



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**LA RELEVANCIA DEL PROCESAMIENTO
ESPECTRAL EN EL INCREMENTO DEL ANCHO
DE BANDA ÚTIL**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Ramón Sánchez González

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Fernando Gómez Santiago



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

AGRADECIMIENTOS

A Fernando Gómez Santiago, por sus observaciones, sugerencias y el tiempo dedicado para la elaboración y desarrollo del presente proyecto. Además, por compartir sus conocimientos y experiencias para mi desarrollo profesional.

A mis sinodales Rodrigo Montúfar Cháveznava, David Escobedo Zenil, Josué Tago Pacheco, Julián Zapotitla Román, cuyos comentarios fueron importantes para la conclusión del presente proyecto. Particularmente a Rodrigo por su amistad y sus conocimientos compartidos no solo en lo académico.

A José Luis Martínez Trujillo por su apoyo y su asesoramiento en temas matemáticos en el transcurso de mi formación profesional.

A la Fundación Chapopote y en especial a Luis Vielma Lobo por la beca concedida para la realización de la presente tesis.

A la Comisión Nacional de Hidrocarburos, por proporcionarme los datos sísmicos requeridos para el desarrollo de este trabajo y permiso para publicarlos.

A mis padres, Virginia del Carmen y Ramón, por su gran apoyo moral, entusiasmo y motivación. En especial a mi padre por la orientación durante la primera etapa del proyecto de tesis y durante todo el transcurso de esta misma, con correcciones y sugerencias de estilos de redacción.

A mi hermana Elena, por sus consejos durante la universidad, por motivarme y apoyarme en todo momento.

A mi gran amigo Víctor, por abrirme las puertas de su casa al inicio de mi desarrollo profesional, por sus consejos y por su gran apoyo incondicional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma máter, generadora de conocimientos, por otorgarme la oportunidad de efectuar mis estudios y compartirme sus valores, permitiéndome desarrollarme no solo en el área científica, sino también cultural y social, teniendo excelentes profesores que brindan una educación de calidad, necesaria para el desarrollo de futuros líderes que dirijan y se encuentren al frente de la Nación.

JURADO ASIGNADO

Presidente Dr. Rodrigo Montúfar Cháveznava

Secretario M.C. David Escobedo Zenil

Vocal M.C. Fernando Gómez Santiago

1^{er} Suplente Dr. Josué Tago Pacheco

2^{do} Suplente Ing. Julián Zapotitla Román

RESUMEN

La manipulación espectral de datos sísmicos involucra conceptos fundamentales de procesamiento de señales (*e.g.*, análisis espectral y filtrado), indispensables para realizar actividades cotidianas en las áreas de exploración y producción y capacitación de profesionales jóvenes afines al procesamiento y representación de datos sísmicos (*e.g.*, Claerbout, 1992; Chopra y Marfurt, 2016). Cotidianamente, en el ambiente académico e industrial, se utilizan diferentes métodos de manipulación espectral de datos sísmicos: blanqueamiento (o nivel de agua; Claerbout, 1992), azulamiento (incremento de frecuencias altas), balanceo, factor de amortiguamiento en inversión lineal y deconvolución (o remoción de efectos de filtrado) (*e.g.*, Elliot, 1987). El contenido de energía de los datos sísmicos está representado en el espectro de amplitud. Dicho espectro es de banda limitada en frecuencia, por lo que generalmente es deseable incrementar el ancho de banda el cual nos da beneficios como i) incremento de resolución sísmica vertical, ii) estabilización de operaciones de filtrado, y iii) estabilización de procesamiento de datos. Además existe una relación matemática, física y numérica de los métodos de manipulación espectral. Por ejemplo, al realizar balanceo espectral de datos sísmicos, interviene un factor de amortiguamiento. Ese valor equivale a reforzar la diagonal principal de la matriz utilizada en el proceso de inversión lineal y al blanqueamiento del espectro. Y al encontrar dicho factor (mediante las ecuaciones normales) podemos establecer su equivalencia con el balanceo espectral.

En el presente documento se analizaron dichos procesos para ilustrar su interrelación matemática, física y numérica, demostrar la necesidad de su uso, relevancia y generar una guía para estudiantes de licenciatura en geociencias (geofísica y geología), que también pueda ser utilizada para fines de capacitación de profesionales jóvenes, interesados en el tema. Además, la relevancia de este trabajo radica en que la manipulación espectral es fundamental y tiene muchas implicaciones técnicas para el mejoramiento de la resolución sísmica vertical, así como para facilitar flujos de trabajo en interpretación sísmica y en la generación de modelos geológicos del subsuelo.

ABSTRACT

The spectral manipulation of seismic data involves fundamental concepts of signal processing (eg, spectral analysis and filtering), essential for carrying out daily activities in the areas of exploration and production, teaching, research and training of young professionals related to processing and representation. of seismic data (eg, Claerbout, 1992; Chopra and Marfurt, 2016). Every day, in the academic and industrial environment, different methods of spectral manipulation of seismic data are used: whitening (or water level, Claerbout, 1992), blueing (increase of high frequencies), balancing, damping factor in linear inversion and deconvolution (or removal of filtering effects) (eg, Elliot, 1987). The energy content of the seismic data is represented in the amplitude spectrum. This spectrum is band limited in frequency, so it is generally desirable to increase the bandwidth which gives us benefits such as i) vertical seismic resolution increase, ii) stabilization of filtering operations, and iii) stabilization of data processing. Thus, in this thesis, I will analyzed these processes to illustrate their mathematical, physical and numerical interrelation, demonstrate the need for their use, relevance and generate a guide for undergraduate students in geosciences (geophysics and geology), which may also be used for training purposes of young professionals, interested in the subject. In addition, the relevance of this work lies in the fact that spectral manipulation is fundamental and has many technical implications for the improvement of vertical seismic resolution, as well as to facilitate work flows in seismic interpretation and in the generation of geological models of the subsoil.

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
Capítulo 1. Resolución sísmica	11
1.1 Resolución sísmica vertical.....	11
1.2 Ancho de banda útil	14
1.3 La relevancia del incremento del ancho de banda útil en la resolución sísmica vertical.....	16
Capítulo 2. Métodos de manipulación espectral para el incremento del ancho de banda útil .	17
2.1 Deconvolución, filtro de Wiener y autocorrelación.....	17
2.2 Blanqueamiento espectral y balanceo espectral.....	20
2.3 Absorción.....	22
2.4 Relación matemática, física y numérica	23
2.4.1 Mínimos cuadrados	25
2.4.2 Mínimos cuadrados amortiguados	28
2.4.3 Balanceo espectral y blanqueamiento	32
Capítulo 3. Pruebas	39
3.1 Procesamiento 2D	39
3.2 Secuencia de procesamiento	42
3.3 Seismic Unix.....	44

3.4 Formato SEG-Y	45
3.5 Pruebas	46
3.5.1 Deconvolución y blanqueamiento espectral	47
3.5.2 Balanceo espectral	56
Capítulo 4. Análisis de resultados	59
CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS	65
APÉNDICES	66
APÉNDICE 1	66
APÉNDICE 2	69

INTRODUCCIÓN

La relevancia del procesamiento espectral en datos sísmicos de reflexión recae en el incremento del ancho de banda útil adecuado a los datos sísmicos que se estén procesando. Ese incremento se obtiene mediante métodos de procesamiento espectral actualmente conocidos: deconvolución, blanqueamiento espectral, balanceo espectral, factor de absorción y azulamiento espectral entre otros métodos. Un buen incremento o un incremento óptimo del ancho de banda útil se logra a través de un análisis detallado de la información: matemáticas, físicas, numéricas y sobre como se deben de ir sometiendo estos procesos en el orden adecuado. Por lo que, cualquier geocientífico, estudiante de geociencias, instructor o algún profesional de la práctica, puede realizar el incremento del ancho de banda útil estudiando y analizando el espectro de amplitud, obteniendo mejores resultados con base en sus criterios y sus conocimientos del área.

El incremento del ancho de banda útil posee grandes beneficios académicos para los estudiantes y recién egresados de las geociencias, así como beneficios técnicos debido a la necesidad que se tiene de mejorar la resolución vertical y beneficios económicos: i) obtención de una mejor interpretación geológica de la sección sísmica, ii) reducción de costos y riesgos de operación y iii) mejores controles de calidad.

En el sector de los hidrocarburos, en específico en el área de la exploración y extracción de aceite y gas, existe un gran interés en el incremento del ancho de banda útil, con el fin de aumentar la resolución sísmica vertical, en las actividades prácticas, de investigación y docencia afines al procesamiento y representación de datos sísmicos (modelado, migración, tomografía e inversión).

El objetivo general de este proyecto fue encontrar la relación matemática, física y numérica que existe entre los métodos de procesamiento espectral: deconvolución, blanqueamiento y balanceo espectral. Además, demostrar la relevancia del incremento del ancho de banda útil para mejorar la resolución sísmica vertical mediante algunos ejemplos tales como: apilados, espectros de amplitudes y pruebas de calidad. Así como contribuir a la Universidad y a los estudiantes con un documento que les sirva como guía debido a que no se cuenta con uno en el cual se encuentre dicha relación.

Para lograr lo anterior, se fijaron los siguientes objetivos particulares: a) analizar y estudiar la resolución de datos sísmicos de reflexión, así como la definición y los conceptos matemáticos del ancho de banda útil, b) estudiar los conceptos matemáticos, físicos y numéricos de los métodos de manipulación espectral: deconvolución, blanqueamiento y balanceo, para lograr encontrar la interrelación que estos guardan entre sí, que representan tareas realizadas en la industria del sector hidrocarburos, para demostrar la relevancia y los beneficios académicos, técnicos y económicos que se tienen al tener conocimientos claros sobre dichos métodos.

En el Capítulo 1, *Resolución sísmica*, describo las diferencias que existen entre la resolución sísmica vertical y horizontal, además de la adquisición y que parámetros afectan dicha resolución, así como explicar qué es el ancho de banda útil y la relevancia que este ancho de banda tiene en el procesamiento espectral. En el Capítulo 2, *Métodos de manipulación espectral para el incremento del ancho de banda útil*, describo la teoría de los métodos espectrales: deconvolución, blanqueamiento, balanceo espectral, absorción, filtro de Wiener y autocorrelación, posteriormente presento la relación matemática, física y numérica, partiendo de la convolución y utilizando los métodos numéricos de inversión: mínimos cuadrados y mínimos cuadrados amortiguados para poder establecer la relación

con el balanceo espectral. En el Capítulo 3, *Pruebas*, describo las pruebas realizadas a datos reales proporcionados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, mediante el procesamiento de datos sísmicos estableciendo un flujo de trabajo con pruebas de calidad que se aplican en la sismología de exploración en el área de producción. En el Capítulo 4, *Análisis de los Resultados*, presento un análisis de los resultados obtenidos en el Capítulo 3. Posteriormente se encuentran las conclusiones. Y, al final del documento incluyo dos apéndices.

CAPÍTULO 1

RESOLUCIÓN SÍSMICA

1.1 RESOLUCIÓN SÍSMICA VERTICAL

La baja resolución sísmica es uno de los problemas que cotidianamente se enfrentan en la industria sísmica. Existen dos tipos de resolución sísmica: vertical y horizontal, ambas resoluciones dependen del ancho de banda (Yilmaz,1987.), el parámetro para incrementar la resolución vertical es la longitud de onda dominante, que es el cociente de la velocidad de la onda entre la frecuencia dominante (Yilmaz, 1987.). Y, para incrementar la resolución horizontal el parámetro que se utiliza es la zona de Fresnel, que es un área circular de un reflector cuyo tamaño depende de la profundidad del reflector, la velocidad sobre el reflector y la frecuencia dominante (Yilmaz, 1987.). En este proyecto se analizará solo la resolución sísmica vertical ya que se realizarán exclusivamente los estudios en el espectro de las frecuencias y las velocidades, distinguiendo estructuras geológicas una de otras, difracciones, fallas, anticlinales o sinclinales. Las características de la resolución sísmica vertical dependerán de nuestros objetivos específicos o las características a detalle que se quieran observar.

De manera que, la resolución vertical se encuentra dado por la ecuación $\lambda = \frac{V}{f}$ que es el cociente de la velocidad de la onda entre la frecuencia dominante, donde la λ se le conoce como longitud de onda dominante a profundidad (Nanda, 2016). La velocidad de las ondas en la superficie oscila entre los valores de 2000 y 5000 [m/s] y generalmente incrementa conforme a la profundidad. Por otra parte,

la frecuencia dominante de señales sísmicas típicas se encuentra en rangos de 20 y 50 [Hz] y decrece conforme a la profundidad (Nanda, 2016), por lo que se puede inferir que para obtener una mejor resolución sísmica vertical se deben tener longitudes de ondas cortas y altas frecuencias.

Además, la resolución sísmica vertical se encuentra afectada por los parámetros de adquisición que varían de acuerdo al área de interés, así como las condiciones superficiales y del subsuelo, ya que la Tierra funciona como un filtro natural se deben considerar ciertos parámetros para obtener una mejor adquisición de la información sísmica. Dichos parámetros se establecen al tratar de obtener el mejor resultado a un menor costo. Los parámetros de diseño son factores que influyen en la calidad de los datos sísmicos adquiridos en campo y dependiendo de los objetivos del proyecto.

Los parámetros de diseño ideales para cualquier adquisición dependen de las consideraciones básicas y de los resultados de las pruebas hechas:

- Tipo de fuente a usar: explosivos (cantidad de carga, profundidad y numero de pozos) o vibros (número de barridos, tiempo entre barridos, etc.).
- La profundidad del pozo depende del espesor de la capa intemperizada.
- Diseño del tendido: lateral o bilateral, simétrico o asimétrico.
- Diseño existente entre Tiro-Tiro (proporcionar el cubrimiento), Receptor-Receptor (proporciona resolución espacial), Tiro-Receptor (cobertura), Tiro-primer receptor (offset mínimo), Tiro-ultimo receptor (offset máximo).
- Intervalo de muestreo.

Los objetivos de exploración para reservas petroleras a menudo son delgados y requieren una resolución vertical mejorada para un mapeo adecuado (Nanda, 2016). La resolución puede mejorarse durante la adquisición al desplegar una ondícula, como lo es una fuente de energía sísmica (dinamita) y al grabar con intervalos de muestreo más pequeños (temporales, ~ 2 ms) (Nanda, 2016); a demás para el incremento de la resolución sísmica vertical se tiene diferentes métodos de procesamiento espectral que ayudan a incrementar la resolución, como lo es la ondícula de fase cero y la deconvolución, suprimiendo los múltiples mediante la compresión de la ondícula aumentando el ancho de banda útil (Nanda, N,2016).

1.2 ANCHO DE BANDA ÚTIL

Es un tema de mucha relevancia al momento de realizar el procesamiento de datos sísmicos, ya que muchas veces este se encuentra limitado por la adquisición de los datos y la absorción de la Tierra, lo que se busca es realizar un incremento de este rango, por lo que el ancho de banda útil es el rango de frecuencias donde el espectro es horizontalmente plano.

El ancho de banda útil se puede calcular tomando como base una línea horizontal que pase por el promedio del espectro de amplitudes, que en escala logarítmica corresponde a 6 dB, es decir la mitad de nuestra amplitud máxima (e.g $20 \log_{10} 0.5$) (Simm,2014).

El ancho de banda se mide en Hz y es un rango de contenido frecuencial de una señal o un rango de frecuencias muestreado por un sistema (Yilmaz, 1987). Para sísmica convencional en la exploración petrolera el rango de frecuencias puede variar, desde los 0 hasta los 70 Hz o por el equipo con el que se estén registrando los datos sísmicos y la fuente (Yilmaz, 1987).

En este proyecto, el área de interés es la exploración de hidrocarburos, para el cual profundizaremos en su estudio. En este ámbito se utilizan bajas frecuencias que se asocian a estructuras geológicas que puedan contener gas/aceite. Estas bajas frecuencias se encuentran relacionadas directamente a la profundidad a la que se encuentra realizado el estudio. Las frecuencias que se utilizan para detectar hidrocarburos tanto en la zona marina como en la terrestre oscilan en un rango de frecuencias de 3 – 100 [Hz], a este rango en la industria petrolera se le conoce como el ancho de banda útil. No obstante, estas frecuencias pueden variar y como se ha mencionado lo que se busca es incrementar ese ancho de banda de frecuencias para obtener una mejor resolución sísmica vertical, mejorando la estimación de espesor para capas delgadas y la supresión de ruido. También, el ancho de banda se ve afectado

por la energía de la traza sísmica, es decir por la amplitud y la fase con la cual se adquirieron los datos sísmicos. Es deseable tener nuestro espectro de frecuencias en fase cero ya que nuestra mayor amplitud se encuentra centrada en el cero. Además, es preciso señalar que este ancho de banda cuenta con ruido coherente (Ground roll y onda directa) y ruido aleatorio (ruido impulsivo) (Yilmaz, 1987). Al incrementar el ancho de banda de la señal, también se incrementa el ruido siendo necesario aplicar métodos de procesamiento espectral para mejorar esta, como lo es la deconvolución, balanceo espectral y el blanqueamiento de datos sísmicos.

1.3 LA RELEVANCIA DEL INCREMENTO DEL ANCHO DE BANDA ÚTIL EN LA RESOLUCIÓN SÍSMICA VERTICAL

Desde la perspectiva de los hidrocarburos, el incremento del ancho de banda útil para obtener una mejor resolución sísmica vertical, es uno de los desafíos que se enfrentan día a día en la industria petrolera. Ya que, al tener una mejor una resolución vertical de la información sísmica, se agilizan flujos de trabajo y para el intérprete es más fácil llegar a conclusiones relacionadas a estructuras geológicas de interés, como lo son: anticlinales, fallas, canales etc. Además se tienen ventajas como:

- 1) Obtención de una mejor interpretación de la sección sísmica: detección de canales y la estratigrafía de la zona. Detectando trampas estratigráficas donde puede existir la acumulación de gas/aceite.

- 2) Reducción de costos y riesgos de operación: maximiza la certeza antes de la perforación de un pozo.

- 3) Mejor control de calidad: Se puede comparar con resultados previos a la deconvolución, blanqueamiento espectral y balanceo espectral, examinando y estudiando con mayor detalle el apilado final.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE MANIPULACIÓN ESPECTRAL PARA EL INCREMENTO DEL ANCHO DE BANDA ÚTIL

2.1 DECONVOLUCIÓN, FILTRO DE WIENER y AUTOCORRELACIÓN

La deconvolución consiste en convolucionar una traza con un filtro inverso, es decir, una ondícula básica inversa se convoluciona con cada traza y se obtiene la compresión de las señales, por el principio de superposición (Elliot, 1987). El objetivo principal de la deconvolución es la compresión de las componentes de una ondícula y la eliminación de los múltiples, dejando sólo la reflectividad de la tierra en la traza sísmica con la finalidad de aumentar la resolución temporal.

FILTRO DE WIENER

Wiener Predictive Error Filtering o Statistical Deconvolution: Se considera que el filtro es capaz de convertir una entrada en una salida deseada, considerando el error de los mínimos cuadrados como el método de solución más adecuado. Se le conoce como el filtro de los mínimos cuadrados o filtro de Wiener, en algunas ocasiones también se le conoce como filtro óptimo (Robinson, 2003)

Deconvolución predictiva: Su objetivo es eliminar los múltiples, los cuales pueden predecirse, si se conoce el tiempo de llegada de las reflexiones primarias. A menudo los reflectores empiezan a ejercer efecto hasta después de un intervalo de tiempo L (intervalo de predicción), el cual es el tiempo de viaje de ida y vuelta al primer reflector generador de múltiples (Robinson, 2003)

AUTOCORELACIÓN

El filtro inverso de los mínimos cuadrados se diseña a partir de valores obtenidos de la autocorrelación. El pico central de la función de autocorrelación representa cambios de menos de la mitad del periodo dominante y contiene la mayor parte de la información acerca de la forma de la ondícula promedio. Por otra parte, los picos y los retrasos más grandes representan repetición de información producida por múltiples (Robinson, 2003)

Cuando se realiza el gráfico de una traza autocorrelacionada se obtiene el autocorrelograma con la finalidad de obtener la longitud del operador que abarca desde el inicio del autocorrelograma al segundo cero de la ondícula y la distancia predictiva, valor aproximado a la longitud del sistema de ondículas. En un conjunto de datos sísmicos, el autocorrelograma para estimar la forma de la onda, se obtiene autocorrelacionando las trazas apiladas.

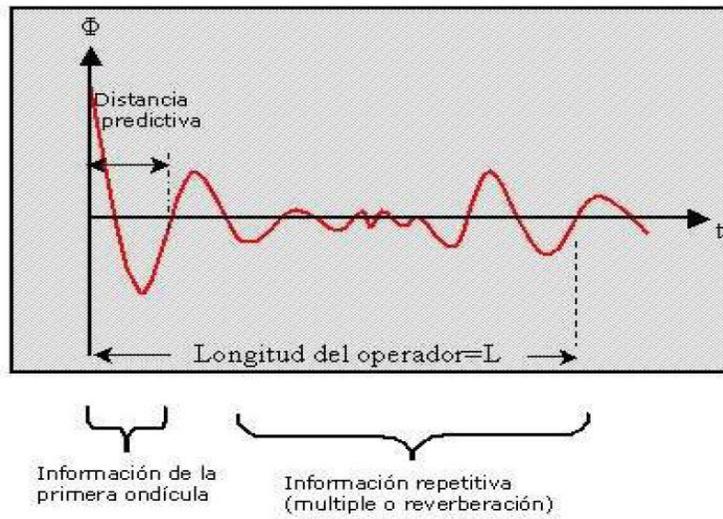


Figura 1. Autocorrelograma de una traza autocorrelacionada.

2.2 BLANQUEAMIENTO ESPECTRAL Y BALANCEO ESPECTRAL

BLANQUEAMIENTO ESPECTRAL

El objetivo principal del Blanqueamiento espectral es impulsar el equilibrio de frecuencias para obtener una resolución sísmica perfecta. El incremento se realiza tanto en las bajas frecuencias como en las altas frecuencias, además de incrementar también el ruido, para obtener un espectro más plano. Al blanqueamiento espectral también se le conoce como nivel de agua, debido a que es un simple reforzamiento en la diagonal principal de los datos de entrada, el valor que se utiliza para reforzar la diagonal principal se le conoce como parámetro de pre-blanqueamiento (σ^2), realizando un cambio de nivel en el espectro en todas las amplitudes aumentando un valor constante.

BALANCEO ESPECTRAL

El balanceo espectral es un método de procesamiento espectral sobre el apilado el cual nos ayuda a incrementar el ancho de banda útil, a partir del incremento de la energía de nuestro espectro. Si los datos de entrada están espectralmente balanceados o si su ancho de banda de frecuencia se extiende, los volúmenes resultantes podrían conducir a una resolución vertical y lateral más alta, teniendo como resultado un espectro de amplitud más plano. Para este método, los datos se descomponen en sus componentes espectrales de frecuencia-tiempo. La energía de la magnitud del espectro (amplitudes), $P(t, f) = m(t, f)^2$, dada cierta ventana de tiempo dentro de un volumen de datos sísmicos se produce un espectro de amplitud de potencia promedio dado por $P_{avg}(t, f)$, que es el promedio de todas las

trazas sísmicas, en esa ventana. A demás para este método también se calcula la potencia pico del promedio de la energía del espectro de amplitudes $P_{peak}(t)$.

Tanto el promedio de la magnitud espectral como la potencia pico promedio de la energía del espectro se utilizan para diseñar un único operador de equilibrio espectral variable en el tiempo, que se aplica a cada traza de los datos sísmicos:

$$m_j^{bal}(t, f) = \left[\frac{P_{peak}(t)}{P_{avg}(t, f) + \varepsilon P_{peak}(t)} \right]^{\frac{1}{2}} m_j(t, f) \quad (1A)$$

Tomada de la guía AASPI 2015, Computing Spectral Components Complex Matching Pursuit, página 7". **Ecuación (1A)**

Donde ε , es el parámetro de pre-blanqueo (también se le conoce como σ^2).

A demás el balanceo espectral nos ayuda a detectar con mayor precisión la ubicación de canales, discontinuidades y fracturas en los apilados finales.

2.3 ABSORCIÓN

El factor de absorción también conocido como factor de atenuación es una magnitud adimensional conocida el cual es inversamente proporcional al factor de calidad Q . Este factor se encuentra relacionado altamente con las propiedades físicas de la roca, donde Q es la relación que existe entre la energía almacenada de la roca y la energía dispersa, por lo que el factor Q aumenta cuando la densidad y la velocidad aumentan también. Se tiene como dato que el factor Q para la corteza terrestre y el manto tiene un rango entre 10 a 1000.

Cuando el factor Q es dependiente de la frecuencia que es el caso para los datos sísmicos de reflexión y teniendo en cuenta que la tierra funciona como un filtro pasa bajas, a medida que incrementa la profundidad de la propagación de la onda a través de la Tierra, la señal sísmica va perdiendo energía. Para bajas frecuencias de hasta 1.0 Hz, el factor Q es independiente de las frecuencias, pero para frecuencias mayores a 1 Hz el factor Q se vuelve dependiente de las frecuencias y normalmente este factor disminuye conforme aumentan las frecuencias. Como resultado las altas frecuencias decaen muy rápidamente creando un ensanchamiento del pulso. En la Tierra se observa que el factor Q para las ondas P es mas grande que para las ondas S. Esto se debe al hecho de que la atenuación intrínseca es causada predominantemente por el movimiento de cizallamiento involucrado entre los límites de las partículas del grano de la roca, causando un mayor calentamiento por fricción.

Por lo que, para la sísmica de reflexión, encontrar un valor adecuado del factor de atenuación Q es de alta relevancia ya que este factor, hace que el espectro hacia las altas frecuencias se aplane. Además, se debe tener mucho cuidado al escoger dicho factor, ya que los datos se pueden forzar demasiado, obteniendo graves implicaciones, como lo es en el caso para datos reales, ya que pueden asemejarse a sismogramas sintéticos creando una alta incertidumbre para continuar con el procesamiento.

2.4 RELACIÓN MATEMÁTICA, FÍSICA Y NUMÉRICA

La relación matemática, física y numérica que existe entre los métodos de manipulación espectral, parte de la definición de la ecuación lineal de la convolución:

$$y(n) = A(n) * h(n) \quad (1)$$

Donde: $y(n)$ es una señal, $A(n)$ es una matriz que contiene nuestros datos de reflexión sísmica y $h(n)$ es un filtro.

Para poder relacionar los conceptos matemáticos de la convolución con la resolución de sistemas de ecuaciones lineales es necesario someter la convolución a su proceso inverso que es la deconvolución, este proceso se puede realizar mediante el método de mínimos cuadrados y mínimos cuadrados amortiguados, para lo que es necesario proponer la ecuación (2)

$$z(n) = y(n) + v(n) \quad (2)$$

Donde: “z” es un vector columna de datos de salida (deconvolución), “y” es nuestra convolución, “v” es un vector columna de ruido

Si se sustituye la ecuación (2) en (1) y se resuelve, tenemos que:

$$z = Ah + v \quad (3)$$

Donde “z” es un vector columna de datos de salida, “A” es una matriz de datos de entrada, “h” es un vector columna, “v” es un vector de ruidos

Por la definición de lo anterior la ecuación 3 puede expresarse en forma de vectores y columnas queda como:

$$\begin{bmatrix} z(0) \\ z(1) \\ z(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) & 0 & 0 \\ x(1) & x(0) & 0 \\ x(2) & x(1) & x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ h(2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(0) \\ v(1) \\ v(2) \end{bmatrix}$$

2.4.1 MÍNIMOS CUADRADOS

Al llegar a la ecuación 3, expresada en forma de vectores y columnas se puede comenzar con la solución por el método de mínimos cuadrados.

Por lo que $z = Ah + v$, es:

$$z_{zx1} = A_{zxh} h_{hx1} + V_{zx1} \quad (4).$$

Se parte del error de los mínimos cuadrados para la solución de una ecuación lineal:

$$e = d - d^{est} \quad (5).$$

Se despeja el vector de ruidos, que es el ruido que se desea minimizar mediante un filtro óptimo y adecuado a nuestros datos de reflexión:

$$v = z - Ah \quad (6).$$

La ecuación (6) se puede reescribir como la ecuación (5), ya que se busca encontrar un vector de ruido blanco óptimo que se adapte a nuestros datos de reflexión:

$$e = z - Ah \quad (7).$$

La ecuación (7), nos dice que el error es nulo o mínimo cuando Z es normal a Ah .

Por definición del error E y sustituyendo en la ecuación (7) en la ecuación (8) tenemos que:

$$E = e^T e \quad (8).$$

$$E = (z - Ah)^T (z - Ah) \quad (9).$$

Realizando el producto de la ecuación (9)

$$E = z^T z - z^T Ah - h^T A^T z + h^T A^T Ah \quad (10).$$

Se deriva la ecuación (10) con respecto h , ya que se desea encontrar el filtro optimo que se adecue a nuestros datos tenemos que:

$$\frac{\partial E}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h} [z^T z - z^T Ah - h^T A^T z + h^T A^T Ah] \quad (11).$$

El resultado de la derivada es:

$$\frac{\partial E}{\partial h} = -2A^T z + 2A^T Ah \quad (12).$$

Se iguala a cero la ecuación (12), debido a que se requiere que el resultado obtenido, tenga un error mínimo:

$$\frac{\partial E}{\partial h} = 0 \quad (13).$$

Sustituyendo la ecuación (13) en la ecuación (12) se obtiene:

$$-A^T z + A^T A h = 0 \quad (14).$$

Despejando los parámetros h , que son los parámetros o los valores de nuestro resultado de nuestro filtro óptimo:

$$h = (A^T A)^{-1} A^T z \quad (15).$$

Donde: \mathbf{z} = Salida de los datos; \mathbf{A} = Datos de entrada; \mathbf{h} = filtro; \mathbf{V} = ruido

Como se observa se llega a una ecuación la cual se encuentra una matriz cuadrada ($A^T A$) a dicha matriz se realizará su inversa para llegar a la solución de los mínimos cuadrados.

Esta matriz presenta un problema ya que si el producto de la matriz $A^T A$ es de fase de secuencia no mínima (los valores que conforman dicha matriz la mayoría son “0”) y será una matriz rectangular (Elliot, 1987).

Es decir, nuestra matriz se volverá una matriz singular por lo que no se podrá obtener su inversa y por lo tanto no podremos obtener una solución a nuestro sistema de ecuaciones, a este problema se le conoce también como una matriz mal condicionada.

2.4.2 MÍNIMOS CUADRADOS AMORTIGUADOS

Debido al problema de que nuestra matriz puede convertirse en una matriz singular y esta se encuentre mal condicionada, un amortiguamiento en la diagonal principal de la matriz es un paso matemático necesario al que se tiene que someter para solucionar este problema.

Por lo que el método de mínimos cuadrados ahora se convierte o es conveniente trabajar con mínimos cuadrados amortiguados (Elliot, 1987).

Se parte de la definición de mínimos cuadrados amortiguados, donde L es la definición de la norma

L_2 :

$$\Phi = E + \sigma^2 L \quad (16).$$

Se retoma la ecuación (5) de los mínimos cuadrados y se sustituye en la ecuación (16) obteniéndose:

$$\Phi = e^T e + \sigma^2 L \quad (17).$$

El valor de L según de la definición y aplicándolo a nuestra función es:

$$L = h^T h \quad (18).$$

Sustituyendo las ecuaciones (7) y (18) en (17), se tiene que:

$$\Phi = (z - Ah)^T (z - Ah) + \sigma^2 (h^T h) \quad (19).$$

Realizando el producto de la ecuación (19) se obtiene:

$$\phi = z^T z - z^T A h - h^T A^T z + h^T A^T A h + \sigma^2 h^T h \quad (19).$$

Se deriva la ecuación (19) con respecto h :

$$\frac{\partial \phi}{\partial h} = \frac{\partial \phi}{\partial h} (z^T z - z^T A h - h^T A^T z + h^T A^T A h + \sigma^2 h^T h) \quad (20).$$

El resultado de la derivada es:

$$\frac{\partial \phi}{\partial h} = -2A^T z + 2A^T A h + 2\sigma^2 h \quad (21).$$

Se iguala la ecuación (21) a cero, para obtener el error mínimo y se tiene que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial h} = 0 \quad (22).$$

Sustituyendo la ecuación (21) en (22) y se obtiene:

$$-A^T z + A^T A h + \sigma^2 h = 0 \quad (23).$$

Despejando la ecuación (23) y separando en términos semejantes se obtiene:

$$A^T A h + \sigma^2 h = A^T z \quad (24).$$

$$h(A^T A + \sigma^2 I) = A^T z \quad (25).$$

Por lo que la ecuación final, para un filtro óptimo o adecuado a nuestros datos es:

$$h = (A^T A + \sigma^2 I)^{-1} A^T z \quad (26).$$

Resolviendo y aplicando las mismas propiedades de los mínimos cuadrados a los mínimos cuadrados amortiguados, tenemos que la solución por mínimos cuadrados amortiguados es:

$$h = (A^T A + \sigma^2 I)^{-1} A^T z \quad (27).$$

EIGEN-VALORES Y POLINOMIO CARACTERÍSTICO

Como podemos observar en la ecuación (27) σ^2 es el amortiguamiento que recibe nuestra matriz cuadrada $A^T A$ en la diagonal principal (reforzamiento) para evitar que se vuelva singular.

El valor que debe tener σ^2 surge a partir de los conceptos y definiciones de eigen-valores y polinomio característico. Esto quiere decir que a nuestra matriz cuadrada de datos de entrada $A^T A$ se le realiza un reforzamiento en la diagonal principal, de esta matriz se puede obtener un polinomio característico.

Cuando se obtiene el polinomio característico de la matriz $A^T A$, su solución nos dará como resultado los eigen-valores, de los cuales se escogerá un λ_{max} y λ_{min} , estas constantes nos ayudarán a obtener un valor óptimo de σ^2 , el cual se determina realizando una simple diferencia entre $\lambda_{max} - \lambda_{min} = \sigma^2$, al escoger un valor óptimo de σ^2 , hablamos de dos temas: balanceo espectral y blanqueamiento espectral o nivel de agua (Elliot, 1987).

2.4.3 BALANCEO ESPECTRAL Y BLANQUEAMIENTO ESPECTRAL

BLANQUEAMIENTO ESPECTRAL O NIVEL DE AGUA

Cuando escogemos un σ^2 óptimo no solo estamos hablando de balanceo espectral, sino al mismo tiempo hablamos de algo que se llama nivel de agua o blanqueamiento espectral (Elliot, 1987). El blanqueamiento espectral es un incremento de las amplitudes en el espectro de las frecuencias, es decir incrementamos nuestro espectro a partir del valor encontrado σ^2 (reforzamiento en la diagonal principal de la matriz), mediante los eigen valores $(\lambda_{max} - \lambda_{min})$, que se obtuvieron a partir de la solución de las ecuaciones normales (Elliot, 1987).

Este incremento en el espectro se realiza a todo nuestro ancho de banda y funciona como un ecualizador, ya que al incrementa las bajas y las altas frecuencias hasta llevarlas a valores diferentes de cero o cercanas a cero. El reforzamiento en la diagonal principal de la matriz para nuestra ecuación 3, queda expresado como:

$$\begin{matrix} z(0) \\ z(1) \\ z(2) \end{matrix} = \begin{bmatrix} x(0) - \sigma^2 & 0 & 0 \\ x(1) & x(0) - \sigma^2 & 0 \\ x(2) & x(1) & x(0) - \sigma^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ h(2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(0) \\ v(1) \\ v(2) \end{bmatrix}$$

Por lo que al vector columna se le denomina como blanqueamiento espectral o nivel de agua.

La figura 2 se muestra el blanqueamiento espectral de una señal sísmica de reflexión, aumentando las amplitudes y evitando la división por cero con un reforzamiento en la diagonal principal de la matriz de datos con un valor σ^2 óptimo y adecuado a nuestros datos.

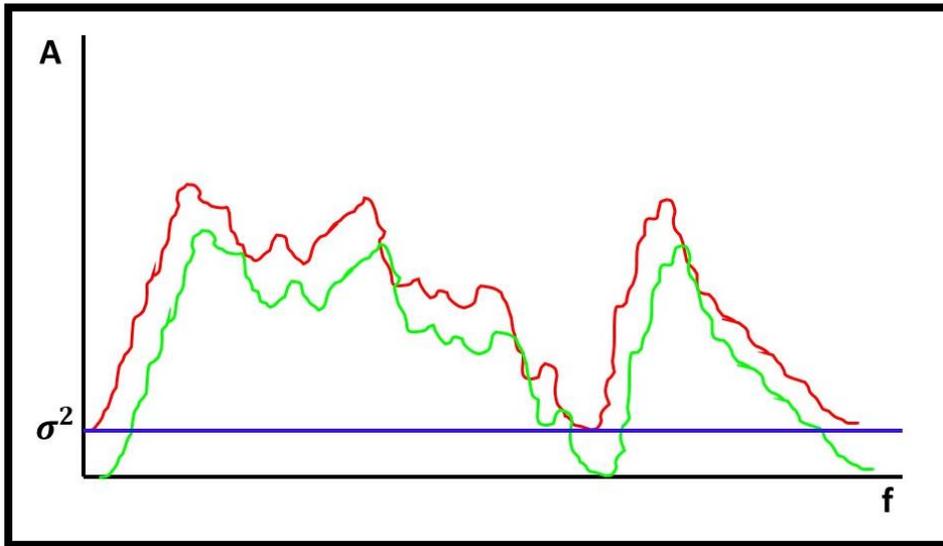


Figura 2. En color verde se tiene la señal sísmica, con valores en cero o cercanos a cero, y en color rojo se tiene la señal sísmica con el blanqueamiento espectral.

BALANCEO ESPECTRAL

El balanceo espectral se puede definir a partir del teorema de Parseval, ecuación (28). El teorema de Parseval nos dice que la potencia promedio de las señales es la suma de sus componentes espectrales al cuadrado, esto se puede expresar mediante la serie discreta de Fourier, ecuación (15).

$$P_j = a_j^2(t, f) \quad (28)$$

Ecuación (28), tomada de la guía AASPI 2015, Computing Spectral Components

Complex Matching Pursuit, página 7.

$$P_{avg} = \frac{1}{J(2K+1)} \sum_{k=-K}^K \sum_{j=1}^J P(t + k\Delta t, f) \quad (29)$$

Ecuación (29), “tomada de la guía AASPI 2015, Computing Spectral Components

Complex Matching Pursuit, página 7”.

Donde, K son las muestras, 2k+1 es una ventana simétrica que va de -k a k, en el cual se encuentran nuestras muestras y J son las trazas sísmicas.

Al hablar del teorema de Parseval y de la suma de sus componentes espectrales, estamos hablando de la energía del espectro (amplitudes) por lo que podemos trabajar con potencias promedio (P_{avg}) y potencias pico ($P_{peak}(t)$), al igual que el blanqueamiento lo que se busca es incrementar esta energía, para poder obtener una mejor resolución sísmica y visualizar mejor la semblanza. Continuando con las expresiones matemáticas del balanceo espectral tenemos la ecuación de la potencia pico que se define como:

$$P_{peak}(t) = MAX_f [P_{avg}(t, f)] \quad (30)$$

Ecuación (30), “tomada de la guía AASPI 2015, Computing Spectral Components

Complex Matching Pursuit, página 7”.

De modo que la potencia pico es el promedio de la potencia mayor para cada una de nuestras trazas sísmicas que existen en una ventana. Cuando ya se tienen todas las potencias pico (por ventana) se realiza un promedio y este se redondea al valor entero más cercano hacia abajo. Por lo que la principal diferencia entre Balanceo espectral y Blanqueamiento espectral, es que el Balanceo espectral realiza un incremento de las frecuencias por ventanas, por lo que para cada ventana existe un σ^2 diferente. Cada ventana se acota en un cierto intervalo de frecuencias (f_1 - f_2 , hasta f_n) y sobre este intervalo se realiza el incremento.

En la figura 3 se puede resumir las ecuaciones (29) y (30), donde se tienen las ventanas (seccionadas con la línea azul) en las que se realiza la “ecualización” de la señal sísmica, tomando en cuenta los valores máximos de las amplitudes de cada ventana (puntos de color rojo) y sobre dicho valor máximo se realiza un incremento sobre todas las amplitudes, este proceso se realiza para cada ventana.

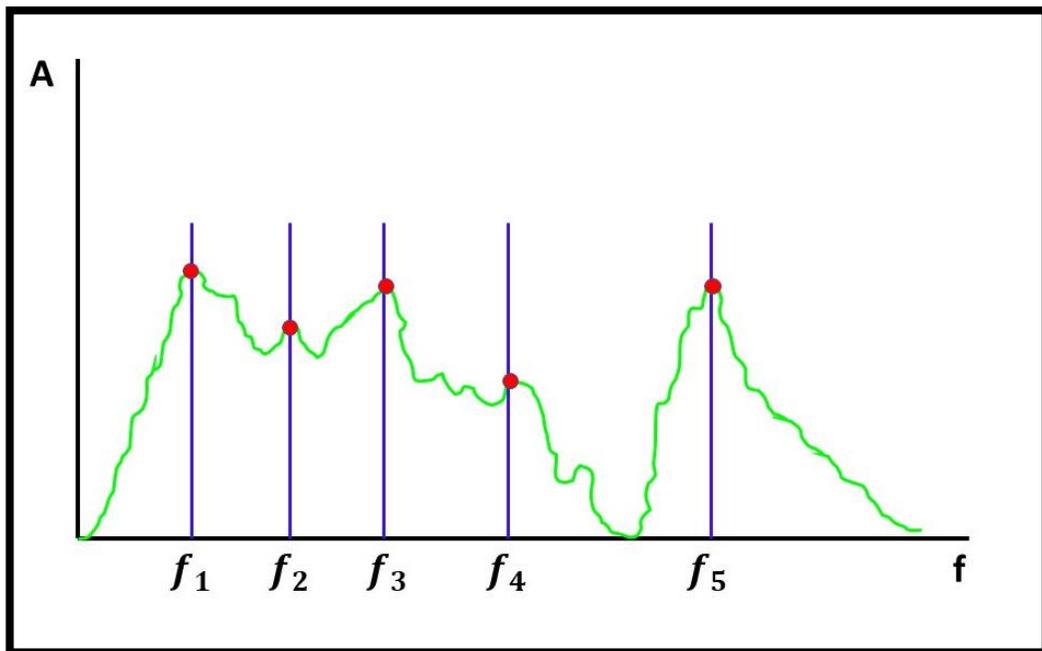


Figura 3. Balanceo espectral de una señal sísmica ideal, con diferentes frecuencias de corte.

El balanceo espectral se aplica con la siguiente formula:

$$m_j^{bal}(t, f) = \left[\frac{P_{peak}(t)}{P_{avg}(t, f) + \varepsilon P_{peak}(t)} \right]^{\frac{1}{2}} m_j(t, f) \quad (31)$$

Ecuación (31), “tomada de la guía AASPI 2015, Computing Spectral Components

Complex Matching Pursuit, página 7”.

$m_j(t, f)$: Es el vector donde se encuentran los datos en tiempo y frecuencia a balancear

ε : Es el amortiguamiento o parametro de pre – blanqueo

En la figura 4 se observa el resultado final esperado de manera ideal del balanceo espectral (color rojo), con un espectro totalmente plano, incrementando las altas frecuencias y el valor de las amplitudes de una manera uniforme. Con datos reales lo que se esperaría obtener es un espectro plano con un decaimiento gradual hacia las altas frecuencias.

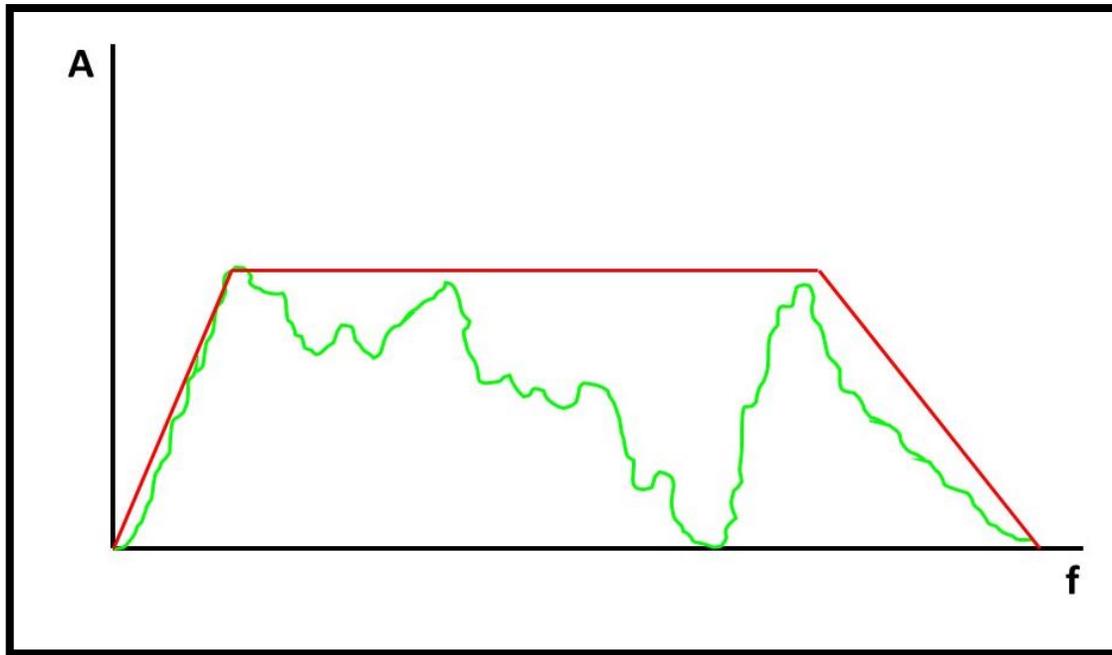
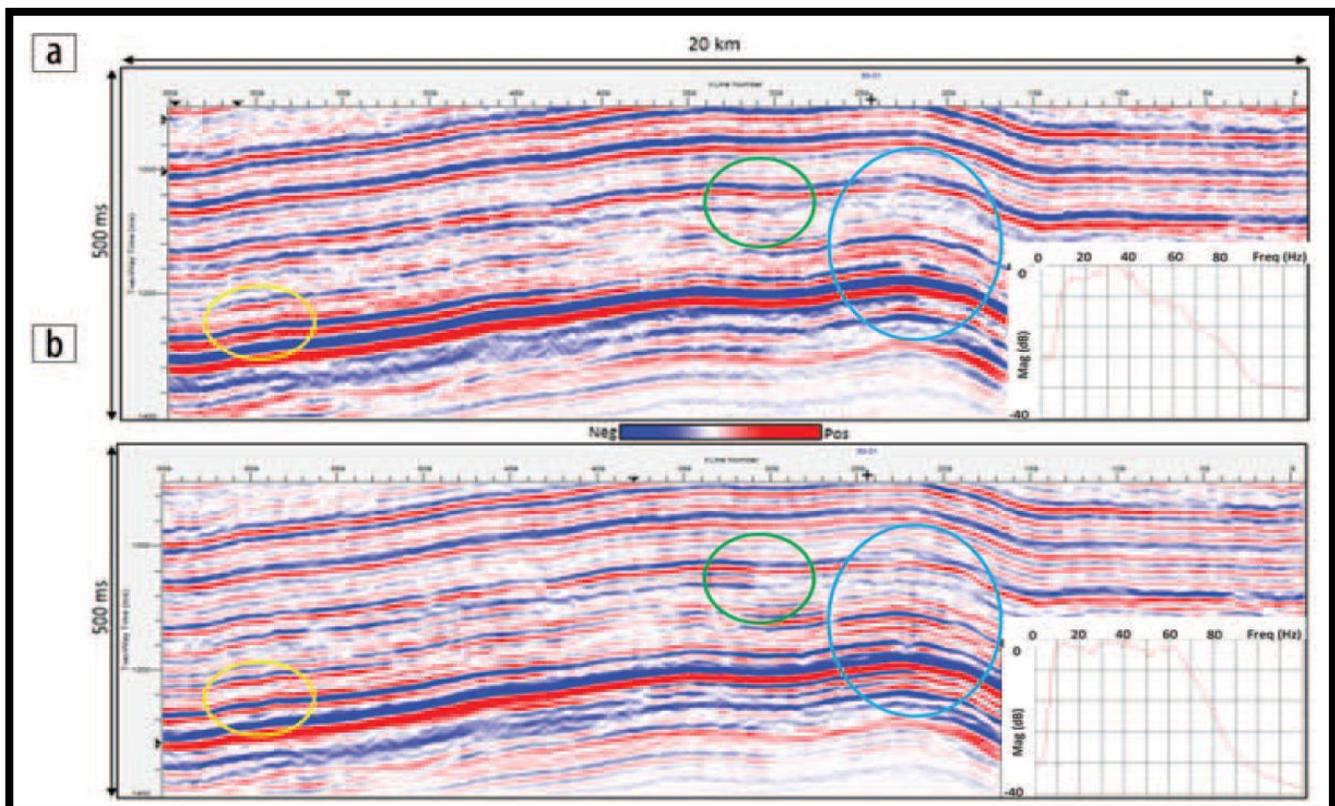


Figura 4. Comparación antes (verde) y después (rojo) del balanceo espectral.

La figura 5 el panel (a) nos muestra el apilado final antes del balanceo espectral, en un rango de frecuencias de 0 [Hz] hasta los 80 [Hz], señalando las partes mas importantes o las que se tienen



incertidumbre en círculos: posibles canales, resolución vertical y esquinas poco claras, además a partir de los 45 [Hz], existe un decaimiento abrupto en la señal. Para el panel (b), después de someter los datos sísmicos al procesamiento del balanceo espectral con intervalos de 5 [Hz] en un rango de frecuencias de los 5 [Hz] hasta los 120 [Hz] y con un valor de pre-blaqueamiento $\sigma^2 = 0.04$, el canal pequeño (círculo amarillo) y las esquinas (círculo verde) así como la resolución vertical (elipse azul), han mejorado mostrando un contenido de frecuencias altas además se tiene un espectro más plano hacia dichas frecuencias.

Figura 5. Comparación de apilados antes y después del balanceo espectral. “Figura tomada de (Chopra S., y K.J. Marfurt, 2016, página 176)”

CAPÍTULO 3

PRUEBAS

3.1 PROCESAMIENTO 2D

El procesamiento de datos sísmicos, tiene como objetivo fundamental la obtención de secciones sísmicas de calidad, para cumplir este objetivo se debe extraer la señal útil (ancho de banda útil) y aumentar la relación de señal-ruido. Para posteriormente obtener un análisis objetivo para facilitar flujos de trabajo en interpretación sísmica y en la generación de modelos geológicos del subsuelo.

Las principales etapas del procesamiento para aumentar/incrementar la relación señal-ruido: la deconvolución, el apilamiento y la migración, lo anterior se puede representar con una caja (Yilmaz, 1987.) a como se muestra en la figura 6. Estas etapas del procesamiento son indispensables para la obtención de secciones sísmicas que ayudarán a una mejor interpretación sísmica.

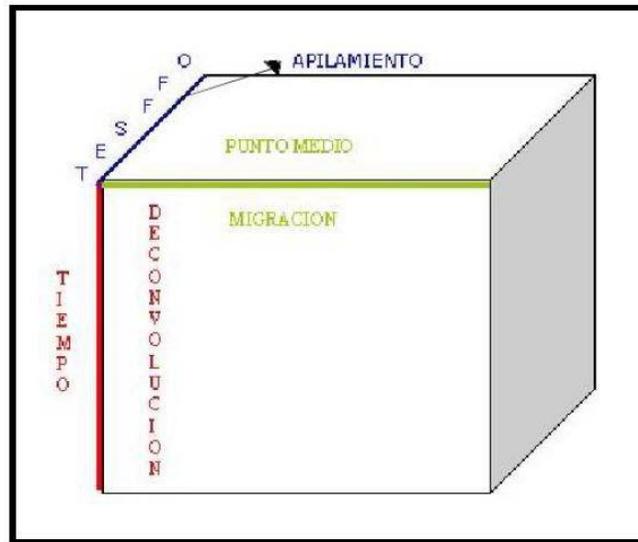


Figura 6: Representación de un volumen de datos sísmicos (Yilmaz, 1987.), si sigue la convención de un sistema coordinado convencional: el eje Z está representado por el tiempo la deconvolución, en el eje Y se encuentra la migración y en el eje X el apilamiento.

La deconvolución es uno de las etapas más importantes de todo el procesamiento sísmico. En la figura 6, la deconvolución actúa a lo largo del eje tiempo y logra incrementar la resolución de las trazas sísmica, realizando una compresión de la ondícula.

En el volumen de datos sísmicos de la figura 7, se realiza una reducción a un plano de punto medio – offset cero es decir la cara superior de la caja. Antes de realizar el apilado se debe aplicar la corrección dinámica NMO (Normal Moveout por sus siglas en ingles), a las trazas sísmicas de cada *Gather CDP*.

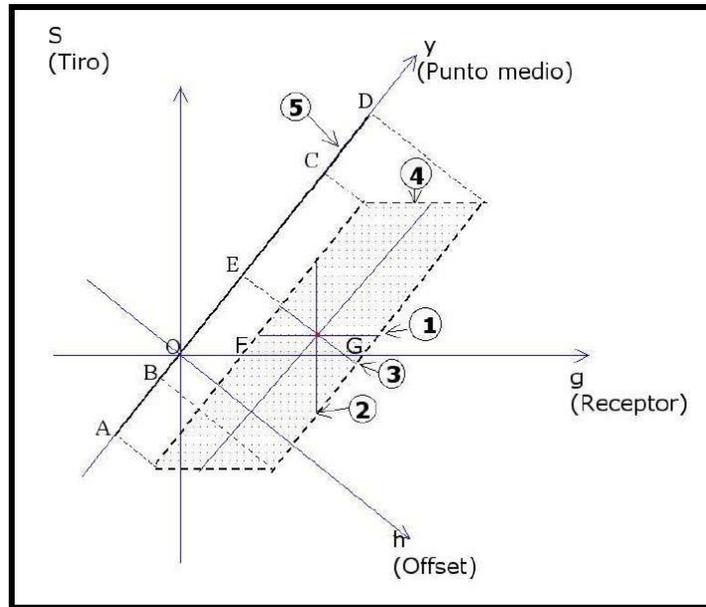
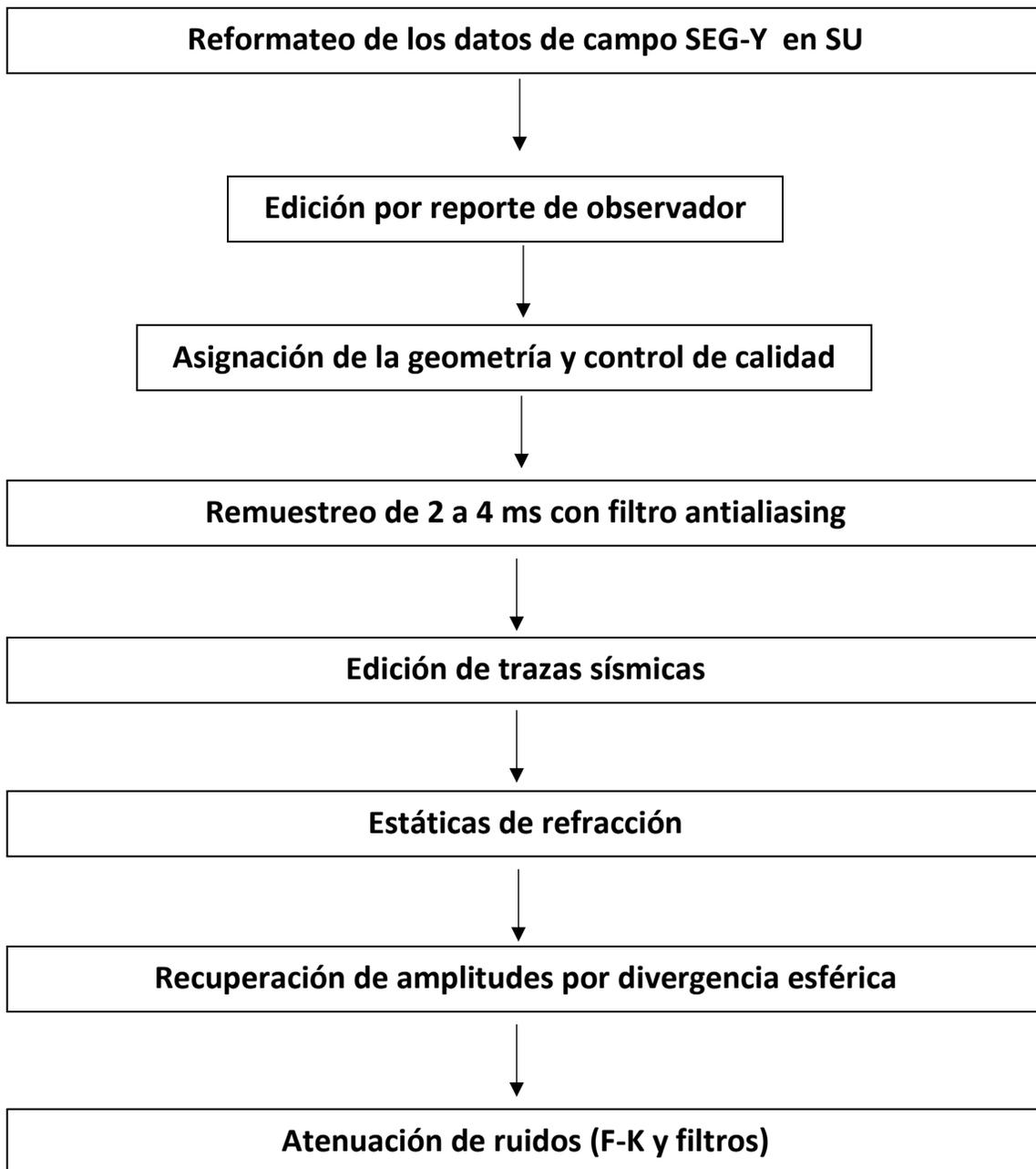


Figura 7. Grafico hipotético de un apilamiento (modificado de Claerbout 1976), en el gráfico se puede observar una traza con el eje del tiempo perpendicular con respecto del plano : la superposición de coordenadas Tiros-Receptores (s,g) y Puntos medio – Offsets (y,h), el plano (y,h), se ha rotado 45° con respecto del plano (s,g) y los puntos en el área, representa la cobertura usada en el perfil de los registros sísmicos a lo largo de los puntos medios del eje (Oy).

Por último, tenemos la migración que es un proceso que consiste en mover los eventos a su posición verdadera colapsando las difracciones. Para migrar las secciones apiladas se usa la velocidad del medio, la migración esta fuera del alcance de este proyecto.

3.2 SECUENCIA DE PROCESAMIENTO

La secuencia de procesamiento básico en tiempo, se utilizó Seismic Unix para realizar el procesamiento de los datos. Estos datos se utilizaron como datos de entrada para mi trabajo (Cureño, 2009).



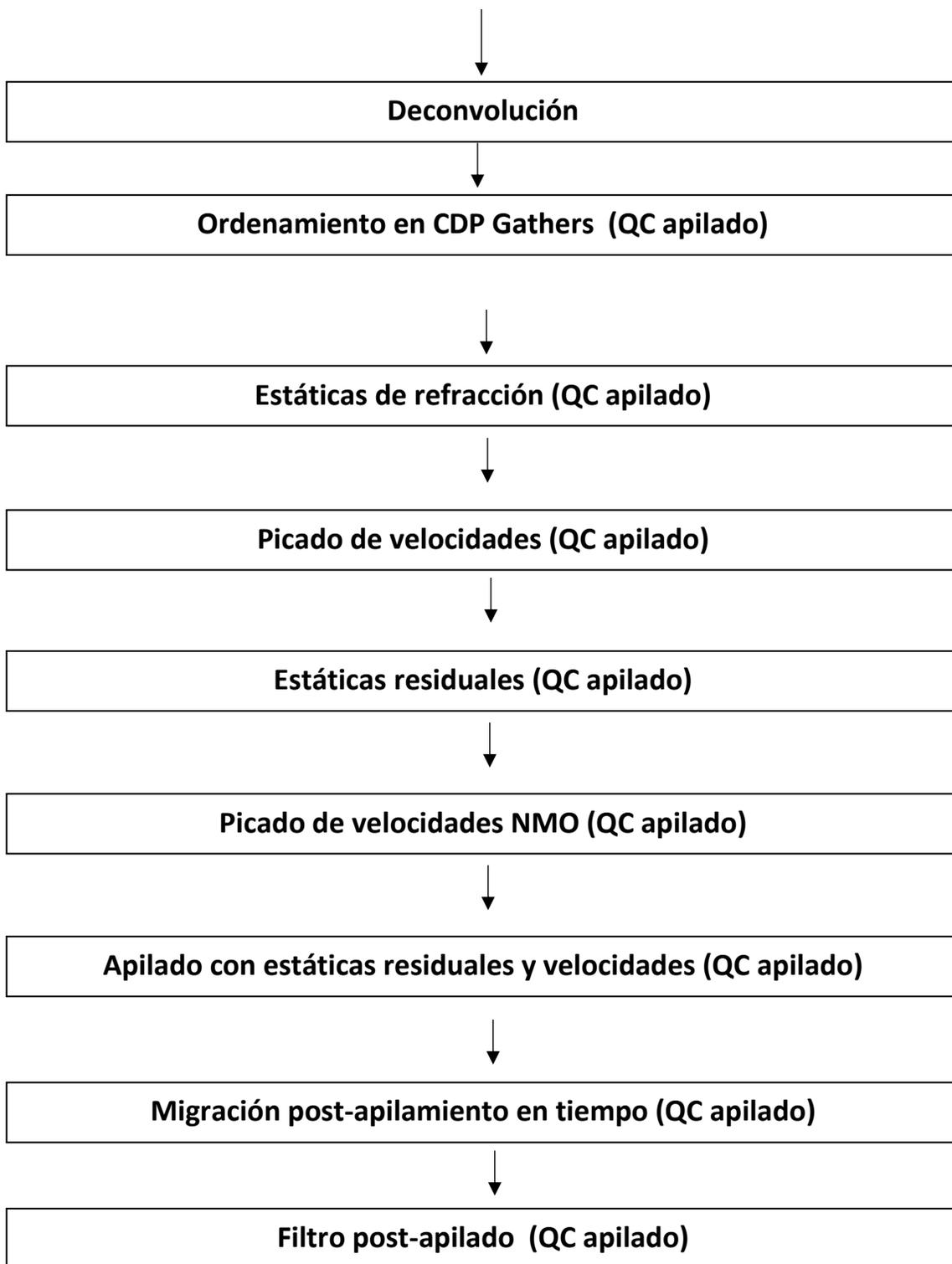


Figura 8. Secuencia de procesamiento en Seismic Unix para una línea.

3.3 SEISMIC UNIX

Es un sistema para plataformas tipo Unix, creado en el año 1983 por Jack k. Cohen y Shuki Ronen del Centro para el Fenómeno de Ondas (CWP, por sus siglas en inglés) en la Escuela de Minas de Colorado (CSM por sus siglas en inglés), Golden, Colorado, EUA. Dicho Software fue creado para el procesamiento de datos sísmicos en sistemas de computo con un ambiente basado en estructura Unix escrito en lenguaje de programación C., que podría extender el sistema operativo Unix a tareas de procesamiento e investigación; además se pensó en que Seismic Unix fuese un programa de uso libre, con el código fuente completo disponible para todo el mundo.

En un principio Jack y Shuki comenzaron con el paquete SY creado por Einar Kjartansson y Shuki Ronen, mientras eran estudiante en el proyecto de Exploración en Stanford de Jon Claerbout. En 1983-1986 Cohen y Ronen crearon la primera versión de SU. Dicha primera versión de SU, se creó para hacerlo soportable, extensible y exportable, sin embargo, en un principio se concibió como un ambiente sencillo de procesamiento y desarrollo para el geofísico con habilidades en la programación, sin embargo, no se trataba de una versión lo suficientemente fácil de manejar.

Años después gracias a la instrucción y a la adopción del ANSI C (Instituto Americano de Estándares Nacionales) como un lenguaje estándar, y gracias al trabajo realizado por Dave Hale, SU se convirtió en un ejemplo a seguir de programación para el computo científico, gracias al trabajo de Dave Hale, en el año 1992 SU comenzó a distribuirse de manera pública, dejando de ser usado exclusivamente por CWP. Ya liberado en internet, comenzó a ser utilizado por una comunidad mayor. El paquete SU actualmente cuenta con más de 300 archivos ejecutables y es utilizado por geofísicos de exploración, sismólogos, desarrolladores de Softwares, compañías de geotecnia, por investigadores y académicos, y grandes compañías de petróleo y gas.

3.4 FORMATO SEG-Y

El formato SEG-Y es un formato de grabación estándar implementado por la Sociedad de Geofísicos de Exploración (Sus siglas en inglés SEG). En este formato se guardan o graban diversos tipos de procesamiento aplicados a los datos sísmicos de campo (geometría, gathers con deconvolución o sin deconvolución, NMO, filtros etc.). La estructura de un archivo SEG-Y está formada por 3 bloques: el primer bloque consta de 3200 bytes, el segundo bloque consta de 400 bytes, y el tercero describe el encabezado de las trazas sísmicas con “N” número de bytes.

El bloque de 300 bytes contiene el EBCDIC, que consta de 40 renglones con 80 espacios cada renglón, en este espacio se describen las referencias del estudio, el nombre del procesamiento, la compañía y año en el que fue procesado, la descripción de los bytes ocupados, etc.

En los 400 bytes está grabado el número de muestra por traza, el intervalo de muestreo, tipo de formato (32 bytes, 16 bytes, IEEE, etc.) y el número de canales por PT.

En caso de tener varios archivos SEG-Y es suficiente con reformatear aleatoriamente una de ellas para saber cómo serán tratadas los otros archivos.

3.5 PRUEBAS

Para este subcapítulo se realizó el procesamiento de los datos sísmicos de reflexión de la línea 47 del campo Ídolos Macuspana, ubicado al sur de México, en el estado de Tabasco. Los datos de entrada que se utilizaron fueron de (Cureño, 2009) y aprobados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos con fines académicos.

Para la deconvolución se realizaron distintas pruebas, empezando por la variación de los parámetros para el GAP, longitud de operador y el parámetro de pre-blanqueamiento. Una vez seleccionados los parámetros óptimos a nuestros datos sísmicos de reflexión se procedió a realizar el Balanceo espectral a los datos apilados. Para el Balanceo espectral se plantearon cuatro diferentes ventanas con diferentes frecuencias de corte. Y se escogió la mejor ventana con un espectro de amplitudes más plano. Dichas pruebas se realizaron para confirmar y demostrar la relación matemática, física y numérica que existe entre los métodos de deconvolucion, blanqueamiento y balanceo espectral, mencionados en el capítulo 2.

El procesamiento de los datos sísmicos fue realizado con ayuda de la compañía SeisGlobe por un software comercial y por motivos de privacidad y confidencialidad no puedo hacer mención del software utilizado.

3.5.1 DECONVOLUCIÓN Y BLANQUEAMIENTO ESPECTRAL

El parámetro GAP adecuado a nuestros datos sísmicos de reflexión se obtuvo a partir de cuatro diferentes pruebas de GAP, dichas pruebas se seleccionaron a partir del resultado obtenido de la autocorrelación en una ventana de 1000 ms, toda la sección sísmica, el valor encontrado fue de 32 ms, este se identificó a partir del primer y el segundo cero donde se ubica la ondícula, en la función de autocorrelación.

SIN DECONVOLUCIÓN

Para poder realizar la comparación de los resultados en el capítulo 4 es necesario desplegar el apilado y el espectro de las amplitudes, de nuestros datos sísmicos de reflexión sin deconvolución. En la figura 8 se observan diferentes múltiples y ruido en el apilado, específicamente en los *CDP* 1300 al 1440, del 1020 al 1220 y en los *CDP* 740 al 900, además de los efectos de la fuente. Sobre este apilado se realizó el cálculo de la autocorrelación en una ventana de los 500 [ms] a los 4500 [ms].

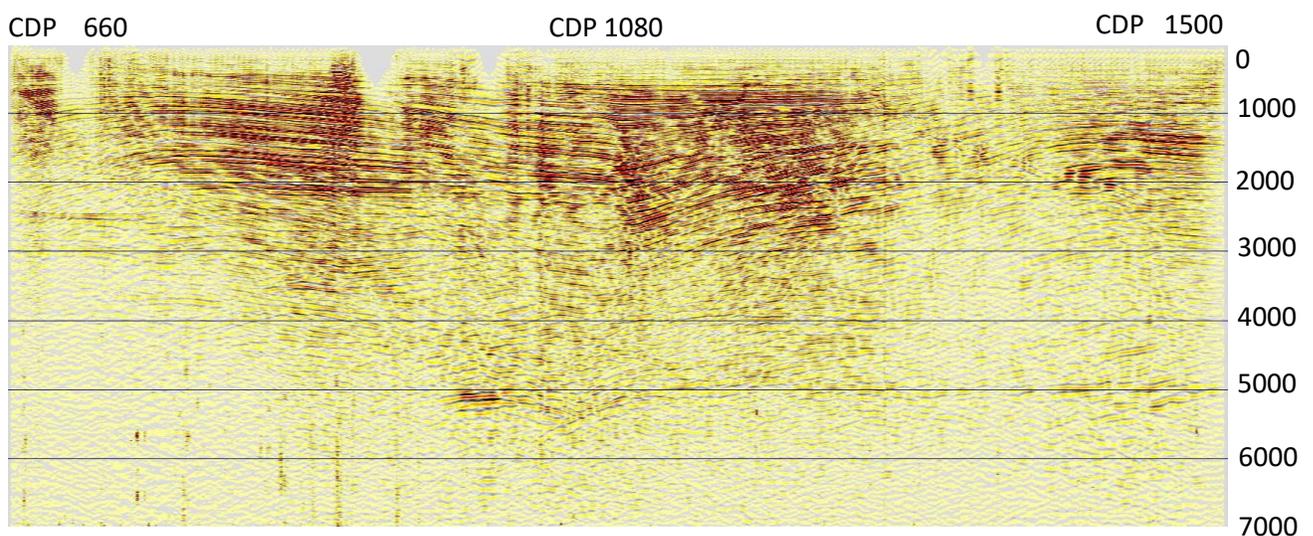


Figura 9. Apilado sin deconvolución a un muestreo de 4 [s].

En la figura 9, se observa el espectro de las amplitudes el cual nos dice la energía que contiene nuestro espectro en un cierto rango de frecuencias, este espectro nos ayuda a conocer u obtener información de nuestros datos sísmicos, como lo es el ancho de banda, la máxima frecuencia y así poder calcular el ancho de banda útil, el espectro contiene frecuencias mayores a 100 Hz. Además, se observa que el espectro de amplitudes decae.

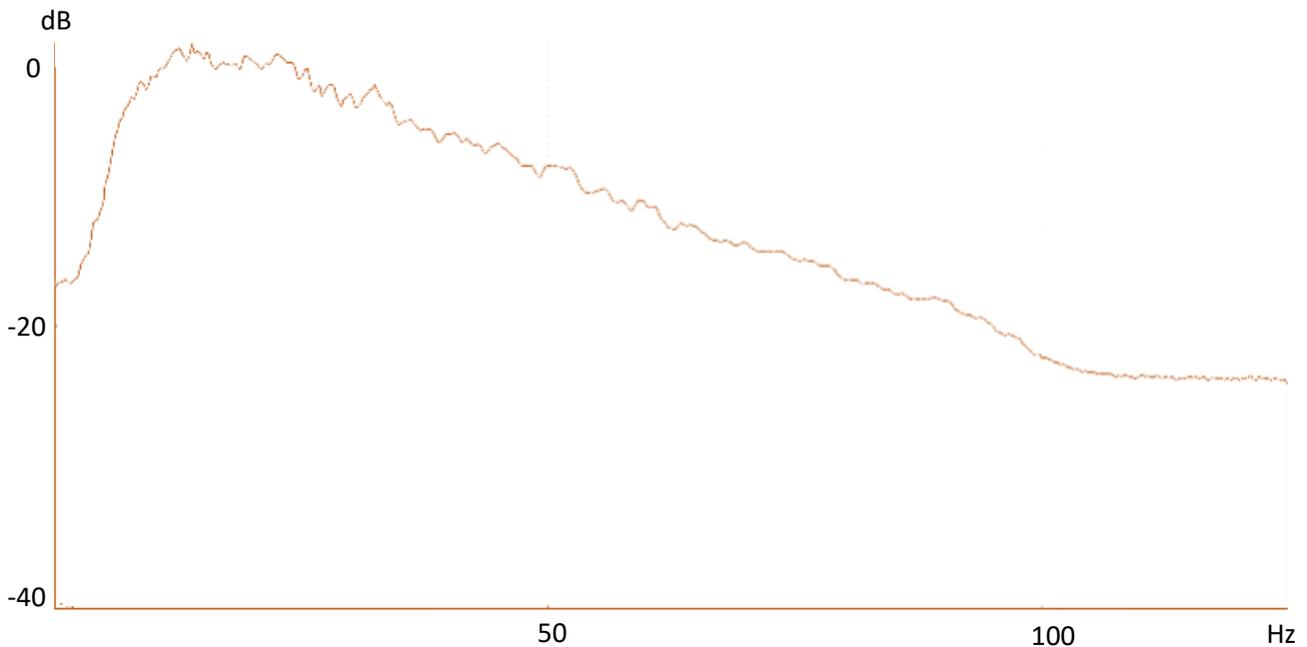


Figura 10. Espectro de amplitudes, el eje X son frecuencias en Hz y para el eje Y se tienen las amplitudes en dB, el pico máximo en las frecuencias es de 13.8 Hz.

GAP Y LONGITUD DE OPERADOR

Para realizar las pruebas de GAP fue necesario dejar la longitud del operador fijo, se escogió un operador de 240 ms. Los valores de los GAP que se seleccionaron para realizar las pruebas fueron: 8, 16, 32 y 64, estos valores se escogieron debido a que son múltiplos del GAP de 32 encontrado. Para cada uno de estos GAP se realizaron sus controles de calidad: apilado en densidad variable,

autocorrelación y espectro de amplitudes para poder decidir cuál era el mejor GAP o el adecuado a nuestros datos. De acuerdo con las pruebas realizadas el valor óptimo del GAP fue de 32 ms ya que arrojó un espectro de amplitudes más plano y un apilado con menos ruido, quitando los múltiples y los efectos de la fuente. Se decidió utilizar el GAP de 32 debido a que en el GAP de 64 se perdía información y por lo mismo se incrementaba la incertidumbre de los datos, además de que en los demás controles de calidad los cambios eran muy pequeños.

En la figura 10 se muestra el apilado de la deconvolución para un GAP de 32 y un operador fijo de 240, el ruido disminuyó removiendo los efectos de la fuente y algunos múltiples, a un muestreo de 4 ms.

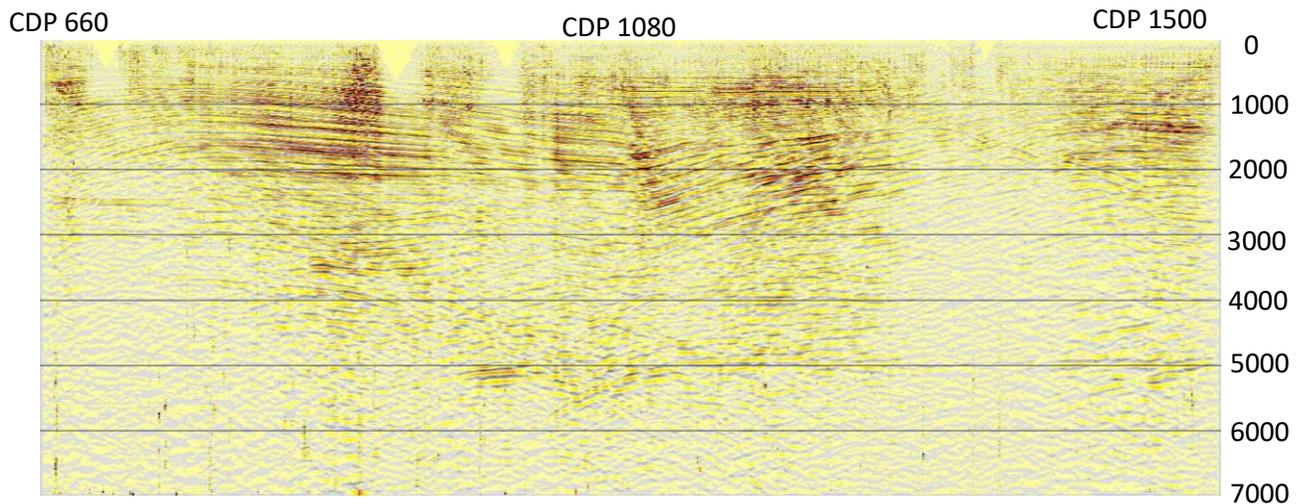


Figura 11. Apilado de la deconvolución para un Gap de 32 y un operador de 240.

En la figura 9, se muestra el espectro de las amplitudes de la deconvolución para una ventana de 500 ms a los 4000 ms, como se puede observar existe una notable mejora en el espectro de las amplitudes consiguiéndose un espectro más plano hacia las altas frecuencias, evitando el decaimiento abrupto. Además, existe un incremento en las bajas frecuencias en comparación con los otros GAP, el pico máximo en la frecuencia es de 8.7 Hz.

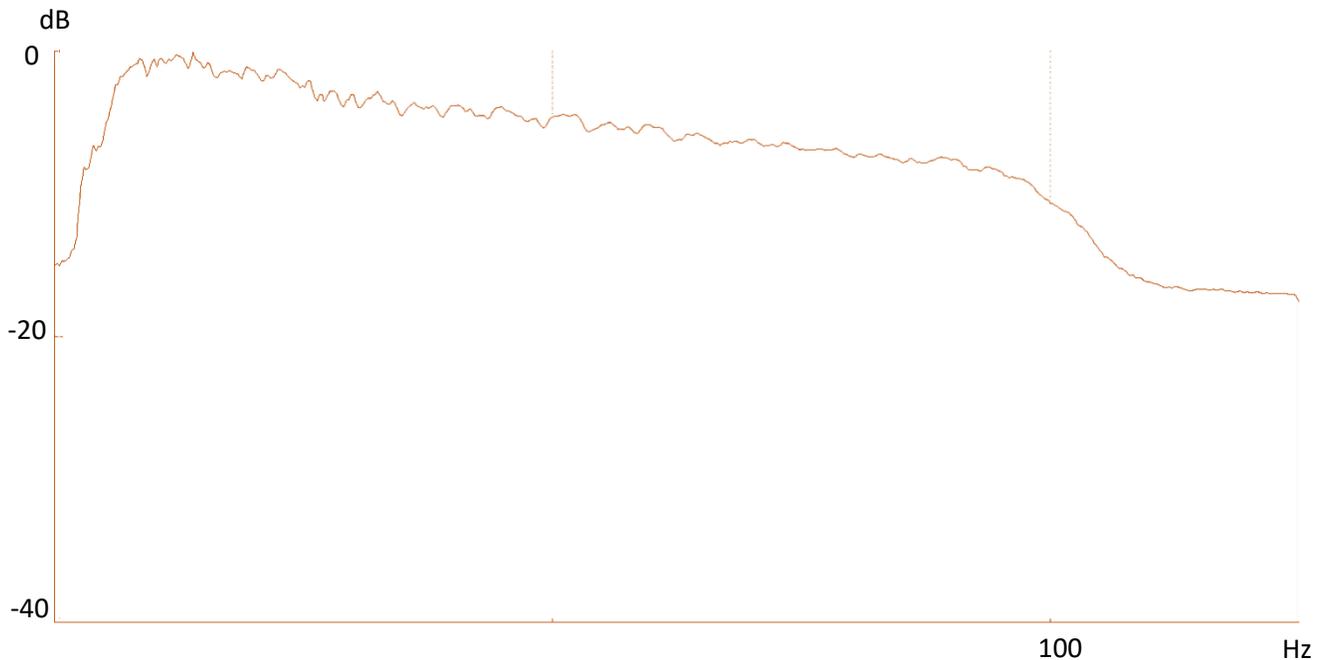


Figura 12. En el eje X se muestran las frecuencias en Hz y en el eje Y las amplitudes en dB.

Posteriormente una vez encontrado el GAP óptimo, se procedió a realizar las pruebas correspondientes a la longitud de operador, las pruebas se realizaron para los valores de longitud de operador de: 80, 140, 260 y 300, con un GAP fijo de 32. Para cada uno de los controles de longitud de operador se realizaron sus respectivas pruebas de calidad: apilado en densidad variable, autocorrelación y espectro de amplitudes para poder decidir cuál longitud de operador era el adecuado a nuestros datos. El tamaño de la ventana que se utilizó para realizar las pruebas va desde el *CDP* 660 hasta el *CDP* 1500 en una ventana de 7000 ms. De acuerdo a las pruebas realizadas, el valor óptimo para el operador fue de 140 ms porque mejora la resolución, con un espectro más plano. Consecuentemente al igual que el GAP los cambios eran muy pequeños pero relevantes ya que en algunas pruebas se observaron inconsistencias como fue en el caso del operador de 300, que la información mostrada causaba incertidumbre en el apilado. Este apilado es el que se utilizó para

realizar las pruebas del blanqueamiento, porque es el que contiene las pruebas anteriores y en el que mejores resultados se encontraron.

En la figura 12 se muestra el apilado de la deconvolución para un GAP de 32 y un operador de 140, el ruido disminuyo quitando los efectos de la fuente y algunos múltiples, para un muestreo de 4 s.

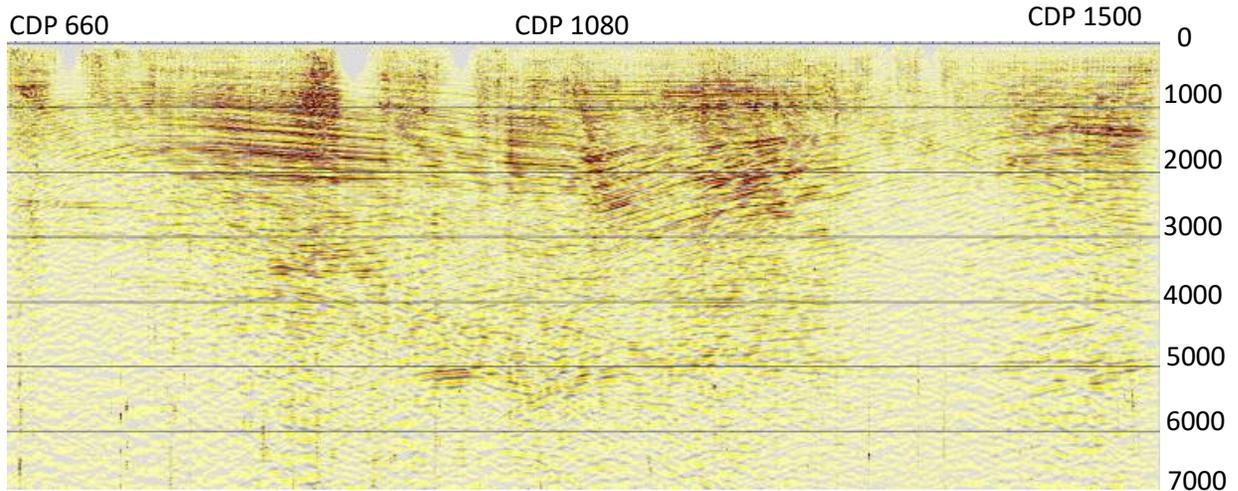


Figura 13. Apilado para un GAP de 32 y un operador de 140.

En la figura 13 se muestra el espectro de las amplitudes de la deconvolución para una ventana de 500 [ms] a los 4000 [ms]. el espectro de las amplitudes es notablemente más plano, con un pico máximo en la frecuencia 8.7, tomando este pico como referencia para realizar el cálculo correspondiente para obtener el ancho de banda útil (aplanamiento del espectro).

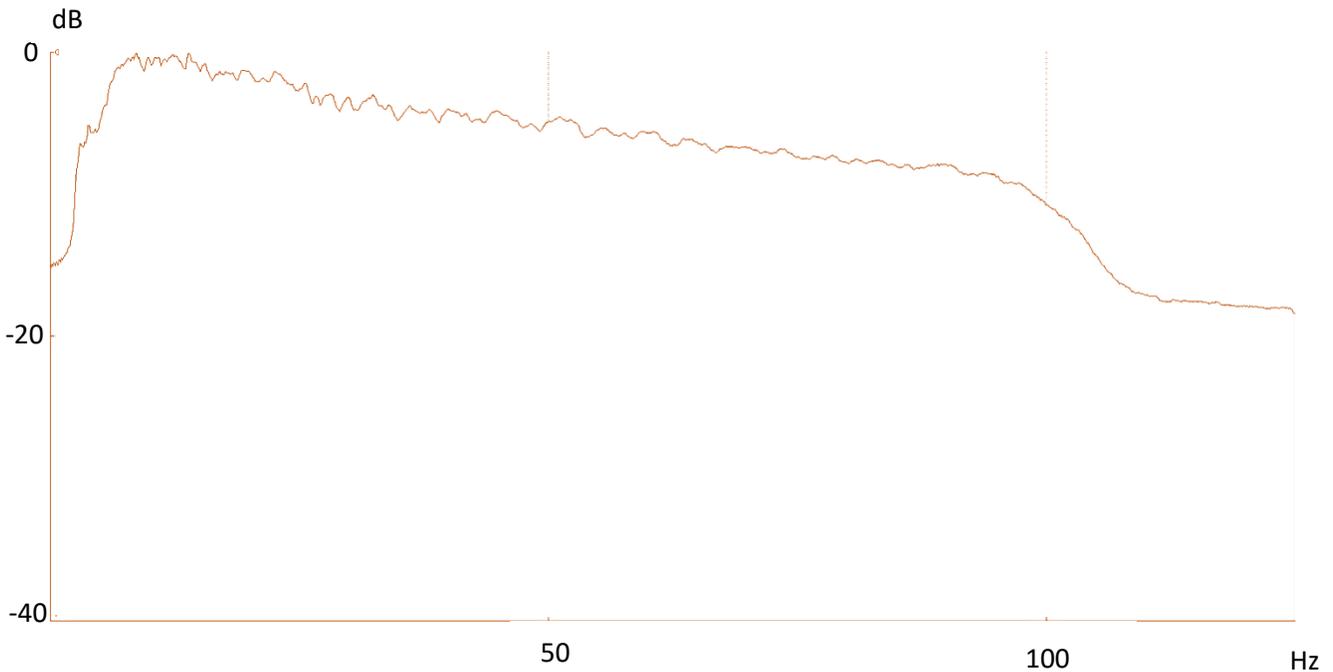


Figura 14. En el eje X se muestran las frecuencias en Hz y en el eje Y las amplitudes en dB.

BLANQUEAMIENTO

Como se mencionó, el apilado de la deconvolucion con el GAP de 32 y el operador de 140 se utilizó para realizar las pruebas del blanqueamiento, para estas pruebas se seleccionaron los parámetros de pre-blanqueamiento de 0%, 0.1%, 0.3%, 1%, 3% y 5% (Chopra and Marfurt, 2016), estos parámetros se escogieron debido a que son los estándares utilizados en la industria, en el área de producción, investigación y docencia. Las pruebas se realizaron a partir del 0% demostrar el efecto del parámetro σ^2 (parámetro de pre-blanqueamiento) que realiza el reforzamiento en la diagonal principal de la matriz de datos sísmicos de reflexión. Posteriormente siguieron los demás parámetros con sus respectivos controles de calidad: apilado en densidad variable, autocorrelación y espectro de las amplitudes.

Los resultados de las pruebas muestran que conforme se incrementaba el valor en porcentaje del parámetro de pre-blanqueamiento del apilado se podía obtener mayor información, pero se debe tener cuidado debido a que no necesariamente al obtener un parámetro de blanqueamiento mayor la información que se está obteniendo es segura, ya que se puede caer en apilados sintéticos, es decir un apilado en el cual se está modificando y la información deja de ser fiable para su posterior interpretación o para las posteriores etapas de procesamiento (migración, filtros e interpretación) sobre todo para datos reales, como lo es para estas pruebas. Debido a esto, el parámetro óptimo que se seleccionó fue de 3% debido que las pruebas de calidad arrojaron los mejores resultados, además de que es un estándar en el sector hidrocarburos en el área de producción (Chopra and Marfurt, 2016).

PARÁMETRO DE PRE-BLANQUEAMIENTO DE 0%:

En la figura 14, se observa el apilado de la deconvolución con un GAP de 32, una longitud de operador de 140 y un parámetro de pre-blanqueamiento del 0%, como se puede observar existe mucha inconsistencia en el apilado, además de la falta de información. Esto se debe a que el espectro contiene valores muy cercanos a cero o cero y al momento de apilarlos afecta a todos los *CDP Gather*. La falta de información es muy notable en los *CDP* 660 al 780, 1240 al 1400 y del 900 al 1100.

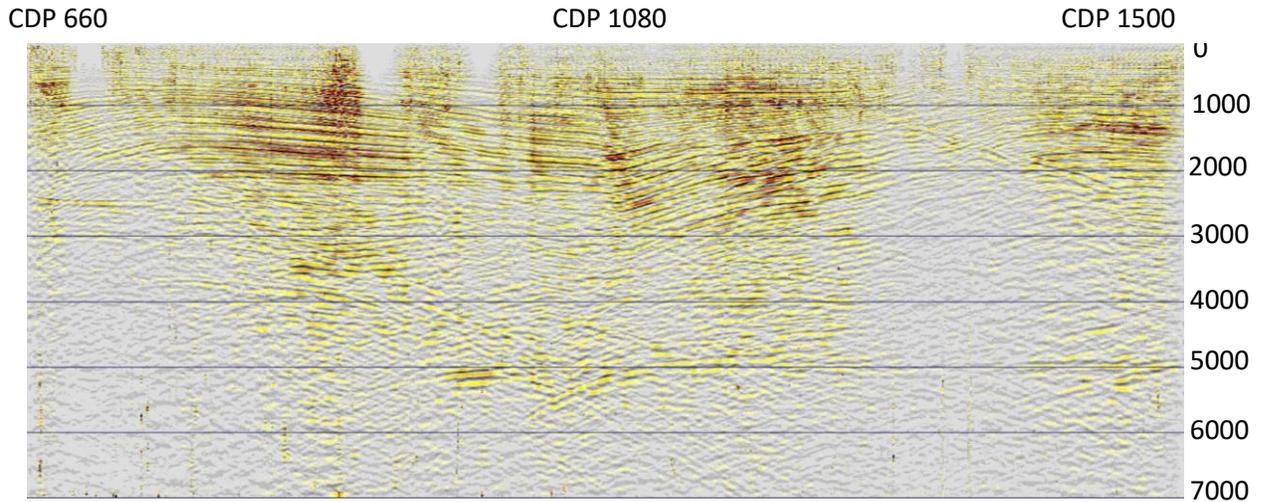


Figura 15. Apilado de la deconvolución para un GAP de 32 y un operador de 140, con un parámetro de pre-blanqueamiento del 0%, para un muestreo de 4 s.

En la figura 15 se muestra el espectro de las amplitudes de la deconvolución para una ventana de 500 ms a los 4000 ms, el espectro es notablemente más plano, con un pico máximo en la frecuencia 8.7

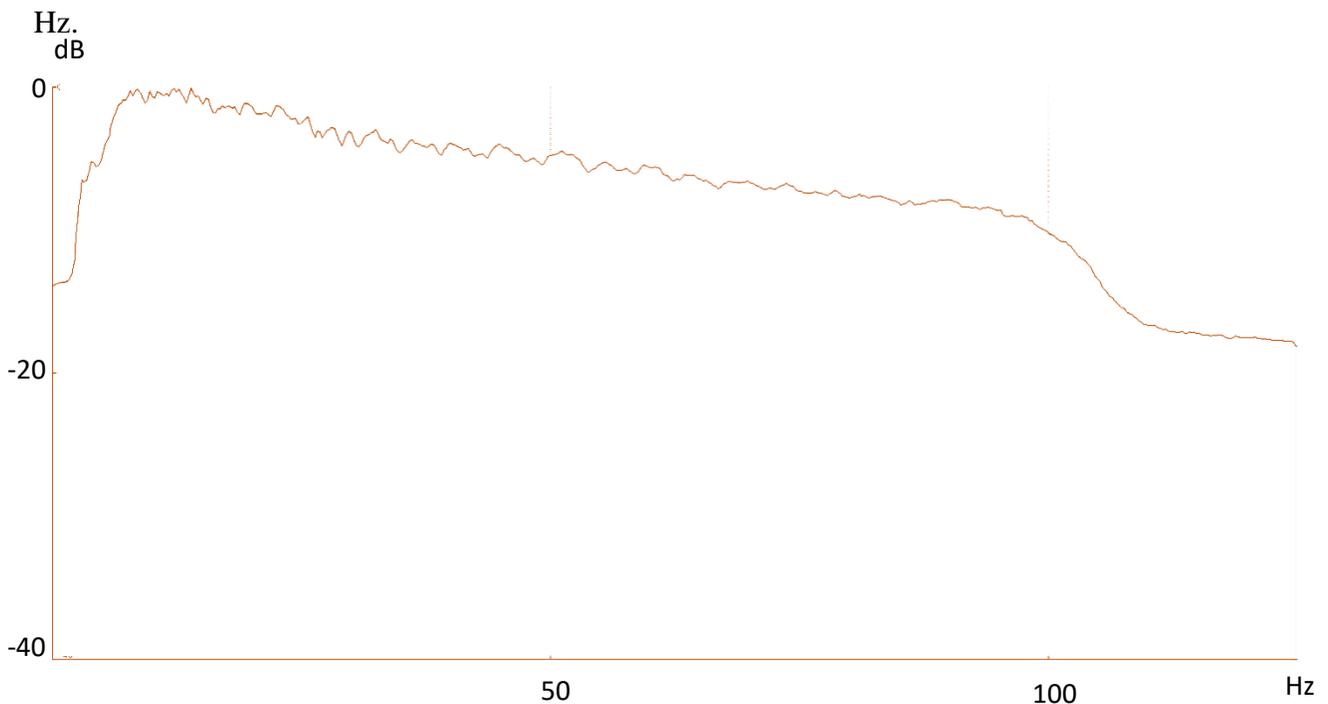


Figura 16. En el eje X se muestran las frecuencias en Hz y en el eje Y las amplitudes en dB,

PARÁMETRO DE PRE-BLANQUEAMIENTO DE 3%:

En la figura 16, se observa el apilado de la deconvolución con un GAP de 32, longitud de operador de 140 ms y un parámetro de pre-blanqueamiento del 3%. Como se puede observar el apilado se obtuvo una mejora relevante en todo el apilado a lo largo de los *CDP Gather*, esta mejora se debe a que el espectro se aplanó y omitió los valores en cero o cercanos a cero, realizando una especie de ecualización.

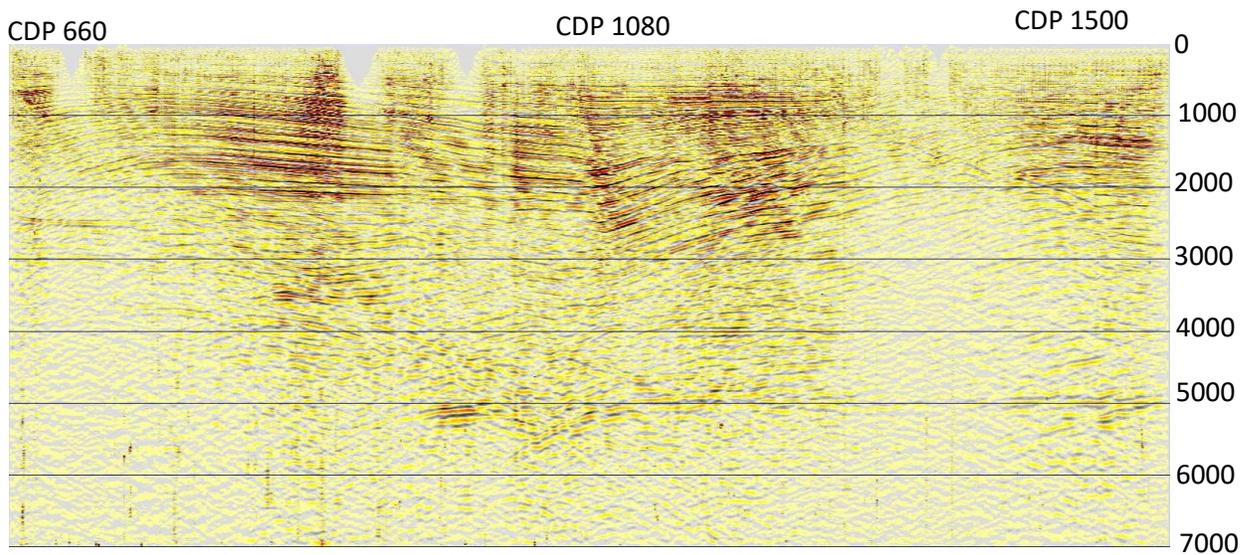


Figura 17. Apilado de la deconvolución para un GAP de 32 y un operador de 140, con un parámetro de pre-blanqueamiento del 3%, para un muestreo de 4 s.

En la figura 17 se muestra el espectro de las amplitudes de la deconvolución para una ventana de 500 ms a los 4000 ms.

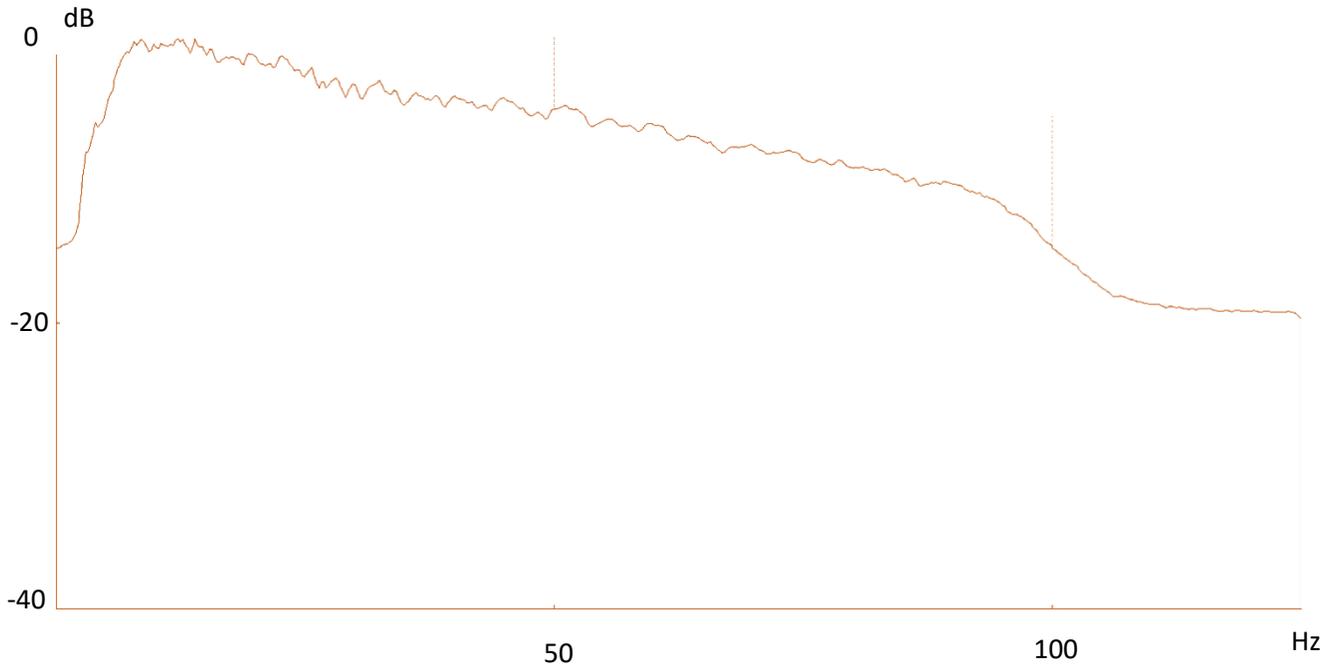


Figura 18. En el eje X se muestran las frecuencias en Hz y en el eje Y las amplitudes en dB.

3.5.2 BALANCEO ESPECTRAL

Por último, se realizó la prueba del Balanceo espectral en el cual se seleccionaron cuatro ventanas diferentes y se calcularon sus respectivos controles de calidad: apilado en densidad variable y espectro de las frecuencias, para la primera ventana se utilizaron las siguientes frecuencias de [50-75] Hz, para la segunda ventana [55-70] Hz, para la tercera ventana [50-65] Hz y para la última ventana [50-60] Hz. Para cada ventana se utilizó el apilado de la deconvolución anteriormente calculado (GAP: 32, longitud de operador: 140 y parámetro de pre-blanqueamiento de: 3%). Las pruebas arrojaron resultados similares con un espectro más amplio hacia las altas frecuencias e incrementando la

resolución sísmica vertical. Sin embargo, en algunos apilados la información no era consistente y su posterior interpretación podría causar incertidumbre. Debido a esto la ventana que mejores resultados arrojó fue la de [0 0 50 65], en esta se observó un gran incremento en la resolución sísmica vertical de los datos, mostrando y definiendo posibles canales o estructuras geológicas.

VENTANA PARA CORTE DE FRECUENCIAS DE [50-65] Hz:

En la figura 18, se observa el apilado con un balanceo espectral con frecuencias de corte en [50-65] Hz, se logra observar que en los CDP 680 al 800, estructuras con una mayor definición y realce de información sísmica. Si se realiza la migración de los datos, el intérprete podrá dar resultados más fiables y con una menor incertidumbre.

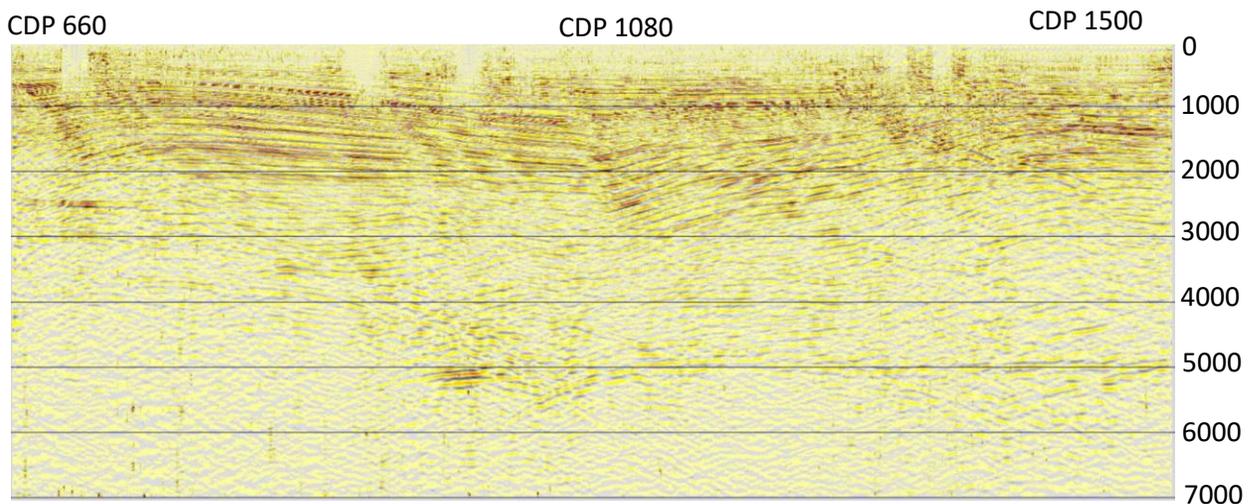


Figura 19. Apilado de la deconvolución para un GAP de 32 y un operador de 140, con un parámetro de pre-blanqueamiento del 3%, para una ventana de balanceo espectral de [50-65] Hz y un muestreo de 4 s.

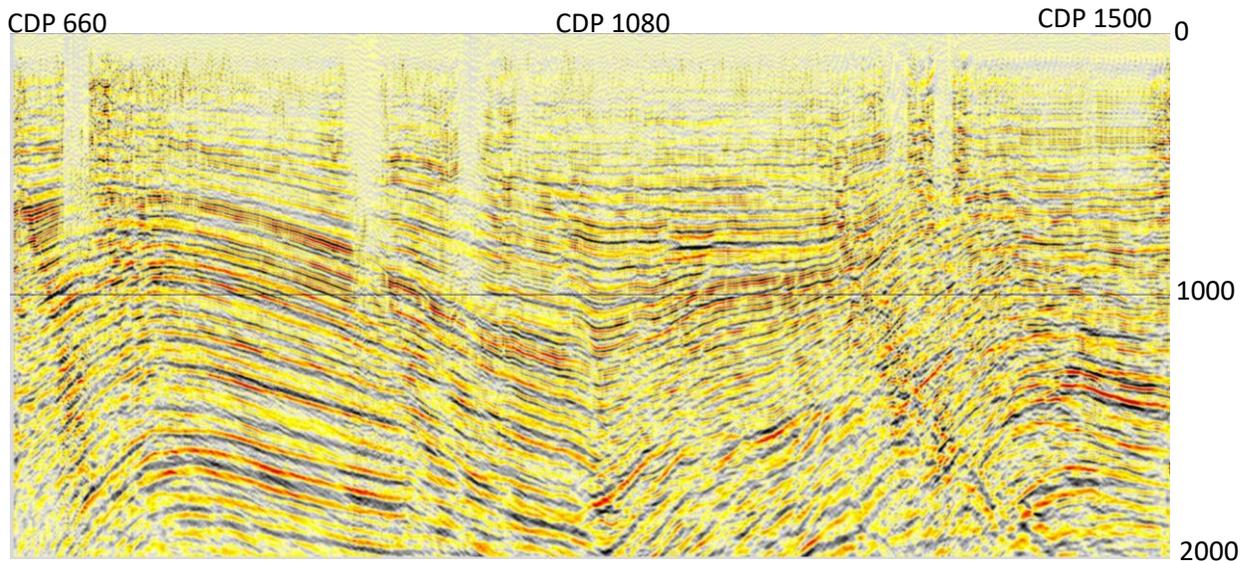


Figura 20. Apilado de la deconvolución para un GAP de 32 y un operador de 140, con un parámetro de pre-blanqueamiento del 3%, para una ventana de balanceo espectral de [50-65] Hz y un muestreo de 4 s.

En la figura 20 se muestra el espectro de las amplitudes de la deconvolución para una ventana de 500 [ms] a los 4000 [ms]. el espectro de las amplitudes es notablemente más plano, con un pico máximo en la frecuencia de 12.3 Hz.

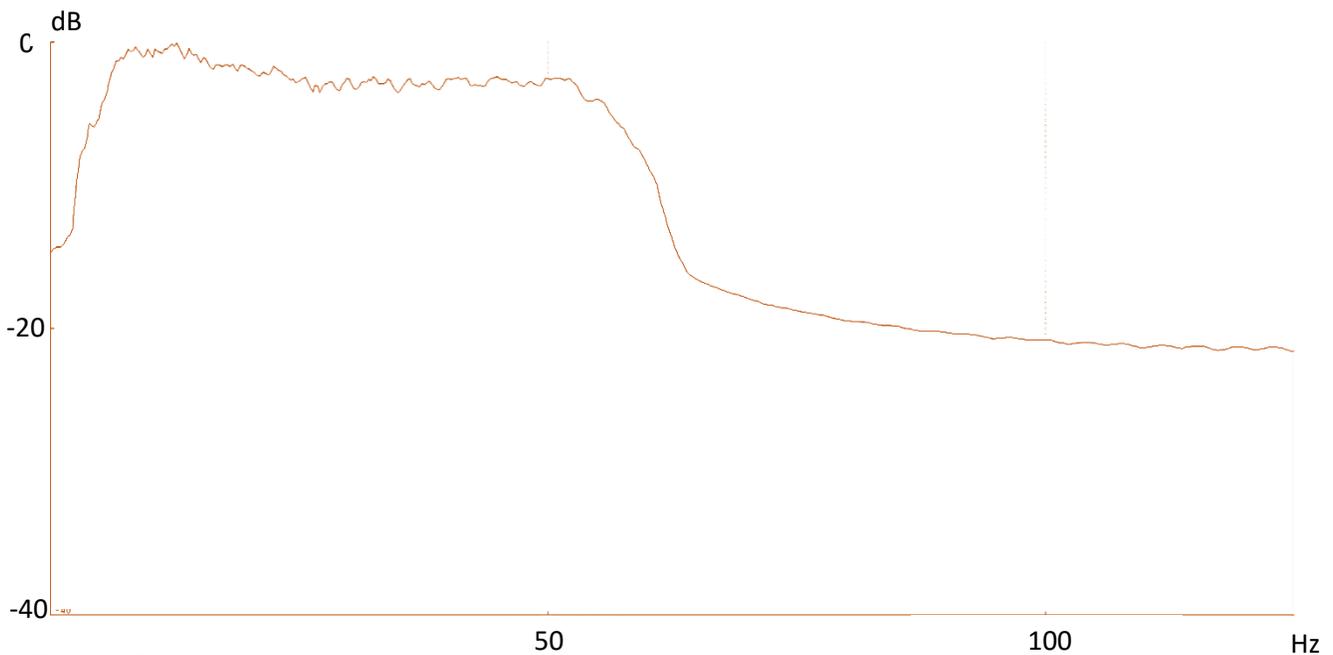


Figura 21. En el eje X se muestran las frecuencias en Hz y en el eje Y las amplitudes en dB.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el Capítulo 3, demuestran la necesidad del procesamiento espectral en los datos sísmicos de reflexión. Como se pudo observar, existen diferentes pruebas que se le deben aplicar a los datos sísmicos antes de seleccionar el mejor pilado, como lo fueron las distintas pruebas de GAP, longitud de operador y blanqueamiento para la deconvolución, así como sus correspondientes pruebas de calidad: apilado en densidad variable, autocorrelación y el espectro de las amplitudes. Para lo anterior fue necesario desarrollar el flujo de trabajo correcto que se realiza para el procesamiento de datos sísmicos en 2D que implica realizar el acondicionamiento, manipulación y graficación de datos sísmicos en formato SEG-Y, así como los filtros necesarios.

Se realizaron las pruebas correspondientes al balanceo espectral realizando un análisis a mayor detalle sobre la ventana era la adecuada a nuestros datos sísmicos que conseguía el espectro mas plano sin afectar los datos. Para lo anterior fue necesario realizar la autocorrelación y estudio de nuestros datos sin la deconvolución, esto para determinar el tamaño de nuestro GAP y posteriormente empezar las pruebas correspondientes.

Con base en los resultados obtenidos y realizando una comparación, el mejor apilado obtenido para la deconvolución fue un GAP de 32, una longitud de operador de 140 y un blanqueamiento del 3%, mejorando notablemente el espectro de las amplitudes y consiguiendo un espectro plano con

información consistente, ayudando a la remoción de múltiples, y efectos de la fuente, mostrando una mayor continuidad de los eventos y una mayor resolución sísmica vertical. Y, para el balanceo espectral la ventana que ayudo a resolver el incremento del contenido hacia las altas frecuencias fue [50-65] Hz, funcionando como frecuencias de corte, en la cual como se menciona en el Capítulo 2 es un promedio de las frecuencias máximas sobre un cierto tipo de ventana predeterminado.

Se demostró que el blanqueamiento espectral es necesario y fundamental en el procesamiento de datos sísmicos, ya que como se puede observar en la figura 14, si no se realiza el blanqueamiento de los datos sísmicos, existe una incertidumbre en la información del apilado, por el cual no se logra observar continuidad de los eventos y la resolución sísmica vertical se ve ampliamente afectada por los ceros o por los valores muy pequeños que existen en nuestros datos. Sin embargo, cuando se aplica un blanqueamiento espectral el apilado muestra continuidad de los eventos.

La relevancia del procesamiento espectral en datos sísmicos de reflexión tiene un impacto positivo y muy amplio en la docencia, investigación y la práctica profesional. Además, por sus beneficios y utilidades en áreas académicas, técnicas y económicas, es necesario realizar los controles de calidad correspondientes para cada flujo de trabajo, son actividades que se realizan día a día en el sector hidrocarburos en el área de la sismología de exploración.

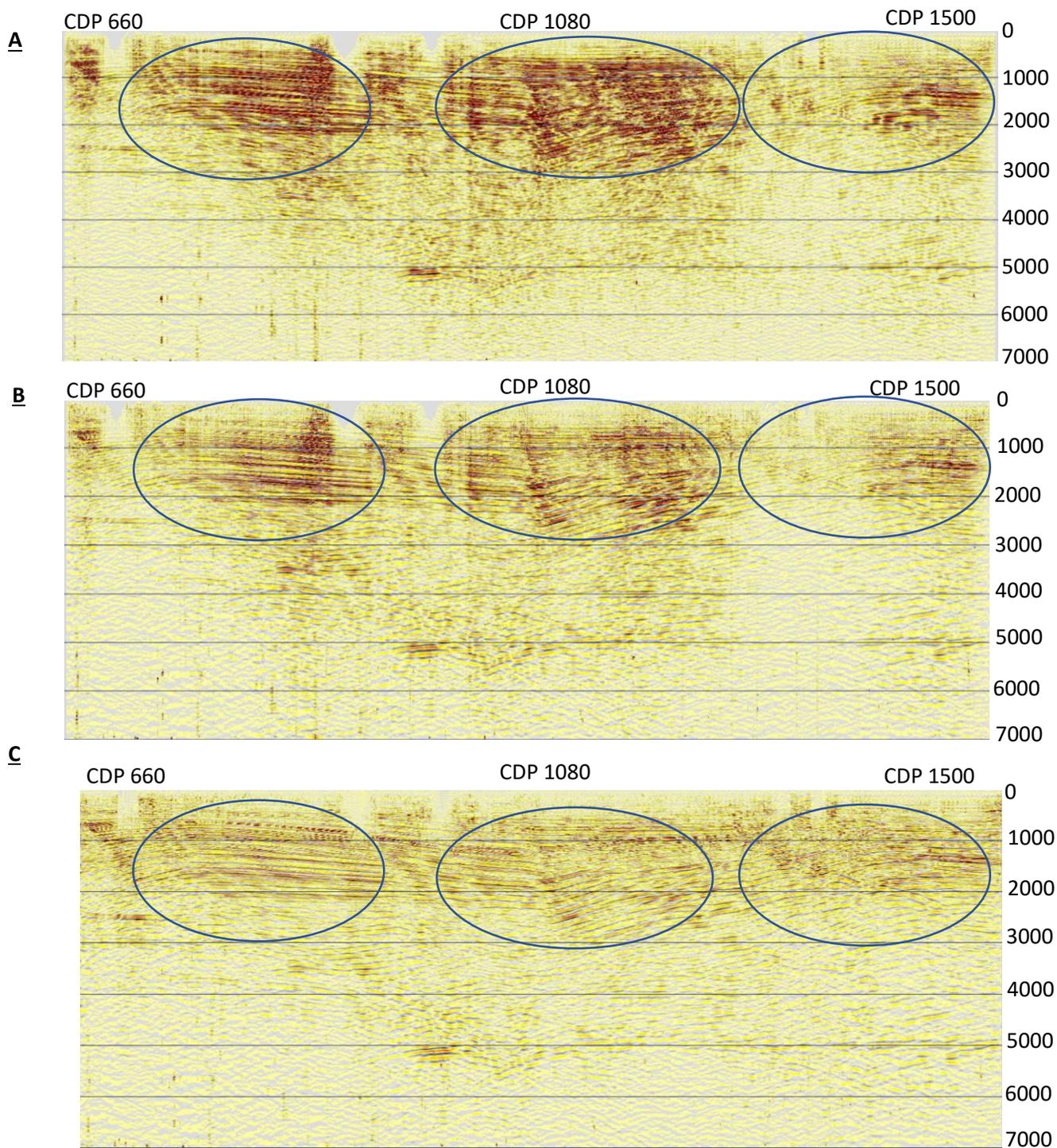


Figura 22. Apilado en densidad variable de sin deconvolución (A), deconvolución (B) y balanceo espectral (C), para un muestreo de 4 s. En las elipses se muestran los cambios más notables.

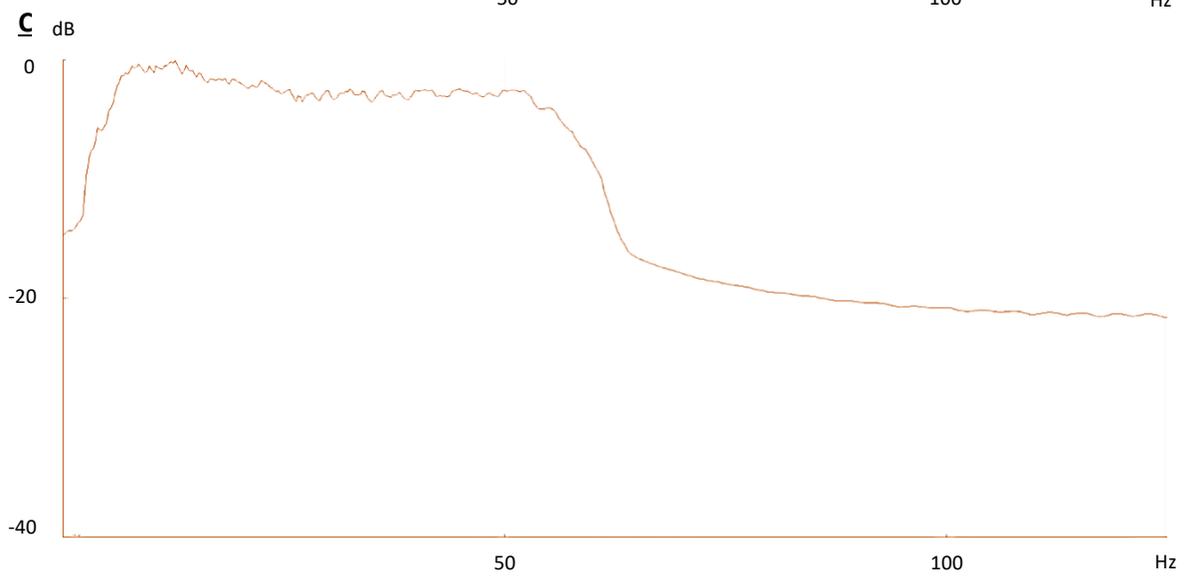
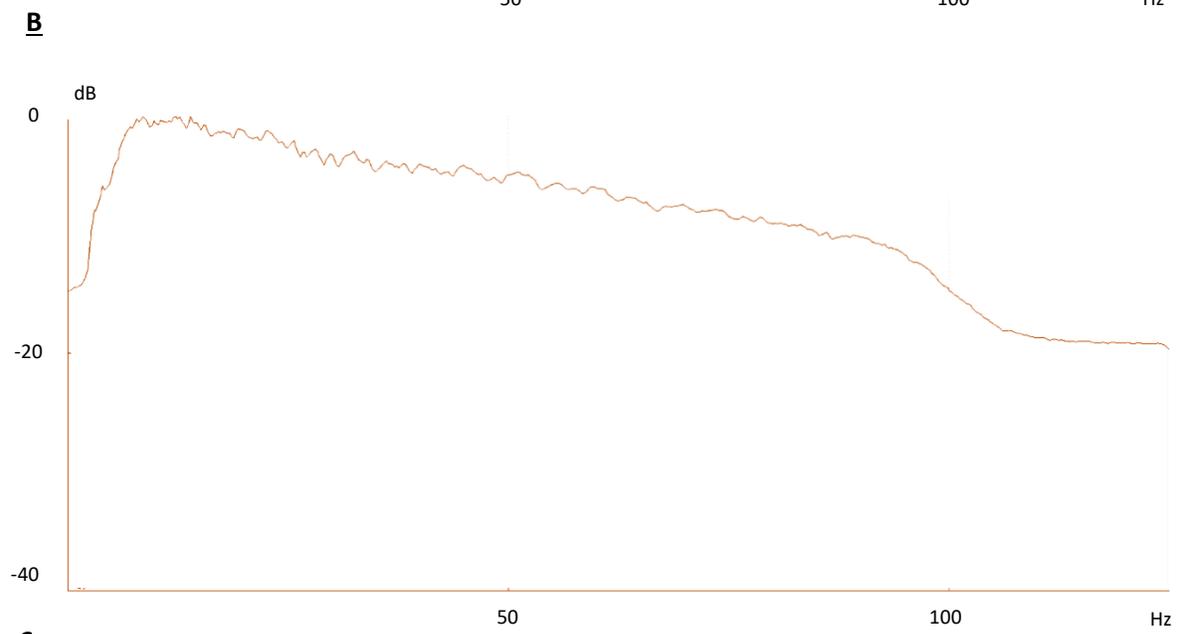
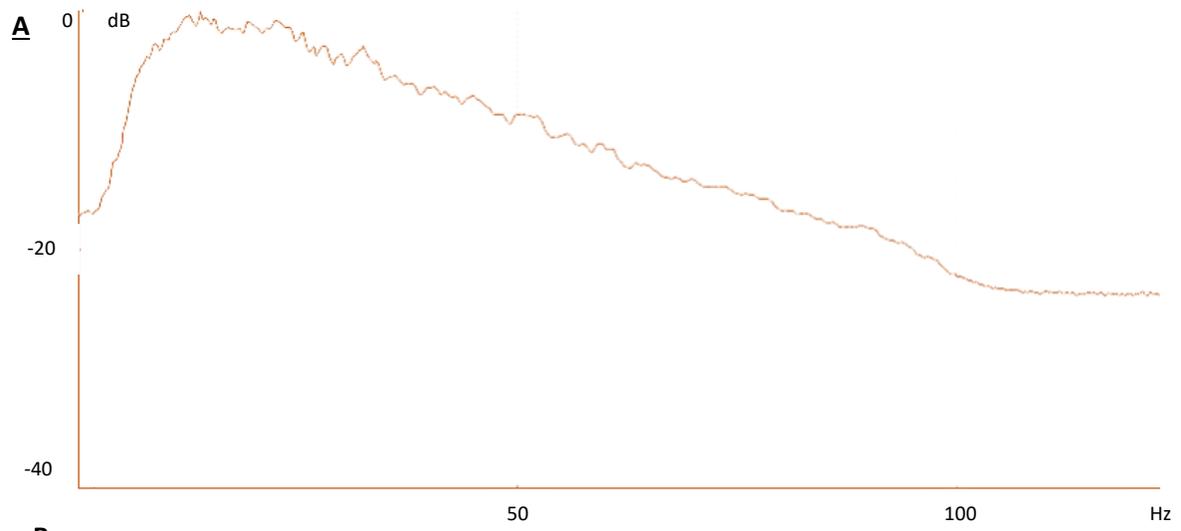


Figura 23. Comparación de espectro de amplitudes, sin deconvolución (A), deconvolución (B) y balanceo espectral (C). El tamaño de la ventana va desde el *CDP* 660 hasta el *CDP* 1500 en una ventana de 500 ms a los 4500 ms, para un muestreo a 4 s.

CONCLUSIONES

1) La relevancia del procesamiento espectral recae en el incremento del ancho de banda útil para obtener una mejor resolución sísmica vertical ya que es uno de los desafíos que se enfrentan día a día en el sector hidrocarburos, docencia, investigación e incluso sirve para la capacitación de profesionales. Además, se tienen ventajas como:

- i) Obtención de una mejor interpretación de la sección sísmica: Detección de canales y la estratigrafía de la zona. Detectando trampas estratigráficas donde puede existir la acumulación de gas/aceite.

- ii) Reducción de costos y riesgos de operación: Maximiza la certeza antes de la perforación de un pozo.

- iii) Mejor control de calidad: Se puede comparar con resultados previos a la deconvolución, blanqueamiento espectral y balanceo espectral, examinando y estudiando con mayor detalle el apilado final y espectro de amplitudes.

2) El tener todas las ecuaciones y las relaciones matemáticas, físicas y numéricas con una misma notación en un solo documento ayuda a comprender mejor los métodos numéricos empleados para

temas más complejos como lo es la deconvolución, blanqueamiento y el balanceo espectral. Ya que muchas veces las notaciones utilizadas por diferentes autores llegan a ser confusas y poco claras.

3) De las pruebas realizadas con datos reales se comprobó la relación matemática, física y numérica que existe entre los métodos de deconvolución, blanqueamiento y balanceo espectral, a partir de las pruebas realizadas. Una de las pruebas claves para encontrar dicha relación fue la del blanqueamiento espectral, diferentes pruebas de calidad, una de ellas fue para un blanqueamiento del 0% en el cual el apilado final se muestra con mucha incertidumbre debido a que la matriz de datos se encuentra mal condicionada. En la práctica la deconvolución ya lleva blanqueamiento por lo que este paso es omiso y solo se realizó en este proyecto con fines de demostración.

4) Como prueba de lo anterior se demostró: i) La relevancia del procesamiento espectral en datos sísmicos de reflexión así como la necesidad de realizar este procesamiento no solo en la industria de la exploración sísmica sino como guía o apoyo para profesores, estudiantes o personas afines a las geociencias, ii) la relación de la teoría con la practica al aplicar los conocimientos en datos reales a partir de flujos de trabajo para el acondicionamiento y procesamiento de datos sísmicos, iii) el incremento de la resolución sísmica vertical de datos reales así como las diferentes pruebas de calidad aplicables a cada método, iv) la relación de la deconvolución, blanqueamiento y balanceo espectral a partir de métodos numéricos de inversión para obtener un incremento en el ancho de banda útil hacia las altas frecuencias.

5) De las pruebas y de las demostraciones realizadas queda trabajo a futuro debido a que en la actualidad en el sector hidrocarburos no se realiza el cálculo para encontrar los eigen valores de la matriz de datos de entrada para cada proyecto sino se realiza, con base en la experiencia.

REFERENCIAS

1. Chopra S., y K.J. Marfurt, 2016, Spectral decomposition and spectral balancing of seismic data: *The Leading Edge*, 176-179.
2. Claerbout, J.F., 1992, *Earth Soundings Analysis, Processing versus Inversion*, Blackwell Scientific Publ., Cambridge, Mass, EEUU.
3. Silvia, M.T., 1987, Deconvolution, en: D.F. Elliott (Ed), *Handbook of Digital Signal Processing Engineering Applications*, 741-788, Academic Press, San Diego, CA, EEUU.
4. Robinson, E. y Treitel S., (2003), *Geophysical signal analysis*, 238-250, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J,EEUU.
5. Neep, J. P., 2007, Time-variant colored inversion and spectral blueing: 69th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, 1-5
6. Yilmaz, O. & Doherty, S. 1987. *Seismic data processing*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists.
7. Nanda, N, 2016, *Seismic data interpretation and evaluation for hydrocarbon exploration and production : a practitioner's guide*. Cham: Springer.
8. Castagna, J.P. & Sun S., 2003 ,Instantaneous spectral analysis: Detection of low frequency shadows associated with hydrocarbons: *The Leading Edge*, p. 120-127
9. Simm,R. y Bacon, M, 2014, *Seismic amplitude : an interpreters handbook*. Cambridge New York : Cambridge University Press
10. Cureño Lopez, G, 2009, Procesamiento sísmico en tiempo 2D Terrestre con Seismic Unix Área: Chiapas-Tabasco. Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
11. González Verdejo, O. (2010). Reproducibilidad en representación sísmica. Licenciatura. Universidad Nacional Autonomía de México, Facultad de Ingeniería.
12. Seymour Lipschutz, 1992 , *Álgebra Lineal*, España: McGraw-Hill.
13. The University of Oklahoma, 8 de diciembre de 2015, Computing Spectral Components Complex Matching Pursuit, Oklahoma, School of Geology & Geophysics Recuperado de http://mcee.ou.edu/aaspi/documentation/Spectral_Attributes-spec_cmp.pdf
14. Stockwell, J., & Cohen, J. (2008). The New SU User's Manual. Retrieved from http://web.mit.edu/cwpsu_v44r1/sumanual_600dpi_letter.pdf

APÉNDICES

APÉNDICE 1

BALANCEO ESPECTRAL

Cuando se habla de obtener un valor óptimo de reforzamiento en la diagonal principal, también se habla de realizar un balanceo espectral (Elliot, 1987), por lo que esta fórmula el reforzamiento en la diagonal principal de la matriz es un valor ε , la demostración de la formula es la siguiente:

$$a_j^{bal}(t, f) = \left[\frac{P_{peak}(t)}{P_{avg}(t, f) + \varepsilon P_{peak}(t)} \right]^{\frac{1}{2}} a_j(t, f) \quad (1a)$$

Para facilitar la demostración y por comodidad las variables de la ecuación se cambiarán de la siguiente manera:

$$P_{peak}(t) = y \quad (2a)$$

$$P_{avg}(t, f) = x \quad (3a)$$

$$P_j = a_j^2(t, f) = z \quad (4a)$$

Partimos de una asunción muy simple es decir $1=1$

$$z^2 = z^2 \quad (5a)$$

A la ecuación (4) se multiplica por un 1

$$z^2 = z^2(1) \quad (6a)$$

La ecuación 5 podemos expresarlo de otra manera, es decir el “1” lo representaremos como un cociente (y/y)

$$z^2 = z^2 \left(\frac{y}{y} \right) \quad (7a)$$

Se realiza la distribución de la ecuación (6) y se obtiene:

$$z^2 = \frac{z^2 \cdot y}{y} \quad (8a)$$

Podemos expresar el valor de “y” como:

$$y = x \cdot \alpha$$

Donde, $\alpha =$ es un valor muy pequeño

$$z^2 = \frac{z^2 \cdot \{x \cdot \alpha\}}{y} \quad (9a)$$

Alpha se puede expresar como la suma de dos números muy pequeños:

$$\alpha = \beta + \gamma \quad (10a)$$

Sustituyendo la ecuación (9) en (8) obtenemos que:

$$z^2 = \frac{z^2 x \beta + z^2 x \gamma}{y} \quad (11a)$$

Ahora necesitamos reducir la ecuación (10a) en una mucho mas pequeña por lo que, necesitamos reducir la suma del numerador de la ecuación (10a), por lo que necesitamos encontrar $z^2 x \beta$ y $z^2 x \gamma$

Para $z^2 x \beta$, tenemos que:

Realizamos y aplicamos la propiedad distributiva:

$$z^2 x \beta = z^2 \cdot \beta \cdot x \quad (12a)$$

Podemos decir que $z^2 \cdot \beta = w^2$, ya que la multiplicación de un valor muy pequeño a un número es otro número al cuadrado.

$$z^2 x \beta = w^2 \cdot x \quad (13a)$$

Eliminando a “x” en ambos lados tenemos que:

$$z^2 \cdot \beta = w^2 \quad (14a)$$

Ahora para $z^2 x \gamma$:

$$z^2 x \gamma = z^2 \cdot x \cdot \gamma \quad (15a)$$

Se realizan las siguientes asunciones para la solución de la ecuación (15a)

$$\gamma \neq \beta (a); \gamma = \delta \beta (b); z^2 \cdot \beta = w^2 (c); \delta x = \varepsilon (d)$$

Con las anteriores asunciones se tiene que:

Sustituyendo la asunción (b) en la ecuación (15a) tenemos que:

$$z^2 x \gamma = z^2 \delta \beta x \quad (16a)$$

Sustituyendo la asunción (c) en la ecuación (17a) tenemos que:

$$z^2 x \gamma = z^2 \cdot x \cdot \delta \beta \quad (17a)$$

Sustituyendo la asunción (d) en la ecuación (18a) tenemos que:

$$z^2 x \gamma = w^2 x \delta \quad (18a)$$

Despejando “x” de ambos lados de la ecuación (19a) tenemos que:

$$z^2 x \gamma = w^2 \varepsilon \quad (19a)$$

Donde $\exists \varepsilon < 1$

Sustituyendo las ecuaciones las (14a) y (20a) en la ecuación (10a) obtenemos que:

$$z^2 = \frac{w^2 x + w^2 \varepsilon y}{y} \quad (20a)$$

Separando términos semejantes de la ecuación (21a):

$$z^2 = w^2 \frac{x + \varepsilon y}{y} \quad (21a)$$

Despejando w^2 de la ecuación (22a) tenemos que:

$$w^2 = \frac{z^2 y}{x + \varepsilon y} \quad (22a)$$

Aplicando raíz cuadrado a ambos lados de la ecuación (23a), obtenemos que:

$$w = \left(\frac{y}{x + \varepsilon y} \right)^{1/2} z \quad (23a)$$

Regresando los términos de las ecuaciones (2a), (3a) y (4a) y aplicándolas a la ecuación (24a) obtenemos:

$$w = \left[\frac{P_{peak}(t)}{P_{avg}(t,f) + \varepsilon P_{peak}(t)} \right]^{\frac{1}{2}} a_j(t, f) \quad (24a)$$

Q.E.D

APÉNDICE 2

TÉRMINOS COMUNES USADOS EN LA INDUSTRIA DEL PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS

Apilamiento: Es un proceso que consiste en sumar todas las trazas que tienen un mismo valor en su encabezado (CDP, Offset, etc.) para obtener una sola traza, esta técnica por si misma también elimina ruido. Al conjunto de trazadas sumadas se le conoce como Apilado (stack).

CDP (Common Depth Point, por sus siglas en inglés): Es el punto de reflejo en el subsuelo donde ocurre la reflexión entre la fuente y el receptor; para el procesamiento 2D se numera de la traza más cercana a la fuente del primer registro considerando la dirección de adquisición.

Espectro de amplitudes: Es un gráfico que representa la parte real de la transformada de Fourier considerando una función continua $f(t)$; es decir, representa la amplitud de cada componente sinusoidal como una función de la frecuencia.

Filtro: reciben este nombre las herramientas que atenúan ruidos actuando en el dominio del tiempo, por ejemplo: filtro pasa-bajas-, pasa-altas y pasa-bandas o en el dominio frecuencia número de onda (F-K).

Gap: es la distancia que existe entre los receptores más cercanos al punto de tiro.

Gather CDP: Conjunto de trazas que se forma al unir todas las trazas existentes con el mismo número de CDP.

Longitud de operador: Es el tiempo total en que se graba una traza sísmica.

Múltiples: Son eventos sísmicos que han sufrido más de una reflexión en una misma interface.

Primeros arribos: Es la primera cresta de la ondícula que se registra al tiempo de llegada al receptor después de cada detonación y proporciona el criterio más importante para identificar reflexiones.

Velocidad NMO: Para una capa horizontal con velocidad constante, la curva de tiempo de viaje como una función del offset es una hipérbola. La diferencia entre el tiempo de viaje en un offset y en offset cero es llamada NMO.