

Análisis e implementación de un algoritmo basado en Transformada Continua Wavelet (*Continuous Wavelet Transform, CWT*), para mejorar resolución temporal de sísmica de reflexión.

JORGE LUIS BACCA MORENO



Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.

Bucaramanga

2011



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Perfecta combinación entre Energía e Intelecto



Análisis e implementación de un algoritmo basado en Transformada Continua Wavelet (*Continuous Wavelet Transform, CWT*), para mejorar resolución temporal de sísmica de reflexión.

JORGE LUIS BACCA MORENO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

PhD Daniel A. Sierra

Codirector

MSc Andrés Eduardo Calle Ochoa

Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.

Bucaramanga

2011

A Dios, a mis padres, mi familia, mi novia y mis amigos.

Apoyo incondicional.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales a mi director el profesor Daniel Alfonso Sierra Bueno por su respaldo y profesionalismo en todo momento.

Agradecimiento al MSc. Andrés Eduardo Calle Ochoa por su orientación en temas relacionados con geofísica y su disponibilidad en los momentos necesarios.

Agradecimiento al MSc. Sergio Abreo por su apoyo desinteresado y su disponibilidad para brindar su colaboración en los momentos necesarios.

Contenido

1. Introducción	11
2. Métodos sísmicos	13
2.1. Sísmica de reflexión	15
2.2. Sísmica de refracción	17
2.3. Procesamiento de datos sísmicos	18
2.3.1. Secuencia de procesamiento de datos sísmicos	18
3. Análisis tiempo-frecuencia	21
3.1. Transformada de Fourier, (FT)	21
3.2. Transformada de Fourier de ventana corta, (STFT)	23
3.3. Transformada continua wavelet (<i>Continuous Wavelet Transform, CWT</i>)	24
3.4. Extensión del ancho de banda sísmico	30
4. Creación de modelos sintéticos y modelado de una adquisición sísmica	33
4.1. Creación del modelo de interfaces	33
4.2. Geometría de la adquisición	34
4.3. <i>Shot Gathers</i>	35
4.4. Concatenación de los <i>Shot Gathers</i>	35
4.5. <i>Orden (CMP)</i>	35
4.6. <i>Correcciones dinámicas por Normal Move-Out (NMO)</i>	37
4.7. Análisis de velocidad	37
4.8. Apilamiento	39
5. Validación del método	41
5.1. Implementación del algoritmo	41
5.1.1. Selección de escalas	45
5.1.2. Modificación de los coeficientes wavelet.	47

CONTENIDO	8
6. Conclusiones	60
7. Observaciones	62
8. Anexos	63
8.1. <i>Anexo A</i>	63
8.2. <i>Anexo B</i>	76
Bibliografía	86

Lista de Figuras

2.1. Comportamiento de las ondas al entrar en contacto con un medio, <i>fuentes: [1]</i>	14
2.2. Arreglo fuente-receptores para una adquisición sísmica <i>fuentes: [1]</i>	14
2.3. Propagación de ondas S (transversales, izquierda) y ondas P (longitudinales, derecha). <i>fuentes: [2]</i>	15
2.4. Lóbulos en ondas reflejadas que representan las interfaces del subsuelo <i>fuentes: [3]</i>	16
2.5. Trazas obtenidas para disparo de cola (izquierda) y para disparo simétrico (derecha) <i>fuentes: [3]</i>	17
2.6. Comportamiento de los rayos refractados dentro de la tierra <i>fuentes: [3]</i>	18
3.1. Wavelet Morlet. Parte real continua, parte imaginaria punteada (Izquierda). Representación en el dominio de la frecuencia (Derecha) <i>fuentes: [4]</i>	25
4.1. Perfil de velocidad creado con SU	34
4.2. <i>Shot Gather</i> para un disparo con la fuente en la posición 1500 m.	35
4.3. Cuatro <i>Gather shots</i> concatenados.	36
4.4. Puntos medios comunes para varios pares fuente-receptor. <i>fuentes: [3]</i>	36
4.5. <i>CMP Gather</i> concatenados.	37
4.6. <i>CMP gather</i> con corrección a <i>offset</i> cero.	38
4.7. <i>CMP gather</i> (a) de donde se obtiene el mapa de velocidades (b) para determinar velocidad de apilado, <i>fuentes: [5]</i>	38
4.8. Mapa de velocidades de un CDP para el modelo 4.1.	39
4.9. Sección sísmica pre-apilada.	40
4.10. Sección sísmica apilada.	40
5.1. Modelo de interfaces horizontales.	42
5.2. Sección sísmica pre-apilada para el modelo de interfaces horizontales.	42
5.3. Sección sísmica pos-apilada para el modelo de interfaces horizontales.	43
5.4. Modelo de cuña sencilla.	43

5.5. Sección sísmica pre-apilada para el modelo de cuña.	44
5.6. Sección sísmica pos-apilada para el modelo de cuña.	44
5.7. Trazas 50 (izquierda) y 100 (derecha) pos-apiladas para el modelo de cuña. . .	45
5.8. Contenido de frecuencias de la traza 50 modelo cuña.	46
5.9. Contenido de frecuencias de la traza 100 modelo cuña.	46
5.10. Contenido de frecuencias de la traza 50 modelo horizontal.	47
5.11. Contenido de frecuencias de la traza 100 modelo horizontal.	47
5.12. Ondícula Morlet y su respuesta en frecuencia para un factor de escala de 0.080812 y $\delta j = 1/4$	48
5.13. Ondícula Morlet y su respuesta en frecuencia para un factor de escala de 0.76882 y $\delta j = 1/4$	49
5.14. Contenido frecuencial de la traza 1 modelo cuña reemplazando <i>CM</i> 8-10 por <i>CS</i> 11-13.	50
5.15. Contenido frecuencial de la traza 50 modelo cuña reemplazando <i>CM</i> 8-10 por <i>CS</i> 11-13.	51
5.16. Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando <i>CM</i> 8-10 por <i>CS</i> 11-13.	52
5.17. Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando <i>CM</i> 8-18 por <i>CS</i> 11-21.	53
5.18. Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando <i>CM</i> 1-11 por <i>CS</i> 11-21.	53
5.19. Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando los <i>CM</i> 1-11 por una suma ponderada de <i>CS</i> 11-21, <i>CM</i> 8-18 y <i>CM</i> 1-11.	54
5.20. Contenido frecuencial de la traza 41 modelo cuña reemplazando los <i>CM</i> 10-14 por <i>CS</i> 15-19.	54
5.21. Contenido frecuencial de la traza 41 modelo cuña reemplazando los <i>CM</i> 10-23 por <i>CS</i> 15-28.	55
5.22. Contenido frecuencial de la traza 41 modelo cuña reemplazando los <i>CM</i> 1-14 por <i>CS</i> 15-28.	55
5.23. Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando los <i>CM</i> 1-14 por una suma ponderada de <i>CS</i> 15-28, <i>CM</i> 10-23 y <i>CM</i> 1-14.	56
5.24. Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando los <i>CM</i> 1-19 por una suma ponderada de <i>CS</i> 18-36, <i>CM</i> 12-30 y <i>CM</i> 1-19.	56
5.25. Datos apilados de entrada modelo cuña.	57
5.26. Datos apilados obtenidos modelo cuña.	57

5.27. Información en el dominio de la frecuencia para la traza 199 de los datos pre-apilados.	58
5.28. Información en el dominio de la frecuencia para la traza 100 de los datos pos-apilados.	58
5.29. Secciones sísmicas finales procesando datos pre-apilados para el modelo de cuña (izquierda) y pos-apilados para el modelo de interfaces horizontales (derecha). .	59

RESUMEN

TÍTULO:

“Análisis e implementación de un algoritmo basado en Transformada Continua Wavelet (*Continuous Wavelet Transform, CWT*), para mejorar resolución temporal de sísmica de reflexión”*

AUTOR: Jorge Luis Bacca Moreno.**

PALABRAS CLAVE: Ancho de banda sísmico, Transformada Continua Wavelet *CWT*, Sección sísmica, Sísmica de reflexión, Resolución temporal.

DESCRIPCIÓN:

La capacidad de detectar detalles dentro de una imagen determina la resolución que esta posee. La naturaleza tridimensional de las imágenes sísmicas utilizadas en diferentes industrias incluida la de los hidrocarburos, involucra resolución tanto horizontal como vertical. La resolución vertical de una imagen sísmica es función de su contenido frecuencial, por lo que obtener un buen resultado exige conocer lo mejor posible dicho contenido y lograr mantener un ancho de banda sísmico extenso.

Los métodos tradicionales para analizar las señales sísmicas en el dominio de la frecuencia utilizan técnicas como la transformada de Fourier o la transformada de Fourier de ventana corta. Estas dos transformadas poseen ciertas limitaciones en su aplicación a señales sísmicas que la transformada continua wavelet logra superar. Mediante la aplicación de la Transformada Continua Wavelet se analizan las señales sísmicas representadas como series de tiempo y se extiende el ancho de banda sísmico. La información correspondiente a las frecuencias fundamentales establecidas en el ancho de banda de las señales sísmicas se utiliza para realzar los detalles presentes en las frecuencias correspondientes a los armónicos y subarmónicos de dichas frecuencias. La extensión del ancho de banda sísmico se puede aplicar a secciones sísmicas pre y pos-apiladas cuya resolución temporal mejora al aplicar esta técnica.

***TÍTULO:** “Análisis e implementación de un algoritmo basado en Transformada Continua Wavelet (*Continuous Wavelet Transform, CWT*), para mejorar resolución temporal de sísmica de reflexión”

****FACULTAD:** Ingenierías Fisicomecánicas. **ESCUELA:** Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. **DIRECTOR:** PhD. Daniel Alfonso Sierra Bueno. **CODIRECTOR:** MSc. Andrés Eduardo Calle Ochoa.

ABSTRACT

TITLE:

“Analysis and implementation of an algorithm based on Continuous Wavelet Transform (CWT), to improve temporal resolution on reflection seismic.”*

AUTHOR: JORGE LUIS BACCA MORENO**

KEYWORDS: Continuous Wavelet Transform, Seismic bandwidth, Seismic section, Reflection Seismic, Temporal resolution.

DESCRIPTION:

Capability for detecting details inside a image determinates its resolution. Tridimensional nature of seismic images used in different industries including hydrocarbons industry, involves both horizontal and vertical resolution. Vertical resolution depends of the frecuencial content, so obtain a good result requires have a good frecuencial information and posses and extended seismic bandwidth.

Traditional methods to analyze seismic signals in frequency domain use techniques like Fourier Transform or Short windowed Fourier Transform. Both transformed have limitations in its application to seismic signals and the Continuous Wavelet Transform can overcome them. Applying Continuous Wavelet Transform seismic signals represented by a time series are analyzed and seismic bandwidth is extended. Fundamental frequency information from seismic bandwidth is used to enhance details present in harmonics and sub harmonics. Seismic bandwidth extension could be applied to pre and post-stack seismic sections and its temporal resolutions its improved with the applications of this technique.

*“Analysis and implementation of an algorithm based on Continuous Wavelet Transform (CWT), to improve temporal resolution on reflection seismic.”

****FACULTY:** Engineering Physicomechanical. **SCHOOL:** School of Electrical, Electronics and Telecommunications. **ADVISOR:** PhD. Daniel Alfonso Sierra Bueno. **CO-ADVISOR:** MSc. Andrés Eduardo Calle Ochoa

Capítulo 1

Introducción

Como parte del proceso investigativo y la necesidad de desarrollo tecnológico relacionados con temas de geofísica, es necesario tomar en cuenta uno de los factores determinantes en la exploración de hidrocarburos como es la generación de imágenes sísmicas, cuya aplicación permite determinar estructuras geológicas de interés para esta industria o con fines científicos. Aunque los alcances actuales de estos métodos son aceptables, los hidrocarburos de fácil acceso ya no tienen la misma disponibilidad y los costos en la producción y exploración van en aumento, impulsando la aplicación de tecnologías innovadoras que disminuyan el riesgo exploratorio.

Con el desarrollo de este trabajo, se busca implementar una herramienta computacional que permita validar el uso de una técnica de análisis en frecuencia para alcanzar uno de los objetivos de los métodos sísmicos, como es el de generar imágenes confiables del subsuelo. El mejoramiento de estas a través de técnicas de procesamiento que aumenten su resolución temporal, permite su uso en la exploración de posibles reservorios de hidrocarburos no detectables anteriormente.

Inicialmente se establecen los conceptos preliminares que enmarcan el desarrollo del proyecto. Se muestra un marco teórico relacionado con los conceptos básicos sobre los métodos sísmicos y procesamiento de estos datos. Estableciendo las características del tipo de señales con las que se va a trabajar y las técnicas de análisis tiempo-frecuencia que serán de utilidad.

Seguidamente se muestra la forma como se crearon los modelos sintéticos con los que se determinan resultados preliminares. Estos modelos establecen un punto de referencia para realizar la comparación antes y después de la aplicación del método seleccionado.

Finalmente se describe el desarrollo del algoritmo computacional. Se muestran algunas de

las pruebas realizadas con los resultados correspondientes y se determina la mejor metodología. El resultado de la aplicación del método a señales sísmicas pre y pos apiladas también es presentado en este documento.

Capítulo 2

Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos representan una serie de pruebas realizadas al subsuelo, empleando ondas elásticas generadas artificialmente que se propagan a través de las capas rocosas de la tierra con propiedades físicas y litológicas de interés, estas pruebas se aplican con el fin de determinar dichas características. Existen dos métodos sísmicos comúnmente usados en la exploración sísmica como lo son el método de refracción y el método de reflexión.

Gran parte de lo que se conoce acerca del subsuelo terrestre se ha determinado gracias a la forma como las ondas se comportan al propagarse por el mismo (Ver figura 2.1). Cuando una onda viaja a través del subsuelo experimenta partición de energía cada vez que a su paso se encuentra una interface entre capas con propiedades físicas diferentes: una parte de esta energía es reflejada y otra es transmitida. La energía que se refleja forma el campo de ondas que contiene información de las amplitudes, longitudes de onda, fases y tiempos dobles de los reflectores del subsuelo. Para realizar exploración mediante métodos sísmicos se trabaja con fuentes con las cuales se generan las ondas en la superficie terrestre bien sea por medio de vibraciones o con explosiones controladas; las refracciones y reflexiones de las ondas generadas se almacenan en forma digital en cintas o discos duros en los equipos de registro de los geófonos. Posteriormente esta información sea procesada para la generación de secciones sísmicas donde se busca observar las diferentes formaciones rocosas e interfaces del subsuelo [6].

El proceso de generar ondas hacia el subsuelo y recibirlas del mismo se denomina adquisición sísmica y son las fuentes y los receptores parte fundamental dentro de este proceso. Cuando se lleva a cabo una adquisición sísmica el proceso se basa en realizar disparos desde las fuentes de onda para que varios receptores capturen la información que regresa de la tierra. Para cada disparo existen varios receptores, esto se conoce como un arreglo fuente-receptor (Ver figura 2.2). La ubicación de la fuente de disparo y cada uno de los grupos de receptores,

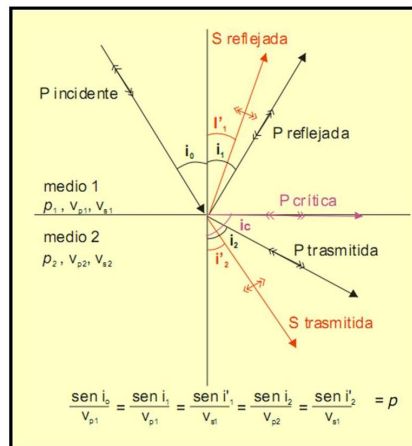


Figura 2.1: Comportamiento de las ondas al entrar en contacto con un medio, *fuentes: [1]* .

se conoce como geometría de la adquisición.

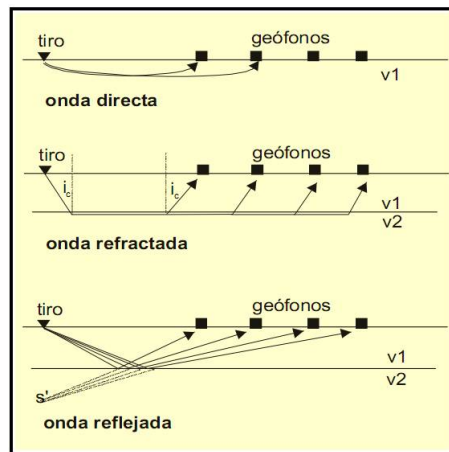


Figura 2.2: Arreglo fuente-receptores para una adquisición sísmica *fuentes: [1]*

Las reflexiones y refracciones sufridas por las ondas generan componentes compresionales (longitudinales) y transversales (de cizalla). Las primeras se denominan así porque las partículas, bien sea de sólidos o líquidos, se mueven en dirección paralela a la de su propagación. Por su parte las ondas transversales reciben este nombre porque el movimiento de las partículas del material se presenta de forma perpendicular a la propagación de la onda (Ver figura 2.3), estas se presentan solo en sólidos [3]. Las ondas longitudinales también son conocidas como ondas primarias o tipo P y las ondas de cizalla como ondas secundarias o tipo S.

Parámetros como el tipo de topografía, instrumentos disponibles para la preparación del terreno, las fuentes empleadas y el procesamiento de los datos son las principales diferencias en la aplicación de métodos sísmicos alrededor del mundo.

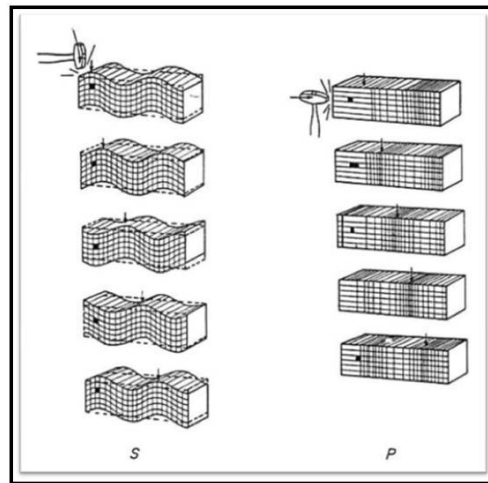


Figura 2.3: Propagación de ondas S (transversales, izquierda) y ondas P (longitudinales, derecha). *fente: [2]* .

2.1. Sísmica de reflexión

La sísmica de reflexión se basa en la recepción, almacenamiento y procesamiento de las señales correspondientes a las reflexiones sobre las diferentes interfaces terrestres, las cuales responden a diferencias de impedancias que se relacionan con las diferentes características geológicas terrestres. Este método representa actualmente una de las técnicas de prospección geofísica más aplicada en diferentes industrias, incluyendo la de los hidrocarburos (en búsqueda de reservorios de gas y petróleo). Su resultado es una sección sísmica donde se puede apreciar la geometría de las estructuras geológicas de interés y aunque su desarrollo solo contempla la información de las ondas reflejadas no indica que las refracciones no se presenten durante el desarrollo de una adquisición [3]. Adicionalmente solo se detectan las componentes longitudinales pero cabe aclarar que en la actualidad existen dispositivos conocidos como geófonos multicomponente capaces de detectar ambos tipos de onda, longitudinales y de cizalla.

De los disparos analizados se obtiene un grupo de trazas para cada uno, el número de trazas por grupo corresponde al número de receptores por disparo. Las trazas obtenidas son procesadas y reorganizadas por puntos reflectores comunes (CMP, del inglés *common midpoint*). Los cuales contienen información de todas las reflexiones halladas. Cuando todas las trazas con un mismo CMP se suman, se obtiene una sola traza CMP. El conjunto de trazas CMP constituye una sección sísmica de reflexión que posteriormente será procesada para determinar la geometría del subsuelo. Es de tener en cuenta que las formas de onda que se

presentan donde las reflexiones se ven en forma de lóbulos con mayor amplitud y así definen las capas reflectoras que caracterizan dicha geometría, (Ver figura 2.4).

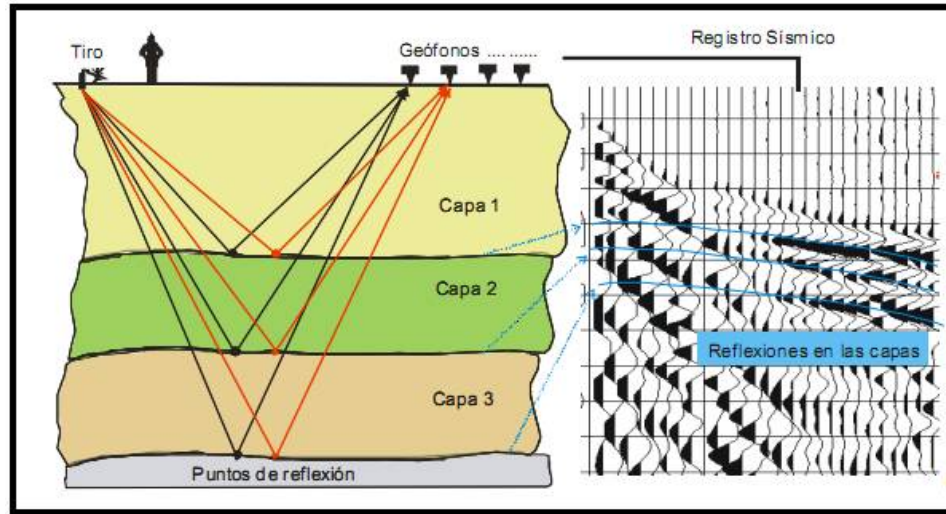


Figura 2.4: Lóbulos en ondas reflejadas que representan las interfaces del subsuelo *fuentes: [3]*.

Cuando se está trabajando con datos de sísmica de reflexión se debe ser muy cuidadoso para lograr obtener de los registros las reflexiones y eliminar la onda directa, las refracciones que se puedan presentar, el ruido y cualquier tipo de información no deseada. Es por ello que la aplicación de procesamiento multiseñal debe hacerse de forma cuidadosa, para no crear artefactos que puedan causar confusión al momento de interpretar la sección sísmica [3].

Para el caso de este trabajo, los modelos sintéticos implementados son ideales y no precisan este tipo de procesamiento, ya que la finalidad no es procesar datos sísmicos sino aplicar técnicas en frecuencia a datos pre y pos-apilados.

Los disparos realizados en una adquisición sísmica de manera general se ubican en los extremos del terreno a estudiar (Los arreglos fuente-receptor sólo presentan receptores a un lado de la fuente), recibiendo por nombre disparos de cabeza o de cola dependiendo del caso y permiten cubrir una mayor distancia de la trayectoria de los reflectores. Cuando los disparos se realizan desde el centro del terreno (Con geófonos igualmente distribuidos a lado y lado de la fuente) se denominan disparos simétricos y permiten tener mayor control sobre el efecto de hipérbola de reflexión.

La figura (2.5) muestra ejemplos de adquisiciones con disparos de cola y simétricos. Para

el disparo de cola se pueden apreciar mejor las reflexiones de baja amplitud. Por su parte en los disparos simétricos se muestran mejor las reflexiones por debajo de 60ms y no se detallan las primeras reflexiones.

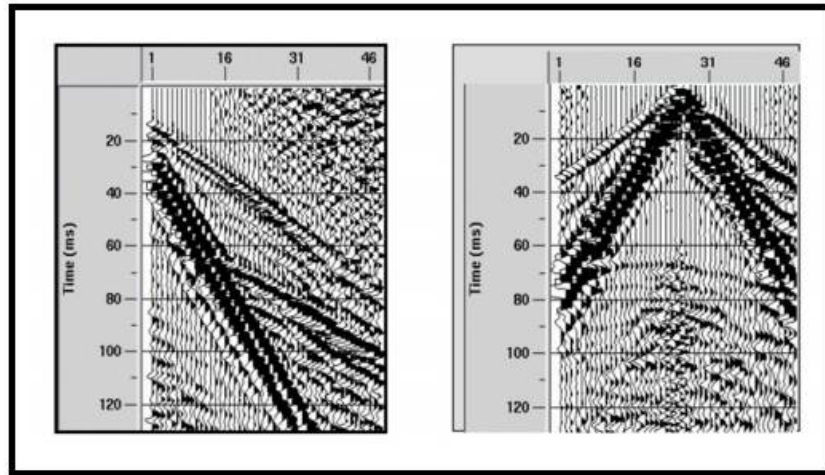


Figura 2.5: Trazas obtenidas para disparo de cola (izquierda) y para disparo simétrico (derecha) *fuentes: [3]*.

2.2. Sísmica de refracción

El método de sísmica de refracción fue muy utilizado y contribuyó al descubrimiento de grandes campos petroleros en la década de los 60, aunque la sísmica de reflexión opacaba su desempeño entregando información más detallada. Para este trabajo sólo se tendrán en cuenta datos sísmicos de reflexión.

Se basa en la medición del tiempo de viaje de las ondas que se refractan críticamente en las interfaces entre las capas con diferentes propiedades físicas y solo se consideran las refracciones con ángulo crítico ya que son las únicas que logran llegar a los geófonos. La figura (2.6) muestra el comportamiento de los rayos refractados y capturados por los geófonos.

Los bajos costos y la información sobre el campo de velocidades que entrega este método lo llevan a ser una herramienta poderosa que actualmente se utiliza para el estudio de estructuras de corteza terrestre y estudios de subsuelo más inmediato [3].

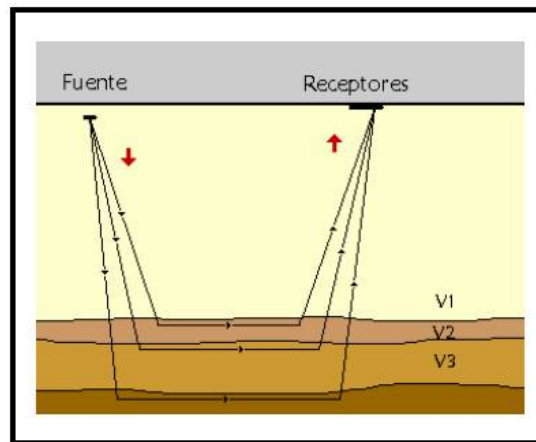


Figura 2.6: Comportamiento de los rayos refractados dentro de la tierra *fuentes*: [3].

2.3. Procesamiento de datos sísmicos

El procesamiento de datos sísmicos consiste en la selección y aplicación de parámetros y algoritmos de tratamiento de los datos capturados por los geófonos (en bruto) para obtener secciones sísmicas de buen calidad, aislando las reflexiones de otro tipo de eventos como ruido que afectan los resultados esperados.

Ya que factores como el volumen de datos y la capacidad de obtener potencia de cálculo representan puntos determinantes en el desarrollo de los métodos sísmicos, manejar apropiadamente las técnicas de procesado es un factor determinante en la prospección geofísica.

La preservación de altas frecuencias en los datos recibidos es importante porque estas contienen información de las estructuras geológicas superficiales. El preprocesamiento puede conllevar a la supresión o reducción de información valiosa en frecuencias de interés [3].

2.3.1. Secuencia de procesamiento de datos sísmicos

Los pasos más importantes en el procesamiento de datos sísmicos incluyen las etapas de Pre-apilamiento, Apilamiento y Pos-apilamiento, [3].

Dentro de cada una de estas etapas se aplican tratamientos fijos, mientras que algunos algoritmos, como filtrado o escalamiento en amplitud, pueden ser aplicados en cualquier momento del procesado [7].

Pre-apilamiento

1. Almacenamiento

En esta etapa se establece el tipo de formato que tendrán los datos almacenados, buscando compatibilidad con el software normalmente utilizado. La Sociedad de exploración en geofísica (*Society of Exploration Geophysicists (SEG)*) sugirió en 1990 un formato estándar para los datos adquiridos, apareciendo así los formatos SEG-2 para sísmica superficial y SEG-Y ¹ para sísmica profunda.

2. Geometría de la adquisición

Definir correctamente las coordenadas de los arreglos fuente-receptor y especificaciones como el *offset* (distancia entre una fuente y un receptor) es esencial cuando se busca que cada una de las trazas obtenidas quede completamente caracterizada. Algunos de estos datos se introducen manualmente y otros se establecen en los cabeceros de las trazas.

3. Edición de registros

Representa la parte más importante en todo el flujo de tratamiento de los datos ya que los resultados finales dependen de la forma como se aíslen las reflexiones de interés.

En esta etapa se aplican procesos de eliminación de trazas con ruido o malas conexiones, inversión de polaridad de trazas debido al terreno o al cambio de conexiones de los equipos, diferentes tipos de filtrado y análisis espectrales.

Otros procesos que también hacen parte de esta etapa son la aplicación de correcciones estáticas, de amplitud de onda y la extracción de la ondícula básica de las trazas. La aplicación de correcciones estáticas se utiliza para obtener tiempos de viaje que correspondan a trazas donde la fuente y el receptor se encuentran en el mismo lugar.

Apilamiento

1. Orden CMP

¹Formato que contiene información de las trazas y los cabeceros que contienen información de la adquisición.

Por medio de este ordenamiento se agrupan todas las trazas que pertenecen a un mismo punto medio entre una fuente y un receptor.

2. Correcciones dinámicas NMO

Las correcciones por NMO (*Normal Moveout*), se aplican para transformar la trayectoria hiperbólica que representa una reflexión producto del *offset* entre fuente y receptor, en una línea horizontal donde las trazas a ser sumadas estarán en fase.

3. Análisis de velocidad

El análisis de velocidad genera un campo de velocidades, el cual mapea la velocidad de propagación en el subsuelo. Esta información es crucial para obtener una sección sísmica.

4. Apilamiento

Con todas las correcciones aplicadas, se procede a sumar las trazas y obtener una sección sísmica formada por todas las trazas CMP.

Post-apilamiento

Este procesamiento busca recuperar las altas frecuencias que se pierden en el apilamiento, se busca eliminar ruido en altas y bajas frecuencias y se introduce cierta ganancia en amplitud para lograr una mejor visualización, [3].

Finalmente se obtiene una imagen sísmica compuesta por señales que representan las reflexiones del frente de onda y con características no estacionarias cuyas componentes varían en el tiempo [8].

Capítulo 3

Análisis tiempo-frecuencia

Las imágenes sísmicas poseen detalles que se pueden identificar sólo en ciertas frecuencias. Para la mejor detección de estos detalles se aplican técnicas de descomposición espectral que permiten obtener imágenes con mejor resolución temporal. La descomposición espectral hace referencia al proceso por medio del cual datos sísmicos son transformados del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, aplicando herramientas matemáticas que entregan volúmenes con la información frecuencial.

Dentro de las técnicas utilizadas para la descomposición espectral se encuentran la transformada de Fourier, la transformada de Fourier de ventana corta y la transformada continua wavelet (*Continuous Wavelet Transform, CWT*) .

3.1. Transformada de Fourier, (FT)

La transformada de Fourier es una herramienta bien desarrollada y aplicable al procesamiento de señales estacionarias (con contenido frecuencial constante a través del tiempo). Sin embargo es limitada para señales transitorias o no estacionarias, la transformada de Fourier se convierte en una herramienta inadecuada [9].

La esencia de la transformada de Fourier es descomponer la señal como combinaciones lineales de funciones senoidales [8].

Una función $f(t)$ tiene una representación en series de Fourier, si se puede representar como una combinación lineal de exponenciales complejas que se relacionan como lo indica 3.1:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in(2\pi/T)t} \quad (3.1)$$

Donde los C_n son los coeficientes de la serie de Fourier y se determinan por 3.2:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_T f(t) e^{-in(2\pi/T)t} dt \quad (3.2)$$

Definida por (3.3), la transformada de Fourier se expresa:

$$\hat{f}(w) = \int_{+\infty}^{-\infty} f(t) e^{-iwt} dt \quad (3.3)$$

Y la transformada inversa se define por 3.4, [8]:

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{+\infty}^{-\infty} f(w) e^{iwt} dw \quad (3.4)$$

Para señales sísmicas el análisis de Fourier está definido como una correlación de estas señales con un conjunto de senoidales en determinadas frecuencias. Cada coeficiente de correlación entre una senoidal dada y el dato procesado es llamado componente frecuencial. Normalmente se usa el teorema de Euler, (3.5) [10].

$$e^{iwt} = \cos(wt) + i\sin(wt) \quad (3.5)$$

Donde $w = 2\pi f$ y es la frecuencia medida en radianes por segundo, f es la frecuencia temporal medida en Hertz, e $i = \sqrt{-1}$. Entonces se expresan los coeficientes de correlación de senoidales con los datos como un número complejo [11].

$$A(w) = \sum_k e^{i w k \Delta t} d(k \Delta t) = \sum_k \cos(w k \Delta t) d(k \Delta t) + i \sum_k \sin(w k \Delta t) d(k \Delta t) \tag{3.6}$$

Donde k es el índice de muestreo, Δt es el incremento del tiempo de muestreo y $d(k \Delta t)$ es el dato sísmico en el tiempo $t = k \Delta t$. $A(w)$ también se puede definir en términos de su amplitud $a(w)$ y su fase $\phi(w)$:

$$A(w) = a(w) e^{i \phi(w)} \tag{3.7}$$

La transformada de Fourier entrega coeficientes que correlacionan $f(t)$ con una onda senoidal $e^{i w t}$ y aunque la onda senoidal tiene dominio en todo el eje real, los coeficientes dependen del intervalo que se considere como período fundamental, para aplicarla se requiere asumir periodicidad en la señal y definir este período. Limitando así la capacidad de analizar propiedades locales de $f(t)$ por medio de $\hat{f}(w)$.

Ya la transformada de Fourier permite identificar sólo las componentes frecuenciales de una señal, se desarrolló la transformada de Fourier de ventana corta [11].

3.2. Transformada de Fourier de ventana corta, (STFT)

Cuando se sitúa una señal en tiempo y frecuencia simultáneamente, se habla de localización tiempo- frecuencia y se busca definir la señal lo mejor posible en cada uno de los espacios. El proceso de localización se denomina enventanado y se desarrolla con señales conocidas como ventanas.

Una señal $h(t)$ se denominará ventana y el producto interno entre esta y una función $f(t)$ será llamado proceso de enventanado [12]. (3.8) permite enmarcar o resaltar la señal $f(t)$ alrededor de $t = b$ [8]:

$$\int_{+\infty}^{-\infty} f(t)\overline{h(t-b)}dt \quad (3.8)$$

Proceso de eventanado

Este proceso corresponde a tomar partes de la señal y obtener ventanas de tiempo y frecuencia descritas por 3.9

$$[b + t^* - \Delta_h, b + t^* + \Delta_h] \quad (3.9)$$

Donde Δ_h corresponde al radio de una función $h(t)$ cuyo decaimiento es suficientemente rápido hacia el infinito [8].

Una traslación en el dominio del tiempo corresponde a un cambio de fase en la frecuencia. Un cambio de fase en el dominio del tiempo corresponde a una traslación en el dominio de la frecuencia. Si se desea recorrer la señal en el eje de la frecuencia se debe incorporar un corrimiento de fase en el proceso de ventaneo [8].

3.3. Transformada continua wavelet (*Continuous Wavelet Transform, CWT*)

La *CWT* representa actualmente una herramienta muy común para el análisis de variaciones localizadas de potencia en series de tiempo. Descomponer una serie de tiempo en el espacio tiempo-frecuencia, permite determinar la variabilidad de la señal en ambos espacios, esta transformada ha sido utilizada para numerosos estudios en geofísica.

Desafortunadamente, muchos estudios que utilizan el análisis wavelet sufren una aparente falta de resultados cuantitativos. La transformada wavelet ha sido catalogada por muchos como una diversión interesante que produce gráficas coloridas, produciendo solamente resultados cualitativos. Esta concepción errónea se debe en algunos casos a la falta de análisis wavelet como tal, teniendo en cuenta que involucra una transformada desde una serie en tiempo unidimensional a una imagen difusa bidimensional (tiempo-frecuencia), [4].

El análisis wavelet puede ser utilizado en series de tiempo con contenidos frecuenciales no estacionarios (cambiantes en el tiempo). Asumiendo que se tiene una serie de tiempo x_n , con igual espaciamiento δt y $n = 0 \dots N - 1$ y a la vez una función wavelet $\Psi_0(\eta)$, que depende de un parámetro de tiempo adimensional η . Para ser admisible como una wavelet, esta función debe tener valor promedio cero y estar localizada tanto en tiempo como en frecuencia. Un ejemplo es la wavelet Morlet la cual consiste en una onda plana modulada por una gaussiana como se muestra en (3.10):

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (3.10)$$

Donde ω_0 es la frecuencia no dimensional que para el caso ilustrado en la (figura 3.1) es seis buscando satisfacer la condición de admisibilidad.

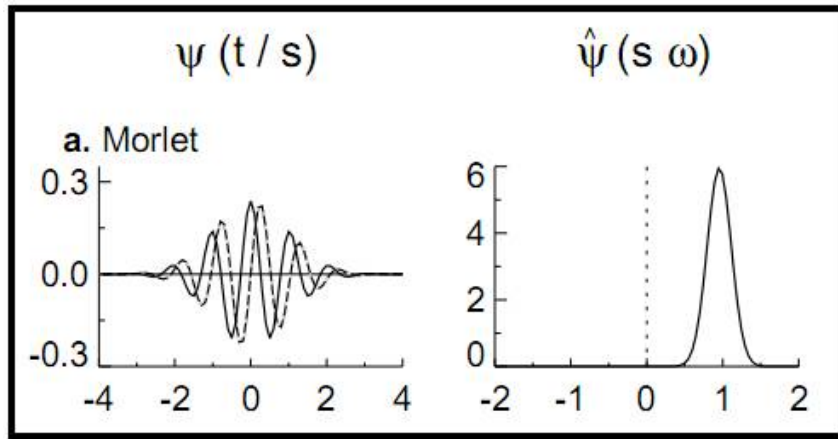


Figura 3.1: Wavelet Morlet. Parte real continua, parte imaginaria punteada (Izquierda). Representación en el dominio de la frecuencia (Derecha) *fuentes: [4]*.

La *CWT* de una secuencia discreta x_n está definida como la convolución de x_n con una versión escalada y desplazada de $\Psi_0(\eta)$ como se muestra en (3.11):

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \Psi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right] \quad (3.11)$$

Donde $(*)$ representa el complejo conjugado. Variando el factor de escala s y el desplazamiento en el eje del tiempo n , se puede construir una imagen donde se muestran las amplitudes de diferentes características en función de la escala y cómo estas amplitudes varían con el tiempo. Aunque es posible calcular la transformada wavelet utilizando (3.11), se considera más rápido hacer los cálculos en el espacio de Fourier.

Para aproximar la *CWT*, la convolución (3.11) debe ser realizada N veces para cada escala, donde N es el número de puntos en la serie de tiempo. Seleccionando N puntos, el teorema de convolución permite hacer N convoluciones simultáneamente en el espacio de Fourier utilizando una transformada discreta de Fourier (*DFT*). La *DFT* de x_n está definida por (3.12).

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N} \quad (3.12)$$

donde $k = 0 \dots N - 1$ es el índice de frecuencia. En el límite continuo, la transformada de Fourier de una función $\Psi(t/s)$ está definida por $\hat{\psi}(sw)$. Por el teorema de convolución, la *CWT* es la transformada de Fourier inversa del producto (3.13):

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\Psi}^*(sw_k) e^{i w_k n \delta t} \quad (3.13)$$

Donde la frecuencia angular está definida como (3.14):

$$W_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} & : k \leq \frac{N}{2} \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} & : k > \frac{N}{2} \end{cases} \quad (3.14)$$

Con (3.13) y una rutina estándar de la transformada de Fourier se puede calcular la *CWT*, para un número dado de escalas s en todos los tiempos n de forma simultánea y de manera más eficiente.

Normalización

Para garantizar que la *CWT* de (3.13) en cada escala s sea directamente comparable con las demás y con la transformada de la serie de tiempo, la función wavelet en cada escala s es normalizada para tener energía unitaria:

$$\hat{\Psi}(sw_k) = \left(\frac{2\pi s}{\delta t} \right)^{1/2} \hat{\Psi}_0(sw_k) \quad (3.15)$$

Cuando se aplica la normalización, en cada escala s se obtiene:

$$\sum_{k=0}^{N-1} \left| \hat{\Psi}(sw_k) \right|^2 = N \quad (3.16)$$

Donde N corresponde al número de puntos. Por lo tanto, el tamaño de la transformada no depende de la función wavelet sino de la amplitud de los coeficientes de Fourier \hat{x}_k . Ya que la función wavelet $\Psi(\eta)$ es en general compleja, la *CWT* $W_n(s)$ también lo es, la transformación puede ser dividida en su parte real y su parte imaginaria.

Funciones Wavelet

Un punto crítico en el análisis wavelet es la selección de la función wavelet $\Psi_0(n)$. En la selección de una función wavelet, hay muchos factores que deben ser considerados. En análisis wavelet ortogonales, el número de convoluciones en cada escala s es proporcional al ancho de la wavelet base en esa escala. Con esto se produce un espectro wavelet que contiene bloques discretos de potencia y es útil para procesamiento de señales ya que entrega la representación más compacta de la señal. Desafortunadamente para análisis de series de tiempo, un cambio aperiódico en la serie produce un espectro diferente. Por el contrario, un análisis no ortogonal es más redundante en más escalas. Donde el espectro wavelet en tiempos adyacentes está altamente correlacionado. La transformada no ortogonal es útil para análisis donde se esperan variaciones en la amplitud wavelet.

Una función wavelet compleja regresa información sobre la amplitud y la fase y se encuentra mejor adaptada para capturar comportamientos oscilatorios; una función real solo entrega

una componente que puede ser usada para aislar picos o discontinuidades.

El ancho de una función wavelet está definido como el tiempo *e-folding* de la amplitud wavelet. La resolución de una función wavelet está determinada por el balance entre su ancho en el dominio real y el dominio de Fourier. Una función más angosta en tiempo tendrá buena resolución en tiempo pero baja resolución en frecuencia, mientras que una señal ancha tendrá pobre resolución en tiempo pero buena resolución en el espacio de la frecuencia [4].

Una función wavelet refleja el tipo de características presentes en la serie de tiempo. Para series con saltos o pasos fuertes, se puede seleccionar una función como la Haar, mientras que para variaciones lentas se puede seleccionar una función como un coseno amortiguado. Si solo se está interesado en el espectro de potencia wavelet, la selección de la wavelet no es tan crítica y cualquier función entregara la misma información cualitativa.

Escalas

Cuando se ha seleccionado una función wavelet, es necesario determinar el conjunto de escalas s para ser usadas en la transformación (3.13). Para una wavelet no ortogonal, se puede utilizar el número de escalas que se desee buscando construir una imagen más detallada. Es conveniente escribir las escalas en términos de potencias de 2 [4]:

$$s_j = s_0 2^{j\delta j}, j = 0, 1, \dots, J \quad (3.17)$$

$$J = \delta j^{-1} \log_2(N\delta t/s_0) \quad (3.18)$$

Donde s_0 representa la menor escala solucionable y J determina la mayor escala. La escala s_0 debe ser seleccionada de forma que su periodo equivalente en Fourier sea aproximadamente $2\delta t$. La selección de un δj suficientemente pequeño depende del ancho espectral que posea la función wavelet. Para una onda Morlet, un δj de 0.5 es el mayor valor que permite un muestreo adecuado en escala, mientras que para otras funciones wavelet un valor más alto puede ser usado. Valores más pequeños de δj permiten una resolución más fina al producir mayor número de escalas [4].

Cono de influencia

Cuando se trabaja con series de tiempo de duración finita, se presentan errores en el principio y en el final del espectro de potencia wavelet ya que la transformada de Fourier en (3.13) asume que la información es cíclica. Una solución es rellenar el final de la serie de tiempo con ceros antes de realizar la *CWT* y removerlos posteriormente, limitando los efectos de borde y acelerando la transformada de Fourier.

Cuando se rellena con ceros se presentan discontinuidades en la parte final del espectro, afectando las escalas mayores y haciendo decrecer la amplitud cerca de los bordes. El cono de influencia (*COI*) es la región del espectro wavelet donde el efecto de los bordes se hace importante y se define como el tiempo *e-folding*. La selección de este tiempo se realiza buscando que la potencia wavelet para una discontinuidad en los bordes, decaiga en un factor de e^{-2} asegurando que los efectos de borde sean insignificantes a partir de este punto. Para series cíclicas no es necesario rellenar con ceros y por lo tanto no existe tiempo *e-folding* ni *COI* [4].

El tamaño del *COI* en cada escala entrega una medida del tiempo de correlación para un pico en la serie de tiempo. Comparando el ancho de un pico en el espectro de potencia con su tiempo de decorrelación, se puede diferenciar entre un pico en los datos producido por ruido y una componente armónica equivalente en el espectro de Fourier [4].

Escala wavelet y frecuencia de Fourier

La relación entre el periodo equivalente de Fourier y la escala wavelet se pueden derivar analíticamente para una función wavelet particular, sustituyendo una onda coseno de una frecuencia conocida en (3.13) y computando la escala s donde el espectro de potencia wavelet alcanza su valor máximo. Para una ondícula Morlet, se tiene que con $w_0 = 6$ se obtiene $\lambda = 1,03s$, donde λ corresponde al periodo de Fourier, indicando que para la ondícula Morlet, la escala s corresponde casi a su periodo de Fourier.

Reconstrucción

La *CWT* es un filtro pasabanda con una respuesta conocida, haciendo posible la reconstrucción de las series de tiempo originales utilizando bien sea deconvolución o un filtrado inverso. Esto es sencillo para transformadas ortogonales, pero para *CWT* es complicado debido a la redundancia tanto en tiempo como en escala. De todas maneras, la redundancia hace

posible reconstruir las series de tiempo utilizando una función wavelet completamente diferente, la función más sencilla es la función δ [4]. En este caso la serie de tiempo reconstruida (3.19) es la suma de la parte real de la transformada wavelet sobre todas las escalas:

$$x_n = \frac{\delta j \delta t^{1/2}}{C_\delta \Psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{R \{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}} \quad (3.19)$$

El factor $\Psi_0(0)$ remueve la energía de la escala, mientras que $s^{1/2}$ convierte la transformada wavelet en una densidad de energía. El factor C_δ proviene de la reconstrucción de la función δ para su transformada wavelet utilizando la función $\Psi_0(\eta)$. C_δ es una constante para cada función wavelet [4].

3.4. Extensión del ancho de banda sísmico

Una buena resolución sísmica se determina por la capacidad de determinar ciertas características en una imagen. Debido a la naturaleza tridimensional de la sísmica, se necesitan buenos resultados tanto vertical como horizontalmente, siendo la resolución temporal (vertical) función del contenido frecuencial de las señales.

En el procesamiento sísmico, muchos métodos son empleados para extender el ancho de banda sísmico manteniendo una relación señal a ruido aceptable, ya que muchos procesos de deconvolución tienden a aumentar el nivel de ruido más que el de la señal siendo su rendimiento menor que el esperado. Nuevas metodologías han sido introducidas y aplicadas tanto en datos sintéticos como en condiciones reales [13], buscando la mayoría de las veces la extensión de la parte superior del espectro, pero, cuando se realizan procesos de inversión de señales sísmicas, también se busca aumentar la parte baja del mismo [11].

Teniendo en cuenta estos aspectos se desarrolló un método llamado *Bandwidth Extension*, (*BE*)¹ basado en *CWT* para extender ambas secciones del espectro [4].

Aunque la transformada de Fourier y la transformada de Fourier de ventana son métodos comúnmente utilizados para realizar el análisis frecuencial de las trazas sísmicas, se ven

¹Propiedad intelectual de *Geotrace*

restringidos ya que la transformada de Fourier da gran información frecuencial, pero no permite conocer información temporal y por su parte la transformada de Fourier de ventana se restringe en cuanto a las frecuencias que se pueden analizar; de este modo la *CWT* muestra la ventaja de permitir análisis de forma general como la transformada de Fourier y de forma local como la transformada de ventana.

Esta transformada permite realizar análisis a series de tiempo de señales sísmicas, descomponiéndolas en sus componentes de amplitud y fase tanto en tiempo como en frecuencia. La *CWT* también está definida por (3.20):

$$W(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|s|}} \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (3.20)$$

Donde (*) indica el complejo conjugado, s indica el factor de escala y τ el desplazamiento en el tiempo.

La *CWT* teóricamente es infinitamente redundante y muchos investigadores han encontrado que esta redundancia contiene información esencial de las señales. Ya que la implementación de la *CWT* es un operador discreto y no completamente continuo, se debe hacer una selección de cuantas wavelet hijas deben ser usadas. Un mínimo de 10 escalas por octava es suficiente para recuperar la entrada desde la transformada por medio de la reconstrucción.

Se selecciona la wavelet Morlet como la onda madre, esta es una función compleja representada por una onda plana modulada por una función gaussiana. La naturaleza compleja de la wavelet permite el cálculo de amplitud y fase para cada escala en diferentes tiempos. La selección de esta wavelet se deriva de la naturaleza del problema que se está analizando [4].

La *CWT* entrega una descripción muy redundante pero bien detallada de una señal en términos de frecuencia y tiempo, siendo estas propiedades utilizadas para predecir los armónicos y subarmónicos utilizados para la extensión del ancho de banda. Ya que la *CWT* opera en el dominio tiempo-frecuencia está limitada por el principio de incertidumbre, el cual establece que no se puede conocer con la misma precisión tiempo y frecuencia simultáneamente limitando la cantidad de información útil para predecir los armónicos en un tiempo dado.

La naturaleza difusa de la *CWT* permite computar armónicos y subarmónicos con información incompleta tanto en tiempo como en frecuencia. Convolucionando armónicos y subarmónicos de la frecuencia fundamental de las trazas se puede recuperar esta información y revelar la reflectividad que de otra manera es difícil de detectar. Este desenmascaramiento de la reflectividad se logra aumentando el ancho de banda de la onda sísmica agregando a la traza las frecuencias de sus armónicos y subarmónicos.

Ya que se está realizando un proceso semejante a la convolución, las frecuencias que correspondan a reflectividades en la traza sísmica serán agregadas y aquellas que no correspondan a reflectividades no serán tenidas en cuenta en la transformada. Finalmente se debe realizar la reconstrucción de la serie de tiempo modificada, desde el dominio *CWT* de tiempo y escala hacia el dominio del tiempo donde se obtiene la nueva traza sísmica con el ancho de banda extendido; la fórmula de reconstrucción está dada por (3.21):

$$f(t) = \frac{1}{C_\Psi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{s}} \hat{W}(\tau, s) \Psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) \frac{ds d\tau}{s^2} \quad (3.21)$$

Donde C_Ψ viene dado por la condición de admisibilidad.

En la implementación se aplica *CWT* a la traza sísmica, se seleccionan pivotes de frecuencia con base en el análisis del espectro sísmico; una octava por debajo del pivote mayor se establece la frecuencia para computar los armónicos y una octava por encima del pivote menor se establece la frecuencia para computar los sub-armónicos [11].

Capítulo 4

Creación de modelos sintéticos y modelado de una adquisición sísmica

Con el objetivo de obtener resultados preliminares que sirvan como punto de referencia, se desarrolló una serie de códigos con los cuales se generan modelos sintéticos simples de secciones pre y pos-apiladas que representan las diferentes interfaces del subsuelo y se puede modelar una adquisición sísmica 2D.

Los códigos fueron desarrollados con la herramienta *Seismic Unix*¹ y a continuación se presentan las etapas de creación de los modelos y del modelado de la adquisición. El anexo A muestra los códigos utilizados para la creación de los modelos.

4.1. Creación del modelo de interfaces

Para realizar el modelado de una adquisición sísmica se deben establecer inicialmente la estructura y propiedades del subsuelo. Por lo tanto se debe generar una representación de las interfaces teniendo en cuenta sus propiedades físicas y estructurales. Especificando las coordenadas de profundidad y distancia horizontal de cada interface dentro de un mismo modelo, se pueden generar diferentes tipos de perfiles representativos. Las medidas de estos modelos se tendrán en cuenta para el diseño de la geometría de la adquisición.

¹El paquete *Seismic Unix* (SU) es un software de libre distribución, desarrollado por el *Center for wave phenomena* de la Escuela de minas de Colorado. <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/>

Para la creación de los modelos a utilizar se tiene en cuenta una propiedad física que los caracterice, en este caso se trabaja con la velocidad de cada una de las interfaces que conforman el modelo. En la figura (4.1) se muestra un modelo que consta de 3 interfaces, donde cada una de ellas cuenta con una velocidad diferente y con características constantes.

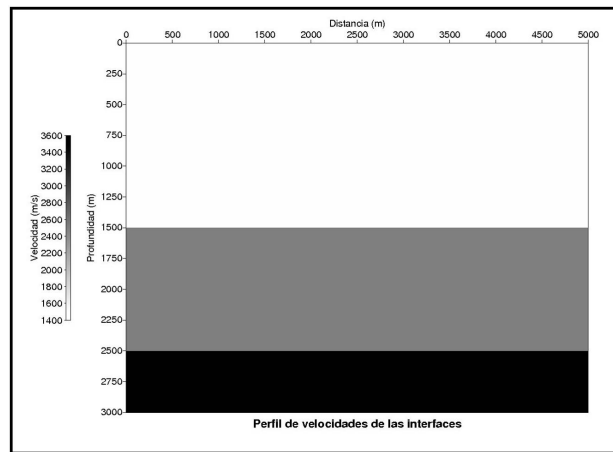


Figura 4.1: Perfil de velocidad creado con SU

4.2. Geometría de la adquisición

Con el perfil de velocidades creado, se prosigue a diseñar la geometría de la adquisición. Se trabaja con receptores dispuestos proporcionalmente a ambos lados de la fuente (Disparo central) y se determina el intervalo entre disparos y el intervalo entre receptores que en este caso es de 50 y 25 m respectivamente. Dado que se tienen 40 fuentes y por tanto se harán 40 disparos. Se tienen 121 receptores por disparo obteniendo una longitud de tendido de 3000 m, donde el tendido corresponde a la distancia cubierta por todos los receptores y la fuente.

El *offset* que corresponde a la distancia que existe entre la fuente de disparo y un receptor cualquiera, para esta geometría será máximo de 1500 m y el mínimo será de 0 m modelando un receptor en el mismo punto de la fuente, lo cual normalmente no se hace en una adquisición real.

Teniendo en cuenta que la distancia del modelo es de 5000 m, el primer disparo se hará en 1500 m y a partir de allí se modelarán disparos cada 50 m hasta 3500 m. Se debe considerar que cuando se mueve la fuente de disparo, todos los receptores se mueven de igual manera manteniendo así la misma geometría y el mismo tendido para toda la adquisición.

4.3. Shot Gathers

Cuando se realiza cada disparo (*Shot*), cada receptor almacena una traza correspondiente a la información reflejada por el subsuelo para dicho disparo. En consecuencia se obtendrán un total de 40 archivos de disparo llamados *Shot Gathers* con 121 trazas cada uno (Una traza por receptor), (Ver figura 4.2).

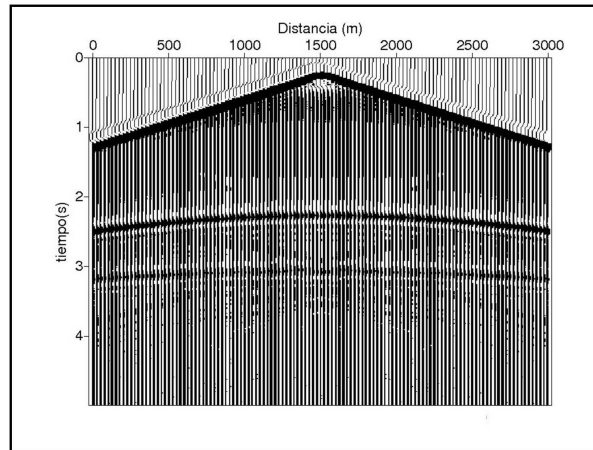


Figura 4.2: *Shot Gather* para un disparo con la fuente en la posición 1500 m.

4.4. Concatenación de los *Shot Gathers*

Cuando se tienen los archivos correspondientes a los *Shot Gathers*, se concatenan con el fin de manejar los datos en conjunto, facilitando así la aplicación de procedimientos que permiten obtener una sección sísmica pre y pos-apilada. Al concatenarlos obtenemos un archivo con 40 *Shot Gathers*. La figura (4.3) muestra 4 de los 40 archivos *Shot Gather* concatenados.

Los procesos de pre-apilado para la edición de los registros no son aplicados ya que se está trabajando con modelos ideales y con características constantes y uniformes.

4.5. Orden (*CMP*)

Dentro de los procesos de apilamiento se encuentra el ordenamiento por *CMP*. Cuando varias ondas de diferentes fuentes encuentran un mismo punto en determinada interface del subsuelo y estas reflexiones son recibidas por detectores particulares para cada una de las fuentes, se dice que estos pares fuente-receptor tienen un punto reflector común (*Common Deep Point, CDP*) (Ver figura 4.4). Estos puntos son denominados *CDP* cuando las interfaces

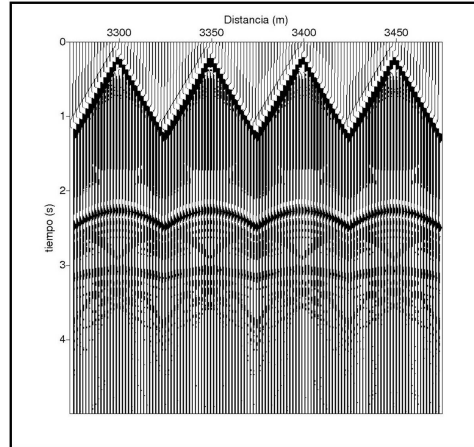


Figura 4.3: Cuatro *Gather shots* concatenados.

del subsuelo son completamente horizontales y se asume que las trazas obtenidas en dichos puntos contienen la misma información del subsuelo [6]. Sin embargo debido a las irregularidades propias de las interfaces, los CDP no son comúnmente encontrados y por tal razón se ubican una serie de CDP en determinada zona de convergencia, se promedian y se calcula un punto medio común (*Common Mid point, CMP*), de esta forma se seleccionan las trazas y se obtienen los *CMP Gathers*, los cuales contienen las trazas correspondientes a un CMP común (Ver figura 4.5).

El ordenamiento de los datos por *CMP* se hace necesario para realizar la corrección por *NMO* (*Normal moveout*, que será explicado más adelante) y el apilamiento de datos para la creación de la sección sísmica.

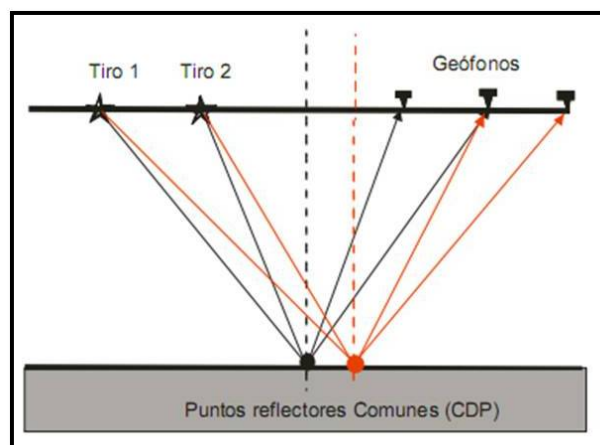


Figura 4.4: Puntos medios comunes para varios pares fuente-receptor. *fuentes: [3]* .

4.6. CORRECCIONES DINÁMICAS POR NORMAL MOVE-OUT (NMO) 40

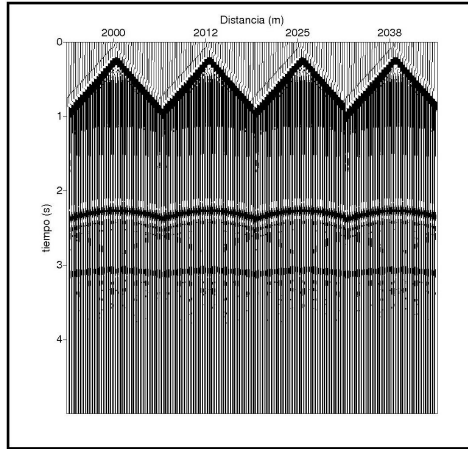


Figura 4.5: *CMP Gather* concatenados.

4.6. Correcciones dinámicas por Normal Move-Out (NMO)

Un registro sísmico representa una medida directa de la velocidad con la cual las ondas sísmicas viajan en el interior de la tierra. La data sísmica nos permite obtener un conjunto de medidas indirectas de velocidad para caracterizar un medio. La base para la determinación de velocidades a partir de datos sísmicos de reflexión es el *Normal Moveout*.

El offset que existe entre la fuente y los receptores causa la aparición del *NMO* que corresponde a la diferencia de tiempos en los arribos de una misma onda, desde una misma interface hasta un geófono ubicado sobre la fuente y uno ubicado lejos de ella, siendo mayor el tiempo de llegada al geófono más lejano y contribuyendo esta diferencia de tiempos a la estimación de la velocidad media de propagación de onda [14].

La tendencia hiperbólica que se presenta en las franjas más oscuras de los *CMP gathers* se debe al efecto del *NMO*, por ello se hace necesario aplicar una corrección dinámica a estos datos y llevarlos hasta un estado de *offset* cero, es decir un estado donde la fuente y el receptor se encuentran idealmente en el mismo punto. El objetivo de esta corrección es lograr que todas las trazas se encuentren en fase para posteriormente ser sumadas en la etapa de apilado [3]. Los gathers corregidos por *NMO* se muestran en la figura (4.6).

4.7. Análisis de velocidad

El análisis de velocidades se realiza sobre un conjunto de *CMP* determinados, arrojando como resultado un campo de velocidades que se utiliza en el apilamiento de la sección sísmica.

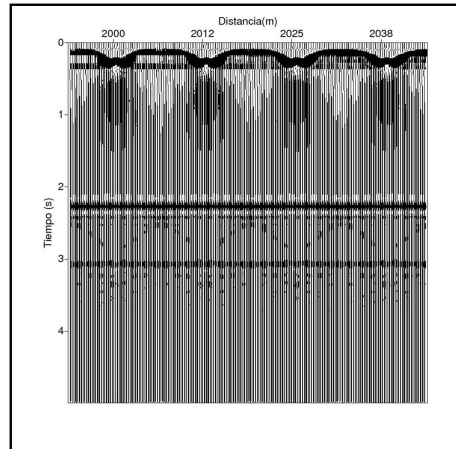


Figura 4.6: *CMP gather* con corrección a *offset* cero.

La figura (4.7a) muestra un *CMP gather* con una hipérbola simple de reflexión de una interface horizontal, conociendo que la velocidad por encima del reflector es de 3000 m/s, se corrige el gather por NMO y se apila usando un rango de velocidades constantes entre 2000 y 4300 m/s. La figura (4.7b) muestra las trazas apiladas resultantes para cada velocidad que se analizó, graficadas en velocidad contra tiempo doble de viaje para *offset* cero. A esta figura se le conoce como el espectro de velocidades, obteniendo los datos sísmicos transformados desde el dominio de *offset* contra tiempo doble de viaje al dominio de velocidad de apilamiento con tiempo doble para *offset* cero.

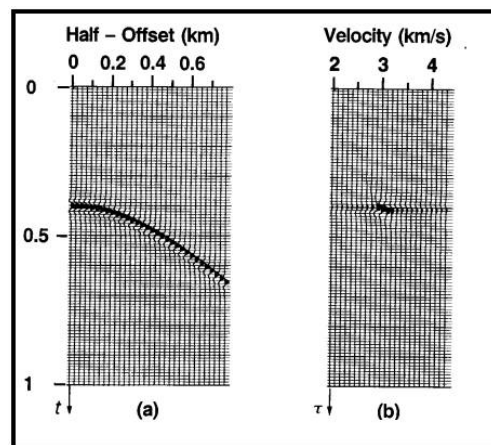


Figura 4.7: *CMP gather* (a) de donde se obtiene el mapa de velocidades (b) para determinar velocidad de apilado, *fuentes* [5].

La figura (4.7b) muestra que la máxima amplitud después del apilamiento ocurre a una velocidad de 3000 m/s, estableciendo la velocidad que debe usarse para corregir el evento de (4.7a).

La figura (4.8) muestra el mapa de velocidades obtenido para el modelo (4.1), por medio del cual se realiza el análisis de velocidad para el apilamiento de los datos sísmicos de este modelo. Esta figura corresponde al análisis de un sólo CDP.

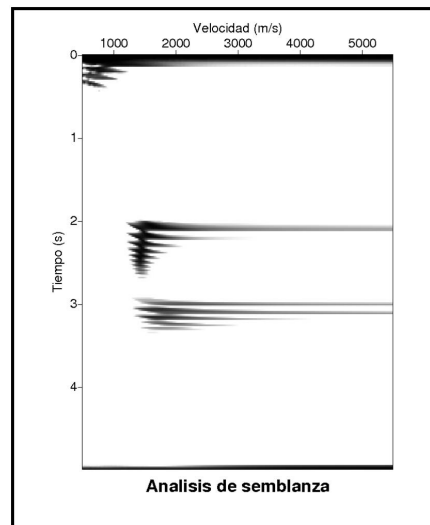


Figura 4.8: Mapa de velocidades de un CDP para el modelo 4.1.

4.8. Apilamiento

Posterior a la corrección por *NMO* se obtiene un archivo que contiene todas las trazas organizadas por *CMP* y corregidas por *NMO*. La figura (4.9) muestra la sección sísmica antes de ser apilada, la cual contiene un gran número de trazas que seguidamente serán sumadas para obtener una sección apilada. En la figura 4.10 se muestra el resultado de una sección sísmica apilada.

Con las trazas obtenidas después del proceso de apilado se procede a realizar el análisis en frecuencia con el cual se busca validar la aplicación de la *CWT* para mejorar la resolución temporal de la sísmica de reflexión.

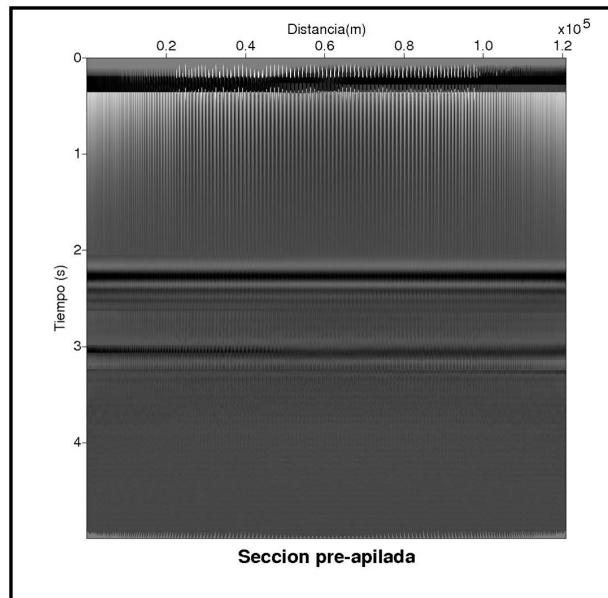


Figura 4.9: Sección sísmica pre-apilada.

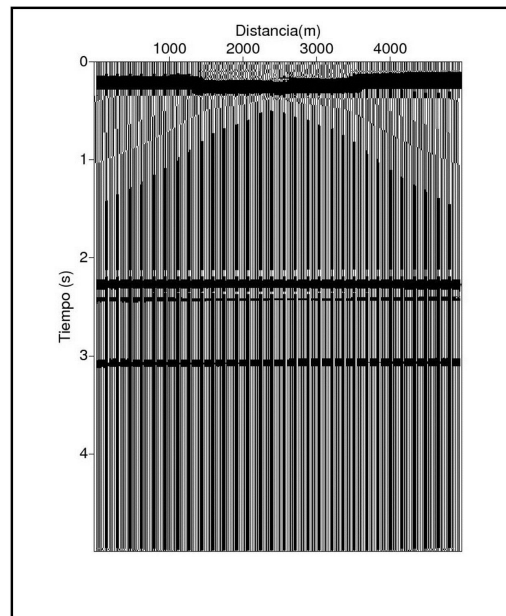


Figura 4.10: Sección sísmica apilada.

Capítulo 5

Validación del método

Para la validación del método se desarrollaron dos modelos sintéticos en el programa *Seismic Unix* de la forma como se explicó anteriormente. Se obtuvieron las trazas pre y pos-apiladas de cada modelo y se guardó cada una en un archivo *.ascii*, para posteriormente trabajar en Matlab¹.

Aplicando la teoría, las fórmulas y los métodos de [4] se desarrolló un código en Matlab que permite *a)* cargar las trazas desde los archivos *.ascii*, *b)* realizar la *CWT*, *c)* seleccionar los coeficientes de interés, *d)* modificar la información de los coeficientes, *e)* reconstruir las trazas y *f)* realizar el análisis frecuencial de las trazas antes y después de la aplicación del método. Adicionalmente permite una visión preliminar de las secciones sísmicas antes y después de la *CWT*, el anexo B también muestra los códigos desarrollados en Matlab.

5.1. Implementación del algoritmo

La figura (5.1) muestra uno de los modelos de interfaces creados en el programa *Seismic Unix*, donde se observan 3 interfaces horizontales, con características de velocidad constantes y la figura (5.4) muestra el otro modelo donde se tiene una interface en forma de cuña. Las figuras (5.2) y (5.3) muestran las secciones sísmicas pre y pos-apilada para el modelo (5.1) mientras que (5.5) y (5.6) muestran estas mismas secciones para el modelo (5.4).

Para tener un resultado preliminar acerca del ancho de banda sísmico y para determinar cuáles serían los pivotes de frecuencia, se analizó el contenido frecuencial de algunas de las trazas iniciales. La figura (5.7) muestra la trazas pos-apiladas número 50 (izquierda) y número 100 (derecha) para el modelo (5.4). Las figuras (5.10) y (5.11) muestran el contenido de frecuencias de las trazas (5.7 izquierda) y (5.7 derecha) respectivamente.

¹Versión 7.8, licencia propiedad del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP)

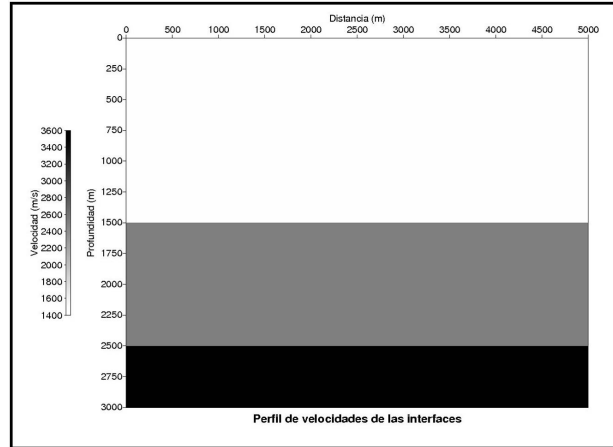


Figura 5.1: Modelo de interfaces horizontales.

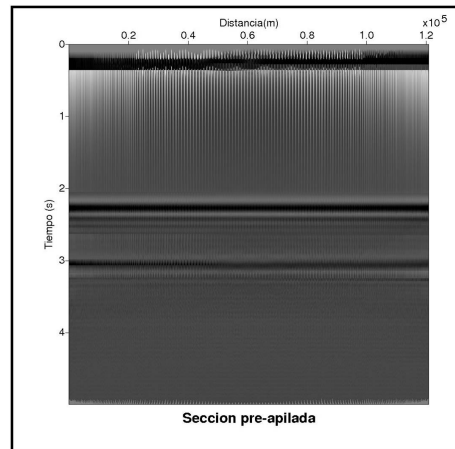


Figura 5.2: Sección sísmica pre-apilada para el modelo de interfaces horizontales.

Las secciones sísmicas están conformadas por 4840 trazas para las secciones pre-apiladas y 199 para las secciones pos-apiladas. Se implementó un ciclo con tantas repeticiones como trazas a analizar. En cada repetición, posterior a la carga de la traza se procede a realizar la *CWT* de cada una de ellas, teniendo en cuenta algunos parámetros establecidos por [4] como parámetros de entrada.

Los parámetros de entrada al código de la *CWT* son:

- La traza de entrada, que corresponde a cada uno de los archivos *.ascii* que contienen esta información.
- El periodo de muestreo, que para este procedimiento corresponde a $\delta t = 5/1400$ ya que el tiempo de grabación en los modelos sintéticos es de 5 segundos y se obtienen trazas

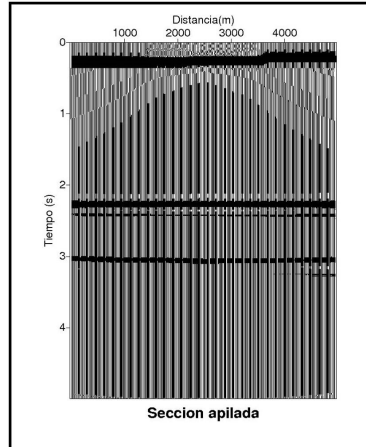


Figura 5.3: Sección sísmica pos-apilada para el modelo de interfaces horizontales.

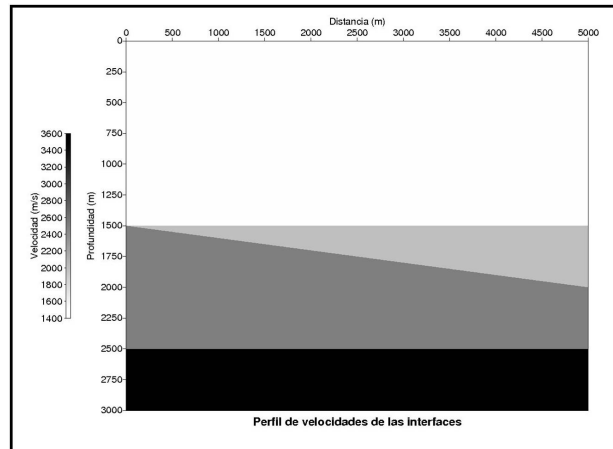


Figura 5.4: Modelo de cuña sencilla.

con un total de 1400 muestras.

- Tipo de wavelet madre. Se trabajó con la ondícula Morlet [4].

Con estos datos, se transforma cada traza teniendo en cuenta que en (3.17) se establecen los factores de escala de la ondícula madre y en (3.18) se determina el número de escalas para la transformada.

Donde:

- La menor escala solucionable s_0 tiene un valor por defecto de $2\delta t$.
- El parámetro δj determina el número de escalas y para la ondícula Morlet tiene como mayor valor aceptable 0.5 buscando obtener resultados adecuados.

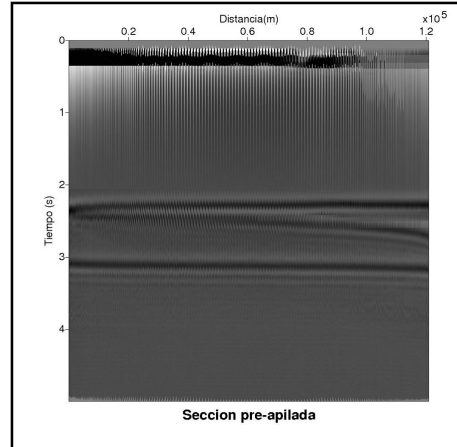


Figura 5.5: Sección sísmica pre-apilada para el modelo de cuña.

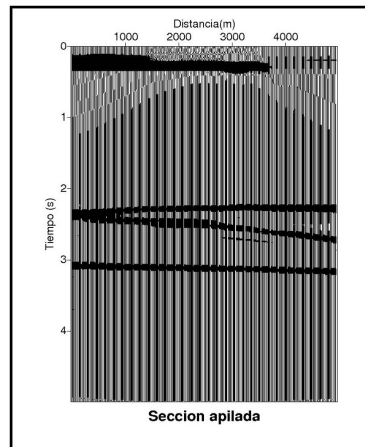


Figura 5.6: Sección sísmica pos-apilada para el modelo de cuña.

- El valor de J corresponde a la mayor escala solucionable [4].

Después de que se ha realizado la transformada de cada traza, se obtienen tantos coeficientes wavelet como número de escalas. Se seleccionan aquellos coeficientes que se espera contribuyan al aumento de la resolución temporal y a la extensión del ancho de banda sísmico.

Cuando se ha realizado la selección de coeficientes se determina modificar de diferentes maneras el conjunto original. Se busca establecer la mejor metodología para cumplir los objetivos con base en la experiencia de *Sierra* y sus colaboradores ([15], [16]) en trabajo con wavelets dentro de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Finalmente se analiza el contenido frecuencial de las trazas originales y se compara con el de las trazas resultantes a la transformación.

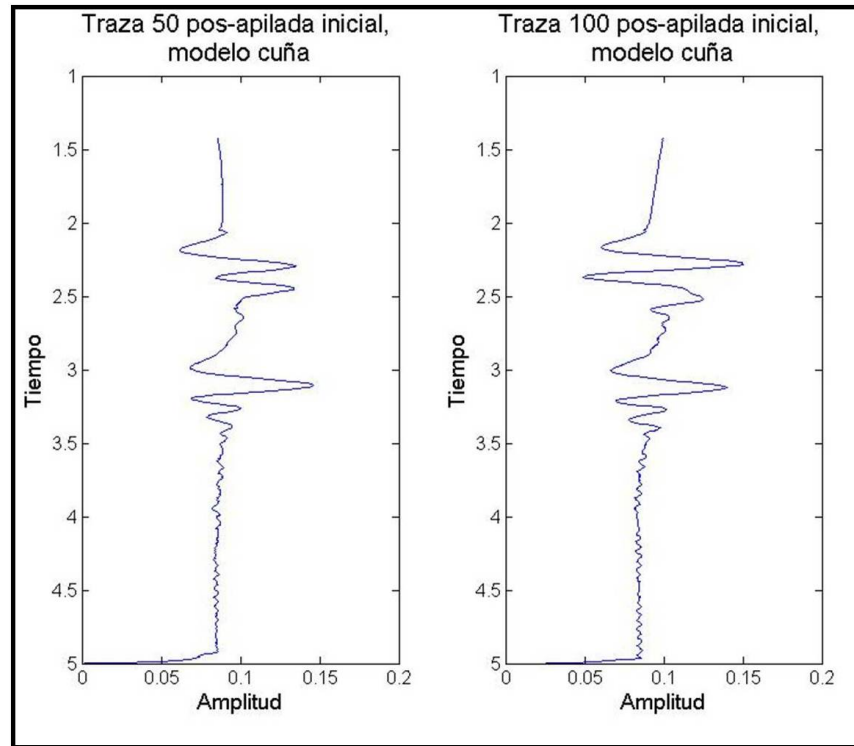


Figura 5.7: Trazas 50 (izquierda) y 100 (derecha) pos-apiladas para el modelo de cuña.

5.1.1. Selección de escalas

Por medio de la variación del parámetro δj de 3.17 se determinó el número de escalas a utilizar en la transformación para cada valor de δj . Obteniendo los resultados del cuadro (5.1). El anexo B muestra el total de escalas obtenidas para cada δj con su posición y respectivo valor:

δj	Número de escalas, s
1/3	27
1/4	36
1/5	45

Tabla 5.1: Número de escalas para diferentes δj

Conociendo la cantidad de escalas obtenidas para cada δj se procedió a buscar cuales de ellas generaban los coeficientes que podían considerarse de interés, con este fin se desarrolló un código que permitiera generar la ondícula Morlet y modificar su factor de escala determinando

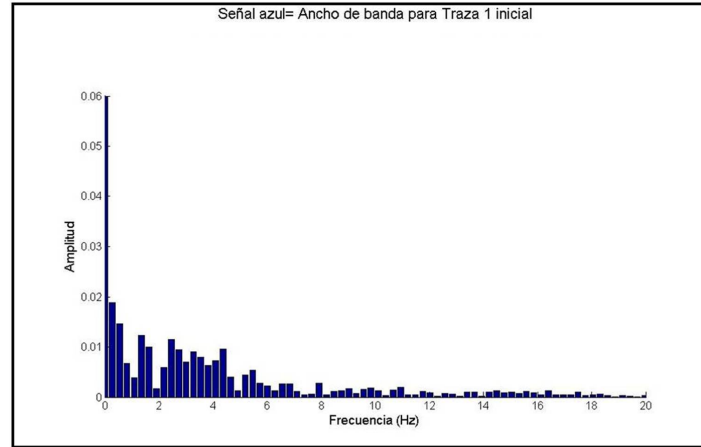


Figura 5.8: Contenido de frecuencias de la traza 50 modelo cuña.

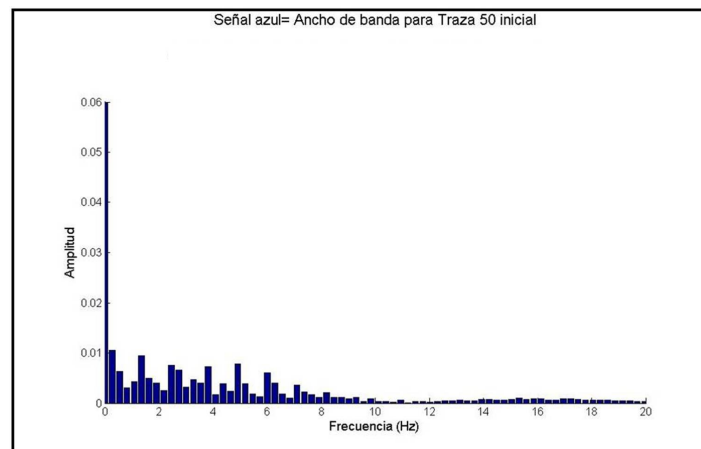


Figura 5.9: Contenido de frecuencias de la traza 100 modelo cuña.

su respuesta en el dominio de la frecuencia.

Para las diferentes trazas analizadas se encontró que el rango de frecuencias oscila entre 0 y 10 (Hz), por lo cual se buscó que las escalas seleccionadas generaran ondículas con respuesta en frecuencia dentro de este rango. El cuadro (5.2) muestra los rangos de escalas para cada uno de los tres δj utilizados, indicando por ejemplo que para el caso de $\delta j = 1/4$ se seleccionaron de las 36 escalas aquellas que están comprendidas entre las posiciones 15 (Ver figura 5.12) y 28 (Ver figura 5.13), siendo la posición 15 la que contiene la escala asociada a la mayor frecuencia.

Cabe resaltar que los valores mostrados en los cuadros, no corresponden al valor de la escala sino a la posición de dicha escala dentro del vector de escalas s .

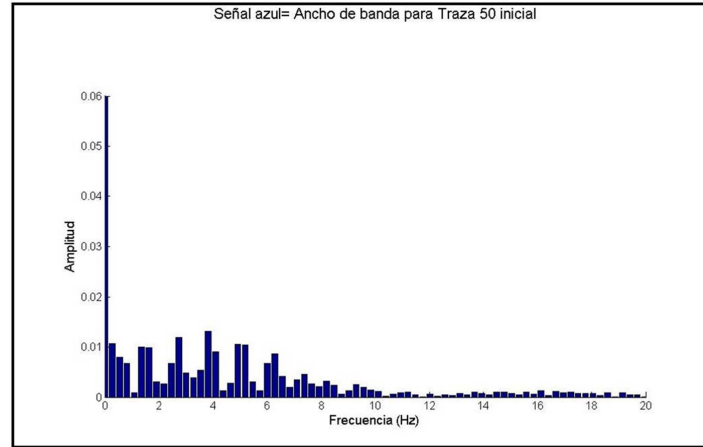


Figura 5.10: Contenido de frecuencias de la traza 50 modelo horizontal.

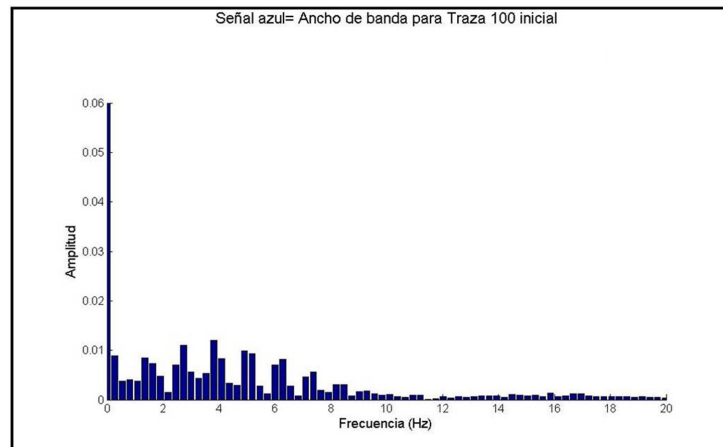


Figura 5.11: Contenido de frecuencias de la traza 100 modelo horizontal.

5.1.2. Modificación de los coeficientes wavelet.

Con las diferentes escalas seleccionadas, se procedió a trabajar con los coeficientes obtenidos para cada una de ellas.

Inicialmente se buscó reemplazar aquellos coeficientes relacionados con la información de las frecuencias que se querían resaltar, en este caso las frecuencias hasta los 20 (Hz). El cuadro (5.3) muestra los rangos de escalas que entregaron información en estas frecuencias para cada δj .

De esta manera, se determinó cuales eran los coeficientes wavelet relacionados a los factores de escala que entregaban en la ondícula madre información de 10 a 20 (Hz). Ya que se obtenían tantos coeficientes como número de escalas, las posiciones seleccionadas dentro del

δj	Escalas seleccionadas
1/3	11-21
1/4	15-28
1/5	18-36

Tabla 5.2: Rangos de posiciones de escalas seleccionadas para cada δj

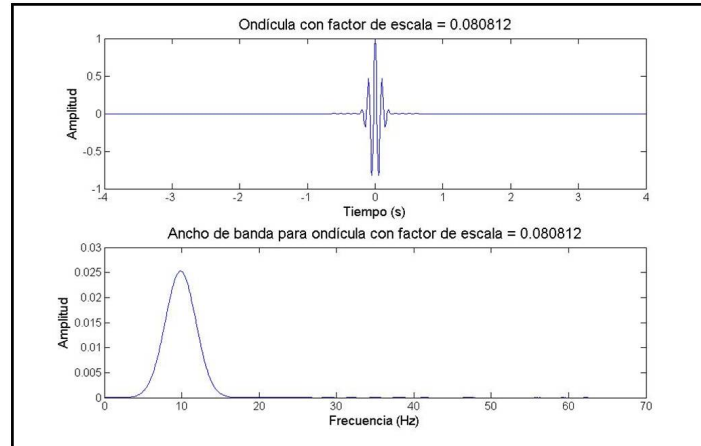


Figura 5.12: Ondícula Morlet y su respuesta en frecuencia para un factor de escala de 0.080812 y $\delta j = 1/4$.

vector de escalas correspondían a las posiciones del vector de coeficientes. Dentro del código desarrollado se determinaron dos factores que permitieran establecer el escalamiento tanto de los coeficientes seleccionados (CS) como de los coeficientes a modificar (CM). Si se quisiera reemplazar completamente los coeficientes a modificar por los coeficientes seleccionados, el primer factor sería 0 y el segundo tendría un valor de 1.

$$\delta j = 1/3.$$

Inicialmente se realizaron las pruebas para $\delta j = 1/3$, donde se obtuvieron un total de 27 escalas de las cuales las posiciones 11-21 corresponden a los CS y 8-10 a los CM . Ya que el número de CS es superior al de CM se utilizaron solo las posiciones 11-13 de los CS para reemplazar las posiciones 8-10 de los CM .

Todas las figuras que se mostrarán a continuación tienen en color azul la información correspondiente a las trazas antes de la CWT y en color rojo los datos que corresponden a las mismas trazas después de la transformación y reconstrucción.

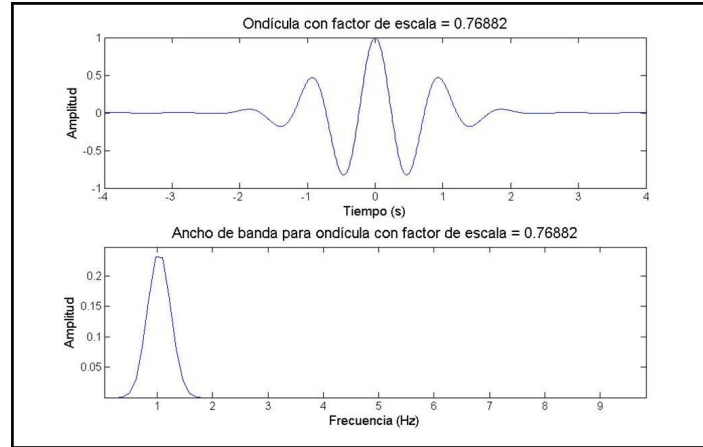


Figura 5.13: Ondícula Morlet y su respuesta en frecuencia para un factor de escala de 0.76882 y $\delta j = 1/4$.

δj	Escalas seleccionadas
1/3	8-10
1/4	10-14
1/5	12-17

Tabla 5.3: Rangos de posiciones de escalas seleccionadas a reemplazar para cada δj

Las figuras (5.14), (5.15) y (5.16) muestran los resultados del contenido frecuencial de las trazas 1, 50 y 199 respectivamente reemplazando *CM* 8-10 por *CS* 11-13.

Como se observó que seleccionar sólo las posiciones 11-13 de los *CS* no entregó un resultado favorable, se utilizaron todos sus valores y se reemplazaron los *CM* de dos maneras.

- Reemplazando los *CM* 8-18.
- Reemplazando los *CM* 1-11.

Reemplazando las posiciones 8-18 y se obtuvo la respuesta mostrada en la figura (5.17) para la traza 199 del modelo de cuña. Para la modificación de los valores 1-11 de este mismo modelo se obtuvo la respuesta mostrada en la figura (5.18).

La respuesta de (5.17) y (5.18) no es conveniente ya que indica que la nueva señal sísmica posee mayor número de componentes de baja frecuencia, lo cual hace las trazas más lentas afectando la resolución de las imágenes.

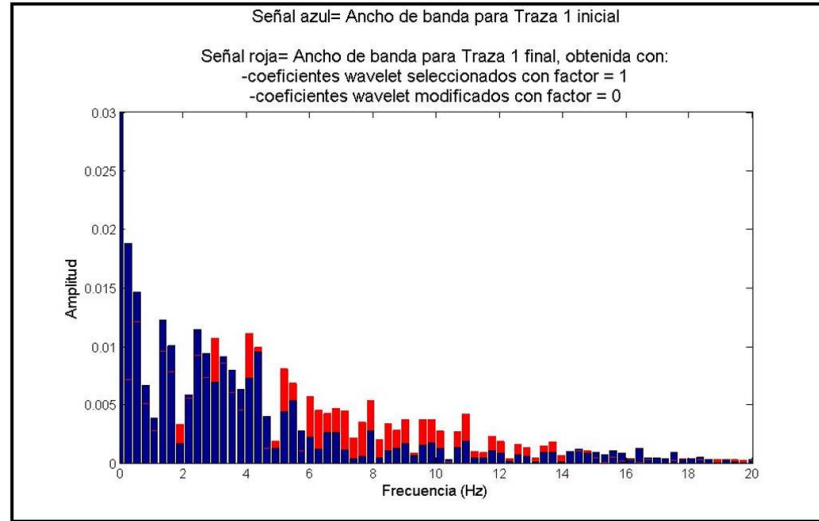


Figura 5.14: Contenido frecuencial de la traza 1 modelo cuña reemplazando *CM* 8-10 por *CS* 11-13.

Otra alternativa que se planteó al no conseguir buenos resultados reemplazando completamente los *CM*, fue mantener estos valores y realizar una suma ponderada con los *CS* de interés de la siguiente manera:

- Escalar los *CS* 11-21 en este caso por un factor de 0.5, sumarlos con los *CM* 8-18 y sumar el valor resultante a los *CM* 1-11, dejando esta suma como los coeficientes 1-11 finales, esto con el fin de mantener la información las frecuencias altas e intentar reforzarla con la obtenida de bajas frecuencias.

La figura (5.19) muestra el ancho de banda una vez se aplicó esta operación.

A pesar de que las frecuencias bajas también se realzan como en los primeros métodos aplicados, esta operación aumenta las componentes de altas frecuencias mejor que lo visto en los primeros resultados.

$$\delta j = 1/4.$$

Para $\delta j = 1/4$ se realizaron las mismas pruebas que para $\delta j = 1/3$ y se obtuvieron los siguientes resultados. La figura (5.20) muestra el ancho de banda donde se reemplazan los *CM* 10-14 por los *CS* 15-19. La (5.21) corresponde a la sustitución de los *CM* 10-23 por *CS* 15-28.

Reemplazando los *CM* 1-14 por los *CS* 15-28 se obtiene la figura (5.22).

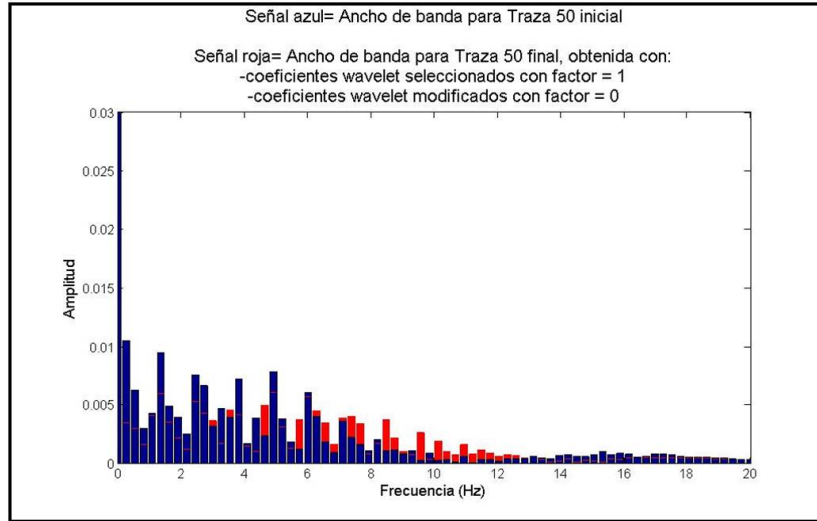


Figura 5.15: Contenido frecuencial de la traza 50 modelo cuña reemplazando *CM* 8-10 por *CS* 11-13.

La suma ponderada para este valor de δj se realizó con los *CS* 15-28 escalados, los *CM* 10-23 y los coeficientes 1-14, estableciendo esta suma como el nuevo valor de los coeficientes 1-14. La figura (5.23) muestra el resultado de la misma estrategia aplicada a la traza 199 para $\delta j = 1/3$.

Para $\delta j = 1/5$ se aplicó esta misma metodología y se obtuvo la respuesta en frecuencia de la figura (5.24), donde se reemplazó el valor de los *CM* 1-19 por la suma ponderada de los *CS* 18-36 escalados, los *CM* 12-30 y el valor inicial de los coeficientes 1-19.

Con base en las figuras (5.19), (5.23) y (5.24) se pudo observar que para $\delta j = 1/4$ se obtuvo la mejor respuesta teniendo en cuenta que las componentes de bajas frecuencias presentan el menor número de componentes de los tres δj evaluados. Con los datos iniciales y finales obtenidos, se realizó nuevamente en el programa *Seismic Unix* el proceso de apilado de las trazas obteniendo los resultados de la figura (5.25) donde se muestra los datos sísmicos apilados inicialmente y de la figura (5.26) que corresponde a los datos apilados después de la transformación.

Con el fin de determinar si se obtienen mejores resultados transformando primero la sección pre-apilada y apilar las trazas resultantes. Para el modelo de cuña se trabajó también con este tipo de datos. Al aplicar el procedimiento a los datos pre-apilados se obtuvo la información en el dominio de la frecuencia que se muestra en la figura (5.27).

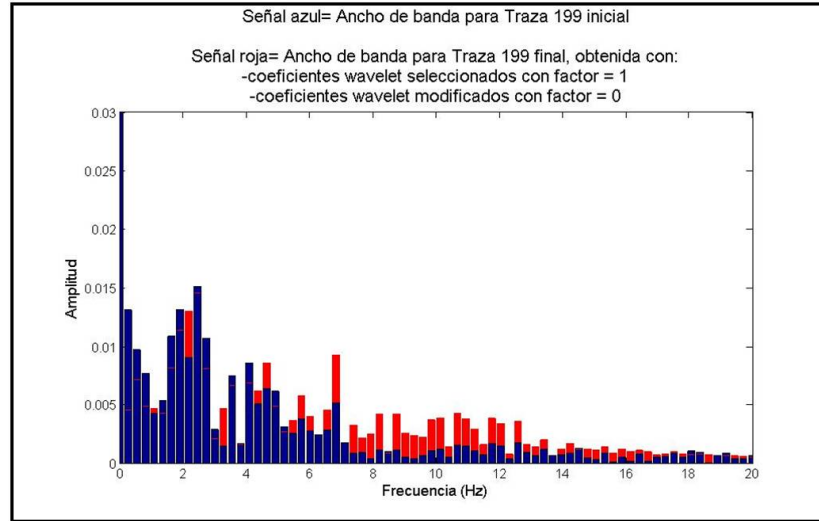


Figura 5.16: Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando *CM* 8-10 por *CS* 11-13.

Aplicando el algoritmo a los datos pos-apilados del modelo de interfaces horizontales se obtiene la información en el dominio de la frecuencia que se muestra en la figura (5.28) y las secciones apiladas finales se muestran en la figura 5.29 para el modelo de cuña procesando datos pre-apilados y para el modelo horizontal datos pos-apilados.

Con la realización de estas pruebas, se establece una base para el desarrollo de nuevos algoritmos computacionales basados en el análisis tiempo-frecuencia.

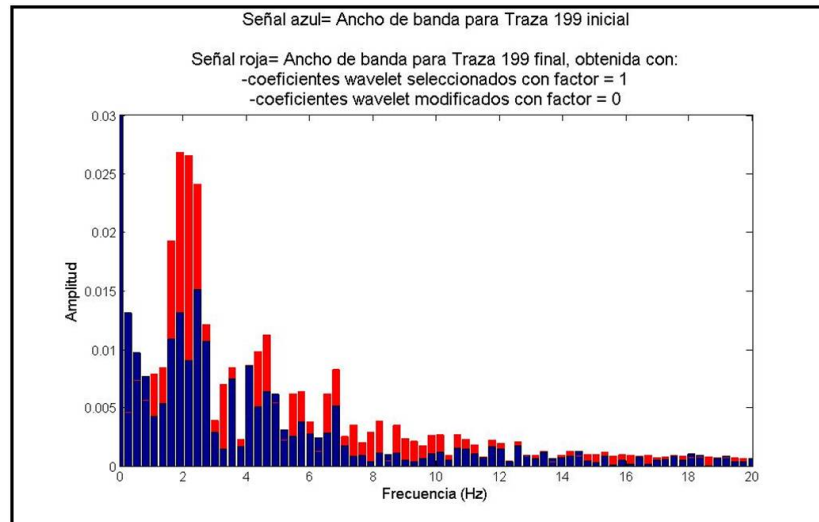


Figura 5.17: Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando *CM* 8-18 por *CS* 11-21.

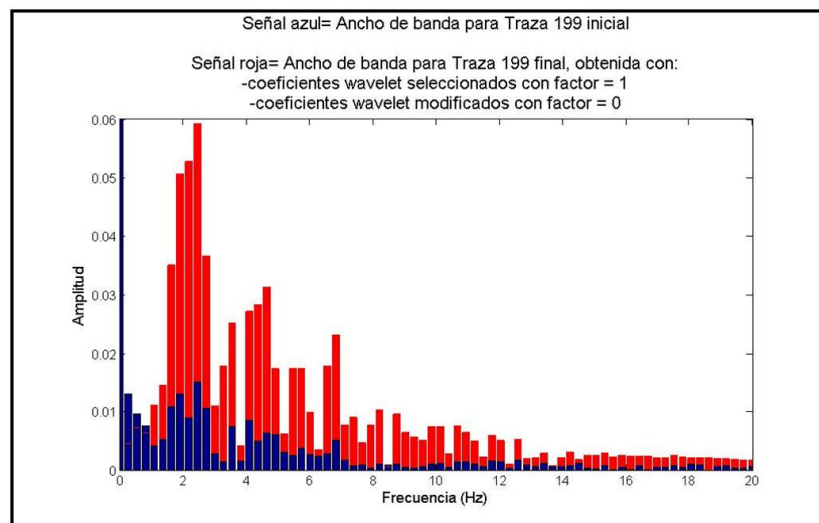


Figura 5.18: Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando *CM* 1-11 por *CS* 11-21.

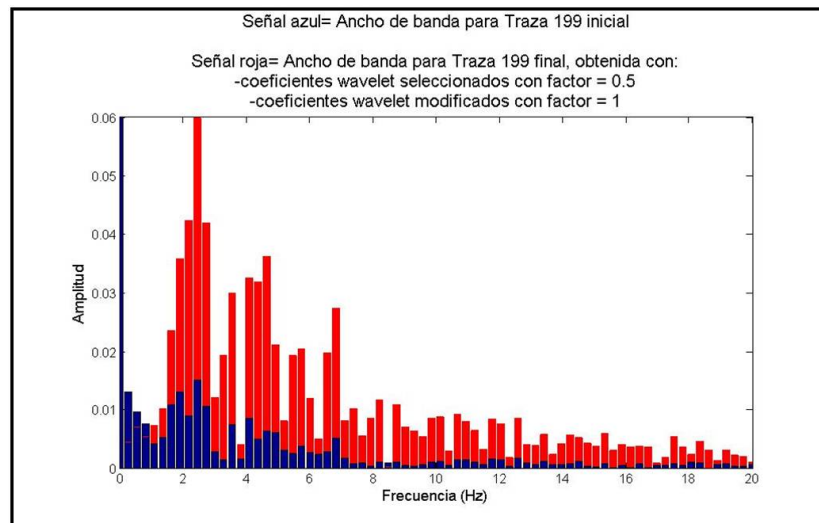


Figura 5.19: Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando los *CM* 1-11 por una suma ponderada de *CS* 11-21, *CM* 8-18 y *CM* 1-11.

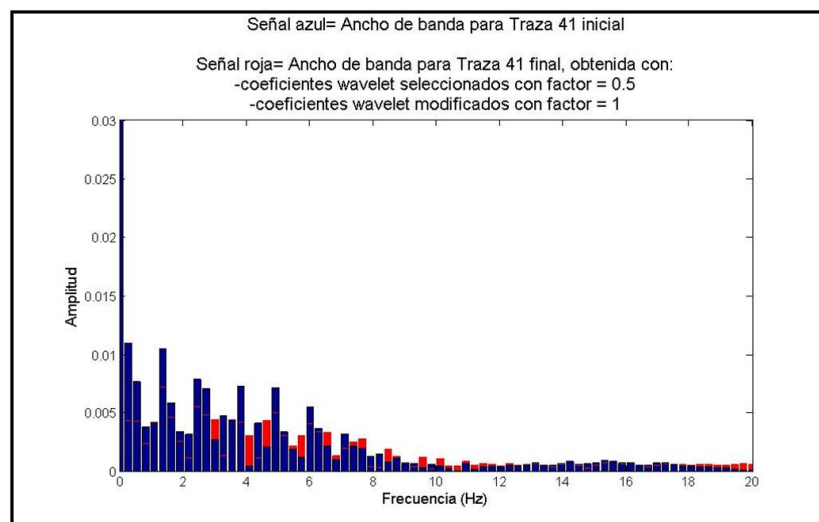


Figura 5.20: Contenido frecuencial de la traza 41 modelo cuña reemplazando los *CM* 10-14 por *CS* 15-19.

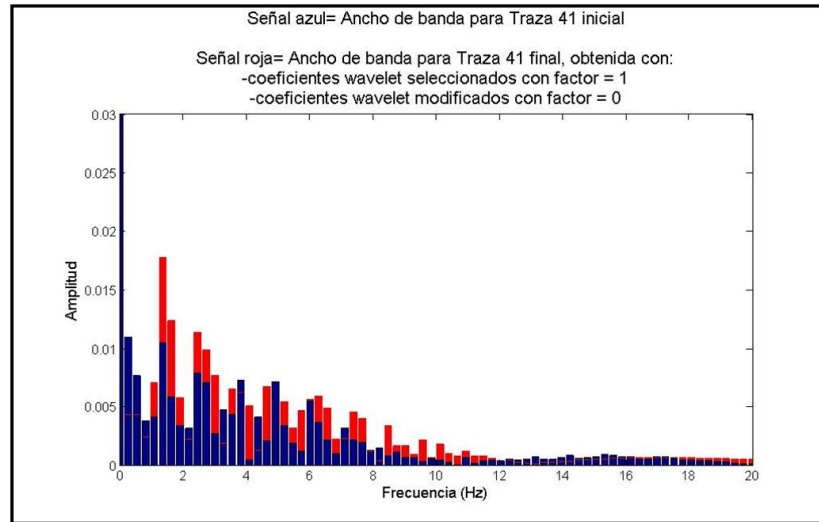


Figura 5.21: Contenido frecuencial de la traza 41 modelo cuña reemplazando los *CM* 10-23 por *CS* 15-28.

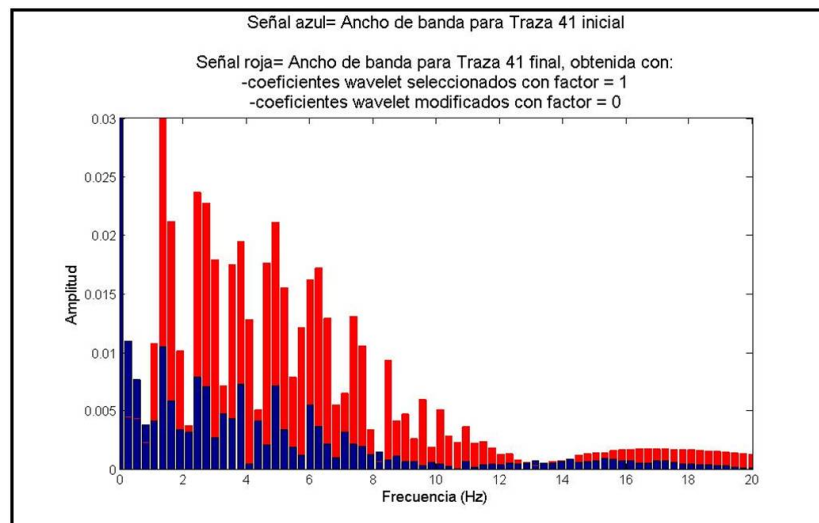


Figura 5.22: Contenido frecuencial de la traza 41 modelo cuña reemplazando los *CM* 1-14 por *CS* 15-28.

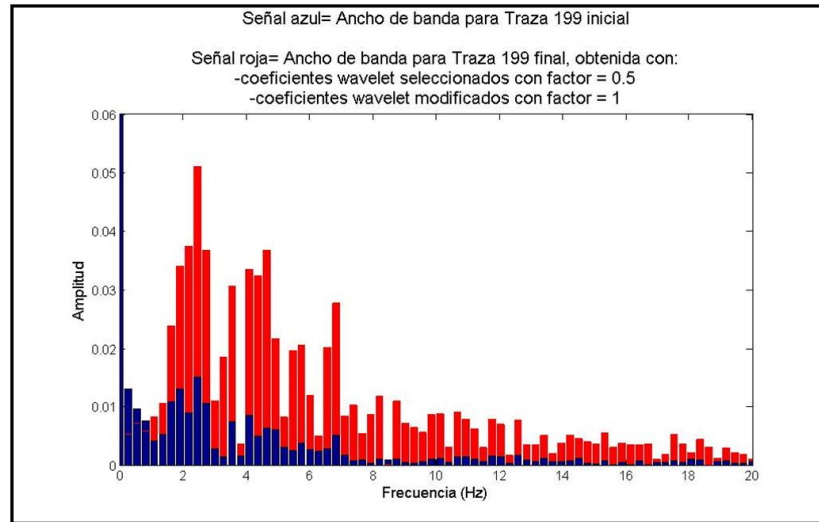


Figura 5.23: Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando los *CM* 1-14 por una suma ponderada de *CS* 15-28, *CM* 10-23 y *CM* 1-14.

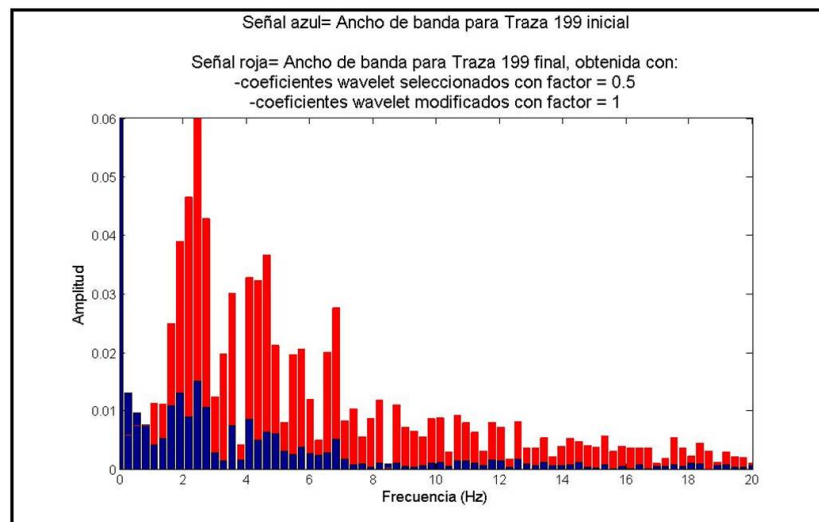


Figura 5.24: Contenido frecuencial de la traza 199 modelo cuña reemplazando los *CM* 1-19 por una suma ponderada de *CS* 18-36, *CM* 12-30 y *CM* 1-19.

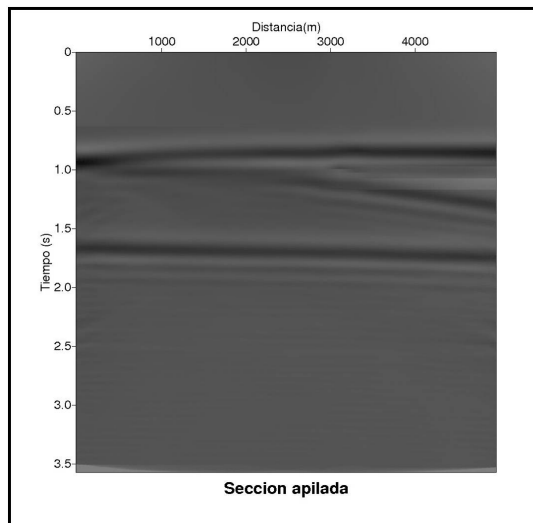


Figura 5.25: Datos apilados de entrada modelo cuña.

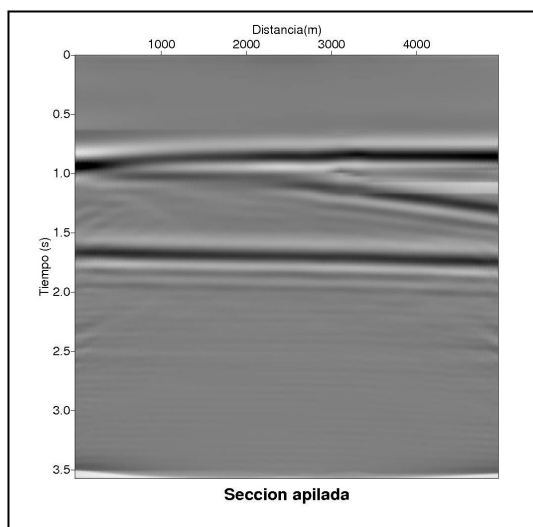


Figura 5.26: Datos apilados obtenidos modelo cuña.

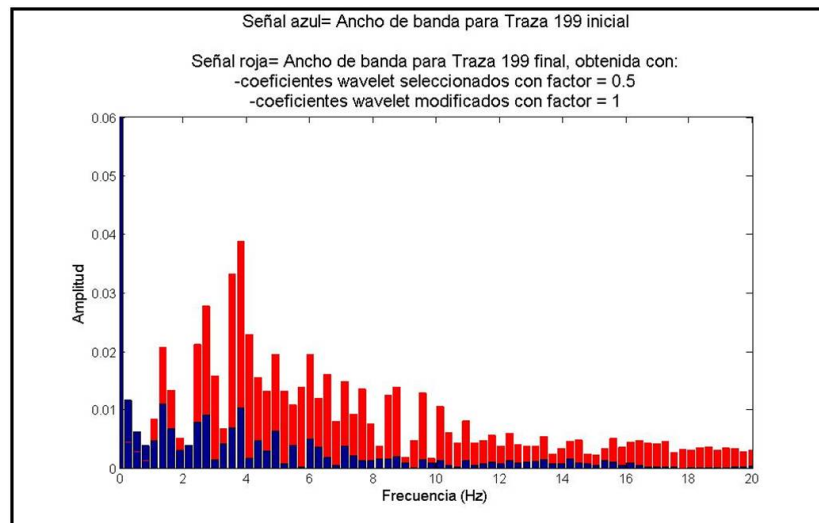


Figura 5.27: Información en el dominio de la frecuencia para la traza 199 de los datos pre-apilados.

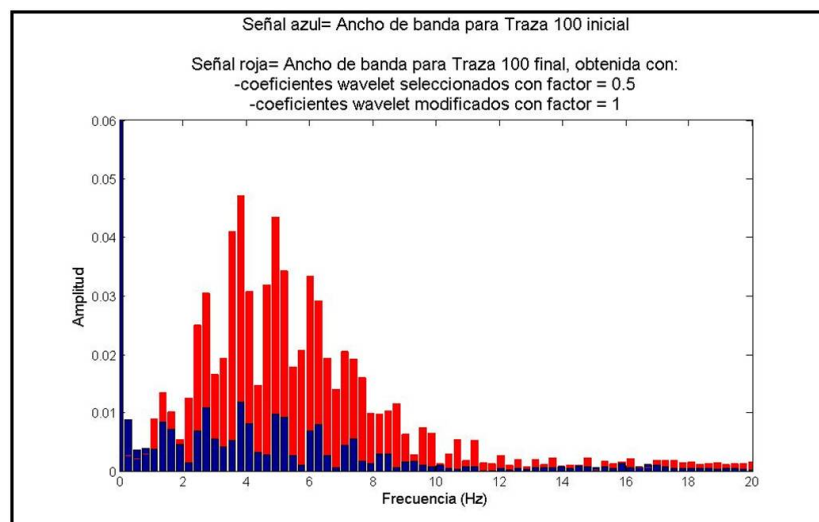


Figura 5.28: Información en el dominio de la frecuencia para la traza 100 de los datos pos-apilados.

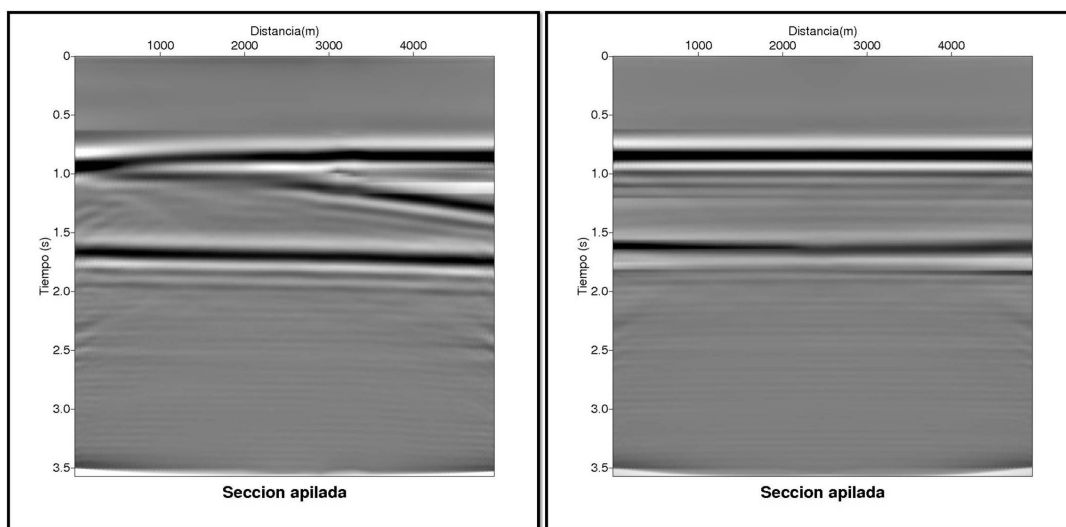


Figura 5.29: Secciones sísmicas finales procesando datos pre-apilados para el modelo de cuña (izquierda) y pos-apilados para el modelo de interfaces horizontales (derecha).

Capítulo 6

Conclusiones

Teniendo en cuenta la naturaleza del proyecto se establecen las siguientes conclusiones sobre el trabajo y observaciones que permitan establecer parámetros de desarrollo en trabajos futuros.

- Se encontró que al modificar de cualquier manera los coeficientes wavelet, se modifica el contenido frecuencial de la serie de tiempo que se está trabajando. La modificación precisa de los coeficientes de interés, permite aumentar el número de componentes frecuenciales que corresponden a los coeficientes modificados.
- Se observó que el método favorece el espectro de frecuencias de las trazas y mejora la resolución temporal de las secciones sísmicas. La calidad del resultado del método es determinada según el criterio del profesional en geofísica, que en este caso hizo parte del personal del Instituto Colombiano del Petróleo y fue quien corroboró los resultados obtenidos.
- La aplicación del algoritmo a datos pre-apilados exige procesamiento de un mayor número de trazas pero los resultados obtenidos son mejores que los arrojados al procesar datos pos-apilados.
- La metodología aplicada mostró resultados similares para ambos modelos debido a que el contenido frecuencial fue muy similar. Para cada modelo que se quiera trabajar se debe realizar el respectivo análisis en el dominio de la frecuencia para caracterizarlos y determinar los componentes wavelet de interés.
- Para la modificación de los coeficientes wavelet se tuvo en cuenta tanto la parte compleja como la parte real de cada uno. El algoritmo es una herramienta que puede incluir artefactos que aparentemente favorecen el resultado pero en aplicaciones a datos reales pueden llegar a disminuir la calidad de los datos finales.

- En el dominio de la frecuencia la mayor ganancia en amplitud se aprecia en las componentes de frecuencias bajas. A pesar de que el efecto de ganancia es no lineal e implica una aparente disminución en la calidad de los datos, se puede determinar cuando se obtiene la sección sísmica apilada que los resultados son los esperados.

Capítulo 7

Observaciones

- La relación señal a ruido (SNR) en señales sísmicas es un factor que determina la calidad de las imágenes finales. En la secuencia de procesado se busca que los procedimientos realizados mantengan el ruido en un nivel que no afecte la información relevante. Para el caso de este trabajo este factor no se pudo cuantificar ya que los datos entregados por el programa *Seismic Unix* no permitían determinar niveles de ruido o de señal.
- Dentro de los parámetros establecidos por [4] se encuentra el factor δj cuyo valor fue modificado para el desarrollo de este trabajo. Otros parámetros no se modificaron y se utilizaron sus valores por defecto ya que las herramientas bibliográficas y el estado del arte no entregaban suficiente soporte para determinar una metodología de trabajo. De haber modificado los demás parámetros con el fin de realizar pruebas, se hubiera contado con un sinnúmero de posibilidades para poder determinar la mejor metodología. Tan solo modificando el parámetro δj se cuenta con una gran cantidad de posibles soluciones.
- Para la extensión del ancho de banda sísmico se aplicó una metodología basada en la bibliografía con que se contó, pero no se pudo determinar una procedimiento estructurado ya que se puede llegar a realizar cualquier cantidad de ajustes antes de determinar la metodología adecuada. El procedimiento que se desarrolló puede a su vez incluir artefactos que indiquen un mejor rendimiento pero en realidad se están obteniendo resultados que no cumplen con los requisitos esperados.
- Con la metodología utilizada se logró resaltar componentes de frecuencia, sin embargo esta es una apreciación meramente cualitativa ya que para determinar si realmente la resolución temporal de sísmica de reflexión mejoró, se requiere de la apreciación de un intérprete profesional en geofísica.

Capítulo 8

Anexos

8.1. *Anexo A*

Códigos utilizados para la creación de los modelos sintéticos en el paquete de datos *SU*. La primera línea de cada código debe ser:

```
#!/bin/sh
```

Con el fin de que al momento de correr el código, el paquete *SU* lo reconozca como un código fuente.

Coordenadas

Coorednadas para el modelo de interfaces.

```
0 0
5000 0
1 -99999
0 1500
5000 1500
1 -99999
0 2500
5000 2500
1 -99999
0 3025
50000 3025
```

Creación del modelo.

```
#!/bin/sh

entrada=coordenadas1
#el archivo coordenadas1 es un archivo de texto plano que contiene las
#coordendas del modelo de interfaces
longitud=5000
profundidad=3000
#velocidades de las interfaces
v00=1500,2000,2500,3500
offset_max=1500
#intervalo de disparos
id=50
#intervalo de receptores
ir=25
#tiempo de grabación
tmax=5

#longitud del tendido
lt=$((2*offset_max))
#número de disparos
nd=$((longitud-lt)/id))
#número de receptores
nr=$((lt/ir+1))

###parametros para los diferentes comandos
nx=$((lt/ir+1))
dx=$ir
nz=$((profundidad/ir))
dz=$ir
tmax=$tmax
fpeak=5
fmax=10
mt=4
```

```
clip=0.25

#modelado por diferencias finitas
unif2 < $entrada \
nz=$((profundidad+1)) dz=1 nx=$((longitud+1)) dx=1 \
v00=$v00 > velocidad

#graficación del modelo
psimage < velocidad title='Perfil de velocidades de las interfaces' \
n1=$((profundidad+1)) d1=1 n2=$((longitud+1)) d2=1 \
legend=1 units='Velocidad (m/s)' \
label1='Profundidad (m)' label2='Distancia (m)' \
width=10 heigth=6 lx=0.2 d1num=250 d2num=500 \
legendfont=times_roman12 labelsz=15 titlesz=18 > grafica_velocidad.ps
```

Generación de los *Shot gathers*.

```
#!/bin/sh

entrada=coordenadas1
longitud=5000
profundidad=3000
v00=1500,2000,2500,3500
offset_max=1500
id=50
ir=25
tmax=5

lt=$((2*offset_max))
nd=$((longitud-lt)/id))
nr=$((lt/ir+1))

###numero de receptores teniendo en cuenta el offset cero
```

```
nx=$((lt/ir+1))
dx=$ir
nz=$((profundidad/ir))
dz=$ir
tmax=$tmax
fpeak=5
fmax=10
mt=4
clip=0.25

limit=$((nd*id))

for ((fx=0 ; fx<=limit ; fx=$((fx+id))))
do
unif2 < $entrada fx=$fx nx=$nx dx=$dx nz=$nz dz=$dz \
v00=$v00 > velocidad_todo.out

#modelado por diferencias finitas

sufdmod2 < velocidad_todo.out xs=$((fx+offset_max)) zs=0 fx=$fx \
nx=$nx nz=$nz dx=$dx dz=$dz \
tmax=$tmax fpeak=$fpeak fmax=$fmax \
abs=1,1,1,1 mt=$mt verbose=0 \
hsfile=gather{=$((fx+offset_max))} > ondas

supswigb < gather{=$((fx+offset_max))} f2=$fx clip=0.25 \
title="Shot Gather correspondiente a disparo en la posicion
=$((fx+offset_max))(m)" \
label1="tiempo(s)" label2="Distancia (m)" \
wbox=8 hbox=6 titlesize=14 labelsiz=18 d2num=500 >
grafica_gather$=$((fx+offset_max)).ps

done

#concatenar shot gathers
```

```
primer_gather=gather{1500}

suwind < $primer_gather j=1 > shots

limite2=$((nd*id-id+offset_max))

for ((x=$((offset_max+id)) ; x<=limite2 ; x=$((x+id))))

do

cat shots gather{$x} > shots_concat

suwind < shots_concat j=1 > shots

done
```

Ajuste del *header* del archivo sísmico.

El *header* de un archivo sísmico corresponde a la información con la cual se realizan las operaciones básicas a los datos sísmicos.

```
#!/bin/sh

entrada=coordenadas1
longitud=5000
profundidad=3000
v00=1500,2000,2500,3500
offset_max=1500
id=50
ir=25
tmax=5

###tiempo de grabacion
```

```
lt=$((2*offset_max))
nd=$((longitud-lt)/id))
nr=$((lt/ir+1))

nx=$((lt/ir+1))
dx=$ir
nz=$((profundidad/ir))
dz=$ir

tmax=$tmax
fpeak=5
fmax=10
mt=4
clip=0.25

#ajuste del header

sushw < shots key=tracl,tracr,tracl,sx,flidr,offset
a=1,1,1,$(($lt/2)),1,-(($lt/2)) b=1,1,1,0,0,$dx c=0,0,0,$id,1,0
j=$((nx*nd)),$(($nx*nd)),$nx,$nx,$nx,$nx > shots.hea

sushw < shots.hea key=gx a=0 b=$dx c=id j=$nx > shots.header

suchw < shots.header key1=cdp key2=gx key3=sx b=1 c=1 d=2 > shots.cmp

#graficar 4 shot gathers

suwind < shots.cmp j=4 |
suwind key=flidr min=1 max=4 |
supswigb clip=0.25 f2=3275 d2=1.652892 d2num=50 \
title="4 primeros shot gathers" \
label1="tiempo (s)" label2="Distancia (m)" wbox=8.5 hbox=8.5 titlesize=14
labelsize=18> grafica_4gathers.ps

suwind < shots.cmp j=10 |
suwind key=flidr min=1 max=10 |
```

```
supswigb clip=0.25 f2=1500 d2=1.652892 d2num=50 \  
title="4 primeros shot gathers" \  
label1="tiempo (s)" label2="Distancia (m)" wbox=8.5 hbox=8.5 titlesize=14  
labelsize=18> grafica_40gathers.ps
```

```
#orden cmp
```

```
susort < shots.cmp > cmp cdp
```

```
#grafica 4 cmp gathers
```

```
suwind < cmp key=cdp min=2000 max=2040 |  
supswigb clip=0.25 f2=1994 d2=0.3125 d2num=12.5 \  
title="CMP gather" label1="tiempo (s)" label2="Distancia (m)" wbox=8.5  
hbox=8.5 titlesize=14 labelsize=18 > grafica_cmp.ps
```

Análisis de velocidad

```
#!/bin/sh
```

```
###Análisis de velocidad
```

```
velpanel=cmp
```

```
vpicks=stkvel.pl
```

```
cdpmin=2100
```

```
cdpmax=2500
```

```
let dcdp=100
```

```
nv=500
```

```
dv=10
```

```
fv=500
```

```
f=1,10,100,120
```

```
amps=0,1,1,0

nout=3001
dxout=0.004

normpow=0
slowness=0
fold=40

let cdp=$cdpmin

while [ $cdp -le $cdpmax ]

do

echo "$cdp">> valorcdp1
ok=false

while [ $ok == false ]

do

suwind < $velpanel key=cdp min=$cdp max=$cdp count=$fold > panel.$cdp

suxwigb < panel.$cdp title="cmp para $cdp" xbox=700 clip=0.6
mpicks=mpicks.$cdp &

sugain < panel.$cdp tpow=2 | sufilter f=$f amps=$amps > panelF.$cdp

suvelan < panelF.$cdp nv=$nv dv=$dv fv=$fv > semblanza

suximage < semblanza wclip=0.6 bclip=1 f2=$fv d2=$dv units='semblanza' \
label1='tiempo (seg)' label2='velocidad(m/s)' \
title="scan de velocidad (grafica de semblanza) para CMP $cdp" \
mpicks=mpicks.$cdp \
```

```
supsimage < panel.$cdp clip=0.25 \  
title="CMP Gather para CMP=$cdp" \  
windowtitle="CMP" \  
label1='Tiempo (s)' label2='Distancia(m)' > CMP1ima.ps  
  
supsimage < semblanza wclip=0.6 bclip=1 f2=$fv d2=$dv units='semblanza' \  
label1='Tiempo (s)' label2='Velocidad (m/s)' title='Análisis de semblanza' >  
semblanza.ps  
  
sort < mpicks.$cdp -n | mkparfile string1=tnmo string2=vnmo > par.$cdp  
  
sed < par.$cdp '  
s/tnmo/xin/  
s/vnmo/yin/  
' > unisam.p  
  
unisam nout=$nout fxout=0.0 dxout=$dxout par=unisam.p method=spline > varias.u  
  
psgraph < varias.u n=$nout nplot=1 d1=$dxout f1=0.0 \  
label1='tiempo (s)' label2='velocidad (m/s)' \  
title="Función de velocidad de apilamiento: CMP $cdp" \  
grid1=solid grid2=solid \  
linecolor=2 stle=seismic > funcion.ps  
  
pause  
  
echo "la seleccion es correcta ? (s/n)" | tr -d "\012" > /dev/tty  
read response  
case $response in  
n*) ok=false;;  
*) ok=true;;  
esac  
  
echo "$cdp">> valorcdp3  
done < /dev/tty  
echo "$cdp">> valorcdp4
```

```
#cdp='bc -1 <<END
let cdp=$cdp+$dcdp
#END'

echo "$cdp">> valorcdp5

done

set +x

#generar archivo par

>$vpicks
echo "cdp=" | tr -d "\012" >>$vpicks
cdp=$cdpmin
echo "$cdp" | tr -d "\012" >>$vpicks
let cdp=$cdp+$dcdp

while [ $cdp -le $cdpmax ]
do
echo ",$cdp" | tr -d "\012" >>$vpicks
let cdp=$cdp+$dcdp
done
echo >> $vpicks

cdp=$cdpmin

while [ $cdp -le $cdpmax ]
do
cat par.$cdp >> $vpicks
let cdp=$cdp+$dcdp
done

echo "archivo par sunmo: $vpicks is ready"
cdp=$cdpmin
```

```
while [ $cdp -le $cdpmax ]
do
let cdp=$cdp+$dcdp
done
```

Corrección *NMO*

```
#!/bin/sh
```

```
sunmo < cmp par=stkvel.p1 > nmodata
```

```
suwind < nmodata key=cdp min=2000 max=2040 |
supswigb clip=0.25 f2=1994 d2=0.3125 d2num=12.5 \
title="CMP gathers corregidos por NMO" \
label1="Tiempo (s)" label2="Distancia(m)" wbox=8.5 hbox=8.5 >
grafica_nmo.ps
```

```
supsimage < nmodata title="Seccion pre-apilada" clip=0.21 \
label1="Tiempo (s)" label2="Distancia(m)" wbox=8.5 hbox=8.5 >
grafica_nmotodo.ps
```

```
#apilado
```

```
sustack < nmodata normpow=1.0 > stackdata
```

```
supsimage < stackdata title="Seccion apilada" clip=0.21 \
label1="Tiempo (s)" label2="Distancia(m)" wbox=8.5 hbox=8.5 >
grafica_stack.ps
```

```
supswigb < stackdata title="Seccion apilada" clip=0.21 \
label1="Tiempo (s)" label2="Distancia(m)" width=10 heigth=6 >
grafica_stack2.ps
```

Separación de trazas para trabajarlas en Matlab

```
#!/bin/sh

limit=199

for ((fx=1 ; fx<=limit ; fx=$fx+1))
do

suwind < stackdata key=tracl min=$fx max=$fx |
sustrip stackdata > traza$fx head=cabecero$fx

b2a < traza$fx n1=1 > traza$fx.ascii

#suwind < stackdata key=tracl min=2 max=2 |
#sustrip stackdata > traza2

#b2a < traza2 n1=1 > traza2.ascii

done
```

Unión detrazas posterior al procesado en Matlab

```
#!/bin/sh

limit=199

for ((fx=1 ; fx<=limit ; fx=$fx+1))
do

a2b < traza_inicial$fx.ascii > traza_inicial$fx
a2b < traza_final$fx.ascii > traza_final$fx
supaste < traza_inicial$fx head=cabecero$fx ns=1001 >
traza_inicial_completa$fx

supaste < traza_final$fx head=cabecero$fx ns=1001 >
traza_final_completa$fx
```

done

Reapilado

```
#!/bin/sh
```

```
limit=199
```

```
suwind < traza_inicial_completa1 j=1 > traza_inicial
```

```
suwind < traza_final_completa1 j=1 > traza_final
```

```
for ((fx=2 ; fx<=limit ; fx=$fx+1))
```

```
do
```

```
cat traza_inicial traza_inicial_completa$fx | sushw key=tracl a=1 b=1>
```

```
traza_inicial_c
```

```
suwind < traza_inicial_c j=1 > traza_inicial
```

```
cat traza_final traza_final_completa$fx | sushw key=tracl a=1 b=1>
```

```
traza_final_c
```

```
suwind < traza_final_c j=1 > traza_final
```

done

```
supsimage < traza_inicial title ="Seccion apilada" clip=0.4 \
```

```
label1="Tiempo (s)" label2="Distancia(m)" wbox=8.5 hbox=8.5 >
```

```
grafica_inicial.ps
```

```
supsimage < traza_final title="Seccion apilada" clip=0.4 \
```

```
label1="Tiempo (s)" label2="Distancia(m)" wbox=8.5 hbox=8.5 >
```

```
grafica_final.ps
```

8.2. Anexo B

Código principal

```
close all
clc
%segundos de grabación sobre número de muestras
dt=5/1400;
%vector de tiempo
t=dt:dt:5;
%número de trazas
for a=1:1:199

%valores para graficar
%fact_espacio= espacio entre trazas
%fact_escala= factor de escala a cada traza
fact_espacio=3*a;
fact_escala=10;
%factor de coeficientes seleccionados
fact_selec=0.5;
%factor de coeficientes a modificar
fact_modif=1;

%valores para crear los nombre y cargar todas las trazas
v=num2str (a);
traza=strcat('traza', v, '.ascii');
datos(a,:)= load (traza);
yi(a,:)=datos(a,400:1400)+zeros(size(datos(a,400:1400)))*j;
mother='MORLET';
dj=1/4;
cs=(15:1:28);
cm=(1:1:14);
cm2=(10:1:23);

%CWT
[wave,period,scale,coi,dj, param, k] = contwt(yi(a,:),dt,0,dj);
```

```

%selección de coeficientes
wvcfs=wave;
wave1=wave(cs,:);
wvcfs(cm,:)=fact_selec*wave1+fact_modif*wvcfs(cm,:)+wvcfs(cm,:);
% transformada inversa
yf(a,:) = INVCWT(wvcfs, mother, scale, param, k);

%graficar trazas originales y trazas transformadas
subplot(1,2,1),plot((yi(a,:)*fact_escal+fact_espacio),t(400:1400),'k')
% fill((yi(a,:)*fact_escal+fact_espacio),t(400:1400),'k')
set(gca,'xdir','normal','ydir','reverse')
title('Sección apilada inicial'),xlabel('Distancia'),ylabel('Tiempo (s)')
hold on
axis([0 fact_espacio 1.5 5])
subplot(1,2,2),plot((yf(a,:)*fact_escal+fact_espacio),t(400:1400),'k');
% fill((yf(a,:)*fact_escal+fact_espacio),t(400:1400),'k')
set(gca,'xdir','normal','ydir','reverse')
title(['Sección apilada final, obtenida con:'];
['-coeficientes wavelet seleccionados con factor = ' num2str(fact_selec)];
['-coeficientes wavelet modificados con factor = ' num2str(fact_modif)])
xlabel('Distancia'),ylabel('Tiempo (s)')
%title('Sección apilada final'),xlabel('Distancia'),ylabel('Tiempo (s)')
hold on
axis([0 fact_espacio 1.5 5])

%guardar las trazas
guardar_inicial=[yi(a,:)]';
guardar_final=[yf(a,:)]';
save(strcat('traza_inicial',num2str(v),'.ascii'),'guardar_inicial','-ascii')
save(strcat('traza_final',num2str(v),'.ascii'),'guardar_final','-ascii')
end

%para analizar solo una traza
k=199;

y=yi(k,:);

```

```

dt=5/1400;
t=0:dt:5-dt;
b=y+zeros(size(y))*j;
fs=1/dt;
s1=length(b);
puntos=2^nextpow2(s1);
bf=fft(b,puntos)/s1;
f=fs/2*linspace(0,1,puntos/2+1);

z=yf(k,:);
dt=5/1400;
t=0:dt:5-dt;
c=z+zeros(size(z))*j;
fs=1/dt;
s2=length(c);
puntos=2^nextpow2(s2);
bf2=fft(c,puntos)/s2;
f=fs/2*linspace(0,1,puntos/2+1);

figure;
subplot(111),plot(y,t(400:1400))
hold on,plot(z,t(400:1400),'r')
set(gca,'xdir','normal','ydir','reverse')
title(['Traza ' num2str(k) ' pos-apilada inicial, modelo cuña'])
title(['Señal azul= Traza ' num2str(k) ' inicial'];'');
['Señal roja= Traza ' num2str(k) ' final, obtenida con:'];
['-coeficientes wavelet seleccionados con factor = ' num2str(fact_selec)];
['-coeficientes wavelet modificados con factor = ' num2str(fact_modif)];
xlabel('Amplitud'),ylabel('Tiempo')

figure; subplot(111),bar(f,2*abs(bf2(1:puntos/2+1)),'r')

```

```

hold on,bar(f,2*abs(bf(1:puntos/2+1))),
title(['Señal azul= Ancho de banda para Traza ' num2str(k) ' inicial'];'';
['Señal roja= Ancho de banda para Traza ' num2str(k) ' final, obtenida con:'];
['-coeficientes wavelet seleccionados con factor = ' num2str(fact_selec)];
['-coeficientes wavelet modificados con factor = ' num2str(fact_modif)]})
xlabel('Frecuencia (Hz)'),ylabel('Amplitud')
axis([0 20 0 0.06])

```

Código para crear ondícula Morlet y analizar su espectro dependiendo el valor de escala

```

%z representa el vector de escalas a utilizar
for ciclo=1:1:size(z)
npuntos=1000;
lb=-4;
ub=-lb;
n=npuntos;
ts=(ub-lb)/n;
t=lb:(ub-lb)/n:ub;
%factor de desplazamiento
b=0;
%factor de escala
a=z(ciclo);
x=(t-b)/a;
fo=exp((-x.^2)/2);
fc=cos(5.*x);
psi=fo.*fc;
figure,
subplot(211),plot(t,psi)
% fill(t,psi,'k')
title(['Ondícula con factor de escala = ' num2str(a) ]),
xlabel('Tiempo (s)'),ylabel('Amplitud')
b=psi;
fs=1/ts;
s1=length(psi);

```

```

puntos=2^nextpow2(s1);
bf=fft(b,puntos)/s1;
%de 0 a 0.5 con incremento de...
f=fs/2*linspace(0,1,puntos/2+1);
subplot(212),plot(f,2*abs(bf(1:puntos/2+1))),title(['Ancho de banda para
ondícula con factor de escala = ' num2str(a) ]),xlabel('Frecuencia (Hz)'),
ylabel('Amplitud')
% axis([0 20 0 0.5]) %redimensiona el recuadro
end

```

Códigos desarrollados basado en lo establecido por [4] y publicados en la página web <http://www.mathworks.com/matlabcentral/>.

Código 1

```

function [wave,period,scale,coi, dj, paramout, k] =
contwt(Y,dt,pad,dj,s0,J1,mother,param);

%Se determinan cuales parámetros fueron los utilizados.
if (nargin < 8), param = -1;, end
if (nargin < 7), mother = -1;, end
if (nargin < 6), J1 = -1;, end
if (nargin < 5), s0 = -1;, end
if (nargin < 4), dj = -1;, end
if (nargin < 3), pad = 0;, end
if (nargin < 2)
error('Must input a vector Y and sampling time DT')
end

n1 = length(Y);

if (s0 == -1), s0=2*dt;, end
%s0 es la menor frecuencia solucionable
%la cual se busca que su periodo equialente en Fourier sea 2dt
if (dj == -1), dj = 1./5.;;, end
%J1 es la mayor frecuencia solucionable segun el documento

```

```

%y define el número de escalas menos una
if (J1 == -1), J1=fix((log(n1*dt/s0)/log(2))/dj);, end
%Ondícula madre es la morlet
if (mother == -1), mother = 'MORLET';, end

%Construir la serie de tiempo a analizar, pad if necessary
x(1:n1) = Y - mean(Y);
%aclara para que se hace el valor medio de Y
if (pad == 1)
base2 = fix(log(n1)/log(2) + 0.4999); % Potencia de 2 más cercana a N
x = [x,zeros(1,2^(base2+1)-n1)];
end
%en este punto se ha creado el vector x con o sin pad.
n = length(x);

k = [1:fix(n/2)];
%figure,plot(k(:,:)),title('k = [1:fix(n/2)]')
k = k.*((2.*pi)/(n*dt));
% figure,plot(k(:,:)),title('k = k.*((2.*pi)/(n*dt))')
k = [0., k, -k(fix((n-1)/2):-1:1)];% no entiendo esta notación.
%figure,plot(k(:,:)),title('k = [0., k, -k(fix((n-1)/2):-1:1)]')

%...compute FFT of the (padded) time series
f = fft(x);

%...construct SCALE array & empty PERIOD & WAVE arrays
scale = s0*2.^((0:J1)*dj);
%figure,plot(scale(:,:)),title('scale = s0*2.elevado a ((0:J1)*dj)')
period = scale;
wave = zeros(J1+1,n); % definir el arreglo wavelet
wave = wave + i*wave; % hacer complejo el arreglo

% Lazo para todas las esclas y aplicacion de la transformada
for a1 = 1:J1+1
%[daughter,fourier_factor,coi,dofmin, paramout]=wave_bases(mother,

```

```

k, scale(a1),param);
if (param == -1), param = 6.;; end
k0 = param;
expnt = -(scale(a1).*k - k0).^2/2.*(k > 0.);% que significa k>0
norm = sqrt(scale(a1)*k(2))*(pi^(-0.25))*sqrt(n);    %
daughter = norm*exp(expnt);
daughter = daughter.*(k > 0.);
fourier_factor = (4*pi)/(k0 + sqrt(2 + k0^2));
coi = fourier_factor/sqrt(2);
dofmin = 2;
paramout = param;
wave(a1,:) = ifft(f.*daughter); % Transformada wavelet (Ecuación 4 de Torrence)
end

period = fourier_factor*scale;
coi = coi*dt*[1E-5,1:((n1+1)/2-1),fliplr((1:(n1/2-1))),1E-5];
wave = wave(:,1:n1);

return

% end of code

```

Código 2

```

function Xrec = invcwt(wvcfs, mother, scale, param, k)

Wr = real(wvcfs);
N = size(Wr, 2);
%compute the sum
scale = scale(:);
s = repmat(scale, [1, size(wvcfs,2)]);

summand = sum(Wr./sqrt(s), 1);

for a1 = 1:length(scale)

```

```
daughter=wave_bases(mother, k, scale(a1),param);
%daughter=wave_bases(mother,k,scale(a1),param);

Wdelta(a1) = (1/N)*sum(daughter);
end

RealWdelta = real(Wdelta);
RealWdelta = RealWdelta(:);

C = sum(RealWdelta./sqrt(scale));

Xrec = (1/C)*summand;
```

Posición	Valores de escalas para δj		
	1/3	1/4	1/5
1	0.0071	0.0071	0.0071
2	0.0090	0.0085	0.0082
3	0.0113	0.0101	0.0094
4	0.0143	0.0120	0.0108
5	0.0180	0.0143	0.0124
6	0.0227	0.0170	0.0143
7	0.0286	0.0202	0.0164
8	0.0360	0.0240	0.0189
9	0.0454	0.0286	0.0217
10	0.0571	0.0340	0.0249
11	0.0720	0.0404	0.0286
12	0.0907	0.0481	0.0328
13	0.1143	0.0571	0.0377
14	0.1440	0.0680	0.0433
15	0.1814	0.0808	0.0497
16	0.2286	0.0961	0.0571
17	0.2880	0.1143	0.0656
18	0.3628	0.1359	0.0754
19	0.4571	0.1616	0.0866
20	0.5760	0.1922	0.0995
21	0.7257	0.2286	0.1143
22	0.9143	0.2718	0.1313
23	1.1519	0.3232	0.1508
24	1.4513	0.3844	0.1732
25	1.8286	0.4571	0.1990
26	2.3039	0.5436	0.2286
27	2.9027	0.6465	0.2626
28	0	0.7688	0.3016
29	0	0.9143	0.3464
30	0	1.0873	0.3980

Posición	Valores de escalas para δj		
	1/3	1/4	1/5
31	0	1.2930	0.4571
32	0	1.5376	0.5251
33	0	1.8286	0.6032
34	0	2.1746	0.6929
35	0	2.5860	0.7959
36	0	3.0753	0.9143
37	0	0	1.0502
38	0	0	1.2064
39	0	0	1.3858
40	0	0	1.5919
41	0	0	1.8286
42	0	0	2.1005
43	0	0	2.4128
44	0	0	2.7716
45	0	0	3.1837

Bibliografía

- [1] Y. Herrera and N. Cooper, *Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia.*, Universidad Nacional de Colombia, Enero 2010.
- [2] M. T. Teixidó i Ullod, “Caracterización del subsuelo mediante sísmica de reflexión de alta resolución, departamento de geodinámica y geofísica.” Ph.D. dissertation, Universidad de Barcelona,, 2000.
- [3] M. A. Gayá Florez, “Procesado de sísmica de reflexión superficial en la cuenca de ainsa, huesca (españa),” Master’s thesis, Universidad Simon Bolivar., 2005.
- [4] L. M. A. Valdivia, *Del instante de la creación a la formación y estructura de la tierra.*, 2005.
- [5] Özdogan Yilmaz, *Seismic data analysis, processing, inversion and interpretation of seismic data.*, S. M. Doherty, Ed. Society of exploration geophysicists., 2008.
- [6] R. Martinez Corredor, “Metodologías de descomposición espectral aplicadas al procesamiento de datos sísmicos,” Universidad Industrial de Santander, Tech. Rep., Mayo 2008.
- [7] S. Mallat, *A wavelet tool of signal processing.* Academic Press, 1999.
- [8] S. Chopra, *Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization*, 2007.
- [9] J. S. A. B. Michael Smith, Gary Perry and G. Yu, “Extending seismic bandwidth using the continuous wavelet transform.” *First Break*, vol. 26, pp. 97–102, 2008.
- [10] C. Chui, *Wavelets: a mathematical tool for signal analysis.* Society for industrial and applied mathematics, 1997.
- [11] C. Torrence and G. Compo, “A practical guide to wavelet analysis,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, pp. 61–78, 1998.

-
- [12] N. Hamarbatan, "High frequency imagin in a exploitation production environment - the murzun basin, case history." Repsol Oil Operation, Tech. Rep., 2006.
- [13] G. Gonzáles Bonorino, "Sísmica de reflexión de alta resolución en el estudio del cuaternario de áreas de pie de monte," *Revista de la Asocioación geológica Argentina*, pp. 78–84, 2003.
- [14] A. Vieira Pacheco, "Modelado básico de datos preapilados y su respectiva secuencia de procesamiento utilizando los programas del paquete seismic unix," Universidad Simón Bolívar, Tech. Rep., Abril 2007.
- [15] D. Sierra and O. Olarte, "Sistema de reconocimiento y diagnóstico de arritmias cardíacas aplicado a la identificación de taquicardias de complejos anchos a partir del ecg." *Revista Facultad de Ingenierías de la Universidad de Antioquia*, vol. 48, pp. 153–164, 2009.
- [16] O. Olarte and D. Sierra, "Determinación de los parámetros asociados al filtro wavelet por umbralización aplicado a filtrado de interferencias electrocardfográficas." Universidad industrial de santander, Tech. Rep.