



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Reprocesamiento sísmico de
reflexión de las líneas
sísmicas 2D adquiridas en la
Ciudad de México en 1986**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Arturo Cuevas Muñoz

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Fernando Gómez Santiago



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**
(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado REPROCESAMIENTO SISMICO DE REFLEXION DE LAS LINEAS SISMICAS 2D ADQUIRIDAS EN LA CIUDAD DE MEXICO EN 1986 que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ARTURO CUEVAS MUÑOZ
Número de cuenta: 315033946

Dedicatoria

A mis padres Patricia y Arturo, quienes siguieron a pesar de la adversidad; con su amor y enseñanzas incentivaron mi creatividad, curiosidad y me apoyaron para llegar hasta aquí.

A mis abuelos Rogelio y Eva (†), quienes, a su manera, procuraron mis estudios.

A mis tíos Guillermo y Cynthia, por recibirme en su hogar para poder estudiar y las lecciones que me dieron en ese tiempo.

A mis hermanos Rodrigo y Sebastian, sus constantes preguntas me ayudaron a seguir.

A mis amigos Monserrat, Gaby y César, su compañía, risas y apoyo hicieron de la universidad una grata experiencia.

A mi pareja Andrea, por su guía, apoyo y amor a lo largo de la universidad y este trabajo.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a mi H. Facultad de Ingeniería por el privilegio de ser parte.

A mi asesor M.C. Fernando Gómez Santiago, quien me mostró un sector de la geofísica y confió en mis capacidades para realizar el proyecto.

A los sinodales Dr. Martín Cardenas, Ing. Mauricio Buendía, M.C. David Escobedo e Ing. Thalía A. Reyes por el tiempo que dedicaron a la lectura, consejos y corrección del trabajo que ayudó a su mejora, así como su paciencia en el proceso.

A la empresa GGRverse S.A. de C.V. por su patrocinio al proyecto.

A la Ing. Griselda Cureño e Ing. Andrea Gallegos por su asesoría en el proyecto, aclaración de dudas y apoyo en el análisis de velocidades.

A la Comisión Nacional de Hidrocarburos por proporcionar los datos necesarios para realizar el trabajo.

CRÉDITOS DE LA INFORMACIÓN PETROLERA PROPORCIONADA POR EL CNIH A LA UNAM.

“Esta tesis utilizó información petrolera proporcionada por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, de acuerdo al anexo C de la licencia de uso de la información a favor de la UNAM, de fecha 11 de diciembre de 2017, bajo la nomenclatura CNIH-C-00417. Dicha información es propiedad de la Nación y su acopio, resguardo, uso administración y actualización, así como de publicación de la misma corresponde a la Comisión Nacional de Hidrocarburos.”

Resumen

Debido a la actividad sísmica del siglo XX y a las afectaciones en la Ciudad de México debido al sismo del 19 de septiembre de 1985, se hizo visible la necesidad de comprender el contexto estructural debajo de la metrópoli. Es así que, en 1986 se realizaron levantamientos de 30 líneas sísmicas de reflexión 2D, se obtuvieron 30 secciones sísmicas presentadas con una interpretación estructural por Pérez Cruz, 1988.

Actualmente existe equipo de cómputo y nuevas metodologías para el procesamiento de datos sísmicos de reflexión que superan en tiempo de ejecución, mejorar los costos y proveen oportunidad de enriquecer los resultados obtenidos. Es por lo anterior que en este trabajo se realizó un reprocesamiento de los datos sísmicos bajo los estándares y herramientas actuales.

En el desarrollo de este proyecto se incluyen conceptos teóricos básicos de la sísmica de reflexión tales como el principio de Huygens, Fermat y la ley de Snell, así como el método sísmico de reflexión con el fin de comprender la secuencia de procesamiento en datos sísmicos crudos, en cuanto a la misma, se hace mención del funcionamiento de cada etapa y su aplicación a los datos empleados.

La secuencia de procesamiento se realizó para obtener una migración preapilamiento en tiempo (*PSTM*) con el algoritmo Kirchhoff. El flujo de procesamiento constó de; reformato, edición, construcción de geometría, recuperación de amplitudes, análisis de velocidad, atenuación de ruido aleatorio, deconvolución, estáticas residuales, migración y postproceso.

Además, los controles de calidad en cada etapa de la secuencia de procesamiento, mostrados en este trabajo, fueron supervisados por un geofísico senior en procesamiento sísmico en las instalaciones de GGRverse S.A. de C.V., empleando un software comercial de la industria sísmica.

Finalmente, se obtuvieron 30 líneas de sísmica de reflexión 2D *PSTM*, las cuales cumplieron con los controles de calidad de la compañía GGRverse S.A. de C.V., esto validó la secuencia propuesta en este trabajo. Asimismo, los resultados generados pueden ser de utilidad para futuros trabajos.

Abstract

Due to the seismic activity of the twentieth century and the effects in Mexico City by the earthquake of September 19, 1985, the need to understand the structural context underneath the metropolis became visible. Thus, in 1986, 30 seismic lines of 2D reflection were surveyed and 30 seismic sections were obtained, presented with a structural interpretation by Pérez Cruz, 1988.

Currently there are computer equipment and new methodologies for the processing of seismic reflection data that overcome in execution time, improve costs and provide the opportunity to improve the results obtained. It is for this reason that in this work a reprocessing of seismic data under current standards and tools was performed.

In the development of this project, basic theoretical concepts of reflection seismic such as Huygens' principle, Fermat and Snell's law are included, as well as the reflection seismic method in order to understand the processing sequence in raw seismic data, as for the same, mention is made of the operation of each stage and its application to the data used.

The processing sequence was performed to obtain a prestack time migration (*PSTM*) with the Kirchhoff algorithm. The processing flow consisted of; reformatting, editing, geometry construction, amplitude recovery, velocity analysis, random noise attenuation, deconvolution, residual statics, migration and post-processing.

In addition, the quality controls at each stage of the processing sequence, shown in this work, were supervised by a senior geophysicist in seismic processing at GGRverse S.A. de C.V. facilities, using a commercial software of the seismic industry.

Finally, 30 2D reflection seismic lines were obtained *PSTM*, which complied with the quality controls of the company GGRverse S.A. de C.V., this validated the sequence proposed in this work. Also, the results generated may be useful for future work.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
2. Consideraciones teóricas	3
2.1. Tipos de ondas sísmicas	3
2.2. Ley de Snell	4
2.3. Ángulo crítico	5
2.4. Principio de Fermat	5
2.5. Principio de Huygens	7
2.6. Modelo convolucional	8
2.7. Sísmica de reflexión	9
2.8. Sismograma sintético	11
2.8.1. Modelo inicial	11
2.8.2. Fuente sintética	12
2.8.3. Parámetros de adquisición	13
3. Descripción de los datos sísmicos a procesar	15
3.1. Sistema de adquisición	15
3.2. Distribución geográfica de las líneas 2D	15
4. Procesamiento de datos sísmicos	21
4.1. Flujo de procesamiento	21
4.2. Secuencia de procesamiento	22
4.2.1. Reformateo	24
4.2.2. Edición	25
4.2.3. Geometría	25
4.2.4. Recuperación de amplitudes	32
4.2.5. Análisis de velocidades I	35
4.2.6. Atenuación de ruido (AMPNA)	47
4.2.7. Deconvolución	49
4.2.8. Análisis de velocidades II	56
4.2.9. Estáticas residuales (RS)	57
4.2.10. Migración PreSTM	60
4.2.11. Análisis de velocidades de migración	65
4.2.12. Migración PreSTM II	66
4.2.13. Migración PSTM final	67
4.2.14. Post-proceso	68

5. Resultados	73
5.0.1. Línea 1	77
5.0.2. Línea 2	78
5.0.3. Línea 3	79
5.0.4. Línea 4	80
5.0.5. Línea 5	81
5.0.6. Línea 6	82
5.0.7. Línea 61	83
5.0.8. Línea 62	84
5.0.9. Línea 7	85
5.0.10. Línea 71	86
5.0.11. Línea 8	87
5.0.12. Línea 9	88
5.0.13. Línea 91	89
5.0.14. Línea 10	90
5.0.15. Línea 11	91
5.0.16. Línea 12	92
5.0.17. Línea 13	93
5.0.18. Línea 14	94
5.0.19. Línea 15	95
5.0.20. Línea 16	96
5.0.21. Línea 17	97
5.0.22. Línea 18	98
5.0.23. Línea 19	99
5.0.24. Línea 20	100
5.0.25. Línea 21	101
5.0.26. Línea 22	102
5.0.27. Línea 24	103
5.0.28. Línea 26	104
5.0.29. Línea 28	105
5.0.30. Línea 30	106
6. Conclusiones y recomendaciones	107

Índice de figuras

2.1.	<i>Propagación de ondas P y S. Tomado de Stein y Wysession, 2003</i>	3
2.2.	<i>Ley de Snell para ondas planas. Tomado de Stein y Wysession, 2003</i>	4
2.3.	<i>Ángulo crítico para onda P. Tomado de Stein y Wysession, 2003</i>	5
2.4.	<i>Principio de Fermat. Tomado de Stein y Wysession, 2003</i>	6
2.5.	<i>Trayectoria de rayo. Tomado de Stein y Wysession, 2003</i>	6
2.6.	<i>Principio de Huygens. Tomado de Shearer, 2009</i>	7
2.7.	Modelo convolucional. Donde (a) representa la función temporal de la fuente $s(t)$ generada por una pistola de aire en un experimento marino, seguida de una serie de burbujas causadas por la reverberación de la presión del agua. (b) es el ejemplo ideal de la función respuesta de la Tierra $g(t)$, y (c) es el resultado de la convolución (a) con (b). Tomado de Shearer, 2009	9
2.8.	<i>Shot gather (a), punto medio común (b), recuperado de Mousa, 2020</i>	10
2.9.	<i>Adquisición CMP tomada de Mousa, 2020</i>	11
2.10.	<i>Perfil de velocidades. Tomada de Suarez Serrano, 2009</i>	12
2.11.	<i>Perfil de densidad. Tomada de Suarez Serrano, 2009</i>	12
2.12.	Modelo de fuente con ondas acústicas. Tomada de Suarez Serrano, 2009	13
2.13.	<i>Shot Gather. Tomada de Suarez Serrano, 2009</i>	14
3.1.	<i>Localización de las 26 líneas 2D</i>	16
4.1.	<i>volumen sísmico, tomado de Yilmaz, 2001</i>	21
4.2.	<i>Flujo de procesamiento sísmico Ciudad de México</i>	23
4.3.	<i>Estructura y evolución de SEG-Y, recuperado de https://wiki.seg.org/w/images/9/9b/SEG-Y_bytestream_all_revisions_.png</i>	25
4.4.	<i>Reporte de observador para línea 2, sección 1</i>	26
4.5.	<i>Reporte de observador para línea 2, sección 2</i>	27
4.6.	<i>Registro de elevaciones y coordenadas de campo</i>	28
4.7.	<i>Tarjetas de FORTRAN del primer procesamiento</i>	29
4.8.	<i>Estructura de los datos recibidos (Punto Vibrado)</i>	30
4.9.	<i>Tiro antes y después de la asignación de geometría, recuperado de (Vázquez Ramírez, 2020)</i>	31
4.10.	QC stack de los datos sísmicos con Geometría para la línea 2	32
4.11.	<i>Divergencia esférica vista como la propagación de el rayo con desde una fuente, recuperada de Mousa, 2020</i>	33
4.12.	<i>Corrección de ganancia automática, tomada de Mousa, 2020</i>	34
4.13.	Curvas de decaimiento de amplitud, recuperadas de Cureño López, 2009	35
4.14.	Geometría del NMO para un reflector simple, tomada de Yilmaz, 2001	36
4.15.	Corrección de NMO, (a) antes (b) después de la corrección por NMO de la ecuación 4.7, recuperada de Yilmaz, 2001	37

4.16. Corrección de NMO, (a) CMP gather con un reflector simple con velocidad de desplazamiento de 2264 m/s, (b) Corrección NMO con la velocidad de desplazamiento, (c) Sobrecorrección por una velocidad baja de 2000 m/s, (d) Subcorrección por una velocidad alta 2500 m/s, recuperada de Yilmaz, 2001	37
4.17. Una señal (a) con un periodo T es estirada hacia la señal (b) con un periodo $T_0 > T$ después de la corrección NMO, recuperada de Yilmaz, 2001	38
4.18. Aplicación de mute. (a) gather, (b) corrección NMO con función RMS, (c) después de la aplicación de mute utilizando límites de estiramiento de 50 % y (d) después de la aplicación de mute utilizando límites de estiramiento de 100 %, recuperada de Yilmaz, 2001	39
4.19. Transformación de un gather CMP sintético de offset al dominio de velocidad, cada traza en (b) es un apilado de las trazas CMP gather (a) aplicando una velocidad constante para corrección NMO, recuperada de Yilmaz, 2001	40
4.20. Corrección NMO a velocidad constante aplicado a un mismo CMP gather (b), con un rango de velocidades 1500-4500 m/s. Seleccionado de los eventos más horizontales se seleccionaron las velocidades y se aplicó el NMO obteniendo (a), recuperada de Yilmaz, 2001	42
4.21. CVS de 24 CMP gathers usando un rango de velocidades de 1500-4400 m/s, recuperada de Yilmaz, 2001	43
4.22. Apilados de 100 CMP gathers usando siete velocidades las cuales son un porcentaje de la función central, recuperada de Yilmaz, 2001	44
4.23. Campo de velocidades promedio, recuperado de Vázquez Ramírez, 2020	45
4.24. Ejemplo de picado de velocidades con semblanza, velocidades RMS, gather y apilados a velocidad constante, recuperado de Vázquez Ramírez, 2020	46
4.25. QC stack primer picado de velocidades para la línea 2	47
4.26. QC stack atenuación de amplitud para ruido aleatorio para la línea 2	49
4.27. Flujo de proceso del filtro inverso, recuperado de Yilmaz, 2001	54
4.28. QC stack deconvolución para la línea 2	56
4.29. QC stack segundo picado de velocidades para la línea 2	57
4.30. Modelo de estáticas consistente con la superficie, T =topografía, B =base de la capa meteorizada, D =datum de referencia, R =reflector profundo, j = índice de fuente, i = índice de receptor, k =punto medio, x_{ij} es el espaciado fuente receptor. recuperado de Yilmaz, 2001	58
4.31. QC stack estáticas residuales para la línea 2	60
4.32. Comparativa entre evento migrado (derecha) y no migrado (izquierda), recuperada de Yilmaz, 2001	61
4.33. Reflectores con curvatura antes (a) y después de migrar (b), recuperado de Yilmaz, 2001	62
4.34. Modelo del muelle	63
4.35. Principio de migración	63

4.36. apertura espacial (a) e inclinación "dip"(b) para la migración Kirchhoff, recuperado de Liu y Bancroft, 2002	64
4.37. QC stack migración para la línea 2	65
4.38. QC generado con migración y velocidades de vmig para la línea 2	66
4.39. QC stack migración con velocidades de migración para la línea 2	67
4.40. QC stack migración con velocidades RMO para la línea 2	68
4.41. QC stack Balanceo espectral para la línea 2	69
4.42. QC stack Coherencia con la superficie para la línea 2	70
4.43. QC stack final filtro variante en tiempo para la línea 2 (sección sísmica final)	71
5.1. Sección sísmica final vs sección sísmica de referencia	74
5.2. Volumen 3D con las 30 secciones sísmicas obtenidas en el presente trabajo	76
5.3. Sección sísmica final para la línea 1	77
5.4. Sección sísmica final para la línea 2	78
5.5. Sección sísmica final para la línea 3	79
5.6. Sección sísmica final para la línea 4	80
5.7. Sección sísmica final para la línea 5	81
5.8. Sección sísmica final para la línea 6	82
5.9. Sección sísmica final para la línea 61	83
5.10. Sección sísmica final para la línea 62	84
5.11. Sección sísmica final para la línea 7	85
5.12. Sección sísmica final para la línea 71	86
5.13. Sección sísmica final para la línea 8	87
5.14. Sección sísmica final para la línea 9	88
5.15. Sección sísmica final para la línea 91	89
5.16. Sección sísmica final para la línea 10	90
5.17. Sección sísmica final para la línea 11	91
5.18. Sección sísmica final para la línea 12	92
5.19. Sección sísmica final para la línea 13	93
5.20. Sección sísmica final para la línea 14	94
5.21. Sección sísmica final para la línea 15	95
5.22. Sección sísmica final para la línea 16	96
5.23. Sección sísmica final para la línea 17	97
5.24. Sección sísmica final para la línea 18	98
5.25. Sección sísmica final para la línea 19	99
5.26. Sección sísmica final para la línea 20	100
5.27. Sección sísmica final para la línea 21	101
5.28. Sección sísmica final para la línea 22	102
5.29. Sección sísmica final para la línea 24	103
5.30. Sección sísmica final para la línea 26	104
5.31. Sección sísmica final para la línea 28	105
5.32. Sección sísmica final para la línea 30	106

Índice de tablas

4.1.	Aplicación del filtro inverso truncado $(1, \frac{1}{2})$, con la ondícula de entrada $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$ y salida deseada $(1, 0, 0)$, recuperado de Yilmaz, 2001	51
4.2.	Convolución del filtro (a, b) con $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$, recuperado de Yilmaz, 2001	52
4.3.	Autocorrelación de la ondícula de entrada $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$, recuperado de Yilmaz, 2001	54
4.4.	Croscorrelación de la salida deseada $(1, 0, 0)$ con la ondícula de entrada $(1, -\frac{1}{2})$, recuperado de Yilmaz, 2001	54
4.5.	Parámetros migración Kirchhoff	64
4.6.	Filtro variante en tiempo	71

1 Introducción

El procesamiento de datos geofísicos es una labor esencial debido a que ésta permite una correcta interpretación de los datos registrados y así solventar una propuesta de interés económico o de investigación principalmente.

En el ámbito de la sismica de reflexión, el procesamiento tiene su origen y desarrollo en la industria petrolera, la cual busca evaluar y desarrollar prospectos de exploración y explotación de recursos naturales, más no se limita a ello. La necesidad de mejorar los resultados previamente obtenidos, probar otros métodos, o incluso cambiar el objetivo del procesamiento, da pauta al reprocesamiento de datos, crudos o procesados.

A partir del sismo del 19 de septiembre del año de 1985, el cual causó una innumerable cantidad de daños económicos, estructurales, pero sobre todo a nivel humano en la Ciudad de México, se realizaron estudios geológicos y geofísicos en los años 1986-1987 por parte de la Comisión Federal de Electricidad y Petróleos Mexicanos en el Valle de México con el objetivo de conocer la estructura del subsuelo.

Derivado de los trabajos de prospección sísmica, Pérez Cruz propuso un modelo geológico de la Ciudad de México tras la interpretación de las secciones adquiridas (Pérez Cruz, 1988). Numerosos trabajos se han realizado a partir de las secciones antes mencionadas, entre ellos la construcción y correlación de columnas geológicas de pozos profundos y el análisis del acuitardo presente en la Ciudad. Unda López utiliza las secciones para rectificar los horizontes y continuidad de las unidades estratigráficas (Unda López, 2016), mientras que Luna Izazaga define fallas geológicas, establece la continuidad y el espesor del acuitardo (Luna Izazaga, 2014). Esto nos permite vislumbrar que las aplicaciones de estos datos no se limitan al motivo de su adquisición y son valiosos para futuros trabajos.

Con el fin de realizar esta tesis la empresa mexicana GGRverse S.A de C.V otorgó un patrocinio que consistió en espacio, máquinas y software comercial de procesamiento, así como asesoría técnica de distintos ingenieros e ingenieras del área con nivel senior. Teniendo dicho apoyo y mediante la UNAM y la Facultad de Ingeniería, se solicitaron a la CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos) los datos crudos de las 30 líneas adquiridas con el propósito de reprocesar los datos sísmicos y de soporte adquiridos mediante una secuencia de trabajo controlada y supervisada.

En el transcurso del escrito, se presentan los principios básicos teóricos de la sismica de reflexión, que permiten la comprensión de la adquisición de los datos y sus atributo, así como la secuencia de reprocesamiento, donde se detalla la parte teórica de cada etapa; inicia desde el reformateo de los datos, hasta la migración preapilamiento en tiempo con el algoritmo Kirchhoff, el cual es un algoritmo poderoso ya que genera

un adecuado posicionamiento de los reflectores ante estructuras complejas y cambios laterales de velocidad, para terminar la secuencia con un posproceso. De esta forma el trabajo aporta una robusta secuencia de procesamiento, así como las secciones y sus datos digitales para las 30 líneas 2D antes mencionadas.

1.1. Objetivos

Los objetivos de este proyecto se presentan a continuación.

- Diseñar y ejecutar una secuencia sísmica de reprocesamiento pre-apilamiento en tiempo (*PSTM*) 2D terrestre con controles de calidad (*QC*).
- Obtener las secciones sísmicas *PSTM* y secciones de isovelocidades RMS en tiempo para las 30 líneas 2D.
- Generar datos de utilidad para futuros trabajos de procesamiento, interpretación sísmica o actualización de un modelo geológico del subsuelo de la Ciudad de México.

2 Consideraciones teóricas

2.1. Tipos de ondas sísmicas

Las ondas son la representación física de la propagación de energía. Las ondas sísmicas son propagadas mediante una fuente, transmitidas por uno o varios medios y registradas por uno o varios receptores. Existen dos tipos particulares de ondas sísmicas: ondas compresionales y de corte, también conocidas como ondas P y ondas S respectivamente.

Son denominadas ondas P a aquellas propagaciones de energía con velocidad superior al resto de las ondas, su forma de transmisión es compresional y paralela al sentido de propagación, figura 2.1. Se propagan en cualquier medio y se atenúa gradualmente conforme pasa el tiempo.

Por otro lado, las ondas S son más lentas en cuanto a la propagación de la onda P. Su forma de transmisión es de cizalla, perpendicular al sentido de propagación, comparable con el movimiento de serpiente. Requiere de un medio de propagación sólido y la amplitud se ve incrementada en un lapso de tiempo corto para después atenuarse.

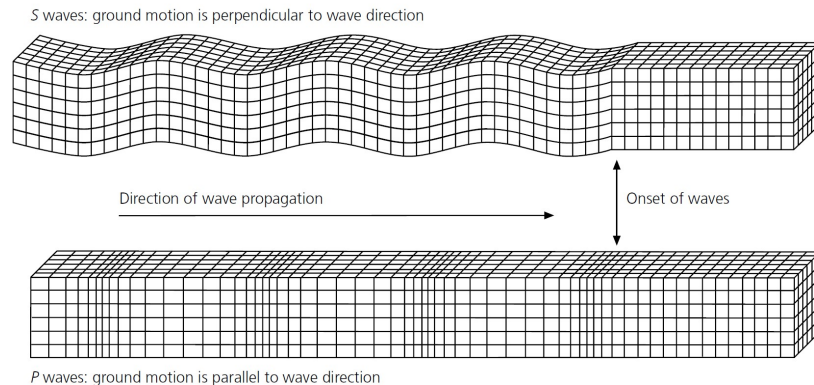


Figura 2.1: *Propagación de ondas P y S. Tomado de Stein y Wysession, 2003*

Algunas propiedades a estudiar de las ondas sísmicas son: fase, frecuencia, amplitud y polaridad. A pesar de que existen otros tipos de ondas, como las ondas Love o Rayleigh en este trabajo nos centraremos en las ondas de cuerpo P.

2.2. Ley de Snell

Para entender la ley de Snell es necesario comprender que es posible representar el comportamiento de una onda sísmica mediante dos elementos importantes: por su frente y su vector de onda, el cual es perpendicular al frente de onda e indica la dirección de propagación. Para el caso de una onda plana podemos representar las variaciones del vector de onda como un rayo, en donde las trayectorias de rayo sufren cambios al cruzar cualquier interfaz debido a el cambio de velocidades sísmicas entre el medio de la capa superior e inferior de la misma interfaz o viceversa.

La ley de Snell para onda plana nos relaciona los cambios de la trayectoria del rayo mediante el ángulo de incidencia con su ángulo de refracción, además, nos permite relacionar las velocidades de onda P y S, mediante sus ángulos de incidencia como se muestra en la ecuación 2.1, la cual tiene una restricción: la velocidad de la capa superior debe ser menor a la inferior.

$$c_x = \frac{\alpha_1}{\sin i_1} = \frac{\beta_1}{\sin j_1} = \frac{\alpha_2}{\sin i_2} = \frac{\beta_2}{\sin j_2} \quad (2.1)$$

donde

c_x es la velocidad aparente la cual tiene una velocidad igual o mayor a la del medio
 α_1 y α_2 son la velocidad de onda P del medio 1 y 2 respectivamente
 β_1 y β_2 son la velocidad de onda S del medio 1 y 2 respectivamente
 i_1, j_1 el ángulo de la onda P incidente y SV reflejada
 i_2 y j_2 el ángulo de onda P y SV refractadas.

Lo anterior se aprecia en la figura 2.2

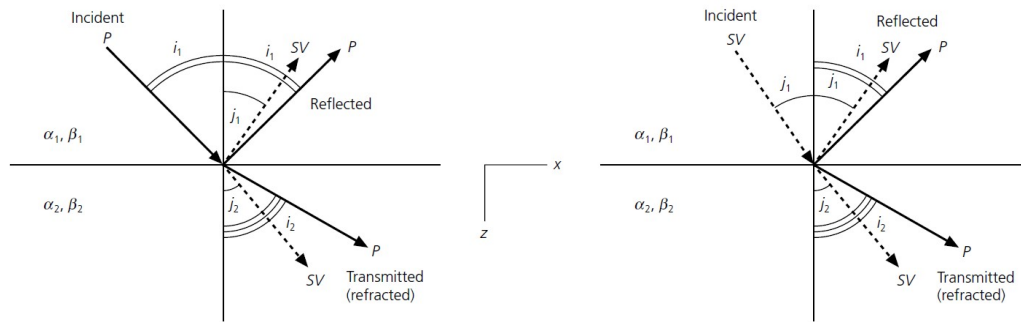


Figura 2.2: Ley de Snell para ondas planas. Tomado de Stein y Wysession, 2003

2.3. Ángulo crítico

De la ecuación 2.1 y tomando solo lo referente a la onda P, del ángulo del rayo refractado con relación al ángulo de incidencia, obtenemos la siguiente ecuación 2.2.

$$\sin i_2 = \sin i_1 (\alpha_2 / \alpha_1) \quad (2.2)$$

Al observar la figura 2.3 para una onda P con velocidad $\alpha_2 > \alpha_1$ podemos notar lo siguiente: al incrementar el ángulo de incidencia i_1 , la cercanía del rayo refractado a la interfaz horizontal es mayor. Cuando el ángulo i_1 hace que el ángulo i_2 sea igual a 90 grados, es decir que viaje sobre la interfaz, se denomina ángulo crítico i_c . Sustituyendo lo anterior en la ecuación 2.2 llegamos a la ecuación 2.3, la cual nos sirve para determinar el ángulo crítico apartir de las velocidades de onda P en dos medios.

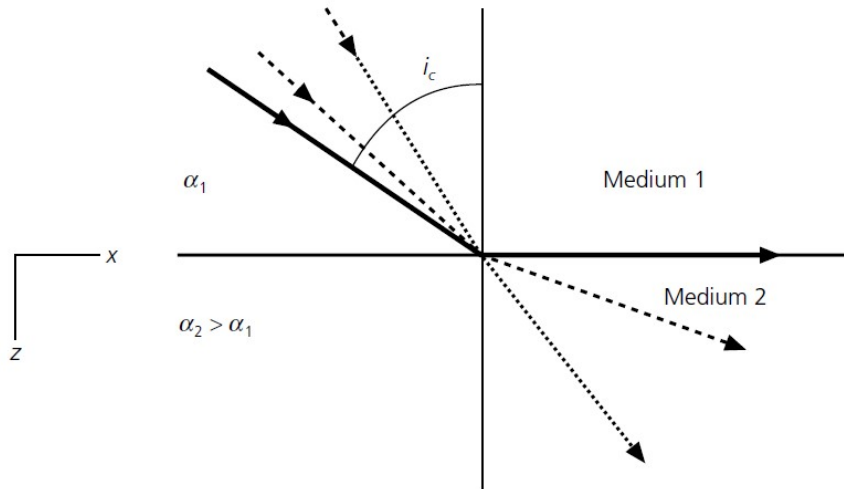


Figura 2.3: Ángulo crítico para onda P. Tomado de Stein y Wysession, 2003

$$\sin i_c (\alpha_2 / \alpha_1) = 1 \text{ ó } \sin i_c = (\alpha_1 / \alpha_2) \quad (2.3)$$

2.4. Principio de Fermat

El principio de Fermat enuncia que la trayectoria de rayo optima entre dos puntos, es aquella para la cual el tiempo de viaje es un mínimo con respecto a las demás posibles trayectorias (Stein & Wysession, 2003). Lo anterior lo podemos representar con la figura 2.4, donde al tener dos puntos en un semiespacio homogéneo, una fuente y un receptor, las posibles trayectorias son representadas por líneas punteadas, mientras

que las trayectorias de rayo (con un tiempo de viaje mínimo) son las líneas solidas. La onda con trayectoria recta de fuente a receptor cumple con ser la onda con un tiempo mínimo general. Por otro lado, el tiempo de viaje generado por la onda con trayectoria de rayo reflejada en la interfaz será un mínimo local en comparación con sus posibles trayectorias reflejadas.

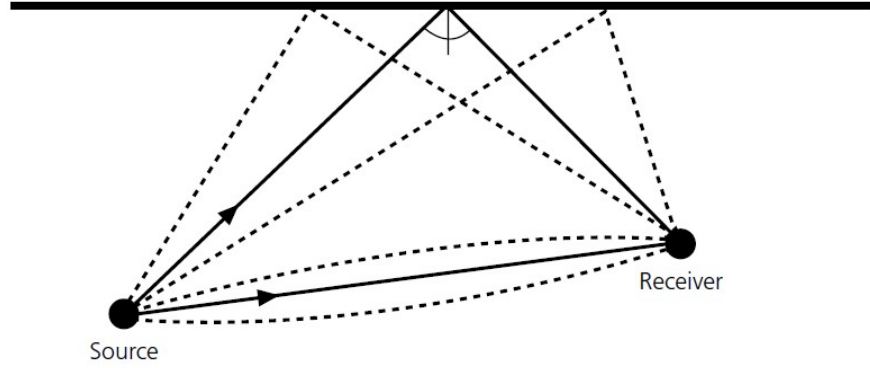


Figura 2.4: *Principio de Fermat. Tomado de Stein y Wyession, 2003*

Si llevamos el principio de Fermat a una capa y un semiespacio, de un punto $(0, a)$ en un medio 1 a un punto $(b, -c)$ en el medio 2, podemos mediante la figura 2.5 descomponer la trayectoria como $(a^2 + x^2)^{1/2} + ((b - x)^2 + c^2)^{1/2}$; si deseamos obtener el tiempo de viaje, llegamos a la ecuación 2.4

$$T(x) = \frac{(a^2 + x^2)^{1/2}}{v_1} + \frac{((b - x)^2 + c^2)^{1/2}}{v_2} \quad (2.4)$$

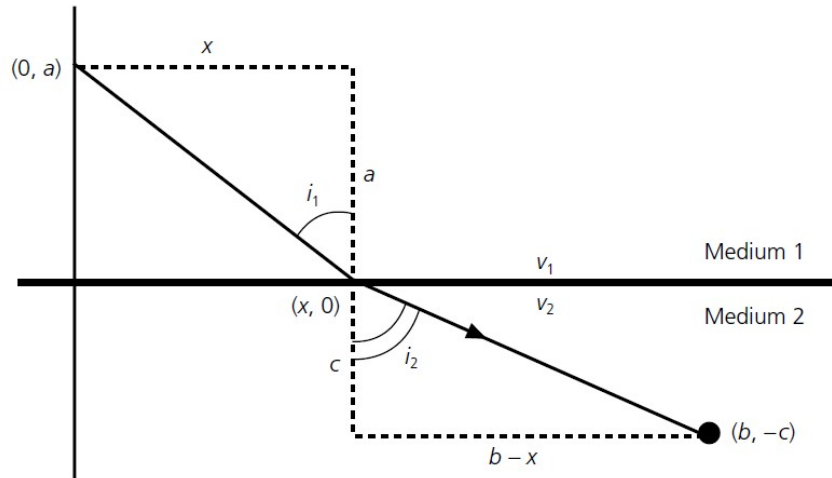


Figura 2.5: *Trayectoria de rayo. Tomado de Stein y Wyession, 2003*

Considerando que el principio de Fermat busca la trayectoria con el tiempo de viaje mínimo, es coherente que se realice la derivada respecto a la posición de la ecuación 2.4 y se iguale a cero, resultado de lo anterior tenemos

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{x}{v_1(a^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{(b-x)}{v_2((b-x)^2 + c^2)^{1/2}} = 0 \quad (2.5)$$

Reacomodando la ecuación 2.5 con trigonometría llegamos a la ecuación de la Ley de Snell de la forma

$$v_1 / \sin i_1 = v_2 / \sin i_2 \quad (2.6)$$

2.5. Principio de Huygens

Este principio tiene su origen en el estudio de la luz y óptica, pero no se limita a esto, ya que es aplicable a la propagación de ondas sísmicas. Para ejemplificar esto se usará un frente de onda plano para simplificar el problema. Teniendo un frente de onda el cual se presenta en un medio homogéneo, al encontrarse con una interfaz en un tiempo t , se generan nuevos frentes de onda con las mismas características que el original y en un tiempo $t + \Delta t$ podemos representar al nuevo frente de onda como la suma constructiva de los frentes generados como se muestra en la figura 2.6 (a). También el principio de Huygens puede verse desde un frente de onda que llega a una apertura de una interfaz la cual generará un frente de onda difractado como se ve en la figura 2.6 (b).

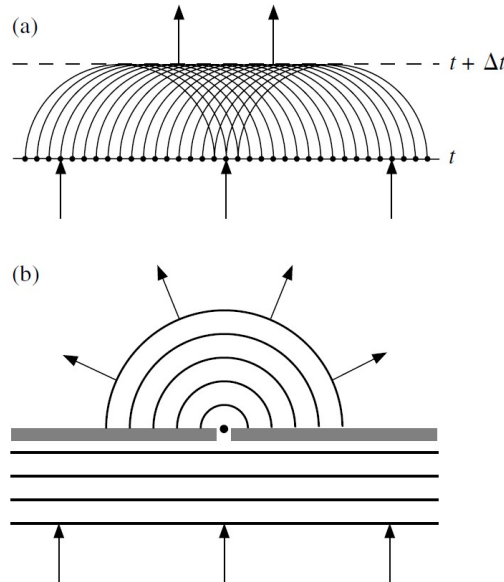


Figura 2.6: *Principio de Huygens. Tomado de Shearer, 2009*

2.6. Modelo convolucional

El modelo convolucional de la Tierra lo podemos analizar por partes, en su forma más sencilla estas son: una fuente y un modelo de capas. En cuanto a la fuente se busca que sea impulsiva, mientras que el modelo de capas estará definido por una secuencia variada de coeficientes de reflexión.

Las características de la fuente estarán definidas por los requerimientos del levantamiento sísmico y del medio, buscando que ésta sea lo más cercana a un impulso para que al realizar la convolución con reflectores cercanos entre sí no presenten interferencia. Por otro lado, el modelo de capas se deberá apegar a un modelo de velocidades con base en un modelo geológico.

La respuesta entre la fuente y el modelo de capas, resulta ser nuestro modelo convolucional. Esto lo podemos representar de forma escrita como:

$$u(t) = s(t) * g(t) \quad (2.7)$$

donde:

$u(t)$ es el sismograma registrado.
 $s(t)$ es la función de la fuente.
 $g(t)$ es el modelo capas en forma de los coeficientes de reflexión.

Esto parece un poco abstracto pero lo podemos ver de forma gráfica en la siguiente figura 2.7.

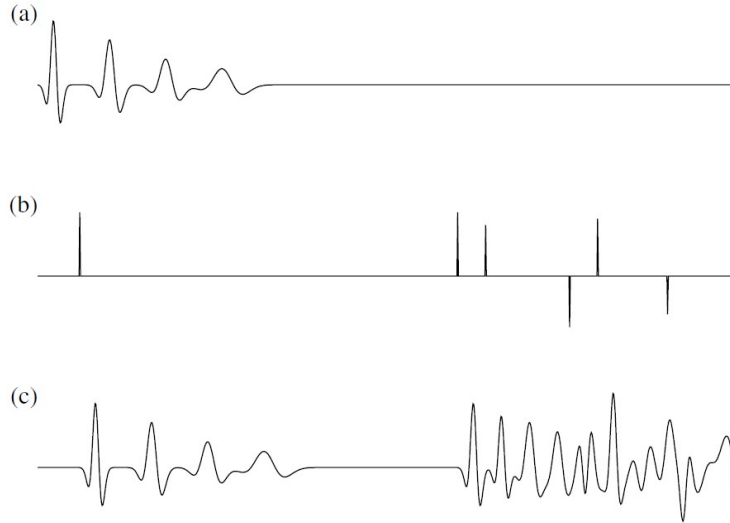


Figura 2.7: Modelo convolucional. Donde (a) representa la función temporal de la fuente $s(t)$ generada por una pistola de aire en un experimento marino, seguida de una serie de burbujas causadas por la reverberación de la presión del agua. (b) es el ejemplo ideal de la función respuesta de la Tierra $g(t)$, y (c) es el resultado de la convolución (a) con (b). Tomado de Shearer, 2009

2.7. Sísmica de reflexión

Es un método geofísico que se basa en el estudio de la propagación de ondas en uno o varios medios. La propagación de las ondas es generada por una fuente de energía artificial, donde las ondas sufren reflexión y refracción en los límites entre capas, lo cual es posible registrar en los receptores situados entre el límite de un medio y una superficie libre.

El método de reflexión sísmica, es considerado como uno de los métodos más importantes en la geofísica, predominando por factores como la alta precisión, resolución y alcance en profundidad, tal y como menciona Chaubey, 2007.

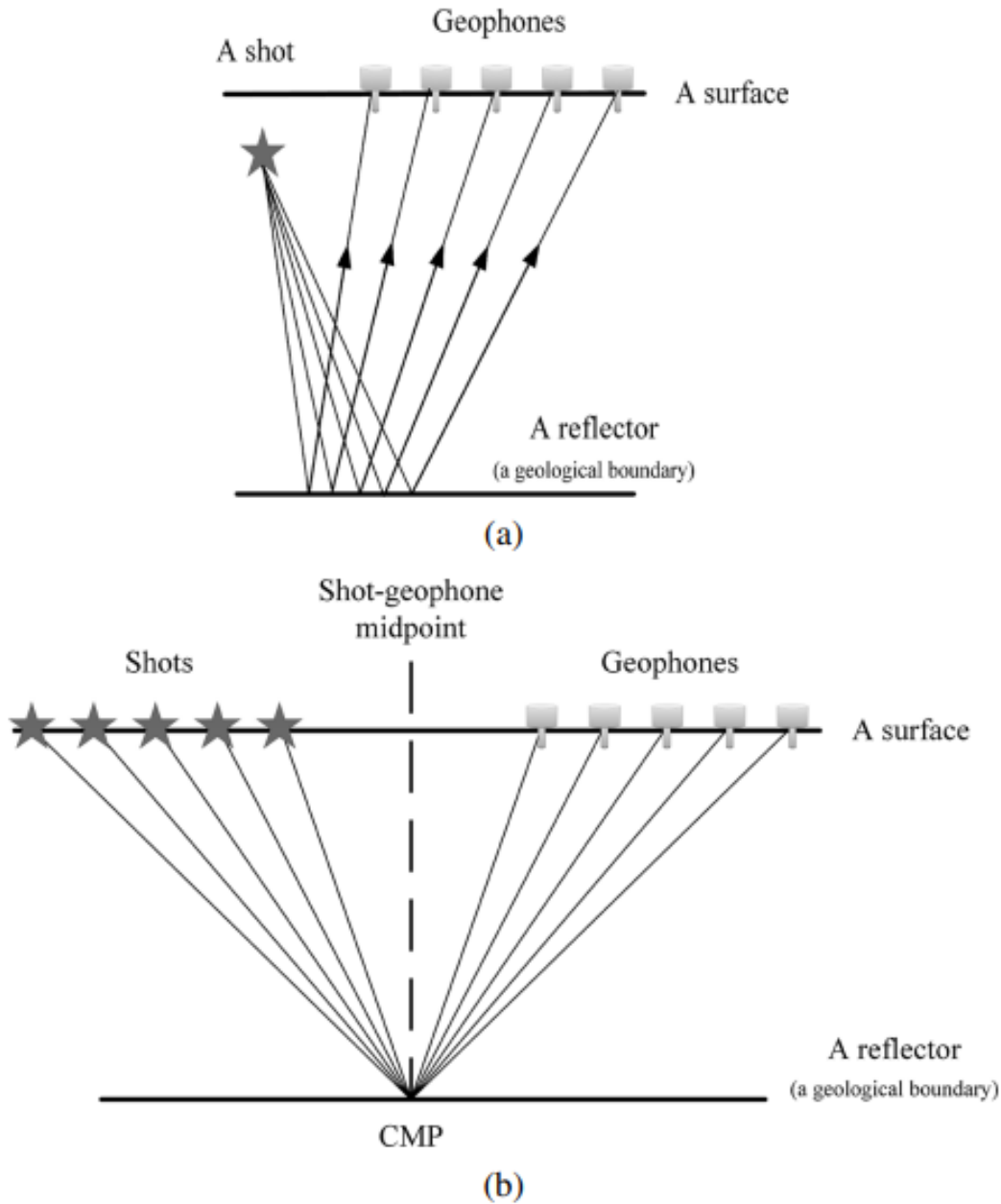


Figura 2.8: *Shot gather (a), punto medio común (b), recuperado de Mousa, 2020*

Retomando, los instrumentos que se utilizan para generar las fuentes en la sismica de reflexión varían, en el caso terrestre se utiliza el marro, pistones, vibroseis y dinamita; para el marino se utilizan las pistolas de aire. En cuanto a los receptores estos son electromagnéticos los cuales se llaman geófonos e hidrófonos y podemos encontrarlos en distintas frecuencias de muestreo. Un registro es una serie de tiempos de viaje contra distancia, registrados en los geófonos posterior a la generación de la fuente. Es mediante el registro y su respectivo procesamiento que se obtienen las sec-

ciones sísmicas correspondientes. En la sísmica de refracción estamos acostumbrados a la sección generada con un tiro, ver figura 2.8 (a), mientras que en la sísmica de reflexión los tiros son acomodados para obtener la forma de un punto medio común (CMP por sus siglas en ingles) como se ve en la figura 2.8 (b). Para comprender mejor que es el *CMP*, se presenta la figura 2.9. En términos de CMP se realiza el procesamiento sísmico para conseguir las correcciones necesarias y así obtener una respuesta lo más acercado a la realidad.

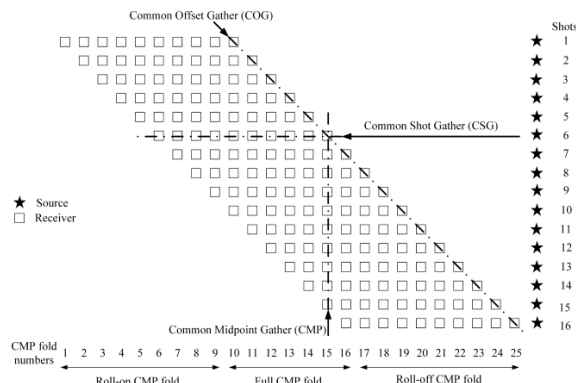


Figura 2.9: *Adquisición CMP tomada de Mousa, 2020*

2.8. Sismograma sintético

Un sismograma sintético es un sismograma el cual se obtiene usando las ecuaciones de onda y modelando una fuente con un modelo de capas. Los sismogramas sintéticos nos permiten entender el funcionamiento del método de la sísmica de reflexión, dándonos la gran ventaja de modelar los elementos y ver la respuesta de forma gráfica.

A continuación se presenta un sismograma sintético obtenido mediante el software Seismic Unix, los cuales desarrolló Suarez Serrano, 2009.

2.8.1. Modelo inicial

- Longitud horizontal de la sección sísmica: 5000 m
- Profundidad: 3000 m
- Interfaz 1: 1500 m
- Interfaz 2: 2500 m
- Velocidades de las capas: 1500, 2500, 3500 m/s respectivamente

- Densidad de las capas: 1.0, 2.25, 2.25 g/cm^3 respectivamente

Para ver de forma visual los criterios anteriores los podemos ver como estratos los cuales varían la velocidad y la densidad como se ve en las figuras 2.10 y 2.11.

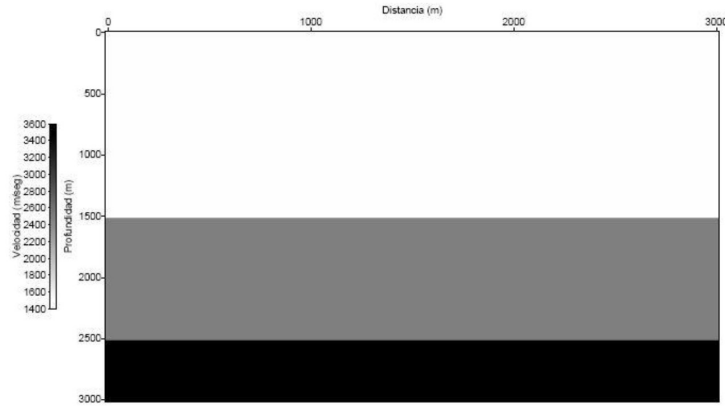


Figura 2.10: *Perfil de velocidades. Tomada de Suarez Serrano, 2009*

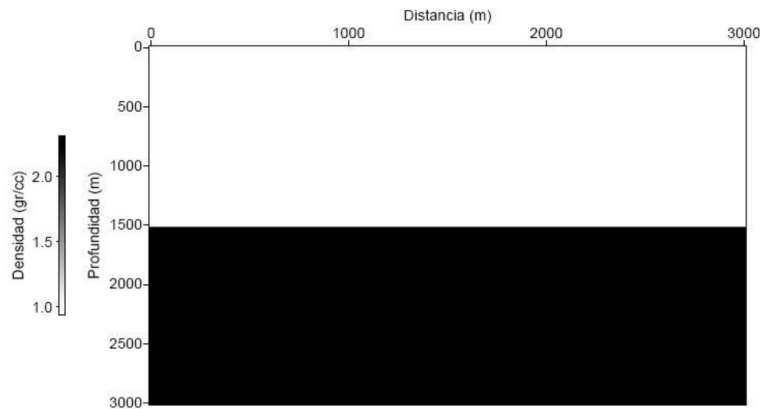


Figura 2.11: *Perfil de densidad. Tomada de Suarez Serrano, 2009*

2.8.2. Fuente sintética

Los criterios de la fuente los define Suarez Serrano, 2009, los cuales representan la frecuencia pico de la ondícula (f_{peak}) y la frecuencia máxima de la ondícula (f_{max}), en el trabajo no se especifica que tipo de ondícula se utilizó para generar la fuente, el modelado de la fuente se puede apreciar en la figura 2.12.

- $f_{\text{peak}}=5$
- $f_{\text{max}}=10$

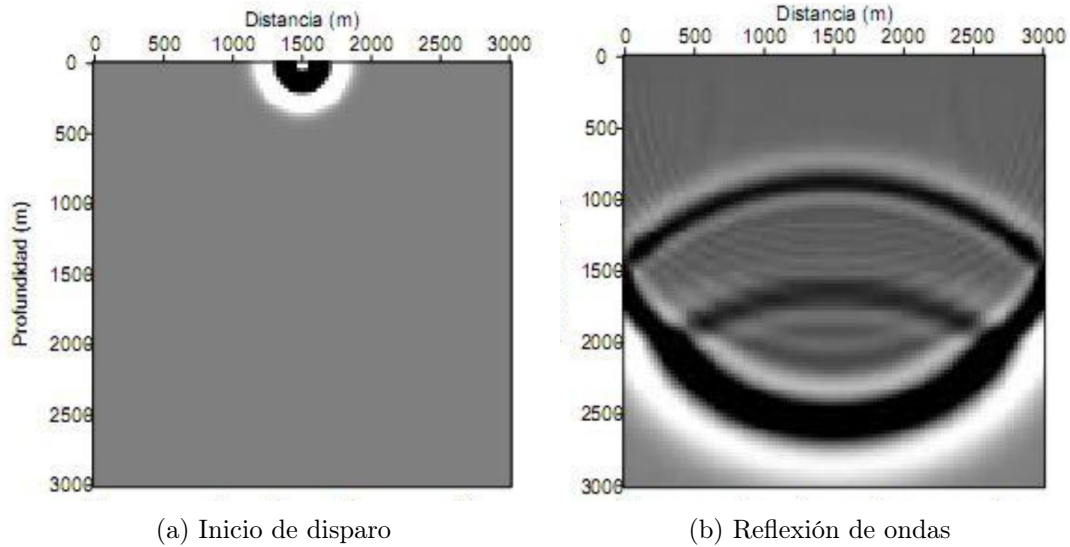


Figura 2.12: Modelo de fuente con ondas acústicas. Tomada de Suarez Serrano, 2009

2.8.3. Parámetros de adquisición

- Offset máximo: 1500 m
- Intervalo entre puntos de disparo: 50 m
- Intervalo entre grupos de receptores: 25 m
- Tiempo de grabación: 5 s

Para generar un registro es necesario definir la ubicación de la fuente, la distribución de los receptores y el tiempo de registro, con un solo registro se obtiene lo que conocemos como un Shot Gather, en el cual podemos ver el primer quiebre, la primera y segunda reflexión, así como sus múltiples. Es importante mencionar que el modelo se realizó con ondas acústicas y es por esto que no se aprecian ondas s en el sismograma sintético, figura 2.13.

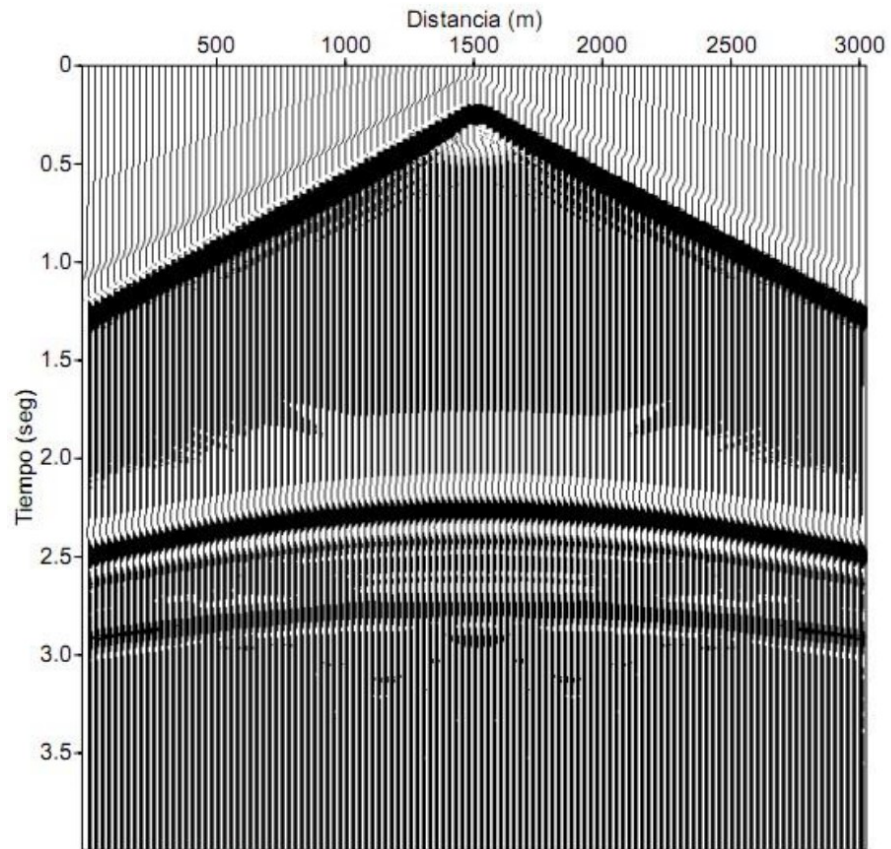


Figura 2.13: *Shot Gather*. Tomada de Suarez Serrano, 2009

3 Descripción de los datos sísmicos a procesar

3.1. Sistema de adquisición

Para saber acerca de los equipos empleados en este estudio, se analizaron los registros del observador de la compañía GSI proporcionados por la CNH. El levantamiento de las líneas 2D de reflexión se realizaron con los mismos parámetros de adquisición. El equipo y parámetros usados fueron los siguientes:

- Un sismógrafo digital de 48 canales con rango dinámico de 168 dB.
- 1440 geófonos de 10 Hz.
- La geometría del tendido: 1250m-100m-0-100m-1250m.
- 30 geófonos por grupo con espaciamiento de 4 m. La distancia entre los grupos de geófonos es de 50 m.
- Fuentes; 4 vibradores separados cada 16 m, con 20 barridos por estación y avance de 5 m ó 3 vibradores separados cada 22.5 m, con 24 barridos por estación y avance de 4 m.
- La frecuencia de barrido fue de 14 a 56 Hz (lineal).
- Duración de barrido de 16 segundos.
- Apilamiento horizontal de 12.
- Se aplicó un filtro pasa-bandas para grabación de los datos de 8 a 64 Hz.
- Una ganancia constante de 36 dB.
- Filtro notch de 60 Hz.
- Intervalo de muestreo de 4 ms.

3.2. Distribución geográfica de las líneas 2D

El estudio consistió en 26 líneas 2D las cuales se distribuyeron en la Ciudad de México, la mayor densidad de las líneas se concentró en la zona urbana, al oeste y centro. Las 26 secciones presentaron dos orientaciones preferentes: norte-sur y este-oeste. Todas las líneas presentan al menos una intersección con otra. De las 26 secciones 3 de ellas fueron adquiridas en segmentos, esto se representa de forma gráfica en la figura 3.1. Las líneas con referencias para su ubicación así como longitudes se presentan en la tabla 3.1.

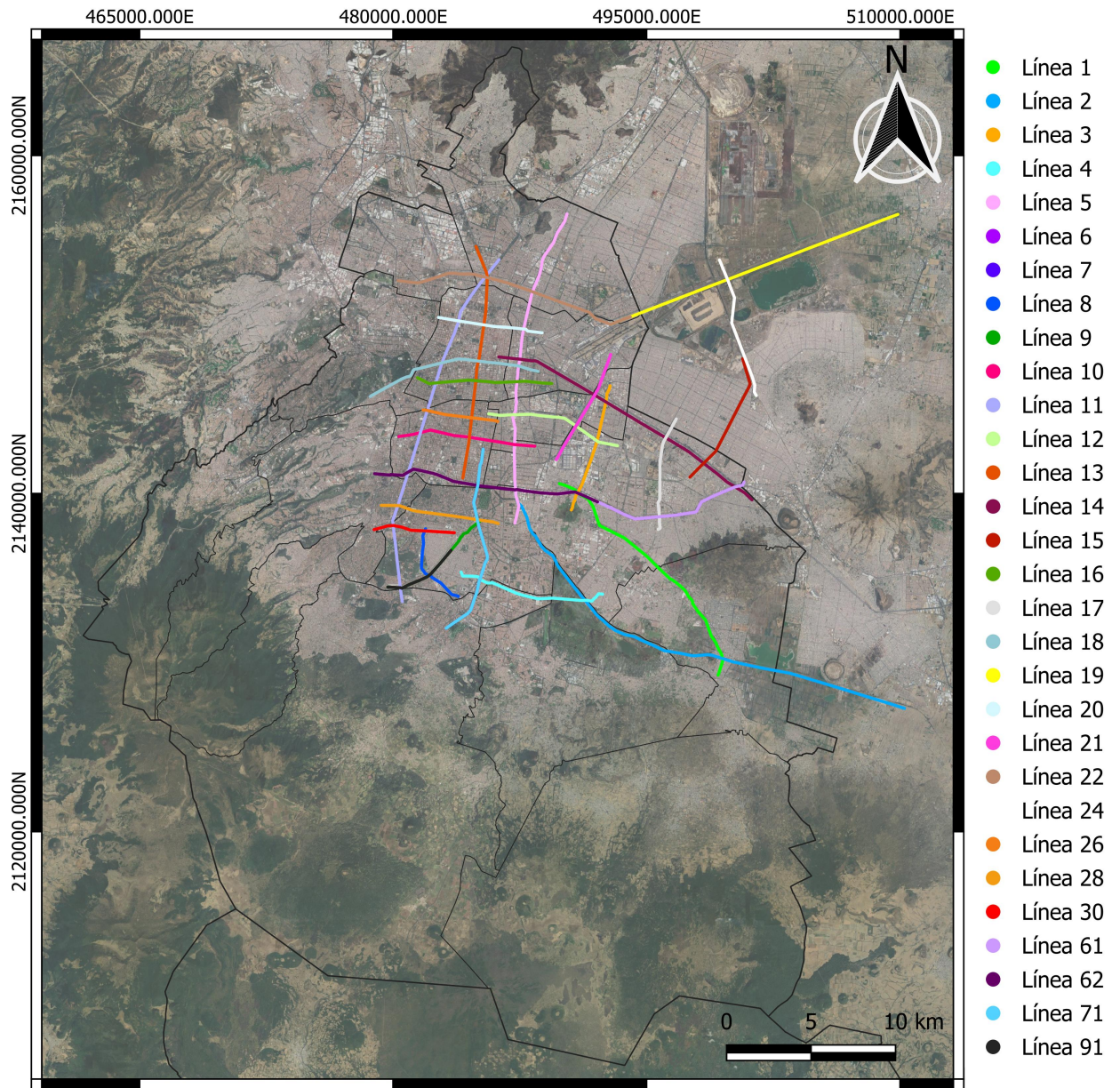


Figura 3.1: Localización de las 26 líneas 2D

Línea	Ubicación	Referencia	Km
L01	Camino a San Lorenzo	Macroplaza Iztapalapa	15
	Camino real Zapotitlán		
	Iztacáhuatl		
	Emiliano Zapata		
L02	Metro Mexicaltzingo L12	Calzada de la viga-Prado Churubusco -Coyoacán	27.6
	Canal de Chalco	Lago de Chalco	
	Chalco - Tláhuac	Parque ecológico Xochimilco	
		Central de abasto de Chalco	
L03	Javier Rojo Gómez	Cerro de la estrella	6.82
		Balneario Olímpico Pantitlán	
		Preparatoria No. 5	
		Parque ecológico –Xochimilco	
L04	Av.- Emiliano Zapata Iztapalapa	Mercado de plantas y flores Cuernanco	8.33
	Calzada de la viga – Sur Iztacalco		
	Av. Heroica Escuela Naval Militar		
	Congreso de la Unión		
L05	Av. Canal Nacional	Metro: Santa Anita, Fray Servando, Jamaica	17.8
	Av. Ermita Iztapalapa		
	Av. Popocatepetl		
	Av. Jose María Rico		
L06	Av. Plateros	Hospital Pediátrico Iztapalapa	13.2
	Av. Centenario	Parque del Conde de la bola	
		Lomas de Plateros	
		Atrás de INCAN	
L07	Viaducto Tlalpan	Club de golf México	10.9
		Metro Portales	
L08	Av. Del Imán	Hospital Shriners para niños	3.61
	AV. Antonio Delfín Madrigal	Club universidad nacional	
		Metro Universidad	

Línea	Ubicación	Referencia	Km
L09	Av. Aztecas, los reyes Coyoacán	Club Universidad Nacional	3.58
L10	Eje 5 sur –San Antonio Av. Colonia del Valle Eugenia Av. Eje 5 sur Ramos Millán Santa María la Purísima Insurgentes Sur Insurgentes centro Insurgentes Norte	Plaza de toros Estadio Ciudad de los deportes Entre metros Villa de Cortés y Nativitas Antes de metro Atlapaco Acceso a Cuicuilco Estaciones de metro: Insurgentes sur, Buнавista, la raza y antes de potrero.	7.16
L11			20.7
L12	Av. Presidente Plutarco Elías Calles Batalla de Calpulalpan	Col. Granjas Alcaaldía Iztacalco Estación de Metrobús la viga Alcaaldía Iztapalapa	7.2
L13	Calle Chilaque Eje central	Diego Churubusco Instituto del petróleo	15.3
L14	Circunvalación Calles Gral. Anaya Sidar y Rovirosa Calzada Ignacio Zaragoza	H. Congreso de la Unión Metro Moctezuma Hasta Autopista México-Puebla	16.2
L15	Av. Republica federal del Sur Av. República federal del Norte Av. Carmelo Pérez Av. Bordo de Xochiaca	Zona urbana ejidal Santa Martha Acatitla Sur (Metro Peñón Viejo) Antes de carretera México – Querétaro 57D	7.19
L16	Av. Nuevo León Av. Sonora Av. Insurgentes Sur Av. del taller 48	Parque México Metro Hospital general Metro Obrera Metro Jamaica Ciudad deportiva	7.24

Línea	Ubicación	Referencia	Km
L17	Av. Guelatao Calle 39	Parque Cuitláhuac Hospital general Metro Guelatao	5.34
L18	Fray Servando Teresa de Mier Av. Chapultepec Av. Constituyentes	Calle Lázaro Pavía Metro Fray Servando Glorieta de los Insurgentes Metro Chapultepec	9.59
L19	Av. Texcoco Vía Tapo Autopista Texcoco-Peñón	Aeropuerto Internacional de la CDMX Parque ecológico Lago de Texcoco	17.4
L20	C. Antonio Alzate. Mosqueta, Jardineros-circunvalación Hortelanos-Floricultura Eje 4 Ote Río Churubusco – Río Soto de la marina; Eje 4 Ote – Ignacio Zaragoza Donato Miranda Fonseca Gustavo Díaz Ordaz	Biblioteca Vasconcelos Metros: Buenavista, Guerrero, Lagunilla, Tepito	5.42
L21		Estadio Alfredo Harp Helú Colegio de Bachilleres Plantel 10	5.34
L22	Calle Heliópolis Av. Cuitláhuac Eje 3 Norte (Robles Domínguez, Noe) Av. 602; vía Tapo – calle 635	Colonia: Clavería Aeropuerto Internacional de la ciudad de México Metro Deportivo Oceanía	13.3
L24	Entre terrenos	Parque ecológico Lago de Texcoco; Lago Nabor Carrillo Universidad Tecnológica de Nezahualcóyotl	7.8
L26	Ohio, Xola, Eje 4 Sur (Napoleón) Santiago Ramon Y Cajal – Itzcóatl - Iztacalco	Viaducto Miguel Alemán Valdez; Insurgentes sur; Av. Coyoacán, Metrobús Amores,	4.88

Línea	Ubicación	Referencia	Km
L28	Calle San Carlos, Av. Miguel Eje 9 sur Miguel Ángel de Quevedo, Av. Las torres	Av. Revolución. Pabellón Alta Vista, Tasqueña	5.4
L30	Eje 10 Sur Río de la Magdalena, Av. Copilco, Av. Pedro Ureña	Estadio Olímpico universitario Metro Copilco	3.68

4 Procesamiento de datos sísmicos

4.1. Flujo de procesamiento

El procesamiento en la sísmica de reflexión no es una secuencia fija, esto se debe al objetivo del proyecto, a las características de los datos adquiridos, el geofísico y su conocimiento, así como las herramientas empleadas (software y hardware), sin embargo el objetivo del procesamiento es obtener una imagen sísmica con una alta relación señal-ruido, es decir, que mantenga coherencia con la parte geológica estructural.

Yilmaz, 2001 considera tres etapas principales en el procesamiento post-apilamiento:

- Deconvolución
- Apilamiento
- Migración

Hay que tener en consideración que al trabajar con datos sísmicos de reflexión, tenemos más de un dominio y el conjunto puede ser visto como un volumen; a éste se le conoce como volumen de datos sísmicos (figura 4.1), los cuales son: tiempo, offset y punto medio (midpoint).

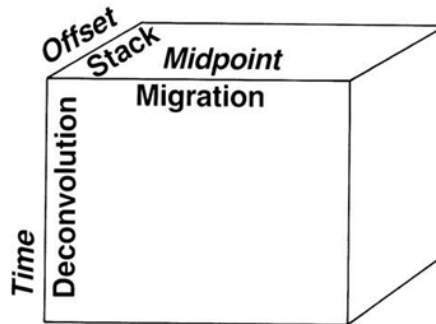


Figura 4.1: *volumen sísmico, tomado de Yilmaz, 2001*

La deconvolución actúa sobre el tiempo como se ve en la figura 4.1 y esto lo hace al colapsar la ondícula originada por la fuente. Lo anterior se realiza mediante una compresión de la ondícula al reflector para mejorar la resolución temporal del registro. Yilmaz, 2001.

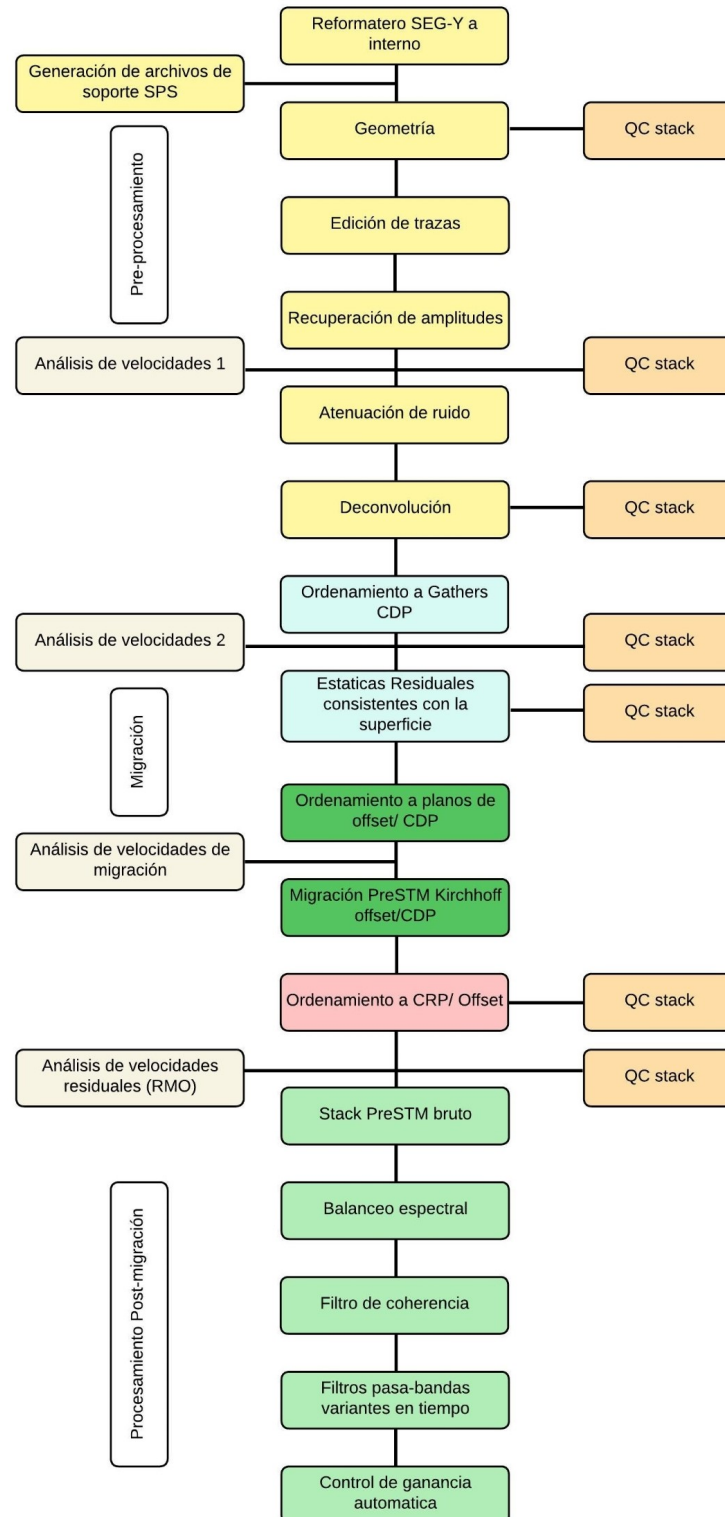
El apilamiento al igual que la deconvolución es un proceso de compresión, pero este proceso se realiza en el offset donde se suman los distintos offsets, con el fin de

obtener el stack. Para realizar lo anterior primero se aplica la corrección por NMO y un mute a las trazas por cada CMP gather, Yilmaz, 2001.

En cuanto a la migración esta puede ser vista como un proceso de deconvolución que mejora la resolución espacial al colapsar las difracciones y llevar los eventos buzantes a su ubicación real en el subsuelo Yilmaz, 2001.

4.2. Secuencia de procesamiento

El procesamiento de datos aplicado sigue la secuencia de la figura 4.2, de cada uno de los apartados se hace una descripción de la metodología así como de sus resultados. La secuencia fue diseñada y aprobada con la ayuda del personal senior de la empresa GGRverse S.A. de C.V.

Figura 4.2: *Flujo de procesamiento sísmico Ciudad de México*

4.2.1. Reformateo

El reformateo de los datos es fundamental, debido a que estos no son compatibles con el formato del software disponible para el procesamiento ya que se usan para almacenamiento. Los datos de campo se registran de forma multiplexada (formato SEG-D), siguiendo un orden o formato (Yilmaz, 2001). El multiplexado se puede ver como una matriz $[i,j]$ de registro en tiempo y canal, conformado por valores para cada muestra, el reformateo consiste en pasar de un formato multiplexado (muestras) a un demultiplexado (trazas), el resultado de este proceso puede entenderse como las trazas sísmicas grabadas a distintos offsets y un shot point común. (Cureño López, 2009).

Este proceso es clave para poder iniciar con el procesamiento de los datos, ya que una vez realizado el reformateo, es posible llevar los mismos al formato del software empleado. En este caso se contó con los datos en formato SEG-Y, formato de grabación demultiplexado.

Formatos

La industria geofísica constantemente busca el unificar los formatos de adquisición, por practicidad y uso, en el caso de la sísmica de reflexión fue la Sociedad de Geofísicos de Exploración (*SEG* por sus siglas en ingles) quienes lideraron este proceso. Iniciaron con un formato prueba el cual llamaron "SEG Exchange Tape Format"; debido al desarrollo tecnológico y las recomendaciones de la industria en 1973, surgió el formato SEG-Y desarrollado por K. Barry (K. M. Barry, 1975), donde uno de los ejes principales es el ser un formato flexible, desde su creación ha tenido 4 revisiones como se muestra en la figura 4.3, donde también se aprecian sus componentes y contenido de bytes.

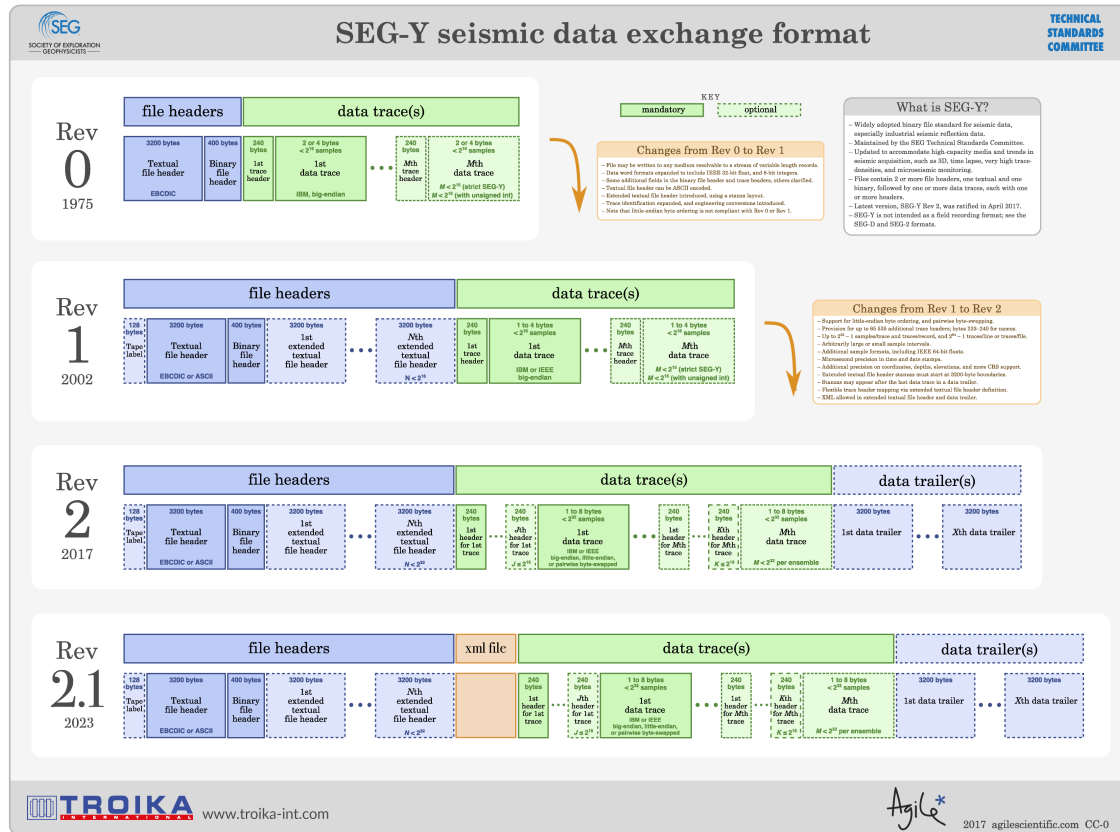


Figura 4.3: Estructura y evolución de SEG-Y, recuperado de https://wiki.seg.org/wiki/images/9/9b/SEG-Y_bytestream_all_revisions_.png

4.2.2. Edición

La edición de trazas es un proceso de suma importancia, debido a que no siempre los datos que se registran en un canal son solo la señal de interés, en algunos casos se trata de ruido, el cual puede tener distintos orígenes; un ejemplo son problemas en el registro. También se graban tiros de prueba, así como fuentes, estos no son de utilidad para el procesamiento y deben ser eliminados.

Por lo anterior se revisaron las trazas, de las cuáles se seleccionaron aquellas que presentaron un nivel de ruido alto, las trazas de prueba y las trazas sin información, se creó en un archivo y con ayuda de un módulo se eliminaron (*Kill trace*).

4.2.3. Geometría

La geometría es un proceso complejo el cuál tiene como objetivo que la configuración de la adquisición y los datos sísmicos coincidan con el fin de actualizar los encabezados de las trazas sísmicas. Este proceso inicia con un inventario de los registros de observador 4.4,4.5, datos de elevación 4.6 y archivos con las fuentes y

HOJA 4

CLIENTE: **Pemex**

BRIGADA: **1507**

DFSTZ

SEMPERADO # 184 y 199

9405 CO. 2002

CIENTE:		BRIGADA:	P.V. No.	REG. IMC.	REG. FIN.	ESTACION	1 SOBRE	40 SOBRE	SELECCION POSICION	CINTA No.	REGISTROS MALOS	HORA	ERRORES DE PARIDAD	OBSERVACIONES
AREA:			180	18	41	179/181	153	207	3	1-2/12-24		10150		3 Viarados 2009
PROSPECTO: Proyecto Sismologico Cuervo de Mexico			182	42	65	181/183	155	209	5					
OBSERVADOR: A. Hernandez			184	66	73	183/185	157	211	7		74			
FECHA: 12 Feb 1986			186	91	114	185/187	159	213	9	1-2/12-03				
LINEA: CRANIO C/100 T/1000			188	115	135	187/189	161	215	11					
DIRECCION DE TIRO: 2-1/13			190	141	163	189/191	163	217	13	1-2/12-03		50		
Salida campo.	Llegada campo.	Salida campo.	192	166	189	191/193	165	219	15					
			194	190	197	193/195	167	221	17			198		
HORA DE VIBRADORES: 4			196	215	238	195/197	169	223	19			17:55		
DISTANCIA ENTRE VIBRADORES: 23m			198	240	260	197/199	169	223	1	1-2/12-05		239		12 segundos 2005
PATRON DE BARRIO: 2			200	261	283	199/201	173	227	5					2 segundos 2005
BARRIOS X P.V.: 100			202	288	311	201/203	173	229	7					2 segundos 2005
LONG. DE GRABACION: 14			204	312	331	203/205	177	233	9					
FREC. HIC. FINAL: 64			206	336	359	205/207	179	233	11	1-2/12-06				
SECCION TPO: ESC 800 1000			208	360	382	207/209	181	235	13		233	18:50		12 segundos
HORA DE DESERCCION X TRAZA: 30			210	385	408	209/211	183	237	15	1-2/12-07				
INTERVALO ENTRE TRAZAS: 50			212	409	431	211/213	185	239	17					
PATRON DE TIEMPO: 1350-200-0-200-1350			214	435	456	213/215	185	239	17	1-2/12-08				
PATRON DE GRUPO			216	459	480	215/217	185	239	17					
CONFIGURACION DEL VIBRADO			218	483	504	217/219	185	239	17					
TI: 1			220	507	528	219/221	185	239	17					
PARAMETROS DEL SISTEMA DE GRABACION			222	531	552	221/223	185	239	17					
GANANCIA CONSTANTE: 36			224	555	576	223/225	185	239	17					
DENSIDAD DE GRABACION: 1600			226	579	600	225/227	185	239	17					
FORMATO: 8			228	603	624	227/229	185	239	17					
GANANCIA: MANUAL			230	627	648	229/231	185	239	17					
HORA DE TRAZAS: 4			232	651	672	231/233	185	239	17					
FILTROS DE GRABACION: 8			234	675	696	233/235	185	239	17					
INTERVALO DE MUESTRO: 4			236	699	720	235/237	185	239	17					
FILTRO NOTCH: ☐ FLAT ☐ 10 Hz ☐ 30 Hz			238	723	744	2								

Figura 4.4: *Reporte de observador para linea 2, sección 1*

V.P.	No. SWP	FIELD TAPE	FIELD REC. FROM	FAULTY PARITY	RECORD BAD	DUM ADD	PILOT SWEEP	REC No.	REMARKS
							FREQ LENG TAPE REC		
180	24	12/13-01	18 ✓ 41 ✓				14-64 16 12/13-01 18	5001	FT-60
182	1	Loc: 103	42 ✓ 65 ✓					5002	
184	8		66 ✓ 73 ✓		74			5003	
—	16	12/13-02	75 ✓ 90 ✓					5004	
186	24	Loc: 104	91 ✓ 114 ✓					5005	
188	21		115 ✓ 135 ✓		136			5006	
—	3	12/13-03	137 ✓ 139 ✓		140			5007	
190	24	Loc: 105	141 ✓ 165 ✓		160			5008	
192	24		166 ✓ 189 ✓					5009	
194	8		190 ✓ 197 ✓		198			5010	
—	16	12/13-04	199 ✓ 214 ✓					5011	
196	24	Loc: 106	215 ✓ 238 ✓					5012	
198	21		240 ✓ 260 ✓		239			5013	
—	3	12/13-05	261 ✓ 263 ✓					5014	
200	24	Loc: 107	264 ✓ 287 ✓					5015	
202	1		288 ✓ 311 ✓					5016	
204	10		312 ✓ 321 ✓					5017	
—	19	12/13-06	322 ✓ 335 ✓					5018	
206	24	Loc: 108	336 ✓ 359 ✓					5019	
208	23		360 ✓ 382 ✓		383			5020	
—	1	12/13-07	— ✓ 289 ✓					5021	
210	24	Loc: 109	285 ✓ 308 ✓					5022	
212	1		309 ✓ 332 ✓					5023	
210	12		333 ✓ 344 ✓					5024	
—	12	12/13-08	345 ✓ 356 ✓					5025	
212	24	Loc: 110	357 ✓ 381 ✓					5026	
212	21		357 ✓ 378 ✓					5027	
214	24	12/13-09	20 ✓ 46 ✓					5028	
216	24	Loc: 111	47 ✓ 78 ✓					5029	
—	—	12/13-10	80 ✓ 82 ✓					5030	
218	24	Loc: 112	83 ✓ 117 ✓					5031	
220	24		118 ✓ 141 ✓					5032	
222	24	12/13-11	142 ✓ 165 ✓					5033	
224	24	Loc: 113	166 ✓ 189 ✓					5034	

Figura 4.5: Reporte de observador para línea 2, sección 2

El objetivo de realizar un inventario es saber con qué información se cuenta y de ser necesario hacer correcciones, buscar o generar los archivos faltantes. Para este proyecto los reportes de observador 4.4 y 4.5, permitieron verificar la información tanto de la configuración, las elevaciones, la dirección de adquisición, los tiros recuperados y tiros repetidos. En algunas líneas, no se contó con el reporte de observador y se utilizó un scan de tarjeta FORTRAN disponibles con suficiente información 4.7.

En cuanto al reporte de elevaciones 4.6 éstos se utilizaron para comparar la información proporcionada en archivos de texto 4.8 los cuales contienen el PV (punto vibrado), la elevación y coordenadas x, y, de cada línea a la que pertenece; también el reporte de elevación se utilizó para realizar una asignación adecuada del FFID (*File Fiel ID*) junto con el reporte del observador y éste no se repita para ninguna línea.

 **perforadata, s.a. de c.v.** 04/11/86

REGISTRO DE ELEVACIONES Y COORDENADAS

HOJA / DE 10

AREA: Toluca - Taxcala LUGAR: _____

PROSPECTO: Valle de México MUNICIPIO: _____

LINEA: 2/12 ESTADO: México

LEVANTO: Antonio Segura P.

CALCULO: J. L. Gerez. Ato - P. de la Cruz A.

NIVEL: P. Menara Viveros

REVISO: _____

FECHA: MARZO-86

PUNTO	ELEVACION	COORDENADAS		OBSERVACIONES
		X	Y	
153	2244.5	510 256.9	2127 224.4	/
154	2243.9			
155	2243.9			CADENADA A
156	2243.9			50 MTS.
157	2243.9			
158	2243.5			
159	2243.3			
160	2243.0			
161	2242.9	509 276.4	2127 414.3	/
162	2243.4			
163	2243.7			
164	2243.3			
165	2243.3			
166	2243.5	509 637.33	2127 495.4	/
167	2243.3			
168	2243.9			
169	2243.8			
170	2243.8			
171	2244.2			
172	2243.8			
173	2243.5			
174	2243.3			
175	2243.0			
176	2242.5			
177	2242.2			
178	2241.7			
179	2241.7			
180	2241.3			1 ^o PV. Vibrado
181	2240.9			

PUNTO	ELEVACION	COORDENADAS		OBSERVACIONES
		X	Y	
182	2241.7			
183	2240.1			
184	2239.6			
185	2239.6			
186	2239.1			
187	2238.7			
188	2237.9			
189	2237.5			
190	2236.7			
191	2236.8			
192	2236.4			
193	2236.3			
194	2236.7			
195	2235.9			
196	2235.8			
197	2236.3			
198	2236.4			
199	2236.6			
200	2237.2	508 009.3	2127 994.9	/
201	2237.0			
202	2237.0			
203	2237.0			
204	2237.0			
205	2236.9			
206	2237.8			
207	2237.0			
208	2236.9			
209	2236.9			
210	2236.8			

Figura 4.6: Registro de elevaciones y coordenadas de campo

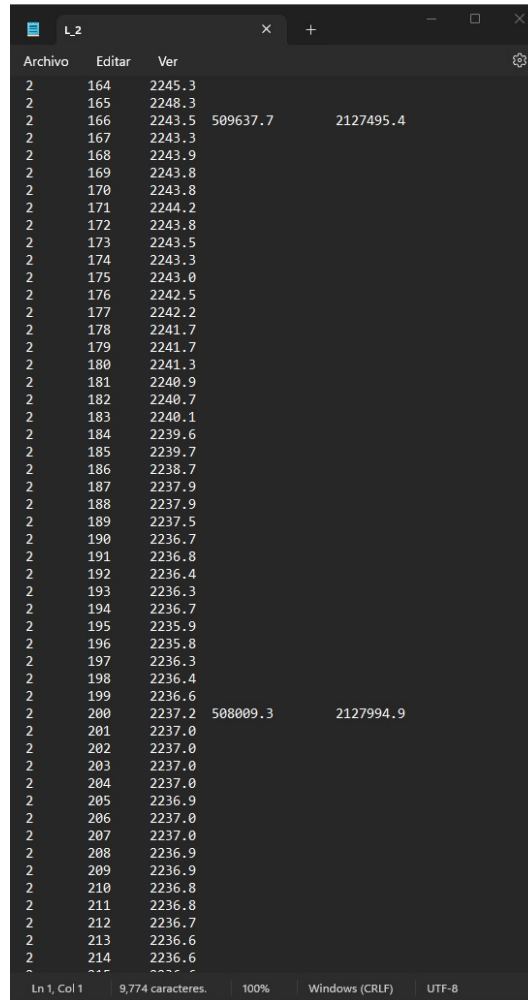
50	SHOTP	102	2 1800	-4 1758	-2	20014	1	50
51	SHOTP	103	1 1796	-2 1756	-2	33014	1	51
52	SHOTP	121	1 1760	0 1760	-2	210014	1	52
-----5...10...15...20...25...30...35...40...45...50...55...60...65...70...75...80								
TARJETA	PRIMER LISTADO DE TARJETAS EN LA UNIDAD DE FORTRAN 6 ==							TARJETA
-----5...10...15...20...25...30...35...40...45...50...55...60...65...70...75...80								
53	SHOTP	122	2 1760	0 1758	-2	220014	1	53
54	SHOTP	123	3 1760	-10 1756	-2	230014	1	54
55	SHOTP	124	7 1750	0 1754	-2	240014	1	55
56	SHOTP	125	4 1750	0 1752	-2	250014	1	56
57	SHOTP	126	1 1750	-2 1750	-2	260014	1	57
58	SHOTP	131	1 1740	0 1740	-2	310014	1	58
59	SHOTP	132	2 1740	-6 1738	-2	320014	1	59
60	SHOTP	133	4 1734	0 1736	-2	330014	1	60
61	SHOTP	134	1 1734	-2 1734	-2	340014	1	61
62	SHOTP	135	1 1732	-2 1732	-2	350014	1	62
63	SHOTP	136	1 1730	-2 1730	-2	360014	1	63
64	SHOTP	137	1 1728	-2 1728	-2	370014	1	64
65	SHOTP	138	1 1726	0 1726	-2	380014	1	65
66	SHOTP	139	2 1726	0 1724	-2	390014	1	66
67	SHOTP	140	3 1726	-10 1722	-2	400014	1	67
68	SHOTP	141	7 1716	-2 1720	-2	410014	1	68
69	*SPRPT	7	0					69
70	PTRN	1	2000 2025	24	-1 1598	24	-1	70
71	PTRN	2	1548 1969	24	-1 1542	24	-1	71
72	PTRN	3	1548 1965	24	-1 1538	24	-1	72
73	PTRN	4	1540 1969	24	-1 1542	24	-1	73
74	PTRN	5	1826 1839	24	-1 1812	24	-1	74
75	PTRN	6	1812 1849	24	-1 1822	24	-1	75
76	PTRN	7	1812 1845	24	-1 1818	24	-1	76
77	SPTN	1	-1 15	-17 27	-33	47	-53	77
78	SPTN	1	-103 121	-126 131				78
79	*ELEV	1						79
80	RELV	1699	2233					80
81	RELV	1711						81
82	RELV	1723	2234	2234 2233 2233 2234 2233		2233 2234 2233 2233		82
83	RELV	1735	2234 2235 2234 2235 2234	2234	2235 2235 2235 2234			83
84	RELV	1747	2234 2233	2233 2234 2233 2234 2233 2232				84
85	RELV	1759		2232 2233 2232 2233 2232				85
86	RELV	1771						86
87	RELV	1783		2232 2233 2232				87
88	RELV	1795	2232 2233 2235 2234 2233	2232	2232 2231			88
89	RELV	1807		2231 2230	2230 2231 2230 2230			89
90	RELV	1819	2231 2230 2230 2231 2231 2230		2230 2231 2230 2231			90
91	RELV	1831	2231 2230 2231 2231 2230	2231 2232 2231	2231 2230			91
92	RELV	1843	2230 2231	2231 2232 2231				92
93	RELV	1855						93
94	RELV	1867	2231 2232	2232 2233 2233 2232 2233				94
95	RELV	1879	2233 2232		2232 2233			95
96	RELV	1891			2233	2232		96
97	RELV	1903	2234 2231 2234 2235 2233		2233 2232			97
98	RELV	1915		2232 2231 2232 2232	2231 2232	2231		98
99	RELV	1927				2231 2232		99
100	RELV	1939					2232	100
101	RELV	1951	2233		2233 2234			101
102	RELV	1963	2234 2233 2233 2234			2234 2235		102
103	RELV	1975	2236 2236 2237 2236 2237 2237	2236 2236 2237 2236				103
104	RELV	1987	2236 2237	2237 2236		2236 2237		104
105	RELV	1999	2237 2238	2238 2239 2239 2240 2243 2243				105
-----5...10...15...20...25...30...35...40...45...50...55...60...65...70...75...80								

Figura 4.7: Tarjetas de FORTRAN del primer procesamiento

Para trabajar la geometría se interpolaron los datos de elevación y con ellos se generaron los respectivos archivos SPS (*Shell Processing Suport*), con sus variantes las cuales corresponden a los receptores (r), posición de los tiros (s) y los dispositivos (x) "patches", que relacionan los r y s.

Se cargaron los archivos SPS al software para su revisión donde los criterios principales son el FFID, la configuración total de los dispositivos y la orientación de la línea, siendo este el primer *QC* de geometría.

El siguiente *QC* que se realizó fue a la elevación, donde una vez realizada la interpolación se confirma que las fórmulas desarrolladas coincidan con la dirección de adquisición, además de la forma de las líneas. Por último, se efectuó una comparativa con la elevación actual de la línea de adquisición considerando la tendencia, que es lo más importante, debido a la subsidencia de la ciudad.



Archivo	Editar	Ver		
2	164	2245.3		
2	165	2248.3		
2	166	2243.5	509637.7	2127495.4
2	167	2243.3		
2	168	2243.9		
2	169	2243.8		
2	170	2243.8		
2	171	2244.2		
2	172	2243.8		
2	173	2243.5		
2	174	2243.3		
2	175	2243.0		
2	176	2242.5		
2	177	2242.2		
2	178	2241.7		
2	179	2241.7		
2	180	2241.3		
2	181	2240.9		
2	182	2240.7		
2	183	2240.1		
2	184	2239.6		
2	185	2239.7		
2	186	2238.7		
2	187	2237.9		
2	188	2237.9		
2	189	2237.5		
2	190	2236.7		
2	191	2236.8		
2	192	2236.4		
2	193	2236.3		
2	194	2236.7		
2	195	2235.9		
2	196	2235.8		
2	197	2236.3		
2	198	2236.4		
2	199	2236.6		
2	200	2237.2	508009.3	2127994.9
2	201	2237.0		
2	202	2237.0		
2	203	2237.0		
2	204	2237.0		
2	205	2236.9		
2	206	2237.0		
2	207	2237.0		
2	208	2236.9		
2	209	2236.9		
2	210	2236.8		
2	211	2236.8		
2	212	2236.7		
2	213	2236.6		
2	214	2236.6		

Ln 1, Col 1 9,774 caracteres. 100% Windows (CRLF) UTF-8

Figura 4.8: Estructura de los datos recibidos (Punto Vibrado)

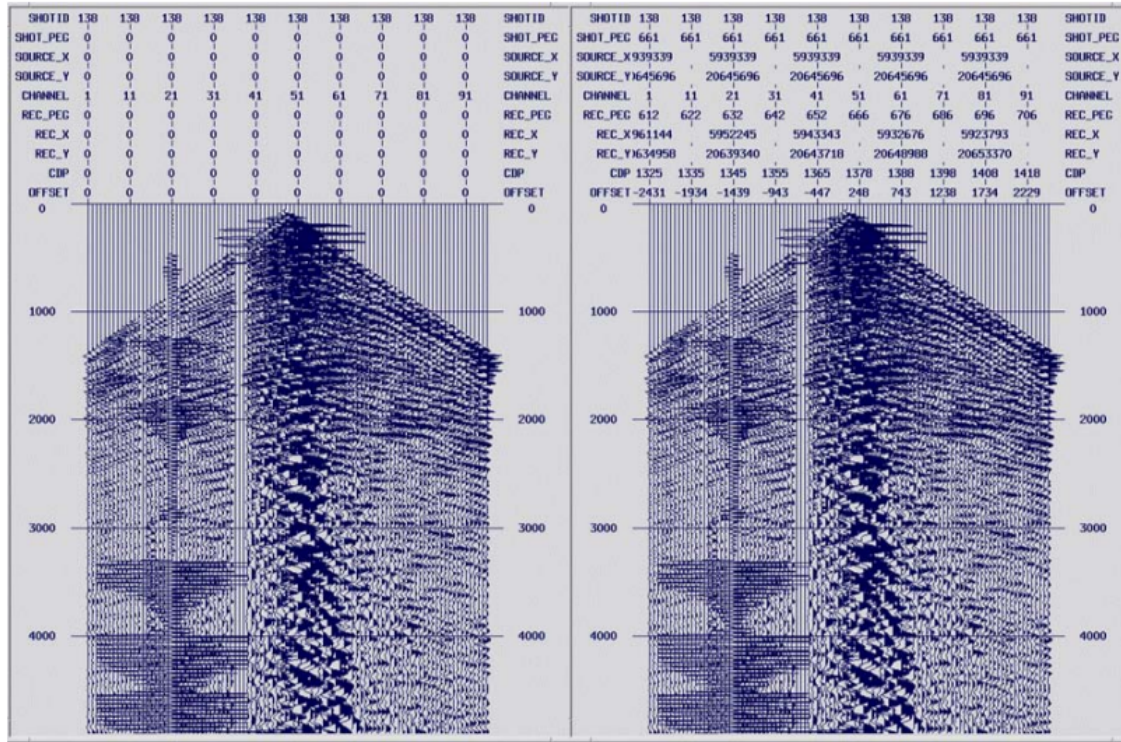
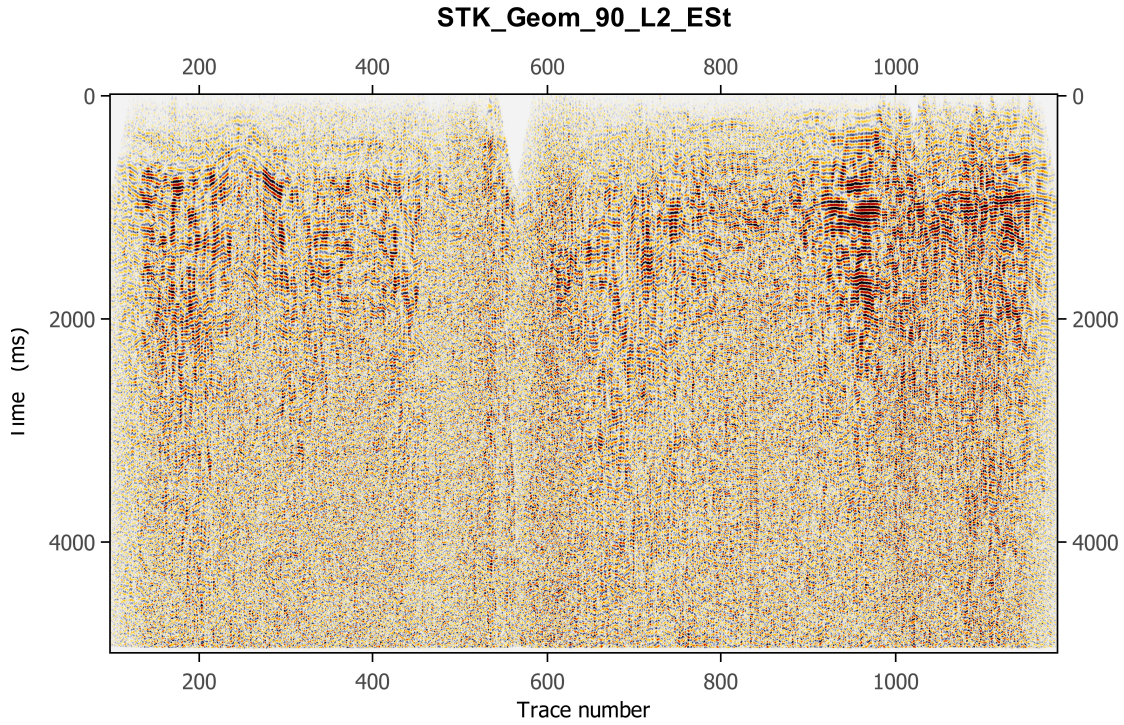
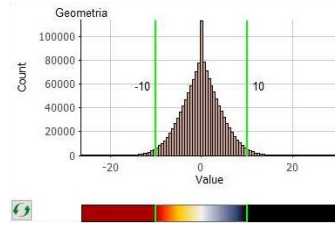


Figura 4.9: Tiro antes y después de la asignación de geometría, recuperado de (Vázquez Ramírez, 2020)

Una vez que se tienen archivos SPS, se realizó la asignación de la geometría a los datos sísmicos de cada línea (actualización de los encabezados de las trazas), lo que genera que cada uno de los criterios que se pueden mostrar y con los que se puede trabajar sean asignados, esto se puede apreciar en la figura 4.9.

Para verificar que la asignación se realizó adecuadamente se genera un *QC stack* posterior a la asignación de la geometría como se muestra en la figura 4.10.

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma

Figura 4.10: QC stack de los datos sísmicos con Geometría para la línea 2

La figura 4.10 es la referencia inicial de la sección, en esta podemos apreciar dos rasgos principales, entre el CDP 0-400 un pliegue anticlinal y entre el CDP 900-1200 estratos laterales. En el rango de 0-400 y 3000-5000 [s] la presencia de ruido y múltiples.

4.2.4. Recuperación de amplitudes

Las ondas al propagarse por la Tierra sufren una atenuación de su amplitud y energía, esto afecta lo que registramos al realizar el levantamiento sísmico. Los factores a los que se debe son los siguientes:

- Pérdidas en el trayecto: como se vio en los antecedentes, las ondas sufren distintos fenómenos al encontrarse con una interfaz o cambio en la estructura del subsuelo, dentro de los efectos esta la refracción, reflexión, difracción y cambio de onda. Estos producen que conforme pasa la onda tenga pérdidas de energía.

- Divergencia esférica o geométrica: este efecto lo podemos ejemplificar en una farola de noche, entre más cercana estemos de la farola, la luz será más intensa y entre más lejos más tenue. La divergencia esférica para un medio homogéneo es vista como una fuente donde la energía se propaga en un radio y éste conforme aumenta, provoca que la energía disminuya. Esto se puede representar por la ecuación 4.1 (Mousa, 2020).

$$A = \frac{E}{(4\pi r^2)} \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 está referida en términos de la energía, donde podemos ver la fórmula del área de una esfera como factor de decaimiento, cuando pasamos de un frente de onda (área de la esfera) a un rayo (r), figura 4.11, la energía decae en $\frac{1}{r^2}$, si ponemos esto en términos de la amplitud A esta decae $\frac{1}{r}$.

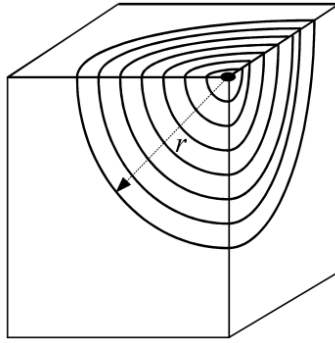


Figura 4.11: *Divergencia esférica vista como la propagación de el rayo con desde una fuente, recuperada de Mousa, 2020*

- Absorción: la absorción es un fenómeno que ocurre en las rocas, este fenómeno sucede cuando la energía cinética se convierte en calor por la fricción en la propagación de ondas.

Para compensar la atenuación de amplitud de las ondas se conocen distintos métodos, entre ellos se encuentran:

- Control de ganancia automática (*AGC* por su siglas en ingles): El AGC es una función que se basa en la relación de la amplitud absoluta promedio y la amplitud deseada, en una ventana de tiempo delimitada. Esta función esta dada por

$$g(t) = \frac{rms_{deseado}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}} \quad (4.2)$$

donde x_i es la amplitud de la traza y N es el número de muestras en la ventana. Esta ecuación es válida para el centro de la ventana. El efecto que tiene en los datos se puede ver en la figura 4.12.

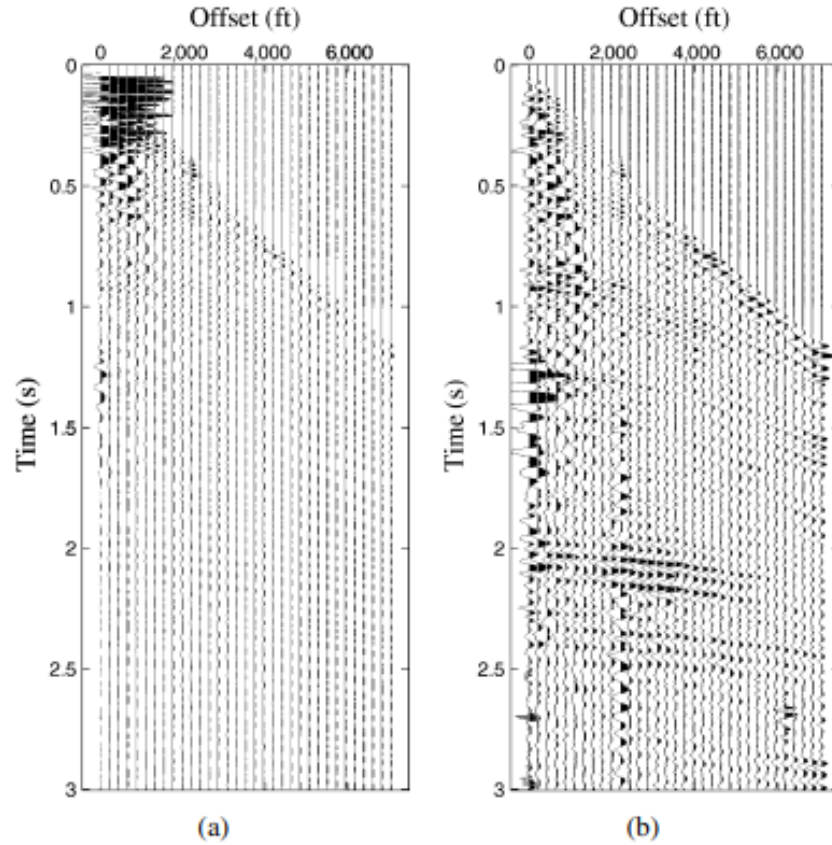


Figura 4.12: Corrección de ganancia automática, tomada de Mousa, 2020

- Corrección por divergencia esférica:

La corrección por divergencia esférica se aplicó a los datos sísmicos, los criterios considerados fueron definidos mediante pruebas en distintos shot points, lo anterior realizando curvas de decaimiento de amplitud en dB/s con la ecuación 4.3.

$$1 \text{ dB} = 20 \log_{10} A \quad (4.3)$$

Una vez que se obtuvieron las gráficas de decaimiento, se compara la gráfica inicial y la posterior a la corrección por divergencia esférica en un rango de offset. A continuación se compara la corrección esférica para rectificar una buena aplicación de la corrección, lo anterior se puede ver en la figura 4.13; se calcularon curvas de decaimiento por rangos de offset con objetivos de control de calidad.

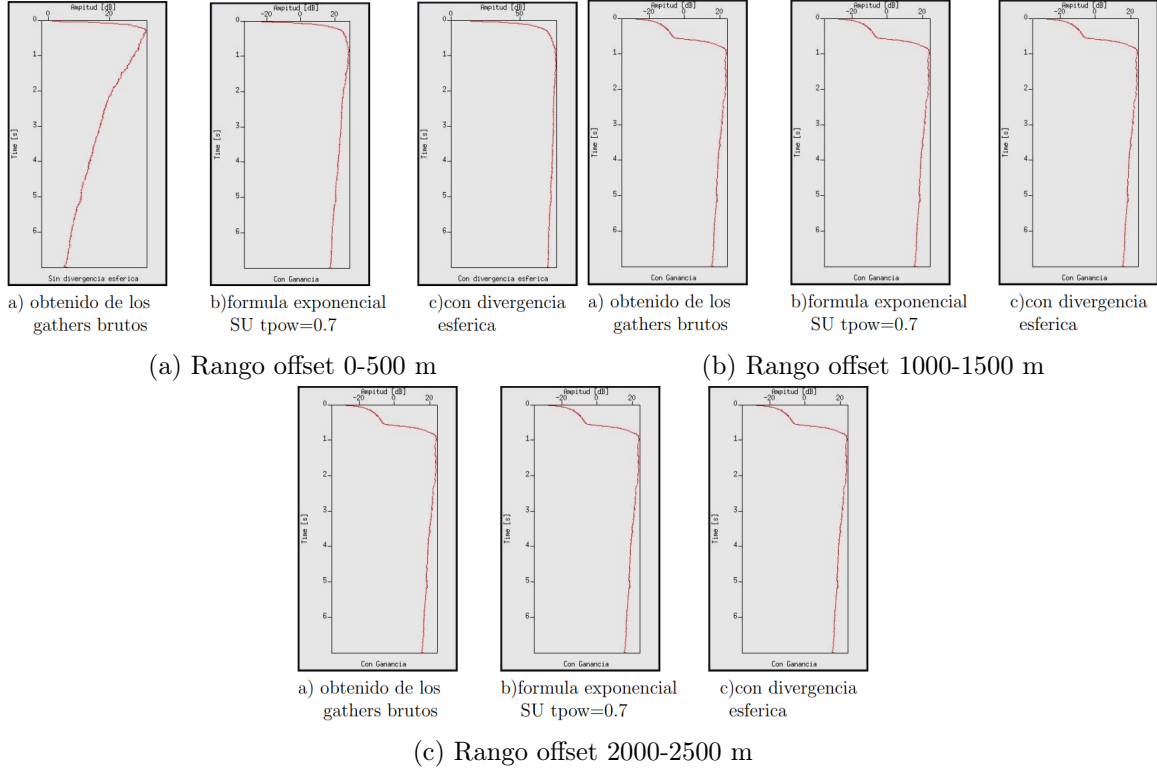


Figura 4.13: Curvas de decaimiento de amplitud, recuperadas de Cureño López, 2009

4.2.5. Análisis de velocidades I

La selección de velocidades (picado), es un análisis de velocidades RMS que se realiza en los datos mediante el estudio de sus gathers con distintos criterios, en la semblanza, velocidades interválicas, CVG (constant velocity gather), CVS (constant velocity stacks) y un display interactivo del campo de velocidades. El objetivo de obtener estas velocidades es para realizar una corrección llamada NMO (normal moveout), para posteriormente realizar el apilamiento de los datos y generar una imagen sísmica de offset cero. El NMO es la diferencia entre el tiempo doble registrado en un offset dado y el tiempo doble registrado en el offset cero para un evento en cada CMP. La forma de registro de un gather considerando un reflector horizontal está dado por la ecuación de una hipérbola y puede expresarse como:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \quad (4.4)$$

donde x es el offset entre fuente y receptor, v es la velocidad del medio y t_0 es el tiempo doble en $\overline{MD}$ y t el tiempo de viaje entre la fuente y el receptor $\overline{SDG}$, como se muestra en la figura 4.14.

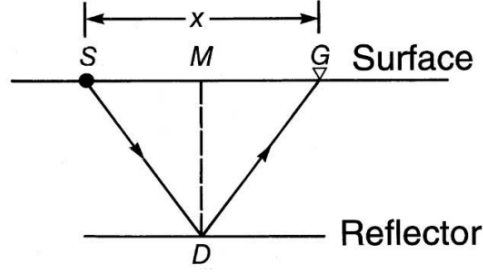


Figura 4.14: Geometría del NMO para un reflector simple, tomada de Yilmaz, 2001

Considerando una Tierra estratificada, tenemos una cantidad de capas con velocidades y espesores dados, lo que genera que la velocidad asociada sea la velocidad RMS dada por la ecuación 4.5.

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta\tau_i \quad (4.5)$$

donde $\Delta\tau_i$ es el tiempo doble considerando las i capas y $t_0 = \sum_{i=1}^N \Delta\tau_i$. Podemos llegar a una forma de la ecuación de tiempo de viaje simplificada de la forma hiperbólica dada por la ecuación 4.6, la cual se puede comparar con la ecuación 4.4 por una aproximación.

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{rms}^2} \quad (4.6)$$

Ahora considerando que la corrección NMO esta dada por la ecuación 4.7:

$$\Delta t_{NMO} = t - t_0 \quad (4.7)$$

donde Δt_{NMO} es la corrección, podemos llevar la ecuación a su forma de velocidad RMS, considerando las variantes ya mencionadas llegando a la ecuación 4.8:

$$\Delta t_{RMS} = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{rms}^2}} - t_0 \quad (4.8)$$

Para aclarar como se ejecuta la corrección de NMO tenemos que considerar la geometría que se presenta en la figura 4.14, si aplicamos la ecuación 4.7 y mostramos la mitad del gather desde el offset cero, obtenemos la figura 4.15 (b), teniendo en cuenta que el NMO se aplica con el objetivo de realizar un apilado se cumple el objetivo.

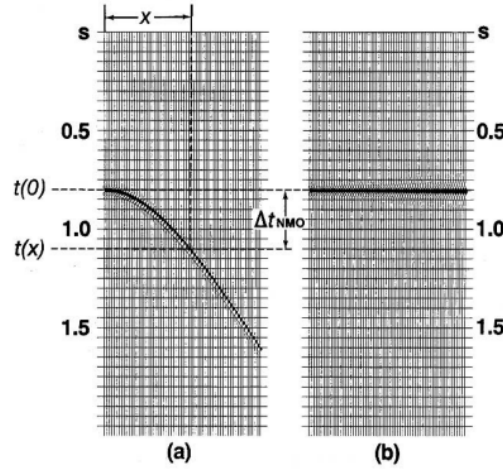


Figura 4.15: Corrección de NMO, (a) antes (b) después de la corrección por NMO de la ecuación 4.7, recuperada de Yilmaz, 2001

Los últimos dos criterios a tomar en cuenta son, en primer lugar una adecuada selección de la velocidad para la corrección, debido a que repercutirá en la horizontalidad del reflector registrado y esto a su vez en el apilado. Lo anterior se aprecia en la figura 4.16.

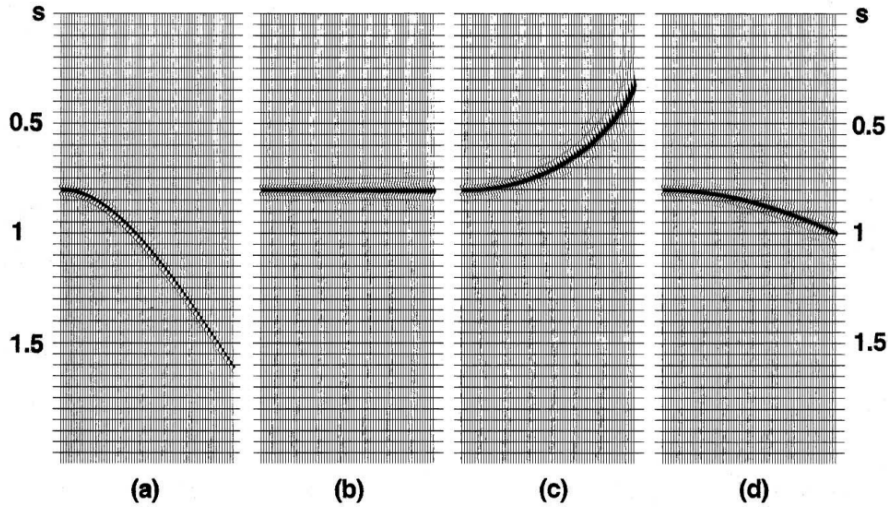


Figura 4.16: Corrección de NMO, (a) CMP gather con un reflector simple con velocidad de desplazamiento de 2264 m/s, (b) Corrección NMO con la velocidad de desplazamiento, (c) Sobrecorrección por una velocidad baja de 2000 m/s, (d) Subcorrección por una velocidad alta 2500 m/s, recuperada de Yilmaz, 2001

Una consecuencia de la aplicación de la corrección NMO es la distorsión de la frecuencia de los eventos someros en offsets largos. Este fenómeno se le llama estiramiento por NMO o NMO *stretching*. Este efecto visto de forma individual para una

reflector se aprecia en la figura 4.17, donde observamos una forma de onda con un periodo dominante T el cual se estira hasta que su periodo es T_0 , una vez que se aplica la corrección NMO, este estiramiento lo podemos ver utilizando la ecuación 4.9.

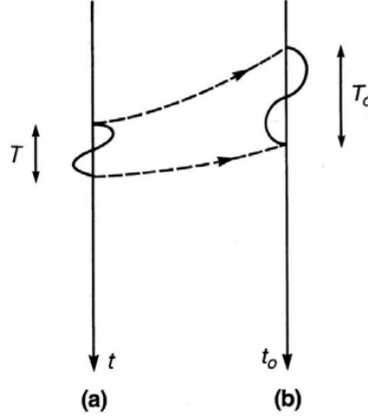


Figura 4.17: Una señal (a) con un periodo T es estirada hacia la señal (b) con un periodo $T_0 > T$ después de la corrección NMO, recuperada de Yilmaz, 2001

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_{NMO}}{t_0} \quad (4.9)$$

Es posible que los términos de la ecuación 4.9 parezcan desconocidos pero Δt_{NMO} es igual al Δt_{RMS} de la ecuación 4.8, f es la frecuencia dominante en el offset cero y Δf el cambio en la frecuencia. En vista de lo mencionado surge el silenciado o *mute*, que es la segunda consideración, la cual elimina zonas en las que surge el estiramiento. Existen distintos tipos de mute y entre ellos se encuentra el que se rige por el porcentual de estiramiento obtenido de la ecuación 4.9, éste fenómeno y su aplicación se aprecian en la figura 4.18, donde se visualiza un gather con una secuencia reflectiva, su posterior corrección NMO con los efectos del estiramiento y la aplicación del mute antes de apilar.

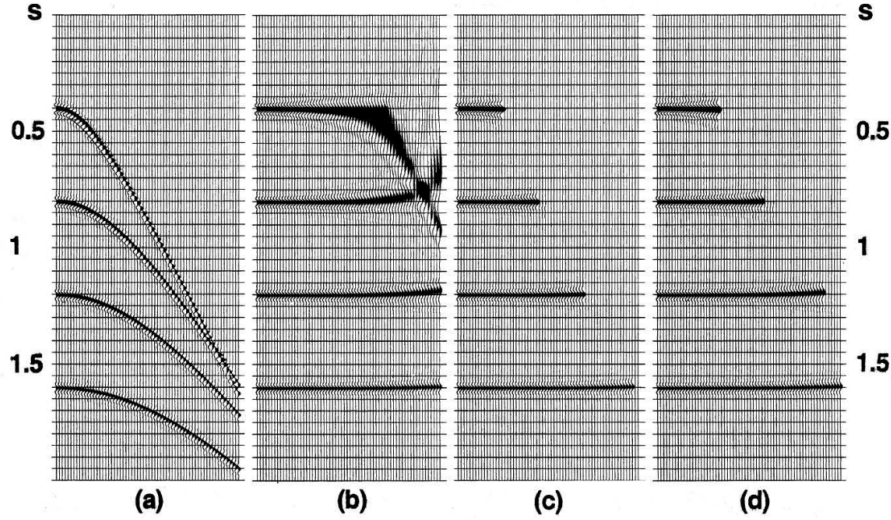


Figura 4.18: Aplicación de mute. (a) gather, (b) corrección NMO con función RMS, (c) después de la aplicación de mute utilizando límites de estiramiento de 50 % y (d) después de la aplicación de mute utilizando límites de estiramiento de 100 %, recuperada de Yilmaz, 2001

El proceso de picado de velocidades presenta los siguientes componentes principales:

- Semblanza:

La semblanza se puede ver como el espectro de velocidad, el cual se obtiene de tomar un CMP gather, al cual se le aplica la corrección NMO y se apila en una traza, este proceso se repite en un rango de velocidades y después se juntan las trazas apiladas con distintas velocidades en un gráfico. Haciendo lo anterior para un CMP gather con un solo reflector con una velocidad de 3000 m/s y un rango de velocidades para la iteración de 2000 a 4300 m/s obtenemos la figura 4.191.a. La metodología se puede aplicar a casos con más reflectores como en la figura 4.191.b, donde se sigue respetando que la velocidad que más resalta dentro del espectro es la velocidad del reflector. Cabe mencionar que los espectros se pueden representar de distintas formas y la más utilizada es la de contornos y sus variaciones.

Teniendo en cuenta que la calidad del espectro de velocidad depende de la relación señal-ruido, se crearon distintas medidas de coherencia para realizar un mejor picado, entre ellas la Semblanza. Para establecer su ecuación se considera un CMP con reflector simple. Definimos la amplitud de apilamiento S en el tiempo doble del offset cero como t_0 como:

$$S = \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)} \quad (4.10)$$

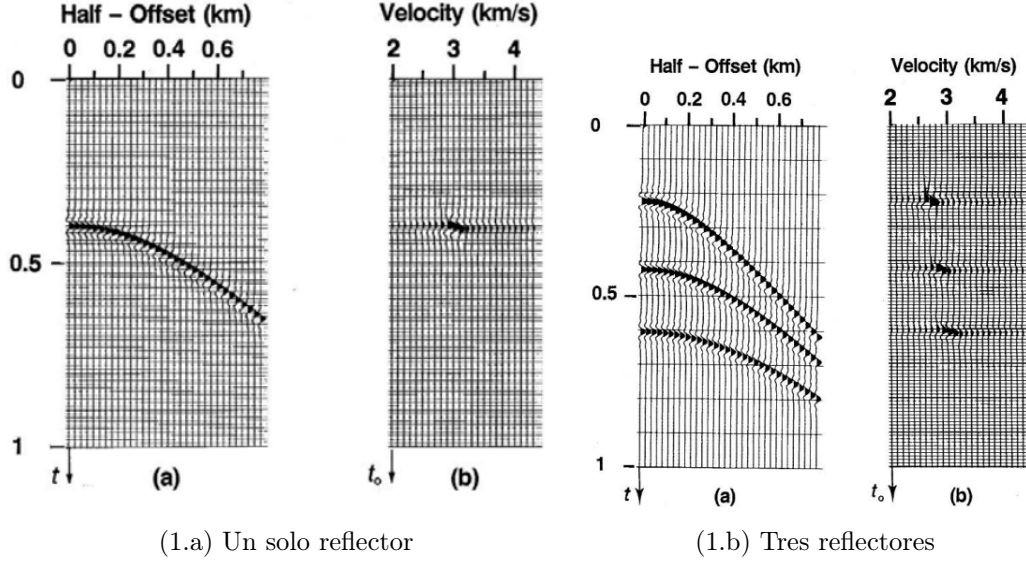


Figura 4.19: Transformación de un gather CMP sintético de offset al dominio de velocidad, cada traza en (b) es un apilado de las trazas CMP gather (a) aplicando una velocidad constante para corrección NMO, recuperada de Yilmaz, 2001

Donde $f_{i,t(i)}$ es el valor de la amplitud en la i -ésima traza en el tiempo doble $t(i)$ y M es el número de trazas en el CMP Gather. Como $t(i)$ dependerá de la velocidad que se pruebe v_{stk} se define como:

$$t(i) = \sqrt{t_0^2 + \frac{x_i^2}{v_{stk}^2}} \quad (4.11)$$

Teniendo las ecuaciones 4.10 y 4.11 podemos definir a la Semblanza como:

$$NE = \frac{1}{M} \frac{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)}}{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)}^2} \quad (4.12)$$

En la ecuación 4.12, la suma respecto a t se debe a una suma en una ventana de tiempo T . Esta ecuación es la relación normalizada de la entrada y la salida de energía o también es vista como una versión de la suma crosscorelacionada de la energía normalizada.

- Gather de velocidad constante (*CVG*):

Éste método consiste en mostrar un CMP gather el cuál ha sido corregido por NMO con distintas velocidades, ya sea con un rango de velocidades o con un porcentaje respecto a una velocidad dada. Como se muestra en la figura 4.20 se tiene el gather con una selección óptima, el gather original y una serie de

gathers con distintas velocidades, todas estas con la corrección NMO.

El objetivo de ésta serie es apreciar de forma visual a qué velocidad se obtiene una mejor horizontalidad del reflector y se selecciona.

- Apilados de velocidad constante (*CVS*):

The constant-velocity stack (*CVS*, por sus siglas en inglés) tiene las mismas características que los *CVG*, es un método de picado de velocidades por medio del apilado de los datos, dónde el panel puede representar un rango de velocidades con las cuáles se les aplica la corrección NMO a los datos y se apilan como en la figura 4.21, o también una variación porcentual respecto a una velocidad dada como es el caso de la figura 4.22. Existen consideraciones respecto al uso de *CVS*, la primera es el rango de velocidades necesario para apilar los datos, esto surge considerando las velocidades teóricas esperadas, así como saber qué características complejas se pueden resaltar con velocidades altas. La segunda es el espaciamiento entre los picados, esto viene de la selección de CDP debido al número de CDP's con los que cuenta la línea así como las características estructurales esperadas.

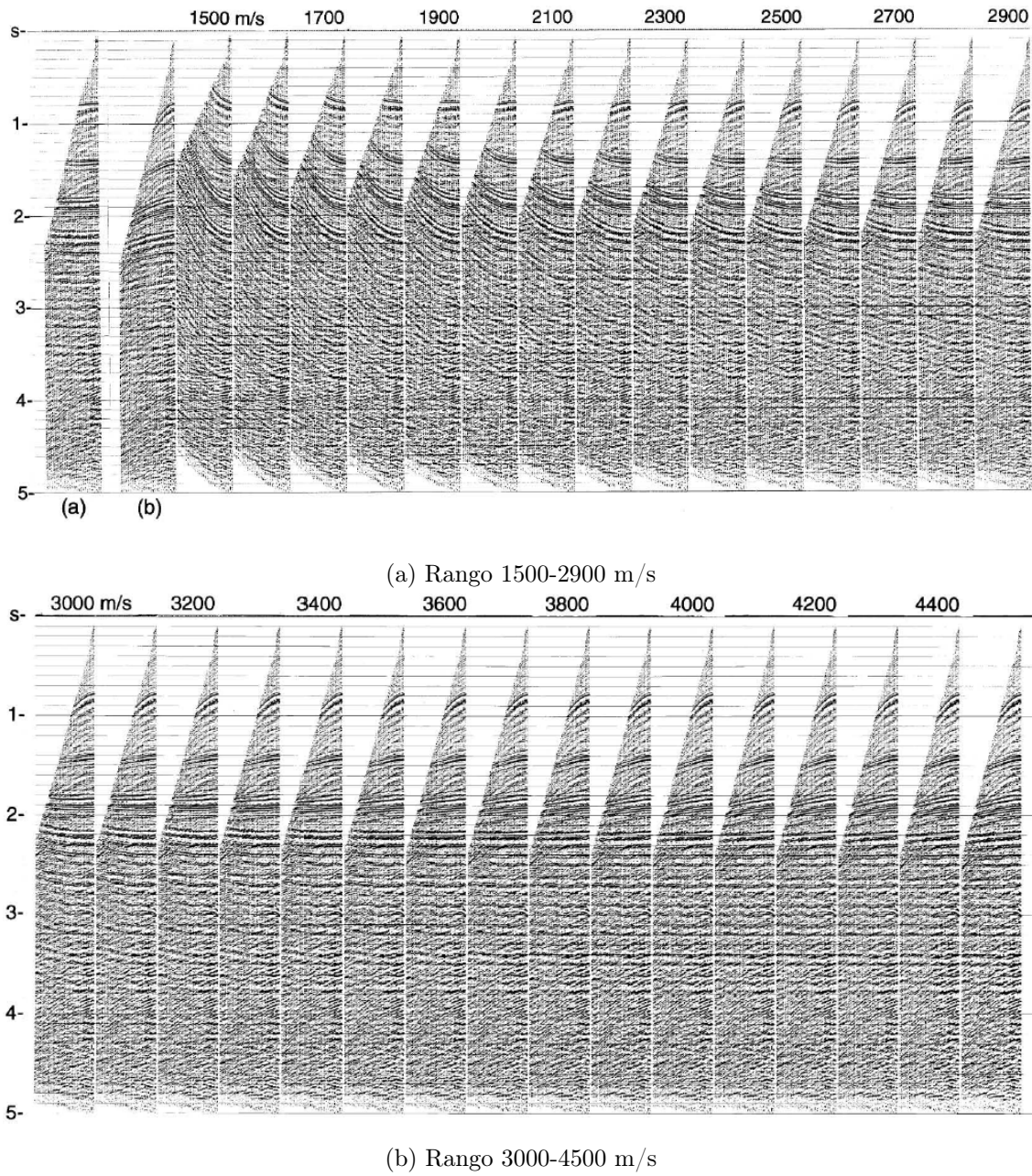


Figura 4.20: Corrección NMO a velocidad constante aplicado a un mismo CMP gather (b), con un rango de velocidades 1500-4500 m/s. Seleccionado de los eventos más horizontales se seleccionaron las velocidades y se aplicó el NMO obteniendo (a), recuperada de Yilmaz, 2001

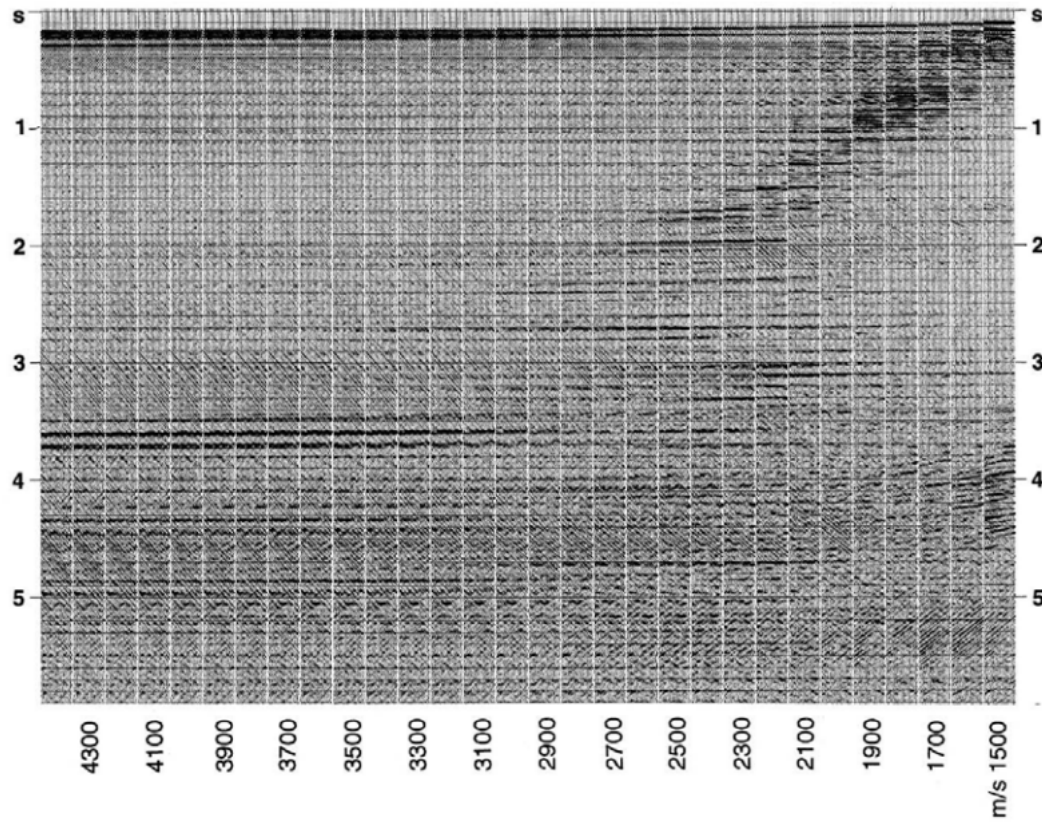


Figura 4.21: CVS de 24 CMP gathers usando un rango de velocidades de 1500-4400 m/s, recuperada de Yilmaz, 2001

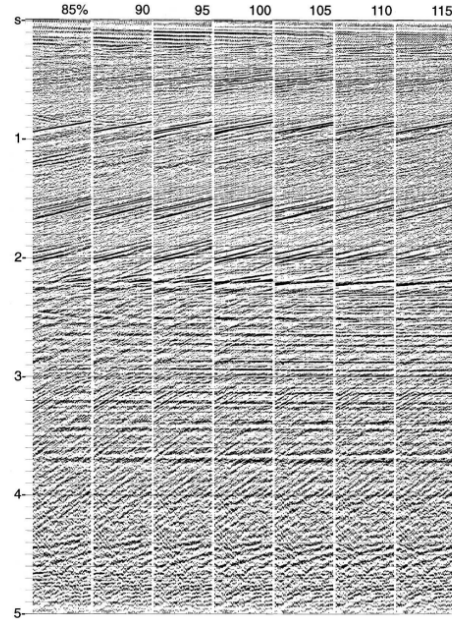


Figura 4.22: Apilados de 100 CMP gathers usando siete velocidades las cuales son un porcentaje de la función central, recuperada de Yilmaz, 2001

Función de velocidades promedio: En este proyecto, para comenzar con el proceso del picado de velocidades para cada línea, primero se realizó un picado en cinco CDP's por cada una y se promediaron los datos picados de todas para obtener una función de velocidades promedio, con el procesamiento mencionado anteriormente. Al campo obtenido se le realizó un suavizado de 10 % y éste se usó como referencia para el picado de todas líneas, comenzando con un picado cada 40 CDP's.

Un ejemplo de lo anterior se muestra en la figura 4.23, donde se aprecia una velocidad constante en todos los CDP's a un tiempo dado.

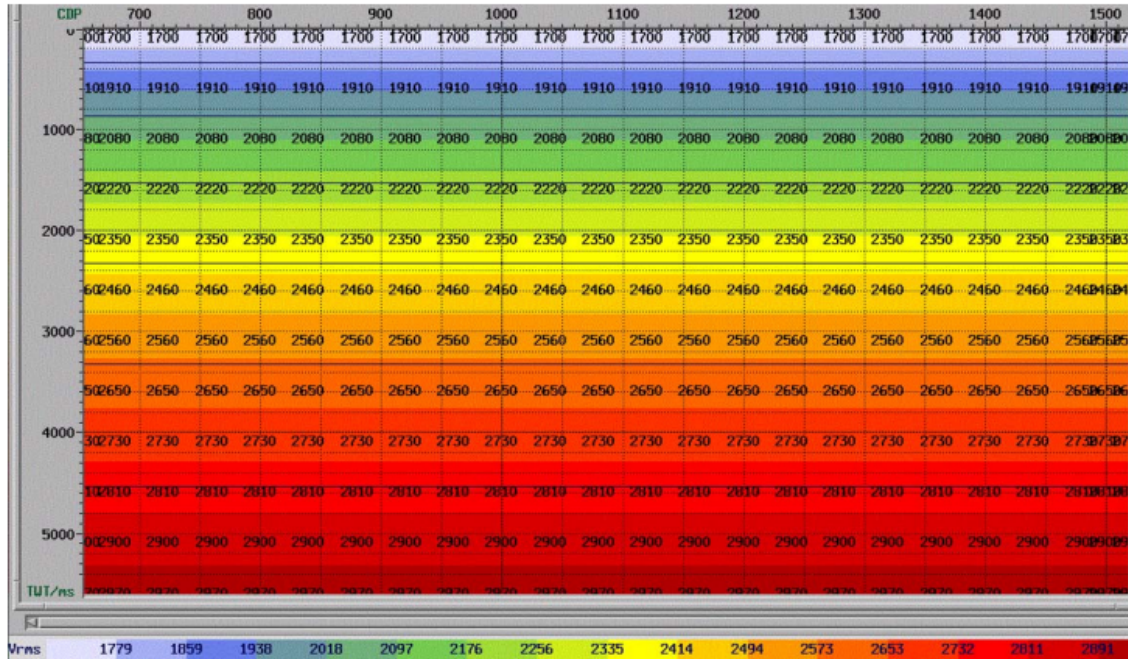


Figura 4.23: Campo de velocidades promedio, recuperado de Vázquez Ramírez, 2020

Una vez que se tiene el campo de velocidades promedio, se procedió a establecerlo para cada línea. Esto quiere decir que se repitió las veces necesarias el CDP cada 40 CDP's hasta cubrir toda la línea y generar su archivo .nmo correspondiente. Para iniciar con el picado de velocidades se ingresó al software: los gathers corregidos por geometría, su campo de velocidades de entrada y el archivo de salida. El picado de velocidades dependiendo del método empleado tiene distintas características, en este caso se utilizaron cuatro ventanas para realizar el picado. Estas ventanas fueron: la semblanza junto con una velocidad interválica, los gathers a velocidad constante, los apilados a velocidad constante y por último el campo de velocidades.

La interpretación conjunta de estas ventanas, así como su significado y el criterio del geofísico que realiza el análisis (picado), dan como resultado el primer campo de velocidades. Un ejemplo de cómo se realiza el picado de velocidades lo ofrece Vázquez Ramírez, 2020 en la figura 4.24.

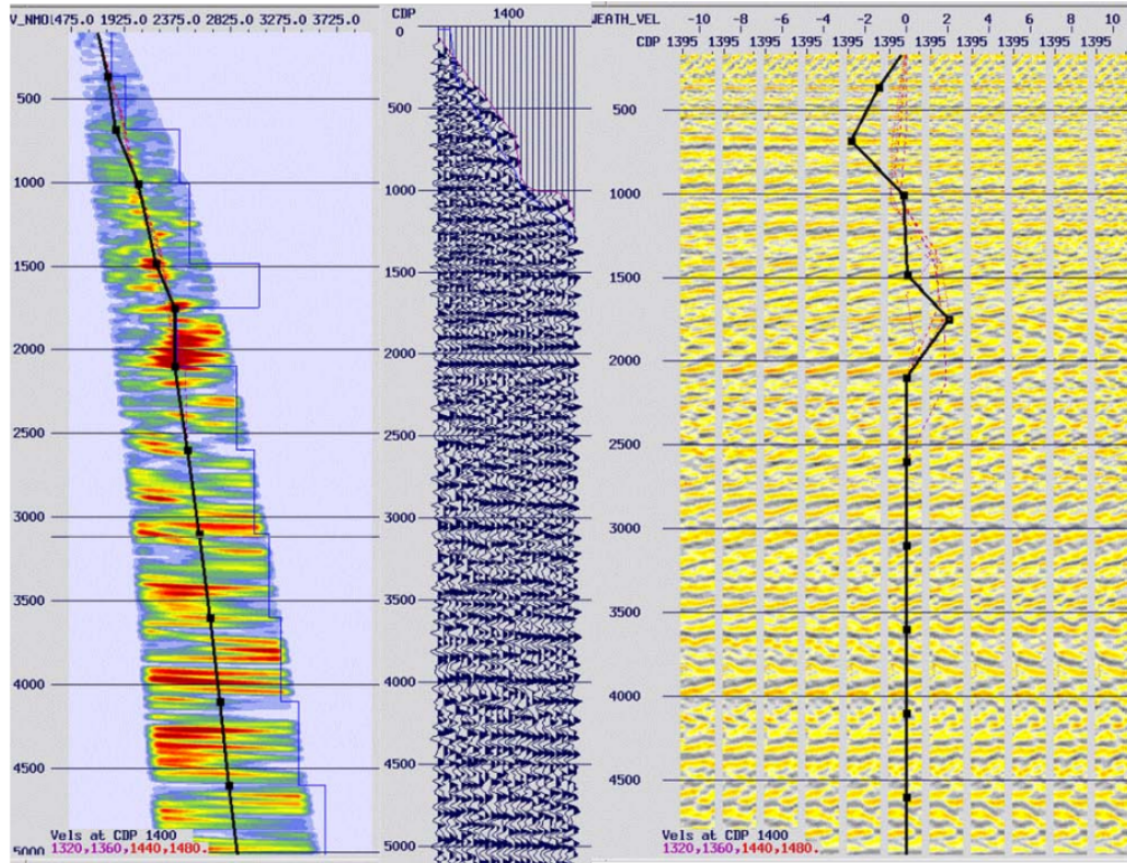
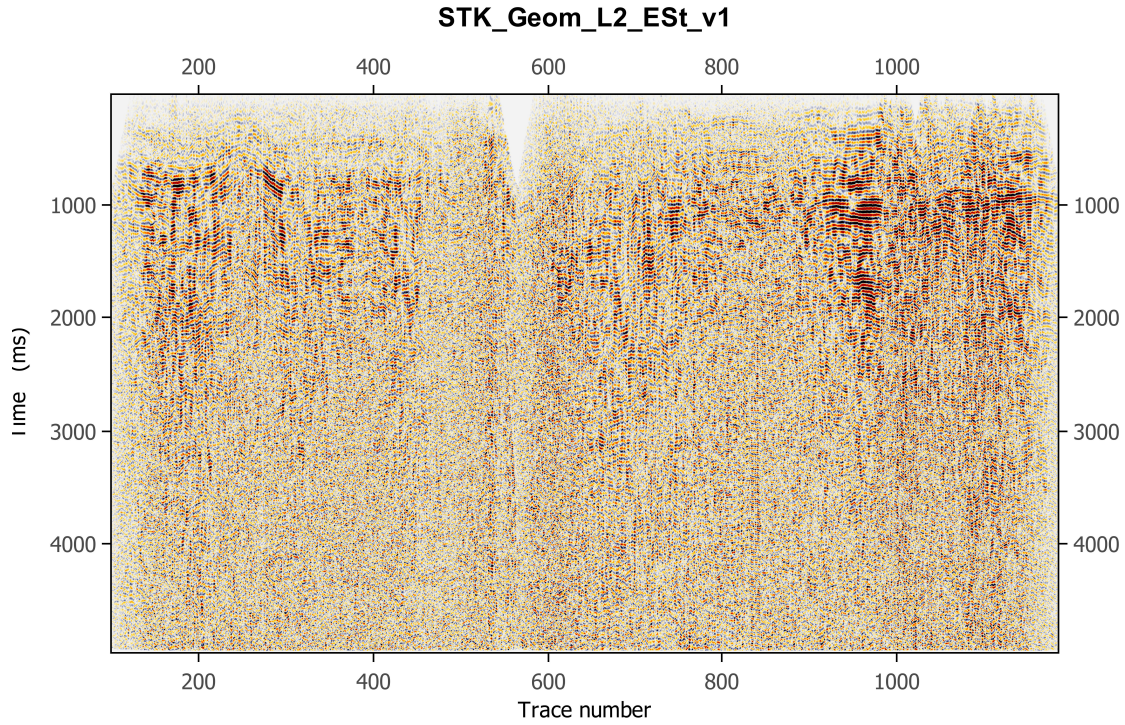
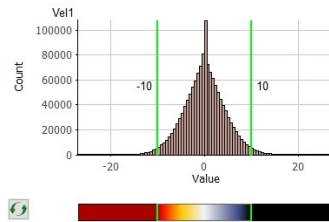


Figura 4.24: Ejemplo de picado de velocidades con semblanza, velocidades RMS, gather y apilados a velocidad constante, recuperado de Vázquez Ramírez, 2020

Para este paso del flujo de procesamiento se realizó el picado de velocidades cada 40 CDP's (1000 m), obteniendo el campo de velocidades para cada línea, posteriormente se realizó el control de calidad (QC) en los campos de velocidad revisando la continuidad de las velocidades. El siguiente QC se realizó aplicando la corrección por NMO a los datos y se generó su stack (figura 4.25), el cual se compara con el QC stack de la geometría (figura 4.10).

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma

Figura 4.25: QC stack primer picado de velocidades para la línea 2

Los cambios entre la figura 4.10 y 4.25 se presentan en la mejora de la continuidad de los reflectores entre los CDP's 310-460, 700-900 y 1000-1100, el resto de la sección permaneció sin cambios.

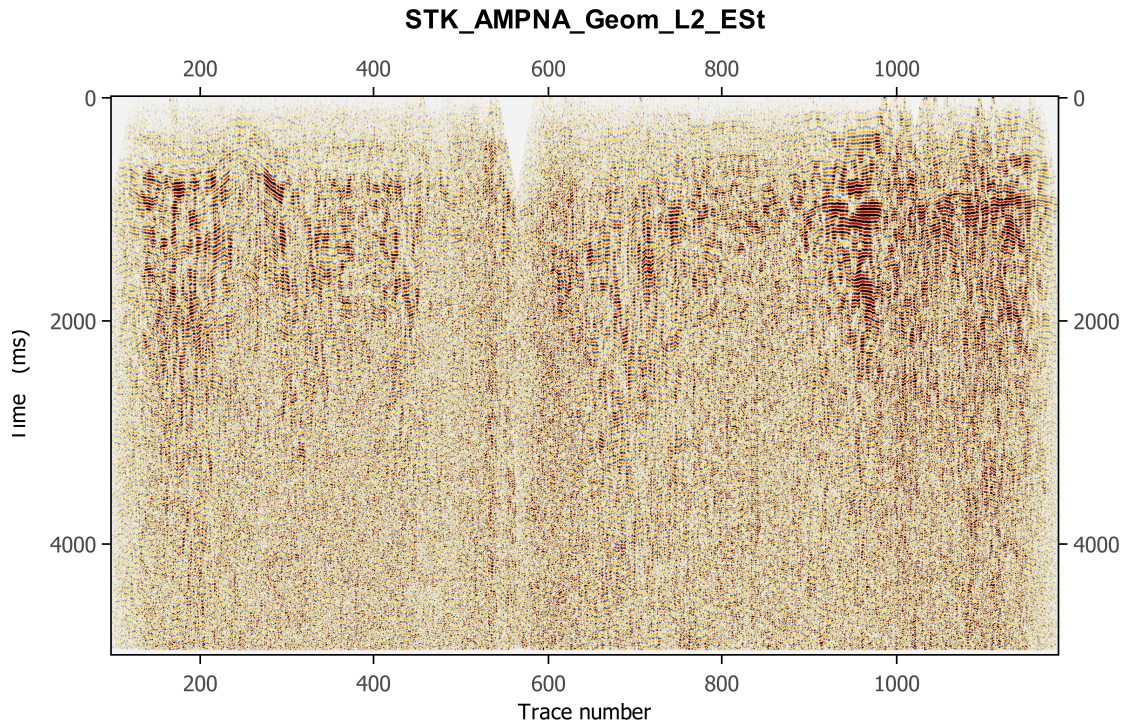
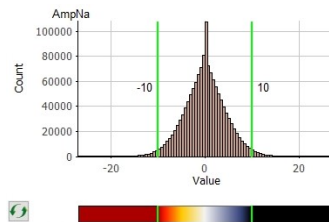
4.2.6. Atenuación de ruido (AMPNA)

Considerando al ruido como cualquier señal que afecte el procesamiento o interpretación de los datos, este puede tener distintos orígenes:

- Ambiental: Vehículos, personas, tormentas, viento.
- Instrumental: Defecto de la bobina, mal acoplamiento, interferencia y del registrador.
- Fuente: Explosiones, sismos.

La atenuación de ruido impulsivo fue aplicada mediante dos pasos, el primero fue un módulo de atenuación aplicado en cada disparo de la línea, el módulo funciona mediante ventanas de tiempo a lo largo de las trazas, éste realiza un análisis de las amplitudes en el dominio del tiempo. Las amplitudes son comparadas con el promedio de la ventana analizada y en caso de no cumplir con los criterios de comparación, ésta se elimina y se interpola. Los criterios de comparación que ingresan al módulo determinan por cuánto puede variar una amplitud respecto a un número de trazas, la variación de amplitud al inicio y final de la ventana y por último considera el tamaño de la ventana.

Posterior a la aplicación del módulo, se realizó un control de calidad donde se revisaron los disparos para la línea. Con esto se buscó encontrar amplitudes anómalas remanentes y posible ruido, fue aplicado un segundo proceso de atenuación con criterios de comparación menores. Este paso fue repetido hasta obtener disparos aceptables. Por último para verificar el paso de atenuación de ruido se realizó el control de calidad del apilado que se presenta en la figura 4.26.

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma

Figura 4.26: QC stack atenuación de amplitud para ruido aleatorio para la línea 2

4.2.7. Deconvolución

El proceso de deconvolución busca regresar a los datos a la secuencia reflectiva que corresponde a la estructura del subsuelo.

Para comprender la deconvolución tenemos que retomar desde la convolución y tomar los siete supuestos mencionados por Yilmaz, 2001.

Supuesto 1. La Tierra tiene capas horizontales.

Supuesto 2. La fuente solo genera ondas compresivas.

Supuesto 3. La forma de onda no cambia al desplazarse en el subsuelo.

Con estos supuestos en mente podemos retomar el modelo convolucional en tiempo como:

$$x(t) = w(t) * e(t) + n(t) \quad (4.13)$$

donde $x(t)$ es el sismograma, $w(t)$ es la forma de onda, $e(t)$ es la respuesta al impulso de la Tierra y $n(t)$ el ruido aleatorio. Para simplificar la ecuación asumimos términos y surgen los siguientes supuestos.

Supuesto 4. $n(t) = 0$.

Supuesto 5. La forma de onda es conocida ($w(t)$).

De esta forma obtenemos un problema determinista como:

$$x(t) = w(t) * e(t) \quad (4.14)$$

donde $e(t)$ es desconocido.

Yilmaz, 2001 realiza un ejercicio de convolución y autocorrelación en frecuencia y tiempo, donde muestra que la secuencia reflectiva tiende a ser una banda de frecuencias y al realizar la convolución, el resultado tiene características de la forma de onda, por lo cual llega al siguiente supuesto.

Supuesto 6. La secuencia reflectiva es aleatoria. En consecuencia el sismograma tiene características de la forma de onda en el espectro y autocorrelación.

Para entender el proceso de revertir la convolución surge el termino filtro inverso, considerando un operador $f(t)$, el sismograma $x(t)$ y la secuencia reflectiva $e(t)$, surge la ecuación 4.15.

$$e(t) = f(t) * x(t) \quad (4.15)$$

Tomando la ecuación de la deconvolución 4.14 y sustituyendo obtenemos la ecuación 4.16.

$$x(t) = w(t) * f(t) * x(t) \quad (4.16)$$

Esta ecuación nos dice es que $x(t)$ esta actuando como un delta de Kronecker simplificando la ecuación como:

$$\delta(t) = w(t) * f(t) \quad (4.17)$$

Despejando para $f(t)$ obtenemos:

$$f(t) = \delta(t) * \frac{1}{w(t)} \quad (4.18)$$

Teniendo en cuenta que la función $f(t)$ es una función inversa a $w(t)$, una forma de obtener $f(t)$ es mediante el uso de la trasformada z, esta nos permite realizar análisis discretos de una función y se describe por la ecuación 4.20.

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x[n]z^n \quad (4.19)$$

Con $x[n]$ una secuencia discreta en tiempo, $X(z)$ la transformada z de $x[n]$ y $z = \exp(-i\omega\Delta t)$.

Para ejemplificar como se obtiene el filtro inverso podemos considerar a la onda $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$, si realizamos la transformada z obtenemos:

$$W(z) = 1 - \frac{1}{2}z \quad (4.20)$$

Retomando la ecuación 4.18 y considerando que Z tiene relación con la transformada de fourier y la transformada de fourier de un delta es 1 tenemos:

$$F(z) = \frac{1}{1 - \frac{1}{2}z} \quad (4.21)$$

Considerando que una serie puede representarse como:

$$\frac{1}{1 - r} = \sum_{n=0}^{\infty} r^n \quad (4.22)$$

Con $r = \frac{1}{2}z$ podemos expresar la ecuación 4.21 de la forma:

$$F(z) = 1 + \frac{1}{2}z + \frac{1}{4}z^2 + \dots \quad (4.23)$$

Retomando la ecuación 4.20 los términos $F(Z)$ son los valores discretos de la serie de tiempo $f(t) = (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \dots)$

Con lo anterior podemos realizar una comparativa, en este caso con ayuda de Yilmaz, 2001, que presenta la tabla 4.1 donde compara la ondícula de entrada, la inversa y sus respectivas transformadas z , para mostrar como se acercan al pico de retardo cero (salida deseada).

	1	$-\frac{1}{2}$	Salida	
$\frac{1}{2}$	1			1
	$\frac{1}{2}$	1		0
		$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{4}$

Tabla 4.1: Aplicación del filtro inverso truncado $(1, \frac{1}{2})$, con la ondícula de entrada $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$ y salida deseada $(1, 0, 0)$, recuperado de Yilmaz, 2001

En la búsqueda de encontrar una forma de obtener un error menor lo cual representa un resultado más cercano al pico de retraso cero, se llega al filtro inverso por mínimos cuadrados. El método busca encontrar los valores de $f(t)$ mediante la salida real y deseada de la convolución mediante un sistema de ecuaciones. Esto lo podemos

visualizar con el ejemplo de $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$ pero ahora $f(t) = (a, b)$ donde a y b serán los valores que obtengan el mínimo error cuadrático.

Se realiza la convolución de $f(t)$ con $w(t)$ como se muestra en la tabla 4.2. Se toma la diferencia entre cada término de la salida obtenida y deseada, se eleva al cuadrado y se suma para obtener la energía acumulada del error L con el fin de obtener a y b , ver ecuación 4.24.

	1	$-\frac{1}{2}$	Salida real	Salida deseada
b	a		a	1
	b	a	$b - a/2$	0
		b	a	$-b/2$
				0

Tabla 4.2: Convolución del filtro (a, b) con $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$, recuperado de Yilmaz, 2001

$$L = (a - 1)^2 + (b - \frac{a}{2})^2 + (\frac{b}{2})^2 \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \left[(a - 1)^2 + \left(b - \frac{a}{2}\right)^2 + \frac{b^2}{4} \right] \quad (4.25)$$

$$= \frac{\partial}{\partial a} (a - 1)^2 + \frac{\partial}{\partial a} \left(b - \frac{a}{2}\right)^2 + \frac{\partial}{\partial a} \frac{b^2}{4} \quad (4.26)$$

$$= 2(a - 1) - \left(b - \frac{a}{2}\right) \quad (4.27)$$

$$= 2a - 2 - b + \frac{a}{2} \quad (4.28)$$

$$= \frac{4a + a - 4 - 2b}{2} \quad (4.29)$$

$$= \frac{5a - 2b - 4}{2} \quad (4.30)$$

$$= \frac{5a}{2} - b = 2 \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \left[(a-1)^2 + \left(b - \frac{a}{2}\right)^2 + \frac{b^2}{4} \right] \quad (4.32)$$

$$= \frac{\partial}{\partial b} (a-1)^2 + \frac{\partial}{\partial b} \left(b - \frac{a}{2}\right)^2 + \frac{\partial}{\partial b} \frac{b^2}{4} \quad (4.33)$$

$$= 0 + 2 \left(b - \frac{a}{2}\right) + \frac{b}{2} \quad (4.34)$$

$$= 2b - a + \frac{b}{2} \quad (4.35)$$

$$= \frac{4b + b - 2a}{2} \quad (4.36)$$

$$= \frac{5b - 2a}{2} \quad (4.37)$$

$$= -a + \frac{5b}{2} = 0 \quad (4.38)$$

Al realizar las derivadas parciales respecto a a y b , ecuaciones 4.31 y 4.38 podemos acomodar los valores en un sistema de ecuaciones y resolverlo de la siguiente forma.

$$\begin{pmatrix} \frac{5}{2} & -1 \\ -1 & \frac{5}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.39)$$

Para este caso del ejemplo anterior $(a, b) = (0.95, 0.38)$. Si se realiza una comparativa entre el filtro inverso y el filtro inverso de mínimos cuadrados, éste último tiene un error menor (se acerca más a la salida deseada).

Retomando los supuestos hay uno faltante, éste nos habla de la importancia y los cambios que se tienen con una onda de fase con retraso y sin retraso, lo cual se puede resumir diciendo que una onda de fase mínima tiene el mínimo retraso en la energía.

Supuesto 7. La ondícula sísmica es de fase mínima, por lo tanto tiene una inversa de fase mínima.

Una vez que tenemos todos los supuestos y todo claro hasta el momento podemos unificarlo. Es entonces que surge el concepto del filtro de Wiener óptimo. El filtro de Wiener lo podemos entender desde la ecuación 4.39 que al dividir entre 2 se llega a la ecuación 4.40.

Al buscar los componentes de la ecuación 4.40 podemos notar en la tabla 4.3 que la primer columna de la ecuación corresponde a la autocorrelación de la forma de onda, ahora si obtenemos la crosacorrelación de la salida deseada con la forma de onda obtenemos al lado derecho de la ecuación 4.40, esto se puede comprobar con la tabla 4.4.

$$\begin{pmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{5}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

	1	$-\frac{1}{2}$	Salida
1	$-\frac{1}{2}$		$\frac{5}{4}$
	1	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$

Tabla 4.3: Autocorrelación de la ondícula de entrada $w(t) = (1, -\frac{1}{2})$, recuperado de Yilmaz, 2001

1	0	0	Salida
1	$-\frac{1}{2}$		1
	1	$-\frac{1}{2}$	0

Tabla 4.4: Croscorelación de la salida deseada $(1, 0, 0)$ con la ondícula de entrada $(1, -\frac{1}{2})$, recuperado de Yilmaz, 2001

A partir de lo mencionado podemos generar una ecuación de matrices con valores conocidos a partir de la autocorrelación y croscorelación, esto tiene la forma de la ecuación 4.41, donde r_i son los valores de la autocorrelación desplazados, g_i son los valores de la croscorelación y a_i son los coeficientes del filtro de Wiener. Una forma en la que podemos ver la aplicación del filtro de Wiener es en un flujo de proceso del mismo, esto se aprecia en la figura 4.27.

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

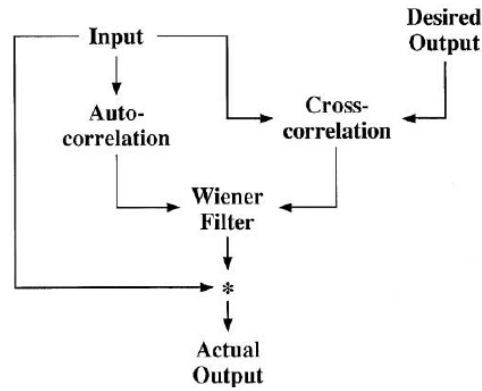


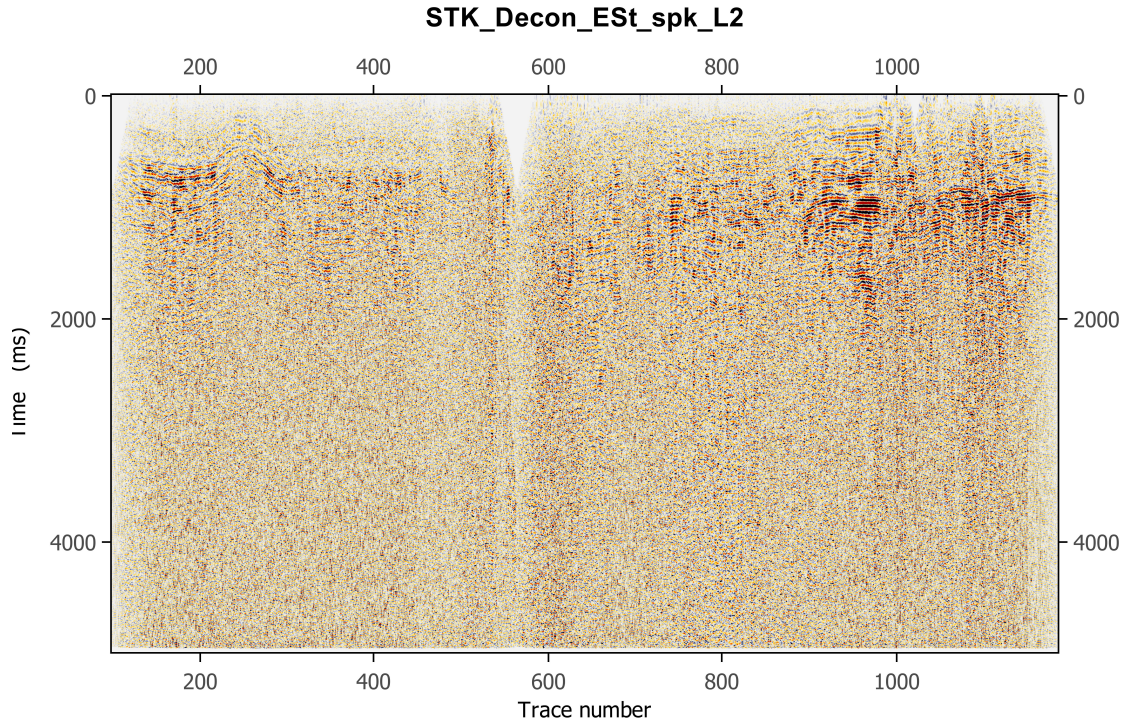
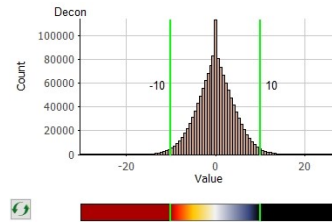
Figura 4.27: Flujo de proceso del filtro inverso, recuperado de Yilmaz, 2001

Por último y más sencillo la deconvolución spiking, es un caso particular del filtro de Wiener donde la salida deseada es $(1, 0, 0, \dots, 0)$, así la ecuación 4.41 cambia a la ecuación 4.42, la cual se puede resolver por métodos numéricos.

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

La deconvolución aplicada en este reprocesamiento fue la deconvolución spiking, para su realización fue necesario diseñar la señal de la fuente con los criterios conocidos.

Se procedió con una deconvolución consistente con la superficie; se comparó el espectro de amplitud de ambas deconvoluciones para la línea 2, 12 y 16. De lo anterior se concluyó que la deconvolución spiking tiene un resultado razonable, debido a que obtiene un espectro de amplitudes cercano a la horizontal. El resultado de la deconvolución se analizó con el apilado que se muestra en la figura 4.28.

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma

Figura 4.28: QC stack deconvolución para la línea 2

Al realizar la deconvolución, se aprecia que de la figura 4.26 a la 4.28 existen diferencias tanto en el espesor, claridad y presencia de reflectores posteriores a los dos mil ms. Mientras que antes de los dos mil ms los reflectores siguen la distribución previa con una disminución de la claridad.

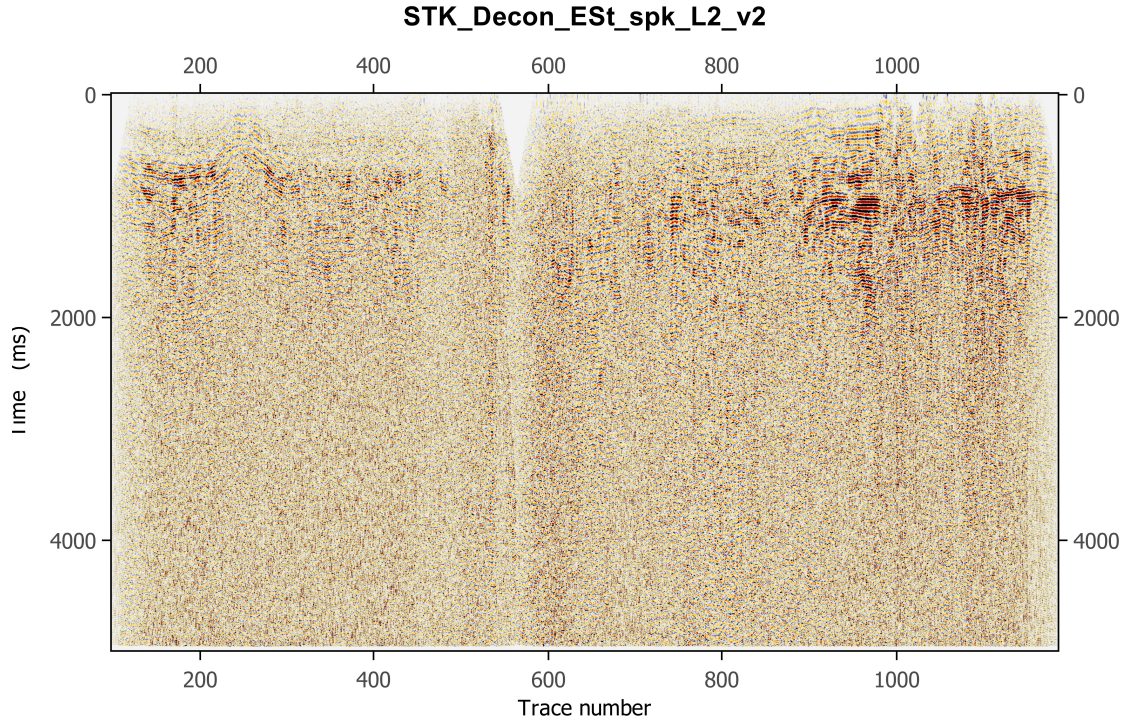
4.2.8. Análisis de velocidades II

El segundo picado de velocidades se realizó con los mismos elementos que en el primer análisis de velocidades, las diferencias se encuentran en las entradas al software: El campo de velocidad de entrada, los datos.

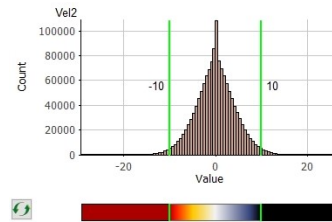
- El campo de velocidad de entrada El campo obtenido del primer picado de velocidades se modificó, ya que el segundo picado de velocidades se consideró cada 20 CDP's, esto duplicando cada CDP picado hasta obtener la distribución cada 20 CDP's a lo largo de la línea.

- En este caso los datos de entrada incluyen la deconvolución.

Al igual que en la sección 4.2.5, se realizó un QC del campo de velocidades para rectificar la continuidad y comparar con el campo anterior. En un segundo QC se aplicó la corrección NMO a los datos obtenidos de la deconvolución, del cual se generó la figura 4.29 y se comparó con el QC stack anterior 4.28.



(a) Apilado CDP y tiempo [ms]



(b) Histograma

Figura 4.29: QC stack segundo picado de velocidades para la línea 2

4.2.9. Estáticas residuales (RS)

Las estáticas residuales son correcciones de tiempo aplicadas a lo largo de una traza, éstas se realizan al comparar los tiempos de un reflector en un número trazas para determinar si una de las trazas respecto al conjunto de las mismas tiene un desfase, posterior a esto, por métodos iterativos se realiza el cálculo y corrección de los tiempos para obtener una alineación de las reflexiones a lo largo de las trazas en

un CDP gather.

En este escrito se trabajó con estáticas residuales consistentes con la superficie, para las cuales los retrasos en tiempo son solamente debido a la posición de la fuente y al receptor. Para realizar esto tenemos que considerar el modelo que se muestra en la figura 4.30.

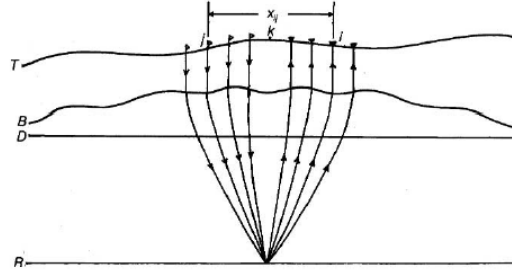


Figura 4.30: Modelo de estáticas consistente con la superficie, T =topografía, B =base de la capa meteorizada, D =datum de referencia, R =reflector profundo, j = índice de fuente, i = índice de receptor, k =punto medio, x_{ij} es el espaciado fuente receptor. recuperado de Yilmaz, 2001

De acuerdo con Yilmaz, 2001, las estáticas residuales se pueden ver en tres pasos principales:

1. Picado del tiempo t_{ij} . Esto se lleva a cabo con ayuda de una crosscorelación de las trazas en un CMP gather y una traza piloto. En este proceso los criterios a considerar son la ventana de selección (trazas) de la croscorrelación, un desplazamiento que permita seguir el horizonte y un criterio de construcción de la traza piloto.

t_{ij} es el tiempo de viaje de la j -ésima fuente en el i -ésimo receptor para el k -ésimo punto medio $k = (i + j)/2$ en una ventana de tiempo h , puede modelarse con la figura 4.30

2. Modelar t_{ij} , es decir obtener t'_{ij} mediante la ecuación 4.43 y descomponerla en sus componentes.

$$t'_{ij} = s_j + r_i + G_k + M_{kx_{ij}^2} \quad (4.43)$$

Donde s_j es el cambio de tiempo de la estática residual en la j -ésima fuente; r_i es el cambio de tiempo de la estática residual en el i -ésimo receptor; G_k es la diferencia en tiempo del tiempo doble para un CMP de referencia y el tiempo de viaje en el K -ésimo CMP a lo largo del h -ésimo horizonte; y $M_{kx_{ij}^2}$ el moveout residual que se asume parabólico. Considerando que se tienen más ecuaciones que incógnitas, formulamos un problema de mínimos cuadrados entre el tiempo observado t_{ij} y el tiempo modelado t'_{ij} de la forma de la ecuación 4.44

$$E = \sum_{ij} (t_{ij} - t'_{ij})^2 \quad (4.44)$$

Para la obtención de los valores de s_j y r_j se sustituye t_{ij} en la ecuación 4.43 y se busca el error mínimo de la ecuación 4.44, generando la ecuación 4.45.

Esto genera un conjunto de ecuaciones, las cuales se resuelven mediante el método Gauss-Seidel. Para ello se requiere un modelo con G_k, M_k, r_i, s_j (valores de inicio), en caso de no contar con ellos, se evalúan con valor igual a cero, es importante que éstos sean obtenidos en el orden mencionado. El número de iteraciones y la selección de éstas recaen en el criterio del analista.

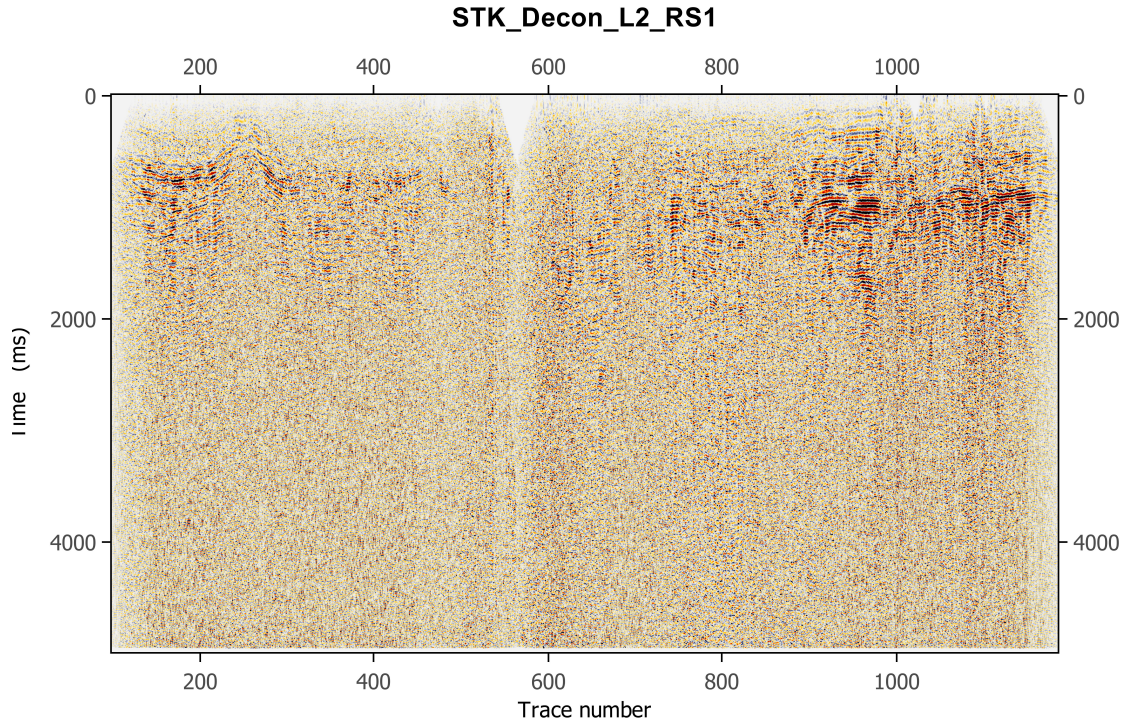
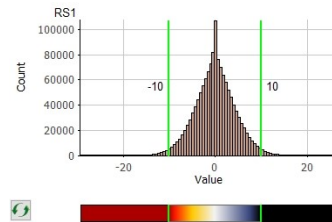
$$\frac{\partial E}{\partial s_j} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial r_i} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial G_k} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial M_k} = 0 \quad (4.45)$$

3. Aplicar los términos s_j y r_i a los tiempos de viaje con corrección NMO. Los términos s_j y r_i , obtenidos en el paso anterior son aplicados a cada tiempo para así obtener la corrección de estáticas residuales consistentes con la superficie.

La aplicación de las estáticas residuales para los datos fue realizada con los siguientes criterios.

- NMO: velocidades RMS segundo paso
- Iteraciones: 2
- Ventana de correlación: 700-1500 ms
- Máximo desplazamiento: 20 ms
- AGC: 400 ms
- Modelo: sin modelo inicial
- Longitud de filtro: 5 trazas

El resultado de las estáticas residuales se sometió a un control de calidad, una vez aprobado se prosiguió con la secuencia de procesamiento, lo anterior se muestran en la figura 4.31.

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma

Figura 4.31: QC stack estáticas residuales para la línea 2

Una vez realizada la corrección por estáticas residuales se pasa de la figura 4.29 a la 4.31, con esta corrección los reflectores se vuelven más claros y con mayores valores de amplitud.

4.2.10. Migración PreSTM

La migración es un proceso que tiene como objetivo que la sección sísmica sea similar a la sección geológica, esto lo realiza tras corregir la inclinación y colapsar las difracciones de los reflectores para llevarlos a su posición real.

Los principios de la migración se pueden apreciar en la figura 4.32, donde tenemos un reflector $\overline{CD}$ antes de la migración (izquierda) y el mismo reflector $\overline{C'D'}$ después de la migración (derecha), de esta imagen podemos afirmar lo siguiente: la migración inclina los reflectores, acorta su longitud y los lleva hacia la superficie.

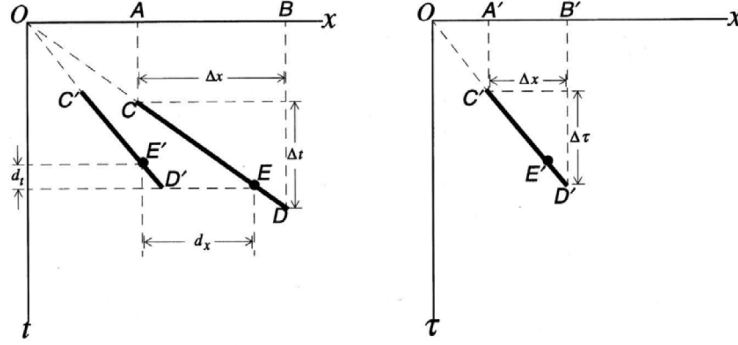


Figura 4.32: Comparativa entre evento migrado (derecha) y no migrado (izquierda), recuperada de Yilmaz, 2001

Una forma de ver la migración en un punto E del reflector cuya migración es E' , es desde los desplazamientos horizontales y verticales, así como de la inclinación $\frac{\Delta\tau}{\Delta x}$ y la inclinación aparente $\frac{\Delta t}{\Delta x}$; τ es el tiempo posterior a migración.

Yilmaz, 2001 hace mención de la figura 4.32 y muestra las ecuaciones que se desarrollan de ella, 4.46, 4.47 y 4.48.

$$dx = \frac{v^2 t}{4} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (4.46)$$

$$dt = t \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v \Delta t}{2 \Delta x} \right)^2} \right] \quad (4.47)$$

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta x} = \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v \Delta t}{2 \Delta x} \right)^2}} \quad (4.48)$$

Al ver como se registra un evento recto podemos pasar a eventos con curvatura, estos los podemos considerar con apertura cero. La figura 4.33 ilustra como se registrarán los pliegues sinclinales y anticlinales, además del efecto generado en los pliegues sinclinales similar a un "moño", debido a los registros cruzados en los pliegues, más el segmento recto.

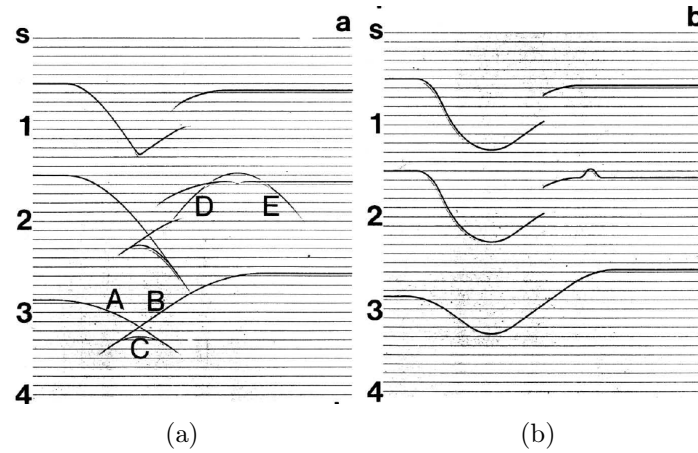


Figura 4.33: Reflectores con curvatura antes (a) y después de migrar (b), recuperado de Yilmaz, 2001

Migración de Kirchhoff

La Migración de Kirchhoff se apoya en el principio Huygens para comprender el modelo de migración. Yilmaz, 2001 lo ejemplifica con una playa en la cual existe un muelle con una apertura, donde la llegada de una ola pasa por la apertura del muelle y es registrada en los geófonos, esto se ilustra en la figura 4.34.

Si se considera la ola como un frente de onda, al pasar por la apertura del muelle se genera un nuevo frente de onda circular, este es visto en el registro temporal en forma de hipérbola. Si se plantea un número n de aperturas a lo largo del muelle, se produciría un conjunto de hipérbolas que al sumarlas se obtendría el registro del muelle. Si el muelle lo vemos como un reflector y las hipérbolas las llevamos al punto de apertura, lo que estaríamos haciendo es migrar los datos por sumatoria, este proceso y su respectiva ecuación se muestran en la figura 4.35 y ecuación 4.49.

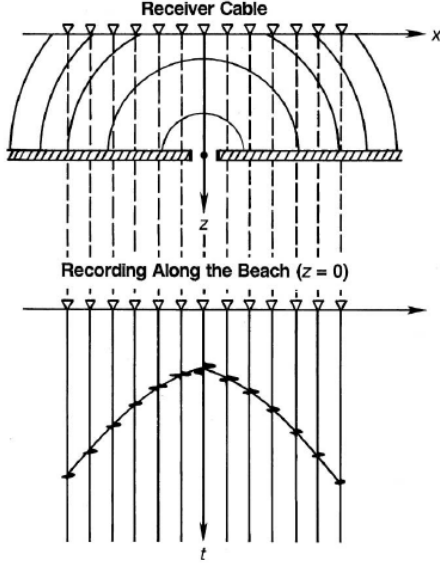


Figura 4.34: Modelo del muelle

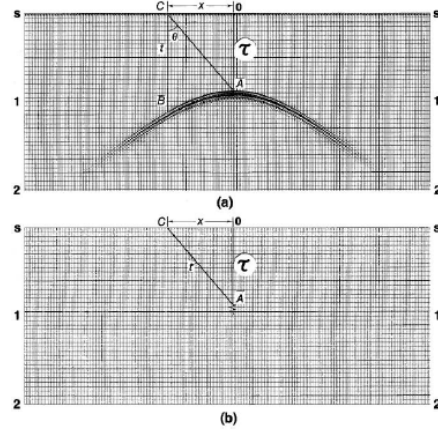


Figura 4.35: Principio de migración

Con ayuda de la figura 4.35, se aprecia el triángulo COA y en la misma se obtiene el tiempo de entrada t para un punto B, en dicha posición se presenta una amplitud que se lleva a la posición A en un tiempo τ con la ecuación 4.49, τ representa el tiempo posterior a la migración y a su vez es el vértice de hipérbola.

$$t^2 = \tau^2 + \frac{4x^2}{v_{rms}^2} \quad (4.49)$$

La segunda fuente de Huygens presenta efectos en los nuevos frentes de onda, estos son: decaimiento por divergencia esférica; un factor de amplitud debido al ángulo de incidencia en la apertura del modelo; y que la fase de la onda se mantiene a lo largo de la hipérbola para que al realizar la suma de difracciones está tenga la misma característica inicial. Retomando los criterios antes mencionados, tenemos la migración de Kirchhoff, la cuál es una solución de la ecuación de onda por medio de una integral, ecuación 4.50 donde $P_{out}(x_0, z = v\tau/2, t = 0)$ es la imagen de salida, $P_{in}(x, z = 0, t)$ las ondas en espaciamento cero que son medidas en superficie y por último el valor de la distancia entre la entrada y la salida $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + z^2}$. En este caso podemos apreciar que los factores mencionados de oblicuidad de las ondas están presentes en θ , el campo de velocidades en v_{rms} y el factor de fase presente en ρ .

$$P_{out} = \frac{\Delta x}{2\pi} \sum_x \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{v_{rms} r}} \rho(t) * P_{in} \right] \quad (4.50)$$

Para el módulo de migración Kirchhoff tenemos dos valores a considerar, los cuales son: la apertura y la inclinación. La apertura nos indica hasta donde se realiza la sumatoria de la hipérbola y se representa como la sumatoria en la ecuación 4.50. La

inclinación es la máxima inclinación para aplicar la migración. Estos criterios gráficamente se pueden ver en la figura 4.36.

Es importante la adecuada selección de estos criterios, ya que de esto dependerá el resultado de la migración, por esto es recomendable realizar pruebas para la apertura e inclinación. Entre ellos se encuentra la apertura mínima óptima como $2dx$ de la ecuación 4.46. La apertura y el dip son mutes que se aplican a los operadores de migración.

Algunas de las consecuencias de aplicar una apertura pequeña son: eliminación de eventos con inclinación alta y organización de ruido. Un criterio a resaltar de la apertura, es que dentro de un estudio, se recomienda mantenerla constante. La relación entre la apertura y la inclinación máxima, determina la apertura efectiva de la migración, esto se puede ver en la figura 4.36.

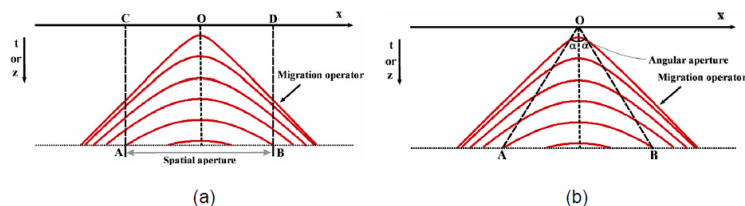
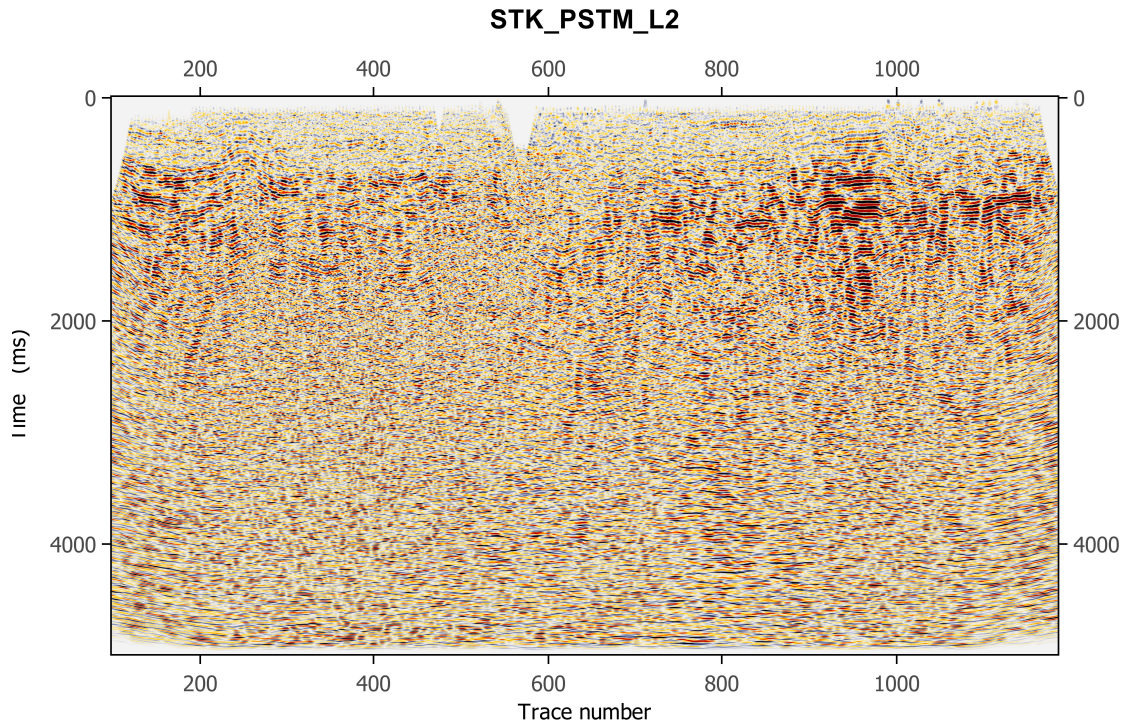
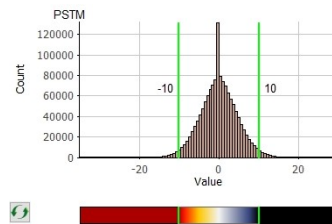


Figura 4.36: apertura espacial (a) e inclinación "dip"(b) para la migración Kirchhoff, recuperado de Liu y Bancroft, 2002

Para la migración se utilizó un módulo de migración Kirchhoff pre-stack 2D para un solo CPU. Se realizó un análisis de velocidad de migración, del 94 % al 106 %. Se realizaron pruebas de migración para las aperturas de 1500-4500 m y con inclinaciones de 15-45°. Los criterios de migración utilizados se presentan en la tabla 4.5, de los cuales se obtiene como resultado la figura 4.37.

Parámetro	Valor
CDP inicial	100
CDP final	1187
Distancia entre CDP	25 m
Apertura	1500 m
Dip	33
Stretch	95 %

Tabla 4.5: Parámetros migración Kirchhoff

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma

Figura 4.37: QC stack migración para la línea 2

Antes de la migración, figura 4.31 y posterior 4.37, la imagen presenta distintas mejoras, estas permiten visualizar reflectores que antes no se apreciaban, en el rango 610-880 CDP's, así como en la zona de 100-490 CDP's con un rango de tiempo 1000-200 ms

4.2.11. Análisis de velocidades de migración

Para realizar el análisis de velocidades en este paso del procesamiento, se siguieron los criterios mencionados en la sección de picado de velocidades. En esta sección, los datos de entrada son: los datos generados en la primera migración y las velocidades generadas de la segunda secuencia de análisis de velocidades.

Como resultado de lo anterior obtenemos velocidades RMS seleccionadas cada 20 CDP's en datos migrados, al realizar un apilado con las velocidades mencionadas

generamos la figura 4.38.

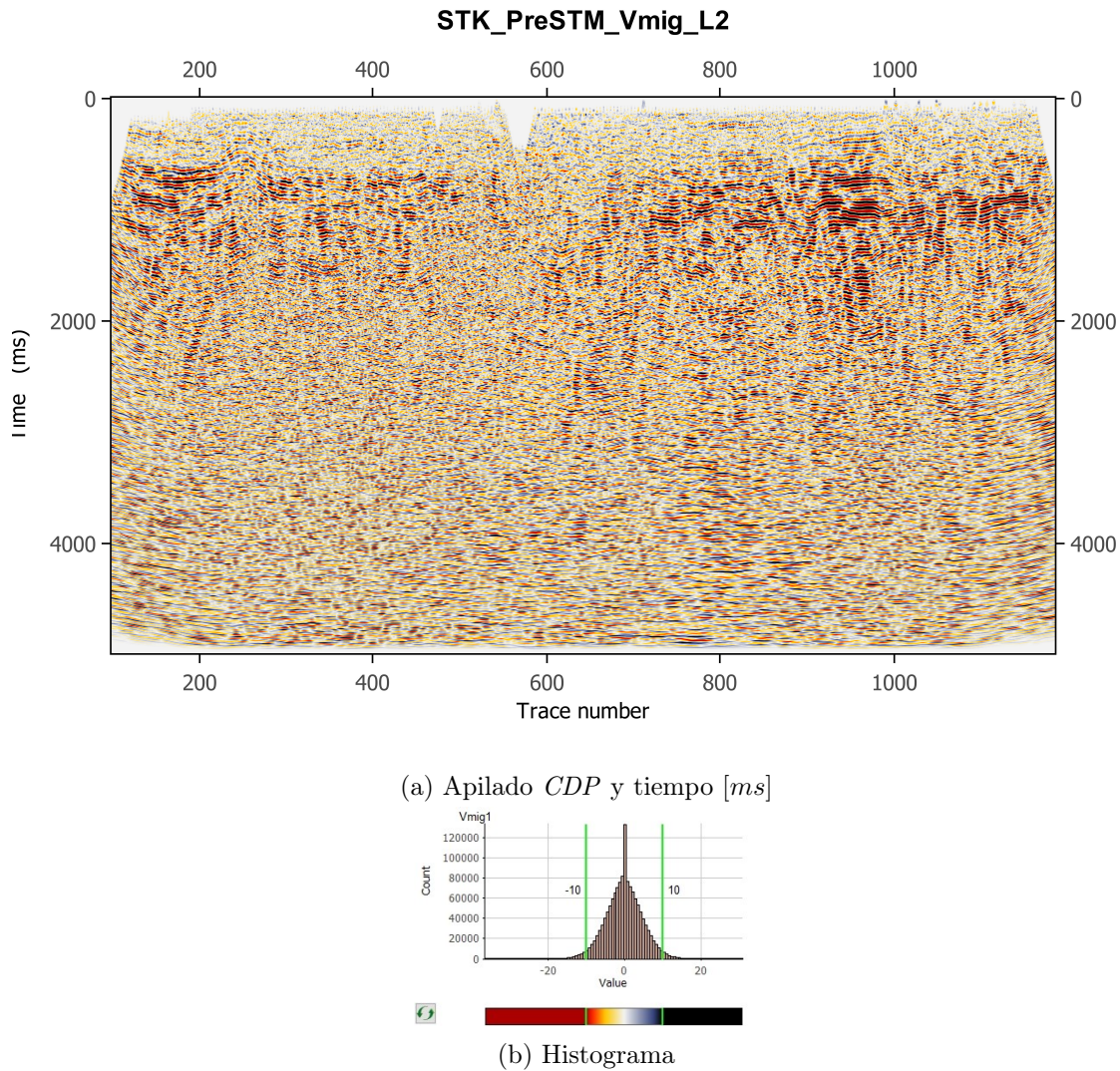


Figura 4.38: QC generado con migración y velocidades de *vmig* para la línea 2

Con la migración, figura 4.37 tenemos la presencia de reflectores con una amplitud baja en las zona de los *CDP* 760-880 y 280-400 en un rango de tiempo de 0-1200 ms los reflectores se ven con mejor claridad, amplitud y el nuevo modelo permite resolver la continuidad de un reflector, figura 4.38.

4.2.12. Migración PreSTM II

Tomando en cuenta las velocidades RMS obtenidas en la sección anterior 4.2.11 y los criterios aplicados para la migración preapilamiento en tiempo, sección 4.2.10, procedemos a realizar la segunda migración, el resultado de éste proceso se aprecia en la figura 4.39. En ella podemos apreciar la mejora de la continuidad de los reflectores

que se encuentran entre los CDP 300-410 en tiempos de 500 a 1500 ms comparándolos comparado con la figura 4.38.

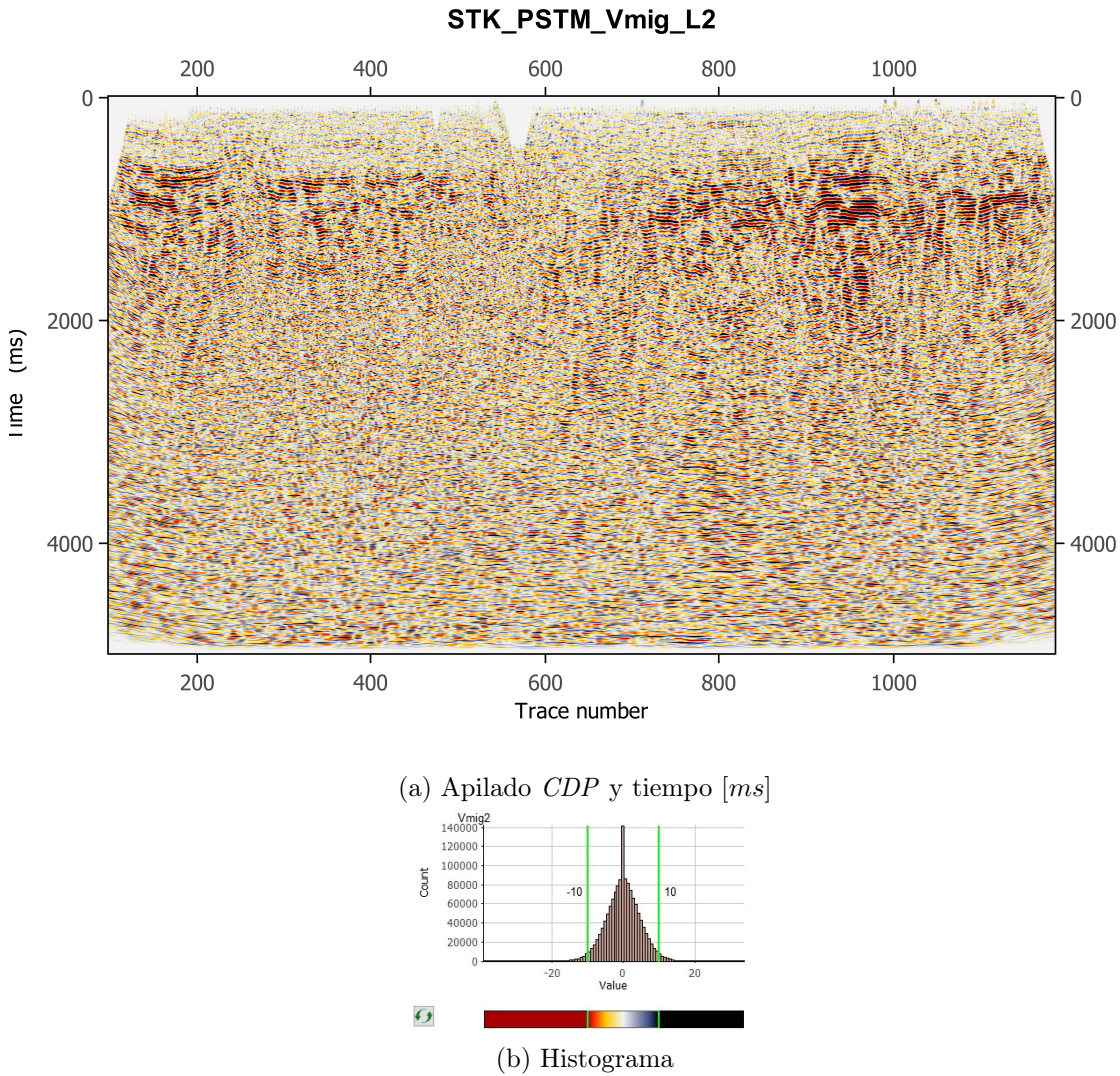


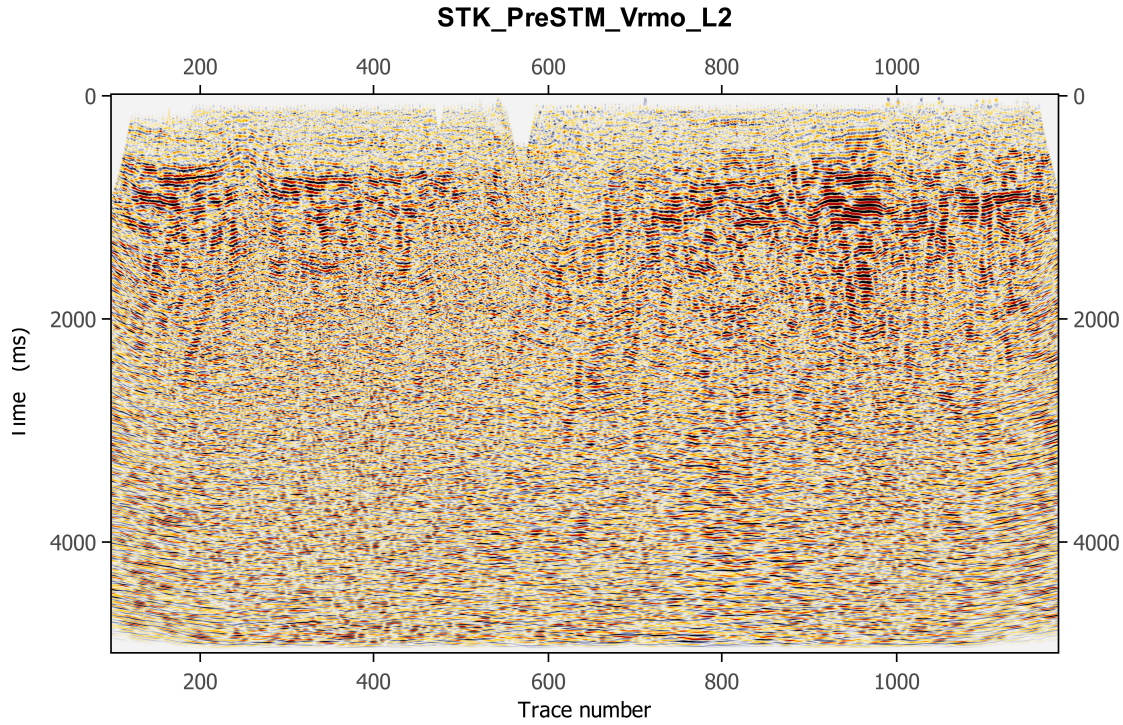
Figura 4.39: QC stack migración con velocidades de migración para la línea 2

4.2.13. Migración PSTM final

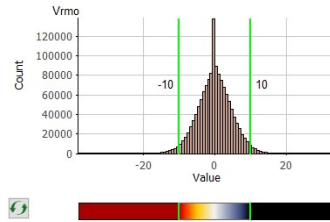
Como último paso de la migración, se busca corregir lo mejor posible el NMO. Con esto en mente se realizó un análisis de velocidades residuales (RMO), para esto los datos de entrada fueron las velocidades de migración 4.2.11 y los gathers generados de la segunda migración 4.2.12.

Una vez que se obtuvieron las velocidades residuales, se procedió con la migración final, la cual contó con los criterios de la tabla 4.5. Al realizar un control de calidad de la secuencia, se generó el apilado que se muestra en la figura 4.40. Al realizar un análisis de la imagen 4.39 con 4.40 son mejoras pequeñas las que se encuentran a lo

largo de la línea, las cuales en conjunto permiten una mejor visualización.



(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma

Figura 4.40: QC stack migración con velocidades RMO para la línea 2

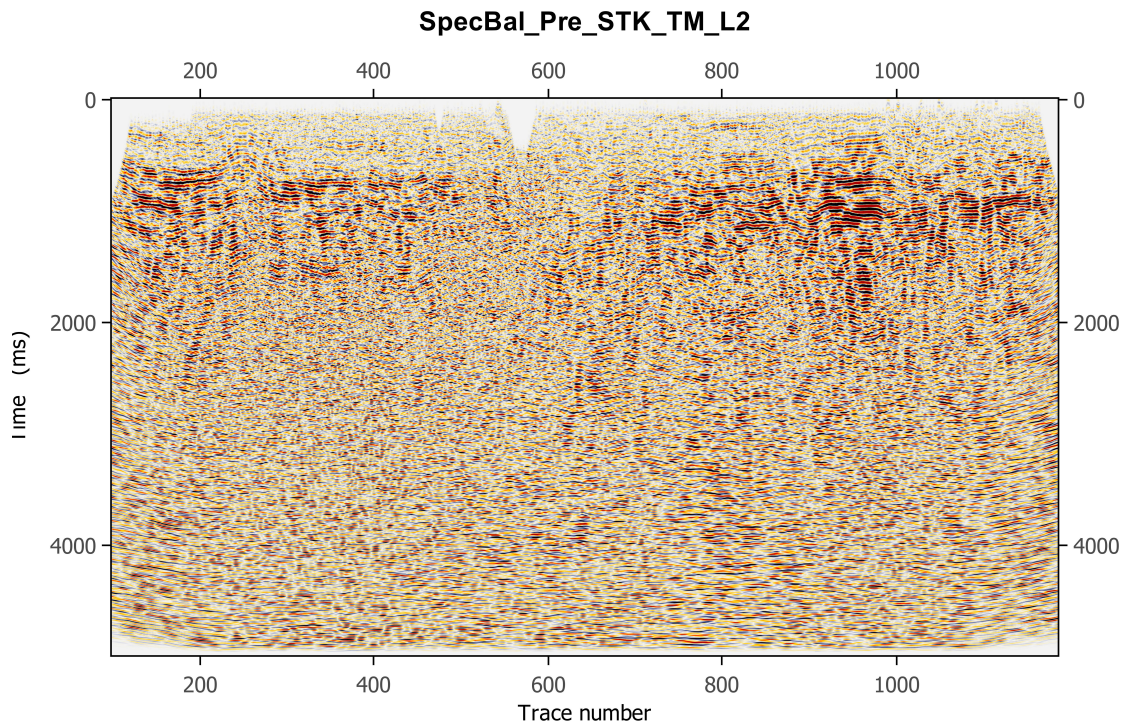
4.2.14. Post-proceso

Con la intención de realizar mejoras de imagen, se procedió con una secuencia de post-procesamiento a partir de los apilados generados de la migración final 4.2.13. Esta secuencia post-proceso constó de un balanceo espectral, coherencia y filtros variantes en tiempo.

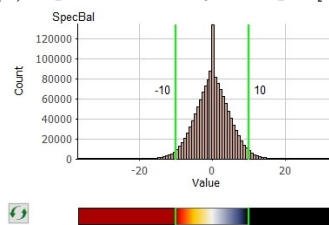
Balanceo espectral

El balanceo espectral se realizó por blanqueamiento espectral en el dominio de la frecuencia, con un filtro BP "shaping" de 7-14-55-56 [Hz]. La figura 4.41 muestra el resultado del balanceo espectral para la línea 2. Los resultados que se obtienen son

poco perceptibles y son más claros entre los 0-750 ms en la sección, es aquí donde apreciamos que se eliminan esas frecuencias.



(a) Apilado *CDP* y tiempo [ms]



(b) Histograma

Figura 4.41: QC stack Balanceo espectral para la línea 2

Coherencia

El objetivo de los filtros de coherencia es permitir una mejor visualización de los reflectores para el ojo humano y las máquinas, mediante la eliminación del ruido de fondo. Esto lo realiza con un algoritmo de ventana que se desliza a través de las líneas de forma horizontal, para obtener la semblanza donde el valor varía entre 0 y 1, con 0 la menor coherencia y 1 coherencia total. Estos valores se asignan a las muestras y están elevados a un exponente, donde entre menor sea el valor de la semblanza asociada, mayor reducción del dato se obtendrá. En este sentido es importante considerar que los eventos con menor coherencia lateral se verán afectados, es por esto que el valor del exponente para este proceso fue de 1 y se consideró una ventana de 5 trazas para

el filtrado (semblanza). Posterior a la aplicación del filtro de coherencia, se realizó un control de calidad del apilado presentado en la figura 4.42.

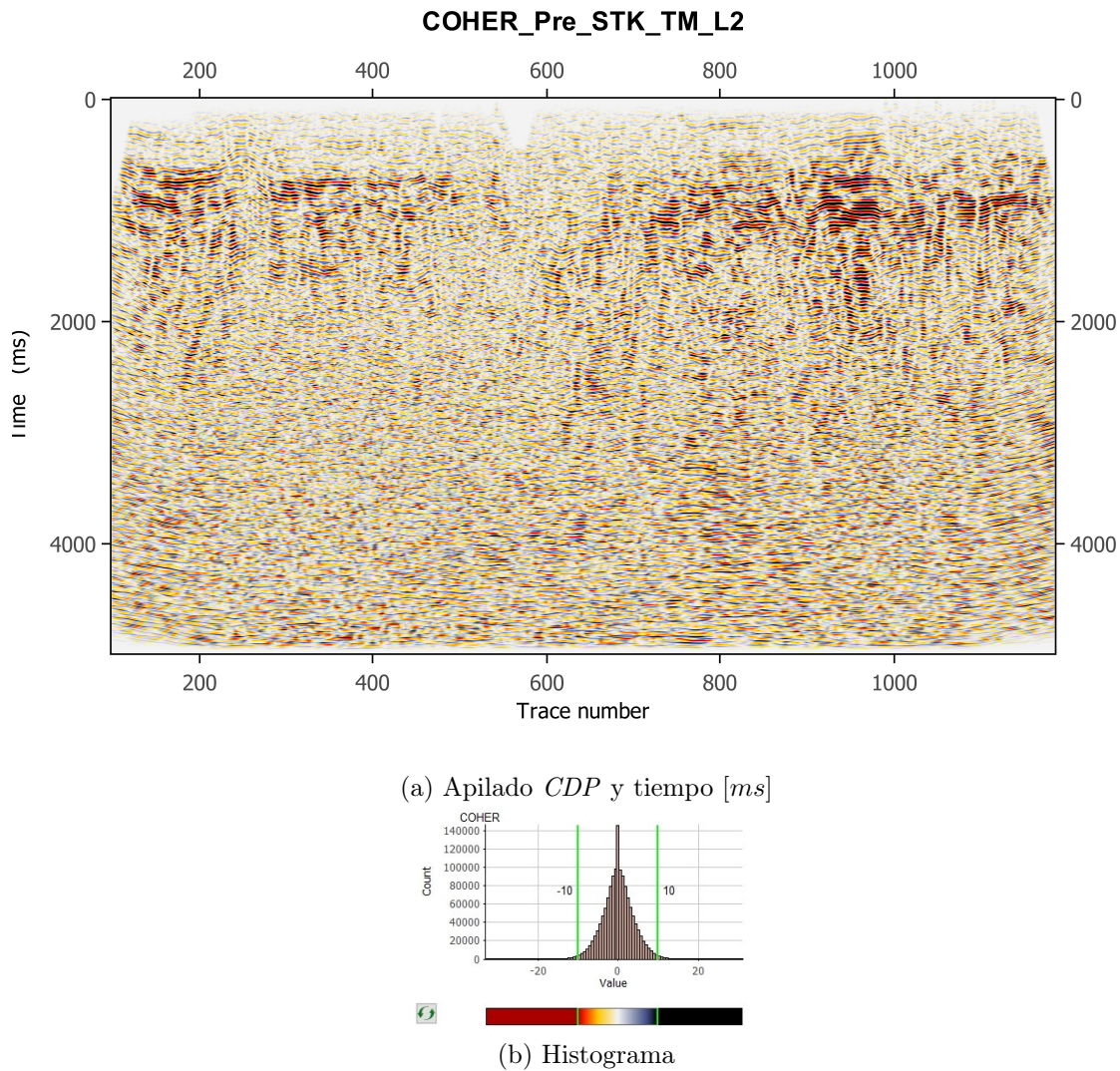


Figura 4.42: QC stack Coherencia con la superficie para la línea 2

Retomando desde la migración final, figura 4.40 al realizar el el balance espectral la esencia de la figura permanece y solo hay pequeños desplazamientos en los reflectores y fondo de la imagen, figura 4.41, una vez realizada la coherencia con la superficie se elimina el fondo y los valores que consideramos ruido permitiendo una mejor visualización de los reflectores en la figura 4.42.

Filtro variante con el tiempo *TVF*

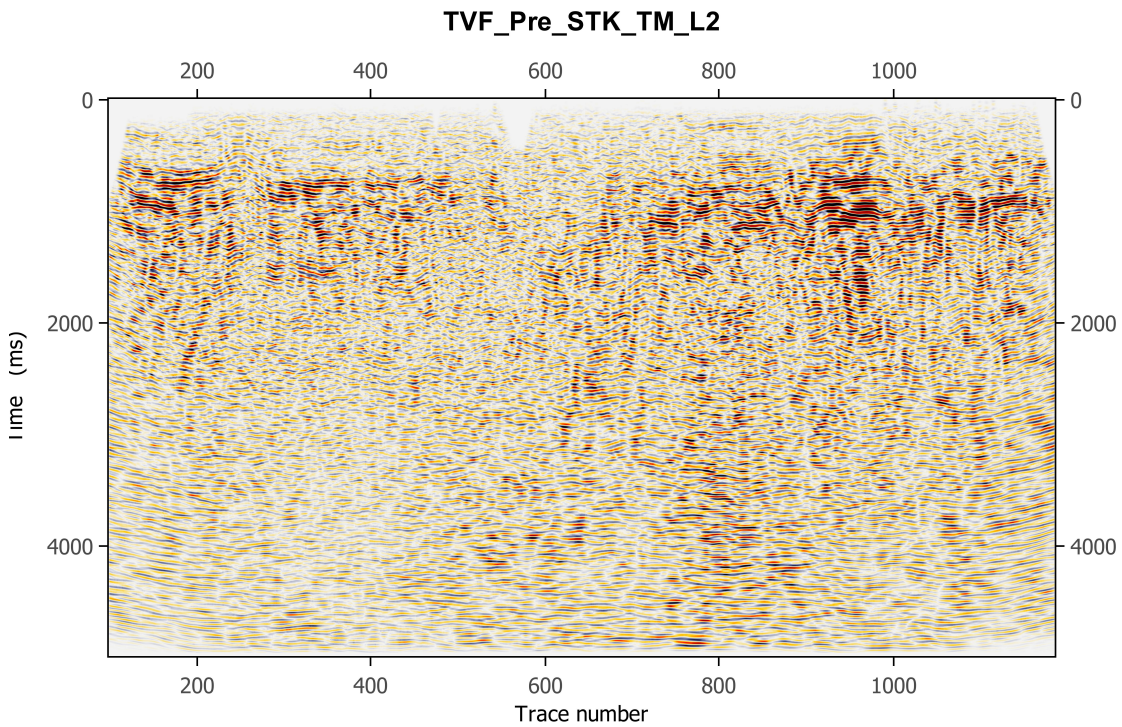
Como etapa final del post-proceso se aplicó un filtro variante en tiempo (*TVF*, por sus siglas en inglés). Se aplicaron tres filtros pasa bandas en tres ventanas de tiempo, ver la tabla 4.6. La parte plana está dada entre F_2 y F_3 y los tiempos en los que se

aplican en T_i y T_f .

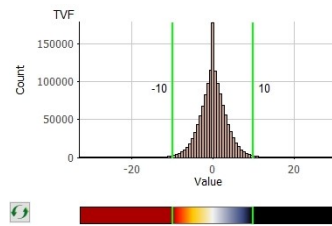
Los tiempos, así como las frecuencias de corte se decidieron posterior a realizar pruebas y análisis de imagen. Finalmente se realizó el control de calidad de la secuencia y como resultado de ello se presenta la figura 4.43.

F_1 [Hz]	F_2 [Hz]	F_3 [Hz]	F_4 [Hz]	T_i [ms]	T_f [ms]
3	7	70	74	4	1700
3	7	35	40	1704	2600
3	7	30	53	2604	5000

Tabla 4.6: Filtro variante en tiempo



(a) Apilado *CDP* y tiempo [ms]



(b) Histograma

Figura 4.43: QC stack final filtro variante en tiempo para la línea 2 (sección sísmica final)

A partir de la figura 4.42 al aplicar el TVF se logra que la imagen obtenga una uniformidad respecto al nivel de ruido en toda la sección llegando a resultado final de la secuencia presentado que se presenta en la figura 4.43.

5 Resultados

En el procesamiento de las líneas sísmicas de reflexión 2D se presentaron distintos retos, los más importantes fueron la generación de los archivos de geometría y el análisis de las velocidades.

En cuanto a la geometría, no se contaba con los archivos SPS necesarios para el procesamiento de los datos. Debido a esta limitante, se solicitó a una especialista de nivel senior en geometría, su asesoría para así garantizar el resultado. Cabe mencionar que los distintos controles de calidad (LMO, stacks, primer quiebre, display del disparo) y pruebas realizadas fueron cruciales, ya que cualquier error o inconsistencia en esta etapa pudo influir de manera significativa en los resultados obtenidos.

El análisis de las velocidades, por otra parte, tiene sus retos en los datos. Desde la construcción del campo de velocidades promedio hasta la obtención del campo de velocidad final para cada línea. Este desafío se debe a las variaciones geológico-estructurales que se presentan en el subsuelo de la Ciudad de México, son estas las que afectan la continuidad y distribución de las velocidades y su análisis. Las variaciones se aprecian en los apilados finales presentados en esta sección, donde podemos observar distintas continuidades, pliegues y fallas, lo que indica la presencia de estructuras complejas subterráneas. Lo anterior se ve reflejado en las velocidades obtenidas y sus cambios. Estas variaciones explican las dificultades que se presentan en la construcción de modelos de velocidad.

En esta sección se realiza una comparativa de los apilados obtenidos en un procesamiento anterior y el presentado en este trabajo para la línea 6, figura 5.1. Para el procesamiento de referencia el CDP inicia desde cero, mientras que en el actual inicia en 100, la característica principal que resalta en esta línea es la estructura que se encuentra entre los CDP's 350-420 y tiempos de 500-1500 ms, donde se presentan mejoras de imagen y amplitudes, mientras que en la anterior es más tenue y suavizada.

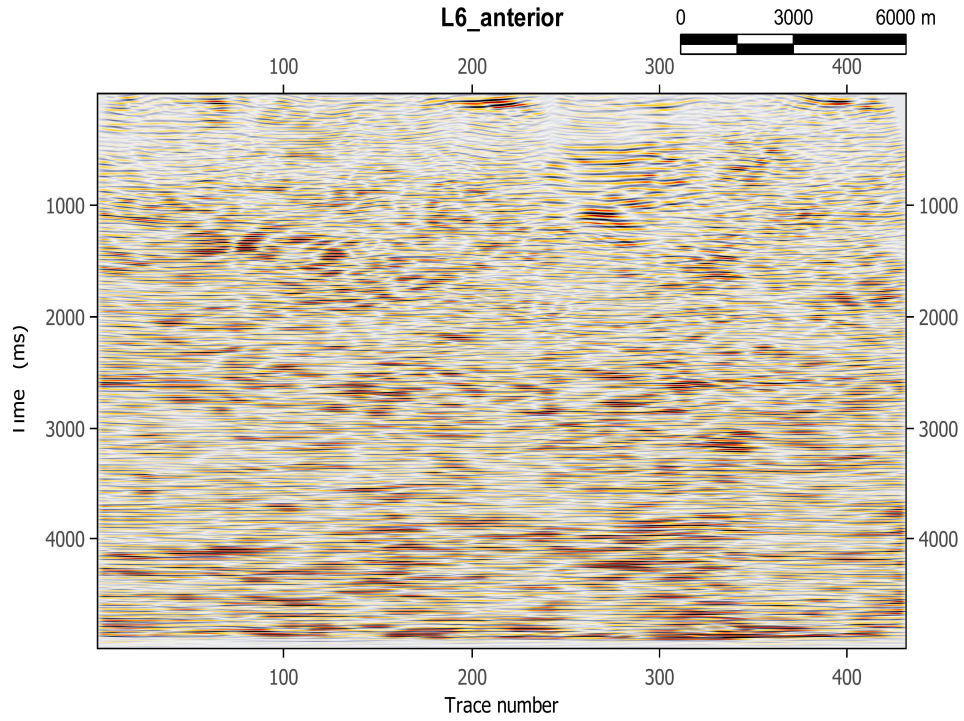
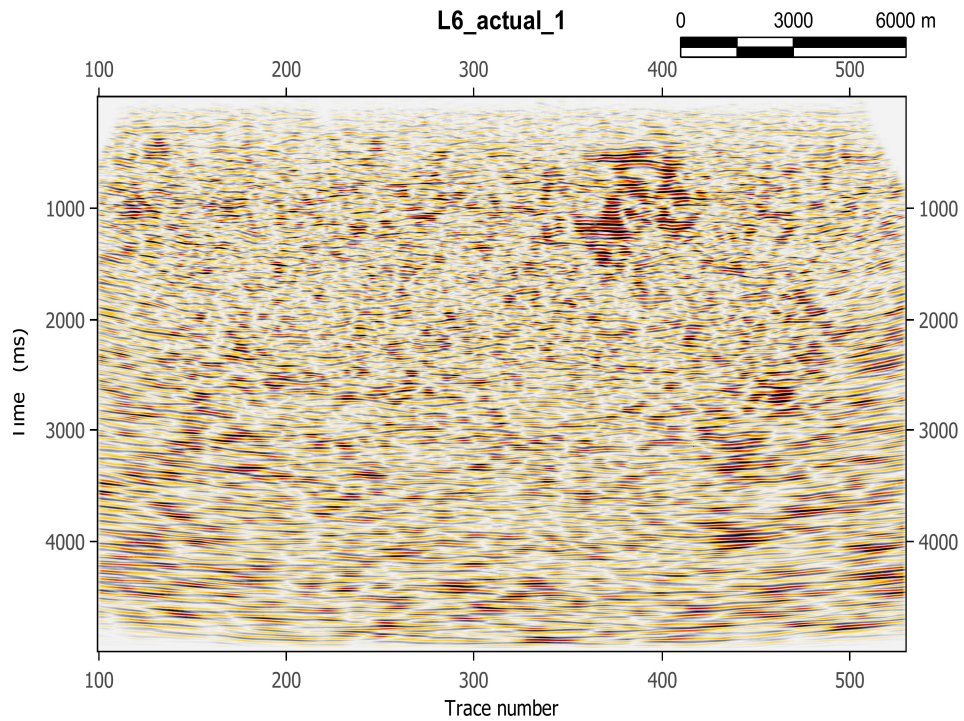
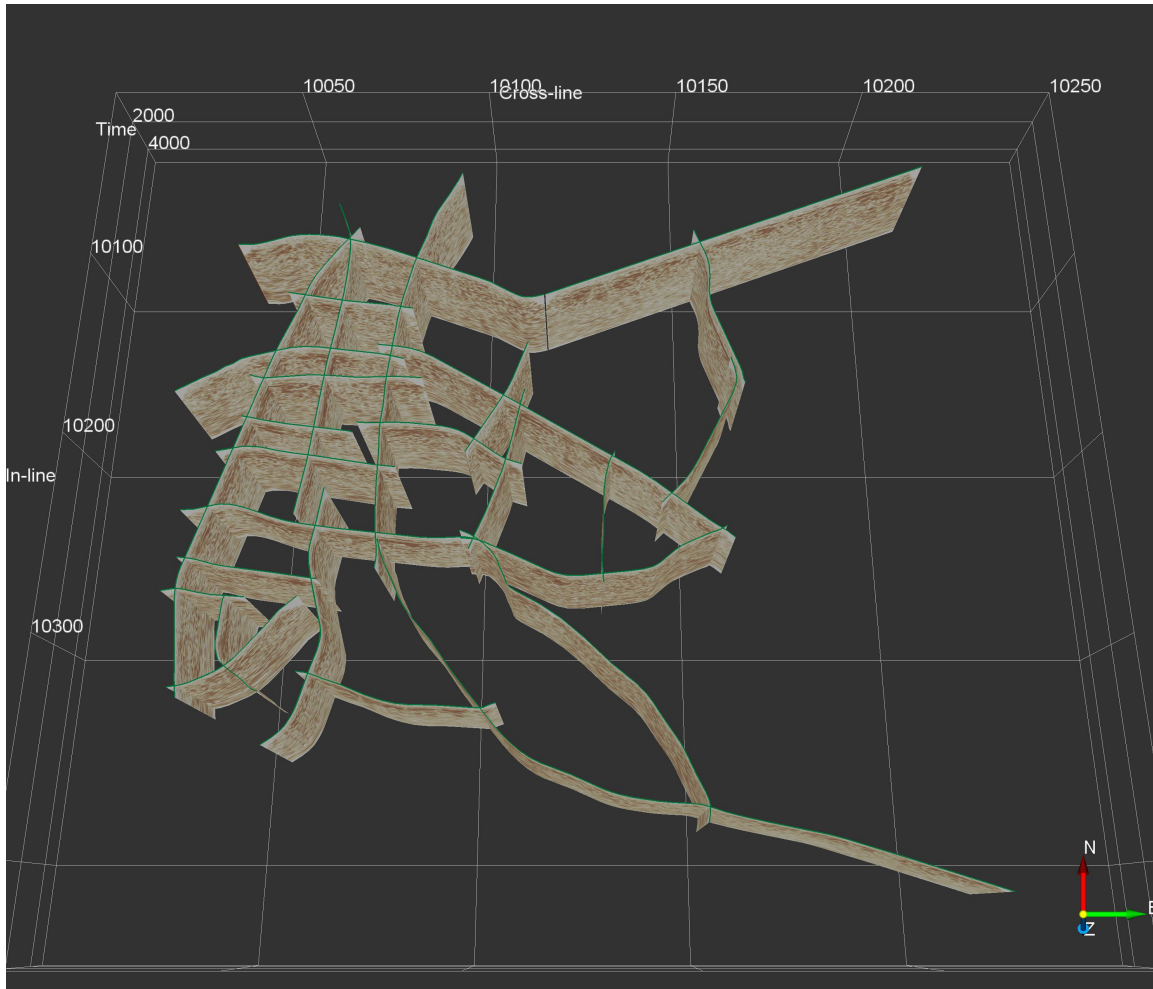
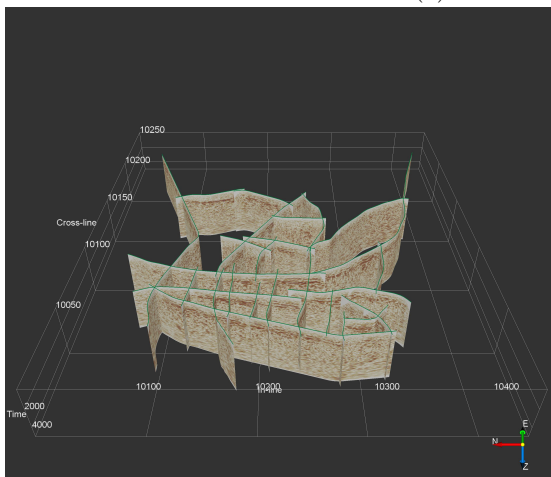
(a) Apilado de referencia *CDP* y tiempo [*ms*](b) Apilado final *CDP* y tiempo [*ms*]

Figura 5.1: Sección sísmica final vs sección sísmica de referencia

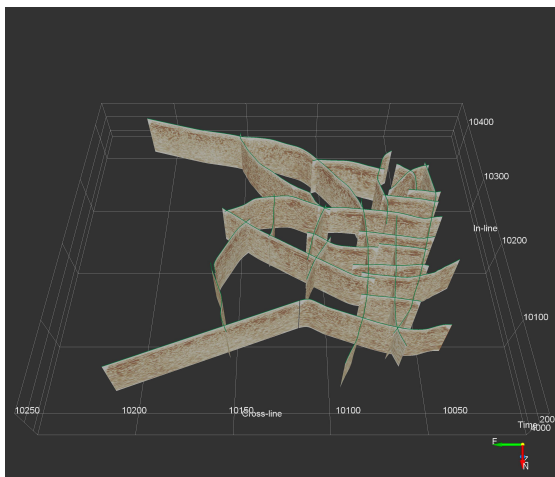
La secuencia de procesamiento del presente trabajo fue mostrada a detalle con los *QC stack* de la línea 2, los mismos QC se realizaron con las otras líneas existentes. A continuación se presentan los apilados finales, resultado de la secuencia de procesamiento de la línea 1 (figura 5.3) hasta la línea 30 (figura 5.32), así como un volumen 3D generado a partir de la totalidad de las líneas, figura 5.2.



(a) Orientación Norte-Sur



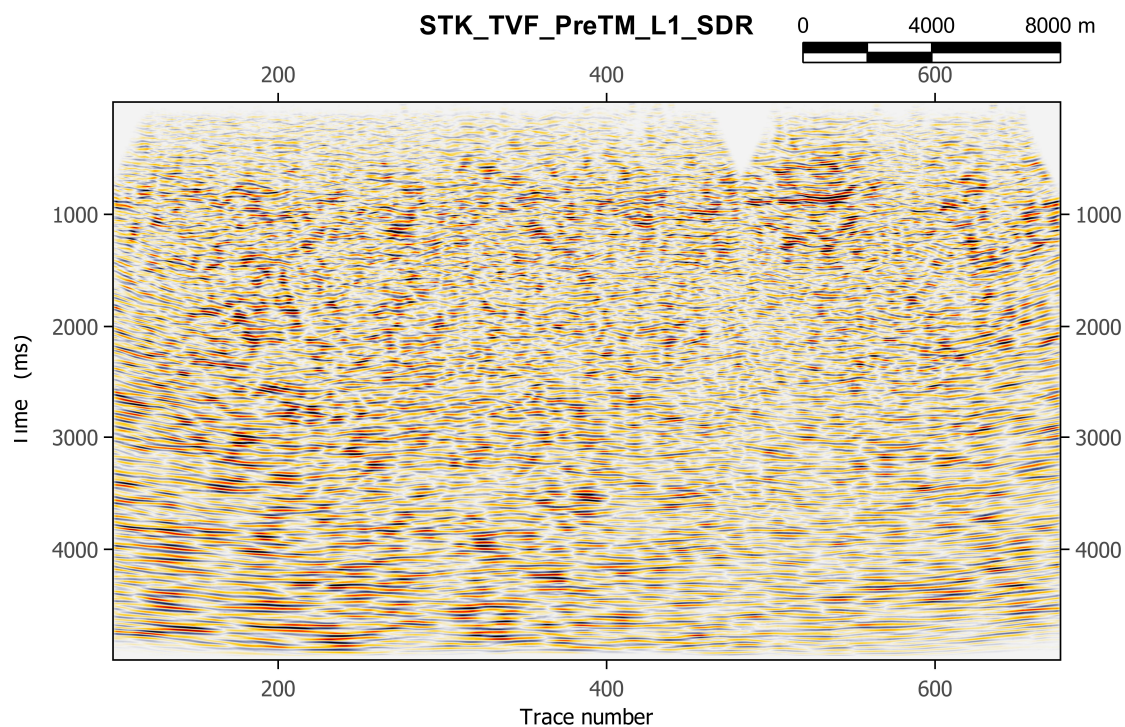
(b) Orientación Este-Oeste



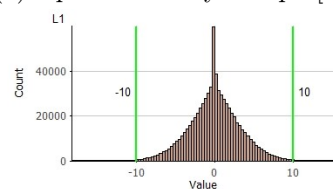
(c) Orientación Sur-Norte

Figura 5.2: Volumen 3D con las 30 secciones sísmicas obtenidas en el presente trabajo

5.0.1. Línea 1



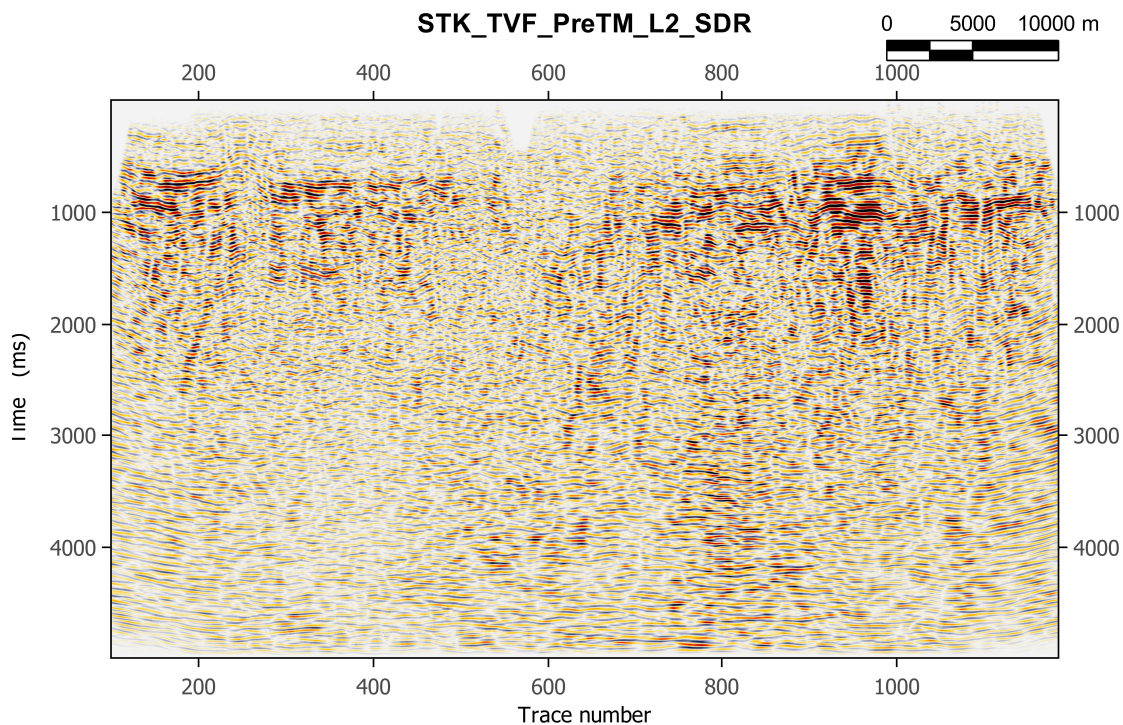
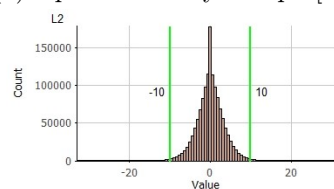
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.3: Sección sísmica final para la línea 1

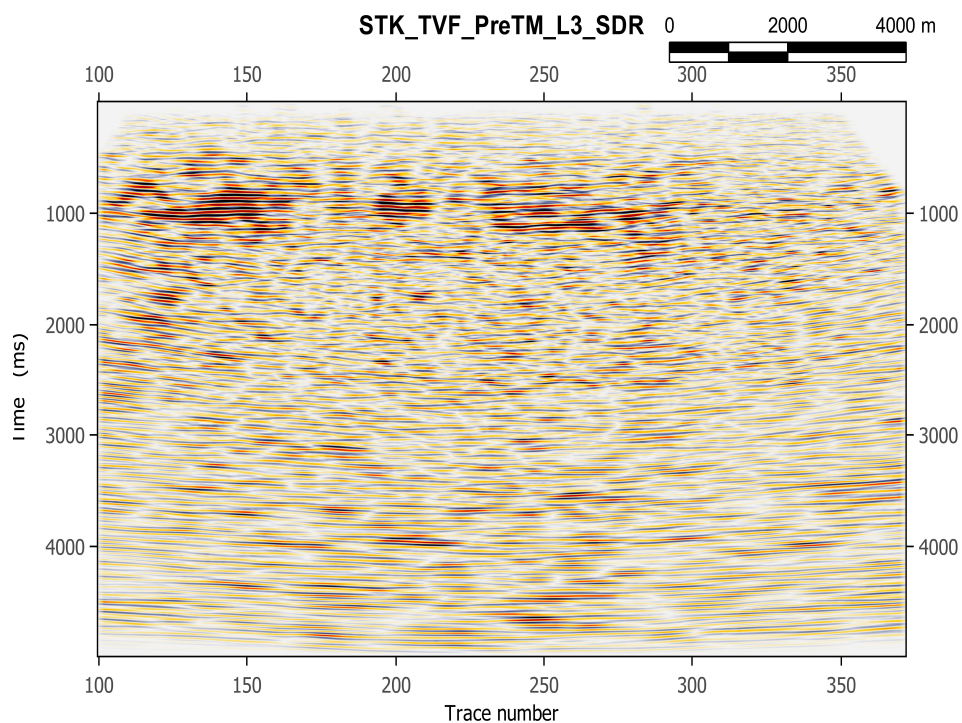
5.0.2. Línea 2

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

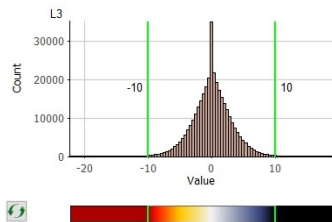
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.4: Sección sísmica final para la línea 2

5.0.3. Línea 3



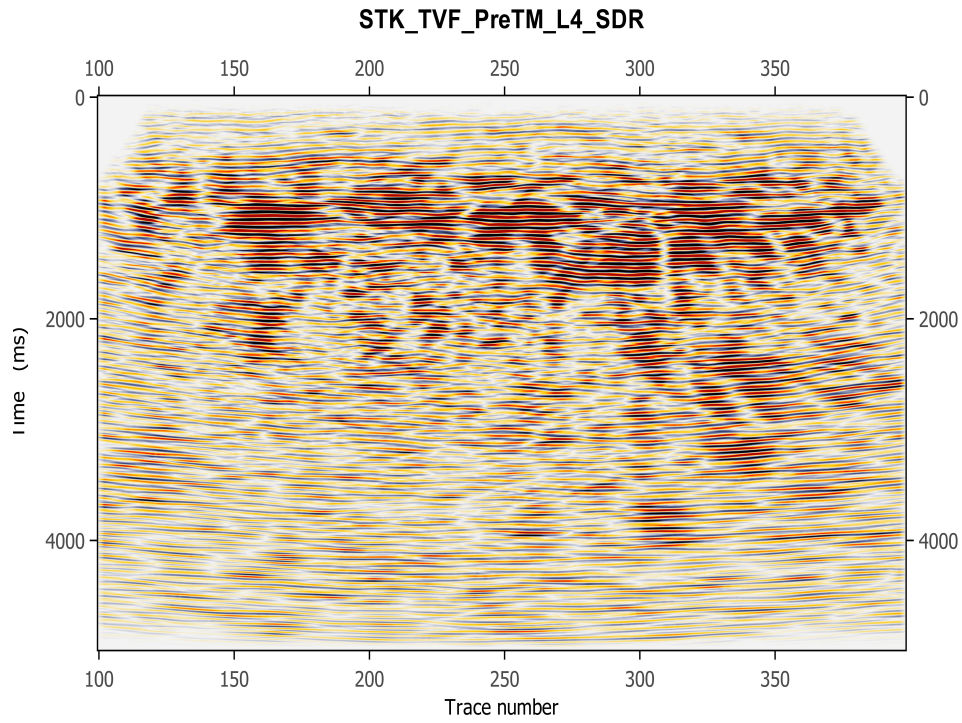
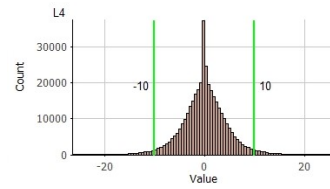
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.5: Sección sísmica final para la línea 3

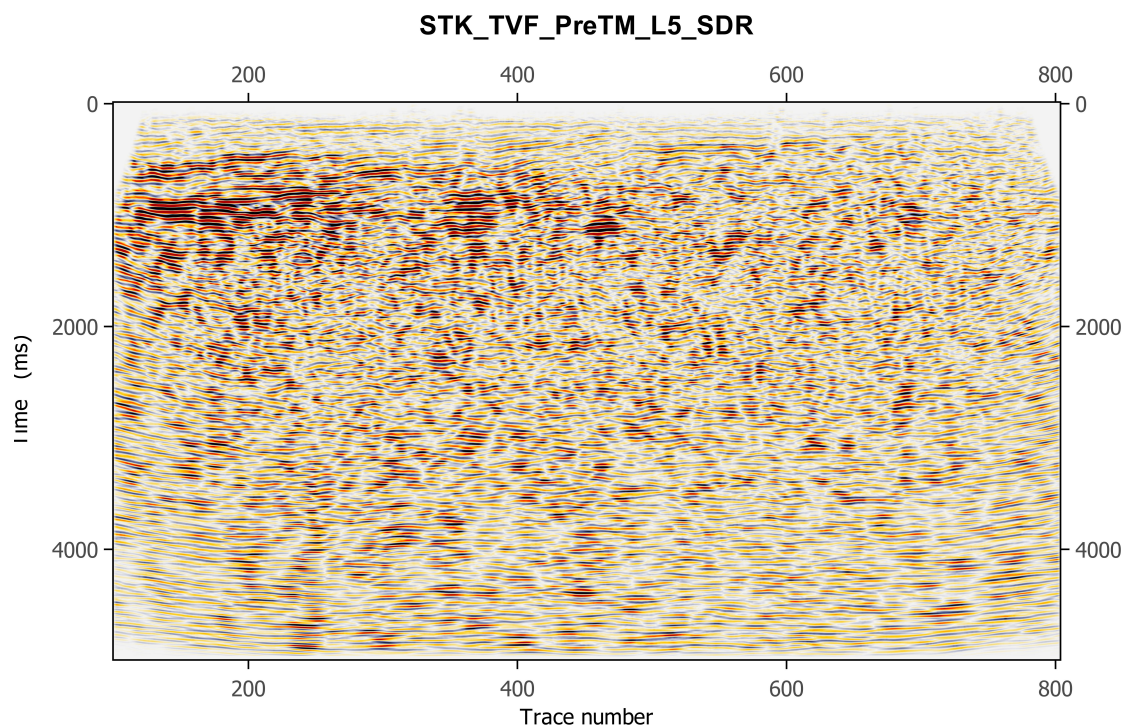
5.0.4. Línea 4

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

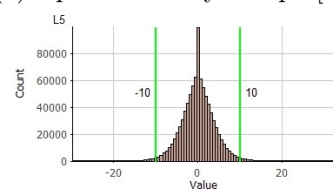
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.6: Sección sísmica final para la línea 4

5.0.5. Línea 5



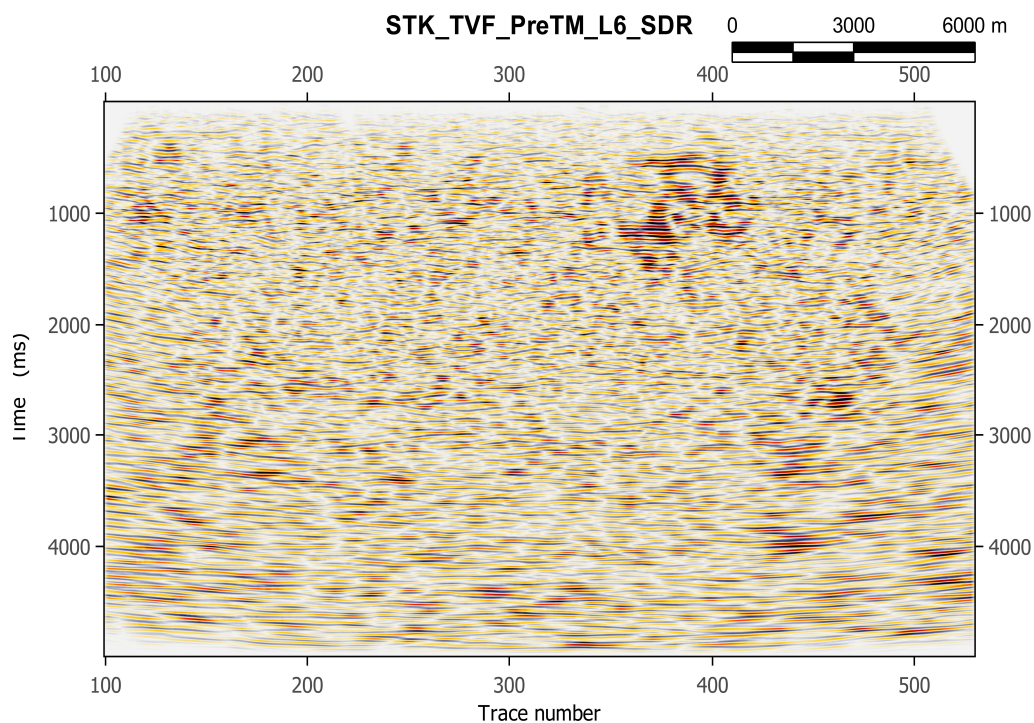
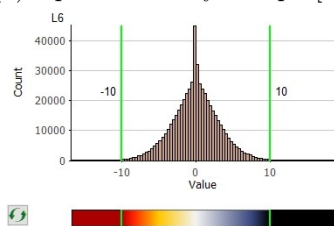
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.7: Sección sísmica final para la línea 5

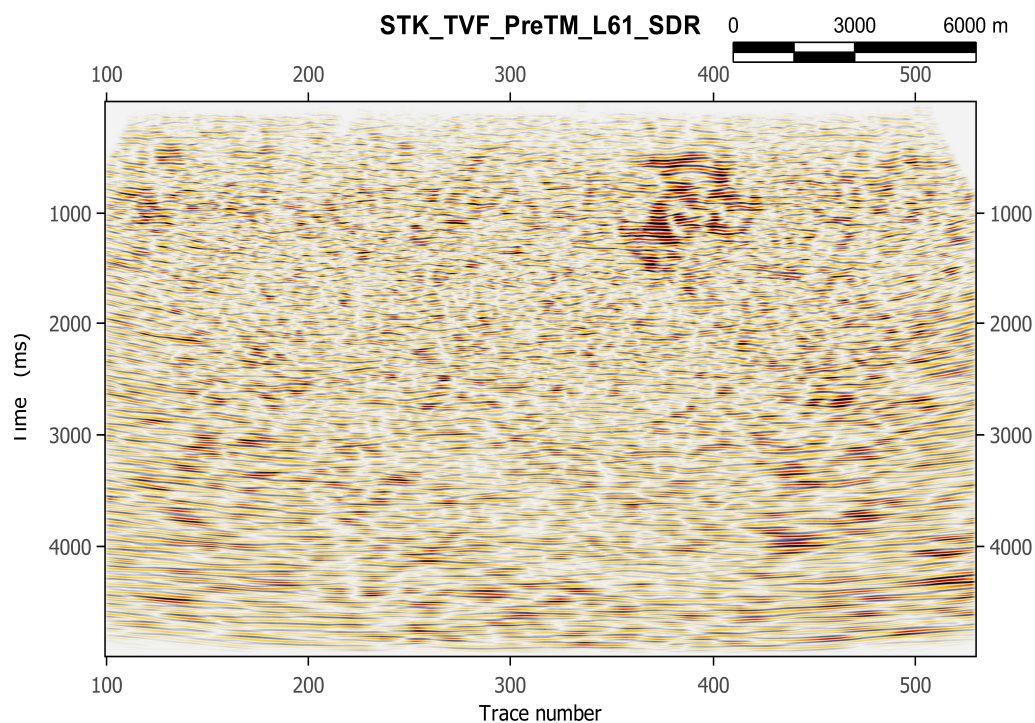
5.0.6. Línea 6

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

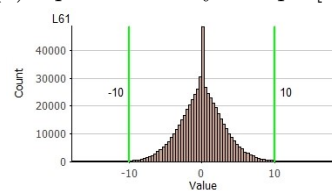
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.8: Sección sísmica final para la línea 6

5.0.7. Línea 61



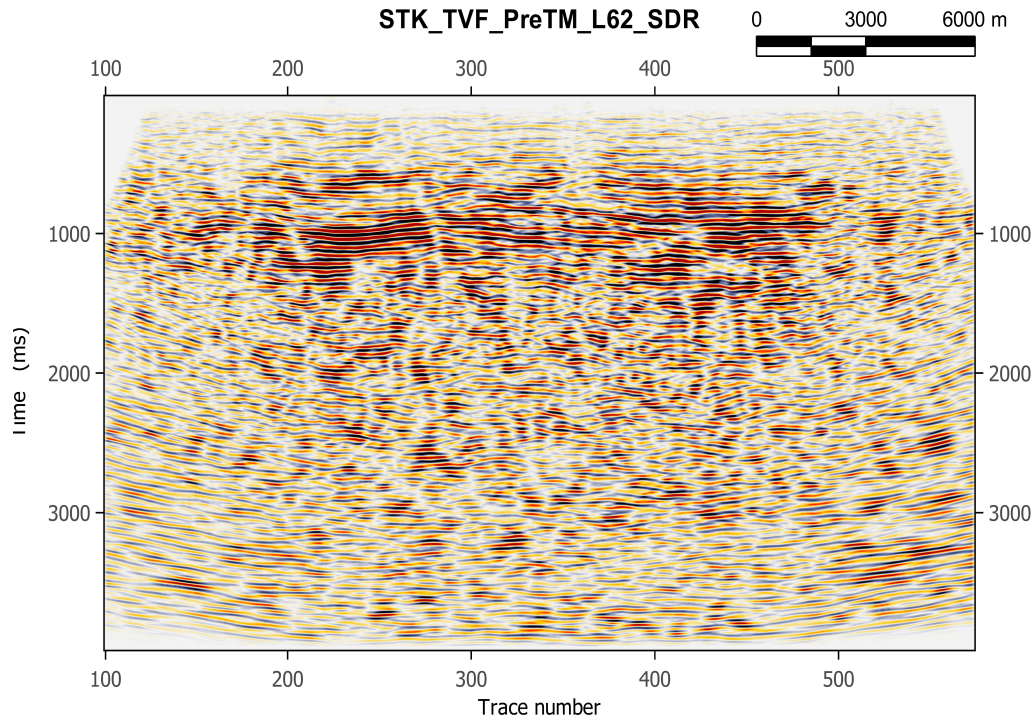
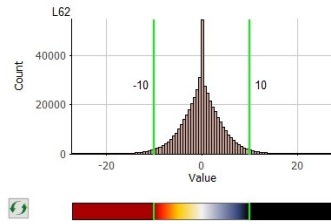
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.9: Sección sísmica final para la línea 61

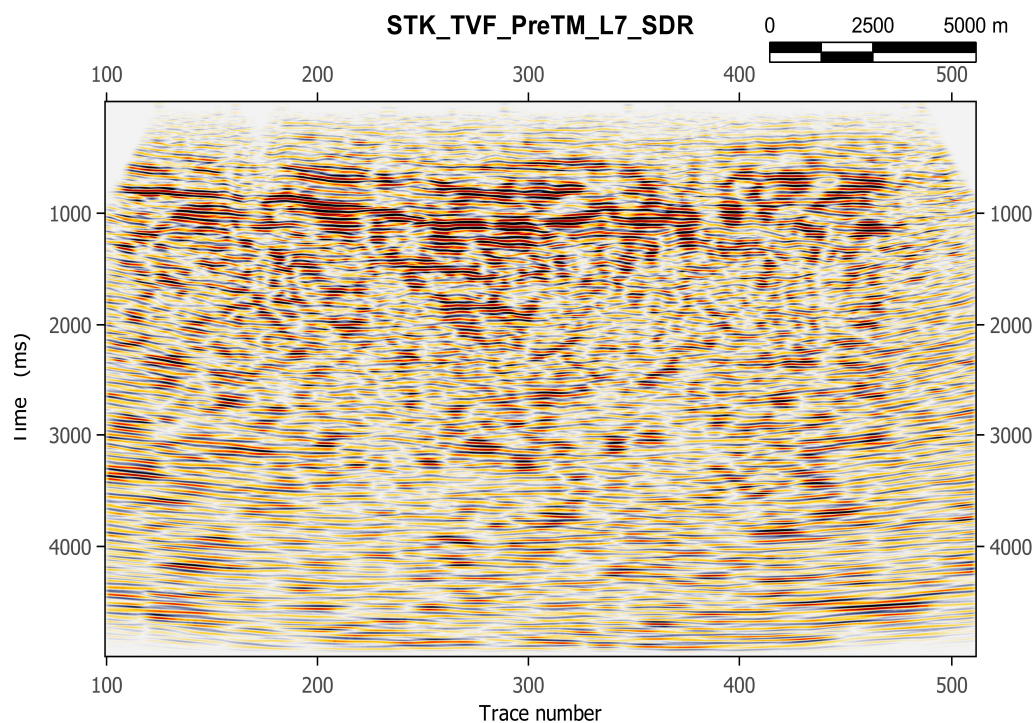
5.0.8. Línea 62

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

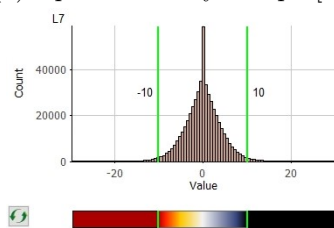
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.10: Sección sísmica final para la línea 62

5.0.9. Línea 7



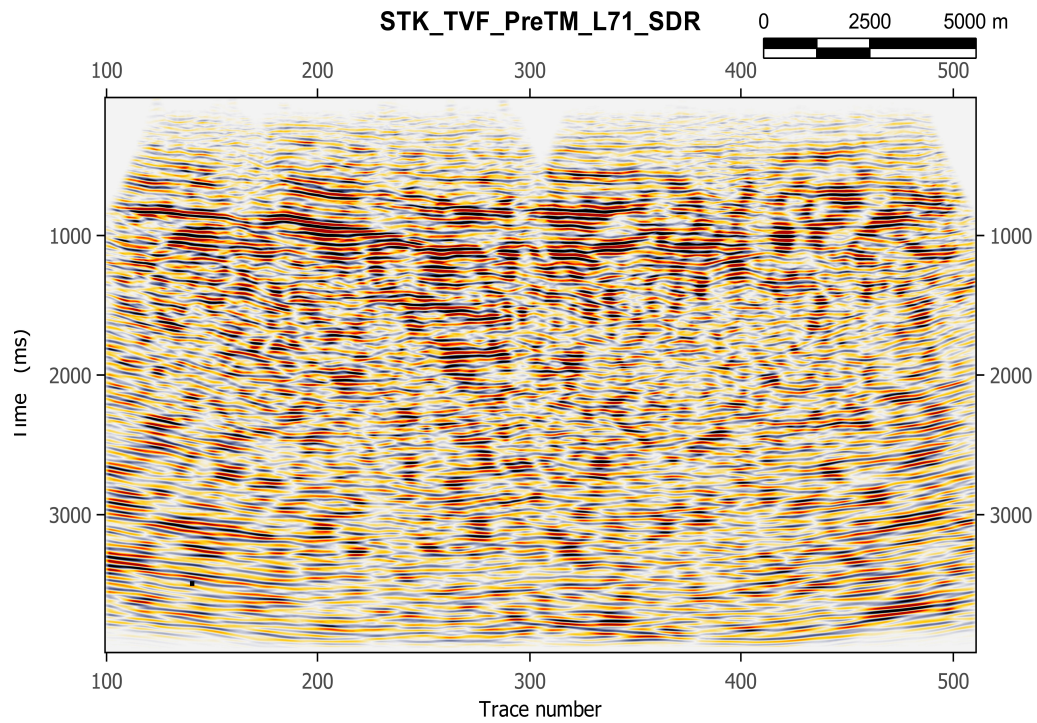
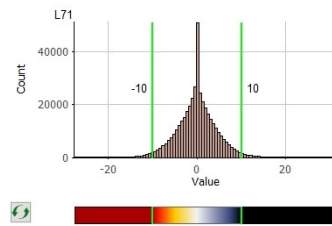
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.11: Sección sísmica final para la línea 7

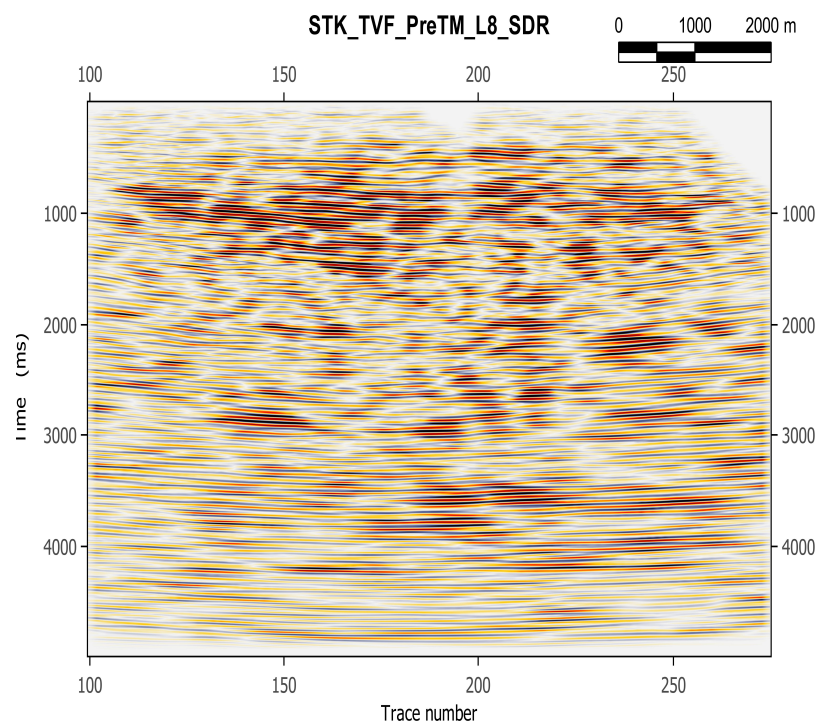
5.0.10. Línea 71

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

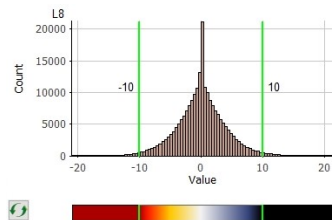
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.12: Sección sísmica final para la línea 71

5.0.11. Línea 8



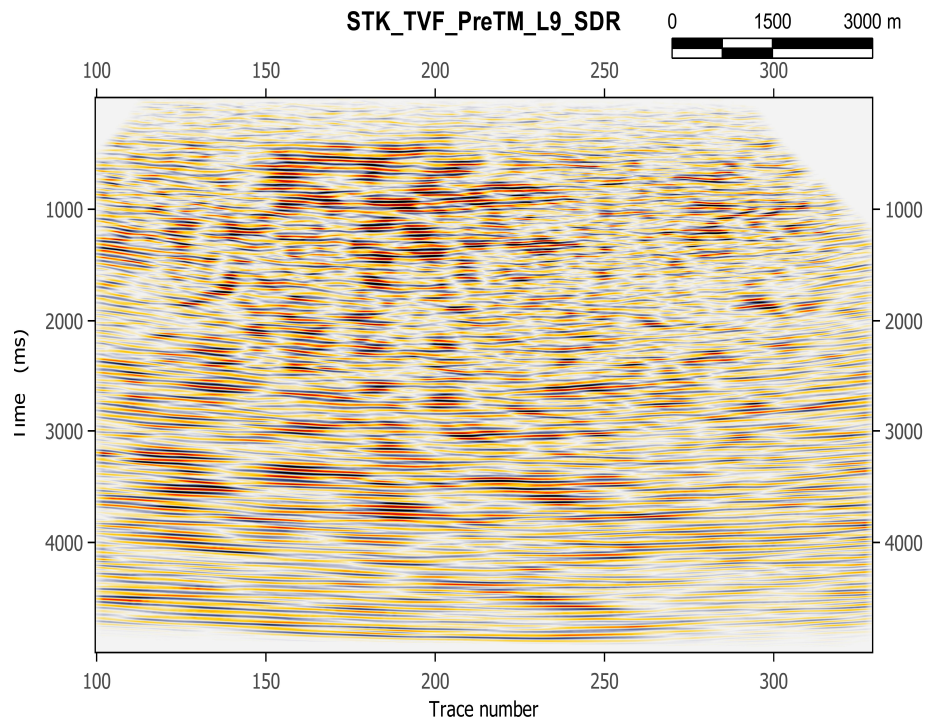
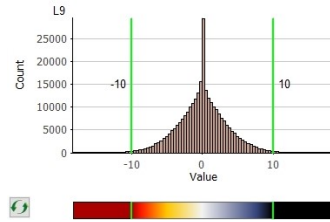
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.13: Sección sísmica final para la línea 8

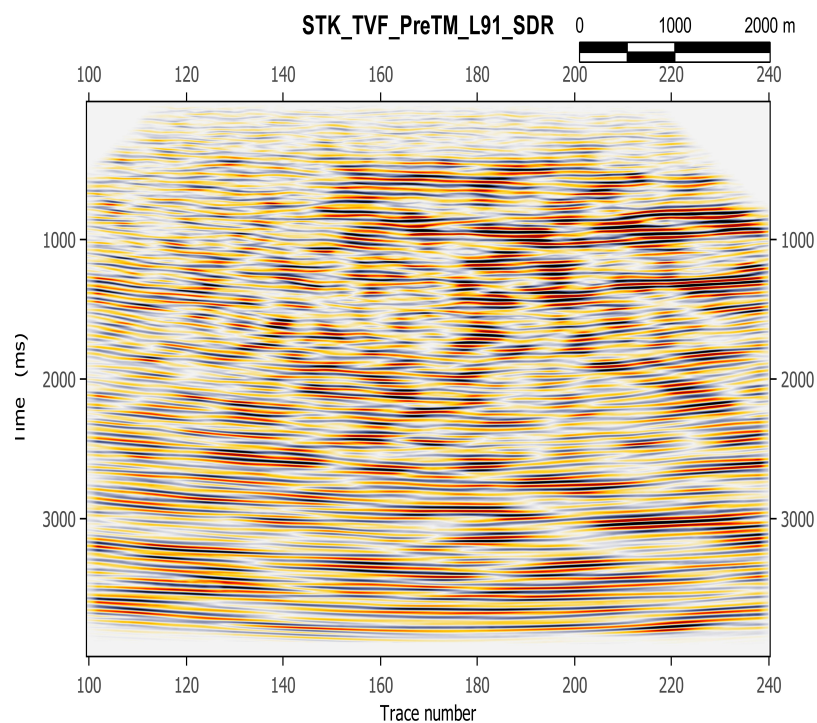
5.0.12. Línea 9

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

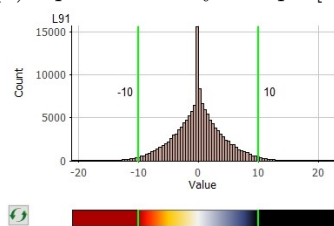
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.14: Sección sísmica final para la línea 9

5.0.13. Línea 91



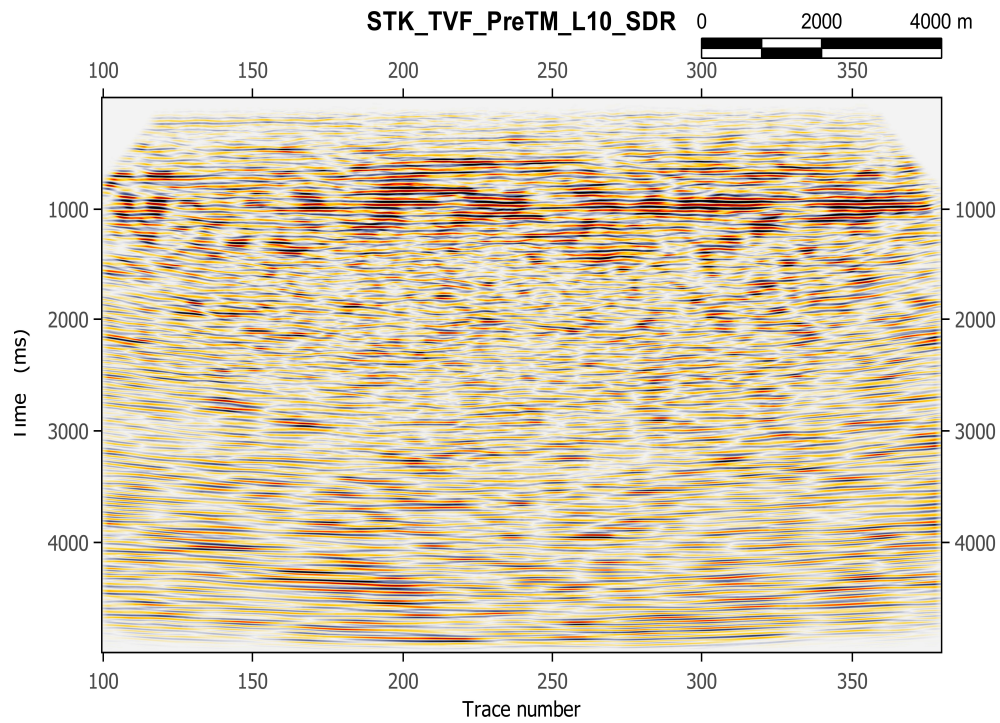
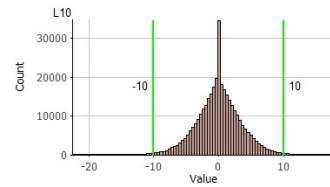
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.15: Sección sísmica final para la línea 91

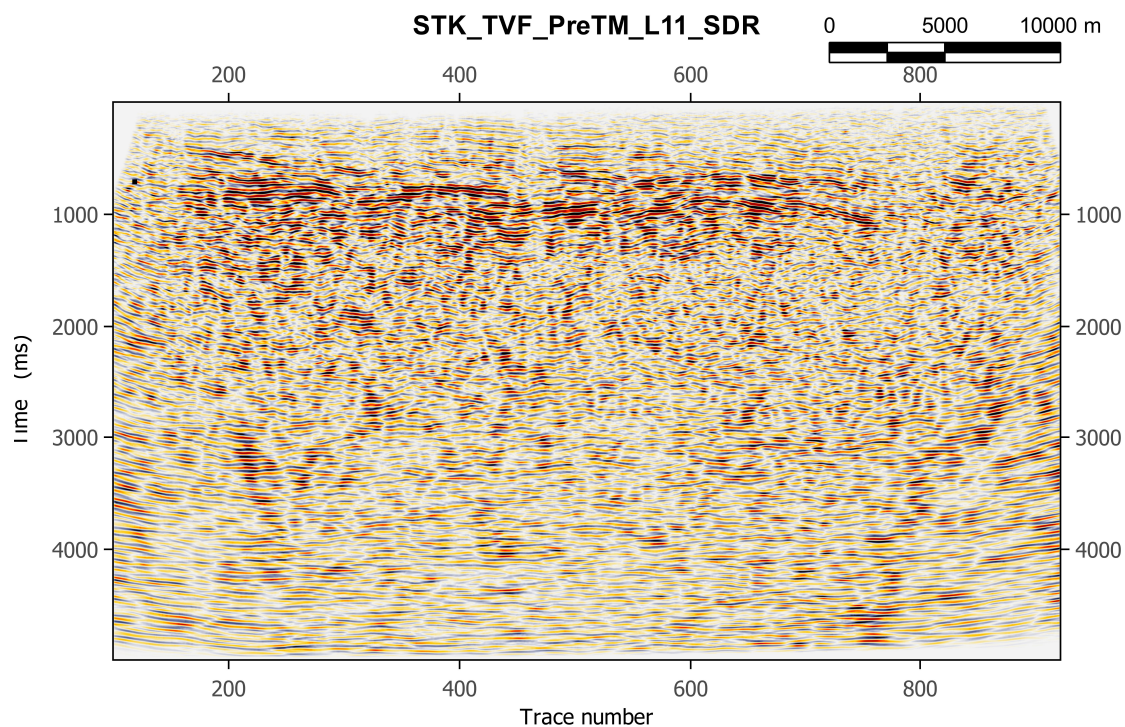
5.0.14. Línea 10

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

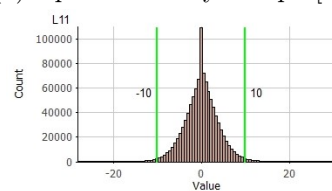
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.16: Sección sísmica final para la línea 10

5.0.15. Línea 11



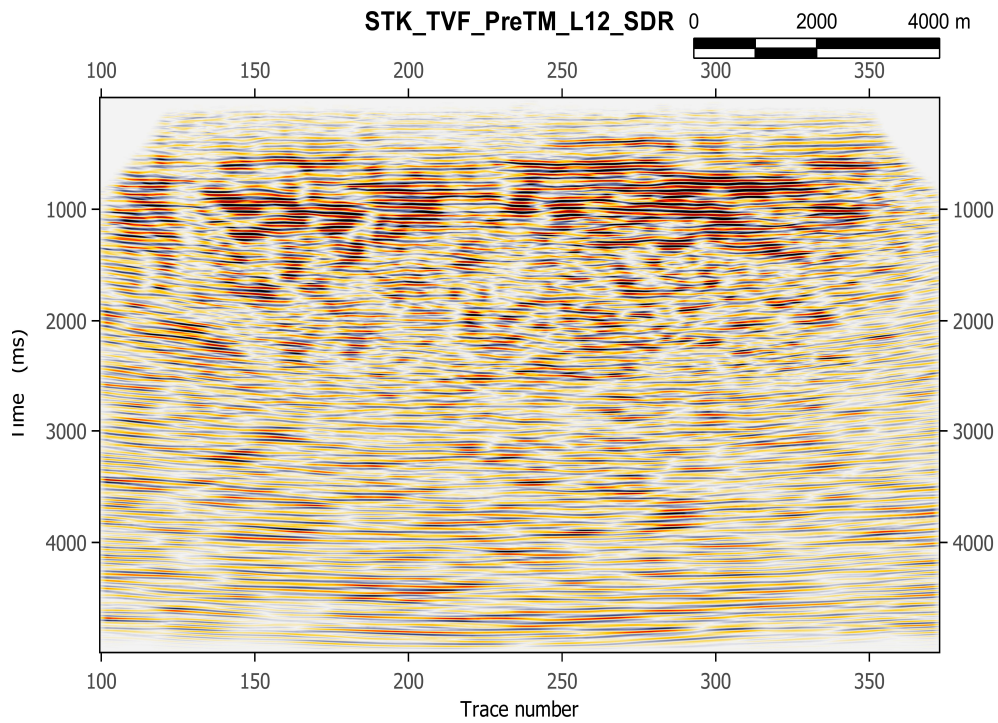
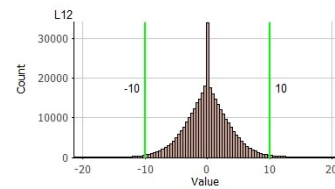
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.17: Sección sísmica final para la línea 11

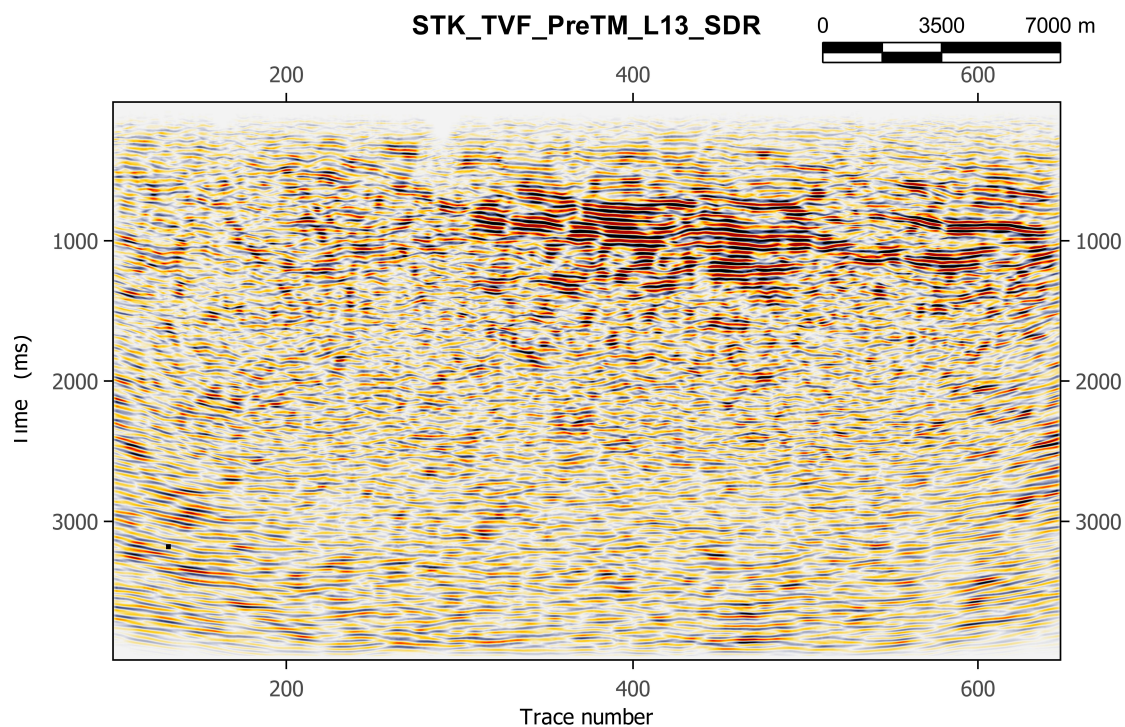
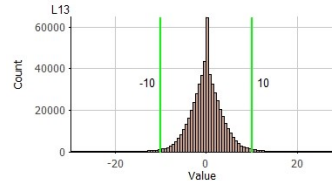
5.0.16. Línea 12

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma y escala de color

Figura 5.18: Sección sísmica final para la línea 12

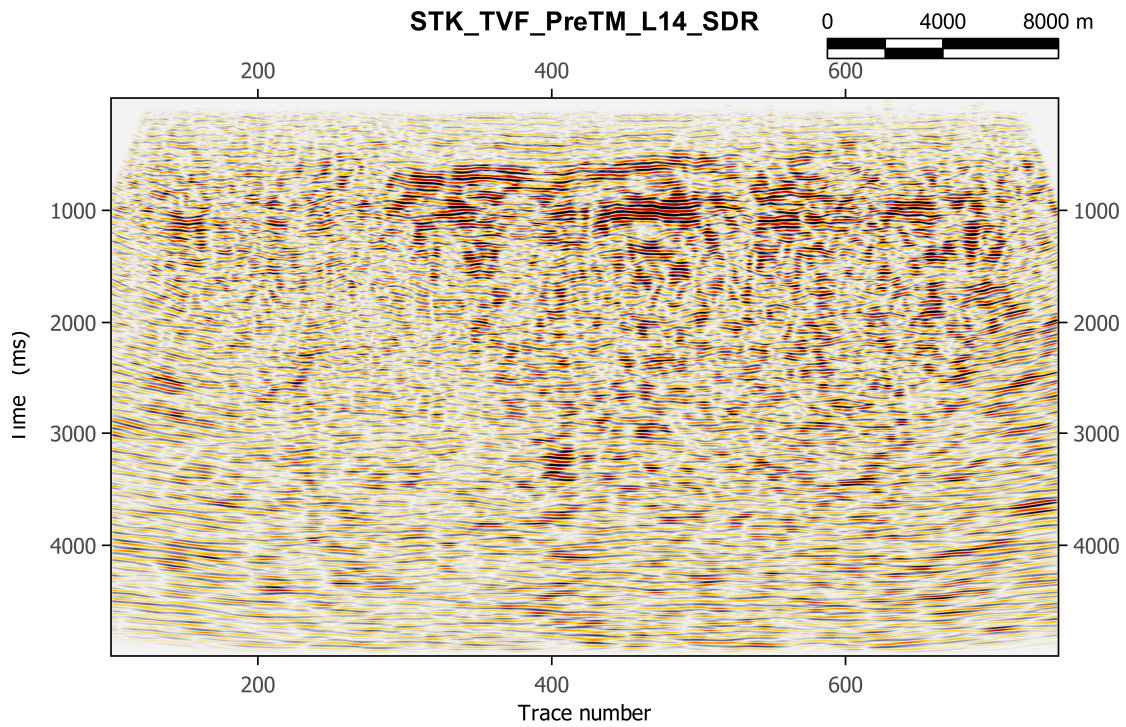
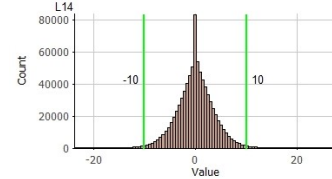
5.0.17. Línea 13

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma y escala de color

Figura 5.19: Sección sísmica final para la línea 13

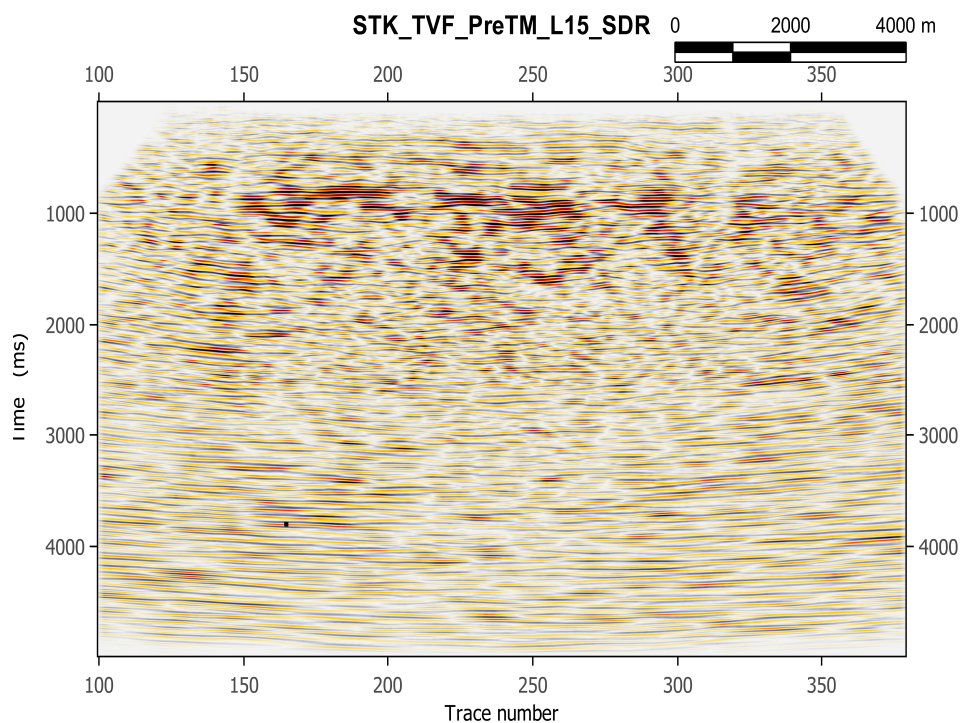
5.0.18. Línea 14

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

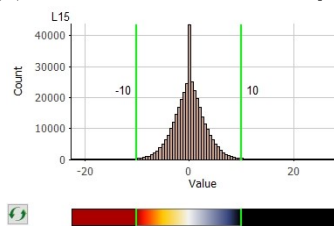
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.20: Sección sísmica final para la línea 14

5.0.19. Línea 15



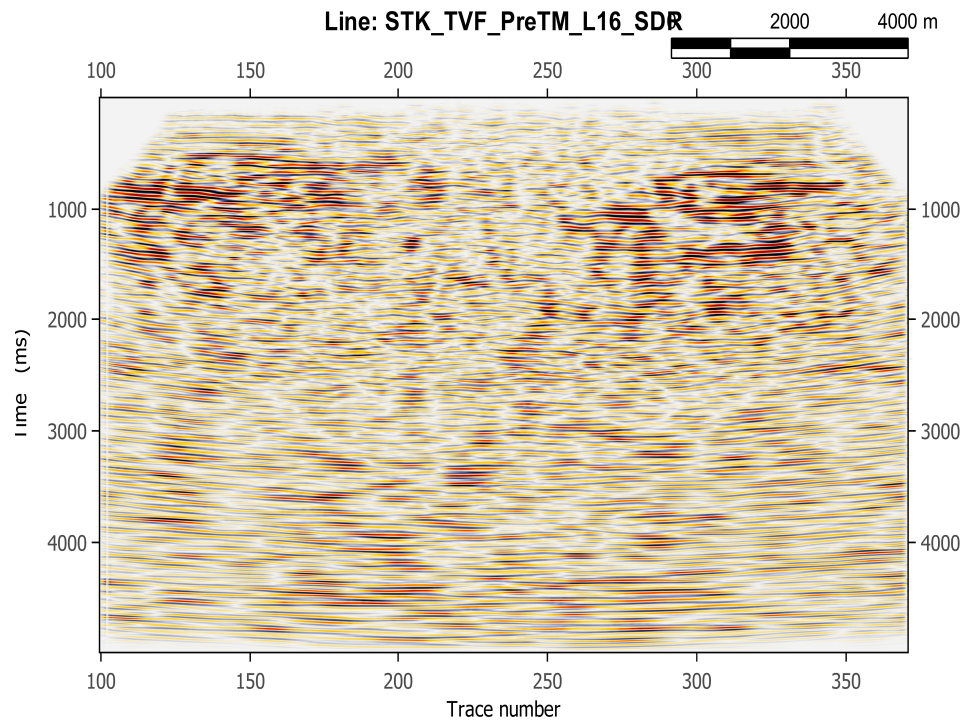
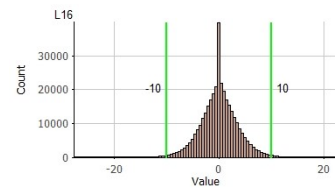
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.21: Sección sísmica final para la línea 15

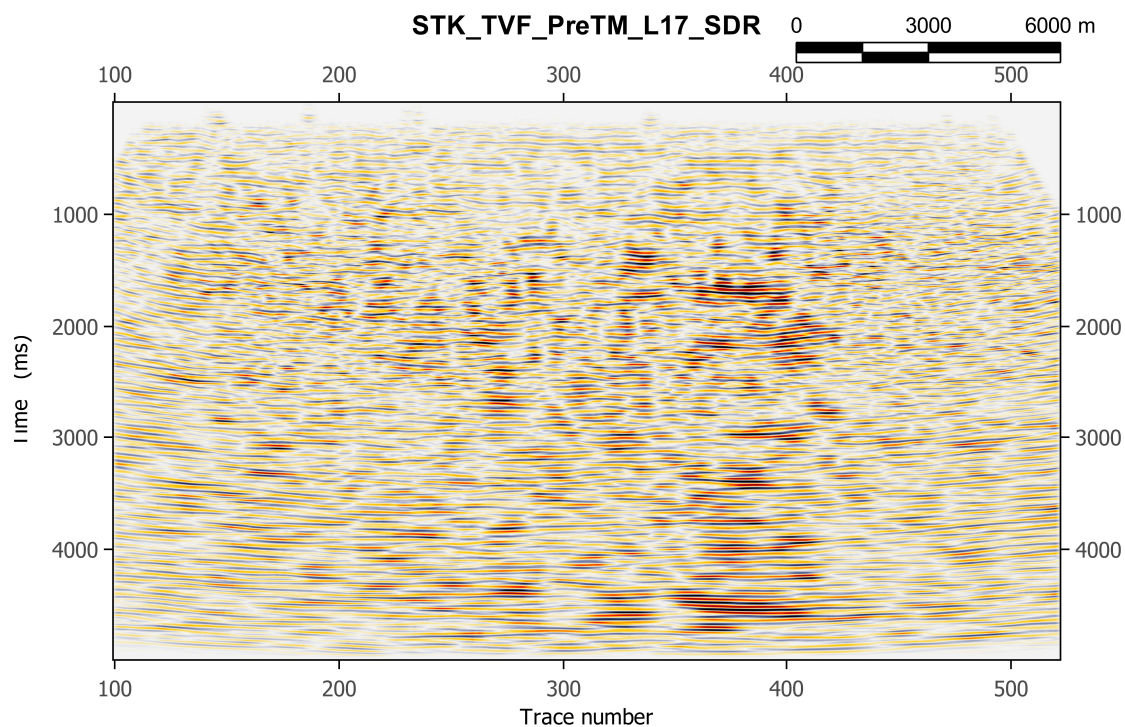
5.0.20. Línea 16

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

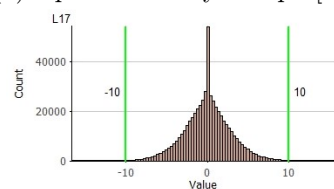
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.22: Sección sísmica final para la línea 16

5.0.21. Línea 17



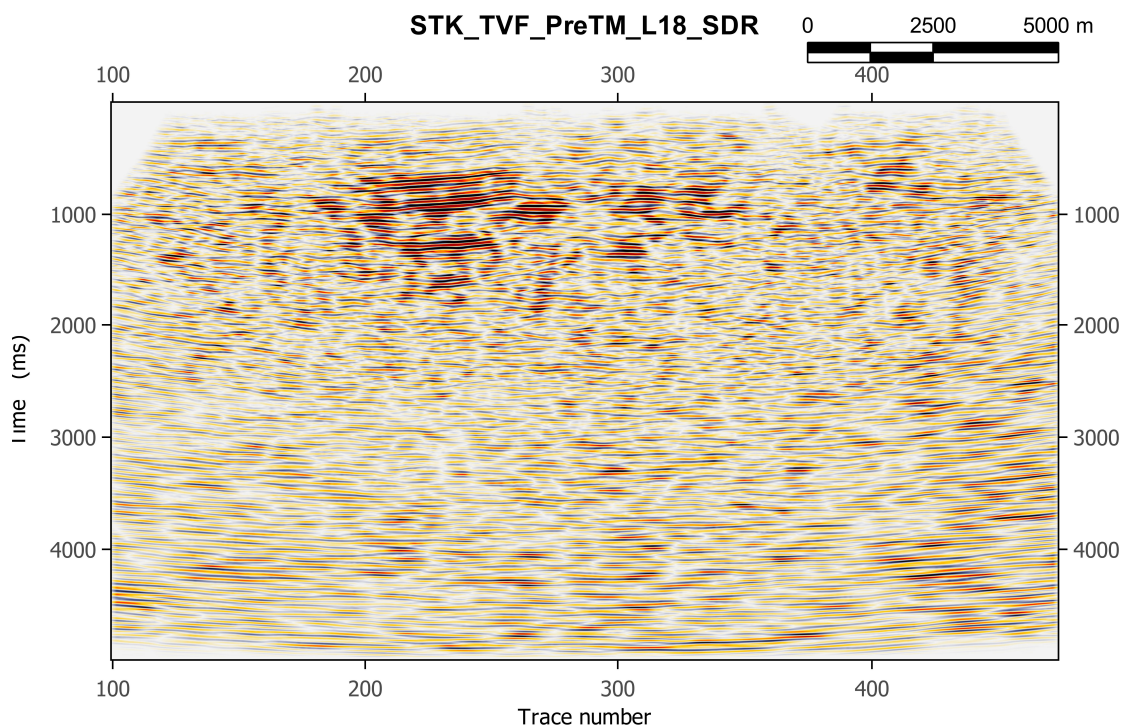
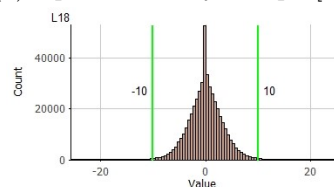
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.23: Sección sísmica final para la línea 17

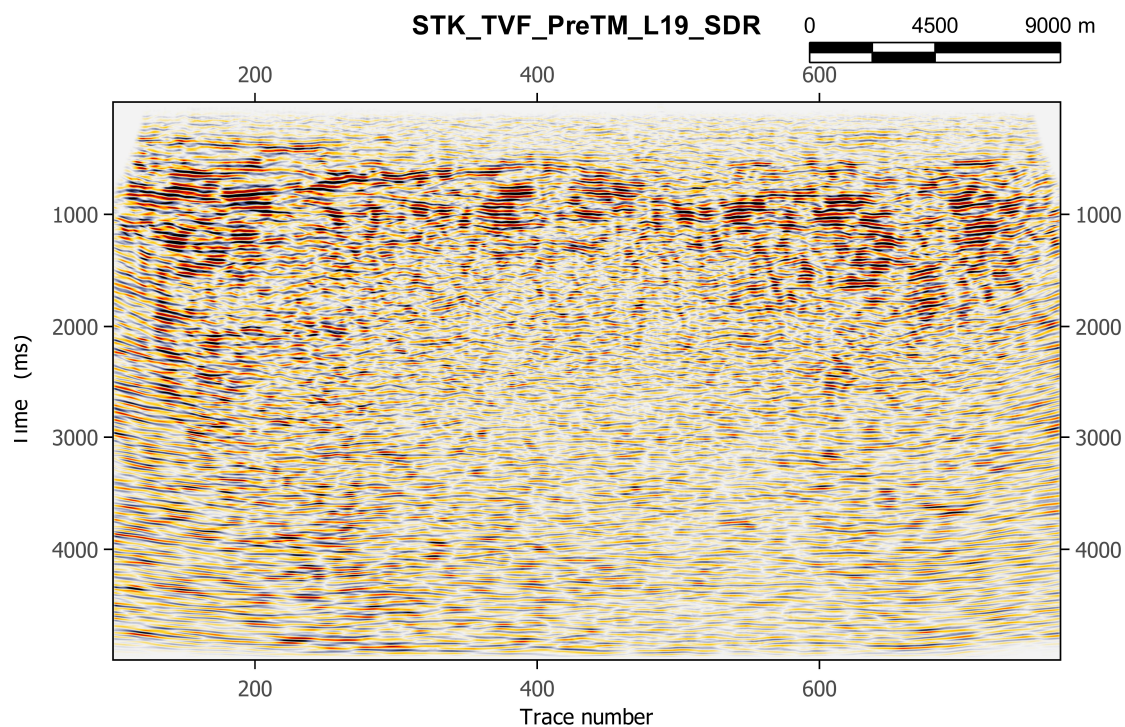
5.0.22. Línea 18

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

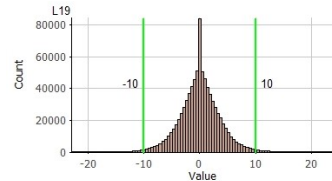
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.24: Sección sísmica final para la línea 18

5.0.23. Línea 19



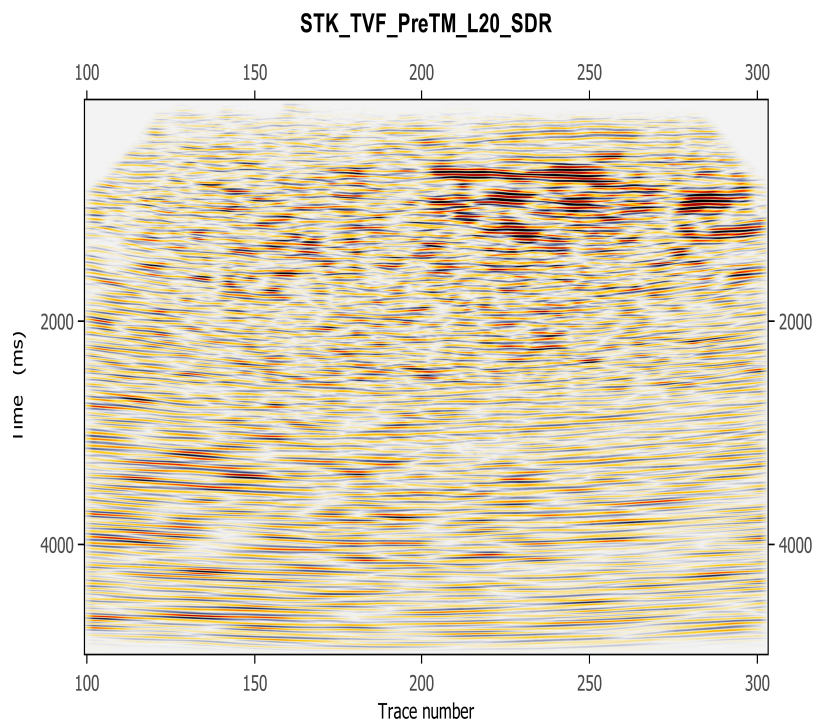
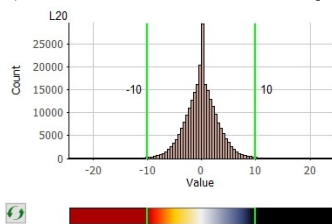
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.25: Sección sísmica final para la línea 19

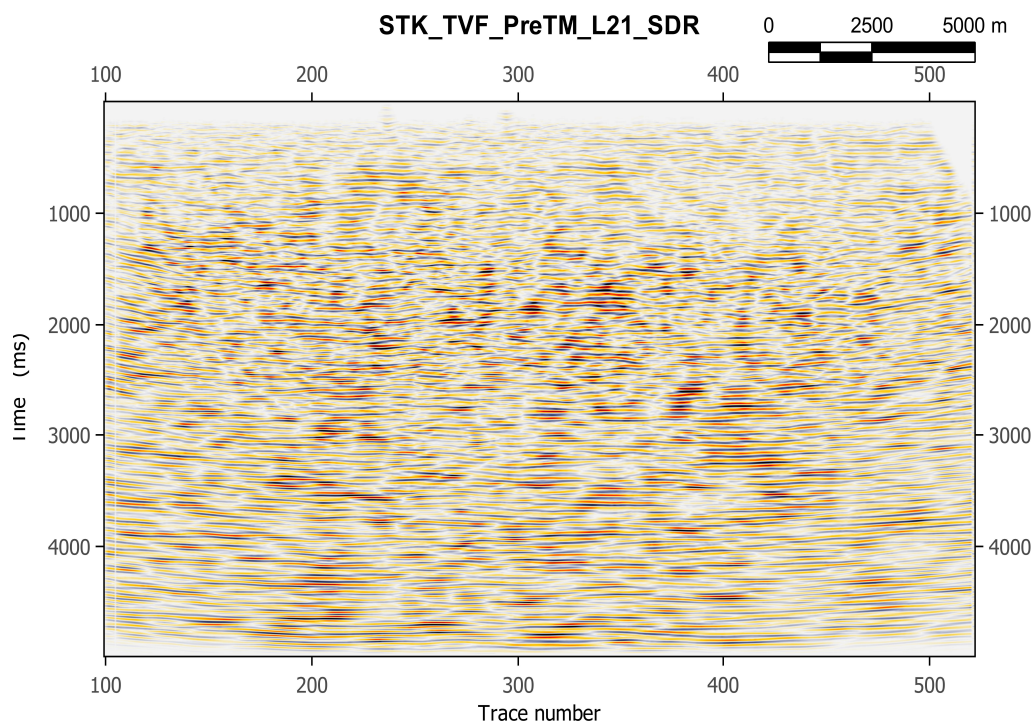
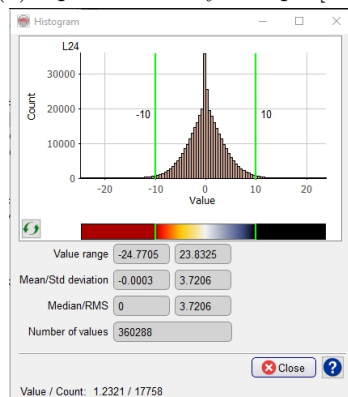
5.0.24. Línea 20

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma y escala de color

Figura 5.26: Sección sísmica final para la línea 20

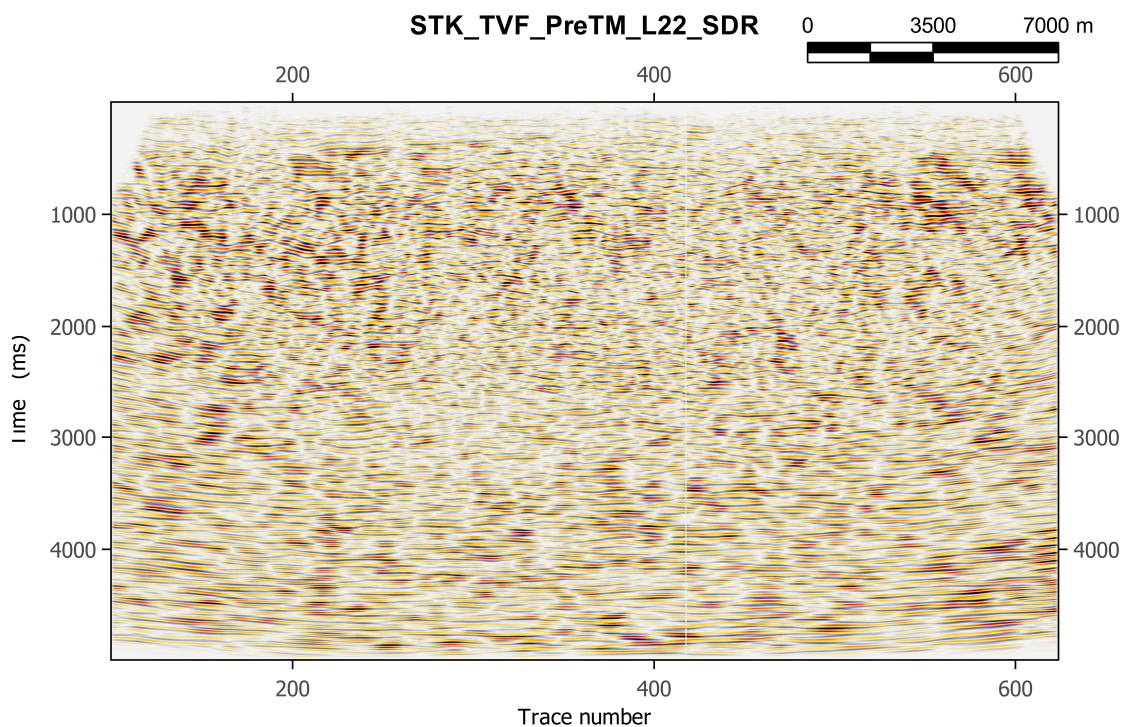
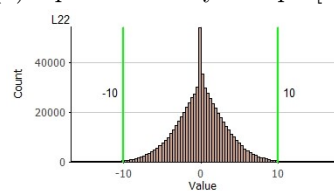
5.0.25. Línea 21

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma y escala de color

Figura 5.27: Sección sísmica final para la línea 21

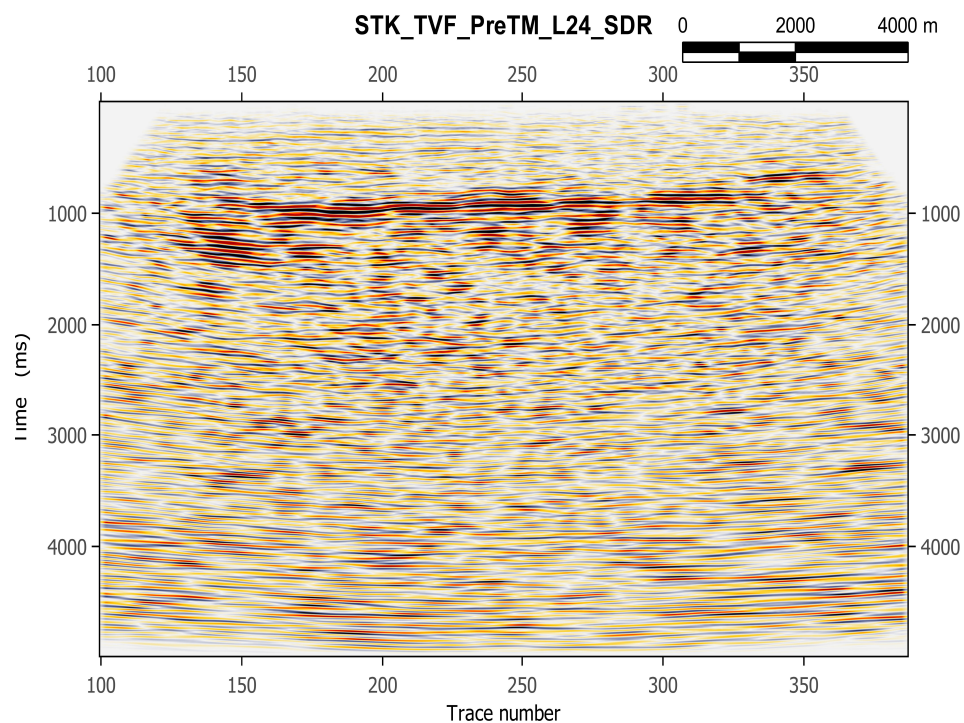
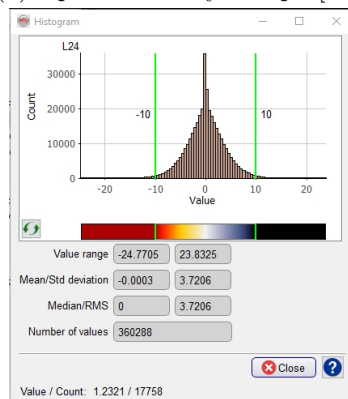
5.0.26. Línea 22

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma y escala de color

Figura 5.28: Sección sísmica final para la línea 22

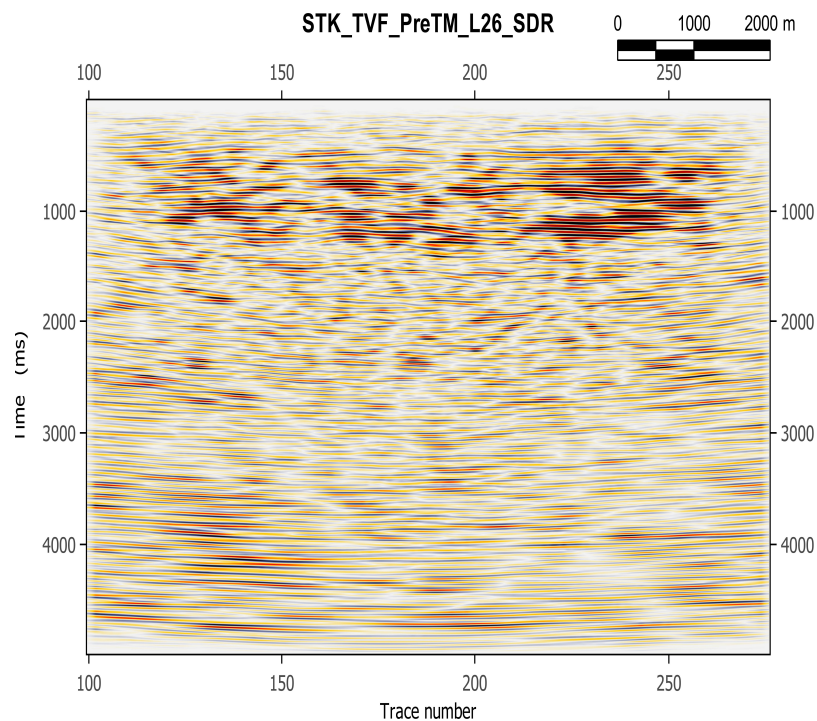
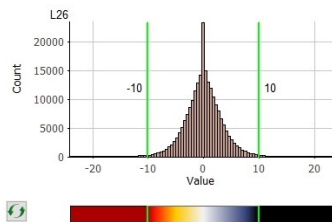
5.0.27. Línea 24

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma y escala de color

Figura 5.29: Sección sísmica final para la línea 24

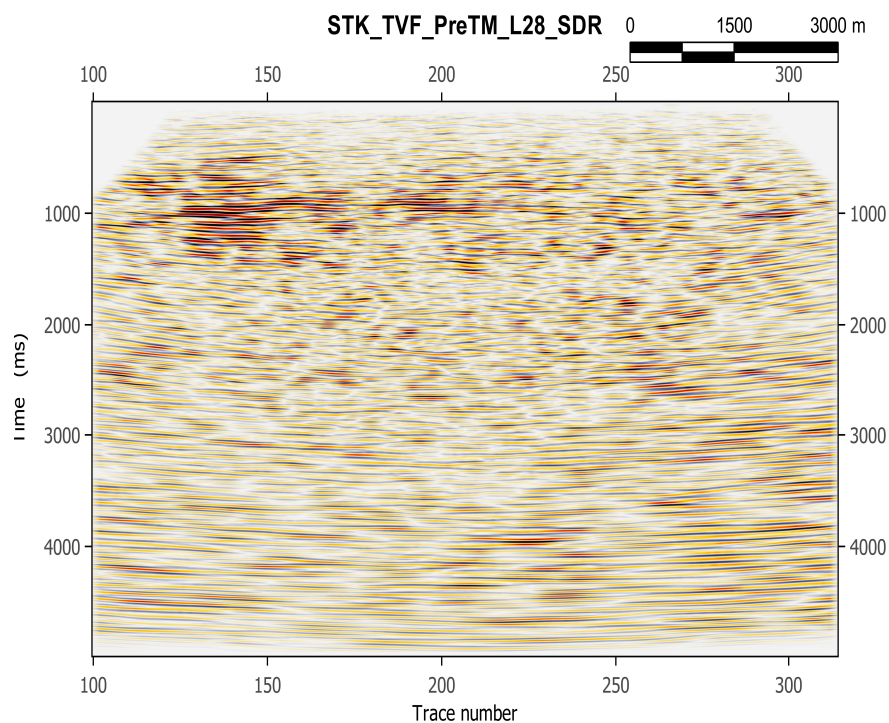
5.0.28. Línea 26

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

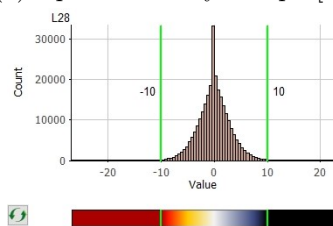
(b) Histograma y escala de color

Figura 5.30: Sección sísmica final para la línea 26

5.0.29. Línea 28



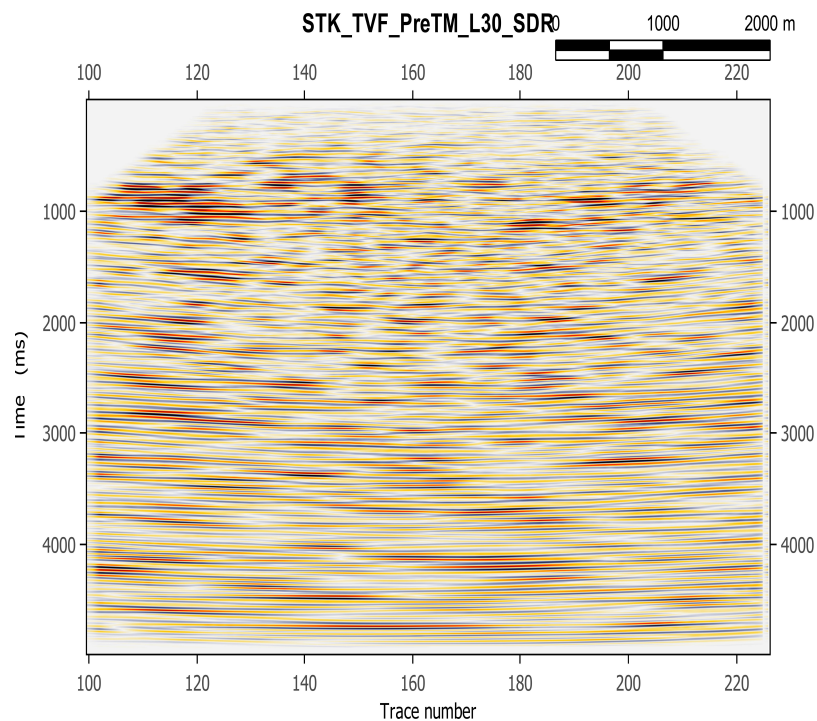
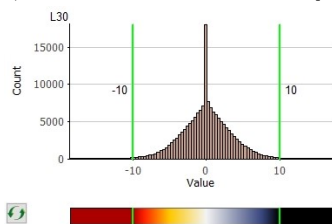
(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]



(b) Histograma y escala de color

Figura 5.31: Sección sísmica final para la línea 28

5.0.30. Línea 30

(a) Apilado *CDP* y tiempo [*ms*]

(b) Histograma y escala de color

Figura 5.32: Sección sísmica final para la línea 30

6 Conclusiones y recomendaciones

La secuencia de procesamiento aplicada en este trabajo es equivalente a un procesamiento con fines exploratorios en la industria petrolera. Se asimiló y aplicó una secuencia de procesamiento 2D terrestre con estándares de la misma.

La secuencia que se diseñó para este reprocesamiento sísmico *PSTM*, tuvo resultados que se comparan con el procesamiento de referencia compartidos por la CNH bajo los estándares de la industria, los cuales se ven reflejados en los 30 apilados correspondientes a las líneas de adquisición sísmica.

El proyecto se realizó con controles de calidad, así como con indicadores clave de desempeño (*KPI*), lo que permitió que toda la secuencia fuera correcta o corregida en distintos aspectos hasta llegar a su culminación.

En las secciones sísmicas *PSTM* brutas, es visible la presencia de ruido remanente, es por esto que se realizó un post-proceso el cual permite un mejor análisis e interpretación de la sección, así como claridad en las fallas presentes. De igual forma las características estructurales tienen una coherencia con los campos de velocidad obtenidos, por lo que a partir de los resultados mencionados, es posible realizar una conversión tiempo profundidad e interpretación en otro proyecto con un contexto diferente.

Los datos resultado de este trabajo tienen aplicaciones para distintos fines, entre ellos la comprobación de horizontes del modelo geológico existente, mapeo de fallas, búsqueda de prospectos para la extracción de agua, generación de un modelo 3D de sísmica de reflexión así como un modelo de velocidades del valle con ayuda de las velocidades RMS y calibración tiempo profundidad con ayuda de los registros de pozo.

A continuación se presentan las recomendaciones a seguir para futuros trabajos:

- Un reproceso de los datos con amplitudes preservadas para estudios de AVO con el fin de evaluar algún contenido de fluidos u otras técnicas como inversión sísmica y/o atributos sísmicos.
- Adquisición de más líneas de sísmica de reflexión 2D con geófonos menores a 5 Hz y offsets lo más largo posible que permitan las condiciones de superficie, para la aplicación del método *RTM* o *FWI*. Se sugiere emplear una línea de referencia de las ya existentes, así como nuevas líneas que cubran la zona Sur-Oeste de la Ciudad de México.
- Nuevas líneas 2D HD de alta densidad, con geófonos de 10 Hz con fines someros, con el fin de incluir los primeros 100 m correspondientes a los sedimentos lacustres. Esto ayudará a mapear con más detalle fallas y agrietamientos en superficie.

Bibliografía

- Chaubey, A. K. (2007). Seismic Reflection and Refraction Methods. *National Institute of Oceanography*.
- Cureño López, G. (2009). *Procesamiento sísmico en tiempo 2D Terrestre con Seismic Unix Área: Chiapas-Tabasco* [Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional].
- K. M. Barry, C. W. K., D. A. Cavers. (1975). Recommended standards for digital tape formats. *Geophysics*.
- Liu, K., & Bancroft, J. C. (2002). The effects of dip-limited Kirchhoff migration and F-K migration. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55257430>
- Luna Izazaga, C. G. (2014). *Respuesta hidrofísica del acuitardo de la Ciudad de México* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Mousa, W. A. (2020). *Advanced digital signal processing of seismic data*. Cambridge university press.
- Pérez Cruz, A. (1988). *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México* [Tesis de maestría, UNAM]. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=TES01
- Shearer, P. M. (2009). *Introduction to seismology*. Cambridge University Press. <http://www.cambridge.org/9780521882101>
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An Introduction to seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing.
- Suarez Serrano, O. (2009). *Modelado y procesamiento de datos con Seismic Unix*. UNAM.
- Unda López, J. A. (2016). *Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del valle de México* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Vázquez Ramírez, D. (2020). *Re-procesamiento y migración pre-apilamiento en tiempo 2d terrestre* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Yilmaz, Ö. (2001, enero). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>