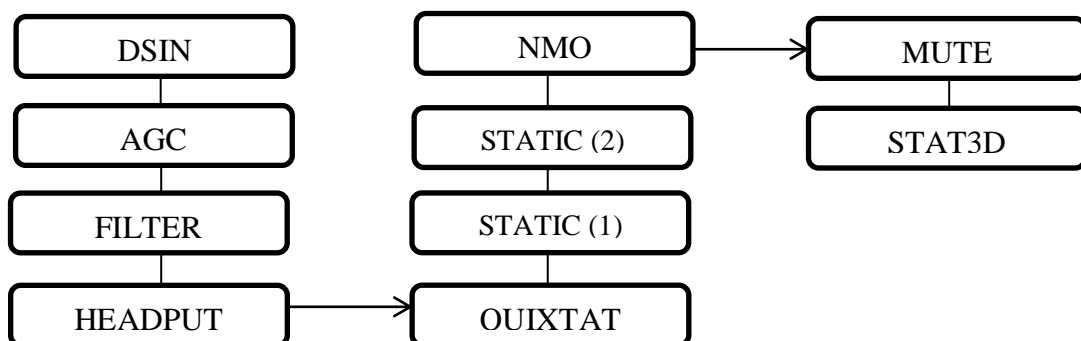
Los parámetros aplicados se resumen en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros para módulo COHERE y FXY

Módulo		COHERE	
<i>NPT</i> (longitud del filtro)	31	<i>PKEYNAM</i> (dominio de interpolación)	CDP
<i>NPX</i> (ancho del filtro)	11	<i>Weight</i> (grado de acción del filtro)	0.6
<i>FREQL</i> (límite inferior del rango de frecuencia)	6	<i>DIPL</i> (límite inferior del rango de buzamiento del filtro)	-2
<i>FREQH</i> (límite superior del rango de frecuencia)	90	<i>DIPH</i> (límite superior del rango de buzamiento del filtro)	2
Módulo		FXY	
<i>FRMAX</i> (máxima frecuencia incluida en el diseño del filtro)		80	

El proceso inicia evaluando distintos valores que permitan filtrar comportamientos lineales dentro de los datos que enmascaren la señal a través módulo COHERE. La resta de la salida generada por el módulo con la entrada de los datos deben ser eventos con tendencia lineal dentro del rango de buzamiento elegido. Posterior a ello, se aplica el módulo FXY para darle continuidad a los eventos (figura 55). El último paso corresponde con la generación del volumen sísmico (cubo piloto) obtenido de dichos procesos para calcular el salto estático máximo presente en los datos.

El segundo paso de las estáticas residuales consistentes con superficie está asociado directamente a su cálculo a través del paquete de procesamiento. Se empleó el siguiente esquema de trabajo para su cálculo.



El esquema de trabajo inicia con la aplicación de los módulos AGC y FILTER para resaltar los eventos dentro del cubo piloto al aplicar una ganancia y un filtro pasabanda con los parámetros establecidos en la tabla 17 (figura54).

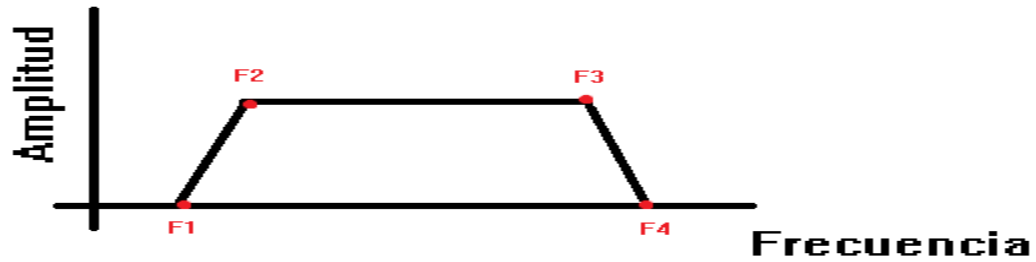


Figura 54. Filtro pasa-banda

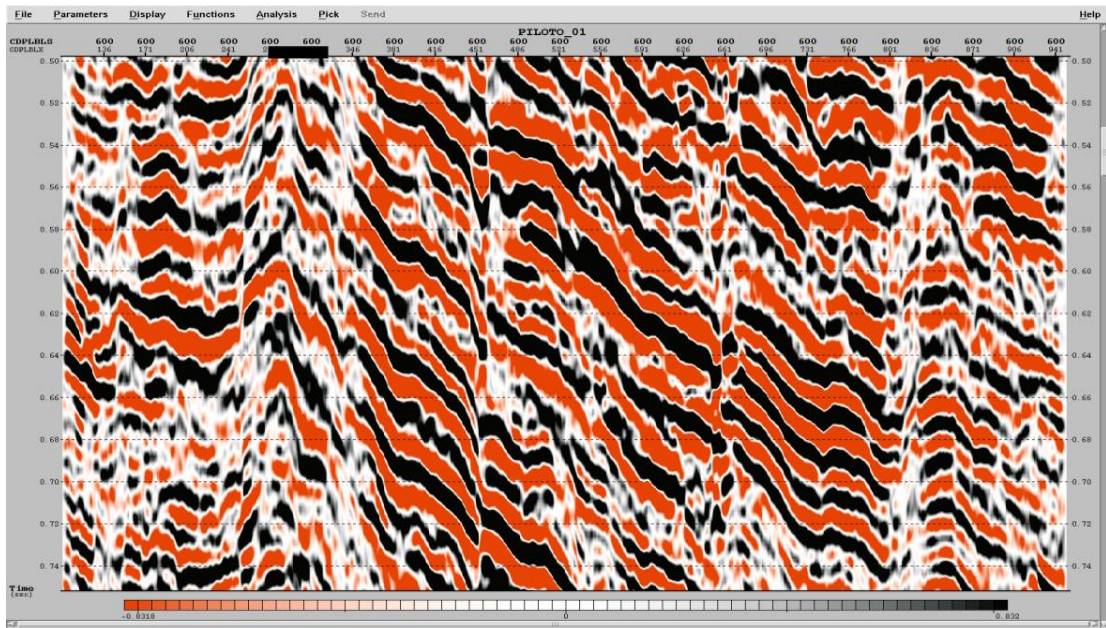


Figura 55. IL - 600 del cubo piloto tras aplicarse los módulos COHERE y FXY

Tabla 17. Parámetros del módulo FILTER

Frecuencia (Hz)			
F1	F2	F3	F4
12	16	80	120

Posterior a ello, aplican las estáticas de campo (elevación y estáticas de refracción) con la secuencia HEADPUT, QUIXTAT y se lleva a datum flotante con los módulos STATIC (1) y STATIC (2). Previo al cálculo de las estáticas, se emplea un módulo de NMO para horizontalizar los CDP y un MUTE para eliminar los efectos de *stretching* en los bordes. Finalmente, se parametriza el módulo STAT3D para calcular las estáticas residuales consistentes con superficie.

Una descripción del cálculo de estáticas residuales a través de STAT3D es la siguiente: una traza de entrada es ingresada al módulo y la traza piloto correspondiente al encabezado del CDP de la traza de entrada es agregada para el análisis. La traza ubicada dentro de la ventana de análisis es correlacionada con la traza piloto dentro de los límites negativos y positivos del valor del salto estático máximo definido por el usuario. La función de correlación cruzada resultante es sumada en los atributos asociados a las ubicaciones de fuentes y receptores correspondientes al valor en el encabezado de las trazas (dominio) de *SHOT* y *REC-STAT*. Cada traza de entrada contribuye en la función de correlación cruzada de manera puntual en cada atributo a nivel de fuente y receptor, así como también, cada ubicación dentro de los atributos asociadas a fuente y receptor contienen las contribuciones de todas las trazas comunes para ese disparo o receptor. Cuando la función de correlación cruzada ha sido sumada para cada traza de entrada en los atributos correspondientes, el tiempo máximo definido en la correlación cruzada para fuente y receptor es elegido y almacenado en la base de datos. Los parámetros empleados en el módulo STAT3D se presentan en la tabla 18.

Tabla 18. Parámetros para el módulo STAT3D

<i>LIMIT</i> (salto estático máximo) (ms)		20
<i>WINDOW</i> (número máximo de trazas para almacenar por análisis)		80
<i>PILOT</i> (nombre del cubo piloto)		PILOTO_01
<i>GATE</i> (dominio del CDP)		
<i>PKEYNAM</i> (valor de CDP)	<i>TSTART</i> (ms)	<i>TEND</i> (ms)
97973	310	1250
1039713	310	1250

4.15. 2do paso – Balanceo de amplitudes (balanceo residual)

En el punto 4.12 se definió la manera para balancear lateralmente las amplitudes. Sin embargo, no distribuyó totalmente la energía dentro de los disparos (figura 56), y por ello, se realizó un segundo paso de balanceo tomando en cuenta las estáticas calculadas hasta los momentos.

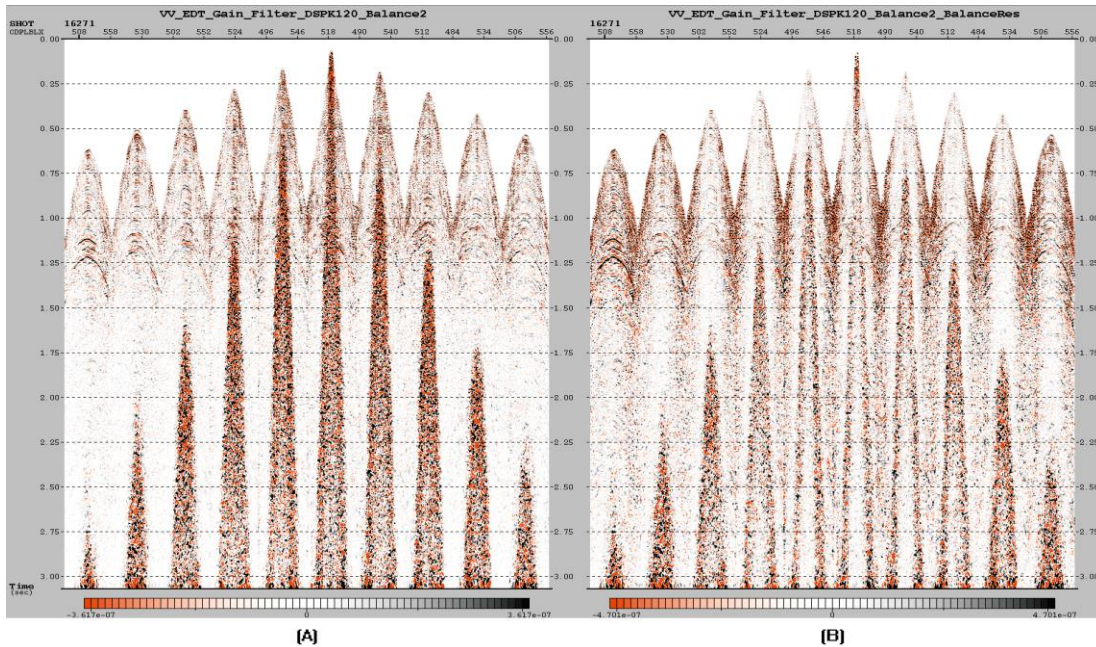
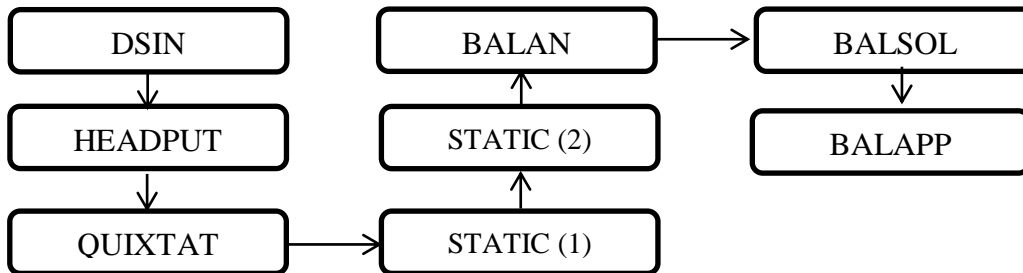


Figura 56. Distribución de la energía con (A) 1er paso de balanceo de amplitudes y (B) 2do paso de balanceo de amplitudes (residual)

El esquema de trabajo utilizado para realizar el balanceo residual es el siguiente:



Los datos son cargados con el módulo DSIN, posterior a ello, los módulos HEADPUT y QUIXTAT aplican las correcciones estáticas de campo y residuales consistentes con superficie a los datos. STATIC (1) y STATIC (2) trasladan del datum fijo al flotante para hacer los cálculos. Los módulos BALAN, BALSOL y BALAPP son homólogos a SURFAN y SURFAMP, debido a que son procesos consistentes con superficie. Mientras SURFAN genera los autocorrelogramas y calcula los valores escalares, el proceso se divide de la siguiente manera: BALAN se encarga de calcular los autocorrelogramas de los datos asociada a la ventana de

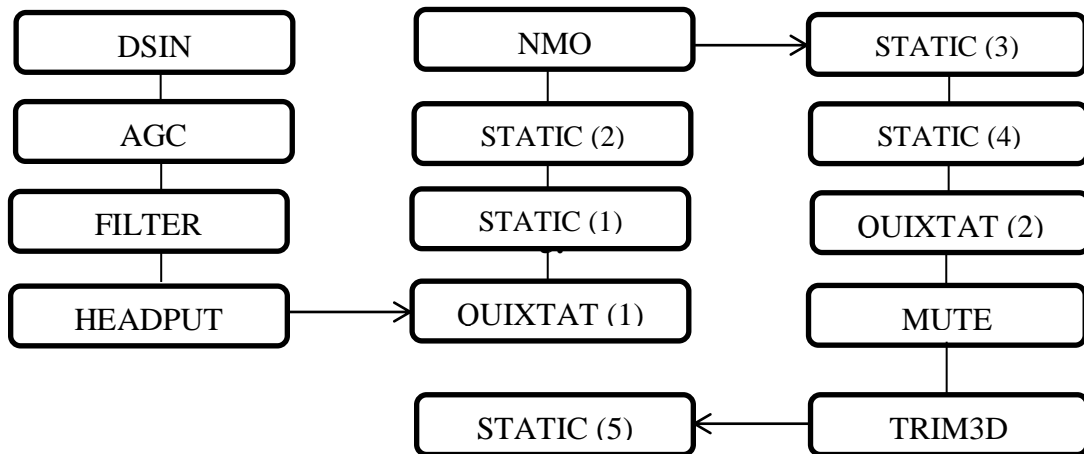
análisis que se establece como entrada y BALSOL calcula los valores escalares a partir de los autocorrelogramas generados por BALAN. Finalmente, BALAPP aplica los valores escalares a los datos para realizar el balanceo lateral consistente con superficie. A pesar de haber utilizado módulos diferentes para realizar el balanceo, su propósito es el mismo. La única diferencia que hubo es la integración de las estáticas previamente calculada durante el análisis. En la tabla 19 se presentarán los parámetros utilizados en BALAN para generar la autocorrelación.

Tabla 19. Parámetros del módulo BALAN

Dominio de descomposición 1		<i>SHOT</i>
Dominio de descomposición 2		<i>REC-STAT</i>
Dominio de descomposición 3		<i>OFFSET</i>
Ventana de análisis (interpolación realizada a nivel de <i>OFFSET</i>)		
<i>KEYVAL</i> (valor de <i>OFFSET</i>)	<i>TSTART</i> (ms)	<i>TEND</i> (ms)
170	104	3000
1122	501	3000
1326	678	3000
1954	900	3000
3024	1171	3000

4.16. 2do paso – Estáticas residuales (no consistentes con superficie)

Las estáticas residuales no consistentes con superficie, también conocidas como estáticas TRIM, tienen como objetivo otorgar mayor enfoque y continuidad a los eventos. El cálculo de las estáticas TRIM se realizó a través del siguiente esquema de trabajo.



Cabe destacar que es necesario generar un nuevo cubo piloto para poder realizar el cálculo de las estáticas residuales no consistentes con superficie. Fueron empleados los módulos COHERE y FXY para la generación del mismo, los parámetros implementados son iguales a los de la tabla 16.

Luego de generar el cubo piloto, se aplica un módulo AGC para resaltar los eventos dentro de las secciones apiladas, se realiza una atenuación de ruido con el módulo FILTER (parámetros definidos en la tabla 17). HEADPUT carga las estáticas de elevación y QUIXTAT aplica las correcciones estáticas de refracción. STATIC (1) y STATIC (2) trasladan del datum fijo al flotante para ejecutar el módulo NMO (corrección *NMO*). Posterior a ello, se aplican los módulos STATIC (3) y STATIC (4) para devolver los datos al datum flotante, y es llamado el módulo QUIXTAT para aplicar las correcciones estáticas residuales consistentes con superficie. Es realizado un enmudecimiento en los bordes de los registros ordenados por CDP para eliminar el efecto de estiramiento (*stretching*). Finalmente, se aplica el módulo TRIM3D para calcular las estáticas residuales, el modo en que trabaja es similar al STAT3D. Sin embargo, éste no toma en cuenta el posicionamiento de las fuentes y receptores, haciendo que los cálculos sean netamente matemáticos. Sin embargo, se utilizó un módulo STATIC (5) para almacenar las estáticas en un atributo; no es realizado directamente como el STAT3D. Los parámetros para TRIM3D están presentados en la tabla 20.

Tabla 20. Parámetros para TRIM3D

<i>LIMIT</i> (salto estático máximo) (ms)		12
<i>PILOT</i> (nombre del cubo piloto)		PILOTO_02
<i>GATE</i> (dominio del CDP)		
<i>PKEYNAM</i> (valor de CDP)	<i>TSTART</i> (ms)	<i>TEND</i> (ms)
97973	410	1250
1039713	410	1250

4.17. Construcción: 3er modelo de velocidades

El modelo de velocidades es empleado en procesos, tales como: corrección NMO, análisis de velocidades, migración, análisis de la variación de la amplitud respecto al *offset* (AVO). Al igual que los modelos previos, la generación del 3er modelo de velocidades estará enfocado en la corrección NMO para apilar óptimamente las secciones sísmicas, y posteriormente, ser aplicado en la migración antes y después del apilamiento. Además de poseer una distribución más densa para seleccionar las funciones de velocidad vertical, fue integrado el parámetro de anisotropía ETA (serie de Taylor en 4to orden). La anisotropía conlleva a una distorsión en los tiempos de llegada en las hipérbolas de reflexión. Si esto no es corregido, causa problemas en la estimación de velocidades y deteriora la calidad de las secciones apiladas. A continuación se presenta el esquema de trabajo implementado para generar el modelo de velocidades, se divide en dos partes.

La parte A corresponde con el modelo de velocidades para la corrección NMO (serie de Taylor de 2do orden) a través del VELDEF, luego, se aplica el mismo proceso sin tomar en cuenta el VELDEF y se emplea el módulo ETADEF para corregir las distorsiones no hiperbólicas en los tiempos de llegadas (serie de Taylor 4to orden) (tabla 21).

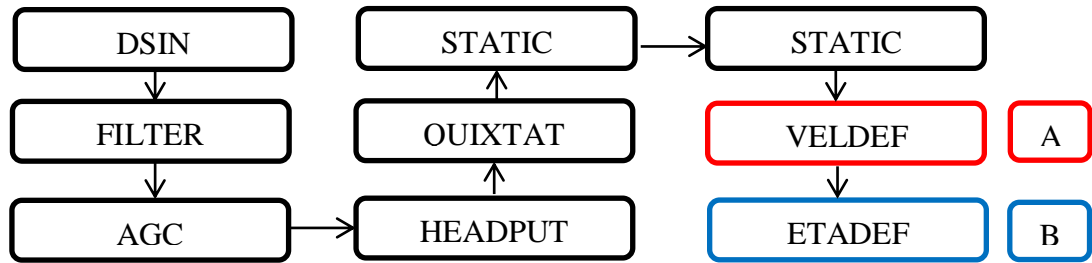


Tabla 21. Parámetros para el diseño de la malla de procesamiento para el 3er modelo de velocidades en el módulo VELDEF y ETADEF

Orden – Parámetros para organizar las trazas			
Orden primario		CDP	
Orden secundario		OFFSET	
Dimensiones de la malla			
Primera inline	122	Primera crossline	150
Ultima inline	1046	Última crossline	950
Incremento en dirección inline	14	Incremento en dirección crossline	14
Número de registros en cada grupo para análisis		11	

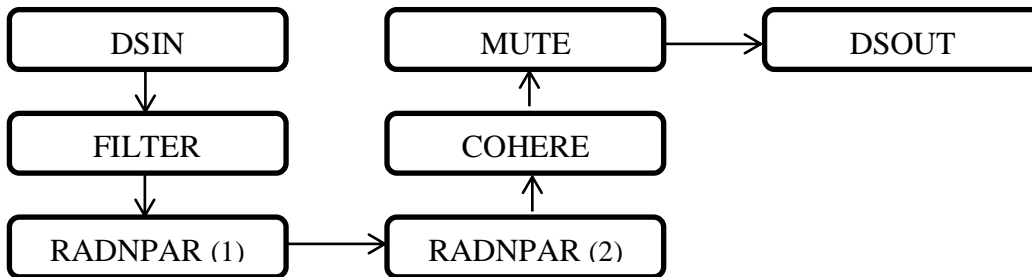
Primero, se empleó el esquema A tomando en cuenta el módulo para generar el modelo de velocidades de apilamiento. Luego, se empleó el esquema B tomando en cuenta el módulo para generar el modelo del parámetro de anisotropía (ETA) para recuperar la información de offsets lejanos.

4.18. Acondicionamiento de los registros

La aplicación de procesos tales como: deconvolución y el balanceo de amplitudes; redistribuyen la energía de los disparos para poder cumplir con sus objetivos. No obstante, alteran el contenido de frecuencia de los datos pudiendo incrementar el

ruido dentro de los mismos, así como todavía pudiese existir la presencia de múltiples y/o reverberaciones. Por ello, es necesario realizar un tratamiento para atenuar el ruido en los registros que serán el producto final para efectuar la migración de Kirchhoff antes del apilamiento en el dominio del tiempo

El esquema de trabajo empleado para realizar el acondicionamiento de los registros se muestra a continuación.



El acondicionamiento inicia con la aplicación de un filtro pasa-banda a través del módulo FILTER para hacer remoción de ruido pre-existente (tabla 22). Luego, se emplearon dos módulos de RADNPAR (filtro Radon) para la eliminación de múltiples (tabla 23 y 24). Los datos son transformados al dominio del tau – p, donde el ruido coherente no deseado es aislado y enmudecido, luego, la información restante se transforma al dominio del espacio – tiempo. El paso siguiente corresponde con la eliminación del ruido cuyo comportamiento posea velocidades lineales y enmascare la señal a través del módulo COHERE (tabla 25), y finalmente, la aplicación de un MUTE para enmudecer los artefactos levantados en los bordes de los registros.

Tabla 22. Parámetros para el módulo FILTER

Frecuencia (Hz)			
F1	F2	F3	F4
10	14	90	110

Tabla 23. Parámetros para el módulo RADNPAR (1)

<i>MAXOFF</i> (offset máximo) (m/ft)	3000
Parámetros para la transformada	
<i>NPARAB</i> (número de parábolas implementadas en la transformada)	300
<i>PBEG</i> (mínimo <i>moveout</i> en el offset máximo) (ms)	1000
<i>PBEG</i> (máximo <i>moveout</i> en el offset máximo) (ms)	1200

Tabla 24. Parámetros para el módulo RADNPAR (2)

<i>MAXOFF</i> (offset máximo) (m/ft)	3000
Parámetros para la transformada	
<i>NPARAB</i> (número de parábolas implementadas en la transformada)	300
<i>PBEG</i> (mínimo <i>moveout</i> en el offset máximo) (ms)	200
<i>PBEG</i> (máximo <i>moveout</i> en el offset máximo) (ms)	600

Tabla 25. Parámetros para el módulo COHERE

<i>NPT</i> (longitud del filtro) (ms)	31	<i>PKEYNAM</i> (dominio de interpolación)	CDP
<i>NPX</i> (ancho del filtro) (ms)	11	<i>Weight</i> (grado de acción del filtro)	0.5
<i>FREQ_L</i> (límite inferior del rango de frecuencia) (Hz)	14	<i>DIP_L</i> (límite inferior del rango de buzamiento del filtro)	-1.5
<i>FREQ_H</i> (límite superior del rango de frecuencia) (Hz)	120	<i>DIP_H</i> (límite superior del rango de buzamiento del filtro)	1.5

4.19. Migración de Kirchhoff después del apilamiento en el dominio del tiempo

Las pruebas de apertura de migración en inline y crossline se realizaron en el módulo de la migración post-apilamiento debido a la rapidez del cómputo. Los valores utilizados fueron: 500, 800, 1000, 1200 y 1600 m, donde la apertura de migración óptima fue 1600 m, y en tiempo la apertura óptima corresponde a 1000 ms.

El paso inicial para realizar esta migración consiste en la realización de un apilamiento de los datos con todos los procesos aplicados hasta el momento (corrección por divergencia esférica, filtrado, balanceo de amplitudes, deconvolución, correcciones estáticas, etc). Luego de realizar el apilamiento de los datos, en el paquete de procesamiento GeoDepth[®], en el módulo de *Imaging/Tomography*, se hace clic en la opción de *3D Kirchhoff post-stack time migration* y se definen los parámetros para realizar la migración post-apilamiento (figura 57)

Antes de ejecutar el proceso de migración, se debe verificar que los datos de entrada correspondan con el volumen sísmico de los datos apilados del proyecto.

CrossLine Output Fine Internal Vertical Step
 Fourth Order Term

Max Frequency [Hz]

Max Stretch [%]

Anti-Alias Strength

Target InLines
 - Step

Target CrossLines
 - Step

Time [ms]
 - Step

Apertures [m]
 Along Inline Along Crossline At Time [ms]

Miscellaneous
 RAM [MB] CPUs

Figura 57. Parámetros utilizados para la migración de Kirchhoff después del apilamiento en el dominio del tiempo

4.20. Migración de Kirchhoff antes del apilamiento en el dominio del tiempo

El primer paso refiere a la selección de residuos para actualizar el 3er modelo de velocidades. El 3er modelo fue optimizado con la integración del parámetro anisotrópico ETA. Sin embargo, añadir los residuos (funciones de velocidad vertical) permite corregir defectos remanentes en la horizontalización de los eventos para visualizar secciones sísmicas apiladas con una recomendable relación señal - ruido.

El proceso inicia con la activación del 3er modelo de velocidades en el módulo *View Data* del Echos[®]. En GeoDepth[®], se ejecuta el módulo *Velocity Navigator*. Este

tendrá que ser parametrizado para generar un modelo de velocidades residuales (tabla 26).

Tabla 26. Parámetros para generar el modelo de velocidades residuales

<i>Isotropic media</i>			
<i>Time migrated domain – RMS velocity refinement</i>			
<i>Residual RMS velocity</i>			
<i>Time migrated gathers</i>			
Primera inline	102	Primera crossline	105
Última inline	1068	Última crossline	948

Finalizado el modelo de velocidades residuales, se ejecuta otro módulo denominado *Volumen manipulations* para actualizar el 3er modelo de velocidades a través de la integración del modelo de velocidades residuales. Luego, se procede generar un volumen de velocidades RMS (interpolación de las funciones de velocidad vertical) que será empleado en la migración.

El segundo paso corresponde al cálculo de pesos (parámetro necesario para la migración antes del apilamiento). Se define el rango de offset que de mayor aporte de información a la migración basados en el histograma de la distribución de cobertura en función del offset. En este caso, el rango establecido fue de 100 a 1750 m con un número de pasos de 50. El número de pasos permite estandarizar la cobertura dependiendo del objetivo del usuario, en este caso, el paso de 50 permitió establecer una cobertura de 34 trazas por bin en los datos (a través de la expresión $\Delta\text{Offset}/\text{Cobertura} = \# \text{ de pasos}$) (figura 58).

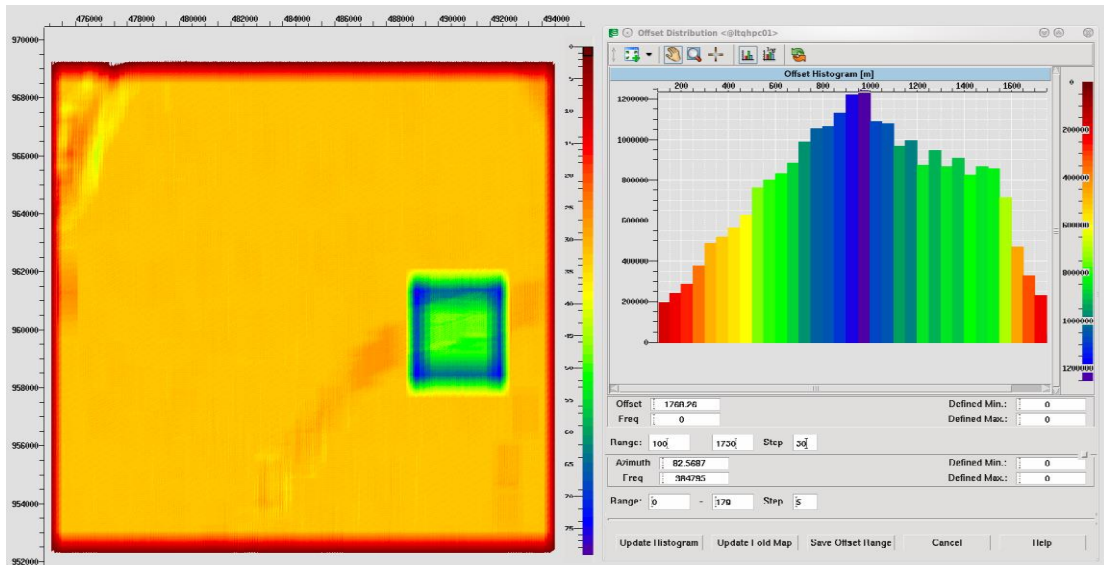


Figura 58. Definición de rango de offsets para estandarizar la cobertura

Luego, se establecieron los parámetros adecuados para el cálculo de los pesos. Se establece una apertura en dirección inline de 80 m y dirección crossline de 80 m para la regularización de la energía en la cobertura (figura 59).

Antes de realizar los procesos de migración, se debe generar una base de datos en el donde se guardará la información concerniente al mapa topográfico. Luego, se generan los mapas topográficos tomando en cuenta el posicionamiento de fuentes y receptores, la velocidad de reemplazo de 1100 m/s para llevar los datos al datum final de 120 m, y a su vez, tomando en cuenta las correcciones estáticas de refracción. Finalmente, se guardaron los mapas en el dominio del tiempo y profundidad. Sin embargo, para la migración se necesita el mapa de topografía en el dominio del tiempo migrado. Para ello, en la opción *Mathematical operations* dentro del módulo se procede a utilizar la ecuación 27 para llevar el mapa a tiempo migrado.

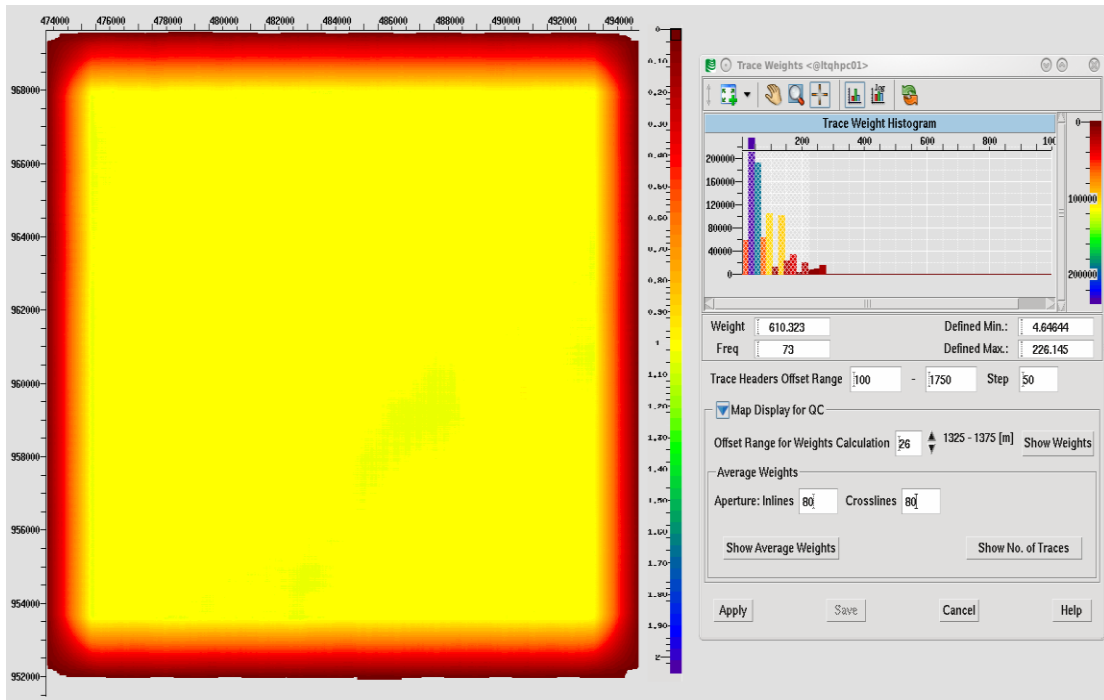


Figura 59. Cálculo de pesos

Donde TM es el tiempo migrado. Después de calcular los pesos se procede a realizar la migración de Kichhoff antes del apilamiento en el dominio del tiempo. En la figura 60, se presentan los parámetros utilizados para realizar la migración de Kirchhoff antes del apilamiento en el dominio del tiempo sobre todos los datos.

Antes de ejecutar el proceso de migración, se debe verificar que los datos de entrada correspondan con los registros de disparo finales incluyendo todos procesos aplicados anteriormente (pre-apilamiento) y el volumen de velocidad RMS generado.

CrossLine Output Fine Internal Vertical Step
 Fourth Order Tern
 Geom. Weights Offsets/Azinuths from DB

Max Frequency [Hz]
 Max Stretch [%]

Anti-Alias Strength

Target InLines
 - Step

Target CrossLines
 - Step

Time [ms]
 - Step

Apertures [m]
 Along Inline Along Crossline At Time [ms]

Maximum Input Offsets [m] **Input Azimuth [deg]**
 Along Inline Along Crossline +/-

Create Output Gathers Target Lines Grouped by

Output Offsets [m]
 - Step

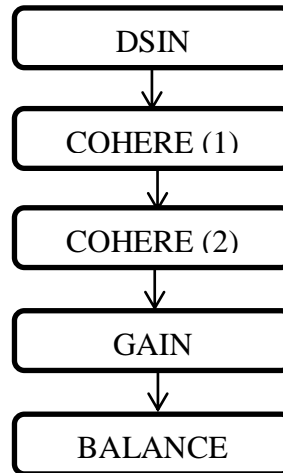
Miscellaneous
 RAM [MB] CPUs

Figura 60. Parámetros utilizados para la migración de Kirchhoff antes del apilamiento en el dominio del tiempo

4.21. Post – procesos y producto final

Los post – procesos consiste en la aplicación de distintos módulos a través de un esquema de trabajo para mejorar la calidad de la imagen. Sin embargo, la preservación de amplitudes no se mantiene debido a la naturaleza de los módulos BALANCE y GAIN, en este caso. El esquema de trabajo implementado será presentado a continuación. Los post – procesos son aplicados para resaltar las

estructuras en la imagen sísmica, no se emplean para ser utilizados para estudios de inversión sísmica o caracterización de yacimientos.



El proceso inicia con la aplicación de COHERE (1) y COHERE (2) para eliminar ruido cuyas velocidades tengan un comportamiento lineal. En este caso, se aplicaron dos rangos de pendientes diferentes en cada módulo para la remoción de dicho ruido (tabla 27). Luego, se aplicó la función de ganancia del módulo GAIN (tabla 28), a diferencia del aplicado para la corrección por divergencia esférica, se utilizó la modalidad *PAIRS* para una compensación de energía a través de la definición de un escalar para un tiempo determinado. Finalmente, el módulo BALANCE realiza un balanceo lateral de amplitudes. Sin embargo, no es consistente con superficie, su análisis se realiza dentro de una ventana de tiempo definida por el usuario (tabla 29).

Tabla 27. Parámetros para los módulos COHERE (1) y COHERE (2)

Módulo		COHERE (1)	
<i>NPT</i> (longitud del filtro) (ms)	31	<i>PKEYNAM</i> (dominio de interpolación)	CDP
<i>NPX</i> (ancho del filtro) (ms)	11	<i>Weight</i> (grado de acción del filtro)	0.6
<i>FREQL</i> (límite inferior del rango de frecuencia) (Hz)	16	<i>DIPL</i> (límite inferior del rango de buzamiento del filtro)	-2

<i>FREQH</i> (límite superior del rango de frecuencia) (Hz)	90	<i>DIPH</i> (límite superior del rango de buzamiento del filtro)	2
Módulo		COHERE (2)	
<i>NPT</i> (longitud del filtro) (ms)	31	<i>PKEYNAM</i> (dominio de interpolación)	CDP
<i>NPX</i> (ancho del filtro) (ms)	11	<i>Weight</i> (grado de acción del filtro)	0.9
<i>FREQL</i> (límite inferior del rango de frecuencia) (Hz)	20	<i>DIPL</i> (límite inferior del rango de buzamiento del filtro)	-2.75
<i>FREQH</i> (límite superior del rango de frecuencia) (Hz)	90	<i>DIPH</i> (límite superior del rango de buzamiento del filtro)	2.75

Tabla 28. Parámetros para el módulo GAIN

<i>PKEYNAM</i> (encabezado para realizar ganancia espacialmente variante)	<i>CDP</i>
<i>TIME</i> (tiempo) (ms)	<i>GAIN</i> (factor de ganancia)
100	25
300	20
700	18
1000	16
1300	13
2000	12
3000	5

Tabla 29. Parámetros para el módulo BALANCE

<i>PKEYNAM</i> (1er dominio)	<i>CDPLBLS</i>	<i>SKEYNAM</i> (2do dominio)	CPDLBLX
<i>XSHORT</i> (1er valor del 2do dominio)	252	<i>XLONG</i> (Último valor del 2do dominio)	405
<i>SFACTOR</i> (factor de escala)		0.05	
GAIN (ventana de análisis)			
PKEY (valor donde se realizará el análisis) (ms)	885	<i>NGATES</i> (número de ventanas para el análisis)	1
TSTART (tiempo de inicio para la 1er ventana) (ms)	200	<i>GLENGTH</i> (longitud de la ventana) (ms)	600
<i>MOVEUP</i> (desplazamiento para cada ventana de análisis) (ms)		100	

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En total, se obtuvieron, a partir de la metodología empleada anteriormente, cuatro volúmenes sísmicos del proyecto Cerro Negro 96B 3D correspondientes a la migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo antes y después de la aplicación de post – procesos así como también a la migración de Kirchhoff post – apilamiento en tiempo antes y después de la aplicación de post – procesos. El volumen de Kirchhoff obtenido del post – apilamiento fue empleado como control de calidad de la imagen sísmica después de migrar los datos y también para definir las aperturas de migración, el volumen de migración de Kirchhoff pre-apilamiento permitirá definir para su interpretación posterior los rasgos estratigráficos y los volúmenes con post – procesos para la migración post – y pre – apilamiento permitieron resaltar los rasgos estructurales de la zona de estudio.

Inicialmente, se cargó la geometría para acoplar la información de la posición y elevación de fuentes (figura 61) y receptores (figura 62) con los registros de los 36078 disparos del levantamiento sísmico.

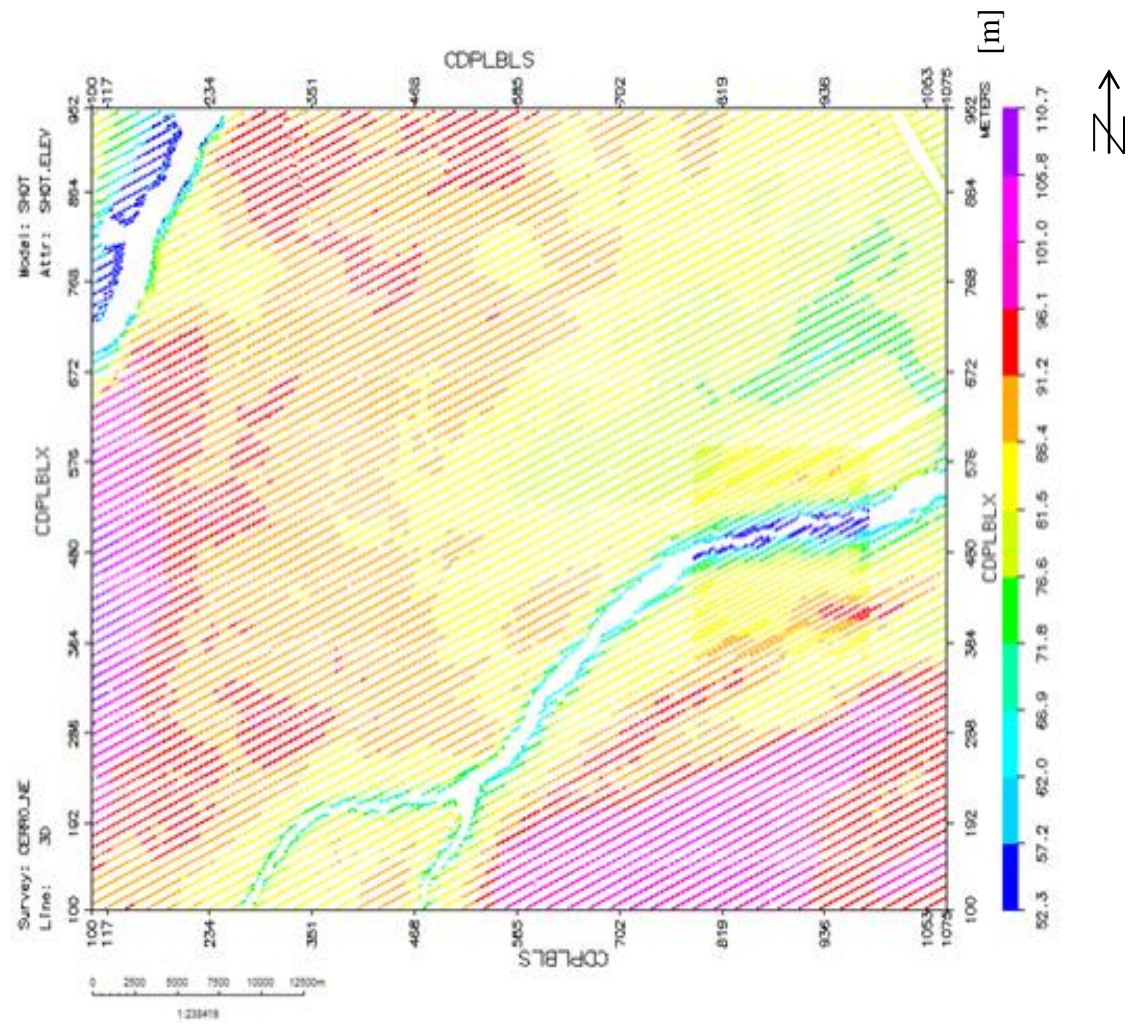


Figura 61. Mapa de elevaciones de las fuentes

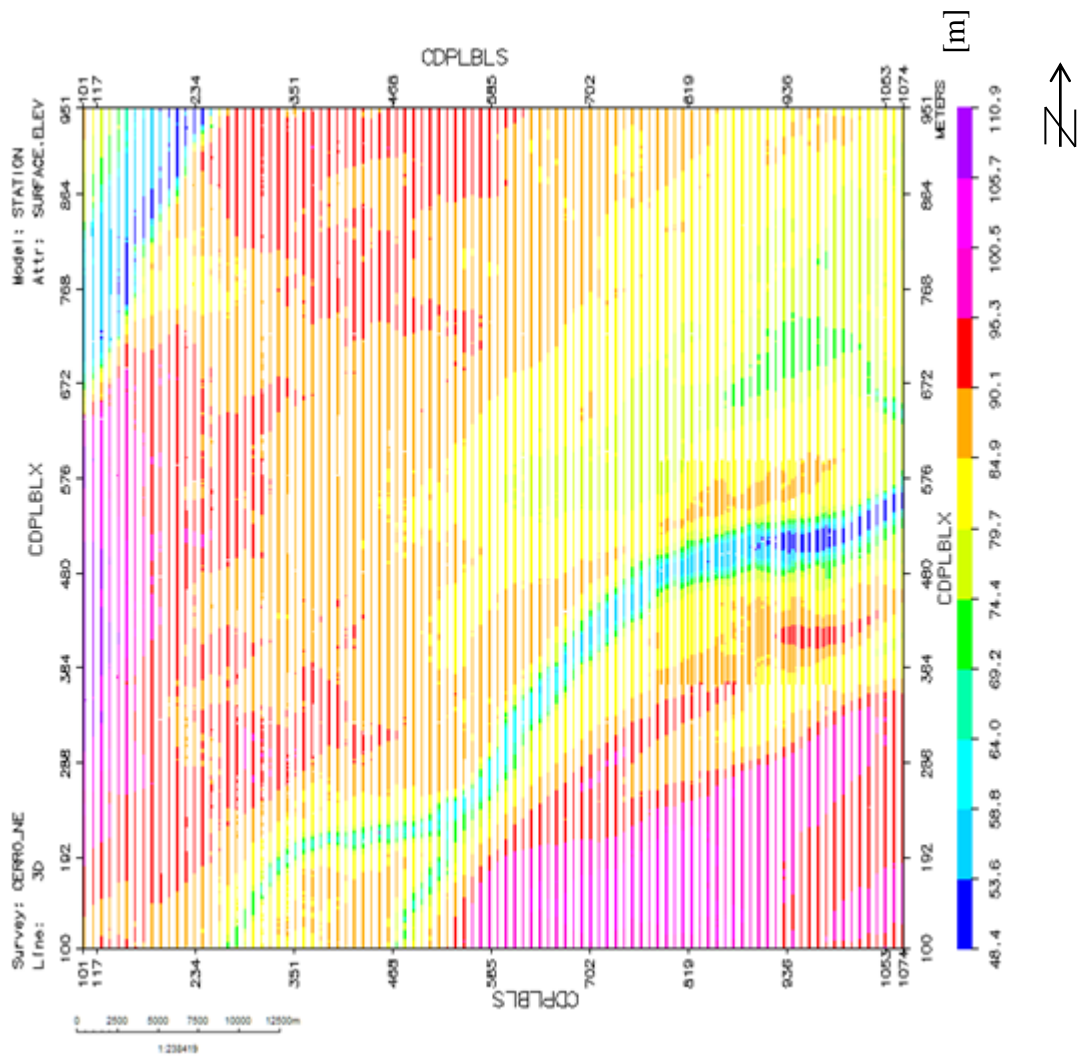


Figura 62. Mapa de elevaciones de las estaciones receptoras

Las líneas receptoras poseen una orientación N – S (inline o IL) y las líneas fuentes poseen una orientación oblicua a diferencia de los tendidos usuales cuya disposición es ortogonal (E - O) a las líneas receptoras (crossline o XL). La cobertura nominal del proyecto corresponde a 35 trazas por bin. Ésta posee un comportamiento uniforme a lo largo del levantamiento. No obstante, existen irregularidades en la distribución de la cobertura debidos a parámetros de adquisición, a los tipos de arreglos durante la grabación (*roll on, roll off*), y también, obstáculos naturales y/o anisotrópicos que comprometen la calidad de la imagen. En la figura 61 se nota un área que no posee

fuentes, ésta corresponde con el paso de un río, esto afecta la imagen en cuanto a offsets cercanos y medios. El área enmarcada en la figura 63 corresponde con la cobertura del proyecto piloto realizado en el año 1995; éste posee una cobertura mayor debido a la densa distribución de fuentes y receptores en el área del levantamiento piloto a diferencia del proyecto Cerro Negro 96B 3D.

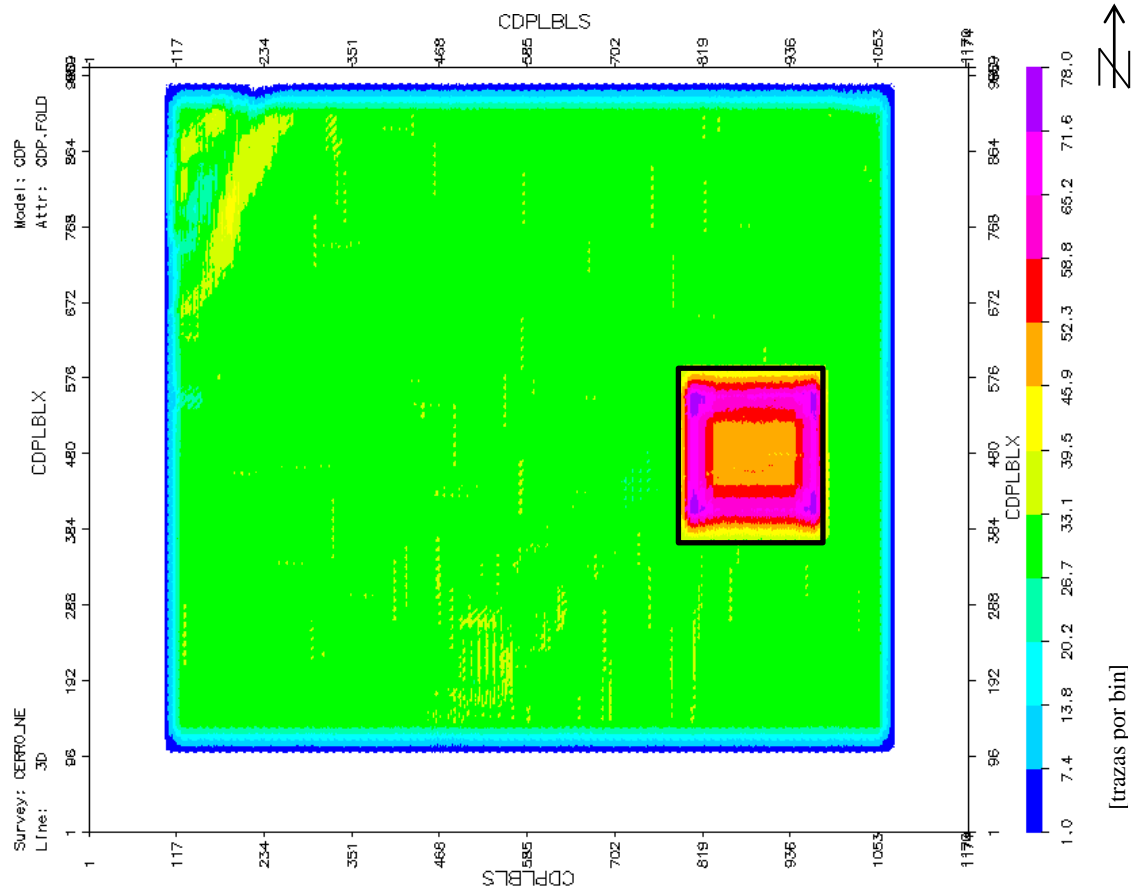


Figura 63. Cobertura del proyecto Cerro Negro 96B 3D

En vista de la importancia del proceso de asignación de la geometría para desarrollar el reprocesamiento, se realizó un control de calidad de los datos para comprobar el acoplamiento de la información de campo con los registros de disparo. En la figura 41 se graficó la distribución de los CDP, tal como se muestra, los CDP están ubicados en el centro de cada bin. Esto permite establecer que la geometría fue cargada correctamente. Se cargaron los registros de los disparos y fue verificado el

acoplamiento de la geometría, así como también, el estado de cada uno de los disparos. Durante dicha revisión, fueron identificados 28 disparos que presentaban distintas fallas, tales como: disparos con geometría incorrecta, con canales muertos y aquellos completamente ruidosos.

Habiendo terminado la revisión de geometría y edición de traza en los datos, se procedió a calcular el datum flotante y el datum de procesamiento. El datum flotante corresponde con la manipulación del mapa de elevaciones para trasladarlo al dominio del CDP y suavizarlo. Luego, a través de la aplicación de la ecuación 27, se trasladan los datos al datum de procesamiento de 120 m sobre el nivel del mar a través de la velocidad de reemplazo de 1100 m/s. El valor del datum de procesamiento corresponde con el valor máximo de cota, con ello, los tiempos de llegada van a estar atados a un datum por encima de toda la topografía, evitando así los efectos de la misma sobre los tiempos de llegada. Se evaluaron distintas velocidades de reemplazo obtenidas de las primeras llegadas de los registros de disparos, valores muy bajos o muy altos distorsionaban la calidad de la imagen, por ello, 1100 m/s fue el valor óptimo que permitió el cálculo de las estáticas de elevación, ya que permitió llevar los datos a la cota establecida por el procesador (120 m).

La aplicación de las estáticas de elevación corrigió el efecto de la topografía sobre los tiempos de llegada. En caso de no haber sido aplicados, el proceso de apilamiento presentaría problemas, ya que las trazas agrupadas por punto común en profundidad estarían desplazadas en tiempo debido al efecto topográfico. Esto ocasionaría que la relación señal – ruido se viera afectada, así como también, se construirían eventos en la imagen sísmica que no corresponden con la realidad.

Antes de la aplicación de los distintos procesos para el tratamiento de la señal sísmica en los datos, se construyó un modelo de velocidades inicial para aplicar la corrección NMO y apilar los datos. El modelo de velocidad inicial tiene características regionales debido a que los datos no poseen ningún tipo de proceso aplicado y es necesario ver la calidad de los datos en una sección apilada. El incremento de 80 líneas en dirección inline y crossline (figura 64) abarcó la información suficiente para

realizar la interpolación de las funciones de velocidad vertical. El rango de velocidades varió entre 1600 m/s y 2450 m/s para los eventos de reflexión entre 0 y 2100 ms, las velocidades iban aumentando a medida que el tiempo aumentaba para mantener el gradiente vertical de velocidad y así poder corregir los eventos de reflexión. Los eventos de reflexión podían ser visualizados en el espectro de velocidad hasta los 2100 ms, por debajo de dicho valor no existía coherencia en los datos.

Tras construir el modelo de velocidades, se definieron los primeros quiebres para generar el modelo del refractor para eliminar el efecto de la capa meteorizada aplicando las estáticas de refracción. El proceso consistió en una etapa computarizada y una etapa manual.

La etapa computarizada está relacionada con el entrenamiento de la red neuronal en la cual se seleccionaron los primeros quiebres cada 100 disparos. Después de aplicar la red neuronal a los disparos, se evaluó la dispersión de los primeros quiebres en las dromónicas tiempo – offset. En el proceso de revisión, se comprobó que no existía un comportamiento lineal que permitiera calcular el modelo del refractor para eliminar los retardos en tiempo debido a la capa meteorizada. La dispersión de los datos afecta directamente el algoritmo GLI. Por tanto, la imagen sísmica no hubiese mejorado si los primeros quiebres no se refinaban.

En la etapa manual, se refinaron los disparos del 1 al 11000 donde la dispersión de los datos debía ser mínima para que existiese una tendencia lineal, esto aseguró que el área perteneciente a esos disparos tuviese una máxima corrección estática para mejorar la calidad de la imagen en dicha zona. Posterior a ello, se definió que el modelo del refractor iba a estar en el rango de offset de 203 m a 559 m, este rango delimitó la primera capa del espesor sedimentario debido a las limitaciones que posee el método GLI, ya que puede generar un modelo en el cual se pueden diferenciar hasta dos capas. La velocidad calculada para la capa meteorizada fue de 1658 m/s, ésta se asocia directamente a sedimentos poco consolidados. Juntando la información de los primeros quiebres y el rango de offset a través del cual se calculó la velocidad

del refractor, se calcularon las estáticas de refracción. La aplicación de las estáticas de refracción corrige las distorsiones en los tiempos de llegada dentro de cada bin. En la figura 65 se muestra la inline 600 apilada aplicando las estáticas de elevación y en la figura 66, el cuadro rojo muestra una zona donde las estáticas de refracción mejoraron la calidad de la imagen.

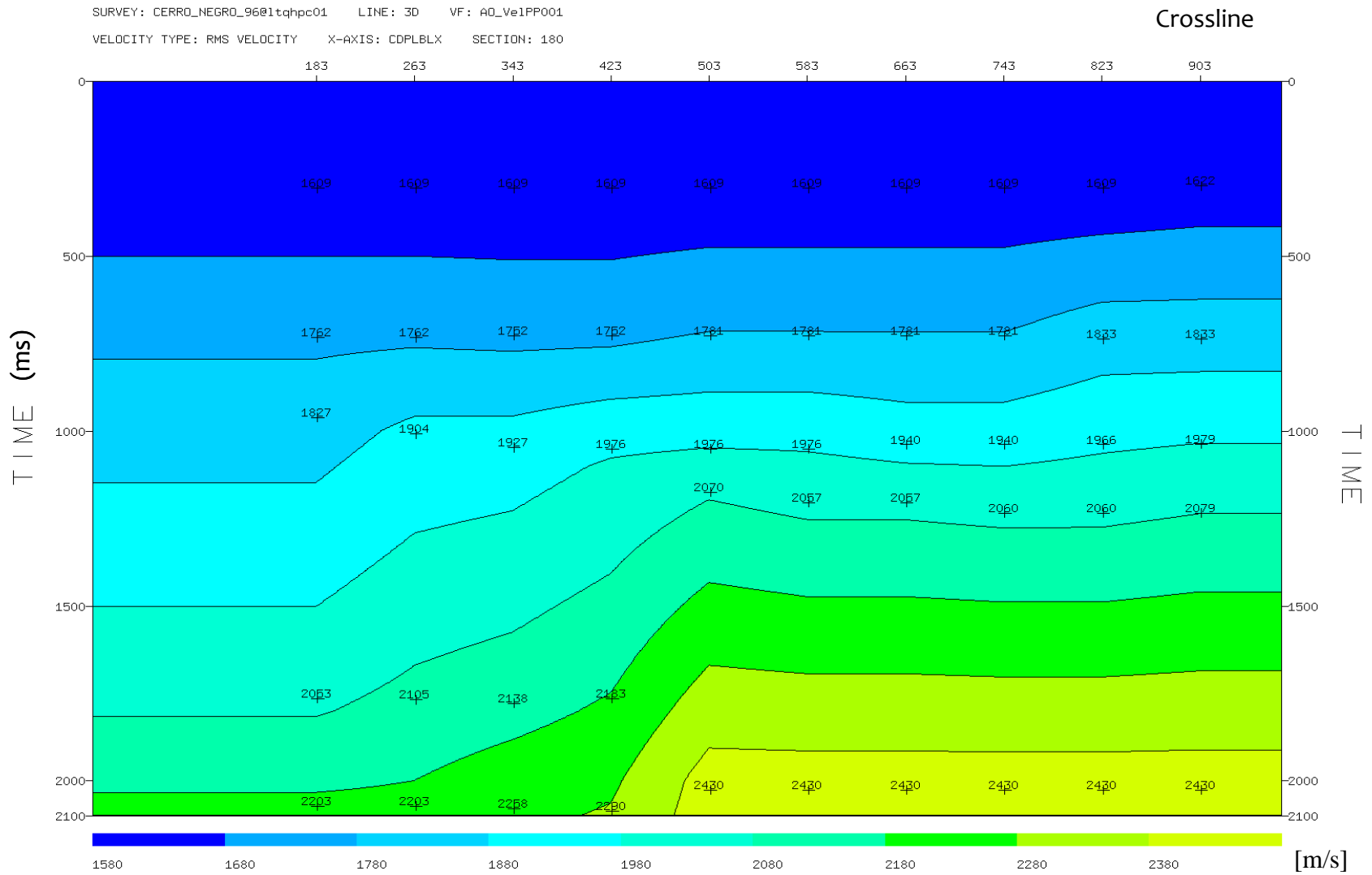


Figura 64. IL – 180 del modelo de velocidades regional

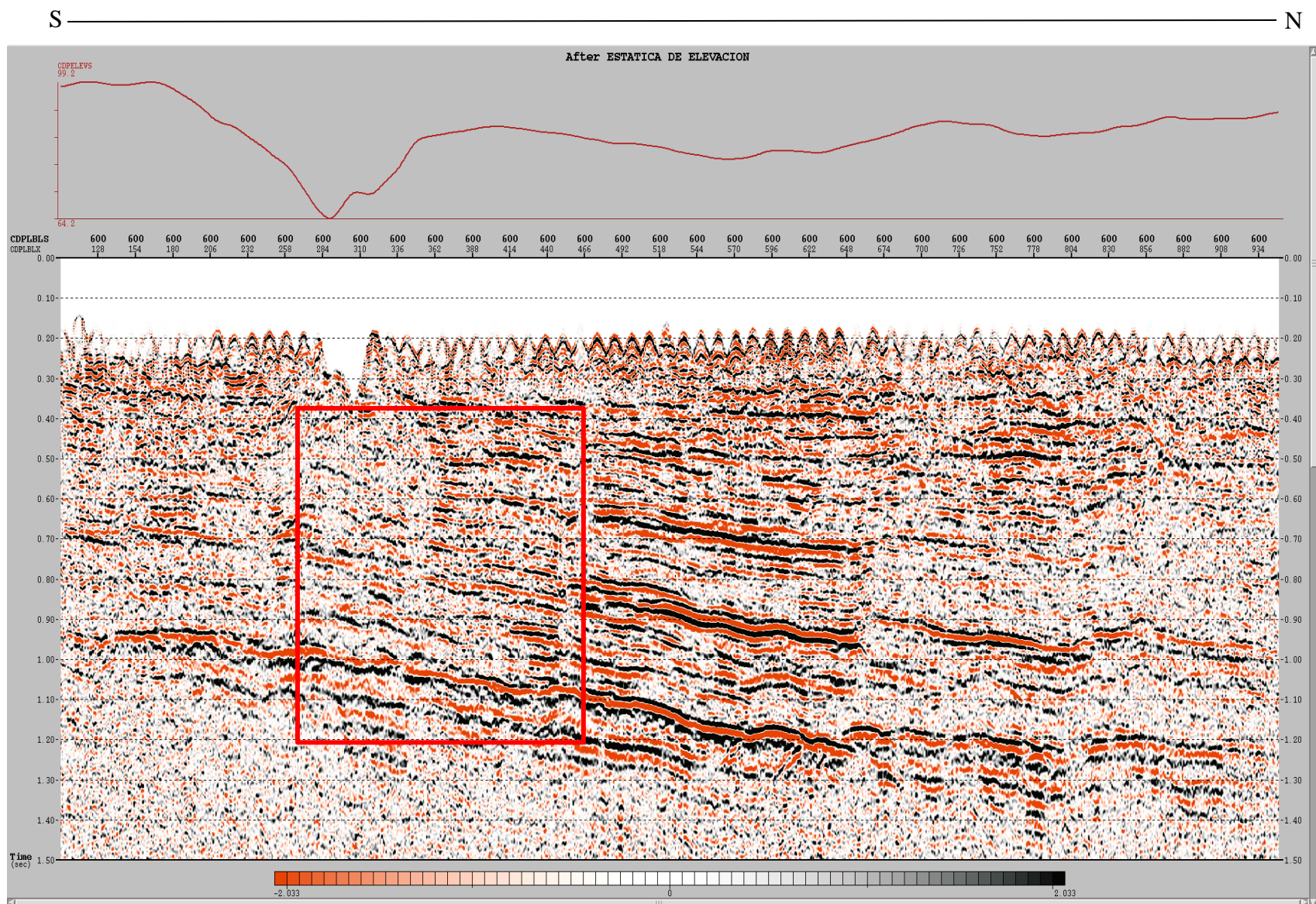


Figura 65. IL – 600 con estáticas de elevación con su perfil topográfico en dirección S – N

S

N

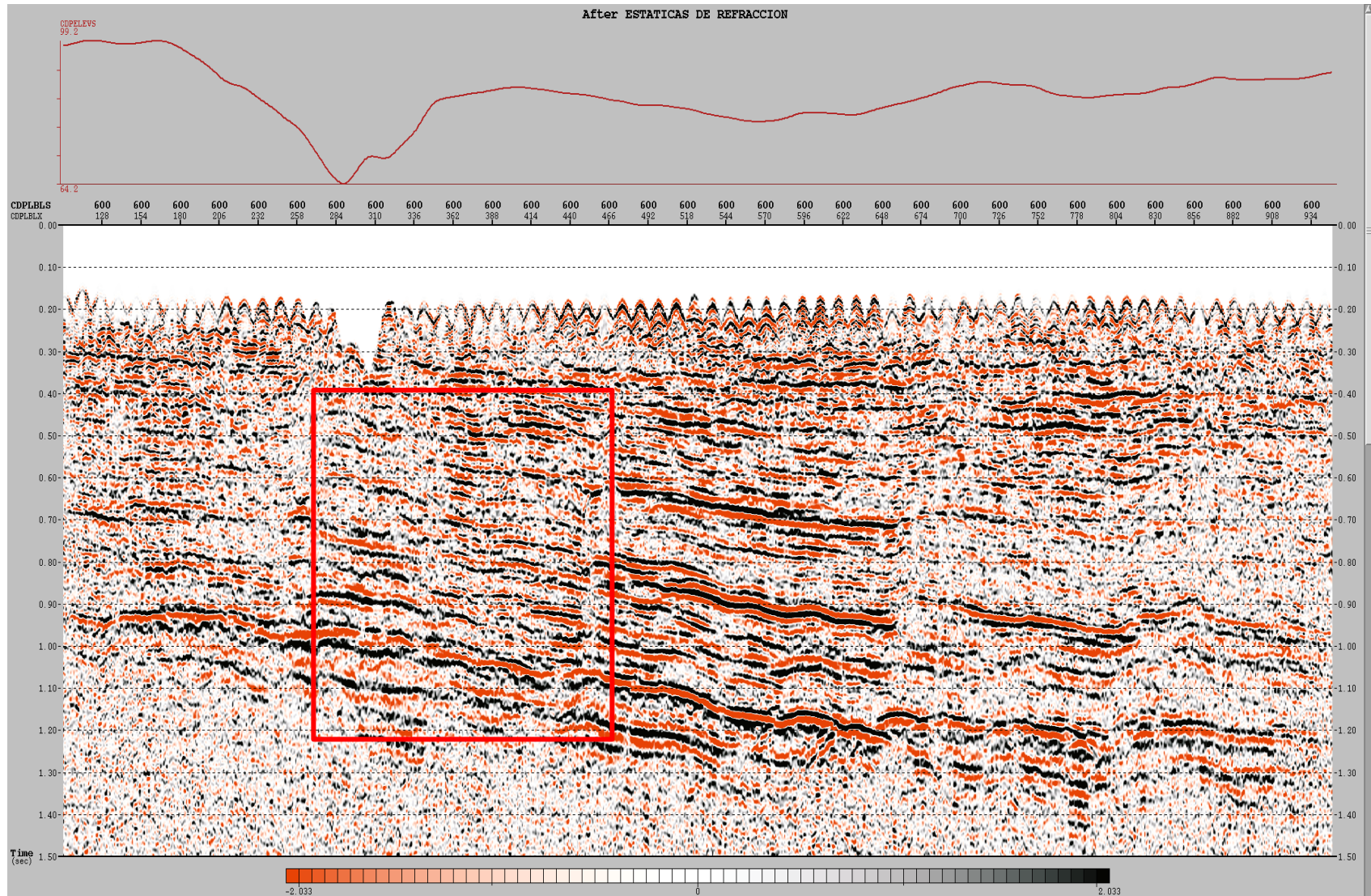


Figura 66. IL – 600 con estáticas de refracción con su perfil topográfico en dirección S – N

Los procesos siguientes requirieron la actualización del modelo de velocidades. El segundo modelo de velocidades construido (figura 67). A diferencia del regional, posee un incremento en dirección inline y crossline de 56 líneas (figura 68) para aumentar la contribución de la selección de funciones de velocidad vertical en la corrección NMO. Dicha contribución permite una mejor interpolación de las funciones para generar una sección apilada con mejor calidad de imagen. A diferencia del primero, se empleó un agrupamiento de 7 bins para generar un espectro de semblanza que definiera mejor las reflexiones primarias.

Las velocidades RMS estaban entre 1450 m/s y 2050 m/s entre 0 y 2100 ms, a pesar de guardar relación con las velocidades del modelo regional, las velocidades poseían una distribución más densa en dirección crossline. Al atenuar el efecto de la capa meteorizada tras la aplicación de las estáticas de refracción, las distorsiones en los tiempos de llegada dentro de cada bin se vieron corregidos. Con ello, el análisis de semblanza permitió establecer una coherencia optimizada de los datos. Los tiempos de las funciones verticales de velocidad del 2do modelo respecto al regional se vieron desplazadas con un valor aproximado de 100 ms, lo que indica que los eventos primarios se encontraban más profundos.

El tratamiento de la señal empieza con la recuperación de amplitudes. La energía no se propaga de manera uniforme en el subsuelo, por ello, se requiere hacer una redistribución de la energía en los datos a través de la corrección por divergencia geométrica. Se realizaron distintas pruebas en los parámetros para la corrección por divergencia geométrica, determinando que los parámetros óptimos para equilibrar el espectro de ganancia en los datos fueron los presentados en la tabla 8. La figura 69 muestra una comparación del registro del disparo 9000 antes y después de haber sido aplicada la corrección, el resultado recomendado es una curva de ganancia uniforme que compense las zonas que posean déficit de energía respecto aquellas que tengan un exceso de la misma.

Antes de ser corregida por divergencia esférica, la energía se encontraba confinada en los primeros segundos del registro, esto se debe a que la mayor cantidad de energía

está asociada al instante en que se realiza la detonación de la fuente (primeros segundos de la grabación) y ésta se ve atenuada a medida que transcurre el tiempo. Por ello, la aplicación de la corrección permitió redistribuir la energía para poder visualizar eventos en tiempos más profundos, entre 700 ms y 1500 ms. En ese rango de tiempo se ubica el objetivo de interés geológico para la explotación de hidrocarburos en el proyecto Cerro Negro 96B 3D.

Luego de la compensación de energía debido a la divergencia geométrica, se procedió a la atenuación del ruido coherente y aleatorio. El filtrado de ruido coherente se centró en la remoción del tren de ondas superficiales generado por la fuente y otros factores, este ruido tuvo un comportamiento constante a lo largo de todos los disparos. La aplicación de los filtros se basó en los parámetros de velocidad y rangos de frecuencia. El rango de frecuencia empleado para la eliminación del cono de ruido fue de 0 a 25 Hz, y las velocidades fueron: 439 m/s, 829 m/s y 1300 m/s, éstas están directamente asociadas a la velocidad del tren de ondas superficiales. No se estableció un valor fijo en cuanto a velocidad debido a que los tiempos de llegada con amplitudes altas asociadas al cono de ruido no poseían un comportamiento lineal en los registros debido a las características geológicas de la capa meteorizada en la FPO que posee muy poca compactación, esto produce una velocidad de propagación en la onda Rayleigh muy baja. Por ello, se definieron distintas pendientes para poder calcular dichas velocidades.

El filtrado de ruido aleatorio se centró en la atenuación del ruido producido por causas externas que no pueden ser controladas durante la adquisición de los datos, por ello, se definieron ventanas en los tiempos donde este ruido afectara las trazas cuya longitud comprendía 11 muestras para el análisis de los datos. Tras realizar distintas pruebas, se comprobó que era el valor óptimo para aplicar el filtrado de ruido aleatorio debido a que éste tomaba ventanas lo suficientemente limitadas para analizar el contenido de ruido de la señal y hacer un escalamiento de las amplitudes sin afectar la señal. El diseño de ventanas con un número mayor de muestras puede

considerar las amplitudes del ruido como parte de la señal si se hace el análisis dentro de dicha ventana y por ello no pueden ser corregidas.

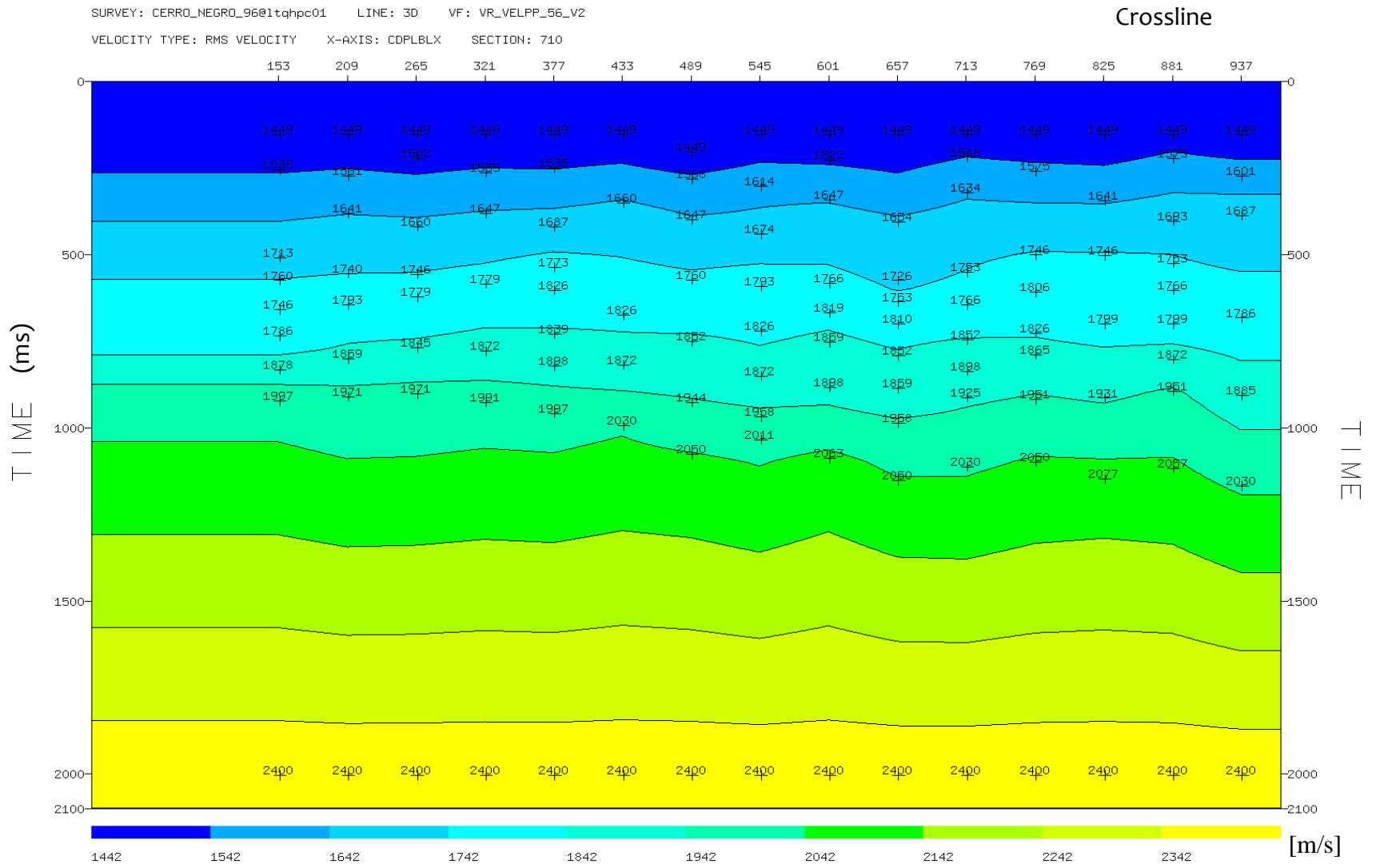


Figura 67. IL – 710 del 2do modelo de velocidades

SURVEY: CERRO_NEGRO_96@1tqhpc01 LINE: 3D VF: VR_VELPP_56_VZ
 VELOCITY TYPE: RMS VELOCITY X-AXIS: XLINE SECTION: 0

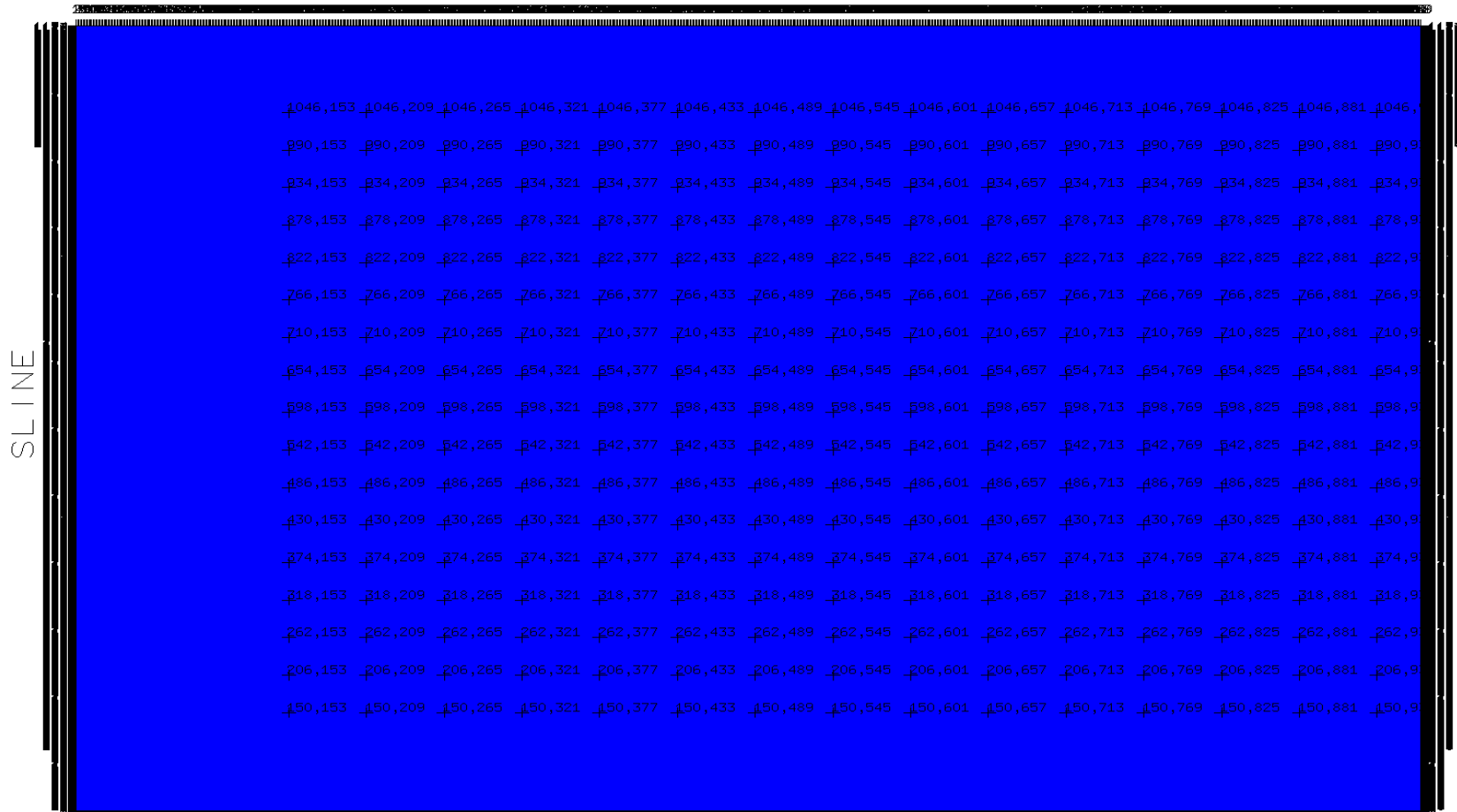


Figura 68. Distribución de las funciones verticales de velocidad para el segundo modelo de velocidad con un incremento de 56 líneas

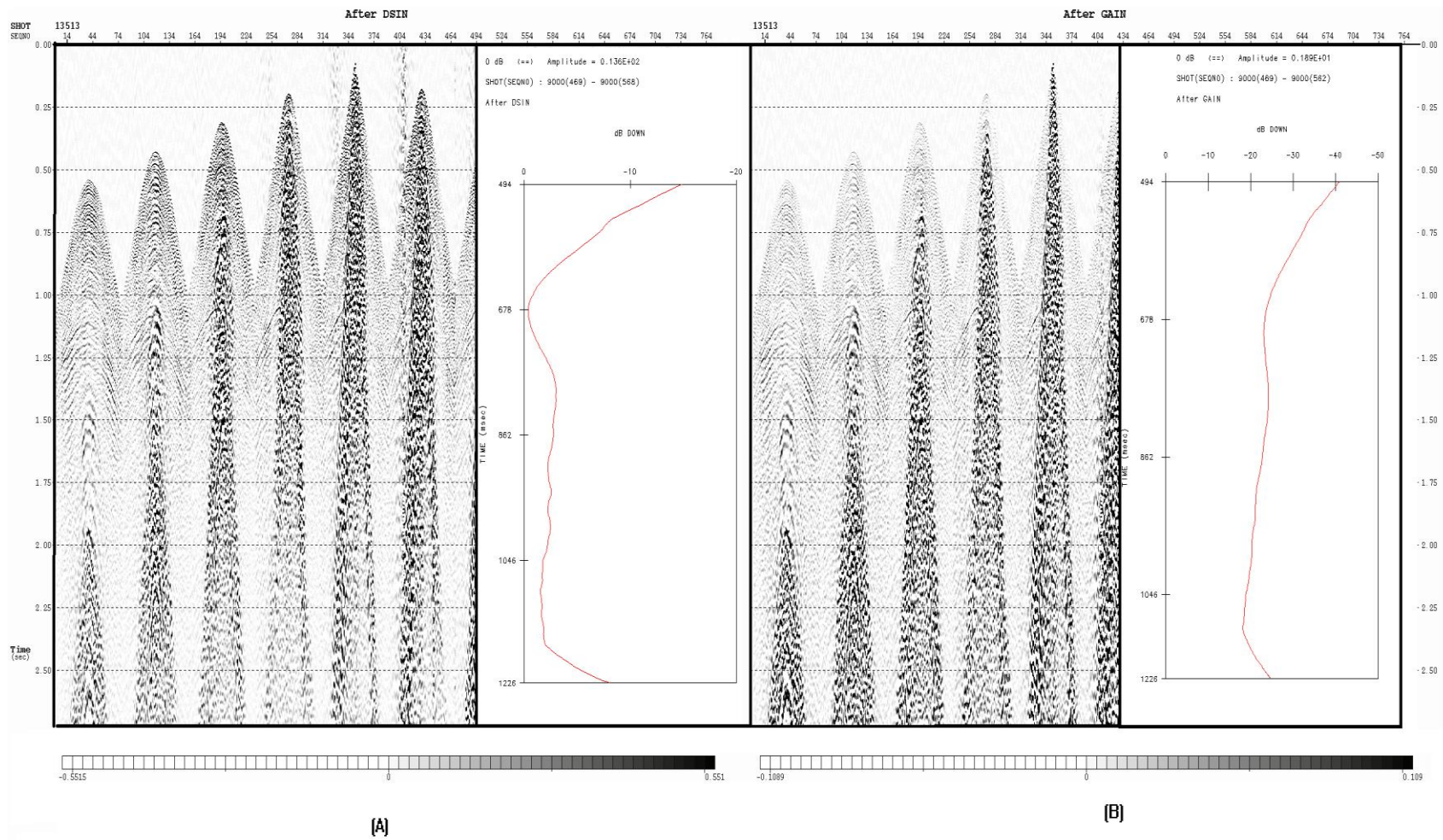
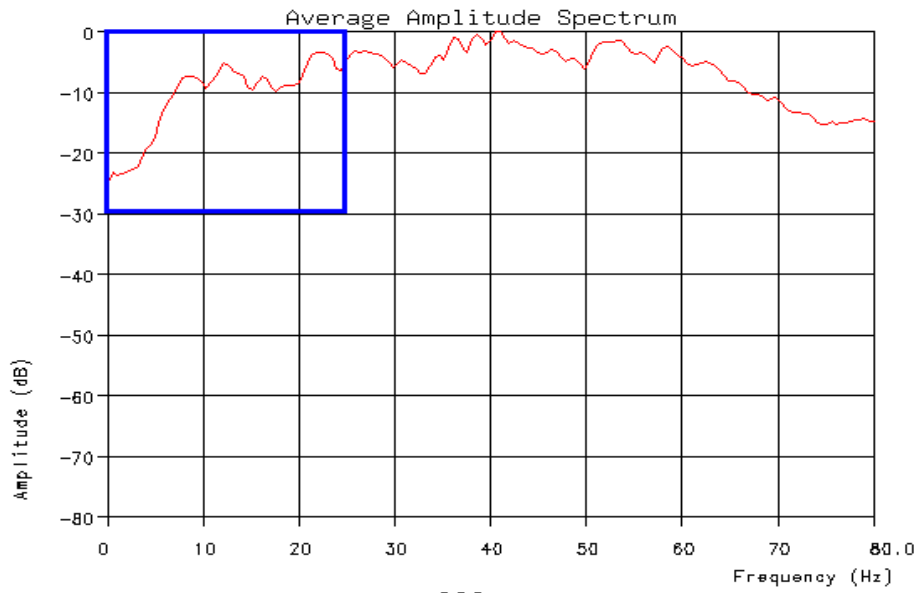


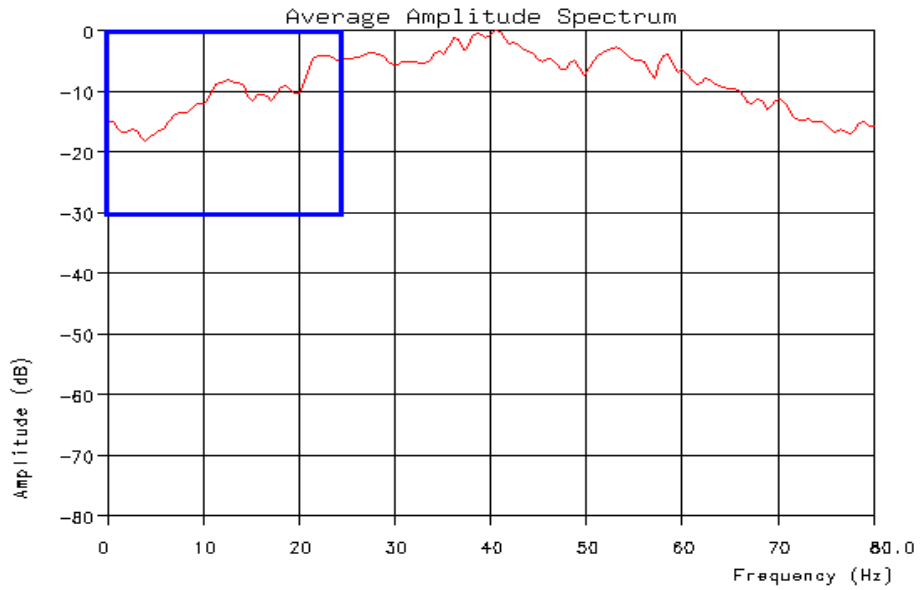
Figura 69. Disparo 13513 con espectros de ganancias asociados (A) antes de aplicar corrección por divergencia esférica (b) después de aplicar corrección por

SHOT 21738 SEQNO 258 T1= 604 T2= 1184
SEQNO 294 T1= 602 T2= 1182



(A)

SHOT 21738 SEQNO 259 T1= 600 T2= 1202
SEQNO 291 T1= 602 T2= 1204



(B)

Figura 70. Disparo 21738 (A) antes de filtrar el registro de disparo (B) después de filtrar el registro de disparo

La figura 70 muestra el espectro de frecuencia del disparo 21738 antes y después de aplicar los filtros, donde el cuadro azul enmarca el contenido de frecuencia entre 0 y 25 Hz. Dicha área fue resaltada ya que está asociada al ruido de baja frecuencia, éste ruido requirió ser eliminado dado que su efecto se propaga a lo largo de todo el tiempo de grabación y provoca la distorsión de la imagen sísmica. En los espectros de frecuencia se nota como los filtros atenuaron el efecto del tren de ondas superficiales sobre los datos. El subsuelo actúa como un filtro pasa – bajo, permitiendo el paso de ondas con bajo contenido de frecuencias a través del medio. Esto hace que la duración de las mismas en comparación a las ondas con alto contenido de frecuencia sea mayor.

A continuación, se presentarán las secciones apiladas de la IL – 600 antes (figura 71) y después (figura 72) de haber sido filtradas. A diferencia de las secciones apiladas correspondientes a las estáticas de refracción y elevación, éstas no presentan un AGC (Control de Ganancia Automático) para darle continuidad a los eventos. El AGC se aplicó en las estáticas de refracción y elevación dado que éstas no poseían una corrección por divergencia esférica u otros procesos que coadyuvaran a resaltar los eventos sísmicos. En el cuadro rojo presente en ambas imágenes se puede notar el efecto que tiene el proceso de filtrado en la eliminación del cono de ruido. Sin embargo, no fue removido completamente y esto se tratará en pasos posteriores.

S

N

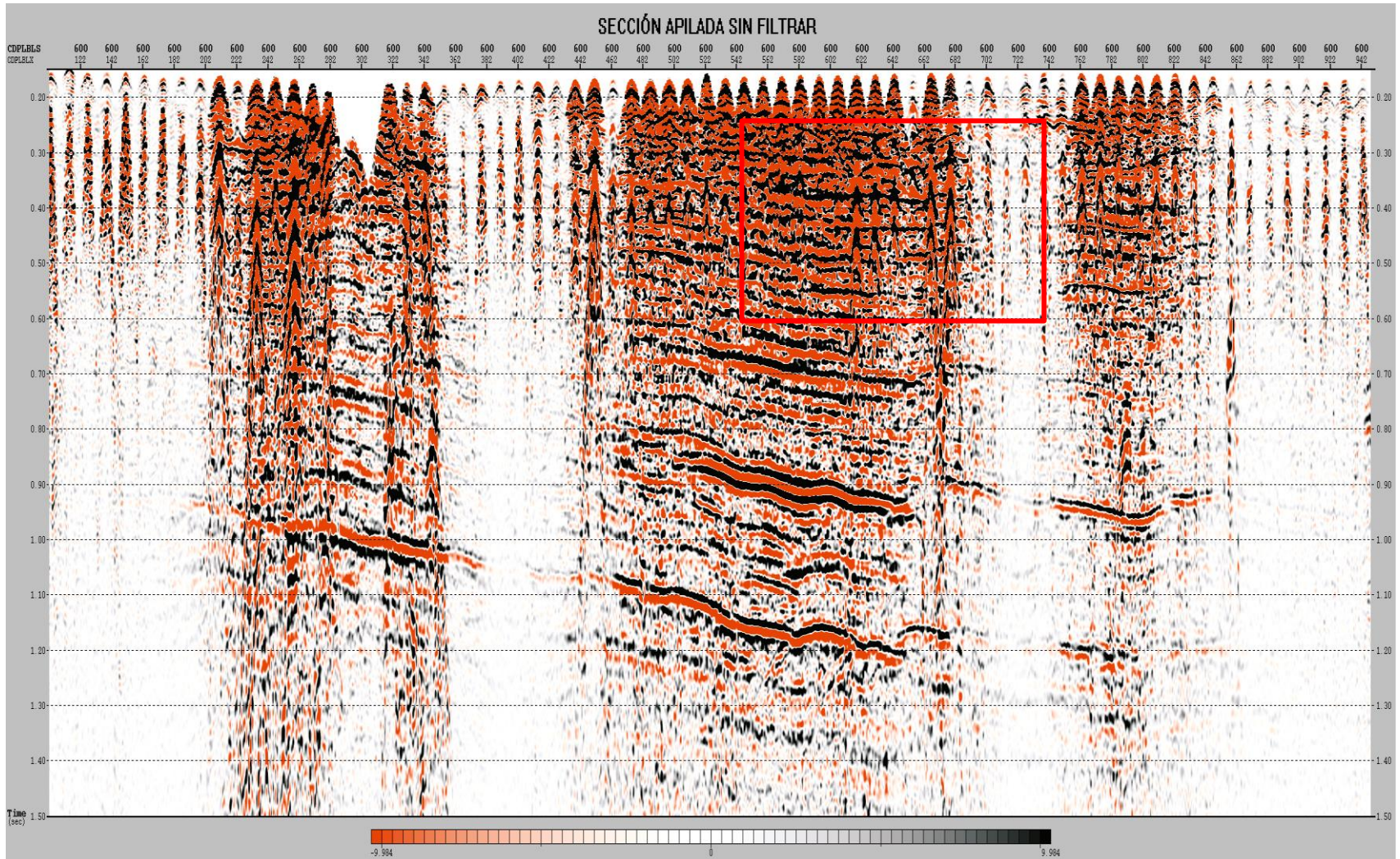


Figura 71. IL – 600 antes de realizar filtrado

S

N

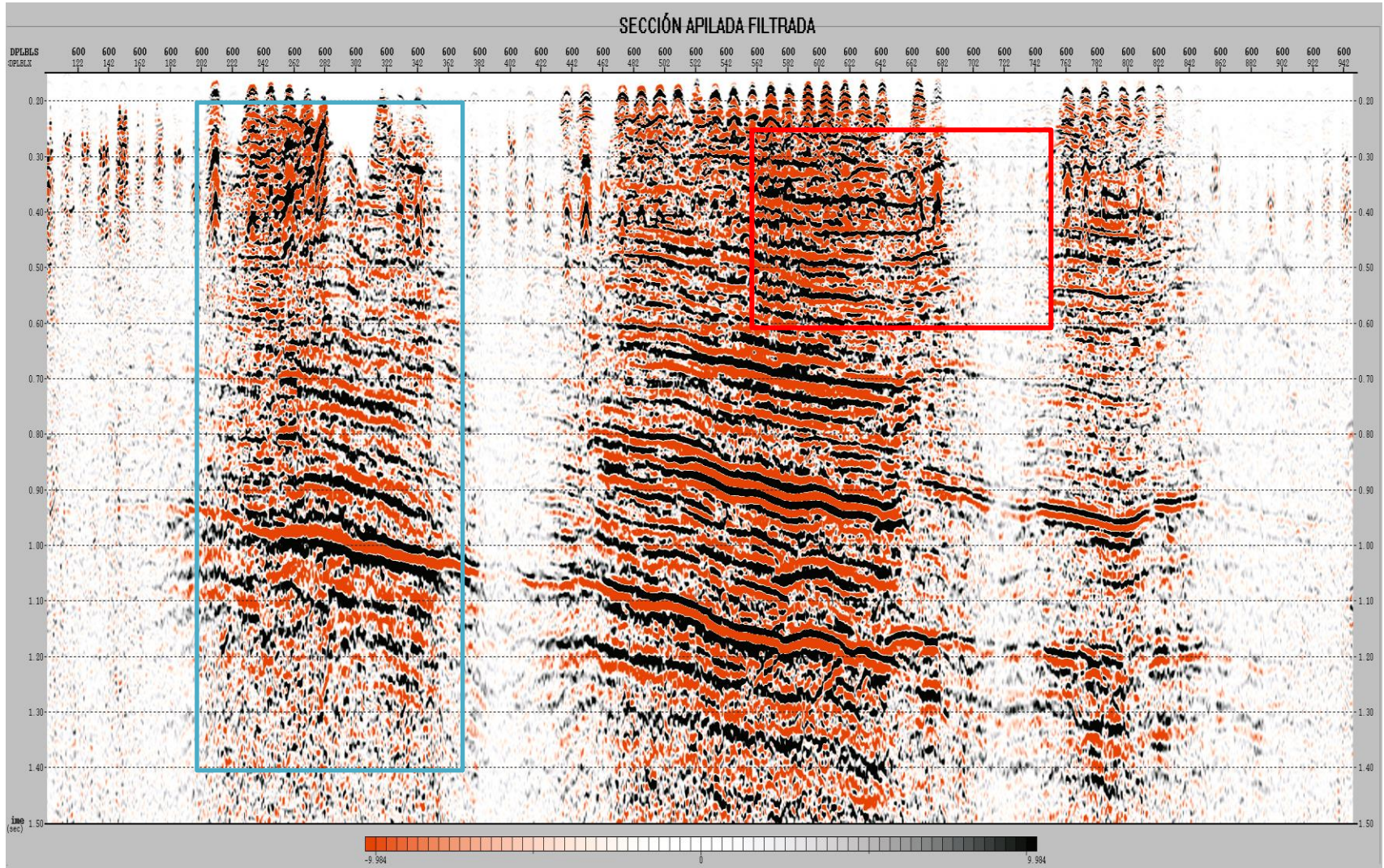


Figura 72. IL – 600 después de haber sido filtrada

En las figuras 71 y 72, sin la aplicación de AGC, se logran visualizar zonas donde la relación señal – ruido es baja. No existe una considerable continuidad en los eventos sísmicos. Esto se debe al efecto topográfico: donde la superficie topográfica es alta, la energía se ve atenuada, al contrario que en zonas donde la topografía es baja (áreas asociadas a los morichales) haciendo que la energía se disipe menos. Los cambios laterales bruscos de la capa meteorizada están directamente asociados con la topografía y su efecto sobre la distribución de la energía: donde la topografía es alta, la capa meteorizada posee un espesor sedimentario mayor y por ello existe una disipación de la energía notable. Sin embargo, al igual que la corrección por divergencia geométrica, es importante redistribuir la energía lateralmente. Por ello, se aplicó un proceso de balanceo de amplitudes consistente con superficie que toma en cuenta el posicionamiento de las fuentes y receptores en la respuesta sísmica obtenida. En dicho proceso, se definió la ventana de análisis parametrizada en la tabla 13 con el fin de abarcar la mayor cantidad de trazas asociada directamente a la señal para generar el autocorrelograma mostrado en la figura 73, del cual se derivaron los cálculos de los escalares para balancear los datos y así poder tener una sección apilada con mayor continuidad (figura 74). Aplicar el análisis consistente con superficie permite establecer valores escalares cercanos a la realidad que tomen en cuenta la contribución de la posición de la fuente, receptor, offset y el medio sobre la amplitud de la traza sísmica para poder así redistribuir la energía.

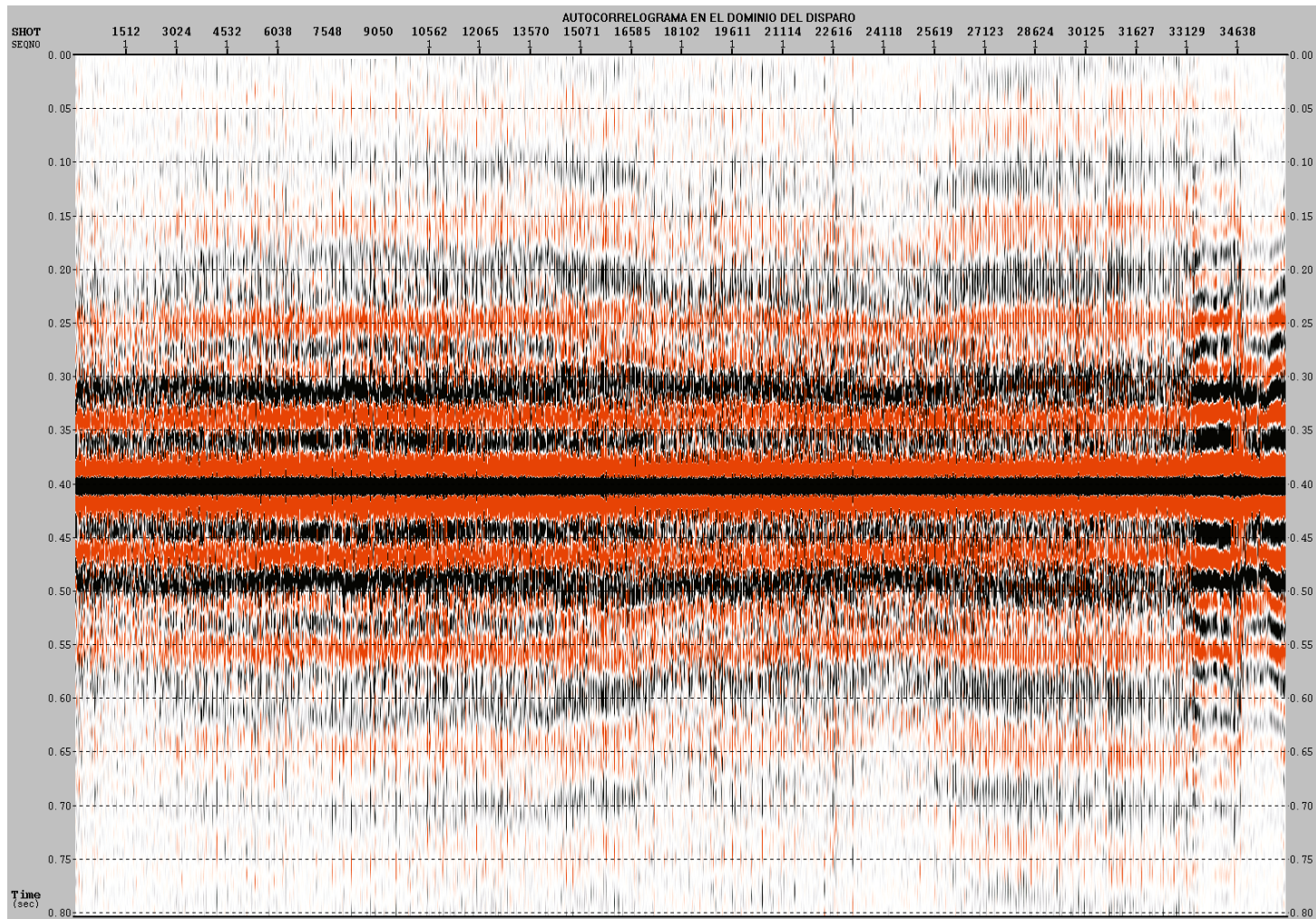


Figura 73. Autocorrelograma para el cálculo de escalares del balanceo de amplitudes

S

N

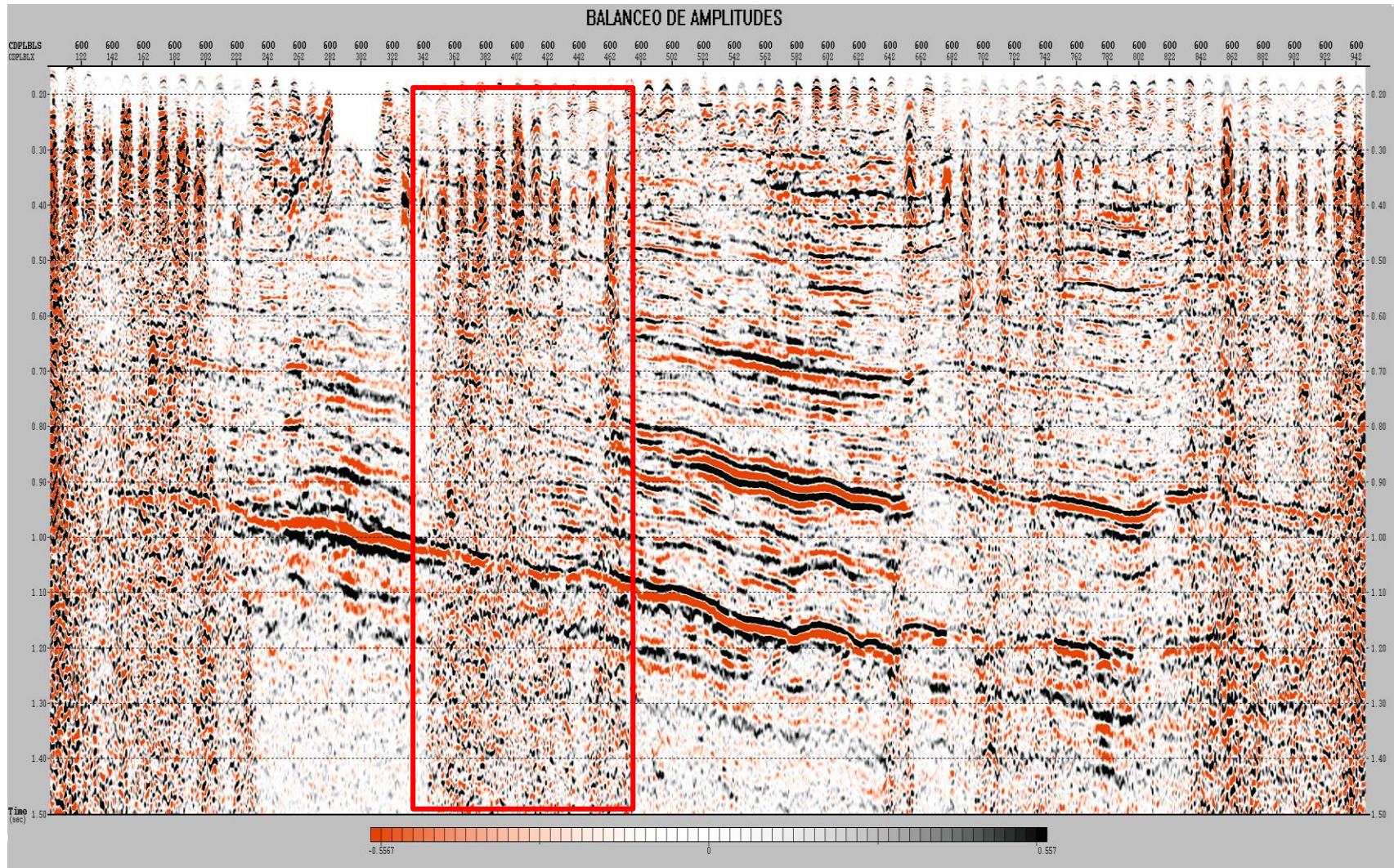


Figura 74. IL – 600 con balanceo de amplitudes consistente con superficie

Cabe destacar que para el balanceo de amplitudes se efectuaron distintas pruebas a través de diferentes ventanas de análisis para un proceso consistente con superficie, los parámetros de la tabla 13 estos otorgaron una mejora en los datos. La redistribución de la energía en zonas donde la topografía es alta debe mantener la preservación relativa de las amplitudes al igual que en las zonas de baja topografía. Por tanto, el balanceo consistente con superficie hizo un análisis de la respuesta de la fuente, receptor, subsuelo y offset para establecer un factor escalar que permita recuperar energía en zonas carentes de ella sin alterar la relatividad de las amplitudes.

Al comparar la figura 74 y la figura 72, el cuadro azul en la figura 72 enmarca una zona cuya energía es mayor a las áreas adyacentes, lo que quiere decir que su topografía es baja. Entonces, la definición de las distintas ventanas de prueba permitió evaluar cual generaría los escalares que distribuirían de tal manera para ofrecer continuidad a los eventos sísmicos. En la figura 74, se resalta con un cuadro rojo el efecto que produjo el balanceo de amplitudes sobre los datos sísmicos. Sin embargo, la continuidad que antes era notable en aquellas zonas de topografía baja se vio afectada negativamente pero con procesos posteriores la calidad de la imagen sísmica irá mejorando.

Habiendo terminado el proceso de balanceo de amplitudes, el paso siguiente corresponde con el proceso de deconvolución. La idea consistió en revertir el modelo convolucional del subsuelo para obtener la serie de reflectividad, la cual está directamente relacionada con los estratos en el subsuelo, así como también, se encarga de restaurar la forma de la ondícula (recuperar contenido de frecuencia) y eliminar múltiples. Al igual que el paso anterior, la deconvolución aplicada en el reprocesamiento de los datos es consistente con superficie, ya que buscan corregir los efectos sobre las amplitudes de las trazas, explicados en el punto 3.25.

Para ello, el proceso se dividió en dos partes referentes a la deconvolución predictiva y la deconvolución impulsiva. Lo común en ambas, fue necesario calcular autocorrelogramas para que fuese consistente con superficie. El autocorrelograma obtenido del balanceo de amplitudes en el dominio del disparo fue utilizado para determinar los parámetros de deconvolución debido a la cercana distribución entre las fuentes, ya que en el mismo permitía definir mejor las correlaciones asociadas a múltiples.

En la longitud de operador, se hicieron pruebas con valores de 10 ms, 40 ms, 90 ms y 120 ms. La longitud de operador óptima para los procesos de deconvolución (predictiva o impulsiva) fue la de 120 ms. Éste permitió la construcción del filtro inverso a través de una ondícula de fase mínima, la definición de dicho valor mejoró las características de la deconvolución predictiva y la deconvolución impulsiva. De haber sido elegido un operador menor, esto pudo haber removido señal de los datos. En el caso de la distancia predictiva (empleada únicamente en deconvolución predictiva), se evaluaron los valores de 12 ms, 16 ms y 20 ms, el valor recomendable fue de 16 ms debido a que este atenuaba de manera óptima los múltiples a comparación de los otros valores. La figura 75 muestra el desarrollo de los autocorrelogramas tras la aplicación de los métodos aplicados. La deconvolución predictiva se encargó de eliminar los múltiples dentro de los datos (figura 76), y la deconvolución impulsiva se encargó de recuperar el contenido de frecuencia atenuado por la acción del subsuelo como filtro.

En la figura 77, un rasgo resaltante es la atenuación del múltiple que se encuentra por debajo del reflector que empieza a partir de los 0,9 segundos hasta los 1,5 segundos enmarcado en el cuadro rojo. Se puede ver que es un múltiple debido a que este posee la misma forma pero la energía que lo representa es menor comparada con la reflexión primaria. Esto no quiere decir que sea el único múltiple que se eliminó. El proceso se aplicó a lo largo de todo el tiempo de grabación (3 segundos) y en la figura 78, se nota la recuperación del contenido de frecuencia, ya que recupera las frecuencias altas entre 40 Hz y 80 Hz asociada a eventos someros, esto puede visualizarse en el cuadro azul. Sin embargo, los procesos asociados a la recuperación de contenido de frecuencia no sólo recuperan señal, también pueden realzar ruido que no fue atenuado completamente. No obstante, la señal predomina sobre el ruido, ya que éste no terminó distorsionando el contenido de la señal y proporcionó continuidad a los eventos. Otra manera de comprobar la recuperación de contenido de frecuencia reside en la figura 79 con los espectros de frecuencia de dichos procesos donde la deconvolución impulsiva recuperó gran contenido de frecuencia que fue atenuada debido a la acción del subsuelo como filtro.

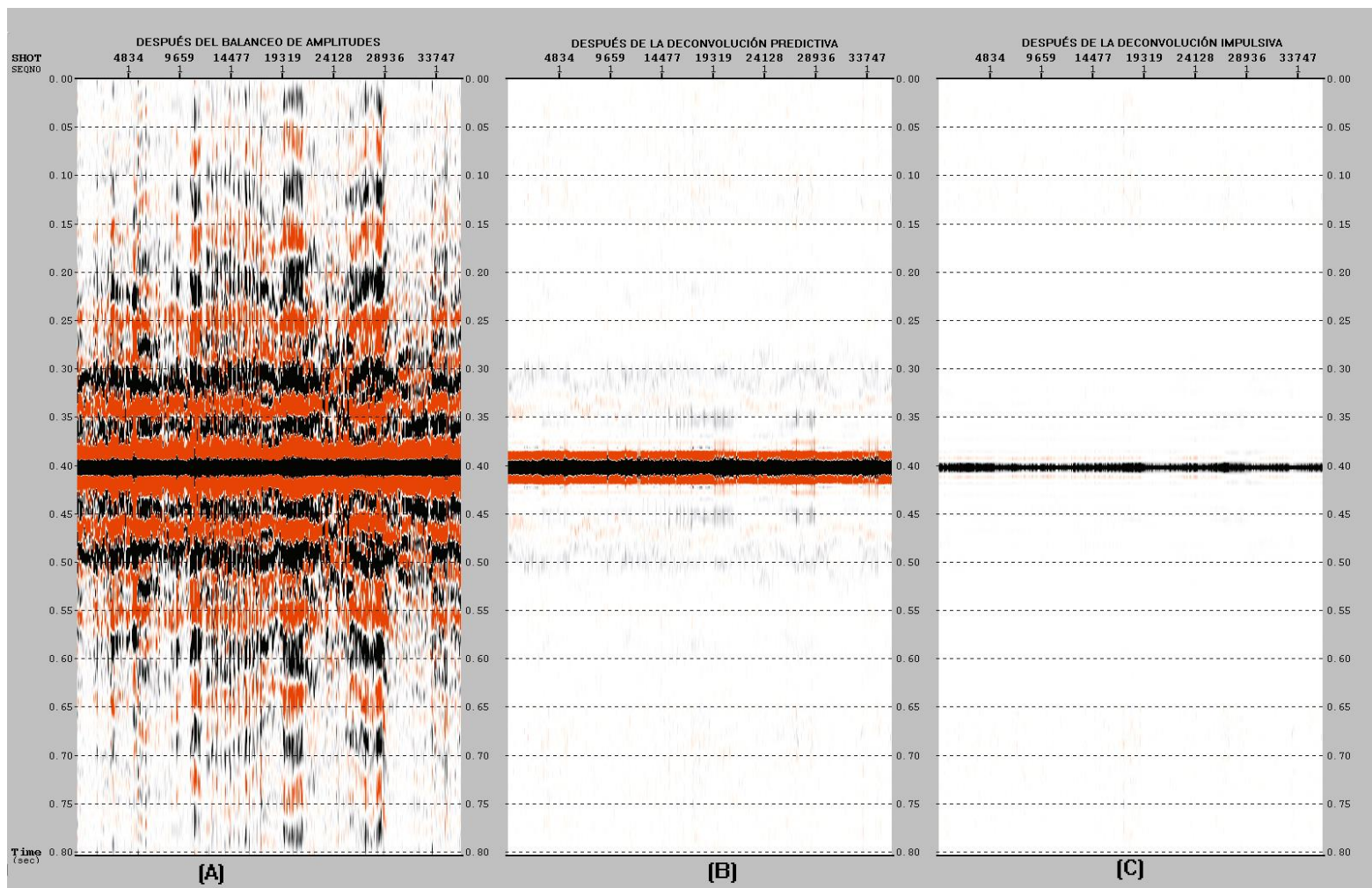


Figura 76. Autocorrelogramas después de (A) balanceo de amplitudes (B) deconvolución predictiva (C) deconvolución impulsiva

S

N

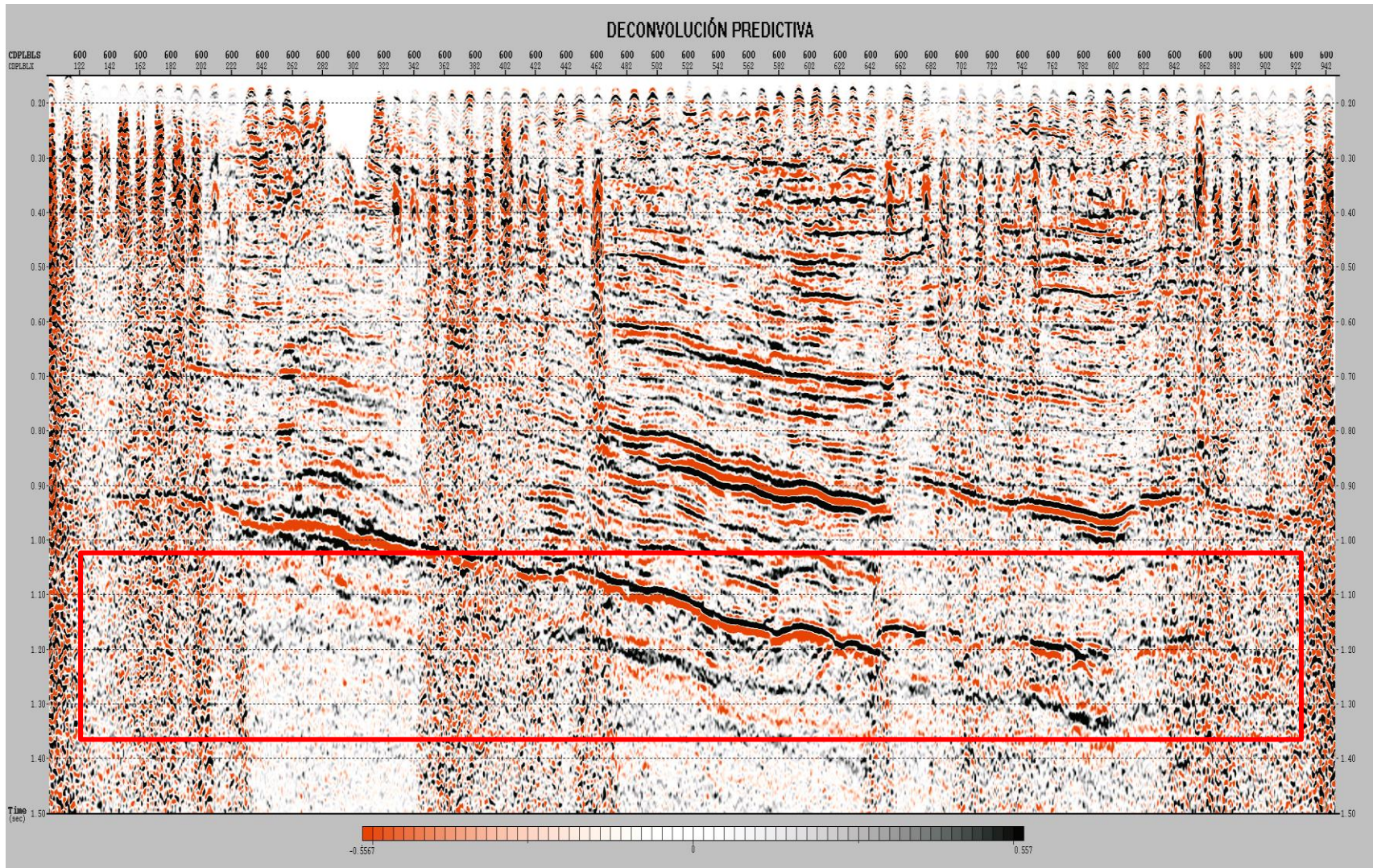


Figura 77. IL – 600 después de deconvolución predictiva

S

N

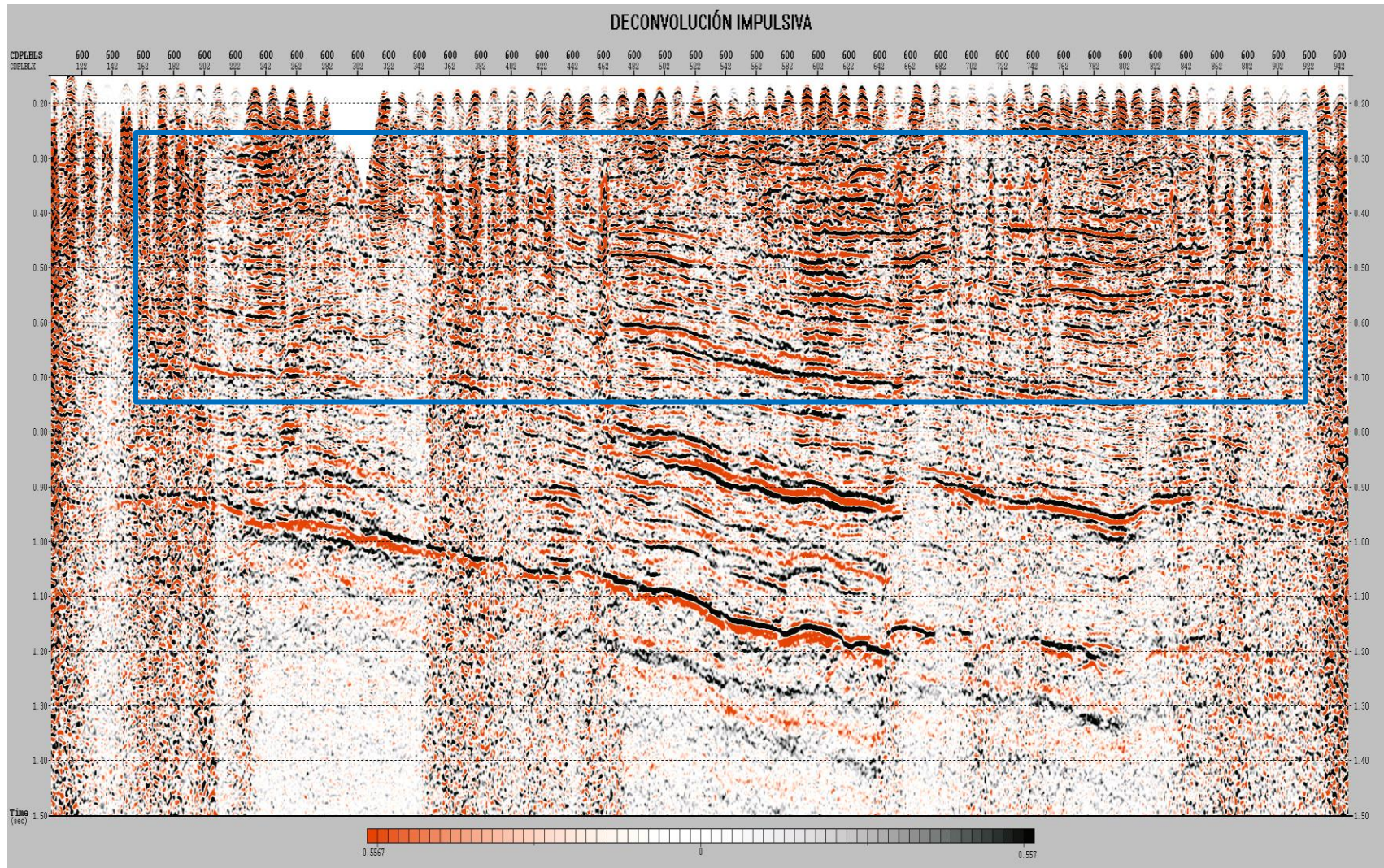
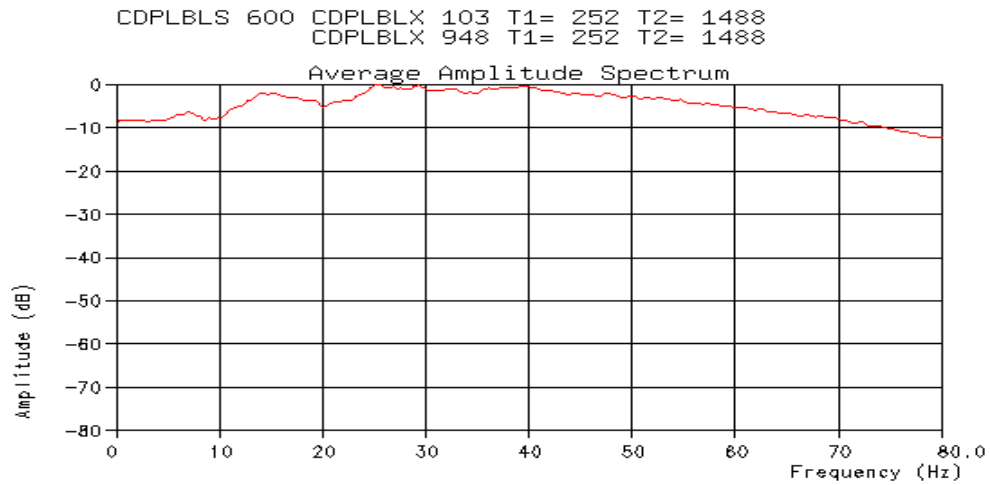
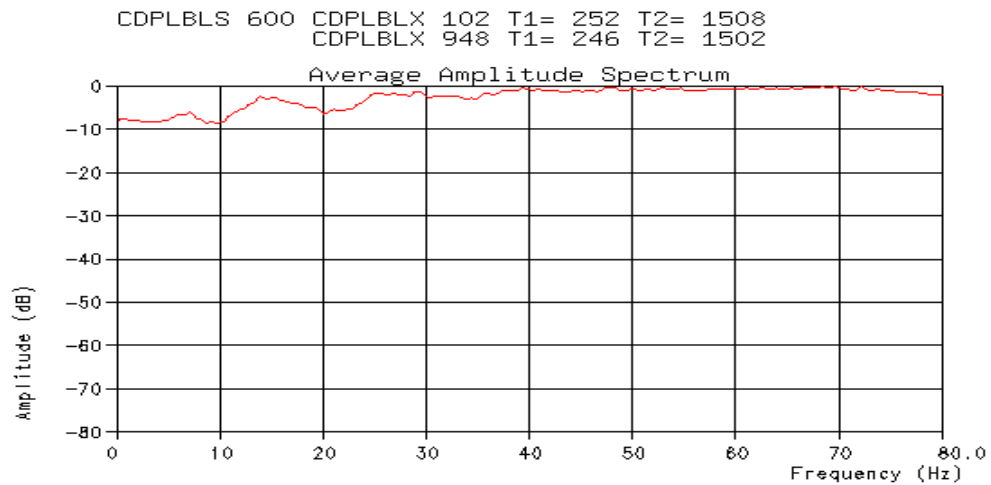


Figura 78. IL – 600 después de deconvolución impulsiva



(A)



(B)

Figura 79. Análisis de frecuencia de (A) deconvolución predictiva y (B) deconvolución impulsiva

Una vez concluida la etapa de deconvolución, se procede a calcular las estáticas residuales consistentes con superficie, ya que los cambios estáticos son retrasos en el tiempo dependientes de la localización en superficie de la fuente y receptor. Entonces, éstas buscan corregir aquellos tiempos anómalos originados por gradientes laterales de velocidad superficiales (capa meteorizada) que no pudieron ser corregidos con las estáticas de refracción y elevación, mejorando la coherencia de los

datos para el apilado. Por ello, se generó un volumen sísmico piloto a partir de la metodología en el punto 4.14 parametrizado según las especificaciones de la tabla 16 (figura 55). Luego de haber sido generado, se procedió a calcular el salto estático máximo permitido en los datos para recuperar la coherencia de los mismos. El valor óptimo para esta etapa fue un salto estático de 20 ms (determinado en el cubo piloto), la selección de éste salto está directamente asociado a cuál va a ser el máximo desplazamiento en tiempo que se permitirá para que se puedan corregir los retardos en tiempo que no fueron corregidos previamente. En este caso, un salto estático mayor o menor a 20 ms podría construir eventos en la imagen sísmica que realmente no existen, afectando la posterior interpretación de los mismos. En las zonas donde la topografía es baja existe mayor cantidad de energía, esto permitió mitigar más aun los efectos de la capa meteorizada sobre los datos, y con ello, estableciendo mayor continuidad sobre los mismos a diferencia de las zonas donde la topografía es alta. Sin embargo, en tiempos menores (0 a 500 ms) se puede visualizar que la continuidad de la imagen sísmica se vio mejorada debido a la aplicación de las estáticas residuales consistentes con superficie.

El módulo fue empleado para que fuese aplicado en una ventana de tiempo definida en la tabla 18. En la figura 80 se puede visualizar la sección apilada luego de aplicar las estáticas residuales consistentes con superficie. En ella se puede apreciar una mejor redistribución de la energía debido a que se aplicaron las correcciones para poder ofrecer mayor continuidad a los datos durante el apilamiento.

Luego, se realizó el segundo paso de balanceo de amplitudes. A diferencia del primero, éste toma en cuenta las estáticas residuales calculadas previamente. La ventana de análisis diseñada para el cálculo de los escalares fue más pequeña en comparación con el primer balanceo debido a que está contenía mayor contenido de información a diferencia de la del primer balanceo de amplitudes que sólo contaba con procesos previos de corrección por divergencia esférica y filtrado de ruido; los parámetros están especificados en la tabla 19. La integración de las estáticas, al igual que los procesos anteriores, permitió la generación de autocorrelogramas, cuyas

correlaciones permitieron calcular valores escalares más adecuados para la redistribución de la energía. Si se compara la figura 81 con la figura 74 que corresponde al primer balanceo de amplitudes, el balanceo residual permitió redistribuir la energía de manera más uniforme, y a su vez, en el cuadro rojo de la figura 81 se nota la recuperación de energía en las áreas que inicialmente distribuyeron la energía lateralmente. Entonces, el resultado del segundo balanceo de amplitudes mejoró considerablemente la calidad de la imagen y estableció una continuidad notable en los eventos sísmicos.

La secuencia de procesamiento consistió, hasta este momento, en el cálculo de las correcciones estáticas de elevación, estáticas de refracción y las estáticas residuales consistentes con superficie. Las estáticas de elevación eliminaron la influencia de la topografía y las estáticas de refracción mitigaron el efecto de la capa meteorizada sobre los tiempos de llegada. Además, las estáticas residuales consistentes con superficie corrigieron los defectos remanentes en los datos a nivel de disparo y receptor en los tiempos de llegada. Sin embargo, existe un último paso vinculado a estas correcciones denominadas estáticas residuales numéricas no consistentes con superficie o estáticas TRIM, cuyo objetivo es establecer continuidad lateral en los eventos.

Para calcular las estáticas TRIM, también se requiere generar un volumen sísmico piloto a partir del cual se definirá el, antes mencionado, salto estático máximo permitido para establecer continuidad lateral. A diferencia del paso de estáticas residuales consistentes con superficie, las estáticas TRIM consisten en un proceso más agresivo que no toma en cuenta el posicionamiento de las fuentes y receptores, haciendo que los cálculos sean netamente matemáticos a través de la definición de la ventana de análisis (tabla 20). La definición del salto estático para las estáticas TRIM toma en cuenta las correcciones estáticas realizadas anteriormente. Por ende, se debe definir un salto estático pequeño que permita establecer continuidad lateral de los eventos, un salto muy grande distorsionaría la imagen. El salto estático permitido para calcular las estáticas fue de 12 ms. La figura 82 muestra la IL – 600 luego de

haber sido aplicada las estáticas TRIM. Si se compara con la figura 81, aquellas zonas donde el balanceo de amplitudes permitió la redistribución de energía para resaltar los eventos, el proceso de las estáticas TRIM permitió establecer continuidad a lo largo de los mismos y esto se ve enmarcado en el cuadro rojo de la figura 82.

Hasta los momentos, las secciones se han apilado a través de la aplicación del segundo modelo de velocidades. Por ello, se procedió a realizar un último modelo de velocidades (figura 83). La decisión de realizar un 3er modelo de velocidades tuvo que ver con una selección más densa de las funciones verticales de velocidad para poder establecer una interpolación cercana a la realidad de las velocidades RMS de los eventos sísmicos. A diferencia de los dos modelos anteriores, el incremento definido en dirección inline y crossline para la selección de las funciones de velocidad vertical fue de cada 14 líneas. Además, fue integrado el modelo de anisotropía (parámetro ETA) para corregir los offsets lejanos para que contribuyan en el apilado, ya que estos pueden tener información de un mismo CDP para una reflexión primaria (figura 84). A diferencia de los dos anteriores, el incremento definido en dirección inline y crossline para la selección de las funciones de velocidad vertical fue de cada 14 líneas. Las características para el mallado de procesamiento para el tercer modelo de velocidades y el modelo para el parámetro ETA fueron los mismos (tabla 21).

Durante la selección de funciones verticales de velocidad se busca horizontalizar los eventos lo más posible. La trayectoria hiperbólica de un evento sísmico es corregida a través de la corrección NMO o serie de Taylor de 2do orden. Ésta busca corregir la hipérbola y aplanarla suponiendo que el medio es homogéneo. Sin embargo, debido a que la naturaleza del subsuelo es anisotrópica, esto afecta directamente en la contribución de offsets lejanos. La corrección NMO de 2do orden no es capaz de resolver dicho problema, por ello, se aplica la corrección NMO de 4to orden o serie de Taylor de 4to orden que busca corregir el comportamiento no hiperbólico para integrar dicha información en la sección apilada y mejorar la relación señal – ruido.

Si se comparan las figuras 82, 85 y 86, correspondientes respectivamente al 2do modelo de velocidades, 3er modelo de velocidades y 3er modelo de velocidades con la integración del parámetro ETA de la IL – 600, se observa que la continua actualización del modelo de velocidades en estas tres fases permitió establecer una mejor interpolación de los datos dando como resultado una sección sísmica con una relación señal – ruido óptima. En la figura 85, el cuadro rojo muestra como es mejorada notablemente la calidad de la imagen, en procesos previos no se obtuvo el mejor resultado para dicha área. Sin embargo, definir una malla de funciones de velocidades más densa genera mejor resultado. En la figura 86, el aporte del parámetro ETA permitió recuperar información en tiempos asociados a eventos someros enmarcados en el cuadro rojo.

S

N

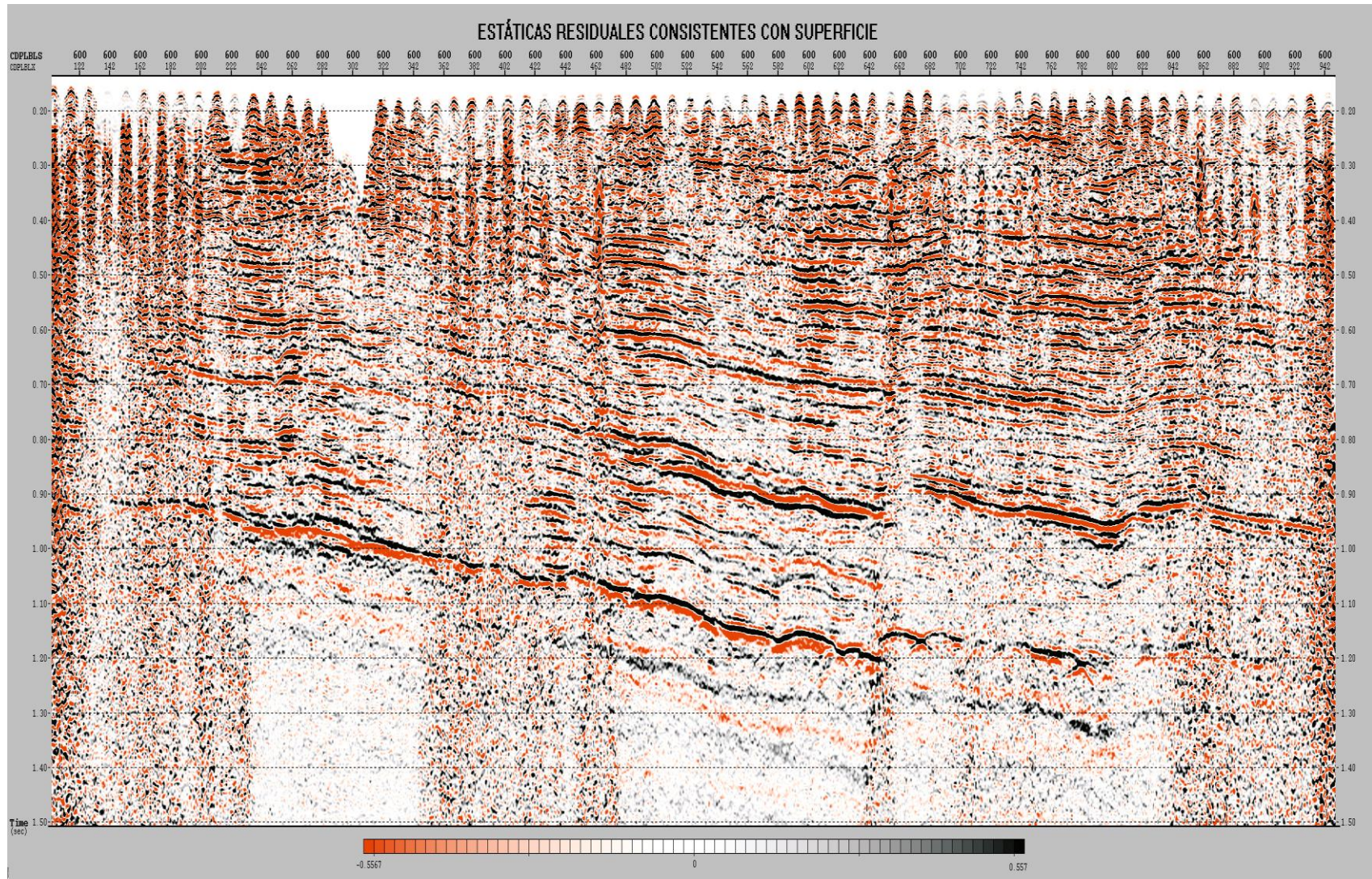


Figura 80. IL – 600 con estáticas residuales consistentes con superficie

S

N

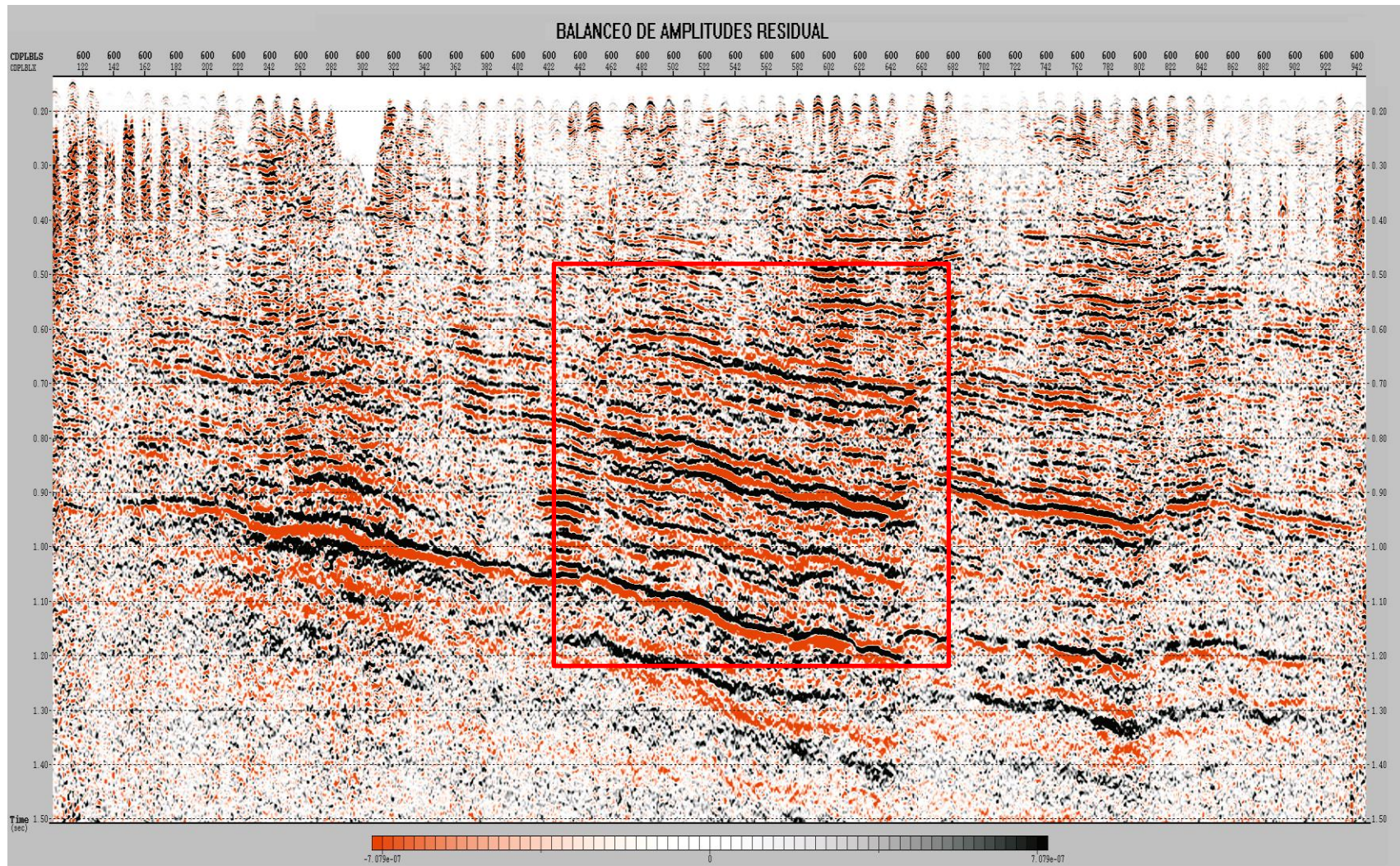


Figura 81. IL – 600 con estáticas residuales consistentes con superficie

S

N

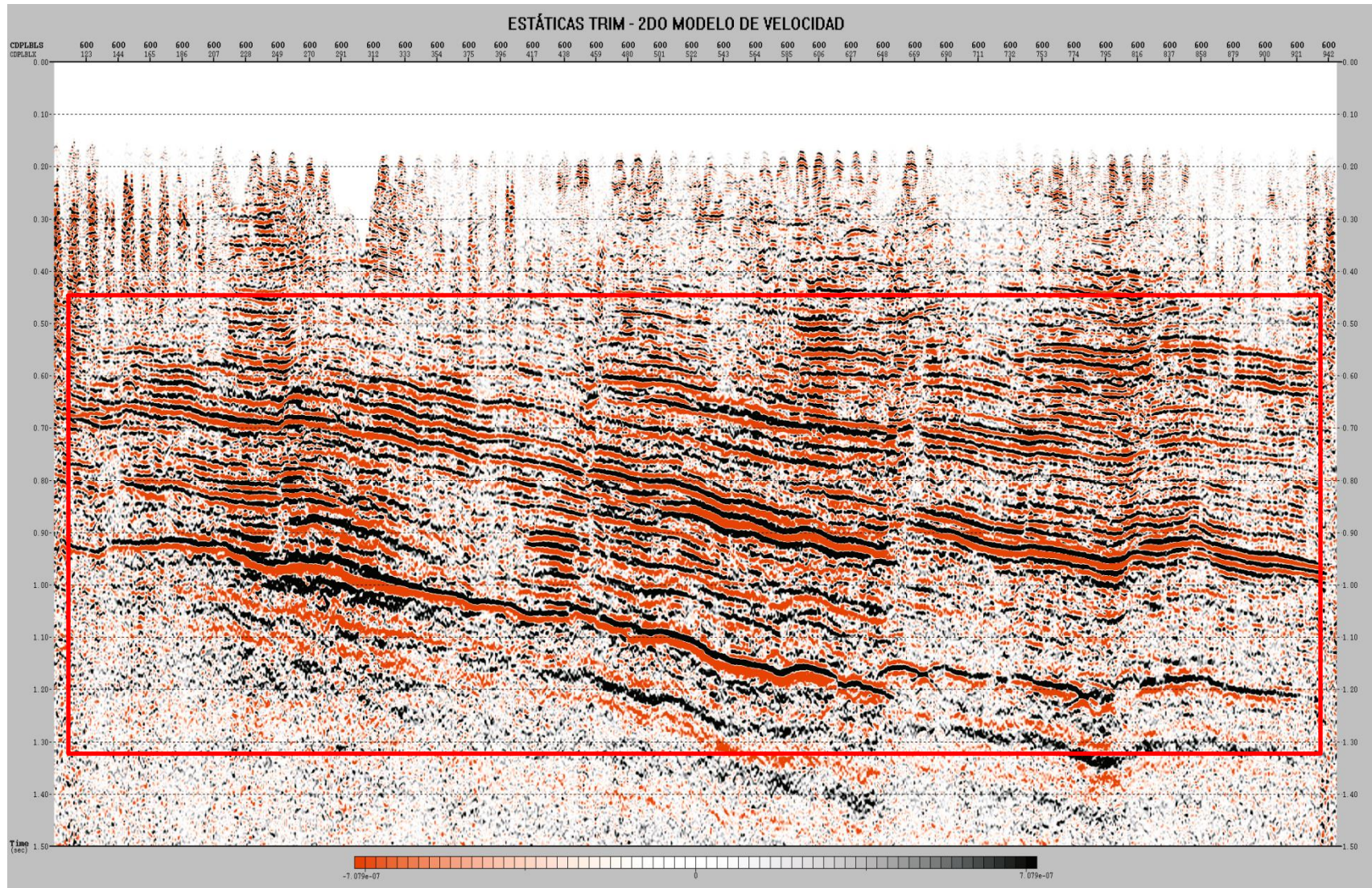


Figura 82. IL – 600 con estáticas TRIM - 2do modelo de velocidades

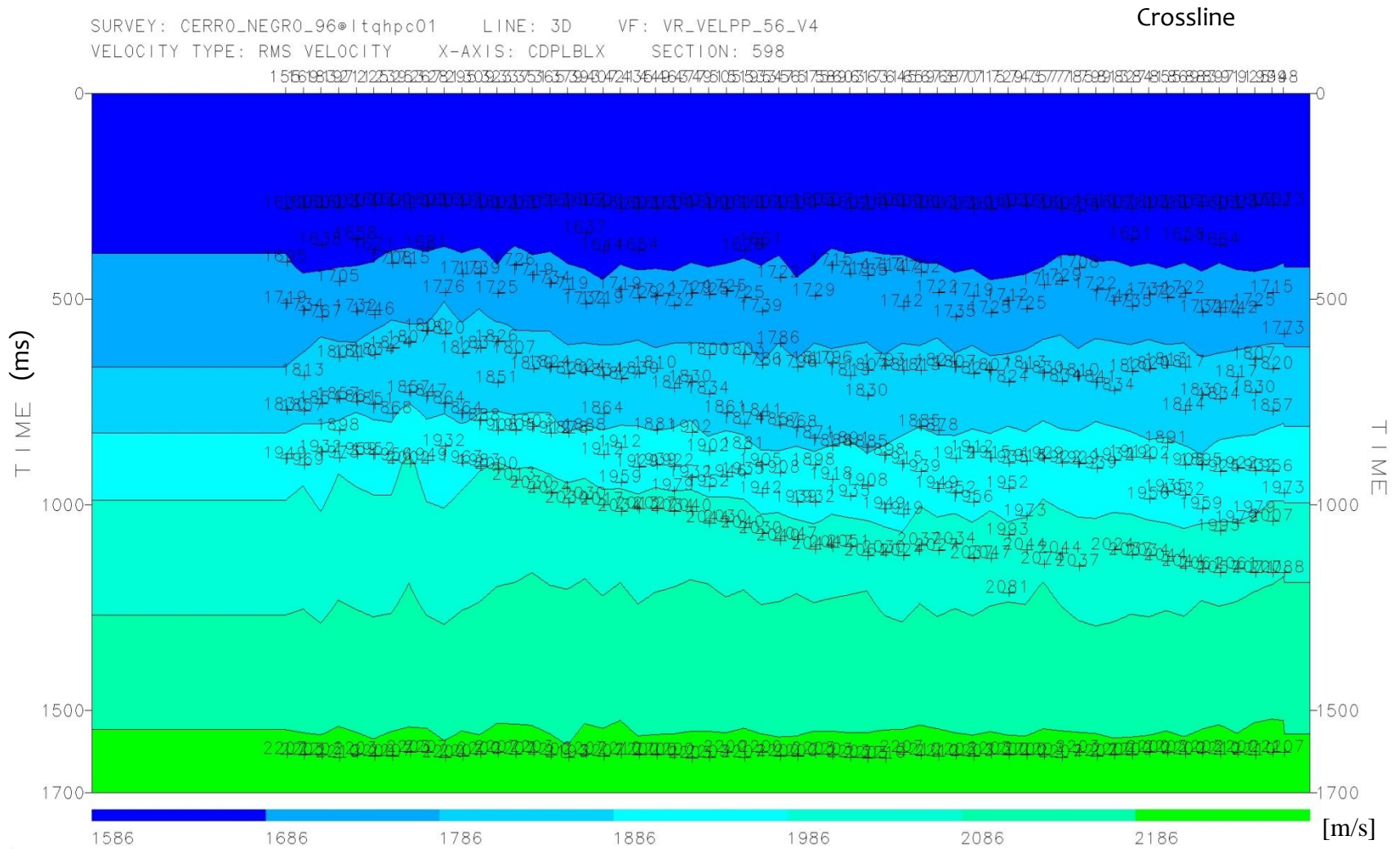


Figura 83. IL – 598 del tercer modelo de velocidad

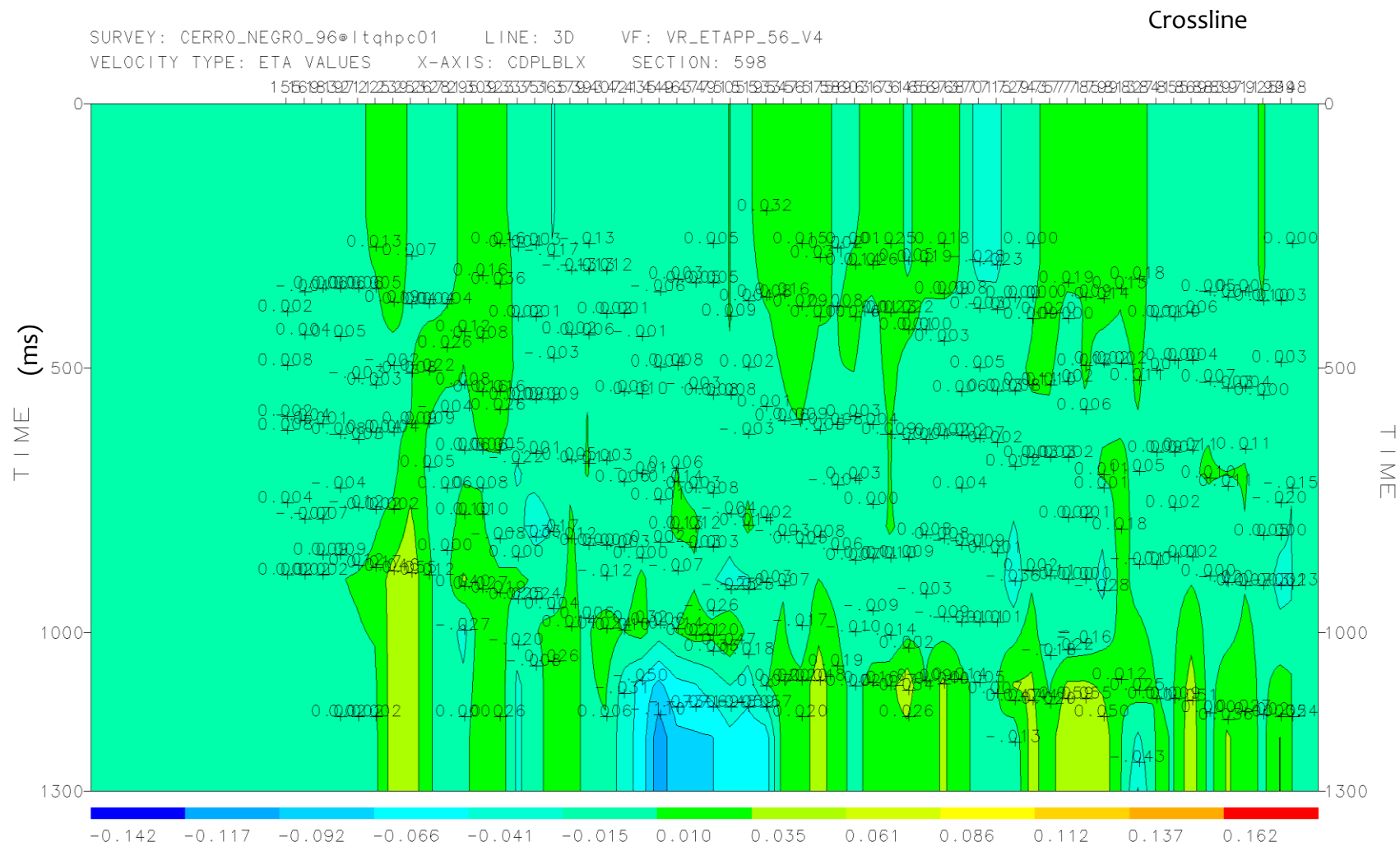


Figura 84. IL – 598 del modelo anisotrópico del parámetro ETA

S

N

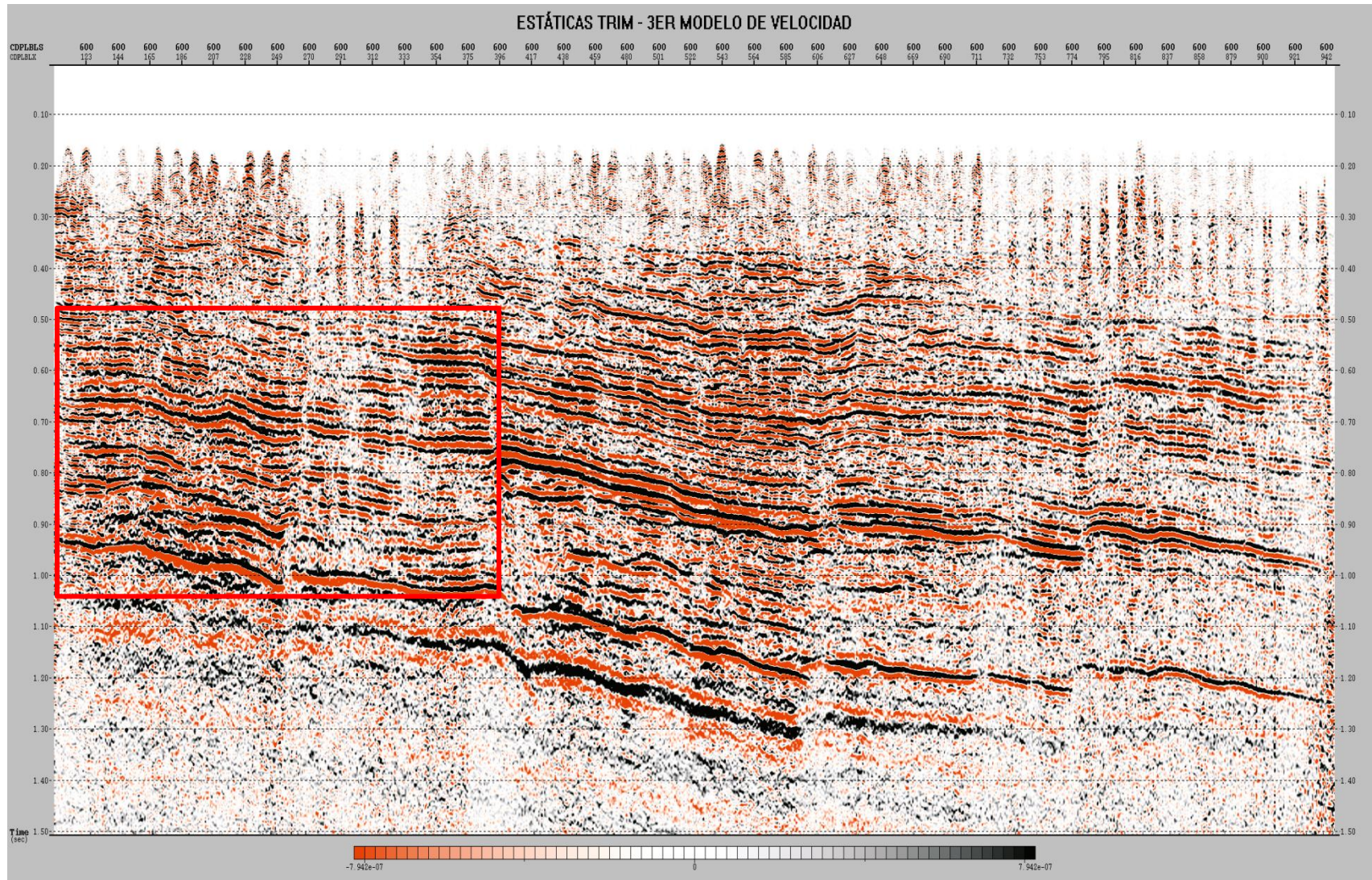


Figura 85. IL – 600 con estáticas TRIM - 3er modelo de velocidades

S

N

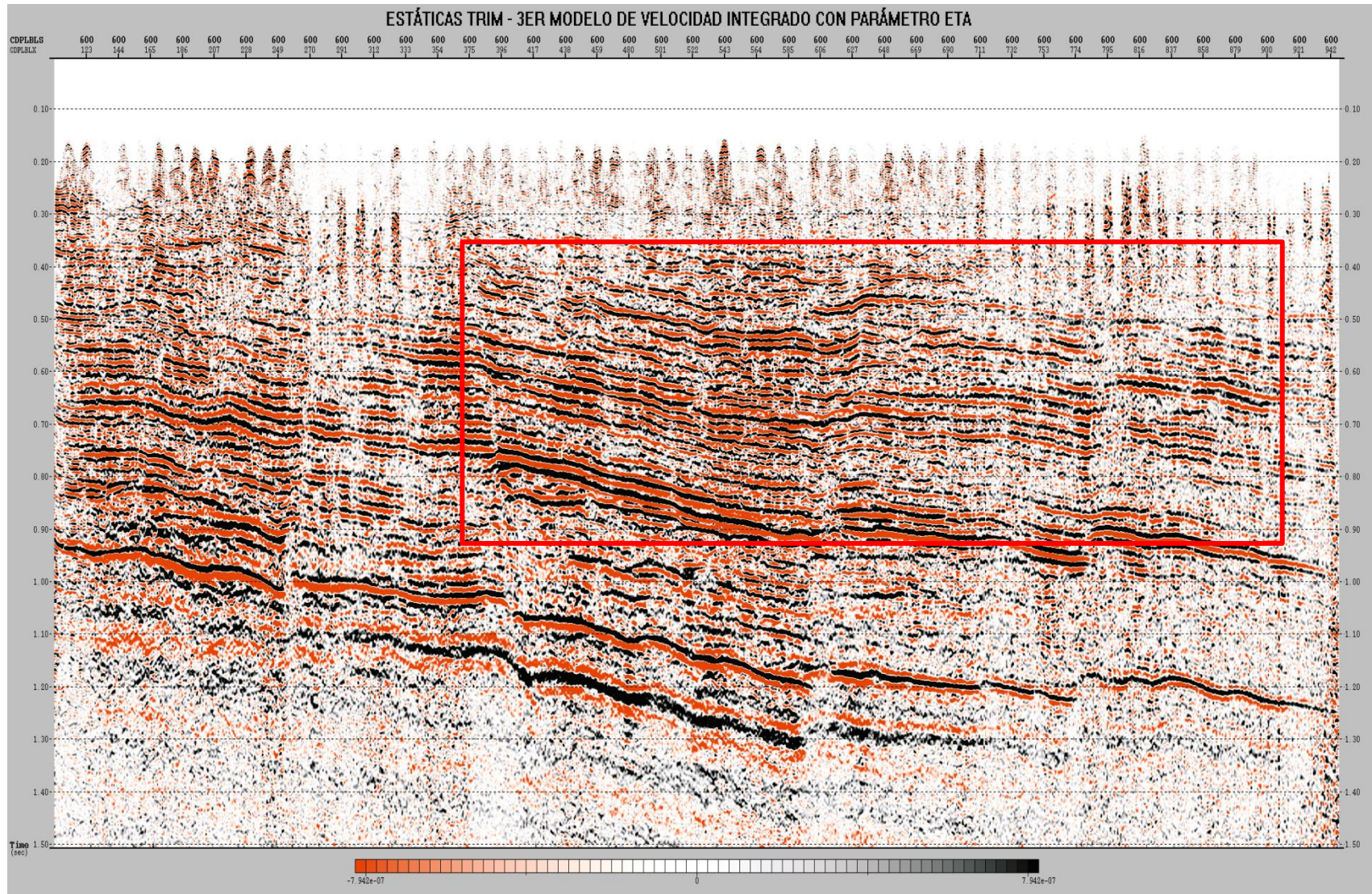


Figura 86. IL – 600 con estáticas TRIM - 3er modelo de velocidades e integración de parámetro ETA

No obstante, uno de los requerimientos para migrar los datos antes del apilamiento refiere al acondicionamiento de los registros agrupados por CDP debido a que procesos anteriores, además de recuperar señal y establecer continuidad, también se generó ruido en los datos, como por ejemplo: los múltiples, ruido aleatorio de alta frecuencia, etc. Para ello se definió un filtro pasa – banda para eliminar el ruido del *ground roll* pre – existente, otro para la eliminación de ruido cuyas velocidades eran lineales, y finalmente, la eliminación de múltiples a través del filtro Radon que trabaja en el dominio tau – p. En resumen, los datos de entrada (figura 87) pasaron por un proceso de filtrado para proceder a ser migrados (figura 88). La figura 87 presenta un registro de disparo con todos los procesos aplicados previamente. No obstante, el cuadro rojo permite destacar una característica en la sección apilada que corresponde al múltiple por debajo del basamento. Luego de la aplicación del proceso de filtrado, en la figura 88, la zona enmarcada en el cuadro rojo correspondiente al múltiple se atenuó. Además, el filtrado eliminó todos esos efectos residuales que enmascaraban la señal, y con ello se pueden diferenciar los reflectores en los registros agrupados por CDP.

Además, el objetivo principal de construir modelos de velocidades era definir cuál de ellos generaba mejores secciones apiladas. Sin embargo, los modelos de velocidades están expresados en velocidades de apilamiento. La velocidad de apilamiento caracteriza mejor el NMO de la reflexión en tiempo a través de un registro agrupado por CDP de las trazas, por ello la migración requiere un volumen de velocidades RMS. El proceso de migración es dependiente de la selección del modelo de velocidad, ya que éste podrá migrar de manera adecuada o incorrecta los eventos dentro de la sísmica. El modelo óptimo para generar el volumen RMS de velocidades para la migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo correspondió con el tercer modelo de velocidades integrado con el parámetro ETA debido a que estableció una calidad de imagen superior respecto a los anteriores. De haber utilizado un modelo de velocidad incorrecto para realizar la migración se generaría una imagen parecida a una sonrisa o una parábola cóncava hacia abajo dependiendo

de cuál sea la diferencia entre la velocidad utilizada para migrar y la velocidad correcta. Cuando la velocidad de migración es mayor a la velocidad del medio se producen sonrisas en tiempos mayores en los puntos de difracción, mientras que cuando la velocidad de migración es menor a la velocidad del medio entonces se producen parábolas cóncavas hacia abajo en tiempos menores. Por tanto, la calidad de la migración depende del modelo de velocidad así como también de la apertura de migración.

Después de generar el volumen RMS, se refinaron las velocidades a través de la selección de funciones de velocidades residuales para terminar de corregir los defectos y migrar los datos de manera adecuada. En la figura 89 se muestra el volumen RMS generado a partir del 3er modelo de velocidades. La figura 90 corresponde al volumen RMS de los residuos, y finalmente, el 91 representa la integración del volumen inicial con los residuos. La figura 92 muestra los registros migrados agrupados por CDP antes de agregar las funciones de residuo en los datos y la figura 93, los mismos registros migrados después de agregar dichas funciones. Esto logró aplanar los datos lo más posible. Como se puede ver, los residuos horizontalizaron aquellos eventos que estaban subcorregidos o sobrecorregidos.

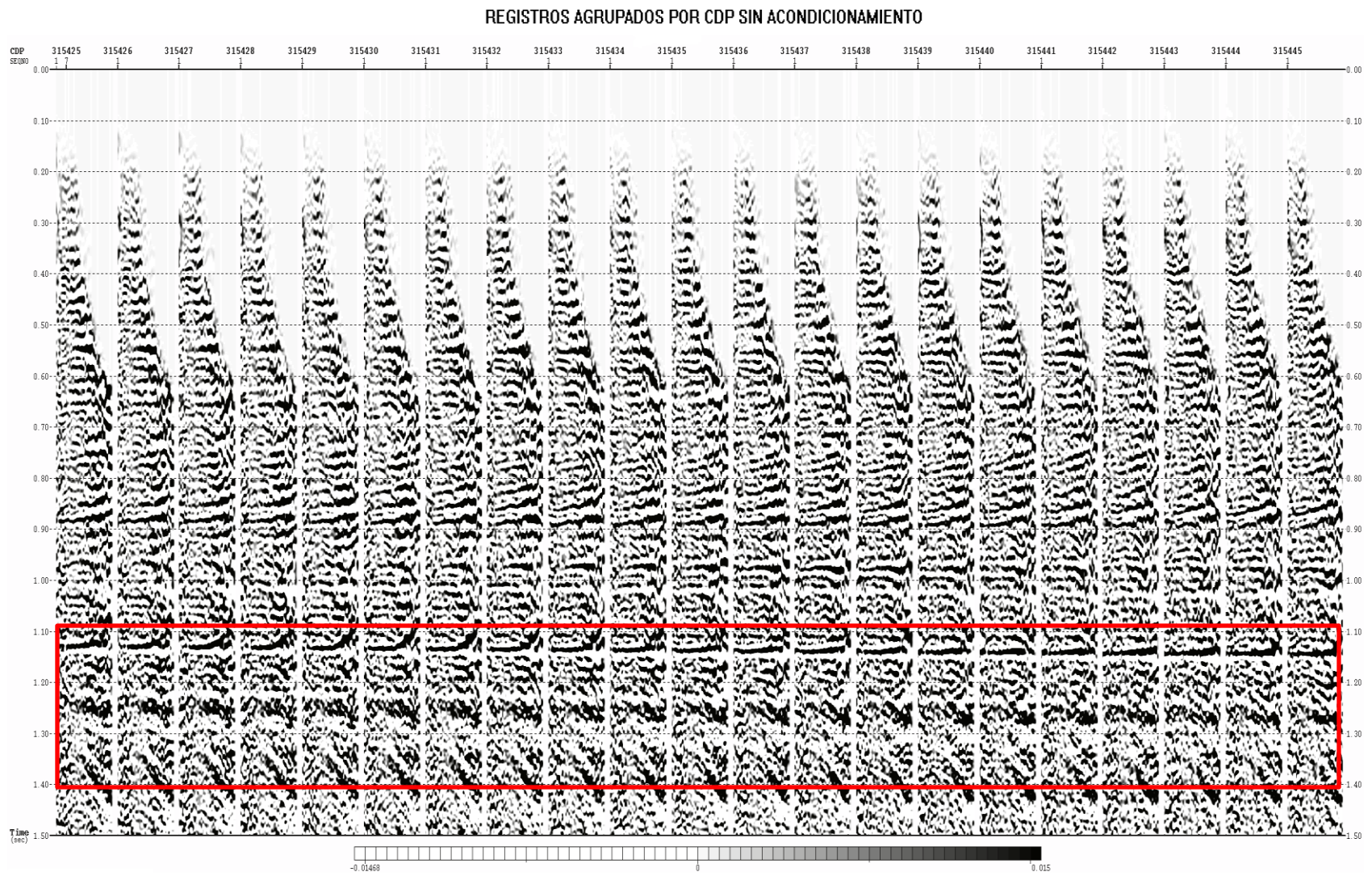


Figura 87. Registros agrupados por CDP antes de realizar acondicionamiento

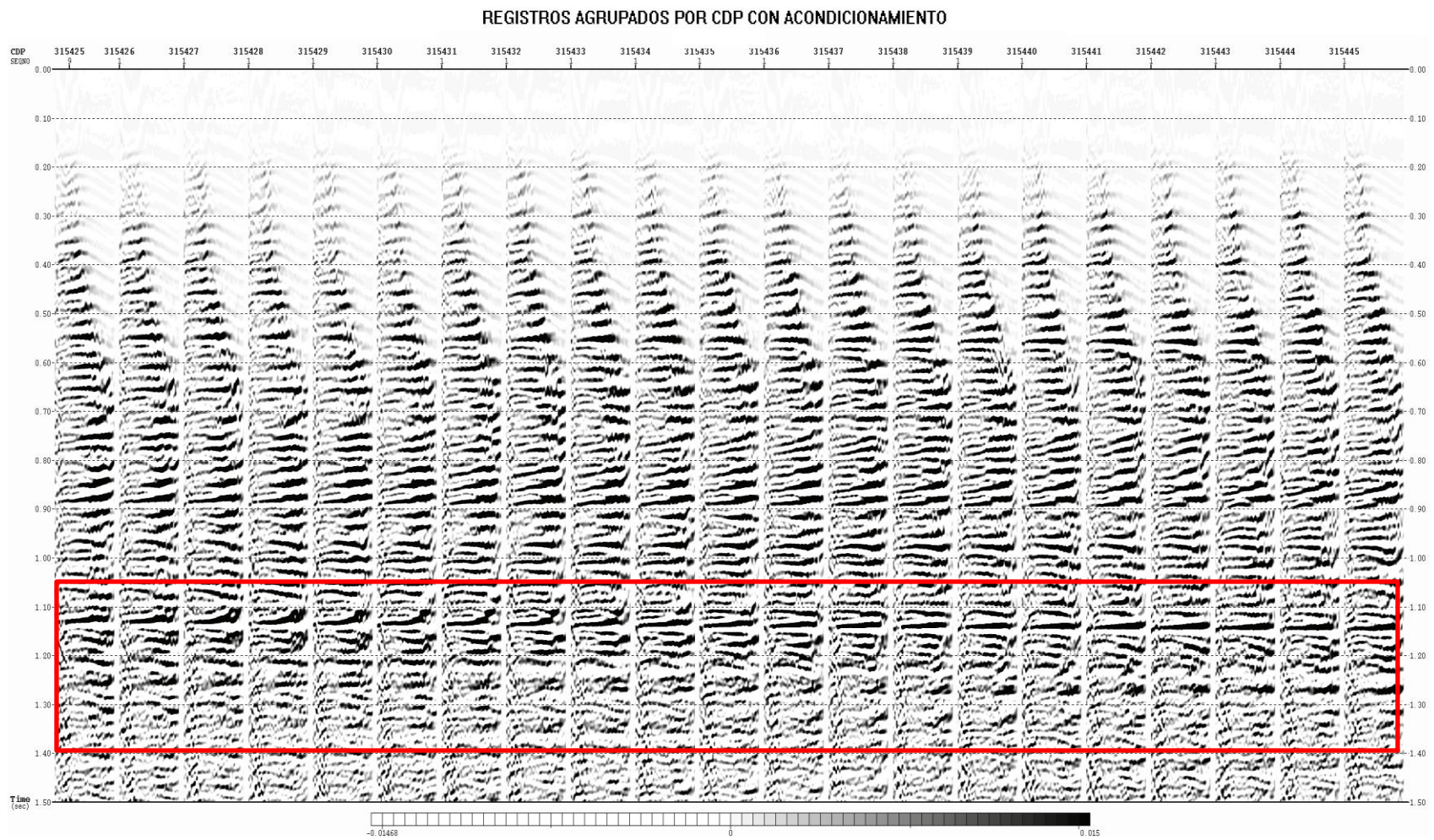


Figura 88. Registros agrupados por CDP después de realizar acondicionamiento (sin función de MUTE aplicada)

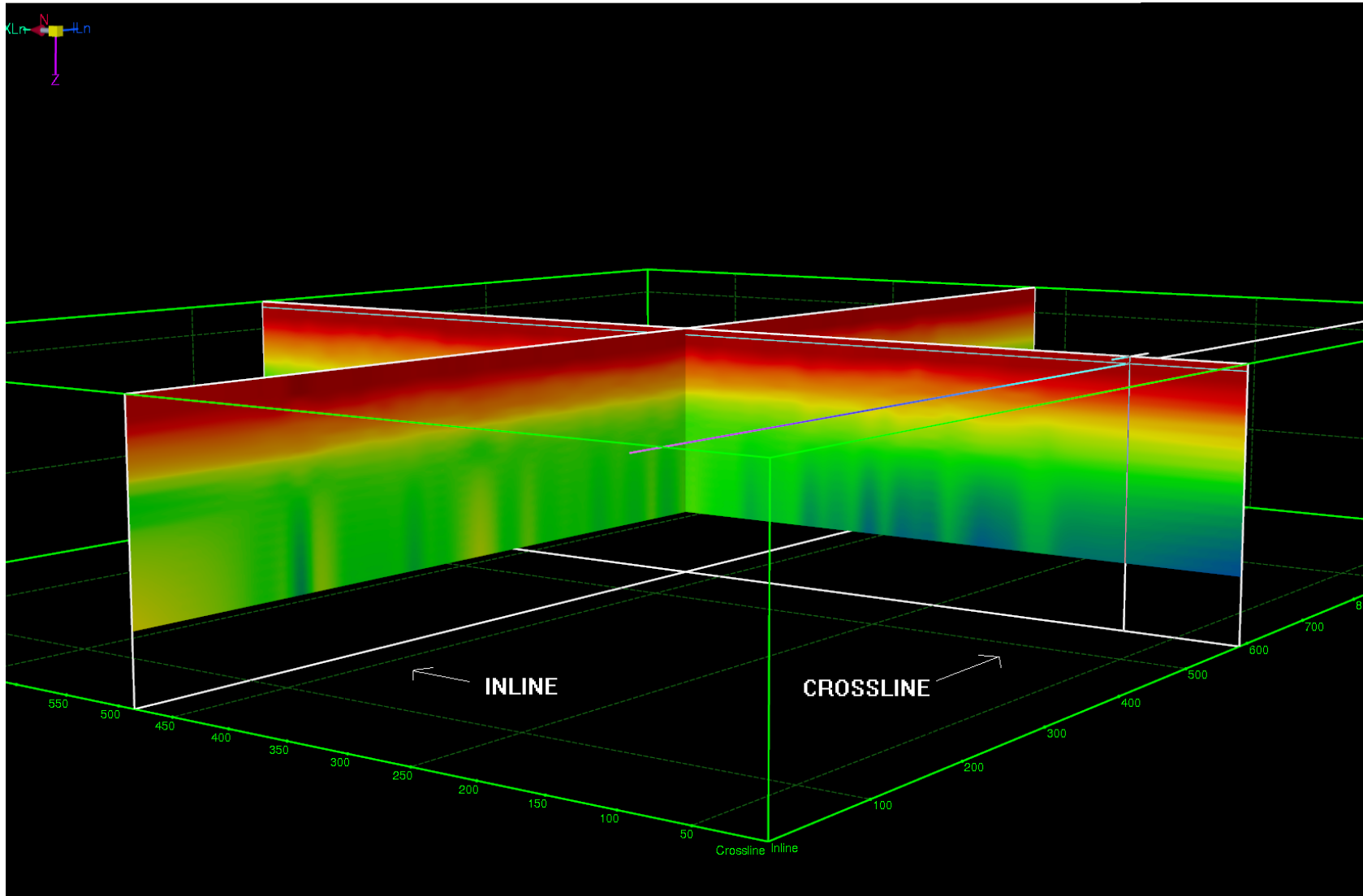


Figura 89. Velocidades RMS generadas a partir del 3er modelo de velocidades (IL – 567, XL – 91)

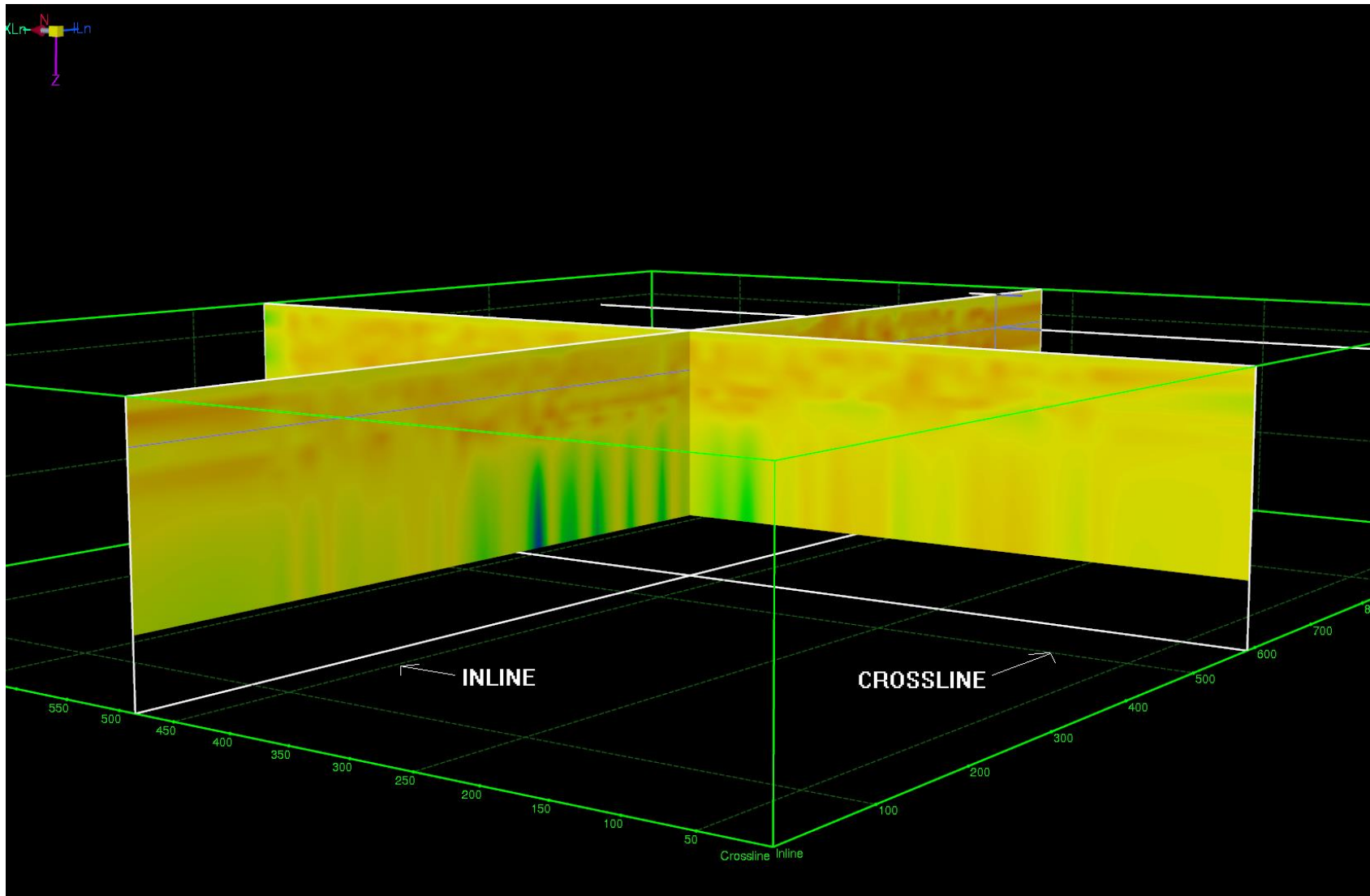


Figura 90. Funciones de verticales de velocidades residuales interpoladas (IL – 1083, XL – 485)

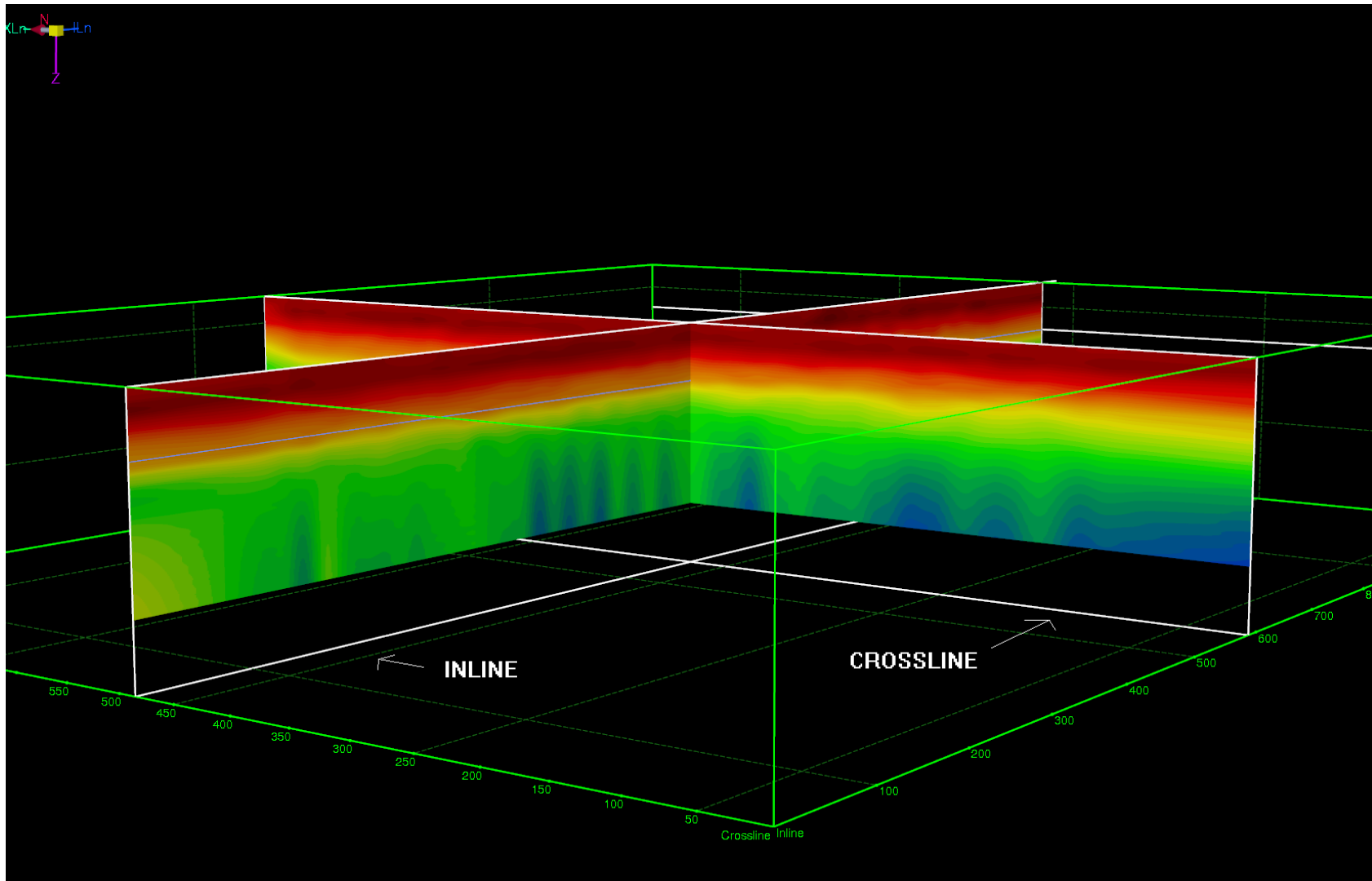


Figura 91. Velocidades RMS integradas con las funciones verticales de velocidad residuales (IL – 1174, XL – 485)

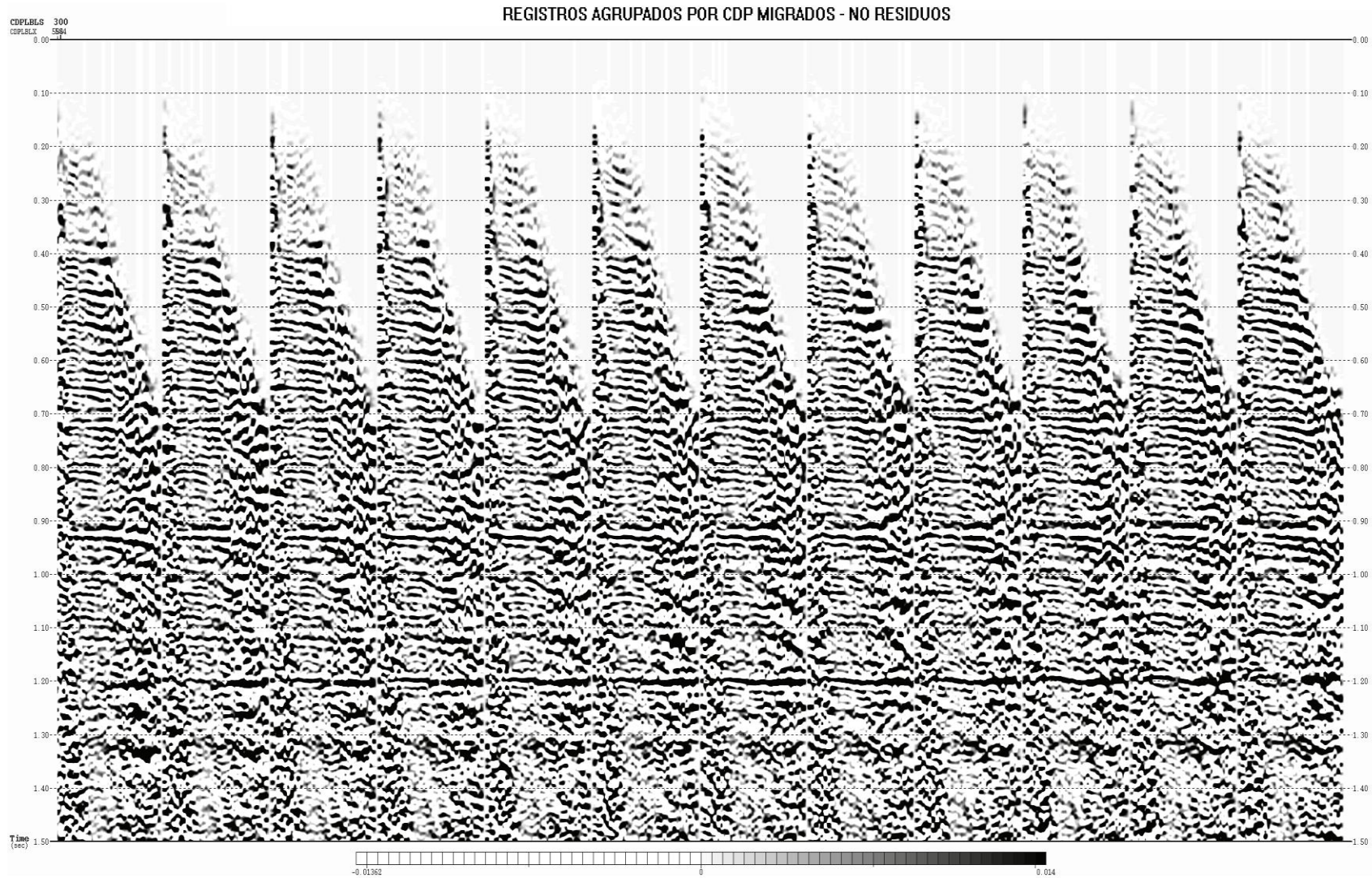


Figura 92. Registros agrupados por CDP migrados antes del apilamiento sin funciones de residuos

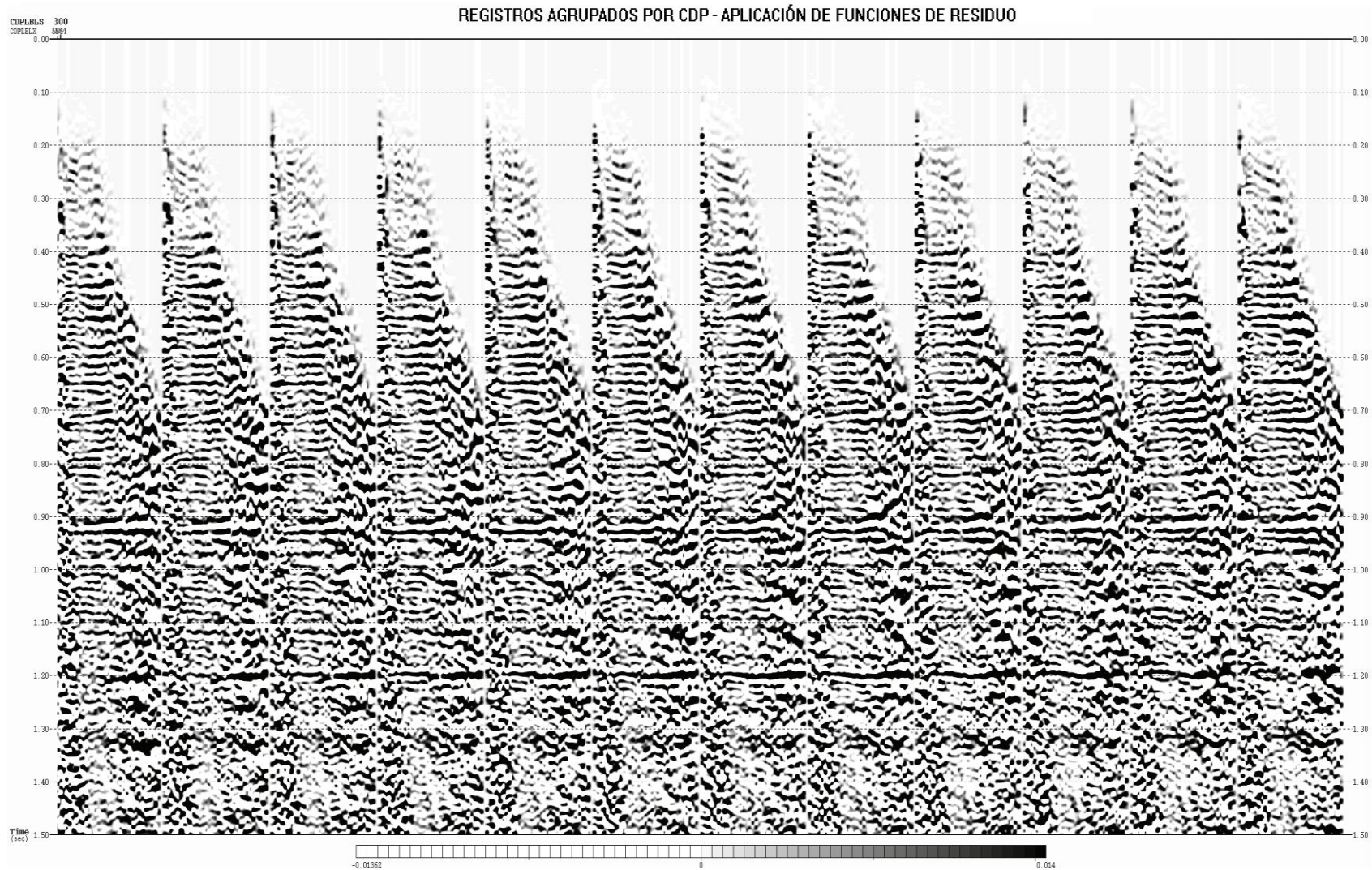


Figura 93. Registros agrupados por CDP migrados antes del apilamiento con funciones de residuos

Las figuras 92 y 93 representan los registros luego de haber sido migrados antes del apilamiento. Para obtener este resultado se tuvieron que realizar distintas pruebas de apertura para efectuar la migración de Kirchhoff. Durante las pruebas se implementaron aperturas de migración de 500 m, 800 m, 1200 m y 1600 m en dirección inline y crossline (figura 94), para definir cuál de ellas reconstruía mejor la imagen sísmica y colapsara las difracciones. Las aperturas se definen según el rango de offset previamente definido. La implementación de valores muy grandes en la apertura de migración permite la migración de eventos profundos o pendiente pronunciada. Esto quiere decir que para un evento somero con una apertura de migración de gran tamaño se va a realizar una sumatoria sobre la hipérbola más allá de la zona de máxima dispersión de energía, por lo cual mayor será la cantidad de ruido sumado para estos eventos someros que para los eventos profundos.

Las pruebas realizadas con 500 m y 800 m no reconstruían los reflectores completamente, a pesar de establecer continuidad en los mismos, las variaciones laterales y verticales de las amplitudes no tenían un patrón que pudiesen definir estratos planos asociados a las formaciones presentes en la FPO. Las hipérbolas de difracción presentadas en la figura 94 son definidas a través del modelo de velocidad generado previamente, el operador de migración realiza la suma sobre las hipérbolas hasta una apertura fija donde para un evento somero la trayectoria de dicha sumatoria es incluso mayor que para un evento profundo. La prueba con la apertura de migración de 1600 m permitió reconstruir la imagen de manera más precisa en los eventos profundos debido a que el yacimiento productor de hidrocarburo se encuentre entre los 750 ms y 1500 ms. También se realizaron pruebas de apertura en tiempo cuya función es realizar un enmudecimiento a la apertura. Sin embargo, a pesar de probar diferentes valores para los datos del proyecto Cerro Negro 96B 3D, no existía una diferencia perceptible entre ellos y el valor elegido fue de 1000 ms. Esto además de reconstruir las imágenes sísmicas permitió colapsar las difracciones presentes en los datos.

Finalmente, después de aplicar una apertura para migrar los datos en dirección inline y crossline de 1600 m y en tiempo de 1000 ms. Los datos fueron migrados antes y después del apilamiento en el dominio del tiempo. En ambos se aplicaron post – procesos para resaltar los eventos. La figura 95 corresponde con la migración de Kirchhoff post – apilamiento en tiempo sin post – procesos y la figura 96, la misma migración con post – procesos. La figura 97 corresponde con la migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo sin post – procesos y la figura 98, la misma migración con post – procesos. La aplicación de los post – procesos en los datos permitieron resaltar características estructurales (fallas normales, etc). La información de las amplitudes de las reflexiones sísmicas puede ser utilizada en un proceso de inversión, destinado a determinar las impedancias relativas de los materiales presentes en ambos lados de la interfase. Mediante la correlación de estas propiedades obtenidas por métodos sísmicos con los valores medidos en el pozo, los intérpretes pueden extender la información de los pozos a través de todo el volumen sísmico. Por ende, es necesario mantener una preservación de amplitudes en los datos para poder aplicar estudios para interpretación y caracterización de yacimiento.

El espectro de frecuencia presentado en la figura 100 permite comparar el contenido de frecuencia de los datos antes y después de haber aplicado la migración pre – y post – apilamiento en tiempo. Los datos finales antes de la migración y el producto obtenido de la migración post – apilamiento poseen el mismo contenido de frecuencia. Sin embargo, el volumen migrado en post – apilamiento presenta mayor continuidad lateral para resaltar rasgos estructurales, este fue empleado como control de calidad para inferir el resultado de la migración pre - apilamiento. Por otro lado, el volumen apilado con todos los procesos hasta las estáticas TRIM y el producto obtenido de la migración pre – apilamiento poseen diferente contenido de frecuencia.

En este proceso, se ven atenuadas las frecuencias bajas debido al acondicionamiento de los registros. En el cual, la migración pre – apilamiento posee mayor continuidad en los eventos, recuperó contenido de frecuencia que permite resaltar eventos en los primeros segundos, a diferencia de la post – apilamiento. La migración de Kirchhoff

colapsó las difracciones ubicadas entre los 0,6 s y 1 y 5 s en las secciones apiladas. La migración realizada antes del apilamiento genera mayor continuidad en los eventos debido a que esta toma en cuenta la información de todas las trazas para reconstruir la imagen sísmica mientras que la migración post – apilamiento toma la información ya apilada y aplica el algoritmo de la migración de Kirchhoff sobre estos. Sin embargo, la migración post – apilamiento se realiza primero para tener una idea del resultado esperado en la pre – apilamiento. La migración pre – apilamiento permite detallar mejor los cambios laterales de amplitudes.

Así mismo, como control de calidad de los datos obtenidos respecto a la mejora de la información y a su relación con la geología del área, se decidió realizar la comparación entre la IL – 600 reprocesada en el año 2005 por WesternGeco y en el 2016 (figura 99). Los canales en la zona de estudio poseen la misma orientación que las líneas de receptores (IL) (N – S). Esto dificulta la determinación de los rasgos estratigráficos a través de las secciones apiladas en dirección IL. La mejor opción para ello es generar una sección perpendicular a la IL para visualizar dichas características, en este caso, una XL.

La figura 102 representa la comparación entre la XL – 408 reprocesada en el año 2005 por WesternGeco y en el 2016. Cualitativamente, las secciones apiladas en ambas direcciones presentan mayor continuidad en el volumen reprocesado en el 2016 debido a que los reflectores a pesar de tener una cantidad de energía menor poseen un contraste de impedancia que permite diferenciarlos uno de otros. El problema del volumen sísmico reprocesado en el 2005 reside en los procesos empleados debido a que no se posee la secuencia de procesamiento exacta, así como tampoco, los parámetros establecidos para los procesos que fueron aplicados. No obstante, a nivel del basamento aún se puede ver el múltiple asociado en el volumen del 2005, éste fue atenuado de manera óptima en el reprocesamiento del 2016. Si se analiza el espectro de frecuencia de la figura 101, se puede ver que existe un comportamiento lineal en el contenido de frecuencia. Esto es indicador que los procesos aplicados en el año 2005 no buscaron preservar las amplitudes, en ese caso,

se buscó resaltar los eventos mientras que el resultado obtenido en el periodo 2015 – 2016 tuvo control sobre el contenido de ruido dentro de los datos sísmicos, atenuó los múltiples y permitió establecer continuidad en los eventos sin alterar las amplitudes sísmicas de los datos.

A nivel de rasgos estructurales, la zona de estudio tiene la particularidad de poseer sistemas de fallas normales (sección 2.3). La figura 103 presenta la IL – 315 migrada pre – apilada en tiempo con post – procesos. Los post – procesos permiten establecer continuidad mejor a los reflectores, ésta no mantiene la preservación de amplitudes, ya que busca resaltar los rasgos estructurales de los datos. Analizando en forma general el comportamiento estructural de dichos datos reprocesados, se puede notar que la mayoría de las fallas son normales en dirección preferencial E – O (perpendiculares a las IL del proyecto), esto indica que el comportamiento estructural presente en la zona de estudio concuerda con lo esperado según el marco estructural y datos previos del área. Otra manera de verificar el comportamiento estructural del área está asociada a la aplicación de algunos atributos sísmicos generales en el volumen reprocesados para así tratar de visualizar su continuidad areal. En este caso, se aplicó el atributo de varianza (figura 105) y de amplitud (figura 106) en una ventana de 8 muestras (16 ms) centrada en los 850 ms. El atributo de varianza mide la diferencia en las trazas, enfatizando la impredecibilidad de los horizontes sísmicos (bordes o interrupciones). La figura 105 presenta un *time – slice* próximo al basamento, en ésta se pueden visualizar datos anómalos de colores rojos y amarillos con una alineación general E – O asociándolos al sistema de fallas principal y secundarias. Por ende, corresponden con las fallas normales ubicadas en el área de estudio.

Después de haber sido identificado de forma general las componentes estructurales del área, se visualizó algunos rasgos que pudieran señalar indicios de realce de características estratigráficas en la zona. Para ello se empleó la XL – 270 migrada sin post – procesos para evitar afectar la preservación de amplitudes. En la figura 106, se resalta el XL – 270, en el cual se proyectan 5 pozos con registros de rayos gamma

(lado izquierdo) y resistividad (lado derecho) definiendo algunas unidades estratigráficas. Al contrastar la información de los pozos con la imagen sísmica, se puede visualizar ciertas características de continuidad lateral de dichos rasgos similares a depósitos fluviales. Al igual que con los rasgos estructurales, la aplicación de atributos sísmicos generales permite, en conjunto con la información de pozo y la sísmica, la verificación y continuidad lateral de los rasgos estratigráficos antes establecido. En este caso, se aplicó un *time – slice* a los 725 ms y se interceptó con un cubo de valores de amplitud RMS, con el propósito de resaltar las características estratigráficas de la zona y establecer un control de calidad general de los datos. En la figura 107 donde se visualiza dicho *time – slice*, se pueden observar algunas anomalías de amplitud alineadas con orientación preferencial S – N (según marco estratigráfico). Esto puede sugerir cuerpos estratigráficos presentes en el área de estudio (líneas de color amarillo). Por tanto, el reprocesamiento de los datos permitió preservar las amplitudes para resaltar dichas características, tanto estructurales como estratigráficas.

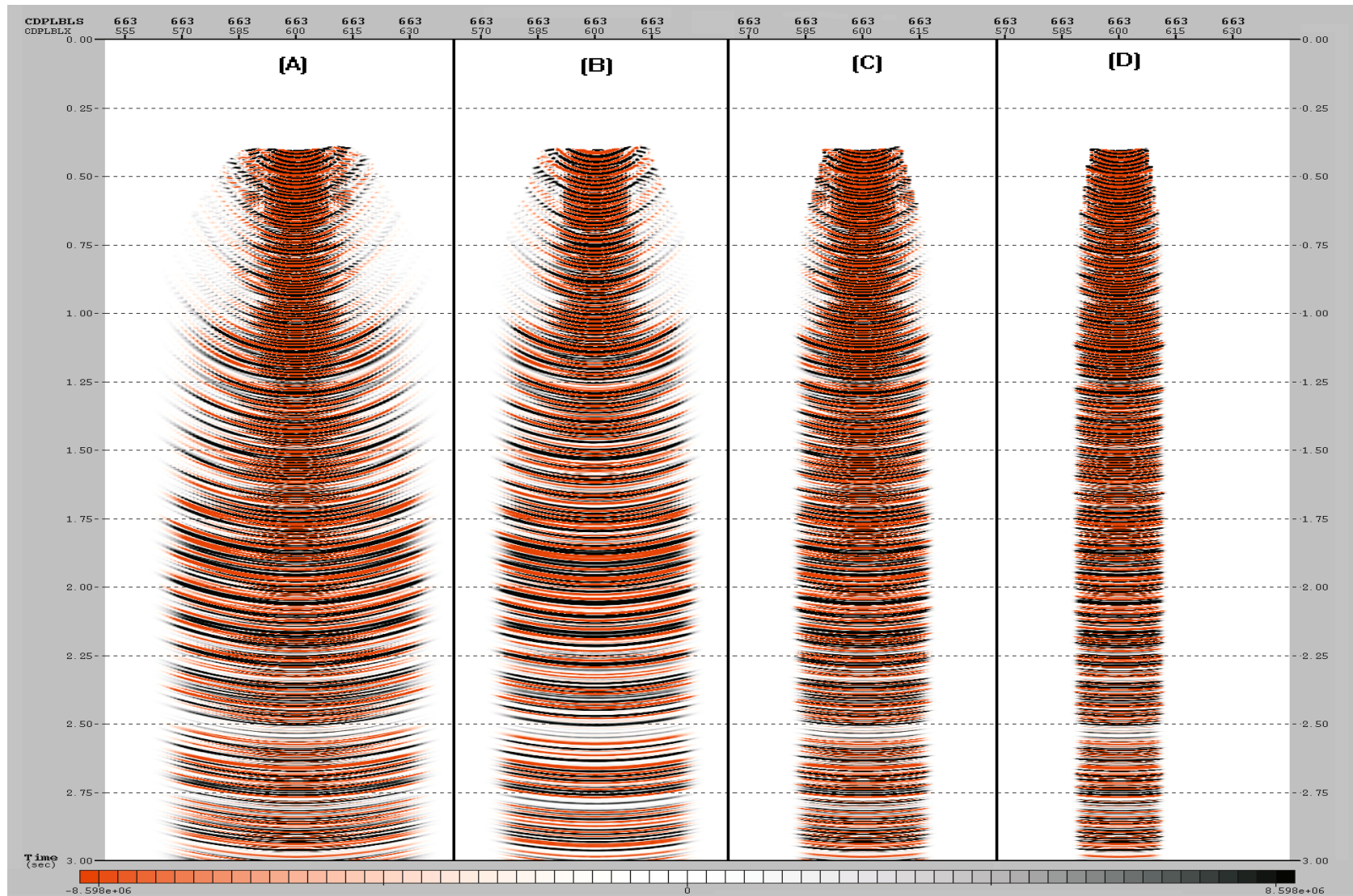


Figura 94. Aperturas de migración de (A) 1600 m, (B) 1200 m, (C) 800 m y (D) 500 m

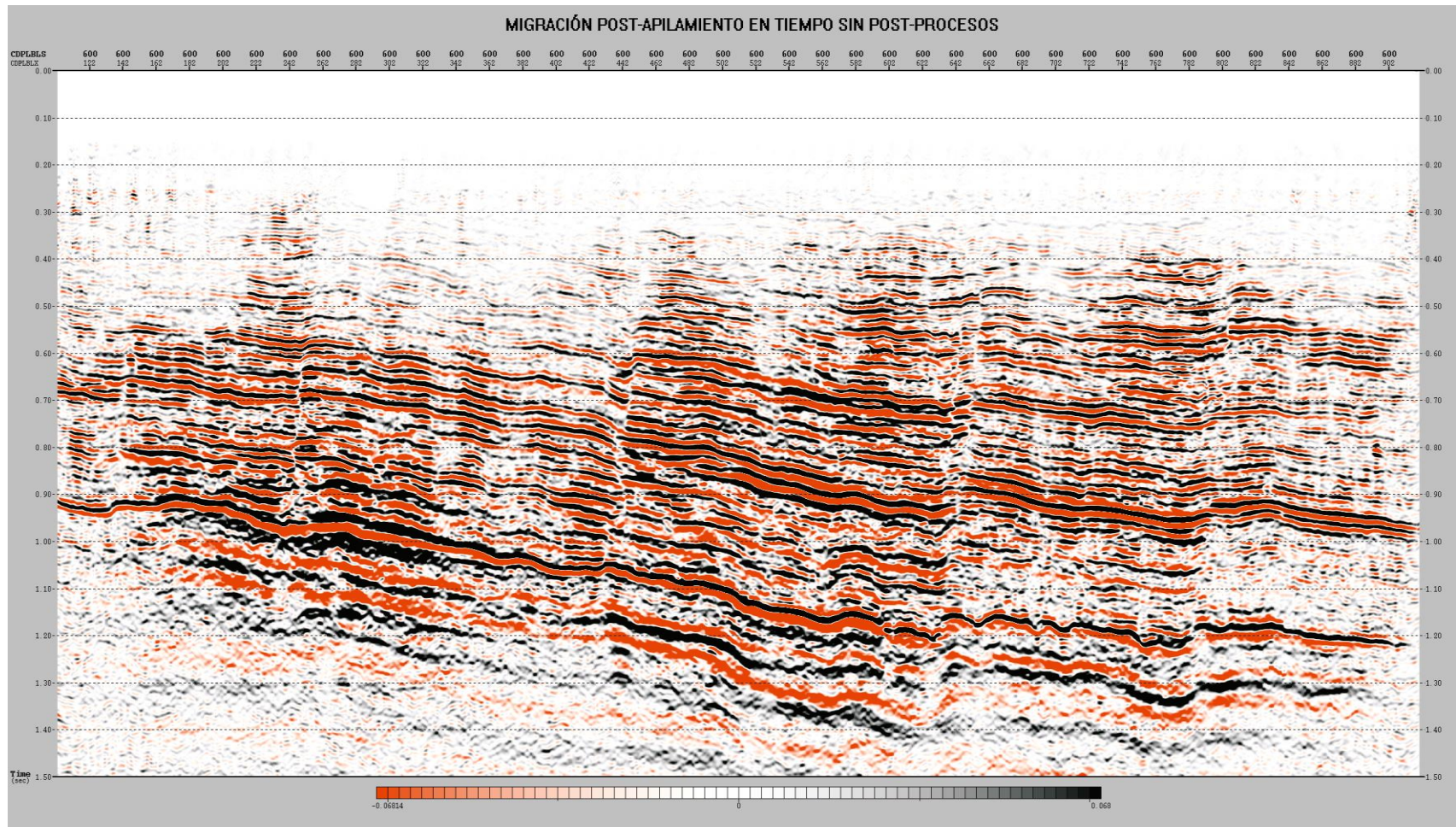


Figura 95. IL – 600 apilada después de aplicar la migración de Kirchhoff post – apilamiento en tiempo sin post - procesos

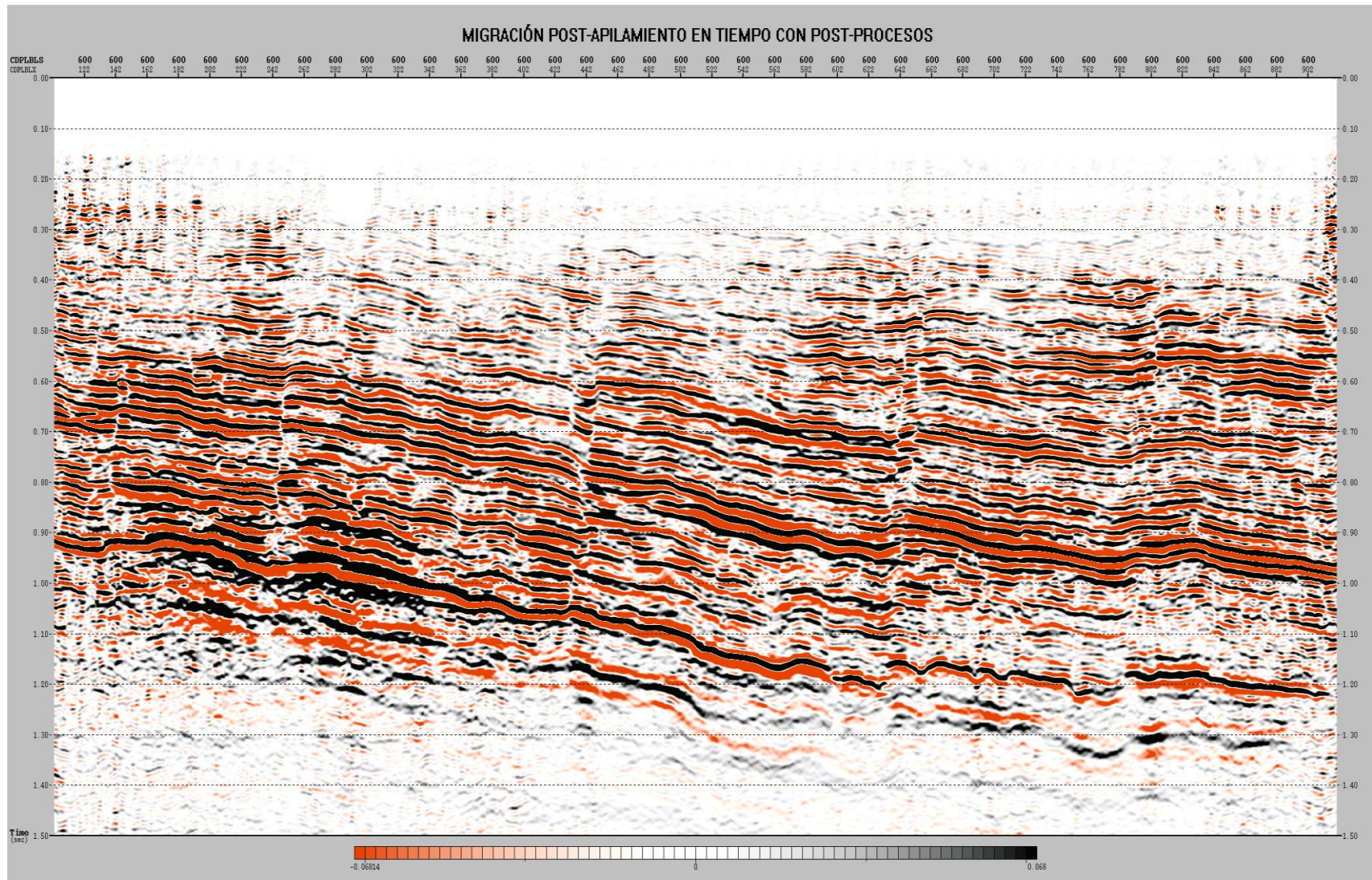


Figura 96. IL – 600 apilada después de aplicar migración de Kirchhoff post – apilamiento en tiempo con post – procesos

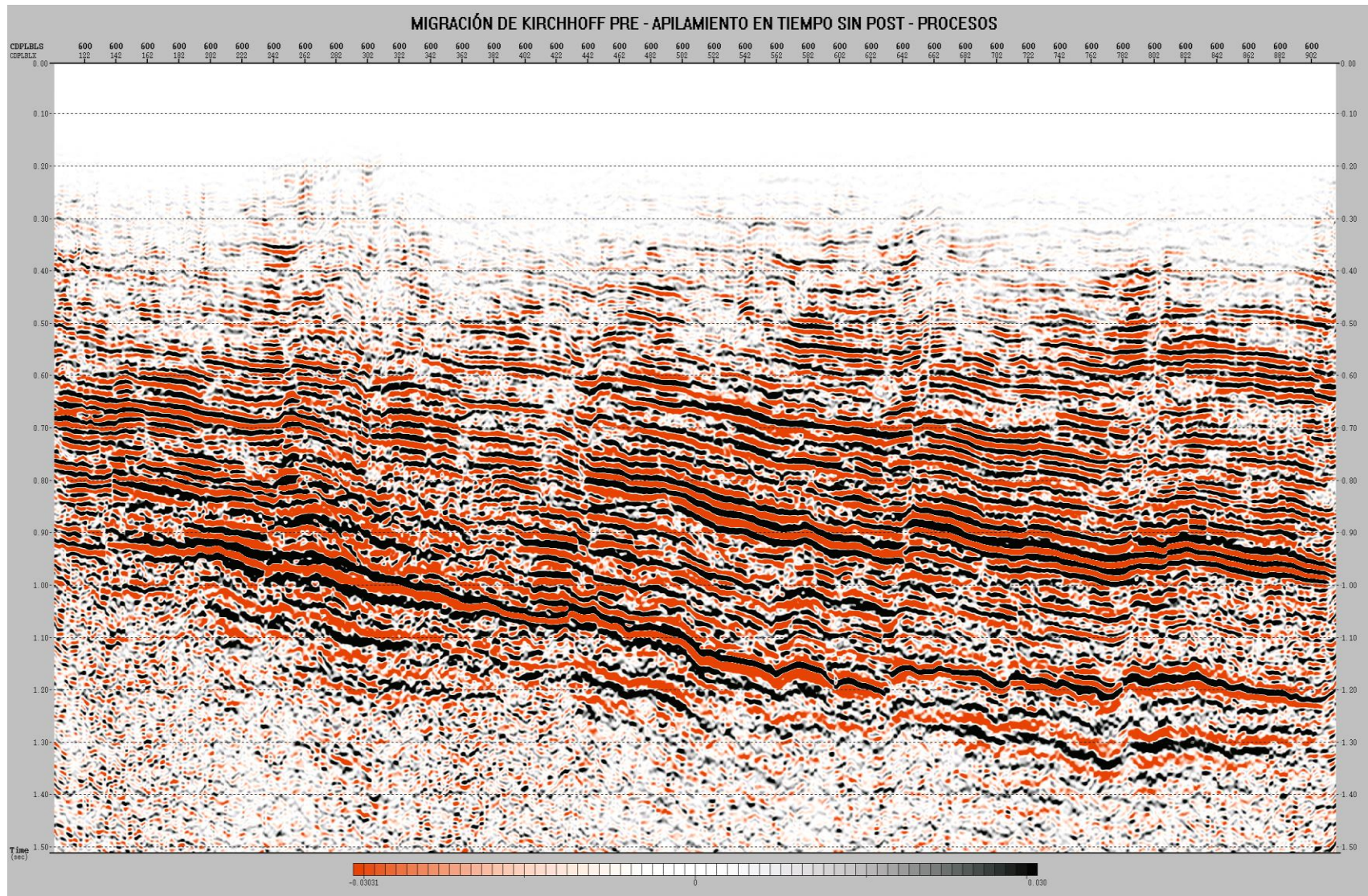


Figura 97. IL – 600 apilada después de aplicar migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo sin post - procesos

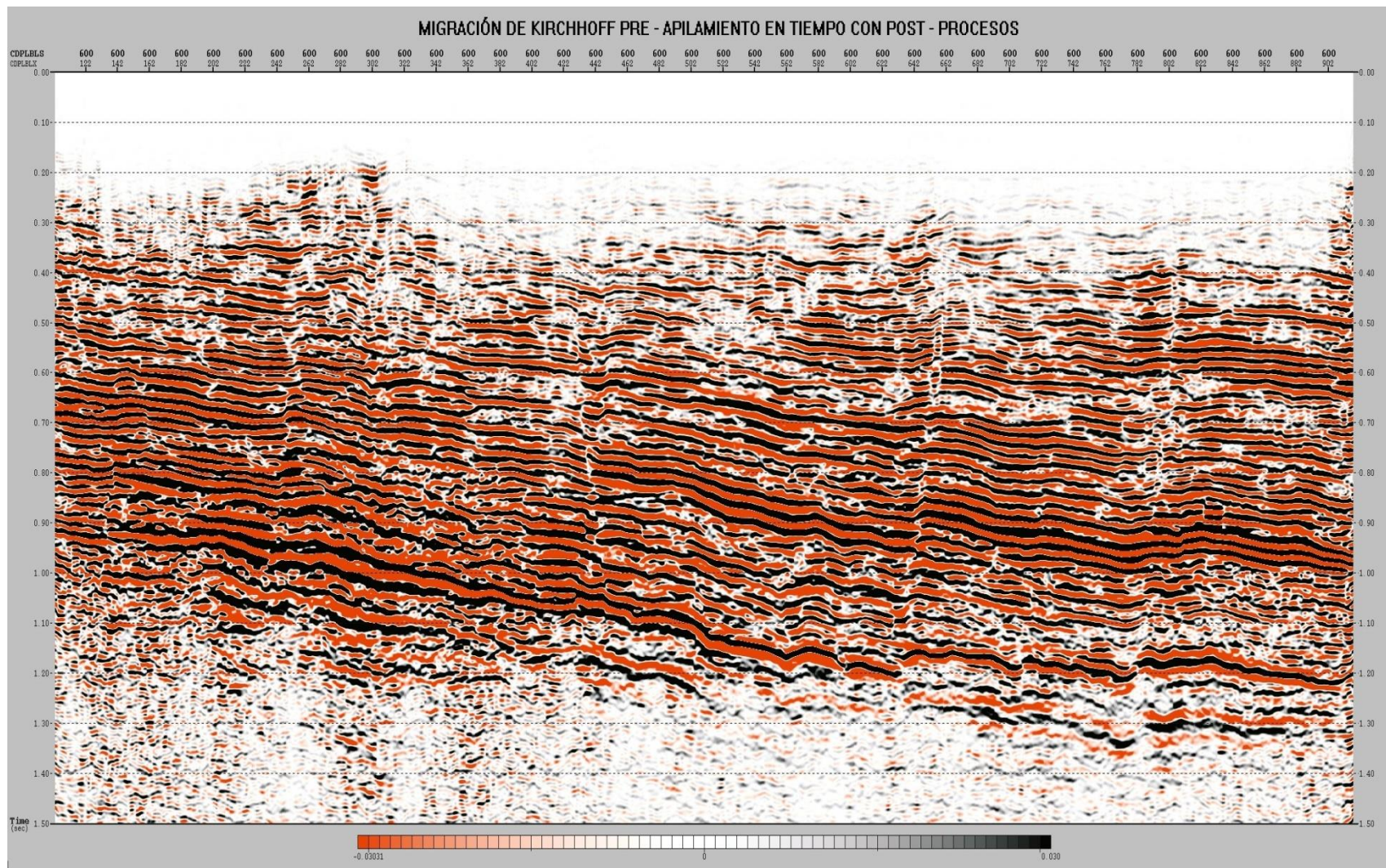


Figura 98. IL – 600 apilada después de aplicar migración de Kirchhoff pre – apilamiento en tiempo con post – procesos

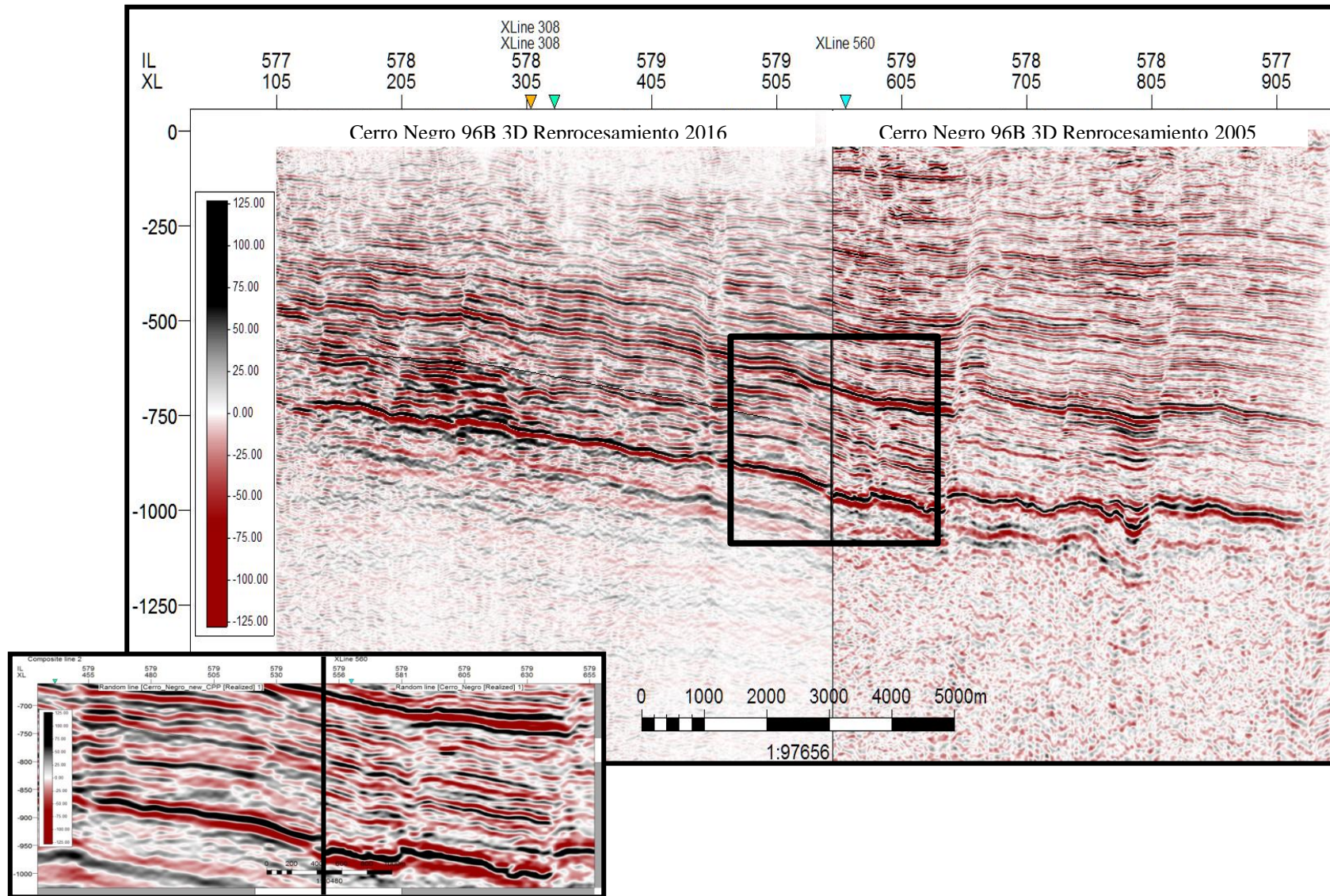
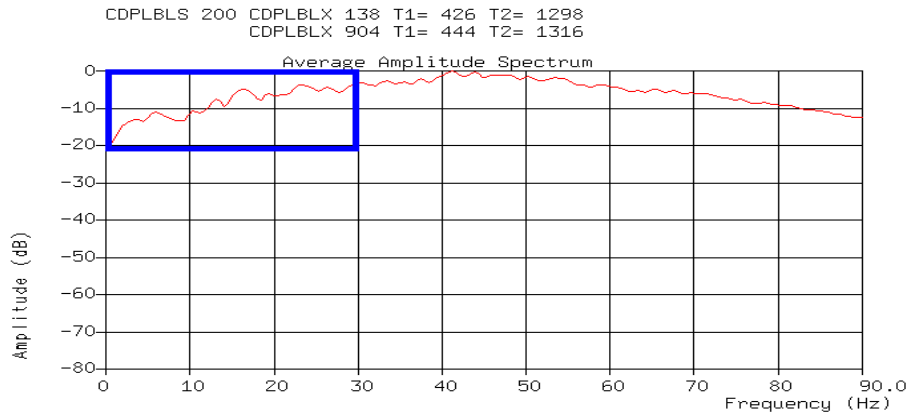
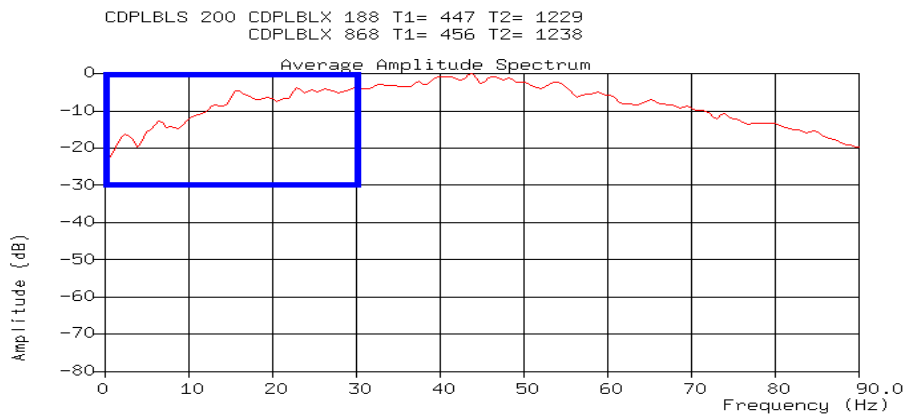


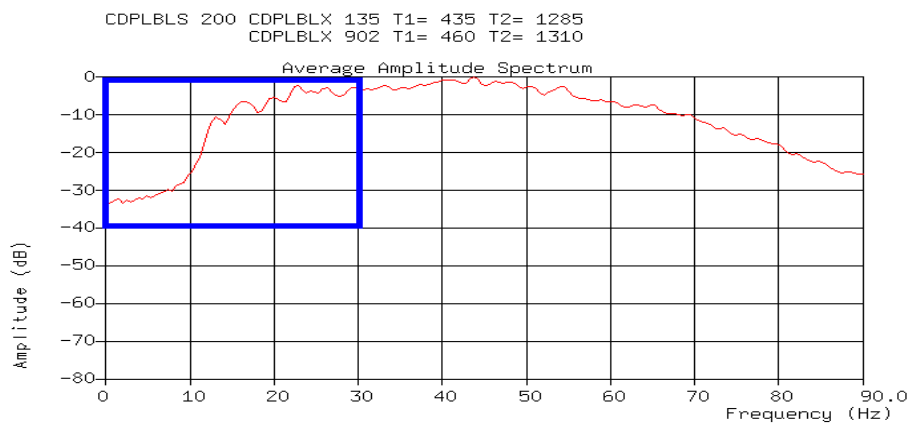
Figura 99. Comparación de la IL – 600 reprocesada en el 2005 y 2006 del proyecto Cerro Negro 96B 3D



(A)



(B)



(C)

Figura 100. Espectro de frecuencia de (A) volumen sísmico antes de migrar, (B) volumen sísmico migrado después del apilamiento y (C) volumen sísmico migrado antes del apilamiento

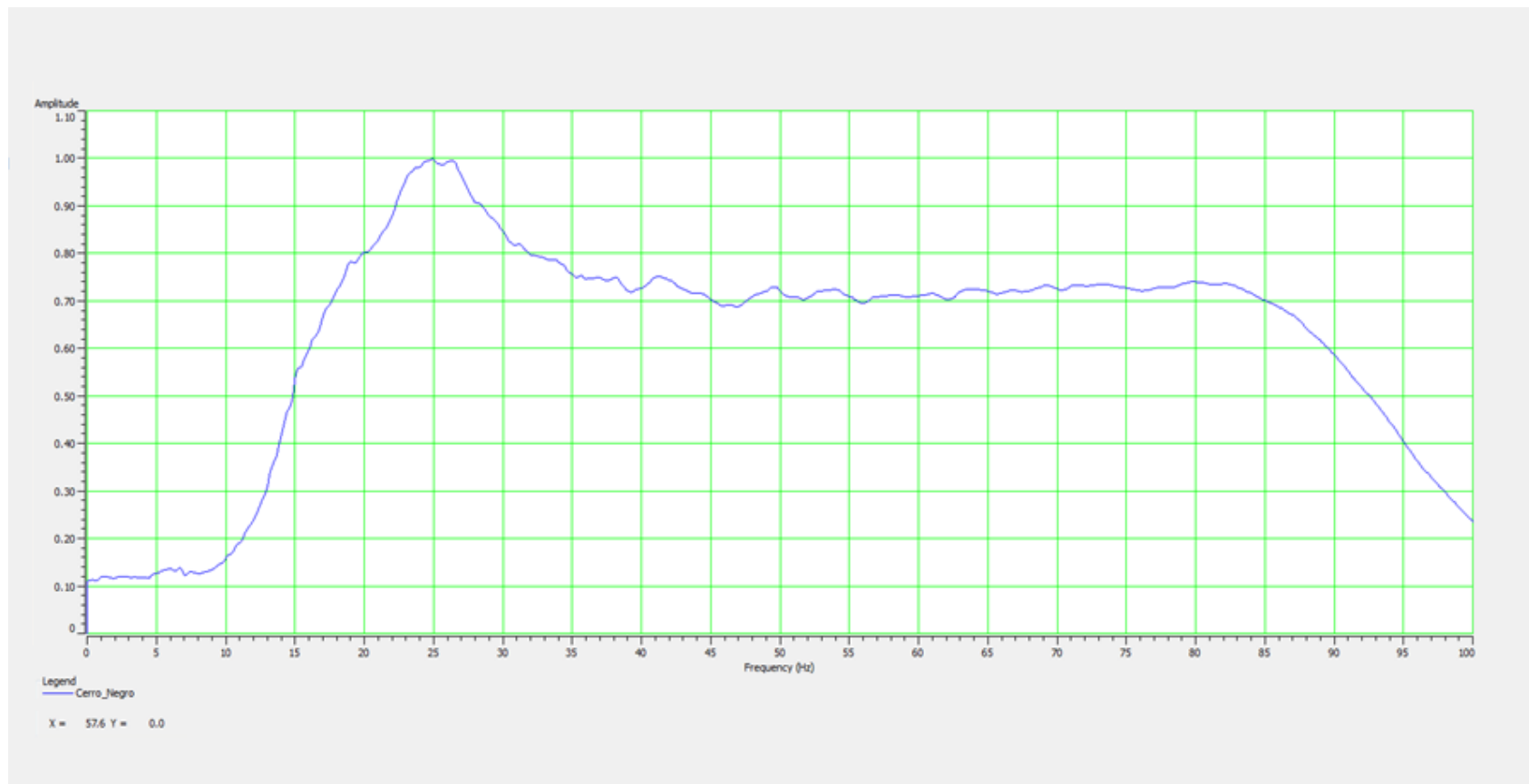


Figura 101. Espectro de frecuencia del volumen sísmico reprocesado en el 2005 por WesternGeco

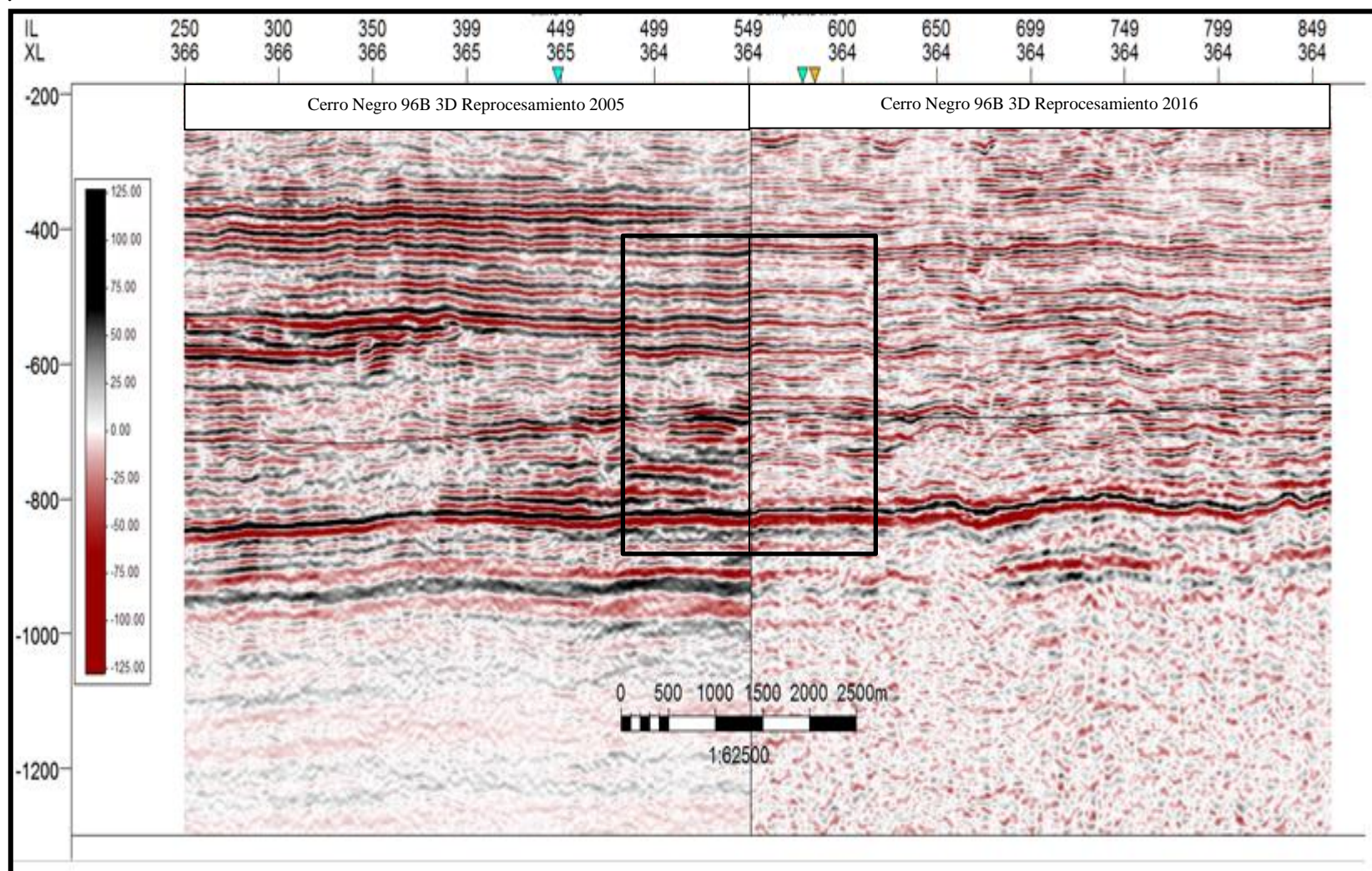


Figura 102. Comparación de la XL – 408 reprocesada en el 2005 y 2016 del proyecto Cerro Negro 96B 3D

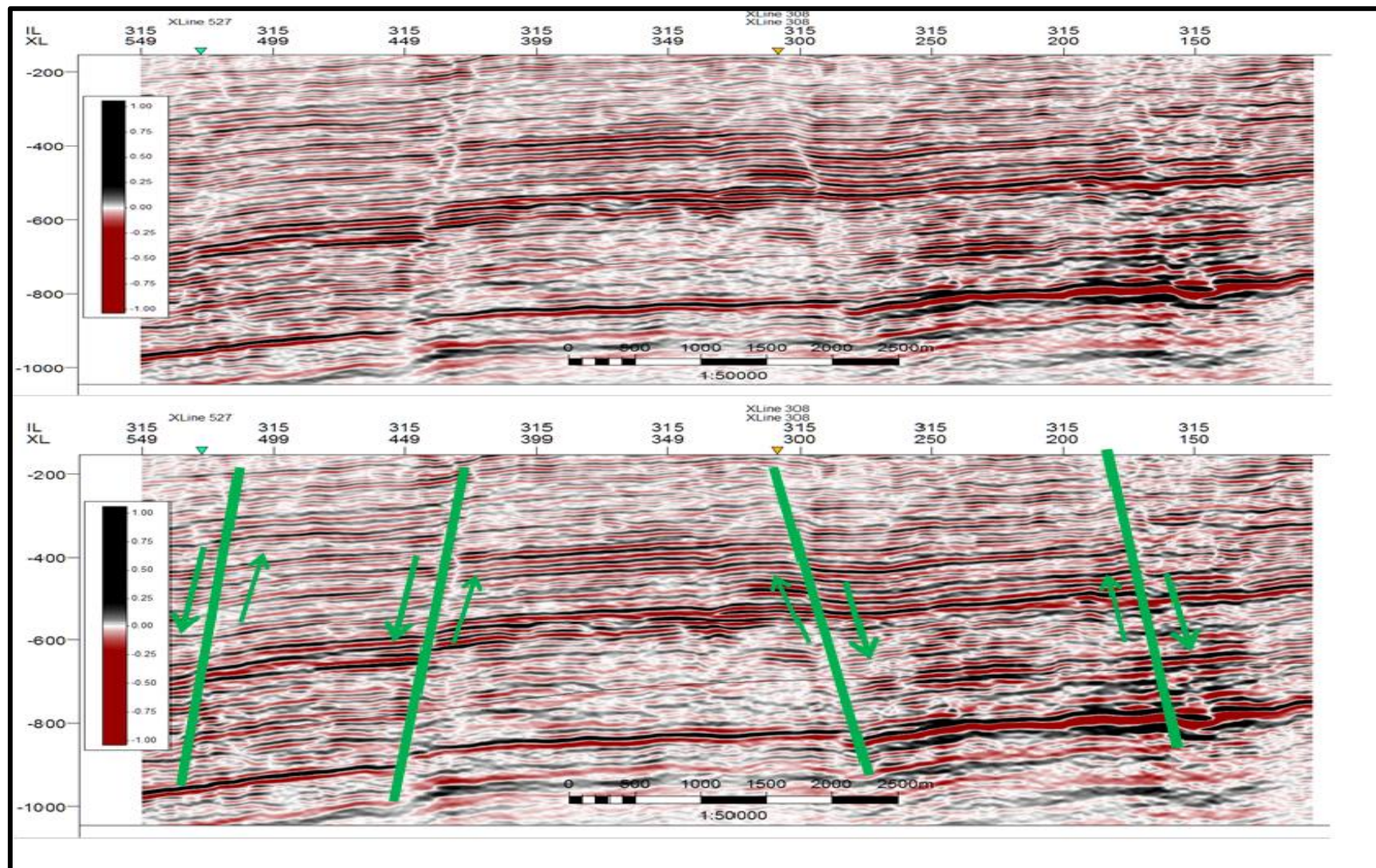


Figura 103. Rasgos estructurales en la IL – 315 con post - procesos

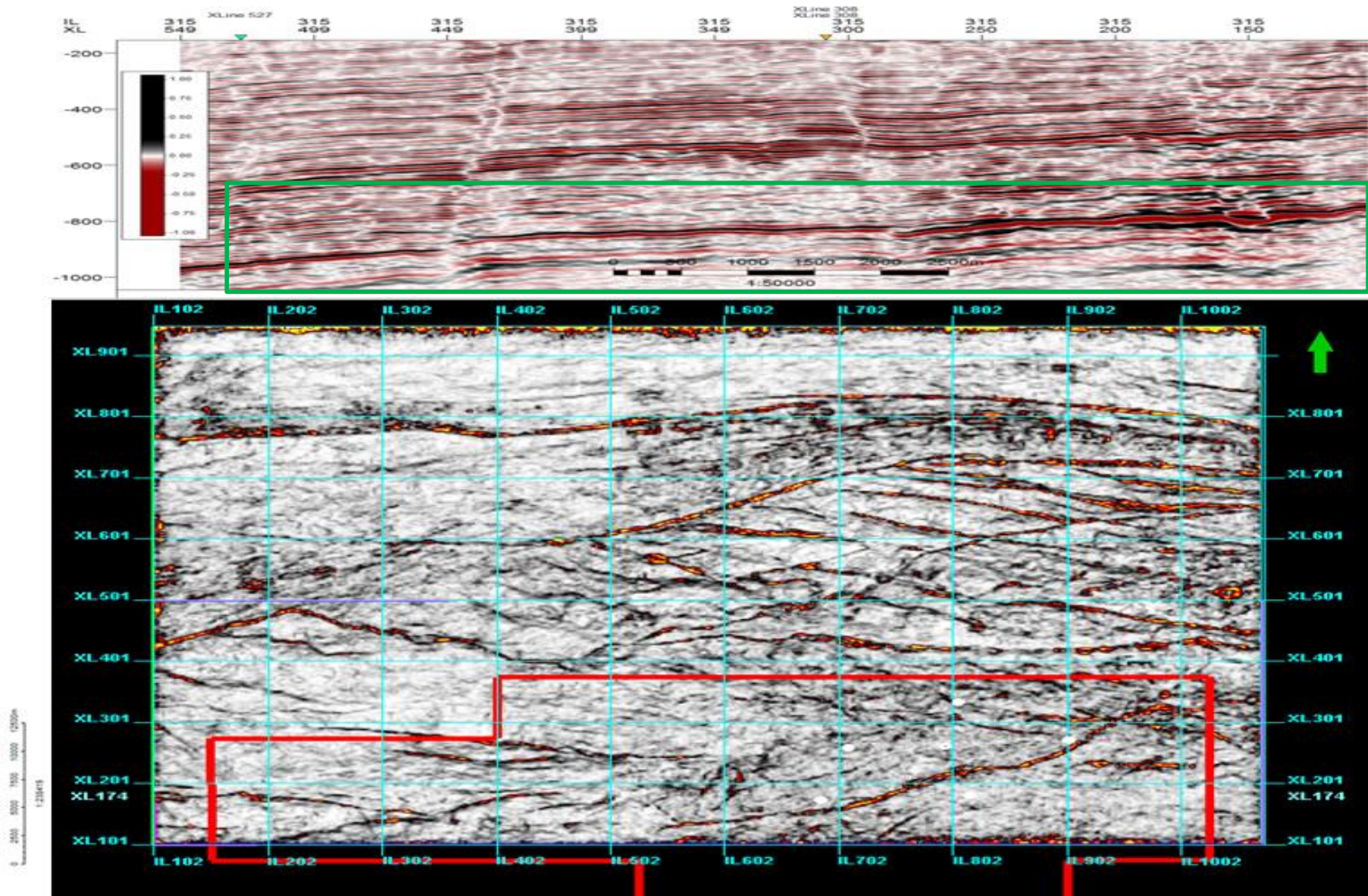


Figura 104. Corte en tiempo (time – slice) a nivel de basamento con atributo de varianza

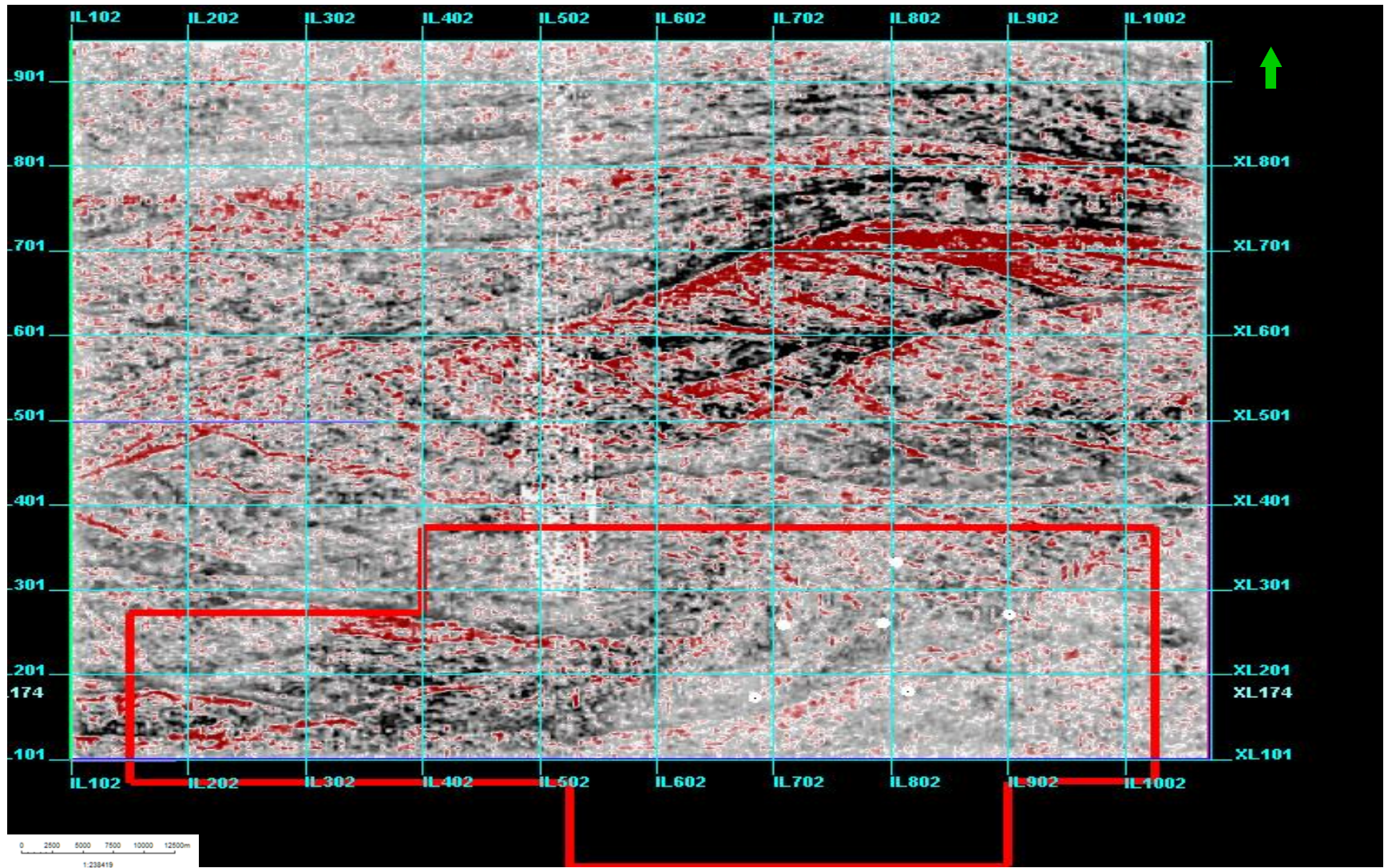
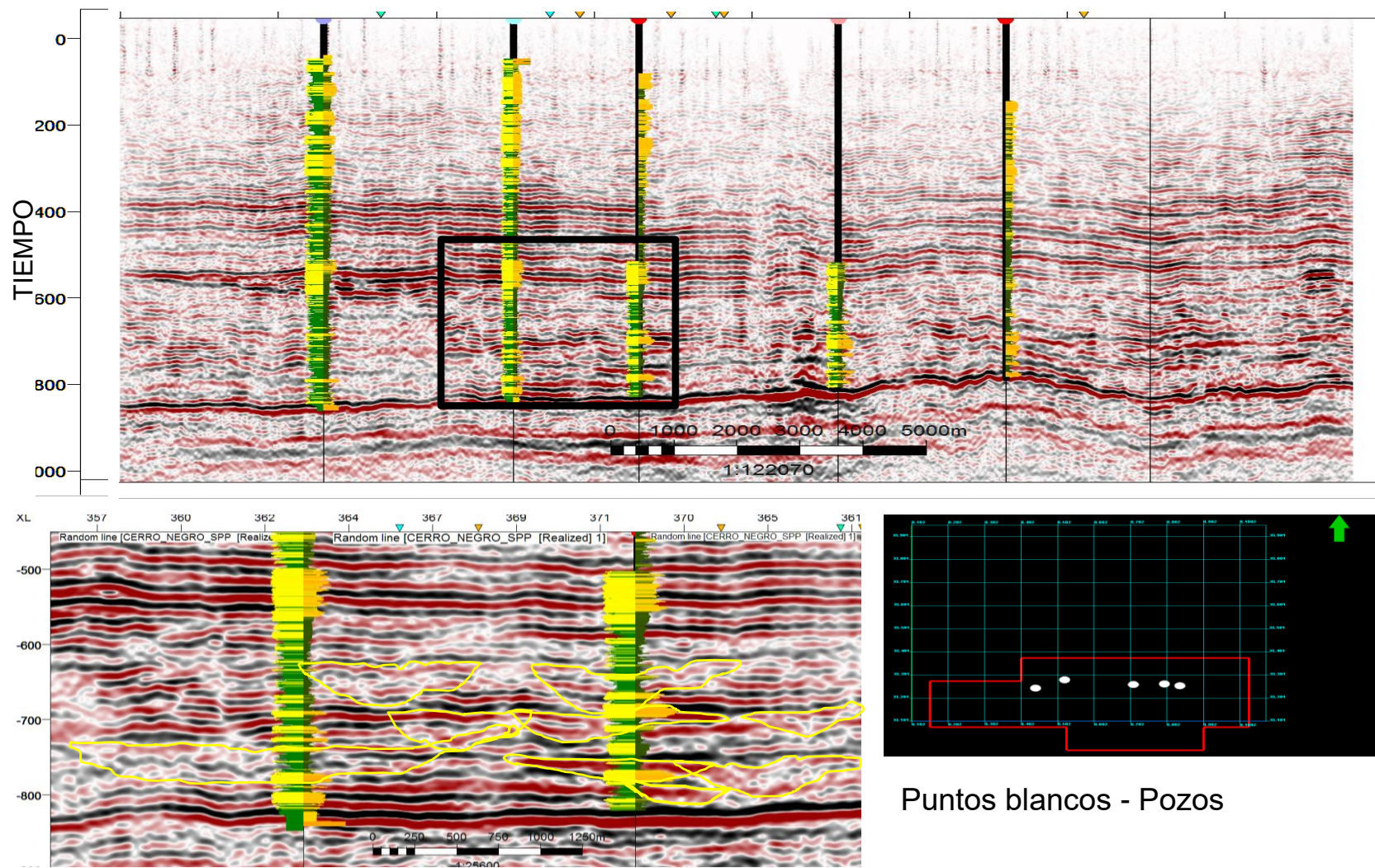


Figura 105. Corte en tiempo (time – slice) a nivel de basamento con atributo de amplitud RMS



Puntos blancos - Pozos

Figura 106. Rasgos estratigráficos en la XL – 270 sin post - procesos

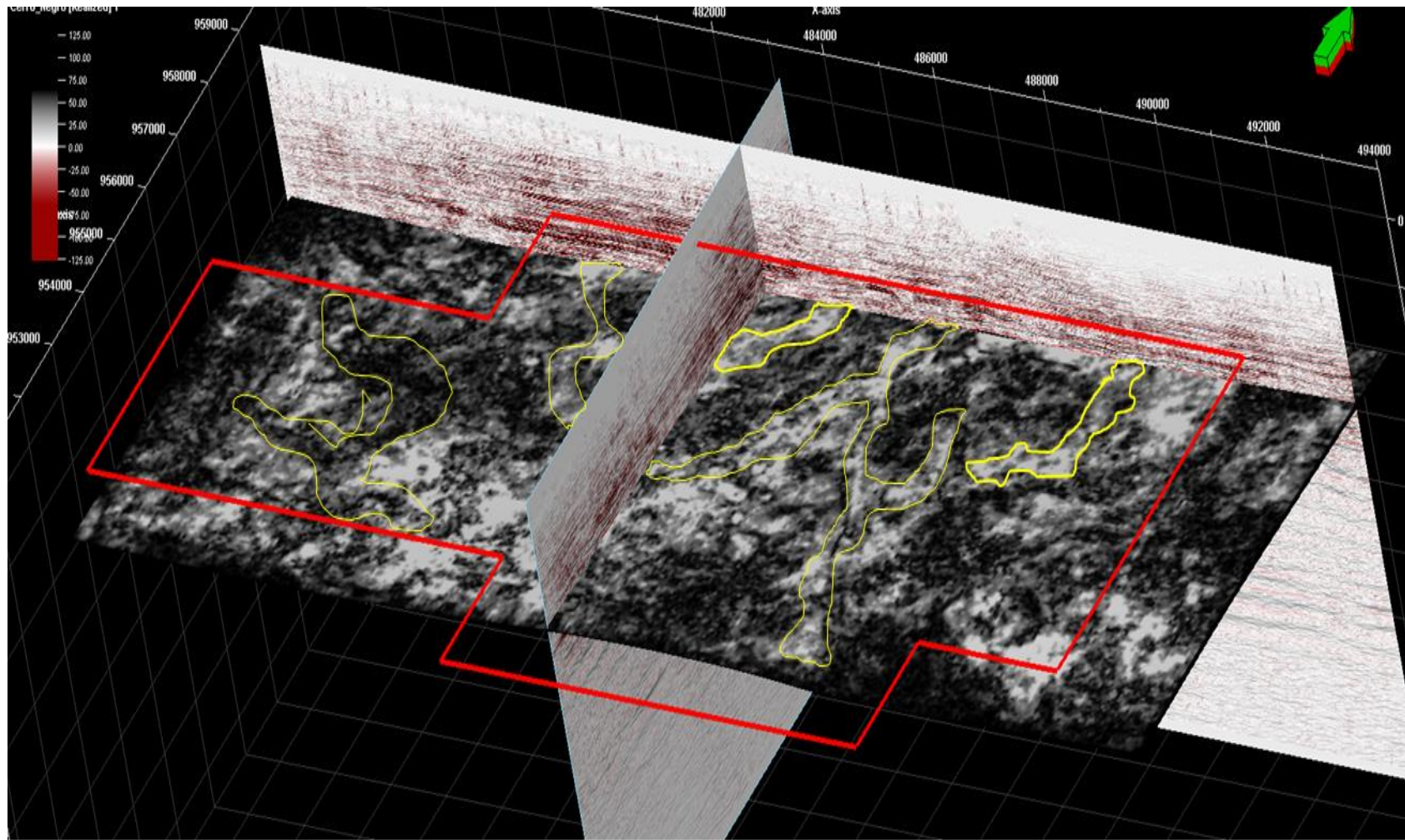


Figura 107. Corte en tiempo (*time – slice*) a los 725 ms con atributo de amplitud RMS

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La construcción de la geometría logró hacer coincidir la información de la posición y elevación de fuentes y receptores almacenada en los archivos SPS (*Shell Processing Support*) con los registros de disparos, para así asociar cada traza a su par fuente – receptor y ubicarla en las coordenadas correctas. Sin embargo, 28 disparos de los 36078 tuvieron que ser removidos debido a que presentaban defectos (ruido en muchos canales, canales muertos, etc).
- Las estáticas de elevación corrigieron el efecto de la superficie topográfica, y las estáticas de refracción eliminaron el efecto de la capa meteorizada, ambas mitigaron dichos efectos sobre los tiempos de llegada.
- Las estáticas residuales consistentes con superficie permitieron corregir los defectos remanentes en los tiempos de llegada a causa de la presencia de la capa meteorizada tomando en cuenta, para dichas correcciones, la influencia del posicionamiento de las fuentes y receptores.
- Las estáticas residuales numéricas no consistentes con superficie establecieron continuidad lateral en los eventos a lo largo de todo el volumen sísmico, estas no tomaron en cuenta el posicionamiento de las fuentes y receptores
- Debido a la limitación del método de inversión lineal generalizada (GLI) para generar el modelo del refractor, se delimitó el rango de offset entre 203 m y 559 m para definir la primera capa del paquete sedimentario asociado a la capa de baja velocidad. Debido a las propiedades anisotrópicas de la capa meteorizada en la FPO y la profundidad somera a la que se encuentra en objetivo geológico, se debe probar con el método de tomografía sísmica para optimizar la certitud en las estáticas y así mejorar la calidad de la imagen. Una

mala estimación de dichas correcciones tendrá un impacto directo en la continuidad de los reflectores.

- El diseño del 3er modelo de velocidades con un incremento de 14 líneas para seleccionar las funciones verticales de velocidad estableció una interpolación más adecuada de dichas funciones en comparación a los dos modelos anteriores para aplicar la corrección NMO. Éste contó con la integración del parámetro ETA para recuperar información de offsets lejanos que contribuyen a un mismo CDP. También se añadieron funciones de velocidades residuales para corregir los defectos remanentes en los reflectores que no pudieron ser horizontalizados con las velocidades seleccionadas previamente.
- El uso de dinamita durante la adquisición de los datos en el año 1996 permitió establecer las características del ruido coherente asociado al cono de ruido, tales como: frecuencias bajas (menores a 25 Hz), amplitudes altas y velocidades no superiores a los 1500 m/s. La particularidad de este filtrado es que se removió el área donde estaba ubicado el cono de ruido, donde fueron diseñado y aplicados los filtros para eliminar dicho comportamiento predominante, y luego fue integrada nuevamente al conjunto de datos. Permitted atenuar el tren de ondas superficiales sin alterar la señal fuera del área seleccionada. Además, el proceso óptimo para atenuar el ruido aleatorio es aplicar un escalamiento de los datos a través de análisis en ventanas de tiempos pequeñas que permitan discernir el ruido respecto a la señal.
- La distribución de la energía no es uniforme en su propagación (vertical y horizontal). Dicha compensación se dividió en dos etapas, la primera es la corrección por divergencia esférica relacionada directamente con la compensación vertical, y la segunda es el balanceo de amplitudes relacionado directamente con la compensación lateral. La corrección por divergencia esférica está vinculado a su espectro de ganancia, una vez definido los parámetros adecuados, dicho espectro debe tener una distribución uniforme ya que la energía al momento de la grabación se concentra en los primeros

milisegundos mientras que en los milisegundos finales se atenúa. En el caso del balanceo de amplitudes, este busca redistribuir la energía lateralmente debido a que hay zonas que poseen mayor cantidad de energía que otras, esto se debe al efecto que produce la superficie topográfica al momento de realizar la grabación. Las zonas donde la topografía es baja, la energía tiende a dispersarse menos que en las zonas donde la topografía es alta. Sin embargo, este proceso debe ser consistente con superficie para tomar el posicionamiento de las fuentes y receptores para balancear las amplitudes de las trazas lo más cercano a la realidad.

- La deconvolución predictiva se encargó de la eliminación de los múltiples al definir una distancia predictiva de 16 ms y una longitud de operador de 120 ms. La deconvolución impulsiva se encargó de recuperar contenido de frecuencia dentro de los datos debido a la acción del subsuelo como filtro.
- La migración de Kirchhoff en el dominio del tiempo se dividió en etapas: después del apilamiento y antes del apilamiento. La migración post – apilamiento sirve como control de calidad de los datos. Sin embargo, ésta no preserva amplitudes ya que el proceso consiste en apilar los datos sin haberlos migrado, eliminando la posibilidad de reconstruir la imagen para que tome en cuenta los cambios estratigráficos del subsuelo. Por otro lado, la migración pre – apilamiento en tiempo permitió mejorar la relación señal – ruido, con ello, se atenuó ruido de baja frecuencia y se pudieron resaltar mejor los reflectores dentro de la sísmica.
- La apertura de migración adecuada para la migración de Kirchhoff fue de 1600 m debido a que ésta pudo reconstruir la imagen en los eventos profundos hasta 1,5 segundos.
- El volumen sísmico reprocesado durante el periodo 2015 – 2016 presenta preservación de amplitudes debido que se llevó control de todos sus procesos a lo largo del mismo a diferencia del reprocesado en el año 2005. Además, se

aplicaron procesos consistentes con superficie con el fin de tomar en cuenta el efecto que produce el posicionamiento de las fuentes y receptores sobre las amplitudes de las trazas. Además, el volumen sísmico reprocesado por WesternGeco presenta un espectro de frecuencia que no posee un comportamiento estable porque que los procesos que aplicaron no buscaron preservar amplitudes sino resaltar eventos sísmicos.

- La aplicación de post – procesos en los datos permiten resaltar estructuras en los datos. Los datos migrados bajo el algoritmo de Kirchhoff de pre – apilamiento en tiempo pueden ser empleados para estudios de inversión sísmica y/o caracterización de yacimiento para optimizar la producción en la industria petrolera ya que éstos resaltan características estratigráficas.
- A través de distintos controles de calidad, los volúmenes sísmicos con post – procesos y sin – post procesos están acordes a los rasgos geológicos (estructurales y estratigráficos) presentes en la zona de estudio. Pudiendo con esto avanzar a las etapas de interpretación sísmica y caracterización de yacimientos.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Albertin, U., J. Kapoor, R. Randall, M. Smith, G. Brown, C. Soufleris, P. Whitfield, F. Dewey, J. Farnsworth, G. Grubitz y M. Kemmer (2002) The time for depth imaging. *Oilfield Review*. 14(1).
- Al-Chalabi, M. (1979) Velocity determination from seismic reflection data. The British Petroleum Company. Londres, Reino Unido.
- Al-Chalabi, M. (1994) Seismic velocities – a critique. *First Break*. 12(12) 589 p.
- Audemar, F.; I. Azpirixaga; P. Baumann; A. Isea y M. Latreille, (1985) Marco geológico del terciario de la faja petrolífera del Orinoco, Venezuela. VI Cong. Geol. Venez., Caracas, 1985, S.V.G., 1: 70-108 p.
- Bancroft, J. C. (2007) A practical understanding of pre- and post-stack migration. *Society of Exploration Geophysicists*. Volume 2. Tulsa, USA.
- Benítez, H. (2012) Evaluación de métodos de migración sísmica antes del apilamiento en profundidad basados tanto en la integral de Kirchhoff como en la ecuación de la onda en datos reales (Proyecto Oro Negro 07G 3D). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Bleistein, N. (1987) On the imaging of reflectors in the Earth. *Geophysics*. 57(2) 931-942 p.
- Bleistein, N., J. Cohen y J. Stockwell (2001) Mathematics of multidimensional seismic, imaging, migration and inversion. *New York: Springer Verlag*.
- Campos, V., A. Daal, A. González, J. Pinzón, H. Chopping De Janvry, G. B. Montes y J. Hernández (1988) Síntesis tectónico – estratigráfica del norte de Anzoátegui – Monagas y su aplicación en la exploración de hidrocarburos. III Simp. Boliv. Exp. Pet. CuencSuband., S.V.G, Caracas.

- Chelotti, L., N. Acosta y M. Foster (2009) Cátedra de Geofísica Aplicada. U.N.P.S.J.B. Chubut, Argentina.
- Claerbout, J. (2009) Basic Earth Imaging (Madagascar version). Stanford University. California, Estados Unidos.
- De la Peña, R. (2002) Evolución tectónica del margen continental oeste de México: Fosa Mesoamericana y Golfo de California. Tesis de doctorado. Instituto de Ciencias del subsuelo Jaume Almera. Barcelona, España.
- Di Croce, J. (1999) Estratigrafía secuencial y evolución estructural de la Cuenca Oriental de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Di Giulio, M. (1999) Análisis de patrones carga – profundidad de la línea experimental Santa Rosa 2D - 99G. Trabajo Especial de Grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.
- Drijkoningen, G. y D. Verschuur (2003) Seismic data processing. Universidad Técnica de Delft. Delft, Países Bajos.
- Farmer, P., D. Miller, A. Pieprzak, J. Rutledge y R. Woods (1996) Exploring the subsalt. *Oilfield review*. 50-64 p.
- Fernández, C. (2005) Secuencia básica de procesamiento de datos sísmicos 2D para una línea del proyecto Río Socopo – Boconó. Trabajo Especial de Grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela
- Gadallah, M. y R. Fisher (2009) Exploration Geophysics. *Springer*. Houston, Texas, USA.
- Gayá, M. (2004) Procesado de sísmica de reflexión superficial en el complejo turbidítico de Ainsa (Huesca). Trabajo Especial de Grado. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España.

- Geiger, H. (2002) Amplitude-preserving weights for Kirchhoff prestack time migration. *Society of Exploration Geophysicists International Exposition*. Salt Lake City. Utah, USA.
- González de Juana, C; Iturralde, J. y Picard, X. (1980) Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Tomo II, Caracas, Ediciones FONINDES.
- González, E. y L. Velásquez (2008) Análisis de métodos de correcciones estáticas por refracción en el levantamiento sísmico Junín 2D, Campo Junín, Faja petrolífera del Orinoco, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Gray, S. H. (1997) True-amplitude seismic migration: A comparison of three approaches. *Geophysics*. 62(1) 929-936 p.
- Gray, S. H. (2001) Seismic imaging. *Geophysics*. 66(1) 15-17p
- Gray, S. H., J. Etgen, J. Dellinger y D. Whitmore (2001) Seismic migration problems and solutions. *Geophysics*. 66(5) 1622-1640 p.
- Hampson, D y B. Russell (1984) First-break interpretation using generalized linear inversion. *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists*. 20(1) 40-54 p.
- Hedberg, H.D; L. C. Sass y H. J. Funkhouser (1947) Oil fields of the greater Oficina area, central Anzoátegui, Venezuela. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 31(12) 1089-2196 p.
- Hedberg, H. D. (1950) Geology of the Eastern Venezuela Basin (Anzoátegui – Monagas – Sucre eastern Guárico portion). *Geol. Soc. Am. Bull.* 61(11) 1137 – 1216 p.
- Isea, A. (1987) Geological synthesis of the Orinoco Oil Belt, eastern Venezuela. *Jour. Petr. Geol.* London, UK. 10(2) 135-147 p.

- Jones, I. F., R. I. Bloor, B. L. Biondi y J. T. Etgen (2008). Prestack depth migration and velocity model building. *Society of Exploration Geophysicists Geophysics Reprint Series No.25*
- Kabbej, A., R. Baina, and B. Duquet, (2007) Aperture optimized two-pass Kirchhoff migration: SEG Technical Program Expanded Abstracts, 26, 2339-2343.
- Key, C. (1977) La formación Oficina en el Campo Lobo. V Cong. Geol. Venez. Caracas. 4(1) 1599 – 1615 p.
- Levin, S. (1989) Surface – consistent deconvolution. *Geophysics*. 54(9)
- Luo, S. y D. Hale (2012) Velocity analysis using weighted semblance. CWP-652. Colorado School of Mines. Golden, Colorado. USA.
- Méndez, O. (1985). Historia geológica graficada de la Cuenca Oriental de Venezuela. VI. Cong. Geol. Venez. S.V.G. 2(1) 1000 – 1040 p.
- Morgan, N. A. (1970) Wavelets maps: A new analysis too for reflection seismograms. *Geophysics*. 35(1) 447-460 p.
- Muller, J.; E. Di Giacomo y A. Van Erve (1985) A Palynological zonation for the cretaceous, tertiary and quaternary of northern South America. *VI Cong. Geol. Venez.*, Caracas 1985, S.V.G., 2: 1041-1079.
- Muller, J., E. Di Giacomo y A. Van Erve (1987) A Palynological zonation for the Cretaceous, Tertiary and Quaternary of northern South America. *Amer. Assoc. of Stratig. Palynologist.*, contribution series (19): 7-71.
- Neidell, N. S. y Taner, M. T., (1971) Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*. 36(1) 482-497 p.
- Newman, P. (1973) Divergence effects in a layered earth. *Geophysics*. 38(1) 481-488 p.

- PDVSA (1983) Evaluación Exploratoria de la Faja Petrolífera del Orinoco. Volumen VI, Área Machete. Informe Interno de la Coordinación de la Faja Petrolífera del Orinoco, PDVSA. Pp. 55-63; 73-95
- PDVSA (2006) Proyecto Orinoco Magna Reserva. CVP.
- Peacock, K. L. y Treitel S. (1969) Predictive deconvolution: Theory and Practice. *Geophysics*. 34(2) 155-169 p.
- Quiroga-Goode, G. y R. Fernandez (1990) Análisis de estática residual en sísmica residual de reflexión desde el punto de vista de teoría inversa. *Geofísica Internacional*. 29(4) 185-209 p.
- Renz, H., Alberding, H., Dallmus, K., Patterson, J., Robie, R., Weisbord, N. y Masvall, J. (1955) *The Eastern Venezuelan Basin*. American Association of Petroleum Geology, Special Publication: Habitat of Oil, 551-600 p.
- Rodríguez, O. (2004) Aplicación y evaluación de métodos de correcciones estáticas de refracción, atenuadores de ruido aleatorio en diferentes dominios y análisis de velocidades sobre el levantamiento “La Concepción 3D” ubicado en la cuenca del Lago de Maracaibo. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Rodríguez, Y. (2012) Procesamiento sísmico de la línea 18 del proyecto Junín 06G 2D. Informe de pasantía. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.
- Salazar, E. (2014) Modelado estructural 3D del Campo Cerro Negro (Bloque Carabobo) Faja Petrolífera del Orinoco, estado Anzoátegui, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela
- Sánchez. K (2014) Determinación de las diferencias entre los modelos de velocidades generados de manera convencional y a partir de análisis de migración por el método de Stolt, en el proyecto Barinas Este 07G 3D. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

- Schuster, G. T. y A. Quintuz Bosz (1993) Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory: *Geophysics*. 58(1) 1314-1323 p.
- Schneider, W. A. (1978) Integral formulation for migration in two and three dimensions. *Geophysics*. 43(1) 49-76 p.
- Shah, P. (1973) Use of wavefront curvature to relate seismic data with subsurface parameters. *Geophysics*. 38(1) 812-825 p.
- Sheriff, R. (1973) Factors affecting amplitudes – A review of physical principles. *Geophys. Soc. Of Houston. Geophys. Prosp.* 23(1) 125 – 138 p.
- Sheriff, R. (2002) Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. *Society of Exploration Geophysicist*. 4th edition. USA.
- Sheriff, R. y Geldart, L. P. (1995) Exploration seismology. Cambridge University Press.
- Sun, J. (1998) On the limited aperture migration in two dimensions. *Geophysics*. 63(1) 984-994 p.
- Sun, J. (2000) Limited-aperture migration. *Geophysics*. 65(2) 583-595 p.
- Talwani, M. (2002) The Orinoco heavy oil belt in Venezuela (Or Heavy Oil to the Rescue?). Houston: Rice University.
- Taner, M. y F. Koehler (1969) Velocity spectra – digital computer derivations and applications of velocity functions. *Geophysics*. 34(1) 859-881 p.
- Taner, M. T., F. Koehler y Alhilali K. A. (1974) Surface consistent reflection amplitudes. 44th *Annual International SEG Meeting*.
- Taner, M. T. y F. Koehler (1974) Surface consistent reflection amplitudes. 44th *Annual International SEG Meeting*. Dallas, Texas.
- Taner, M. y F. Koehler (1981) Surface consistent corrections. *Geophysics*. 46(1) 17-22 p.

- Toloza, A. (2014) Efecto de la apertura de migración de Kirchhoff en la calidad de la imagen en datos sísmicos 3D marino del Golfo de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Vásquez, J. (2010) Análisis de diferentes algoritmos de migración post-apilamiento sobre los datos sísmicos bidimensionales al oeste del estado Barinas. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Vila, C. (2005) Simulación de Zonas de Fresnel para Enlaces de Microondas Terrestres. Trabajo Especial de Grado. Universidad de las Américas Puebla. Cholula, Puebla, México.
- Velásquez, L. (2008) Análisis de métodos de corrección de estáticas por refracción en el levantamiento sísmico Junín 2D, CAMPO Junín, faja petrolífera del Orinoco, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Yarygin, A. P. (1979) Methods of stationary phase for stationary “saddle” points in problems of diffractions of waves in an inhomogeneous medium: Radio Engineer. Electron. Phys. 15(1) 1582-1588 p.
- Yilmaz, O. (2001) Seismic data analysis. *Society of Exploration Geophysicists*, Oklahoma.
- Yoris, F. y M. Ostos (1997) Geología de Venezuela: Geología general y cuencas petrolíferas. WEC Venezuela – Evaluación de pozos. 1era ed. Texas: Schlumberger – Surencó C.A.