

ANÁLISIS DE LA TÉCNICA MULTIFOCO
(MULTIFOCUSING) COMO HERRAMIENTA UTILIZADA EN
LA OBTENCION DE IMÁGENES SÍSMICAS EN UN SECTOR
DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

Liliana Paola Medina Guerrero

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
2013

ANÁLISIS DE LA TÉCNICA MULTIFOCO (MULTIFOCUSING) COMO HERRAMIENTA UTILIZADA EN LA OBTENCION DE IMÁGENES SÍSMICAS EN UN SECTOR DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

Liliana Paola Medina Guerrero

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de: Maestría
en Geofísica

Magister en Geofísica

Director

Ph.D. Luis Castillo

Línea de Investigación:

Geofísica – Métodos de procesamiento e interpretación sísmica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia

2013

(Dedicatoria)

Para aquel ser que desde el primer momento de su vida fue, es y seguirá siendo mi inspiración; Por quien me esfuerzo cada día para ser su orgullo y su alegría; Para aquel ser que me hace sentir la mujer más feliz del mundo, quien es mi gran amor, mi verdadero amor , el amor que jamás termina.....para ti Dany mi vida.....

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, En cuyas instalaciones se forjó mi conocimiento desde cuando decidí estudiar geología y luego continuar como geofísica.

A Dios, por fortalecer mi espíritu.

A mi Madre, siempre incondicional, quien de no ser por ella jamás hubiese logrado mis objetivos.

A Mi Esposo, por su tolerancia y su comprensión.

A Gabriel, por su guía desde el inicio de esta empresa.

A mis compañeros de estudio, Erwin, Maria C, Jhon, Andrés y Germán, quienes no me dejaron desistir.

A Carlfred, por su apoyo, sus ideas, y su constancia.

A Luis Castillo, por su guía y acompañamiento en este proceso.

A todos aquellos, quienes de una u otra forma influyeron para llevar a cabo este sueño.

Resumen

Imágenes en tiempo constituyen la primera aproximación en la identificación de estructuras prospectivas en el subsuelo, es así como buscando mejorar la definición estructural y estratigráfica de los rasgos presentes en un sector de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, se propone el uso de la técnica de procesamiento Multifoco (MF) como alternativa para el mejoramiento de la calidad de las imágenes sísmicas. Esta, a diferencia de la técnica convencional de procesamiento, apila trazas que no necesitan pertenecer a la misma familia de punto medio común (CMP) solo deben encontrarse en una apertura en cercanías a un punto central, dicha apertura esta condicionada por el tamaño de la zona de freznel, permitiendo un incremento considerable en la relación señal – ruido. Tres parámetros son fundamentales en este método: El ángulo de emergencia (β), y los radios de curvatura de los frentes de onda, uno relacionado con un punto de incidencia normal (R_{cre}) y otro al radio de curvatura de la onda normal (R_{cee}). Este documento incluye comparaciones de tipo cualitativo basadas en comparaciones de los rasgos geológicos presentes, y comparaciones de tipo cuantitativo , basadas en diferencias con respecto a escalares, cambios de fase y ruido, en dos líneas sísmicas procesadas con la técnica convencional y con la técnica Multifoco (MF); Logrando identificar las fortalezas de este método para áreas tectónicamente complejas y mostrando cómo es posible diferenciar un mayor número de rasgos geológicos además de mejorar la continuidad en la definición de eventos.

Palabras clave: Procesamiento no convencional, multifoco (MF), ángulo de emergencia, radio de curvatura, predictibilidad, piedemonte, antepaís.

Abstract

Time imaging is the first step in the prospective structure identification, looking for improve the structural and stratigraphic definition in an area in the Llanos Colombian basin. Multifocusing has been proposed as an alternative method to classical CMP stacking seismic processing in order to improve the seismic imaging. Multifocusing stacking traces that need not belong to the same CMP gather but, rather, whose are within the limits of an aperture in the vicinity of the central point, the size of such an aperture is determined by the size of the Fresnel zone allows a considerable increase in the signal-to-noise ratio. Three parameters are fundamental in this method: the emergence angle (β), and the wave front curvatures for the normal wave (R_{cre}) and normal-incidence-point wave (R_{cee}). This document includes qualitative comparisons based on geological features, and quantitative comparisons based on differences with scalar, phase changes and noise, in two lines processed with a conventional method and the MF method. It helps identify the strength of the method in geological complex areas showing how possible it is to visualize a greater number of geological features and improve the horizon continuity.

Keywords: Non-conventional seismic processing, multifocusing (MF), emergence angle, curvature radio, predictability, foothills, foreland.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	1
1. Generalidades	7
1.1 Localización Geográfica y Geológica.....	7
1.2 Información Disponible	11
2. Contexto Teórico	12
2.1 Procesamiento Convencional.	12
2.2 Imágenes Homeomórficas. Técnica Multifoco.	14
2.2.1 Parámetros Multifoco.	15
2.2.2 Corrección de Sobre tiempo Normal Multifoco.	22
2.2.3 Apilados Multifoco.....	23
2.2.4 Corrección de buzamiento	24
2.3 Multifoco y otras técnicas de procesamiento.	25
3. Metodología	26
4. Interpretación y Descripción de Resultados. Comparación de tipo Cualitativo 31	
4.1 Consideraciones Pre-Apilado	32
4.1.1 Procesamiento Técnica Convencional.	32
4.1.2 Procesamiento Técnica Multifoco. MF	33
4.2 Consideraciones Post-apilado	43
4.2.1 Procesamiento Técnica Convencional.	43
4.2.2 Procesamiento Técnica Multifoco MF	54
5. Interpretación y Descripción de Resultados. Comparación de tipo cuantitativo 66	
5.1 Repetibilidad, Rms Normalizada Y Predictibilidad.	66
5.2 Pruebas iniciales y Datos Teóricos.....	68
5.3 Comparación Procesamiento Técnica Multifoco MF Vs Procesamiento Convencional.....	73

6. Consideraciones finales	81
6.1 Riesgos en la interpretación de los datos.....	87
7. Conclusiones y Recomendaciones	89
7.1 Conclusiones	89
7.2 Recomendaciones	90
Bibliografía	91

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Localización del área de estudio.....	9
Figura 1-2: Mapa geológico.. ..	9
Figura 1-3: Columna estratigráfica detallada.....	10
Figura 2-1: Geometría para un reflector horizontal.....	12
Figura 2-2: Corrección NMO (Yilmaz 2001).	13
Figura 2-3: Apilado MF en coordenadas de receptoras y fuentes.	15
Figura 2-4: Método MF. Rayos central y paraxial en un medio arbitrario.....	16
Figura 2-5: Esquema geométrico de la corrección de tiempo MF.	18
Figura 2-6: Esquema relacionado al Elemento Reflectivo Común CRE (a-c) y al Elemento Evolutivo Común CEE (d-f).	20
Figura 2-7: Frentes de Onda CEE (a) y CRE (b).....	21
Figura 2-8: Configuración Multifoco y trazado de rayos.	22
Figura 2-9: Corrección de buzamiento.	24
Figura 3-1: Tratamiento de la línea merge.	27
Figura 3-2: Procesamiento técnica Multifoco. Sección Post Apilada MF.	28
Figura 3-3: Metodología en el análisis cualitativo de la información.	29
Figura 3-4: Metodología en el análisis cuantitativo de la información.	30
Figura 4-1: Semblanzas.....	33
Figura 4-2: Semblagrama.	35
Figura 4-3: Ángulos de Emergencia.....	37
Figura 4-4: Radiograma CEE.....	40
Figura 4-5: Radiograma CRE.....	41
Figura 4-6: Sección sísmica Apilada en tiempo.....	45
Figura 4-7: Espectros de Frecuencia. Línea Apilada Procesamiento Convencional. .	46
Figura 4-8: Sección sísmica Migrada y Pre-apilada en tiempo. Técnica convencional de procesamiento.....	48
Figura 4-9: Sección sísmica Post-apilada y Migrada en tiempo. Técnica convencional de procesamiento.....	50
Figura 4-10: Frecuencia Instantánea.	52
Figura 4-11: Fase.	53
Figura 4-12: Imagen de la Frecuencia Instantánea en la línea PSTM.Detalle.	54
Figura 4-13: Sección sísmica Multifoco Apilada.....	57
Figura 4-14: Espectros de Frecuencia. Línea Apilada MF.....	58
Figura 4-15: Sección Post Apilada MF.....	61
Figura 4-16: Frecuencia Instantánea. Línea Apilada MF (a), Línea MF Post (b).	63

Figura 4-17:	Imagen de la Frecuencia Instantánea en la línea Migrada post Apilada MF Detalle.	64
Figura 4-18:	Fase. . Línea Apilada MF(a), Línea MF Post (b).	65
Figura 5-1:	NRMS Vs Predictibilidad.	68
Figura 5-2:	Señal X generada y su auto correlación Y. 100 primeras muestras.	69
Figura 5-3:	NRMS vs Predictibilidad. Trazas calculadas.	70
Figura 5-4:	Señal X, escalar 2X, Autocorrelación de la señal X y Correlación cruzada de la señal X con su escalar. Primeras 100 muestras.	71
Figura 5-5:	Fase. Análisis de las 100 primeras muestras de la señal.	71
Figura 5-6:	Ruido. Análisis de las 100 primeras muestras de la señal.	72
Figura 5-7:	Traza 125.	73
Figura 5-8:	Correlación cruzada entre la traza MF y la traza convencional.	73
Figura 5-9:	NRMS vs Predictibilidad entre la traza 125 PSTM y la traza 125 MF.	74
Figura 5-10:	Rangos de frecuencia.	75
Figura 5-11:	Correlación entre Apilado convencional y Apilado MF.	76
Figura 5-12:	NRMS Vs Predictibilidad.	77
Figura 5-13:	NRMS &. Predictibilidad a lo largo de 2 segundos.	78
Figura 5-14:	NRMS Predictibilidad a lo largo de 4 segundos.	79
Figura 6-1:	Varianza.	83
Figura 6-2:	Línea PSTM (Amplitudes). Interpretación geológica.	84
Figura 6-3:	Línea PostSTM (Amplitudes). Interpretación geológica.	85
Figura 6-4:	Línea Migrada MF Post (Amplitudes). Interpretación geológica.	86

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Parámetros de adquisición de las líneas 2D.....	11
Tabla 5-1: Valores de NRMS y Predictibilidad.....	69
Tabla 5-2: Valores de Nrms y Predictibilidad para la traza 125	74
Tabla 6-1: Cuantificación del riesgo geológico.. ..	87

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos

Símbolo	Término
β	Angulo de emergencia normal al rayo
Σt	Sumatoria realizada en la ventana alrededor de la curva central
ΣR	Reflector

Abreviaturas

Abreviatura	Término
CEE	Elemento Evolutivo Común
CMP	Punto Medio Común
CRE	Elemento Reflectivo Común
CRS	Superficie de Reflexión Común
CRcP.	Punto Receptor Común
CSP.	Punto de Disparo Común
DMO	Corrección de sobretiempo buzante
FI	Frecuencia instantánea
G	Punto del receptor .Geófono
h	Offset medio
K_{NIP}	Curvatura del punto de incidencia normal
K_N	Curvatura de la onda normal
N	Número de trazas
NMO	Corrección de sobretiempo Normal
Offset	Distancia par fuente – receptor
P	Fase
PostSTM	Migración en tiempo Post Apilado
Rcee	Radio de curvatura de la onda normal
Rcre	Radio de curvatura de un punto de incidencia normal
R_N	Radio de curvatura de la onda normal
R_{NIP}	Radio de curvatura de un punto de incidencia normal

Abreviatura Término

RMS	Raíz Cuadrática Media
t_0	Tiempo inicial de referencia
V	Velocidad del medio
V_0	Velocidad cercana a la superficie del terreno
X	Punto medio entre la fuente y el receptor
X_0	Coordenada de X_0
X_G	Posición del receptor en la dirección del eje de la línea sísmica
X_S	Posición de la fuente en la dirección del eje de la línea sísmica
$x h t$	Dominio punto medio-offset medio-tiempo
$t^2(x, h)$	Tiempo hiperbólico del rayo reflejado
P	Fase
Fl	Frecuencia instantánea

Introducción

La prospección sísmica en Colombia se ha enfocado en el mejoramiento de las imágenes obtenidas en el subsuelo mediante el uso de diferentes técnicas. Una de ellas, corresponde a la técnica convencional de procesamiento la cual presenta configuraciones de punto medio común (CMP) para realizar las correcciones de los tiempo de tránsito resultando en una sección apilada. La técnica de procesamiento Multifoco (MF) (Gelchinsky et al., 1999) pertenece a un grupo de nuevas técnicas alternativas al procesamiento convencional de apilado que busca mejorar la calidad de las imágenes sísmicas basado en aproximaciones esféricas de los frentes de onda y en el apilamiento de una súper familia de trazas con una configuración fuente – receptor arbitraria. A diferencia de la técnica convencional, e igual que la técnica CRS (Superficie común de reflexión), la técnica Multifoco tiene en cuenta la extracción de un mayor número de parámetros, para el caso de configuraciones 2D, tres parámetros en total: El ángulo de emergencia (β), y los radios de curvatura de los frentes de onda, del punto de incidencia normal (R_{cre}) y de la onda normal (R_{cee}). La búsqueda sistemática de estos parámetros se basa en análisis de coherencia de los datos bajo la premisa del conocimiento de una velocidad cercana a la superficie y constante en la cercanía a un punto central.

Aplicaciones exitosas de la técnica Multifoco han sido reportadas en la literatura (Landa et al., 1999, Gurevich et al., 2002). La necesidad de encontrar una técnica que facilite la labor del intérprete y reduzca la incertidumbre en zonas complejas estructuralmente ha llevado a la industria a explorar nuevas alternativas que permitan reconocer los diferentes tipos de estructuras y /o eventos estratigráficos presentes en un área como es el caso de la cuenca de Llanos Orientales en donde la falta de definición de algunos reflectores sísmicos dificulta la labor exploratoria; Es así como la técnica Multifoco es propuesta a ser utilizada en el presente trabajo .

Antecedentes y Estado Actual.

En la industria del procesamiento sísmico, la técnica convencional de apilado utiliza configuraciones de punto medio común CMP (Common Mid Point), y correcciones como la de sobretiempo normal o NMO (Normal Move Out), además de la corrección de buzamiento, DMO (Dip Move Out) (Mayne (1962), Hubral y Krey (1980)) cuyos resultados atienden a la construcción de un modelo de velocidades.

Diferentes ecuaciones de tiempo han sido propuestas buscando mejorar la calidad del apilado de las trazas sísmicas a través del alineamiento de las reflexiones en familias de CMP, tal es el caso de la ecuación de segundo orden estándar de Dix. El uso de aproximaciones de orden mayor para correcciones NMO es posible y se han enfocado en análisis individuales de las familias de punto medio común (CMP). Sin embargo, son poco usadas en procedimientos de apilado debido a que requieren el conocimiento previo de múltiples parámetros sobre la misma cantidad de datos.

De Bazelaire (1988), propuso un acercamiento alternativo a la corrección NMO usando la siguiente ecuación:

$$t = t_0 - t + \sqrt{t^2 + \frac{x^2}{v^2}}, \quad (1.1)$$

la cual es una expansión de la ecuación del tiempo de viaje que considera dos parámetros independientes, un tiempo t y la velocidad v . Con esta expresión, para distancias fuente – receptor pequeñas, el parámetro v puede ser reemplazado por una velocidad constante cercana a la velocidad en superficie v_0 .

En contraste a lo anteriormente descrito, la técnica Multifoco propuesta por Berkovich et. al (1994) cita el procesamiento de imágenes utilizando la técnica homeomórfica que hace referencia a que cada traza apilada es construida por un conjunto de datos que no necesariamente necesitan pertenecer al mismo arreglo de punto medio común (familia de CMP), y cuyo par fuente receptor se considera en la vecindad de un punto central. Así la ecuación de tiempo normal se basa en aproximaciones esféricas de dispersiones de los frentes de onda cercanos a la superficie de observación.

De esta forma, el análisis de velocidad de estas familias de punto de disparo común (CSP), permite que las trazas sísmicas apiladas presenten un mayor cubrimiento lo que aumenta la relación señal-ruido, con respecto a datos obtenidos con el análisis de velocidad convencional equivalente utilizando familias de CMP, abarcando un rango más amplio de información .

En el caso de una configuración 2D, la corrección depende de tres parámetros medidos en el punto de dispersión común: el ángulo emergente (β), el radio de curvatura de un punto de incidencia normal (R_{cre}) y el radio de curvatura de la onda Normal (R_{cee}) para dos frentes de onda. Dichos radios corresponderían esencialmente a los mismos parámetros considerados por Muller et. al (1998), tales como radio de curvatura del punto de incidencia normal (R_{nip}) y el radio de curvatura de la onda normal (R_n), aplicados en el método de apilamiento conocido como CRS (common reflection surface).

Conceptualmente la técnica MF es muy parecida al método CRS (Muller et al., 1988, Jaguer et al., 2001) ya que ambos consideran una colección de trazas en una súper base (Súper familia MF) cercanas a un punto central. En ambos métodos la búsqueda de coherencias o similitudes entre trazas se desarrolla para obtener estimaciones de los parámetros de las correcciones de sobretiempos normal más que en un análisis convencional de velocidad en donde la búsqueda es realizada sobre un gran espacio multidimensional.

Trabajos anteriores relacionados a la técnica CRS fueron desarrollados en la Universidad Nacional de Colombia (Cárdenas (2006), y Jiménez (2008)) buscando comparar el desempeño de las técnicas CRS y NMO. Autores como Tygel et al., (1999), y Tygel & Santos (2007) basan sus comparaciones mas en similitudes que en diferencias.

Garabito et al., (2005) realiza una revisión de las aproximaciones de los tiempos de viaje CRS considerando una topografía suavizada y una rugosa, adicionalmente considera los tiempos de viaje con la técnica Multifoco en la topografía rugosa, utilizando ejemplos sintéticos y realizando las comparaciones entre las diferentes expresiones de los tiempos de viaje.

Adicionalmente, nuevas propuestas en apilado derivadas de soluciones analíticas para los tiempos de viaje de las reflexiones, son postuladas como aproximaciones más acertadas que el MF y el CRS para grandes separaciones fuente – receptor o grandes

separaciones de punto medio; citadas como superficies de reflexión común no hiperbólicas (en ingles Nonhyperbolic CRS) por Fomel et al., (2009).

En la industria contribuciones experimentales han desarrollado la técnica MF como promesa en el mejoramiento de imágenes. Ejemplos de trabajos en el mundo ilustran líneas procesadas en Siberia, Kamchatka (Rusia), Pakistán entre otros (Berkovitch et al., (2008), Korabelnikov et al., (2008)). En Colombia compañías como Pacific Rubiales (2011), Nexen (2010) y Cepcolsa (2011) han utilizado esta técnica encaminada a la obtención de mejores resultados en la prospección sísmica.

Planteamiento del problema.

Las imágenes sísmicas se han convertido en herramienta fundamental para la prospección de hidrocarburos desde su introducción, demostrando los altos beneficios en relación a su costo reduciendo los riesgos de la perforación de pozos secos y mejorando la estimación de las reservas y la planeación de proyectos. Es así como las inversiones en tecnología aportan un mayor significado en el desarrollo de los campos y las estrategias de producción.

Colombia se caracteriza por ser un país en donde la evolución tectónica de sus cuencas conlleva a importantes consideraciones de tipo exploratorio requiriendo la identificación de los diferentes estilos estructurales y el comportamiento de las secuencias estratigráficas. En la cuenca de los Llanos Orientales diferentes patrones estructurales están claramente establecidos, algunos asociados a sectores de mayor deformación en donde la sutura entre el escudo de Guyana y la provincia central hacen referencia al sector conocido como el frente de cabalgamiento del piedemonte llanero y otros patrones que reflejan menor deformación en el sector del antepaís. La relación entre las expresiones de los patrones mencionados y sus consecuencias en la exploración de hidrocarburos no ha sido lo bastante valorada especialmente en lo que se refiere a la definición de la geometría de los prospectos en los bloques yacentes a la falla frontal del sistema de cabalgamiento, en donde los sectores mas proximales al plano de falla se pliegan en amplios anticlinales que podrían resultar prospectivos de no deberse a afectos como pull ups debidos a capas de diferentes velocidades, fenómenos de dispersión de energía resultando en reflexiones más pobres en eventos profundos, entre otros.

El problema radica en la identificación de aquellos rasgos que permitan aumentar la prospectividad en el área, basándose en comparaciones entre dos técnicas de procesamiento, la técnica convencional y la técnica Multifoco que supone una mejora en la relación señal ruido gracias al apilado de una mayor cantidad de trazas.

Justificación y Objetivos.

Aportes en este tema no son muy extensos, es por esto que como objetivo general se busca identificar las fortalezas y limitaciones de la técnica Multifoco para el mejoramiento de la imagen sísmica en un sector de la Cuenca de los Llanos Orientales, utilizando descripciones de tipo cualitativo asociadas a descripciones geológicas de rasgos estructurales y estratigráficos, y descripciones de tipo cuantitativo basadas en conceptos de repetitividad y predictividad para considerar la similitud entre datos.

Como objetivos específicos se considera:

- Evaluar la técnica Multifoco como una alternativa en la definición de prospectos para reducir la incertidumbre y el riesgo exploratorio en la Cuenca.
- Realizar la comparación directa de los resultados obtenidos con la imagen sísmica utilizando la técnica Multifoco y la técnica convencional de apilado.
- Interpretar y verificar la respuesta de los datos sísmicos con imágenes derivadas del método Multifoco.

Alcances

En el presente trabajo se explica el fundamento teórico de la técnica Multifoco como herramienta basada en análisis geométricos para la consecución de una buena imagen y se crean inquietudes para seguir avanzando en la implementación de la técnica. No se presentan aquí formulaciones de programación del algoritmo MF.

Adicionalmente, como herramienta para llevar a cabo una comparación, se propone una metodología de trabajo basada en comparaciones cualitativas y cuantitativas de imágenes obtenidas con el procesamiento convencional y el procesamiento MF en un sector de la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia. La cualitativa, diferenciando rasgos estructurales y estratigráficos que proponen consideraciones importantes en la prospectividad en el área, y la cuantitativa, con el fin de cuantificar y distinguir las

diferencias entre una técnica y otra, asociadas a efectos como escalares, cambios de fase y ruido.

1. Generalidades

1.1 Localización Geográfica y Geológica

El área de interés se encuentra localizada en la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia (Figura 1-1). Extendiéndose desde un sector en las estribaciones mas orientales de la Cordillera Oriental conocido como el Piedemonte Llanero, hasta un sector enmarcado en la zona del Antepaís sobre rocas precámbricas del escudo de la Guyana.

Geológicamente, el área de estudio está enmarcada por una tectónica de tipo compresivo hacia el sector del piedemonte, y de tipo extensivo hacia el sector del Antepaís. La evidencia de fallamientos recientes ha sido completamente comprobada gracias a los levantamientos topográficos de superficie en donde se revelan trazos sinuosos en dirección Nor-Este /Sur – Oeste. Rasgos importantes de estas fallas frontales describen planos de vergencia Sur-Este con inclinaciones que oscilan entre los 25 y 35 grados y con ramificaciones frontales cuya trayectoria afecta rocas recientes. La mayoría de estas fallas se comportan como rampas laterales que permiten el enfrentamiento de diferentes unidades litoestratigraficas y son generadoras de pliegues de moderada amplitud. Estructuras anticlinales y sinclinales asimétricas generadas por propagación o flexión de fallas de mediana a gran amplitud, se localizan de manera casi paralela a los trazos de falla.

El sector del Antepaís se encuentra poco deformado, solamente en la parte más proximal al plano de falla frontal las unidades estratigráficas más antiguas se pliegan en amplios anticlinales (Figura 1-2)

La sucesión litoestratigráfica en el área abarca desde el Cretácico inferior hasta el Holoceno (Figura 1-3) representado por la Formación Fómeque, constituida principalmente por una potente sucesión de lodolitas y arcillolitas; La Formación Une, conformada por dos conjuntos de arenitas separados por una sucesión de sedimentitas

finas con restos carbonosos; La Formación Gachetá, con espesas secuencias grano decrecientes de cuarzenitas de grano medio a grueso y sucesiones de lodolitas físciles (shales);

El Grupo Guadalupe, consta de dos unidades areníticas y una unidad intermedia lodolítica; La Formación Guaduas, es un intervalo predominantemente lodolítico; La Formación Barco, está constituida principalmente por arenitas de grano grueso a muy grueso; La Formación Los Cuervos, cuyo conjunto inferior consta de paquetes gruesos de lodolitas con fragmentos carbonosos y restos vegetales; y el conjunto superior está conformado por secuencias espesas de lodolitas arcillosas y arcillolitas; La Formación Mirador, está constituida por secuencias grano decrecientes de conglomerados de guijos y gránulos redondeados de cuarzo, y arenitas de grano muy grueso a medio, en menor proporción grano fino y lodosas.

La Formación Carbonera consta de una alternancia de litologías denominadas como miembros "C8", "C7", "C6", "C5", "C4", "C3", "C2" y "C1", siendo las de números pares las correspondientes a sedimentitas finas y las de números impares corresponden a sucesiones con predominio de arenitas; La Formación León, constituida principalmente por sedimentitas finas arcillolitas, lodolitas y limolitas; y La Formación Guayabo está compuesta por interposiciones de bancos de arcillolitas arenosas.

Sobre el área de estudio, no se encuentra perforado ningún pozo; sin embargo, en sus cercanías se encuentran dos pozos que fueron extrapolados sobre esta para análisis; dichos pozos reportan el nombre de "Formación Charte" la cual corresponde a la base de la Formación Guayabo.

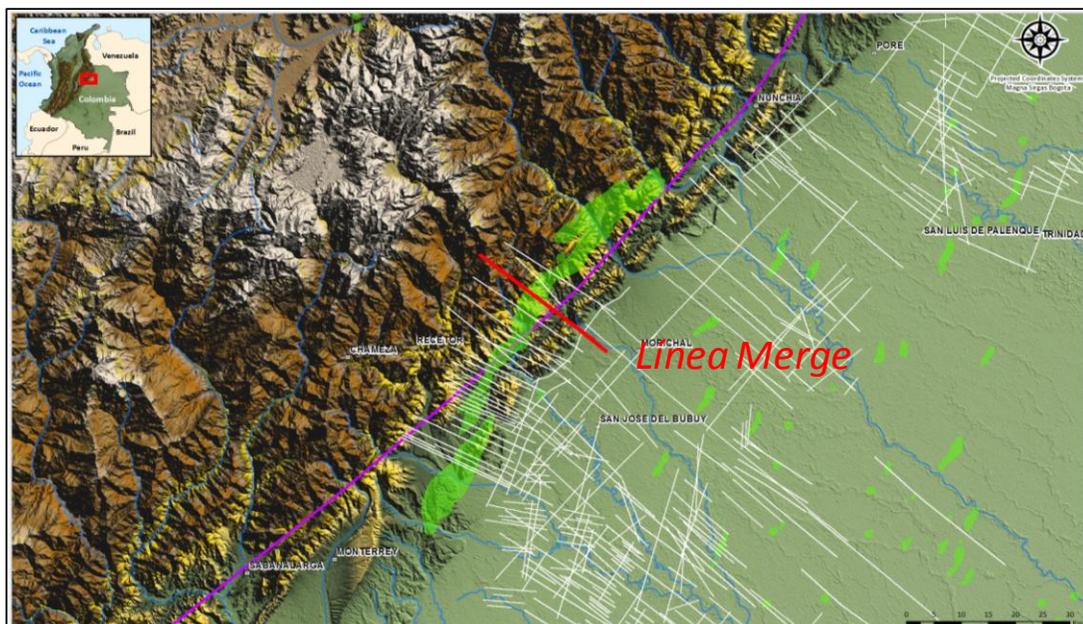


Figura 1-1: Localización del área de estudio.

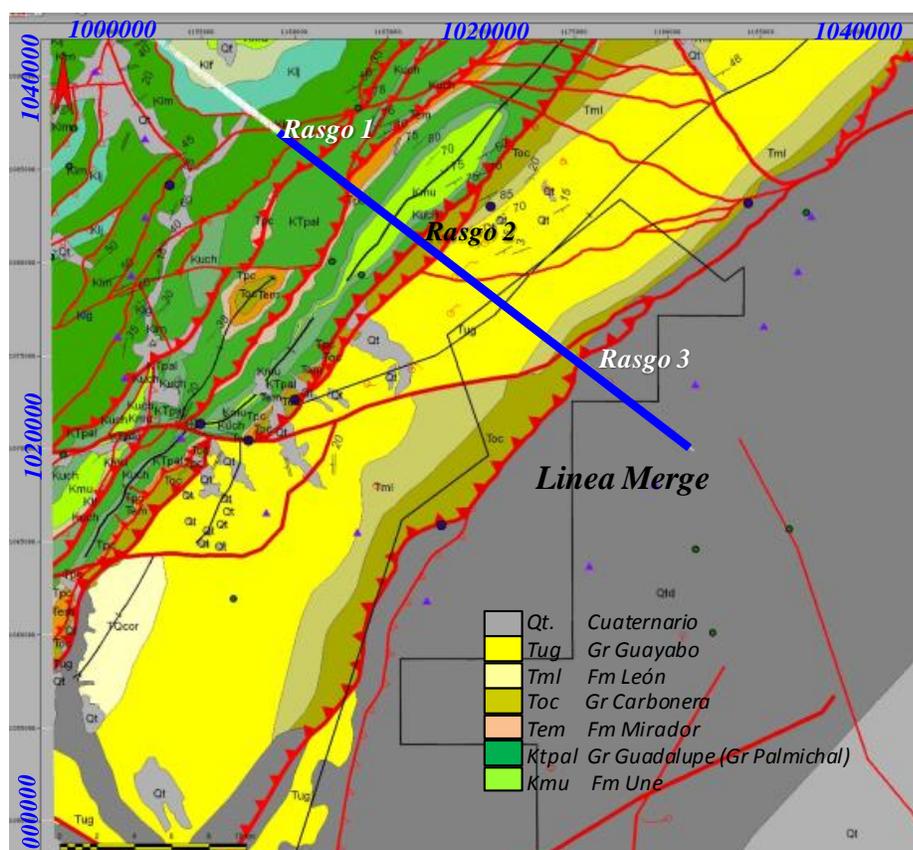


Figura 1-2: Mapa geológico. Note la presencia de tres rasgos estructurales importantes.

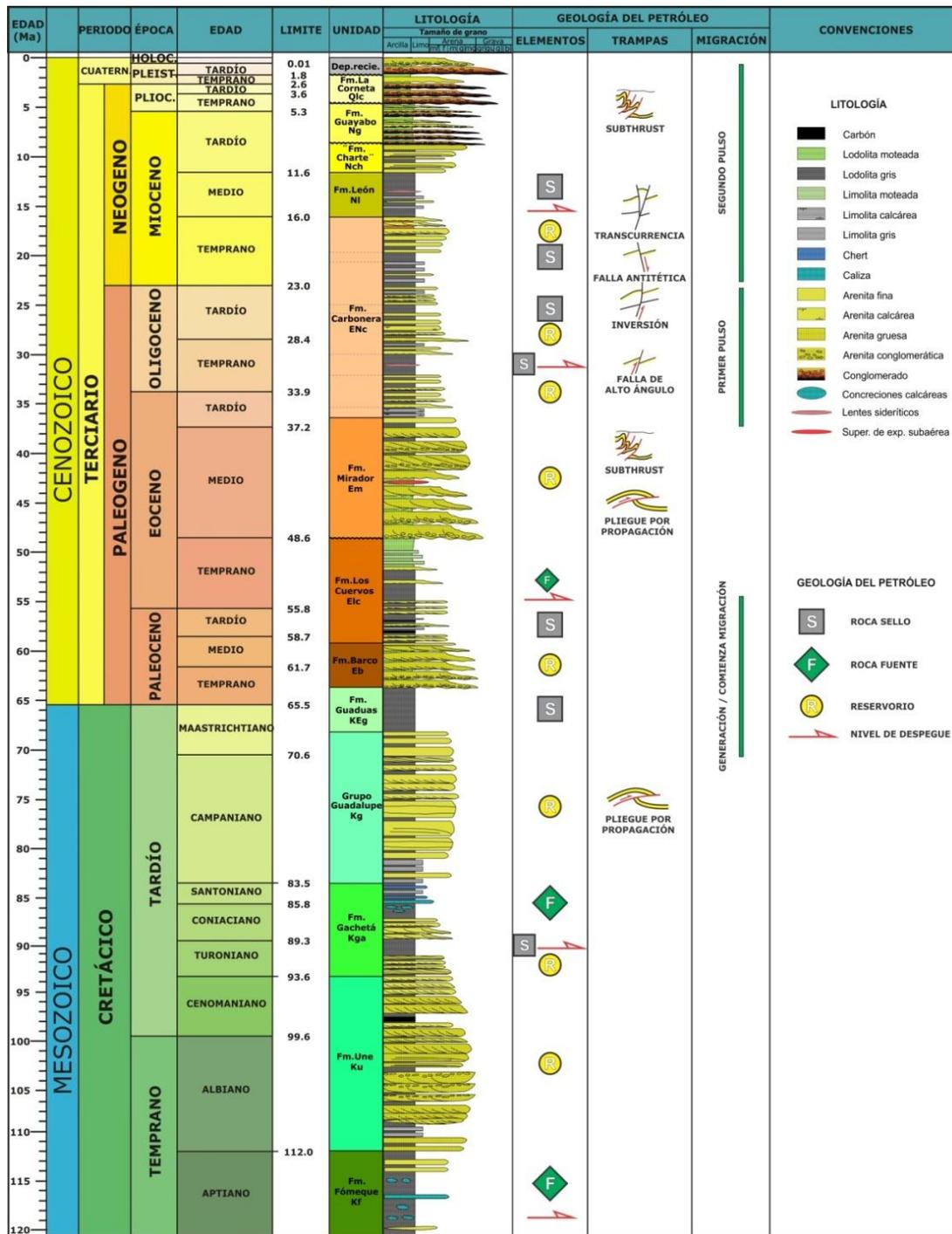


Figura 1-3: Columna estratigráfica detallada (Cepcolsa, 2011).

1.2 Información Disponible

El trabajo desarrollado se basó en la siguiente información geológica de superficie, datos sísmicos, e información de pozo:

- 2 líneas sísmicas, formato segy. Adquiridas durante los años de 1991 y 1992; cuyos parámetros básicos de adquisición se encuentran compilados en la tabla 1-1.

PARAMETROS DE ADQUISICION	
<i>Fuente de Energía</i>	<i>Dinamita</i>
<i>Carga</i>	<i>1800 gramos</i>
<i>Profundidad</i>	<i>3 - 10 m.</i>
<i>Receptores</i>	<i>Geófonos tipo GSC-20D</i>
<i>Frecuencia de receptores</i>	<i>10 Hz</i>
<i>Longitud entre receptoras</i>	<i>25 Km</i>
<i>Longitud entre puntos de disparo</i>	<i>25 Km</i>

Tabla 1-1: Parámetros de adquisición de las líneas 2D.

- Reportes de campo (reporte del observador y reporte de topografía) de las líneas 2D.
- Campos de velocidades. en formato segy y ascii para el procesamiento de tipo convencional.
- Mapas geológicos de superficie, levantados en campo durante el 2011.
- Información de 2 pozos cercanos al área de estudio (pozo A y Pozo B) referente a desviaciones, tablas tiempo profundidad, marcadores geológicos, y reportes finales de perforación.

2. Contexto Teórico

2.1 Procesamiento Convencional.

El objetivo de las reflexiones sísmicas es construir la imagen más fiel posible del subsuelo, que ayude a definir la geometría y posicionamiento en el espacio de los horizontes sísmicos, los cuales corresponden a eventos de continuidad espacial con carácter geológico.

El procesamiento de tipo convencional se basa en configuraciones de punto medio común (CMP) para corregir tiempos de tránsito con el uso de técnicas como la corrección NMO basada en la ecuación estándar de Dix. Figura 2.1 y Ecuación 2.1.

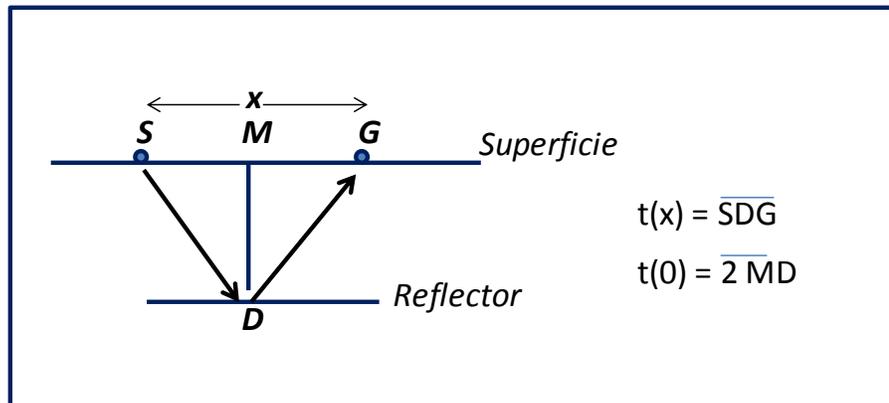


Figura 2-1: Geometría para un reflector horizontal. Tiempo de viaje (t) descrito por la hipérbola representada por la ecuación 2.1. M corresponde a la posición del punto medio en superficie entre una fuente arbitraria S y un receptor G, y D posición del punto medio en profundidad.

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{rms}^2}} \quad (2.1)$$

La corrección de Sobretiempos Normal (NMO) se refiere a la corrección por offset para cada uno de los eventos sobre la familia de CDP's. La trayectoria hiperbólica de los eventos de reflexión debe ser transformada en una línea horizontal (paso a offset cero) de manera que todas las trazas al ser sumadas estarán en fase. Figura 2-2.

La curva del tiempo de viaje de las reflexiones es calculada mediante la ecuación 2-1 (Yilmaz 2001). El cambio de tiempo es la diferencia entre el tiempo de viaje del receptor a una distancia x desde la fuente, y el tiempo de viaje t_0 a una distancia en donde el receptor y la fuente están ubicados en el mismo sitio (cero Offset).

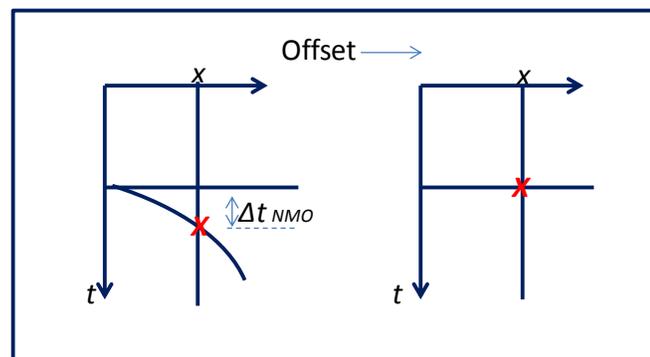


Figura 2-2: Corrección NMO (Yilmaz 2001).

Esta corrección, aplicada antes del apilado, busca aplanar todos los eventos para que la suma sea la de mayor energía. Se calcula a partir de las velocidades RMS estimadas para cada uno de los eventos, usando semblanzas o espectros de velocidad.

2.2 Imágenes Homeomórficas. Técnica Multifoco.

El término imágenes homeomórficas (HI) hace referencia a la teoría de las ondículas asintóticas para computar las correcciones de tiempo según varios tipos de arreglos de datos. Se incluyen el punto de disparo común (CSP), el elemento de reflexión común (CRE), y el elemento evolutivo común (CEE).

La teoría de las imágenes homeomórficas fue desarrollada como un método basado en la teoría de ondas y en procedimientos de correlación para el apilado. Incluye nuevas fórmulas de corrección de tiempos, y configuraciones fuente – receptor, para los cuales un frente de onda producido por un objetivo puede ser encontrado sin asumir una estructura suprayacente (Gelchinsky et al., 1989).

Parámetros para definir tiempos de viaje para cada uno de los arreglos de datos mencionados, incluyen el ángulo de emergencia (β) y el radio de curvatura R para cada frente de onda.

Con base en los fundamentos de las imágenes homeomórficas Berkovitch *et al* (1994) y Berkovitch (1996) desarrollaron la técnica Multifoco (MF); En donde las fórmulas de corrección de tiempo se basan en la geometría de ondas, y el arreglo de trazas no está limitado por un tipo particular de familia (el único requerimiento es que las fuentes y los receptores estén localizados en la vecindad sin importar si el arreglo es simétrico o no).

Esta colección de trazas se define como súper base o súper familia MF (Figura 2-3), cuya configuración está condicionada por el tamaño de la zona de fresnel.

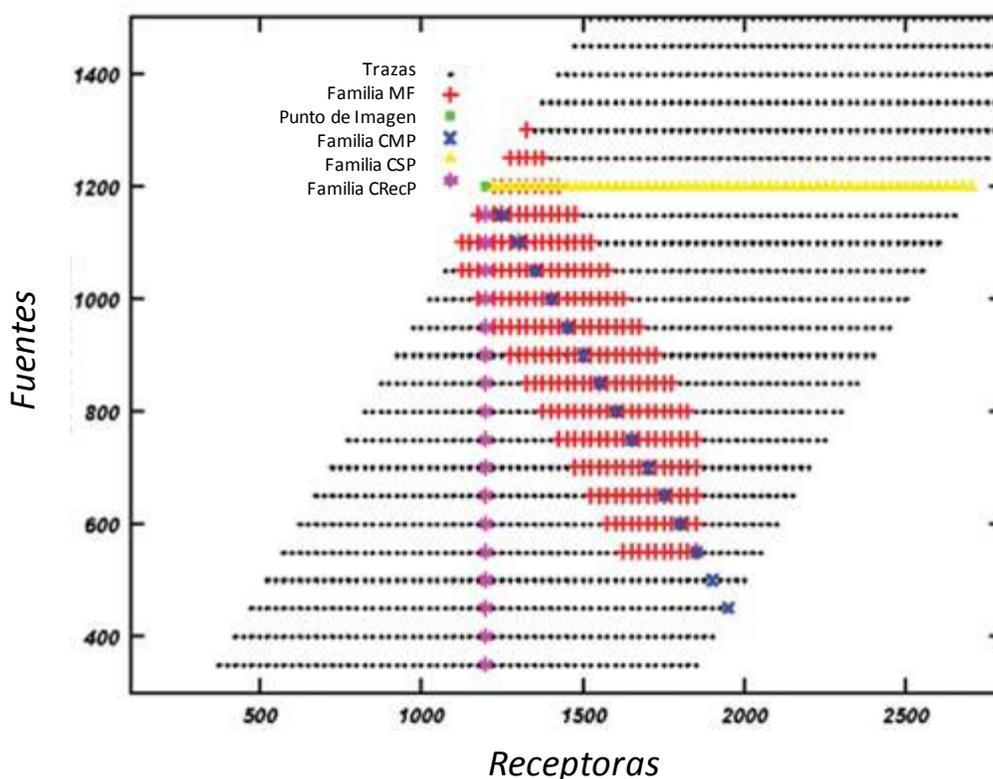


Figura 2-3: Apilado MF en coordenadas de receptoras y fuentes. Note el mayor numero de trazas en la familia MF (rojo) que en las familias de punto medio común (CMP), Punto de disparo común (CSP) y punto receptor común (CRecP). Tomada de Berkovitch et.al (2008).

2.2.1 Parámetros Multifoco.

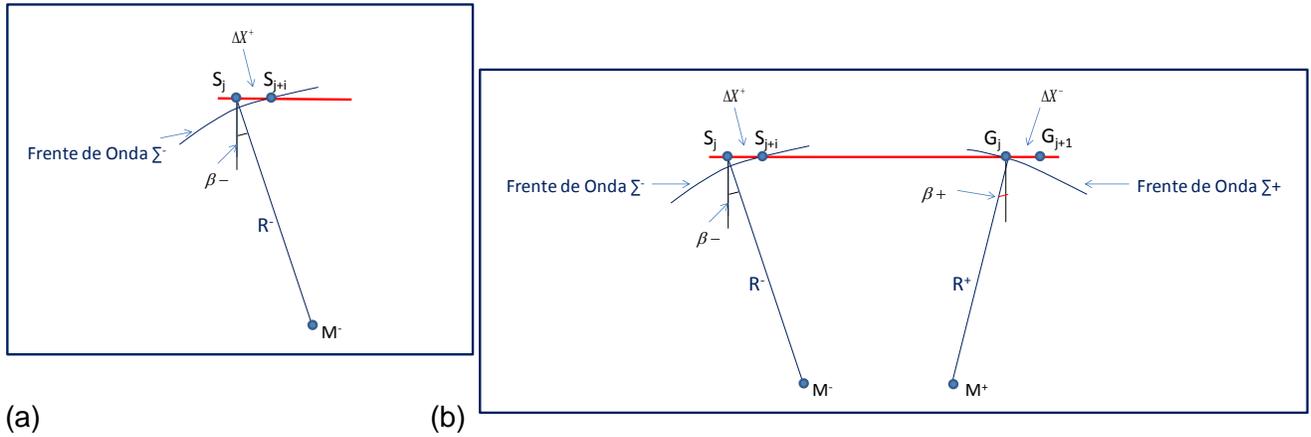
Si se consideran 2 fuentes S_j y S_{j+1} , y dos receptores G_j y G_{j+1} , donde j es la posición índice en una adquisición 2D (Figura 2-4), para computar las diferencias entre los tiempos de viaje a lo largo del rayo central $S_j G_j$ y el rayo paraxial $S_{j+1} G_{j+1}$, se tiene que:

$$\Delta t = t(S_{j+1} G_{j+1}) - t(S_j G_j). \quad (2.2)$$

Siendo el rayo central cualquier rayo arbitrario que atraviesa un sistema desde una interfase anterior a una posterior (Bortfeld, 1989), y el rayo paraxial un rayo cercano al rayo central desde la interfase posterior que regresa a la anterior.

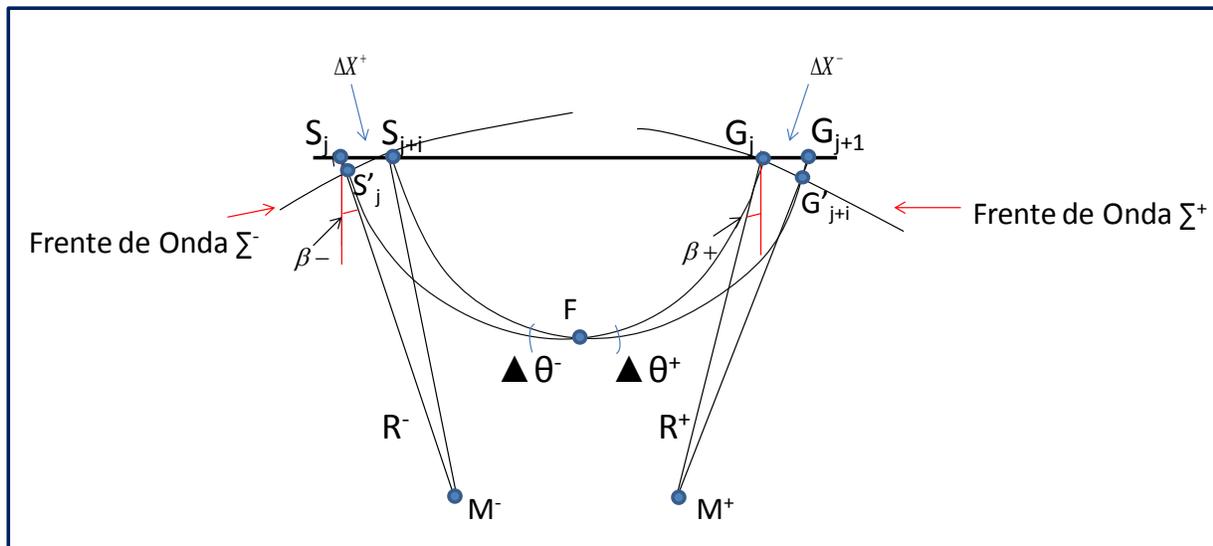
Los dos rayos definen un frente de onda común Σ con radio de curvatura R y ángulo de emisión desde la vertical β a S_j (Figura 2-4 (a)).

Propagando a lo largo del rayo central, el frente de onda arriba al punto G_j como un frente de onda Σ^+ con radio de curvatura R^+ y ángulo de arribo β^+ (Figura 2-4 (b)).



(a)

(b)



(c)

Figura 2-4: Método MF. Rayos central y paraxial en un medio arbitrario. ΔX^- y ΔX^+ equivalen a las distancias entre los puntos de los rayos central y paraxial, para las fuentes y para los receptores respectivamente. F es la fuente virtual de los frentes de onda Σ^- y Σ^+ que proceden de direcciones contrarias. Entre los puntos S'_j y S_{j+i} ; Y G_j y G'_{j+1} los frentes de onda son aproximadamente circulares con centros de curvatura M^- y M^+ y radios R^- y R^+ . Finalmente, β^- y β^+ son los ángulos de emergencia del rayo central.

Introduciendo un punto S'_j el frente de onda Σ^- y un punto G'_{j+1} sobre el frente de onda Σ^+ (Figura 2-4 (c)).

$$\begin{aligned}
 t(S'_j G_j) &= t(S_{j+1} G'_{j+1}). \\
 t(S_j G_j) &= t(S_j S'_j) + t(S'_j G_j) \\
 t(S_{j+1} G_{j+1}) &= t(S_{j+1} G'_{j+1}) + t(G'_{j+1} G_{j+1}) \\
 \Delta t &= t(S_{j+1} G_{j+1}) - t(S_j G_j) = t(G'_{j+1} G_{j+1}) - t(S_j S'_j). \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

Si se asume que las velocidades a lo largo de los segmentos son constantes en la zona cercana a la superficie, Los segmentos $S_j S'_j$ y $G'_{j+1} G_{j+1}$ podrían considerarse como líneas rectas y la diferencia entre los tiempos de viaje sería

$$\Delta t = \frac{|G'_{j+1} G_{j+1}|}{v^+} - \frac{|S_j S'_j|}{v^-} \quad (2.4)$$

donde v^+ y v^- serían las velocidades a las posiciones de receptor y fuente, respectivamente.

Las distancias $|S_j S'_j|$ y $|G'_{j+1} G_{j+1}|$ podrían considerarse como distancias no muy largas así los frentes de onda Σ^- y Σ^+ , pueden considerarse arcos con centros M^- y M^+ , y radio de curvatura R^- y R^+ , respectivamente.

De acuerdo a la figura 2-5 y por la ley de cosenos.

$$|M^+ G_{j+1}| = \sqrt{(R^+)^2 + 2 \text{sen} \beta^+ R^+ \Delta X^+ + (\Delta X^+)^2} \quad (2.5)$$

$$|M^+ G_j| = R^+$$

$$|M^- S_j| = \sqrt{(R^-)^2 + 2 \text{sen} \beta^- R^- \Delta X^- + (\Delta X^-)^2} \quad (2.6)$$

$$|M^- S_{j+1}| = R^-$$

siendo:

$$|\Delta X^-| = |S_j S_{j+1}|$$

$$|\Delta X^+| = |G_j G_{j+1}|$$

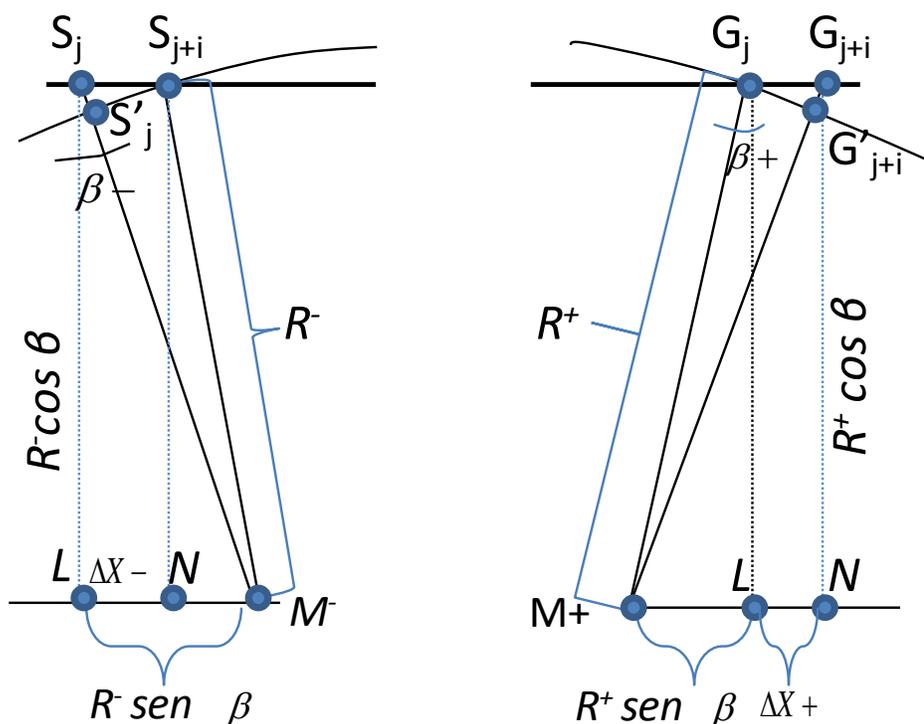


Figura 2-5: Esquema geométrico de la corrección de tiempo MF. Corresponde a la diferencia entre los tiempos de viaje de los frentes de onda a lo largo de los segmentos $S_j - S_{j+1}$ y $G_j - G_{j+1}$. Y así la expresión dada en la fórmula 2.4, para la diferencia en los tiempos de viaje puede ser escrita como (2.7)

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(R^+)^2 + 2 \sin \beta^+ R^+ \Delta X^+ + (\Delta X^+)^2} - R^+}{v^+} - \frac{\sqrt{(R^-)^2 + 2 \sin \beta^- R^- \Delta X^- + (\Delta X^-)^2} - R^-}{v^-}$$

En general, los ángulos β^+ y β^- son considerados iguales.

Babich Y Boldyrev (1991); Cerveny, (2001) y Ursin (1982); describen las distancias ΔX^+ y ΔX^- , y la geometría de los frentes de onda Σ^- y Σ^+ . R^+ y R^- están relacionados. Si consideramos un punto F (Figura 2-4) en la intersección de los rayos $S_j G_j$ y $S_{j+1} G_{j+1}$ podría llegar a ser una fuente virtual que emite frentes de onda en 2 direcciones: el primero, Σ^+ emitido por la fuente F y que arriba a los puntos $G_j G_{j+1}$ a un ángulo β^+ desde la vertical con radio de curvatura R^+ ; y el segundo frente, Σ^- emitido por la fuente F y que arriba a los puntos $S_j S_{j+1}$ a un ángulo β^- con radio de curvatura R^- .

La teoría del trazado de rayos dinámica (Cerveny, 1981, 1985, 2001; y Cerveny *et al.*, 1988) la cual describe la propagación y los radios de curvatura de los frentes de onda muestra que para un rayo reflejado existen dos frentes de onda: el elemento evolutivo común (CEE) (Keydar, 1990) y el elemento de reflexión común (CRE) (Gelchinsky, 1989) figura 2-6. Estos elementos tienen una dirección en el espacio y se reflejan como ondas de acuerdo a la ley de Snell.

Para ambos frentes de onda, se considera como cero la distancia entre la fuente y el receptor (cero offset) El frente de onda CEE se asocia a un reflector llamado “exploding reflector” y parte de un punto o centro evolutivo con la curvatura de ese reflector y se registra en un punto X_o (Figura 2-7 (a)). El frente CRE se asocia a la difracción desde un punto cualquiera en el subsuelo que se propaga con la mitad de la velocidad del medio (Figura 2-7 (b)).

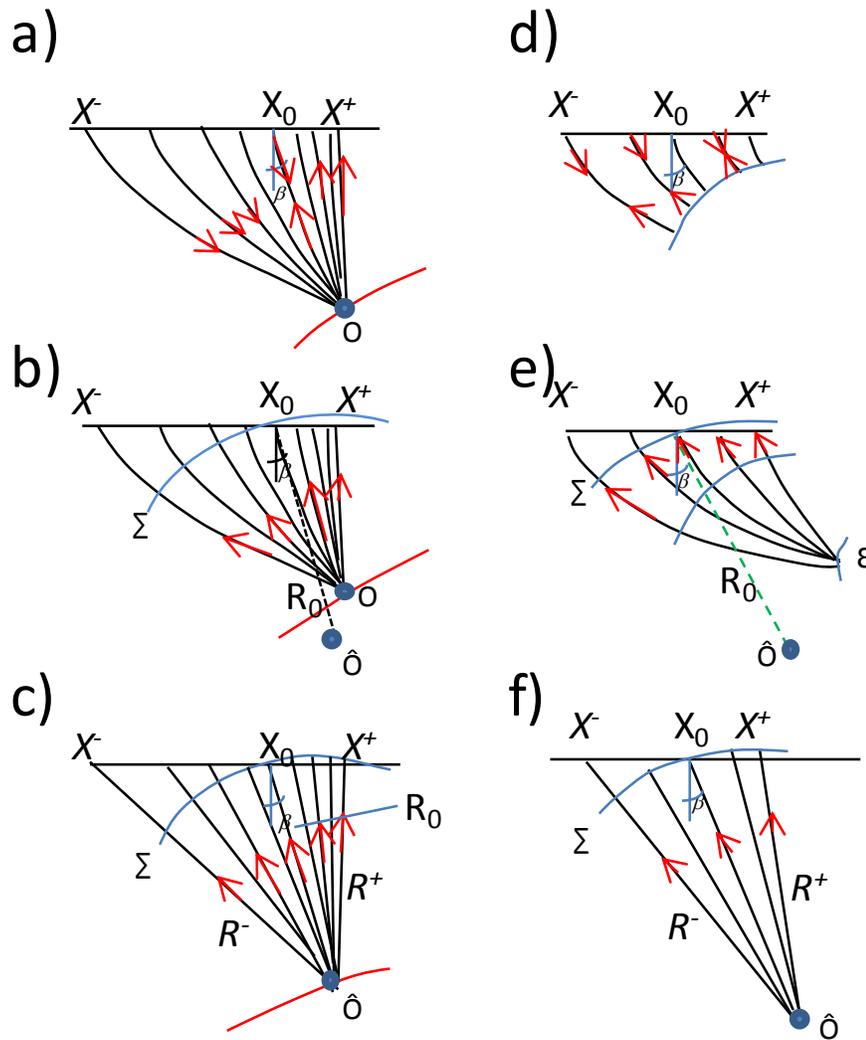


Figura 2-6: Esquema relacionado al Elemento Reflectivo Común CRE (a-c) y al Elemento Evolutivo Común CEE (d-f). a). Distribución CRE de los puntos fuente y receptor., b). Fuente ficticia O . (ángulos de incidencia y reflexión iguales), \hat{O} es el centro del arco Σ aproximándose al verdadero frente de onda., c) Imagen de la fuente \hat{O} localizada en el centro del frente de onda circular para el medio homogéneo., d) Distribución CEE para los puntos fuente y receptor del medio verdadero., e) Fuente ficticia de Snell a la fuente ϵ (evoluta) localizada en el CEE, \hat{O} es el centro del arco Σ aproximándose al verdadero frente de onda. f) Imagen fuente localizada en \hat{O} (Tomada de Berkovitch et al., 2008).

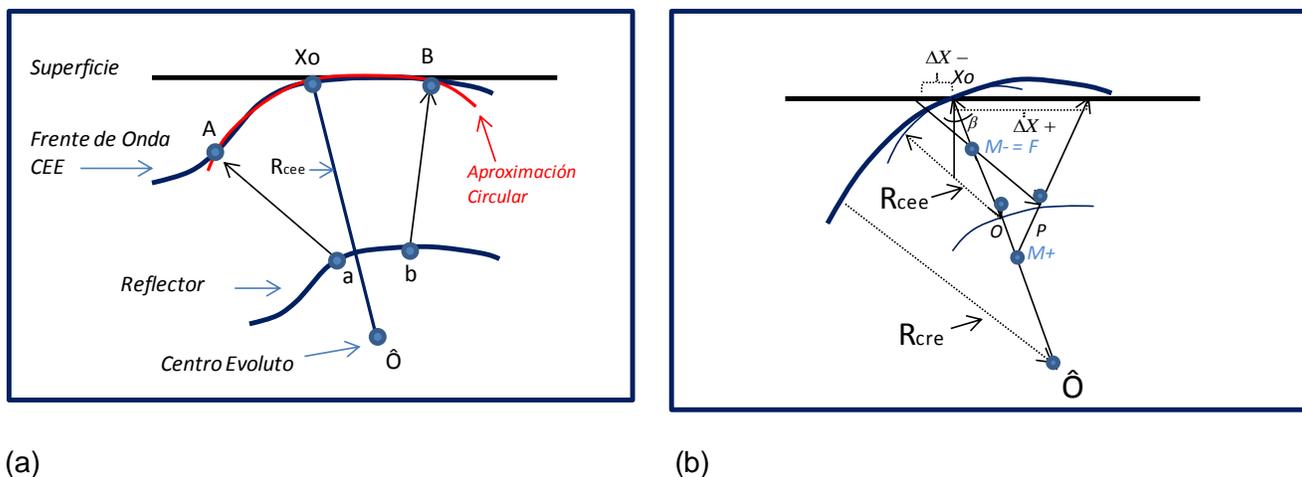


Figura 2-7: Frentes de Onda CEE (a) y CRE (b). ΔX^- y ΔX^+ equivalen a las distancias entre los puntos de los rayos central y paraxial, F es la fuente virtual del frente de onda. M^- y M^+ Centros de curvatura, y β ángulo de emergencia.

En cercanías al rayo central los frentes de onda asociados al CEE y CRE son aproximadamente circulares, permitiendo considerar los radios R_{cee} y R_{cre} . Con estas consideraciones es posible obtener las siguientes ecuaciones (Berkovitch et al., 2008):

$$R^+ = \frac{1+\sigma}{\frac{1}{R_{cee}} + \frac{\sigma}{R_{cre}}} \text{ y } R^- = \frac{1-\sigma}{\frac{1}{R_{cee}} - \frac{\sigma}{R_{cre}}} \quad (2.8)$$

donde R^+ y R^- depende de la posición de F y las propiedades del medio, y σ corresponde al factor focal para el cual no existen soluciones analíticas, pero aproximaciones numéricas pueden ser referidas para cortas distancias fuente receptor. El factor focal describe el punto de intersección del rayo central y paraxial (el de incidencia normal y el cero offset).

$$\sigma = \frac{\Delta X^+ - \Delta X^-}{\Delta X^+ + \Delta X^- - 2 \frac{\Delta X^+ \Delta X^-}{R_{cre}} \text{ sen } \beta} \quad (2.9)$$

Esta ecuación corresponde a la expresión para topografía planar (Multifoco planar).

El problema de viaje para las reflexiones de reflectores esféricos ha sido conocido como "problema de Alhazen's (Dorrie, 1965; Neumann, 1998) y se basa en el problema para

encontrar un rayo de luz reflejado sobre un espejo esférico desde la fuente al receptor. Expresiones analíticas que incluyen ecuaciones algebraicas de cuarto orden son consideradas para resolver este problema (Burnside & Panton, 1960).

2.2.2 Corrección de Sobretiempo Normal Multifoco.

Las formulas del tiempo de viaje para la técnica Multifoco proveen una adecuada representación de los tiempos de arribo para configuraciones arbitrarias fuente-receptor.

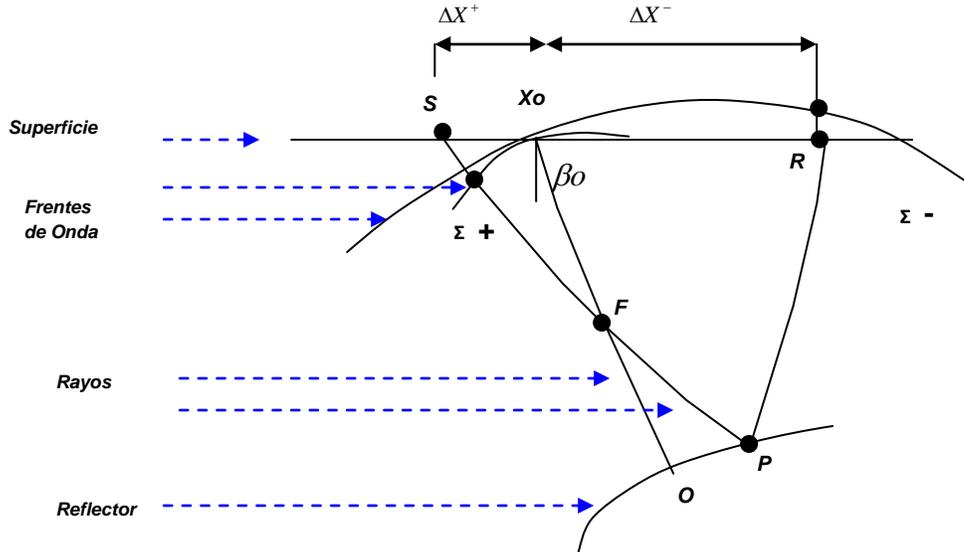


Figura 2-8: Configuración Multifoco y trazado de rayos (Tomada de Berkovitch et al., 2008).

La figura 2-8 describe una típica configuración 2D. Los rayos normales comienzan desde un punto en superficie X_o , el cual es referido como punto Central, con un ángulo β_0 e incidencia normal al punto O sobre el reflector. Rayos paraxiales desde una fuente arbitraria cruzan dicho rayo central en el punto F y en la superficie en el punto R . El punto F puede ser considerado como fuente ficticia de dos frentes de onda Σ , donde el frente Σ^+ es emitido desde el punto F hacia la superficie y el frente de onda Σ^- es emitido hacia el reflector.

La corrección de tiempo normal para esta configuración arbitraria en cercanías al rayo normal está descrita por Berkovitch et. al (1994) según la ecuación 2.7.

En esta ecuación, $\Delta X+$ y $\Delta X-$ son las distancias entre fuente y receptor con respecto al rayo central; $R+$ y $R-$ corresponden a los radios de curvatura de los frentes de onda ficticios, $\Sigma+$ y $\Sigma-$ en el plano vertical; V_0 es la velocidad cercana a la superficie, la cual se asume constante a largo de la línea central de observación, R_{cee} y R_{cre} son los radios de curvatura de los dos frentes de onda, en donde el primero es formado por los rayos normales emitidos por diferentes puntos sobre el reflector, y el segundo es formado por una fuente de donde el rayo cero offset es emitido desde el punto central.

En la ecuación del tiempo de viaje (ecuación 2.7), el primer término corresponde al tiempo de viaje a lo largo del segmento SF y el segundo término corresponde al tiempo a lo largo del rayo 'FPR' (Figura 2-8).

La dependencia de los radios $R+$ y $R-$ de la posición fuente receptor es contenida en el parámetro σ , tal que si $\sigma = 0$, $R+ = R- = R_{cee}$ o Radio de curvatura de la onda normal (el punto F coincidiría con el centro de la curvatura del frente de onda normal, o configuración cero offset). Por su parte, si $\sigma = 1$ ó $\sigma = -1$, $R+$ y $R-$ serían iguales a cero y corresponderían a configuraciones de fuente común y receptor común; finalmente si $\sigma = \infty$, $R+ = R- = R_{cre}$ (el punto F coincide con O).

2.2.3 Apilados Multifoco.

Para la teoría Multifoco se aplican varios rayos localizados en la cercanía de un rayo central y los tiempos de viaje a lo largo de estos rayos pueden ser utilizados para definir el apilado el cual es construido de trazas que pertenecen a la misma familia. Al hacer referencia a la localización de la fuente y el receptor se escoge una máxima distancia de un punto central la cual es determinada por la zona de Fresnel.

Para casos 2D deben considerarse tres parámetros, el ángulo de emergencia β y los radios de curvatura de los frentes de onda $R+$ y $R-$. Los valores $\Delta X+$ y $\Delta X-$ son conocidos de los parámetros de adquisición; valores de β , y los radios R_{cee} y R_{cre} , son necesarios

para conseguir σ y R_+ y R_- ; esta tripleta se pueden conseguir con una búsqueda sistemática basada en la ecuación 2.7.

2.2.4 Corrección de buzamiento

La técnica Multifoco permite encontrar los valores óptimos de radio de curvatura R y ángulo emergente β (Figura 2-9) el cual es dependiente del buzamiento del reflector, para el punto central X_0 al tiempo t_0 .

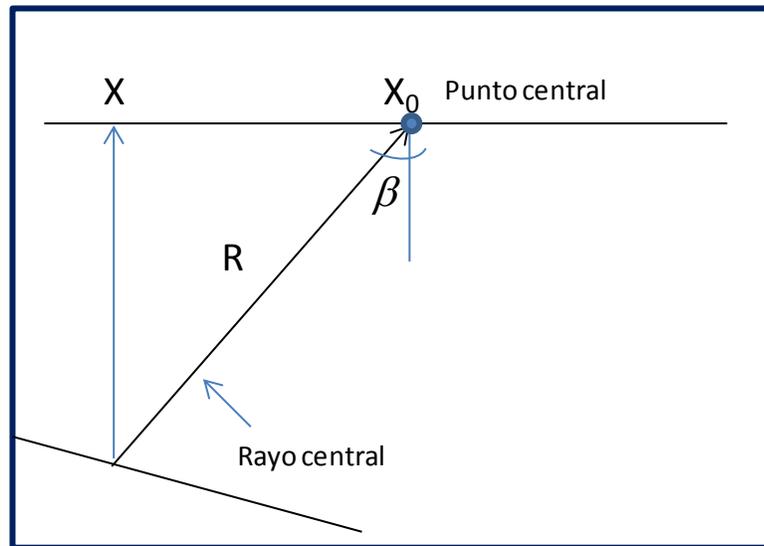


Figura 2-9: Corrección de buzamiento.

El valor de R es calculado sin considerar las velocidades RMS, por la fórmula:

$$V_{MF-RMS} = \sqrt{\frac{2RV}{t_0}}, \quad (2.10)$$

El proceso de la corrección de buzamiento es una transición de V_{MF-RMS} a la posición más adecuada conectada con el rayo vertical.

2.3 Multifoco y otras técnicas de procesamiento.

En el apilamiento convencional CMP el mejoramiento de la relación señal / ruido a través de la suma de trazas está limitado por el número de esas trazas relacionado al punto medio común (CMP) y al grado de alineamiento y similitud de la señal. La técnica MF, abarca un rango más amplio de información, en este, la corrección de sobretiempo normal es apropiada para reflexiones registradas a varios ángulos, para interfaces curvas y para distancias fuente – receptor arbitrarias. El número de posiciones fuente – receptor es mayor, esto basado en estimaciones del tamaño de la zona de Fresnel.

Al igual que la técnica CRS, apila datos pertenecientes a múltiples localizaciones y requiere la estimación de varios parámetros en adición a la velocidad de apilamiento convencional. Los parámetros de estas expresiones de moveout se basan en procedimientos de análisis de coherencias que maximizan las funciones de semblanza de la súper familia. Una velocidad cercana a la superficie es considerada en las cercanías a un punto central pero que puede variar de un punto a otro, sin embargo, como consecuencia de una errónea escogencia en la velocidad, erróneos ángulos de emergencia pueden ser extraídos. La correlación se repite para cada punto central obteniendo la imagen final.

CRS emplea aproximaciones multiparamétrica hiperbólicas de reflexión de los tiempos de viaje justificadas en las series de expansión de Taylor a lo largo de un rayo de referencia que podrían llegar a perder precisión en grandes separaciones fuente – receptor.

Los datos sísmicos apilados de manera convencional se describen en función de tiempo, un punto medio común y la mitad de la separación fuente – receptor, además de un parámetro de velocidad efectiva, cuya aproximación moveout representa la forma de la hipérbola. Los apilados MF y CRS presentan una forma diferente, en donde el punto medio no es considerado, en su lugar, una serie de datos pertenecientes a una vecindad son tenidos en cuenta, al igual que parámetros adicionales que describen frentes de onda y geometrías del rayo (Gelchinsky et al., 1999).

3. Metodología.

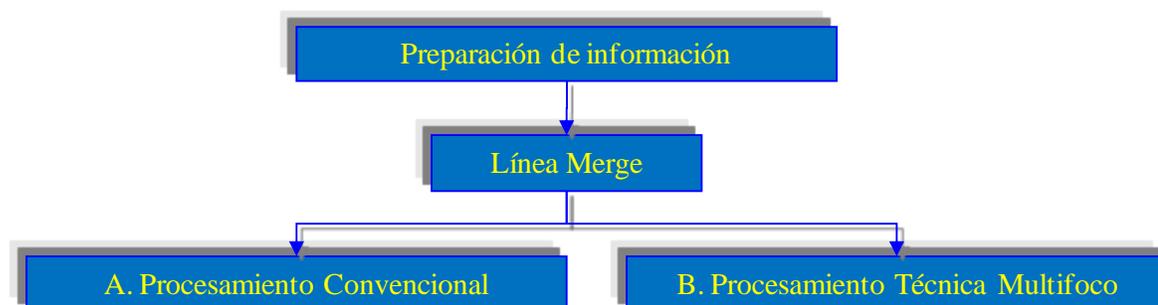
El trabajo se realizó en tres etapas. En la primera se incluye la selección del área de estudio y la compilación de datos. En la segunda, el reprocesamiento de la información con la técnica convencional de procesamiento y con la técnica Multifoco. Y la tercera, el análisis realizado bajo la óptica de descripciones de tipo cualitativo y de tipo cuantitativo. Las tres etapas se describen a continuación:

En la primera etapa, se realizó la revisión de la información sísmica disponible para diferentes sectores de la Cuenca de los Llanos Orientales.

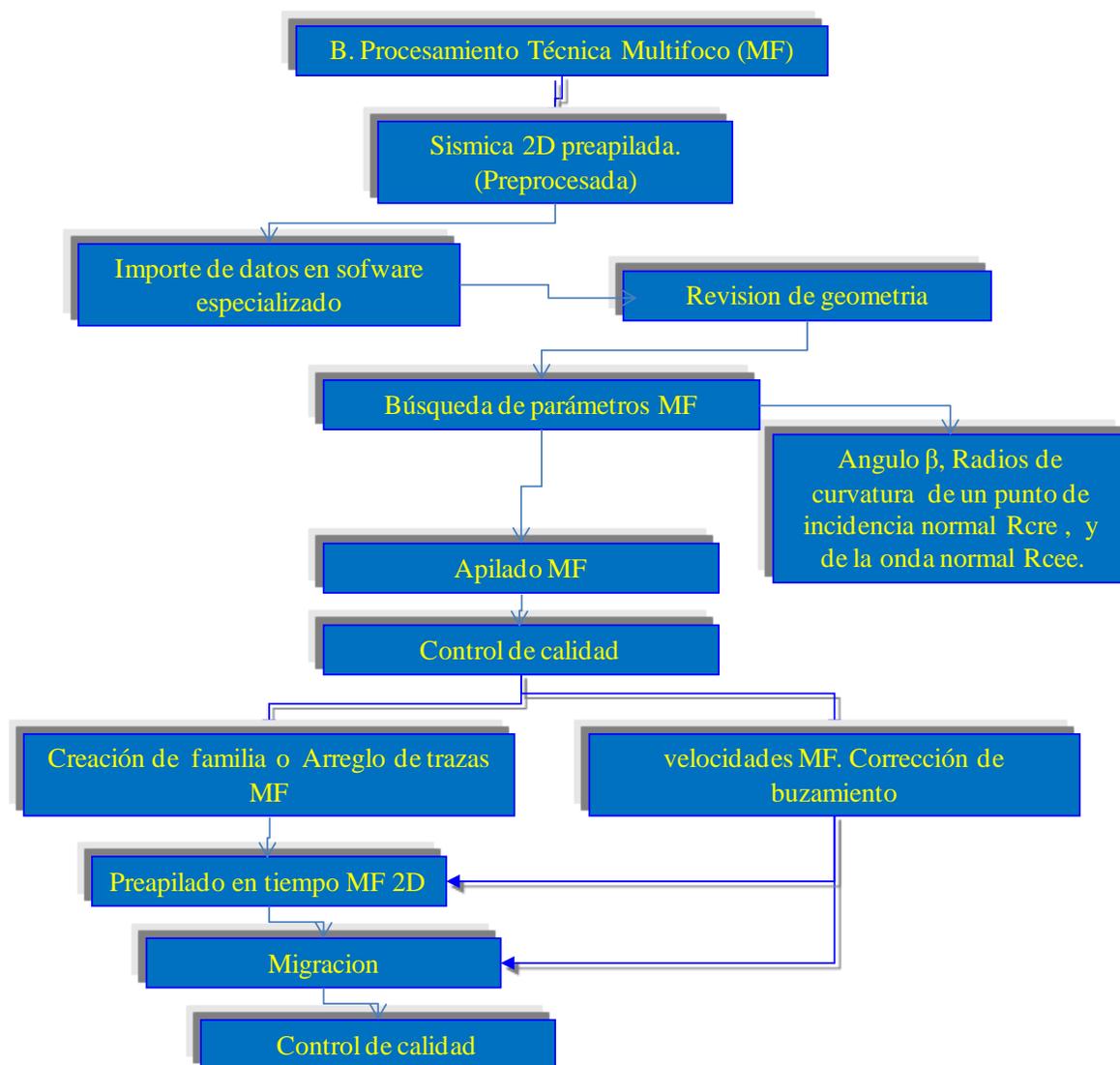
Se escoge un sector ubicado desde las estribaciones del Piedemonte Llanero al Oeste, hasta parte del Antepaís al Este. Estos sectores son reconocidos geológicamente por su complejidad que va de alta a media respectivamente, en los cuales se presentan dificultades en la interpretación de eventos por problemas de iluminación, tales como sombras de falla o falta de coherencia lateral de eventos sísmicos, resultado de la interpretación convencional del campo de velocidades de migración.

La cobertura de esta zona, 25 Km aproximadamente, se realiza con dos líneas sísmicas 2D.

La segunda etapa, correspondió a la preparación de la información. Se optó por realizar bajo la modalidad de reprocesamiento con la técnica convencional de proceso, la unión de las líneas que se consideraron como relevantes para el estudio. El resultado fue una línea "Merge" (Figura 2-5), que reflejaba las diferentes condiciones estructurales y las complejidades que permitirían ilustrar las diferencias entre las técnicas de procesamiento convencional y Multifoco. Una vez obtenida se dio paso al procesamiento con la técnica MF (Figura 3-1, Figura 3-2 y Anexo G).



(a)



(b)

Figura 3-1: Tratamiento de la línea merge(a). Secuencia de procesamiento técnica MF (b).

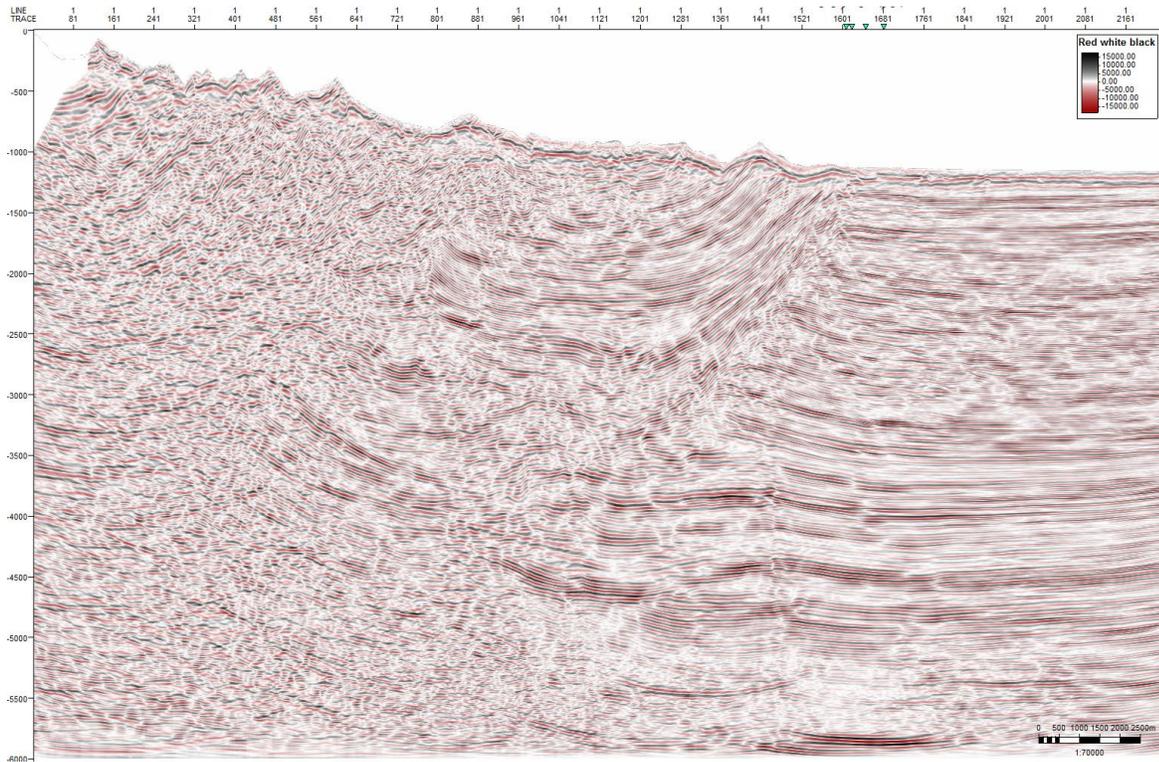


Figura 3-2: Procesamiento técnica Multifoco. Sección Post Apilada MF.

La tercera etapa, abarcó el análisis de la información. Esta fue realizada desde dos ópticas diferentes:

Un análisis de tipo cualitativo donde se incluye el desarrollo de un flujo de trabajo o método comparativo, encaminado a evaluar las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas utilizadas en el procesamiento, basándose en la descripción de los campos de velocidad, la preservación de atributos sísmicos, y la interpretación de eventos y estructuras de interés (Figura 3-3).

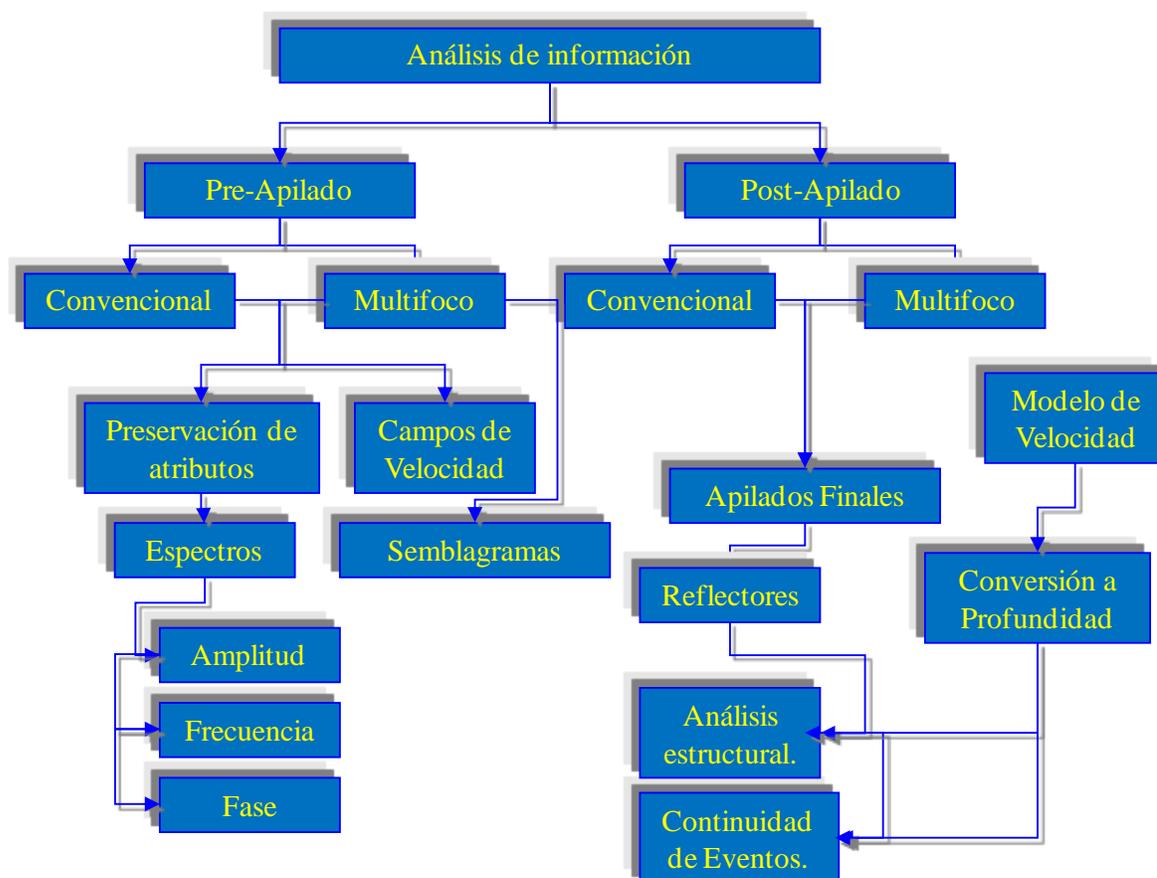


Figura 3-3: Metodología en el análisis cualitativo de la información.

Y un análisis de tipo cuantitativo cuya metodología desarrollada para la comparación de los productos convencional y MF se observa en la figura 3-4. Para este análisis, se utilizaron trazas sintéticas para mostrar los efectos de escalares, el ruido y los cambios en tiempo o “shifts” sobre una traza sintética conocida; el conocimiento de tales respuestas sirve de base para identificar efectos análogos al operar con los datos reales. Cálculos de correlaciones y auto correlaciones son considerados como indicadores de similitud.

Una vez demostrados los efectos anteriormente nombrados sobre la traza sintética, se procede a operar con trazas extraídas de los datos MF y Convencional; Y posteriormente con la totalidad de las líneas.

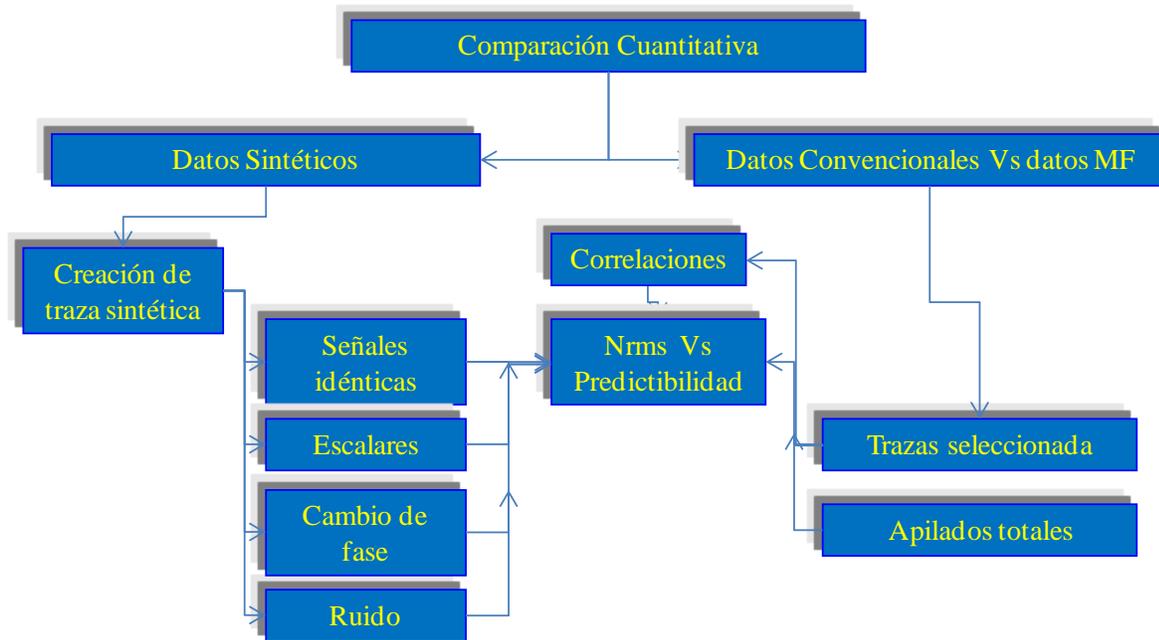


Figura 3-4: Metodología en el análisis cuantitativo de la información.

4. Interpretación y Descripción de Resultados. Comparación de tipo Cualitativo

Los métodos de procesamiento como la técnica Convencional (CMP) y la técnica Multifoco (MF) buscan aislar el ruido de la señal, preservando así las reflexiones y obteniendo la mejor imagen del subsuelo.

Al considerar la construcción de imágenes sísmicas y la técnica MF, nuevos conceptos deben ser introducidos, los cuales son el resultado de los procedimientos de correlación llevados a cabo y reflejados en la construcción de cinco secciones en tiempo. Estas secciones incluyen:

- ✓ La sección en tiempo, que corresponde al campo de onda apilado.
- ✓ El Semblagrama, que representa los valores óptimos de semblanzas.
- ✓ El Angulograma β , que muestra los valores óptimos de los ángulos de llegada a un punto x .
- ✓ El Radiograma CEE (r_{cee}), que representa los valores óptimos de los radios del frente de onda CEE o radio de curvatura de la onda normal.
- ✓ El Radiograma CRE (r_{cre}), que representa los valores óptimos de los radios del frente de onda CRE o radio de curvatura del punto de incidencia normal.

La interpretación de datos se realiza en dos etapas: la primera, en donde se verifican los parámetros necesarios para la obtención de los productos obtenidos con las diferentes técnicas de procesamiento, reunidas en las consideraciones pre-apilado del presente documento. Y la segunda etapa en donde se reúnen las diferencias o similitudes

encontradas en los productos apilados obtenidos con ambas técnicas de procesamiento, además de las secciones migradas.

4.1 Consideraciones Pre-Apilado .

4.1.1 Procesamiento Técnica Convencional.

- **Campos de Velocidad.**
- **A. Semblanzas**

Se llevo a cabo un primer trabajo de velocidad, mediante semblanzas convencionales, en donde las trazas fueron agrupadas por CMP y porcentajes de velocidades de apilado fueron desplegados con el fin de ajustar y horizontalizar los eventos buscando corregir los tiempos de viaje de las reflexiones.

El segundo fue basado en las estáticas de refracción, el cual proporcionó un mejor alineamiento de la energía reflejada y aportó una mejor estimación de las velocidades de apilamiento, con puntos de control cada 500 metros.

Finalmente, se realizaron mejores ajustes en las velocidades.

Tal y como lo muestra la figura 4-1, en las semblanzas se logra un óptimo alineamiento de eventos en cuanto al picado de velocidades se refiere.

Para optimizar los resultados se requiere contar con la experiencia del personal y un buen conocimiento en cuanto a la geología del área. Para este caso específico, en la Cuenca de los Llanos Orientales, inversiones de velocidad están presentes a lo largo de la columna estratigráfica. De no conocerse la geología podría incurrirse en el error de forzar los resultados a seguir la tendencia de aumento de velocidad con la profundidad.

La inversión de velocidad más conocida se presenta en la Formación León. Esta formación, está constituida principalmente por sedimentos finos como se mencionó con anterioridad, y a lo largo de la cuenca se presenta como un paquete sordo a nivel acústico que sirve como marcador sísmico.

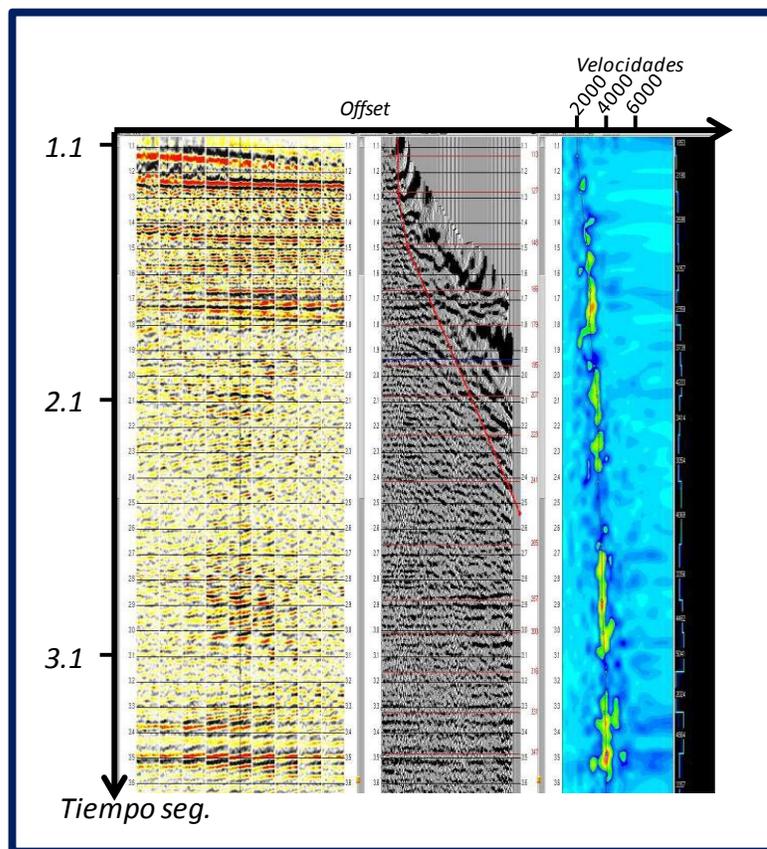


Figura 4-1: Semblanzas. Panel 1. Familia CMP de trazas con corrección NMO. Panel 2. Familia CMP de trazas. Panel 3. Espectro de velocidades.

4.1.2 Procesamiento Técnica Multifoco. MF

- Campos de velocidad
- A. Semblagramas

En la técnica MF se utiliza un modelo de velocidad a priori.

Una aplicación especializada permitió el cálculo de las velocidades para cada muestra agrupada en una súper familia MF. Los cálculos se basan en pseudo-semblanzas y correcciones en tiempo parecidas al NMO.

Los Semblagramas son imágenes que representan valores de semblanzas y que pueden ilustrar la imagen del subsuelo de una manera coherente (Figura 4-2).

En el Semblagrama, se muestra una mayor coherencia de las ondas a partir de valores de 0.3, que podría considerarse bajo, sin embargo, para esta zona y debido a la complejidad estructural, representa un valor óptimo. Una parte considerable de datos calificados como óptimos se sitúan entre 2000 ms y 5500 ms y Trazas de la 1200 a 2200, en el sector Este de la línea, lo que con anterioridad se llamó la zona del Antepaís o zona adyacente al cinturón montañoso, evidenciando una zona de baja deformidad. El sector del piedemonte, también representa alta coherencia pero solo en los sectores más someros, alrededor de 2000 ms y 2300 ms, trazas entre 800 y 1200.

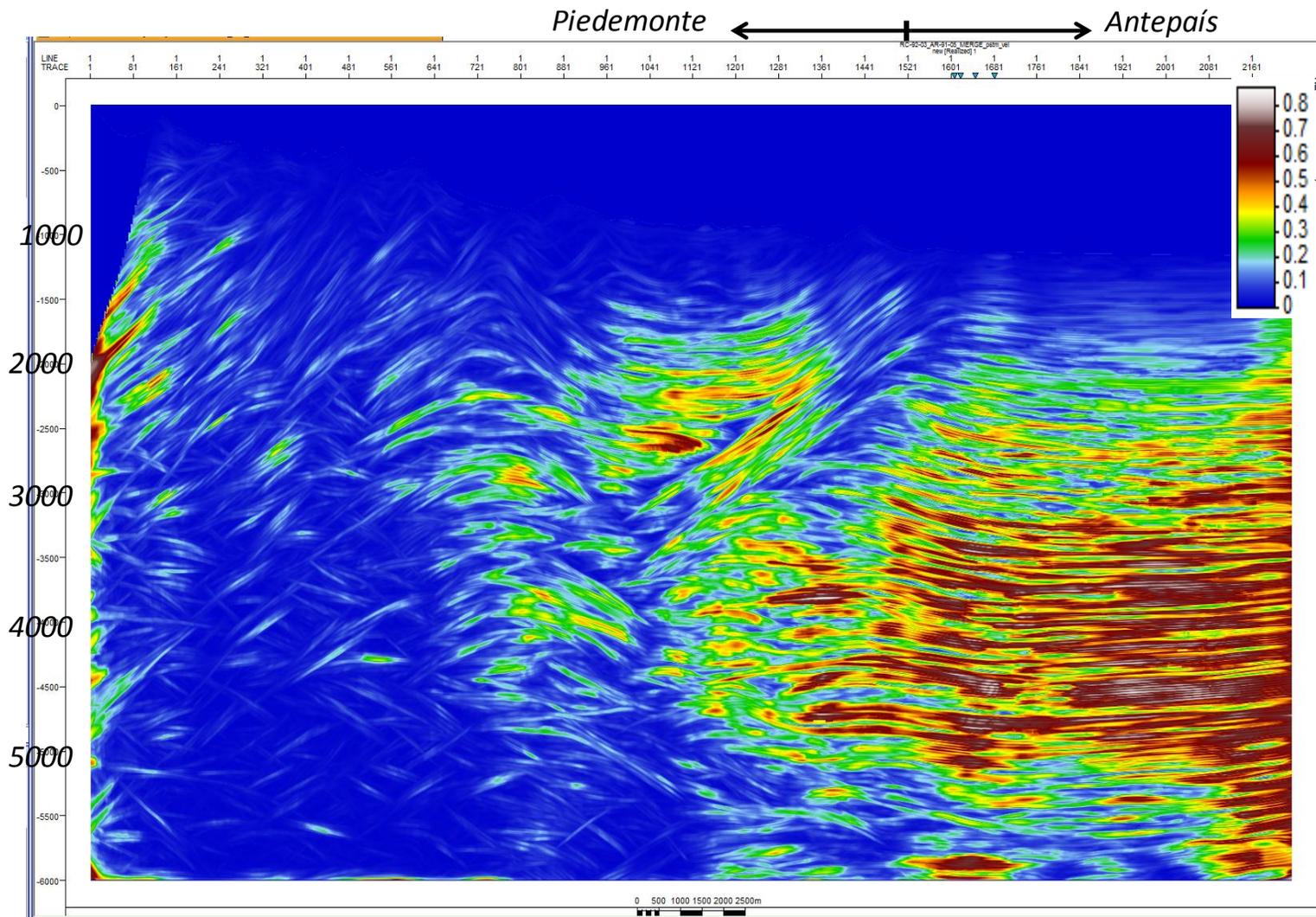


Figura 4-2: Semblagrama. Note mayor coherencia $S > 0.3$

▪ **Parámetros adicionales**

La implementación del método Multifoco, se basa en medidas de correlación de la señal sobre unas trazas sísmicas observadas. Los datos se corrigen a lo largo de diferentes curvas de tiempo hasta encontrar aquella más cercana al tiempo de viaje de la señal. Los parámetros descritos en las ecuaciones de la sección 2.2.1 son estimados encontrando un set de parámetros los cuales maximizan las funciones de semblanza calculadas para cada traza sísmica alrededor de una traza central. El procedimiento de correlación se repite para cada punto de imagen y para cada muestra de tiempo formando la sección Multifoco que representa el valor óptimo apilado de los parámetros ángulo de emergencia (β) radios de curvatura de los frentes de onda R.

▪ **A. Angulograma**

Entre los rasgos más sobresalientes de la Figura 4-3, se observan cambios suaves en la región del Antepaís. Se pueden apreciar cambios graduales de ángulos desde los colores amarillo a colores marrón claro (pequeños valores negativos a pequeños valores positivos) entre 1500 ms y 3300 ms, trazas entre la 1200 y 2200. Mientras que en la región del piedemonte cambios más bruscos que oscilan entre colores azul oscuro y marrón oscuro (de valores muy pequeños de ángulo a valores muy altos de ángulo).

Para efectos de interpretaciones estructurales, las áreas positivas separadas bruscamente de las áreas negativas pueden llegar a significar elementos estructurales importantes como fallas muy marcadas, delimitadas gracias a levantamientos geológicos de superficie. En el mapa geológico (Figura.1-2), se notan estos tres rasgos estructurales identificables en el Angulograma.

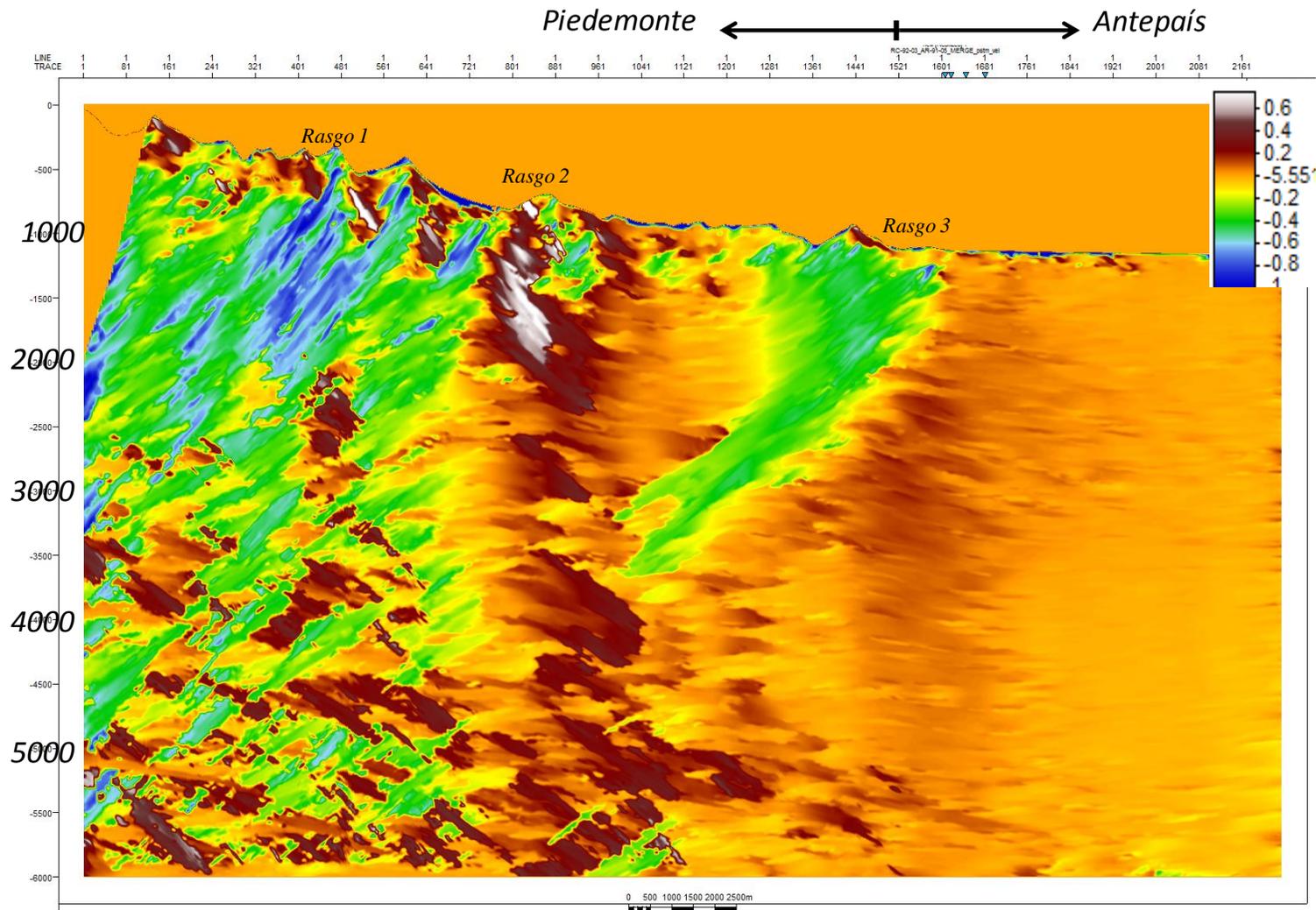


Figura 4-3: Ángulos de Emergencia. Note cambios graduales hacia la zona de menor complejidad estructural. Se identifican tres dominios separados por cambios bruscos entre valores positivos y valores negativos.

▪ B. Radiogramas

Corresponden a los radios de los frentes de onda: del Elemento Evolutivo Común (CEE), y del Elemento Reflectivo Común (CRE).

La imagen 4-4, Radiograma CEE, es similar a la mostrada en el Angulograma, y revela los mismos rasgos. Sin embargo, en el radiograma se aprecia que los cambios graduales de colores en la zona del Antepaís no son tan evidentes como en el Angulograma. Se sugieren valores muy altos de radios de curvatura representados por el color amarillo con una proporción menor de colores azules que representan valores negativos debajo de lo que se podría considerar como la sombra de una falla frontal (entre los 1500 ms y 3000 ms, y entre las trazas 1520 a 1680), que en este caso corresponde a la falla principal de la sección. Dicha franja de color amarillo se presenta más o menos constante sobre el sector del Antepaís, sector caracterizado por su baja deformidad, lo cual es consistente con la teoría de IH al referir que los radios CEE pueden ser cercanos a infinito en los medios estratificados horizontales.

El sector del piedemonte está caracterizado por valores negativos que alternan con valores bajos positivos, estos últimos, por encima de los 2700 ms y entre la traza 1 y 1500.

El sector más complejo estructuralmente, es decir, el sector del piedemonte en la parte inferior de la sección (por debajo de los 2700 ms) no presenta una clara definición de eventos, los colores alternan de manera caótica en la sección, igual parece ser el comportamiento del Angulograma y la falta de coherencia en el Semblagrama; una posible indicación de la falta de resolución del método para sectores demasiados complejos estructuralmente.

Un comportamiento diferente es observado en el radiograma CRE de la figura 4-5. Cambios muy suaves de color, casi progresivos, en la región profunda (por debajo de los 4300 ms) del Antepaís, indicado por incrementos regulares de los valores positivos; mientras que en la región somera los cambios son nulos. Esto es de nuevo consistente con el hecho que el radio CRE está determinado por la estructura de la sobrecarga y no depende de la geometría del reflector (Gelchinsky, 1988, 1989; Rabbel *et al.*, 1991).

Una vez más están presentes los valores caóticos y bruscos en la parte inferior del piedemonte.

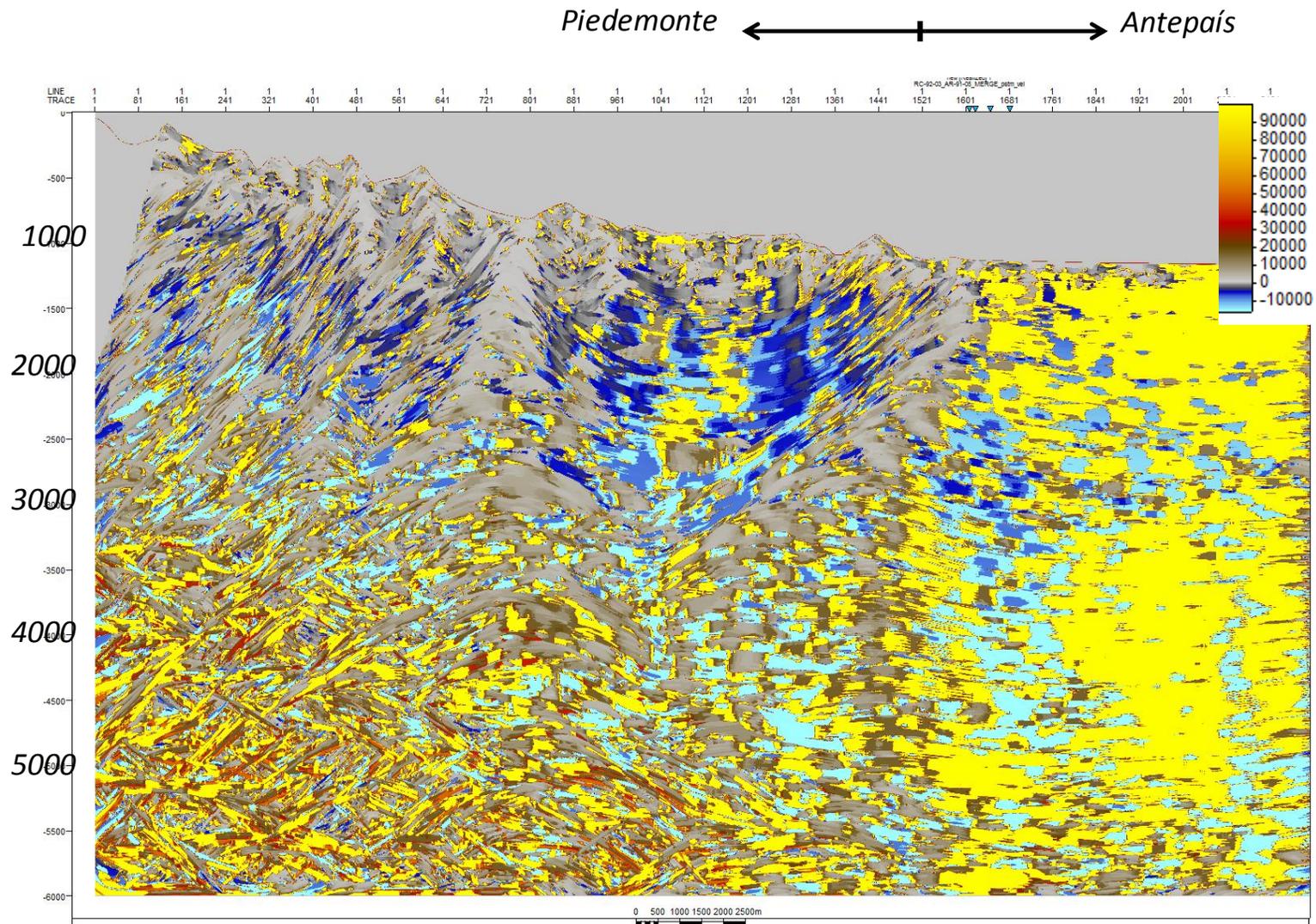


Figura 4-4: Radiograma CEE. Note colores constantes y que se acercan a infinito en la parte subhorizontal de la sección (Antepaís).

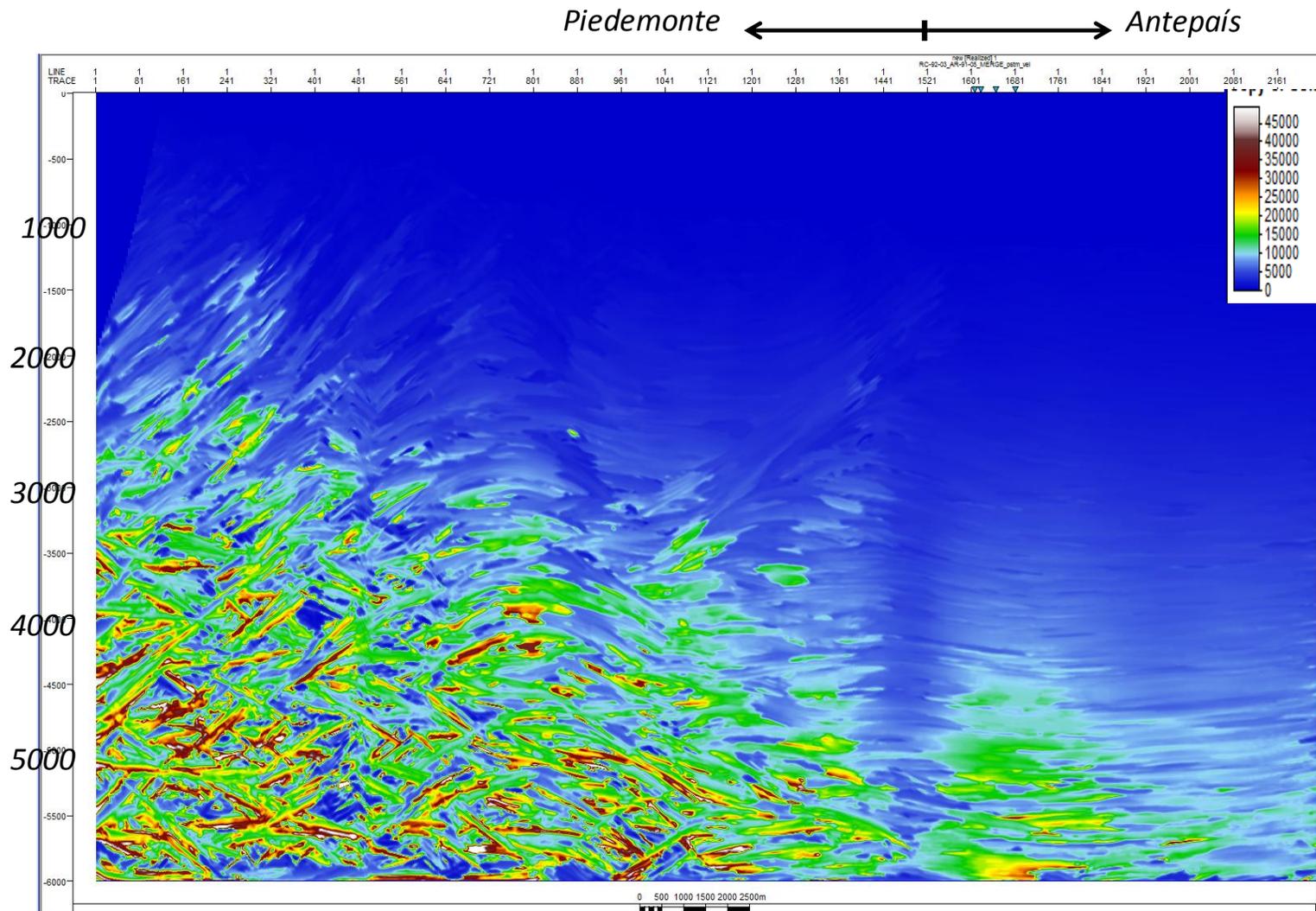


Figura 4-5: Radiograma CRE. Incrementos regulares en el radio en el sector del Antepaís por debajo de los 4300 ms.

4.2 Consideraciones Post-apilado

Los productos obtenidos con las dos técnicas de procesamiento son comparados: Con la Técnica Convencional de Procesamiento: Una línea Apilada en Tiempo, una línea Pre-apilada Migrada en Tiempo (PSTM), y Una línea Post-apilada Migrada en Tiempo (PostSTM); Y con la Técnica Multifoco: Una línea Apilada en tiempo (Apilado MF) y una Línea Migrada Post -apilada en Tiempo (MF Post).

Como producto óptimo para la interpretación geológica de estructuras, es común el uso de la línea Pre-apilada y Migrada en Tiempo (técnica convencional). Sin embargo, con la técnica MF se propone el uso de la línea Post-apilada MF como producto final ya que aquí no se considera un producto Pre-apilado y Migrado en Tiempo, ni es necesaria la corrección de sobretiempo normal antes de apilar.

Se lleva a cabo la comparación entre las líneas apiladas con las dos técnicas de procesamiento, y las líneas PostSTM y MF post. Adicionalmente, se realiza la descripción del producto pre-apilado PSTM.

4.2.1 Procesamiento Técnica Convencional.

- **Productos**

La figura 4-6 muestra la línea apilada con la técnica convencional de procesamiento; Este apilado no filtrado, no presenta clara definición en los reflectores hacia el sector Oeste o sector del piedemonte; Igual sucede en el sector profundo del antepaís, por debajo de los 4600 ms, mientras que para el sector comprendido entre los 3400 ms a 4600 ms los reflectores muestran cierta continuidad. Se identifica una gran estructura antiforme en el sector del antepaís por debajo de los 3600 ms. No se logra definir con claridad los trazos de los rasgos estructurales como fallas menores. Sin embargo, se pueden inferir las fallas frontales del piedemonte (grandes fallas con vergencia occidental).

En áreas estructuralmente complejas, interpretaciones sobre productos apilados (sin migrar) son bastante inciertas, debido a que es la migración la que provee la correcta localización de los eventos con las correcciones por buzamiento. En este caso, el área es estructuralmente compleja y se tienen buzamientos muy marcados imposibles de identificar solo con este producto.

En las diferentes secciones sísmicas, se identifican tres áreas de complejidad: La primera, en el sector somero del Antepaís; La segunda, en el sector profundo del mismo; Y la tercera en el Piedemonte.

Para el caso de la línea Apilada, análisis espectrales fueron realizados (Figura 4-7), mostrando frecuencias dominantes alrededor de 30 Hz para el sector del Antepaís, y alrededor de 20Hz para el Piedemonte.

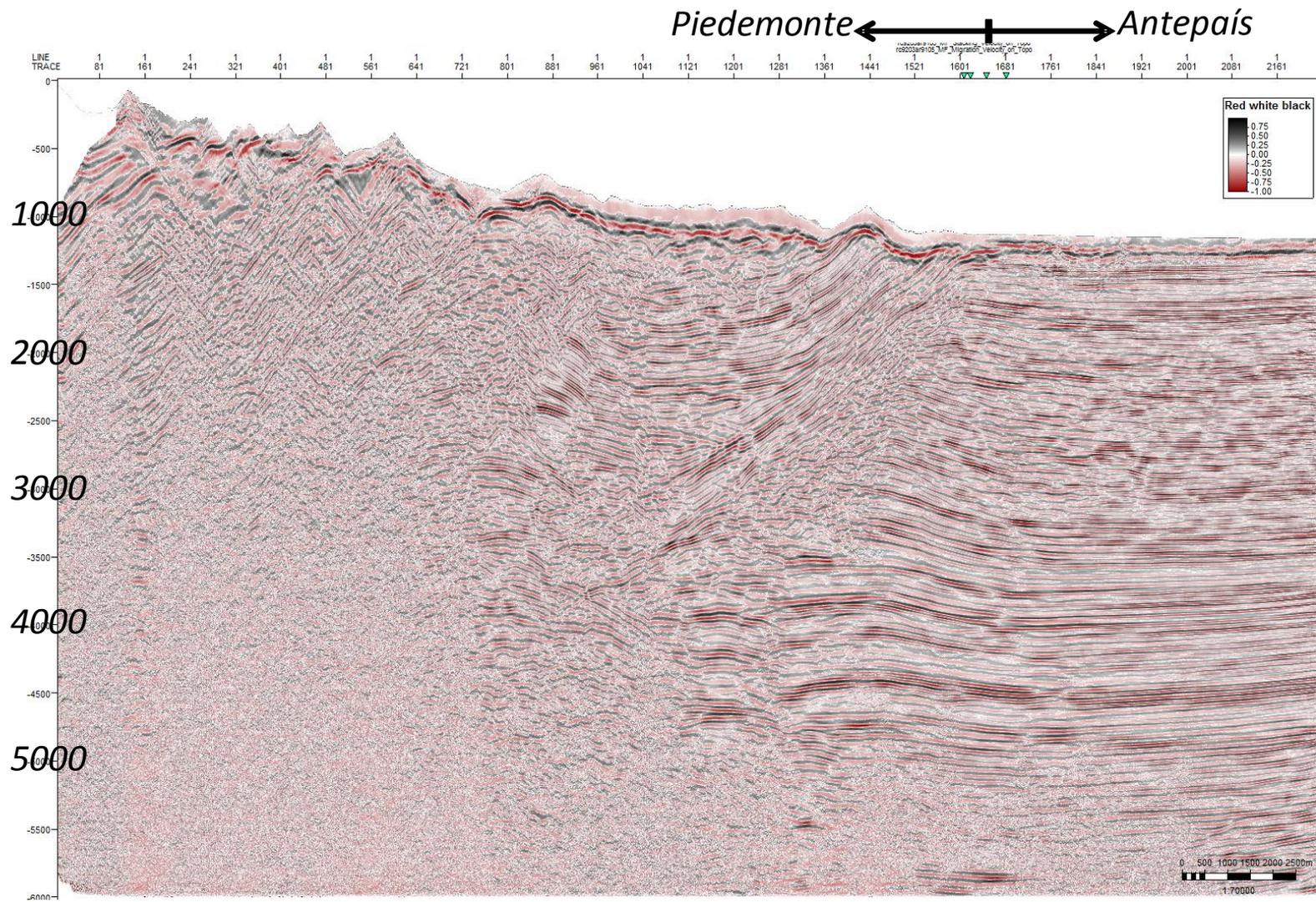


Figura 4-6: Sección sísmica Apilada en tiempo. Técnica convencional de procesamiento

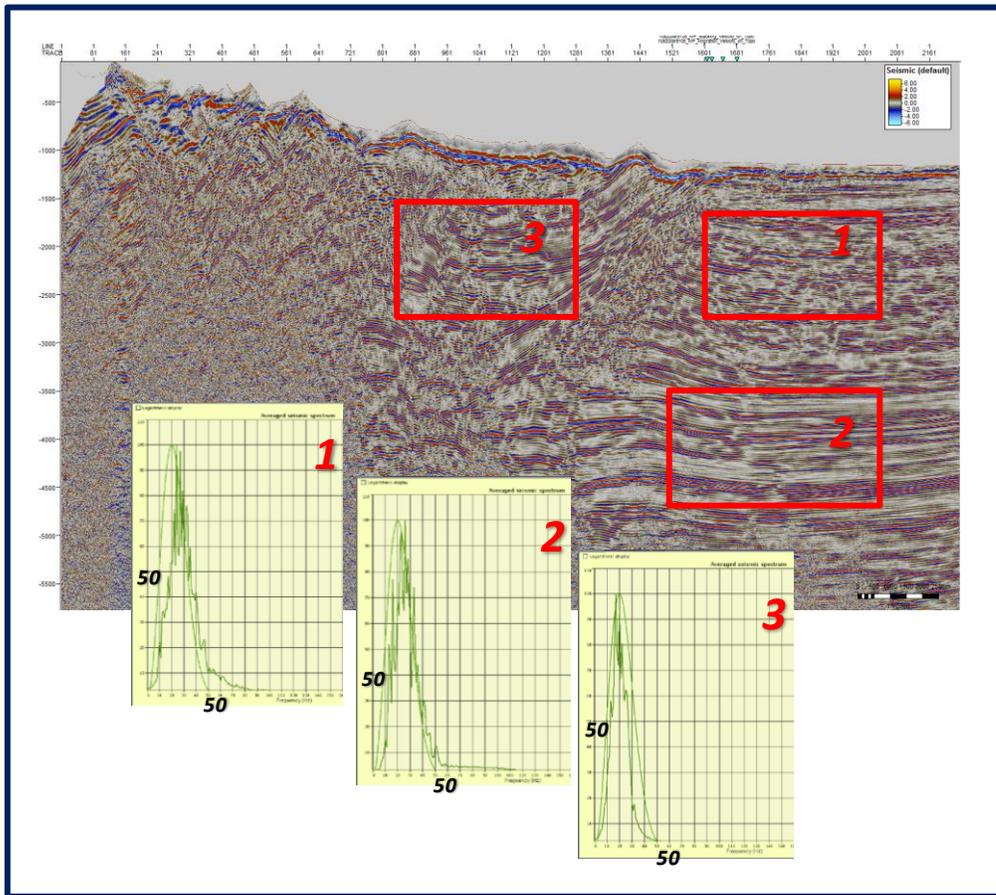


Figura 4-7: Espectros de Frecuencia. Línea Apilada Procesamiento Convencional.

Respecto a la línea Pre-apilada migrada en tiempo (Figura 4-8 y Anexo F), para el sector del Antepaís, los rasgos estructurales están bien marcados. Esta área se muestra como un sector de baja intensidad de deformación comparada con el Piedemonte.

Persiste la estructura antiforme en el sector profundo, con su ápice cortado por la falla frontal del piedemonte alrededor de los 3000 ms y la traza 1441. El anticlinal aparece fallado, se identifican 2 fallas con vergencia oriental limitando el centro de la estructura, y una falla central con vergencia occidental. Adicionalmente, al Oeste del centro de la estructura anticlinal se diferencian cuatro cuñas tectónicas limitadas en tope y base por fallas casi horizontales, a excepción de la cuña superior de forma triangular que se encuentra limitada por la falla frontal del piedemonte al oeste, y por una de las fallas con vergencia Oriental anteriormente descrita. Las cuñas presentan gran extinción lateral entre las trazas 561 y 1201, y espesor entre los 3500 y 5000 ms.

En el sector más profundo del antepaís, bajo la estructura anticlinal y las cuñas se diferencian dos despegues de gran extensión.

En la región del piedemonte, se identifica la falla frontal como un sistema de dos fallas que corresponden al rasgo geológico 3 descrito con anterioridad en el mapa geológico (Figura 1-2), la falla correspondiente al rasgo geológico 2 (trazas 801-881) también está presente seguida al occidente por una falla de menor extensión y que limitan en el piedemonte una zona en donde se reconoce un amplio sinclinal fallado y compartimentalizado con buzamientos identificables en donde la continuidad de los reflectores no es la mejor pero en donde se alcanza a diferenciar levemente una estructura anticlinal amplia entre las trazas 641 y 1201, y 3000 ms y 3900 ms; de una zona bastante ruidosa, muy distorsionada que refleja la complejidad estructural.(Figura 6-2).

En la línea Apilada se describe el pliegue anticlinal más amplio.

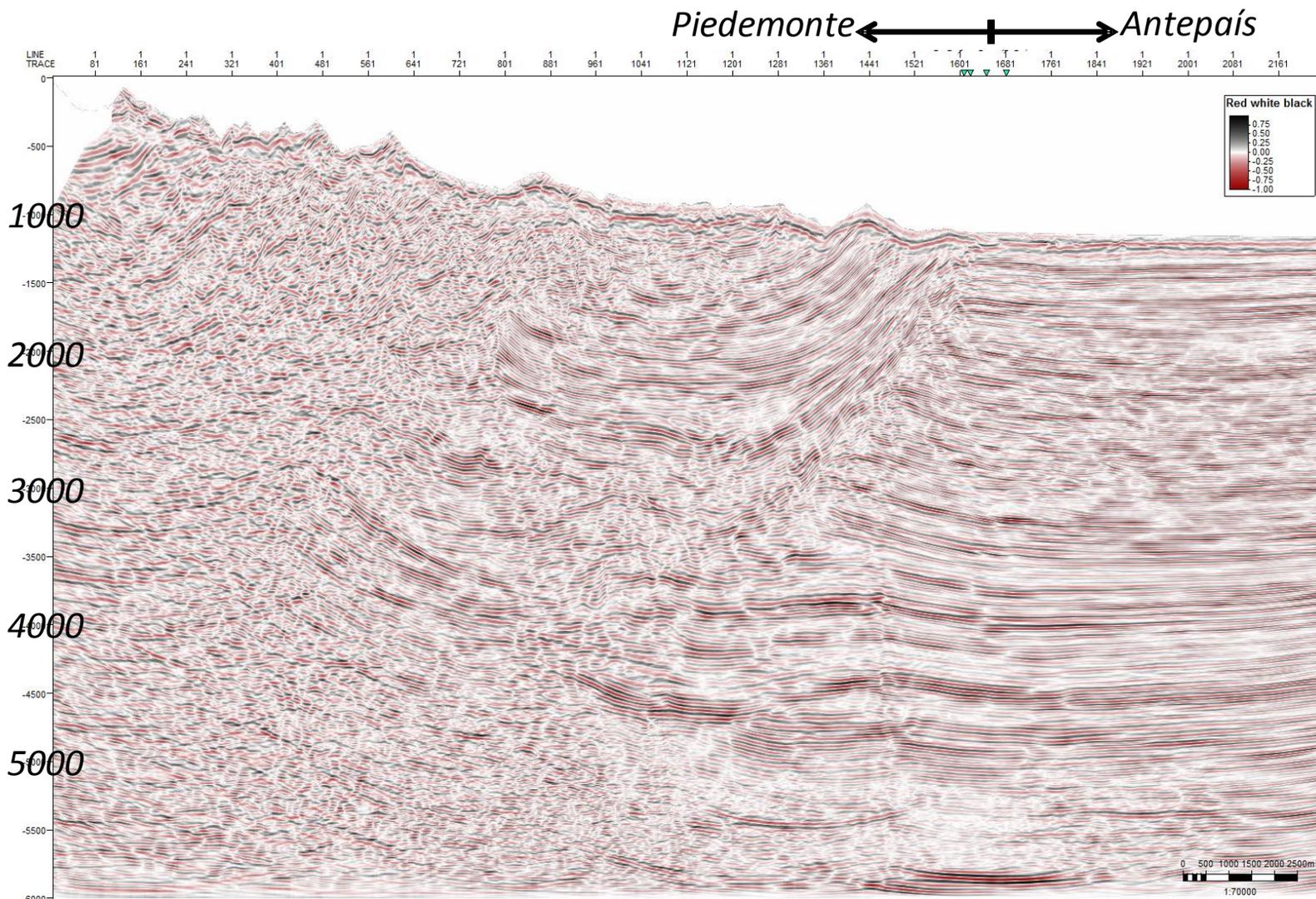


Figura 4-8: Sección sísmica Migrada y Pre-apilada en tiempo. Técnica convencional de procesamiento

La línea post-apilada migrada en tiempo (Figura 4-9 y Anexo G), muestra para el sector del antepaís, una buena continuidad en los reflectores tanto en sector somero como en el profundo, persiste la estructura antiforme profunda, sin embargo solo se puede diferenciar una de las fallas con vergencia oriental, la que limita al oriente las cuñas tectónica, cuatro en total, similares a las descritas en la línea PSTM, aunque los rasgos tectónicos no son muy claros, las dimensiones en cuanto a longitud y profundidad se mantienen. Ase identifican también dos despegues en el sector profundo.

A diferencia de la línea PSTM, el ápice de la estructura se encuentra localizado un poco al oriente de la falla frontal.(Figura6-3).

En el piedemonte, el sector somero es más claro que el profundo, aunque presenta menos continuidad que en la línea PSTM. La falla frontal se presenta como dos fallas y solo es posible identificar una falla en el sector occidental (rasgo geológico 2 Figura 1-2). El sector Occidental se mantiene distorsionado.

En el sinclinal formado entre la falla frontal y el rasgo geológico 2, los compartimientos generados son limitados por fallas con un menor grado de inclinación, casi horizontales, que las fallas presentes en la línea PSTM.

..

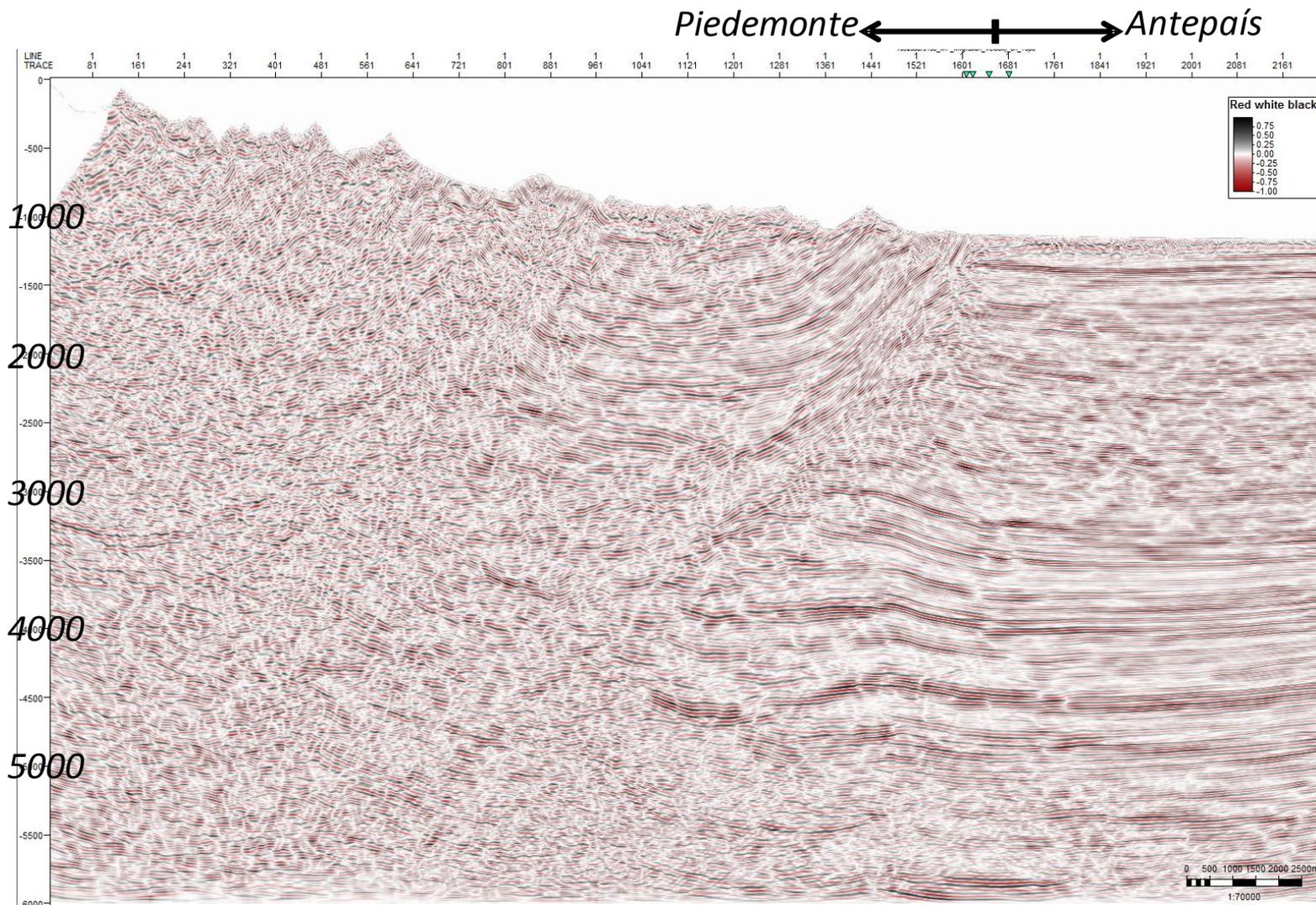


Figura 4-9: Sección sísmica Post-apilada y Migrada en tiempo. Técnica convencional de procesamiento

▪ **Preservación de Atributos**

Además de las amplitudes, atributos como la frecuencia instantánea (FI) y la fase también fueron comparados para establecer alguna correlación entre las características geológicas, por ejemplo cambios litológicos y estructurales.

La Figuras 4-10 muestra las frecuencias instantáneas para las líneas apilada, PSTM y PostSTM. En todos los casos, se presenta una mayor distorsión en el sector del Piedemonte que en el sector del Antepaís. Los rasgos estructurales están enmascarados y no es posible diferenciar con claridad el trazo de los diferentes trenes de fallas presentes.

Las secuencias estratigráficas en el área están caracterizadas por una alternancia de areniscas y arcillas (Columna estratigráfica, Figura 1-3). Estas formaciones fueron calibradas e interpretadas a lo largo de la línea Merge.

Cambios en las frecuencias instantáneas sobre la línea no parecen estar relacionados a los cambios formacionales (Figura 4-12). Frecuencias más altas se concentran en los lugares donde la continuidad de los reflectores es más evidente.

Respecto a la fase, se busca mostrar la variabilidad de la ondícula enfatizando la continuidad espacial o discontinuidad de los reflectores. Así, para este caso, no se evidencian discontinuidades, pinchamientos ni límites importantes.

El sector del Antepaís muestra un mejor comportamiento que el sector del Piedemonte siendo en este último más variable.

Estructuralmente solo la falla frontal (Rasgo 3. Mapa geológico figura 1-2) describe con mediana claridad el plano en superficie. En profundidad se confunde con la variabilidad de los datos.

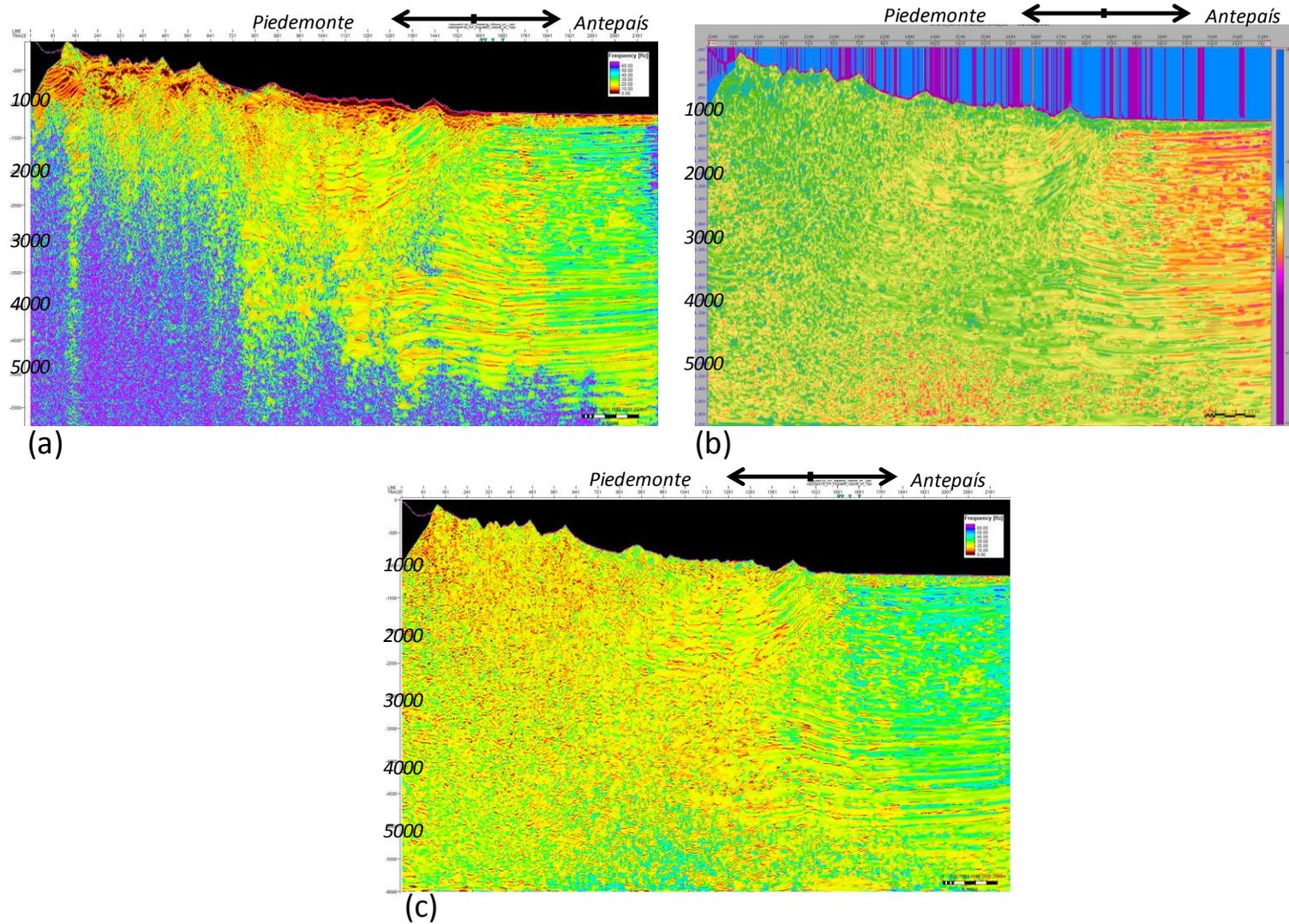


Figura 4-10: Frecuencia Instantánea. Línea Apilada(a), Línea PSTM (b), Línea PostSTM (c).

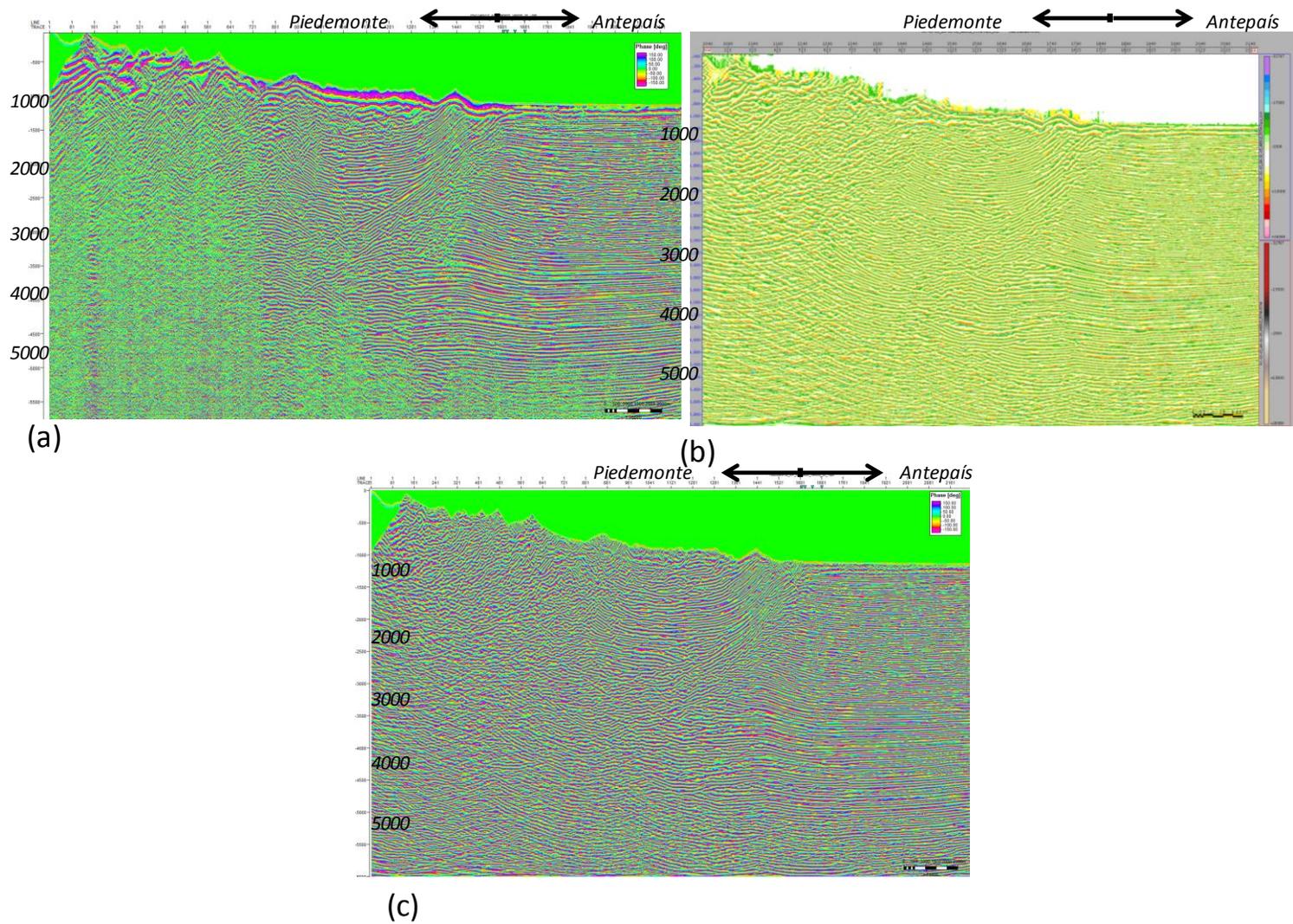


Figura 4-11: Fase. . Línea Apilada(a), Línea PSTM (b), Línea PostSTM (c). Note mayor continuidad en el Antepaís.

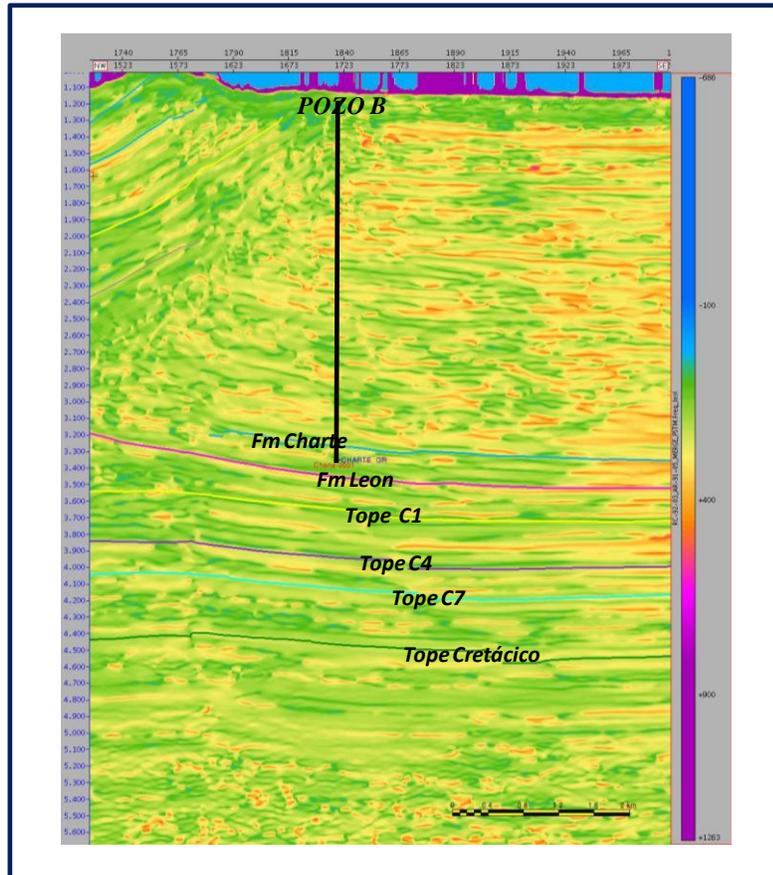


Figura 4-12: Imagen de la Frecuencia Instantánea en la línea PSTM. Detalle Note la falta de correspondencia entre los cambios de frecuencia y los horizontes interpretados.

4.2.2 Procesamiento Técnica Multifoco MF

Al no depender este de un macro modelo de velocidades, solo de una velocidad inicial cercana a la superficie, se espera reducir errores en la obtención de la imagen final. La técnica MF opera en dos etapas: La primera, para pequeñas distancias fuente – receptor (offsets cortos) estudiando los frentes de onda generados con pequeños radios CRE y CEE que se obtiene por lo general en estratos someros. Y la segunda, tiene en cuenta las mayores distancias fuente – receptor; Extrayendo información importante a nivel estructural y estratigráfica desde los datos iniciales preapilados.

▪ **Productos.**

Se consideran aquí como productos la línea Apilada MF y la línea Migrada post apilada MF (MF Post).

La línea Apilada MF (Figura 4-13), presenta un gran número de difracciones (que luego se colapsaran y permitirán la clara definición de los planos de falla), las diferentes estructuras anticlinales y sinclinales muestran flancos bien definidos; Inclusive, en algunas ocasiones es posible delinear los ejes de las estructuras, tanto en el sector más oriental del piedemonte como en el sector del antepaís.

Reflectores profundos en el sector del antepaís, muestran continuidad y alineamiento en los eventos. Estructuras anticlinales antiguas son reconocidas entre los 3600 ms y 4200 ms, y trazas 800 a 1220, esta se presenta más amplia que en el apilado convencional y se puede reconocer asociada al desarrollo de rampas laterales.

En sectores cercanos al flanco oriental de la falla principal o falla frontal, se muestran reflectores que se confunden con pequeñas difracciones y que pueden llegar a ser considerados como rollover reales y no efectos de la sombra de falla dada su disposición no vertical con relación a la misma y gracias a la estructuración visible en la parte más profunda. Sin embargo, esta consideración está sujeta a revisión.

La relación señal – ruido se ve incrementada en la continuidad de las reflexiones profundas, a diferencia del apilado convencional.

Los anticlinales localizados en la región más occidental del Antepaís (entre 3800 y 4800 ms y trazas de 1100 a 1520), en el sector en donde se identificaron las cuñas tectónicas de las líneas con procesamiento convencional, parecen estar asociados a difracciones sin colapsar y posibles efectos de levantamientos (Pull ups) por la sombra de falla. Esta aseveración solo podrá llegar a ser confirmada con la perforación de un pozo profundo que así lo compruebe.

Al occidente del piedemonte, se reconocen eventos cuyos buzamientos reflejan la presencia de un sistema de fallas de cabalgamiento de gran importancia y orientación SSW – NNE (validado con datos de geología de superficie).

Comparaciones entre el apilado MF y el apilado convencional muestran al producto MF como una imagen de buena calidad, en la que, aunque faltan difracciones por colapsar, se evidencia una mejor resolución y mayor continuidad en los eventos sísmicos gracias al mayor cubrimiento de eventos en el subsuelo, ya que con la técnica MF se consideran todas las posibles combinaciones del par fuente-receptor en el momento de apilar.

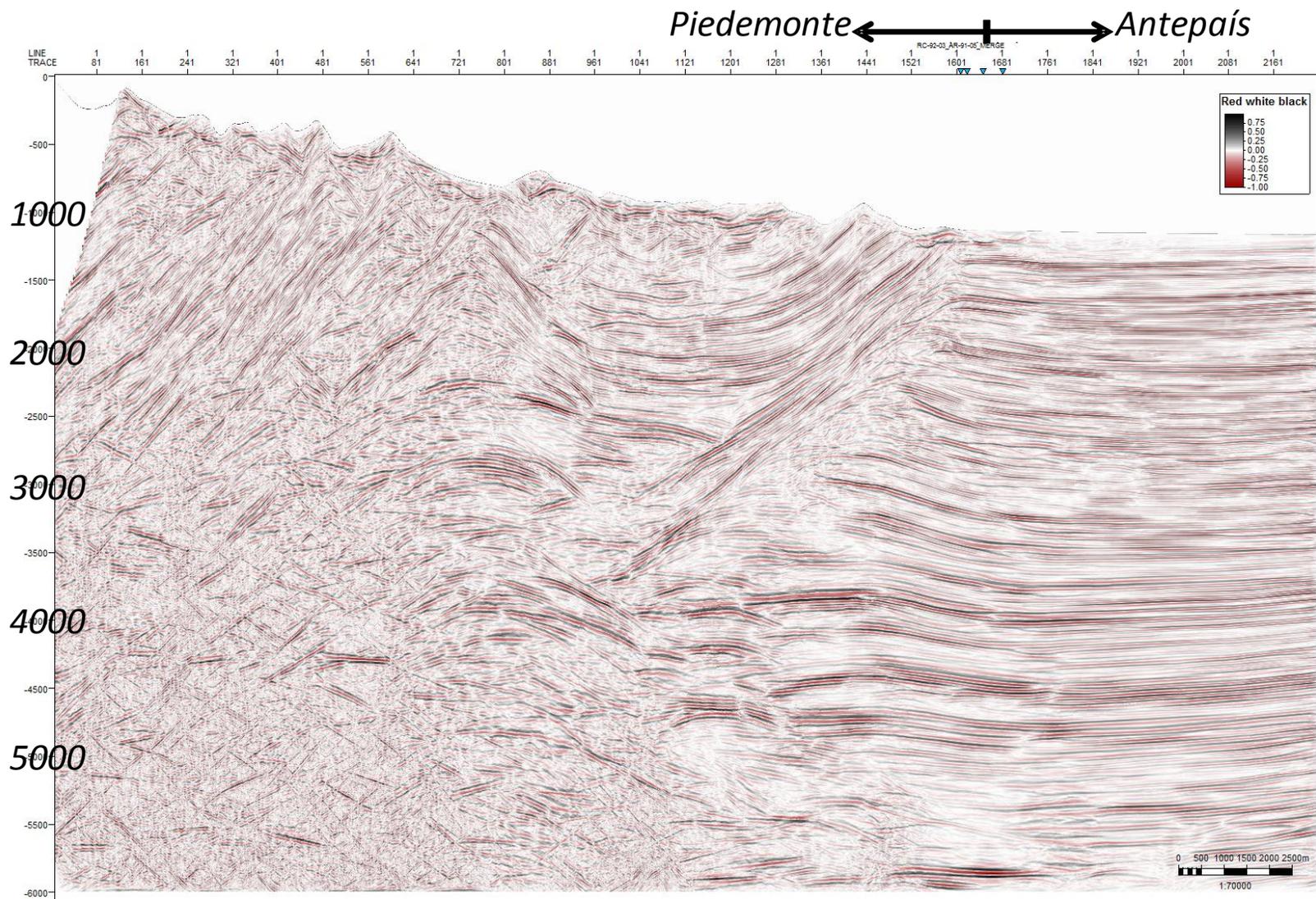


Figura 4-13: Sección sísmica Multifoco Apilada.

Fueron realizados análisis espectrales en las diferentes zonas. El espectro de frecuencia en la zona 1 y zona 2 se encuentra alrededor de los 30 Hz (sector del Antepaís) y para el sector 3 (Piedemonte) alrededor de los 25 Hz (Figura 4-14).

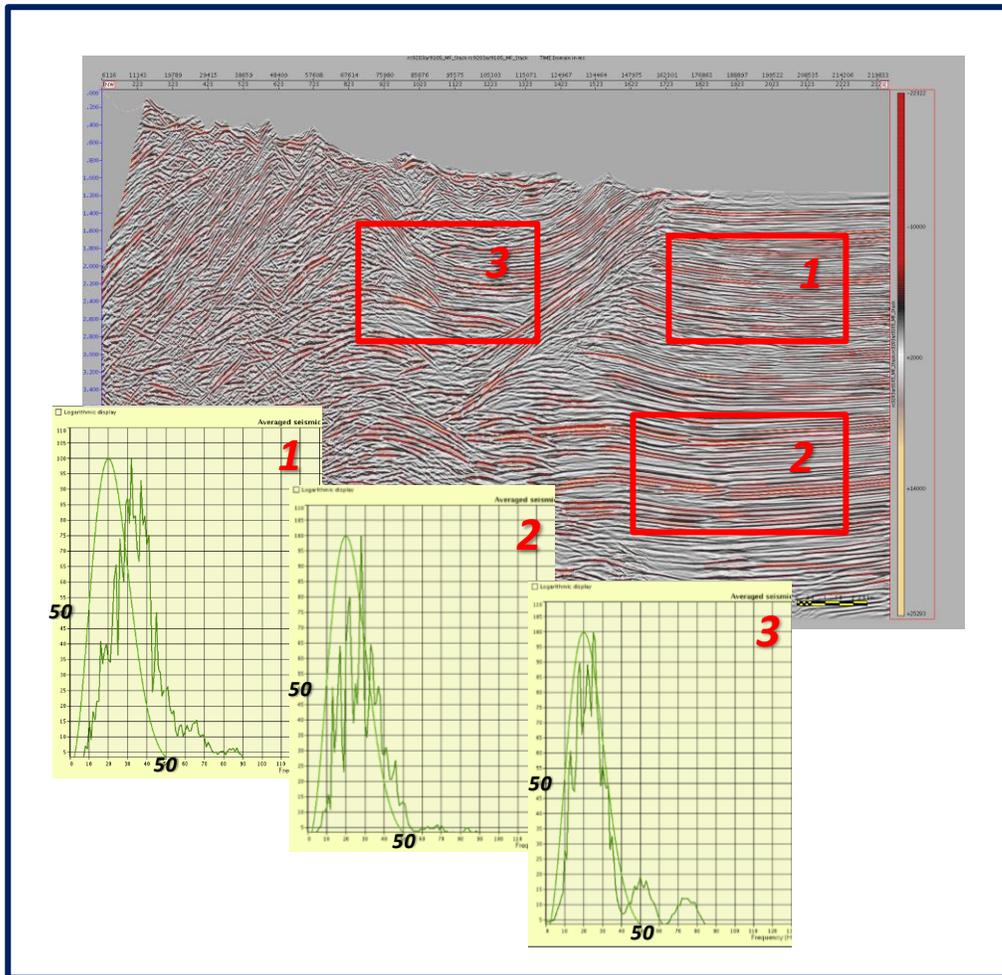


Figura 4-14: Espectros de Frecuencia. Línea Apilada MF.

Los espectros de frecuencias calculados con las dos técnicas de procesamiento sobre los apilados muestras valores iguales para el antepaís y muy cercanos para la región del piedemonte. Se considera entonces que no se aprecian cambios en las frecuencias entre las técnicas.

En la línea Post MF (Figura 4-15 y Anexo H) las difracciones han sido colapsadas dando lugar a una mejor definición de las estructuras como planos de falla que se muestran

mejor delimitados y evidenciando con claridad rasgos estructurales como sinclinales y anticlinales.

Reflectores someros en el antepaís, presentan continuidad en los eventos. El claro alineamiento de estos, hace suponer una mejora en la relación señal – ruido en comparación a la sección convencional. Esto gracias a que en la sección MF el arreglo de trazas excede en magnitud el cubrimiento del arreglo convencional de trazas en un punto medio común (CMP). Esto mejora la relación señal – ruido en zonas con bajo cubrimiento.

El anticlinal en el sector profundo del antepaís descrito en las secciones convencionales se mantiene, al igual que las cuatro cuñas tectónicas, sin embargo aquí, estas presenta una menor extensión lateral (entre las trazas 801 a 1281). Igualmente, estas están limitadas al oeste por una falla con vergencia oriental asociada a una falla con vergencia occidental que corresponde a una extensión de uno de los dos despegues que se aprecian en el sector profundo. En la línea PostSTM solo se aprecia una falla. Estos despegues también fueron identificados con el procesamiento convencional. (Figura 6-4).

El ápice del anticlinal fallado aparece localizado debajo del punto de terminación en superficie de la falla frontal (tip de la falla), un poco al oeste del sector en donde aparece el ápice en la línea PostSTM, lo que podría generar dudas acerca de la existencia del relieve de la estructura anticlinal, sin embargo, este antiforme repetido en los diferentes tipos de procesamiento empieza a cobrar interés exploratorio.

En general, los buzamientos están bien definidos y la continuidad de los reflectores es comparable con el sector somero.

En el Piedemonte, la continuidad y definición de los reflectores es similar a la del Antepaís. Hacia el occidente, la imagen se distorsiona un poco y las difracciones no son resueltas en su totalidad. Sin embargo, en el sector somero, entre 600 y 2000 ms y entre las trazas 523 y 723, se alcanzan a percibir las direcciones preferenciales de buzamientos (dirección NNE – SSW) de los sistemas de cabalgamientos. Esta información es verificada con los datos geológicos de superficie.

Los trazos de las fallas son claros, las estructuras anticlinales profundas entre los 3600 ms y 4200 ms, y trazas 241 a 721, pierden relieve.

Compartimientos localizados en el sinclinal se ven limitados por fallas casi horizontales igual que en la línea PostSTM. Estructuras anticlinales se diferencian entre estos compartimientos profundos (trazas 641 a 1121 y 2700 ms a 3700 ms) mostrando interés prospectivo.

En general, en la sección post MF, la complejidad del piedemonte intenta ser resuelta, se muestra un aumento en la relación señal – ruido y se tratan de resolver eventos que se confunden con ruido en la sección convencional.

Comparaciones con la sección convencional muestran que no se introducen distorsiones sobre los datos, de manera que el producto MF puede ser considerado como un producto seguro de utilizar en zonas complejas tectónicamente. Se reduce la presencia de ruido, dando mejor calidad a la imagen, con reflectores más continuos y una mejor definición de rasgos estructurales como fallas y sentidos de buzamientos aparentes.

No se percibe tampoco presencia de múltiples.

Son notables las diferencias entre las dos técnicas de procesamiento. Los rasgos visibles en la línea MF post adquieren mayor sentido geológico; La sección se muestra menos ruidosa con reflectores mejor definidos que permiten el refinamiento de las interpretaciones, realzando la imagen sísmica y logrando una percepción en la disminución del ruido de más del 60% en el sector del piedemonte (sector de mayor complejidad estructural).

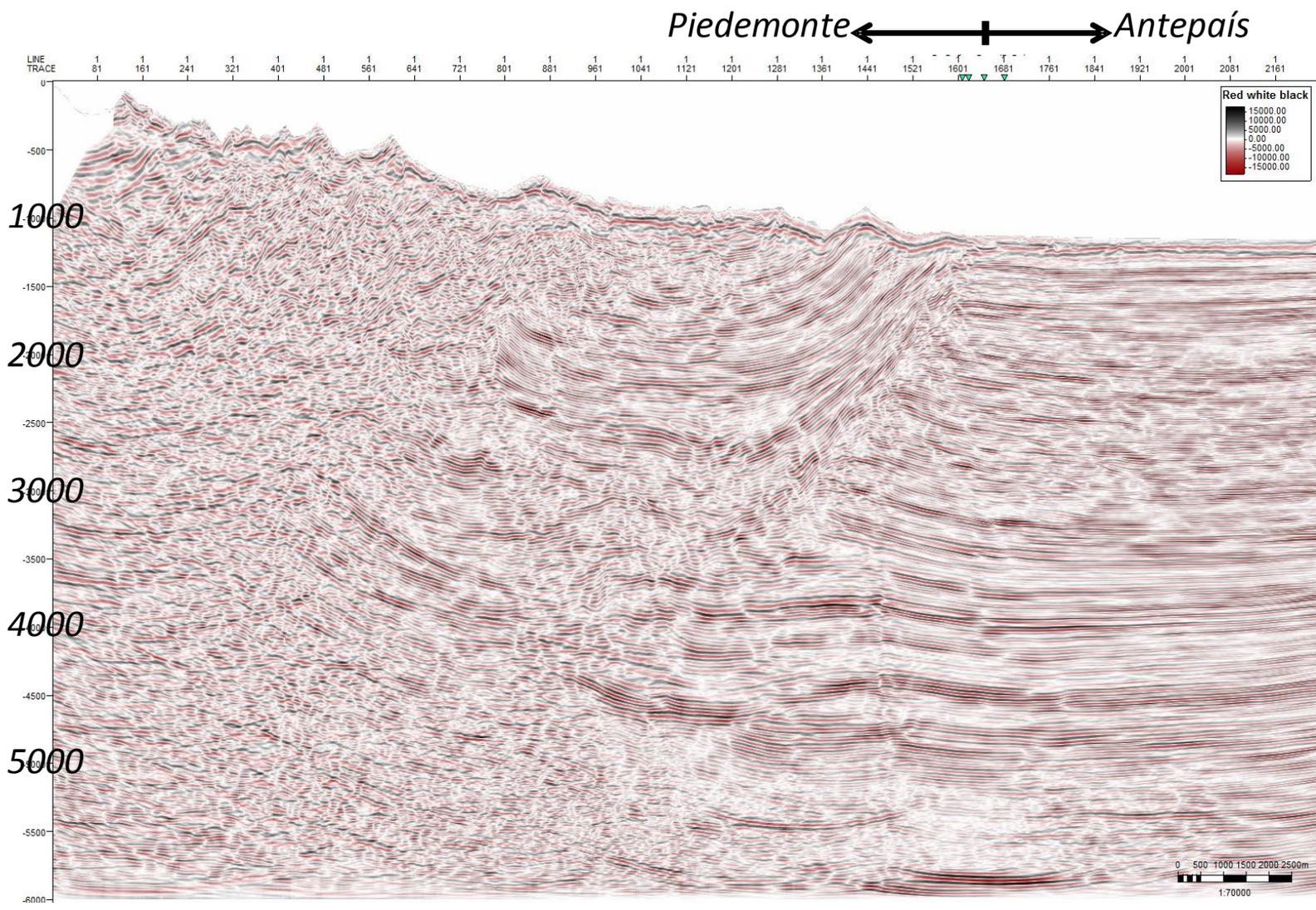


Figura 4-15: Sección Post Apilada MF. Note mejor definición de buzamientos aparentes en el Piedemonte (NNE-SSW).

▪ **Preservación de Atributos**

Respecto a la frecuencia instantánea (FI) (Figura 4-16, para el sector del Antepaís, se perciben más constantes que en el Piedemonte.

Frecuencias más altas, y una mejora en su recuperación son visibles al compararlas con aquellas calculadas a partir de las secciones convencionales.

La definición de horizontes (Figura 4-17) se puede asociar a cambios muy marcados de frecuencias. Variaciones en los paquetes de altas a bajas frecuencias, (variación de color amarillo continuo a color verde continuo) representan los cambios formacionales en topes específicos, como el tope de la Formación León y el Tope del miembro C4 de la Formación Carbonera; Mientras que en las frecuencias instantáneas calculadas a partir de la sección convencional no existe ningún patrón continuo ni claro que permita hacer alguna distinción.

Adicionalmente, con ambas técnicas de procesamiento, convencional y MF, antiformes localizados entre los 3200 ms y 5400 ms para la región del Antepaís inmediatamente al Este de la falla frontal, y entre los 3200 ms y 4200 ms para la región del Piedemonte, se encuentran asociados a bajas frecuencias, pero mejor delimitados con el atributo calculado a partir de la técnica MF.

Estudios en reservorios porosos saturados de hidrocarburos (Korneev, 2004), reflejan cambios en las reflexiones sísmica a bajas frecuencias, mostrando una relación compleja entre este atributo sísmico y los reservorios saturados de fluido. Dicha afirmación permite tomar en consideración estas zonas y que cobren importancia exploratoria.

El procesamiento con la técnica MF ayudaría entonces a la preservación de atributos como la frecuencia instantánea, sin embargo, ninguna de las técnicas de procesamiento permitió la delineación de rasgos estructurales; De manera general, la frecuencia instantánea aquí no se muestra muy sensible a los cambios de litología de las unidades almacenadoras y sellos.

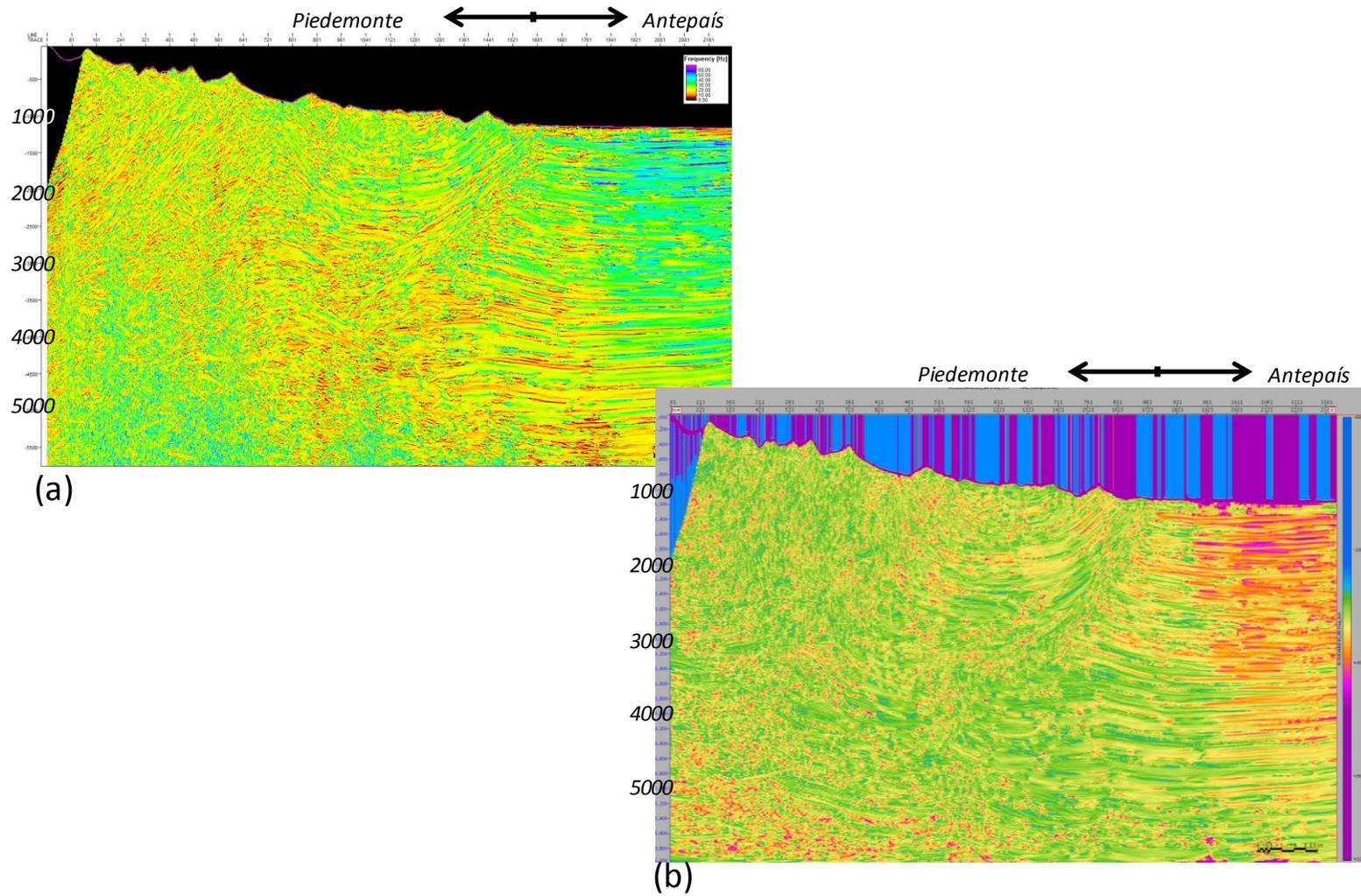


Figura 4-16: Frecuencia Instantánea. Línea Apilada MF (a), Línea MF Post (b),. Note la distribución de las altas frecuencias en la totalidad de la línea, mayoritariamente en el sector del Antepaís.

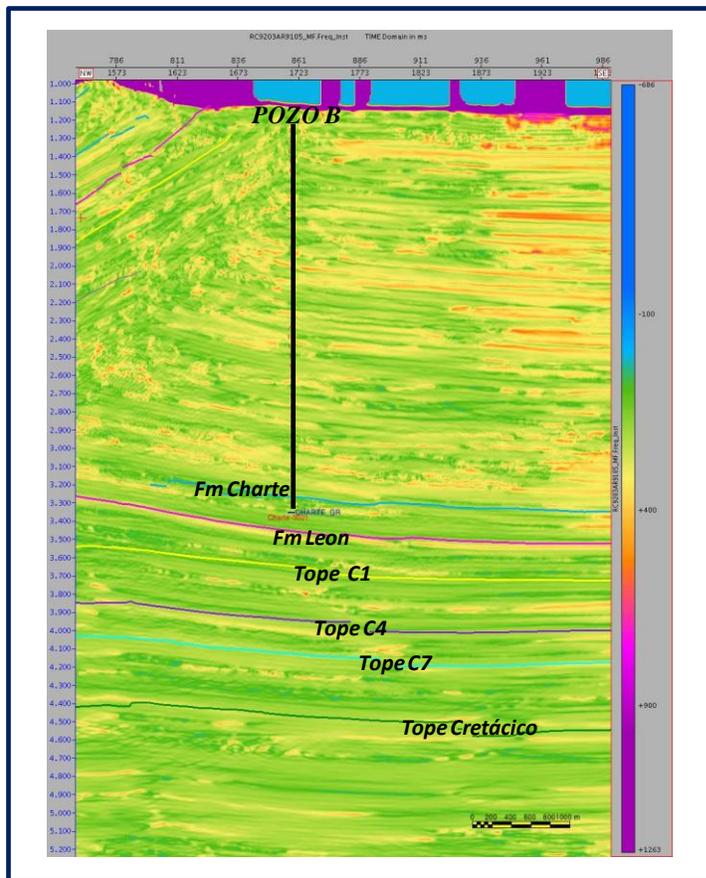


Figura 4-17: Imagen de la Frecuencia Instantánea en la línea Migrada post Apilada MF Detalle. Note cambios en frecuencia a los topes León y C4.

La Fase (Figura 4-18), en el sector del Antepaís, refleja una buena definición de eventos con valores estables y sin cambios laterales bruscos a diferencia de la fase calculada a partir de la sección convencional. Los rasgos estructurales se presentan bien marcados y mejor definidos.

Las estructuras anticlinales se describen amplias y con límites precisos; Igual sucede con el sinclinal central presente en el Piedemonte, el cual se encuentra claramente limitado por los distintos rasgos estructurales. Las tendencias en valores altos de fase permiten identificar rasgos que pueden llegar a significar expresiones de buzamientos.

En general, la fase se muestra muy parecida a la calculada a partir de las líneas convencionales, pero con una mejor definición en el Piedemonte.

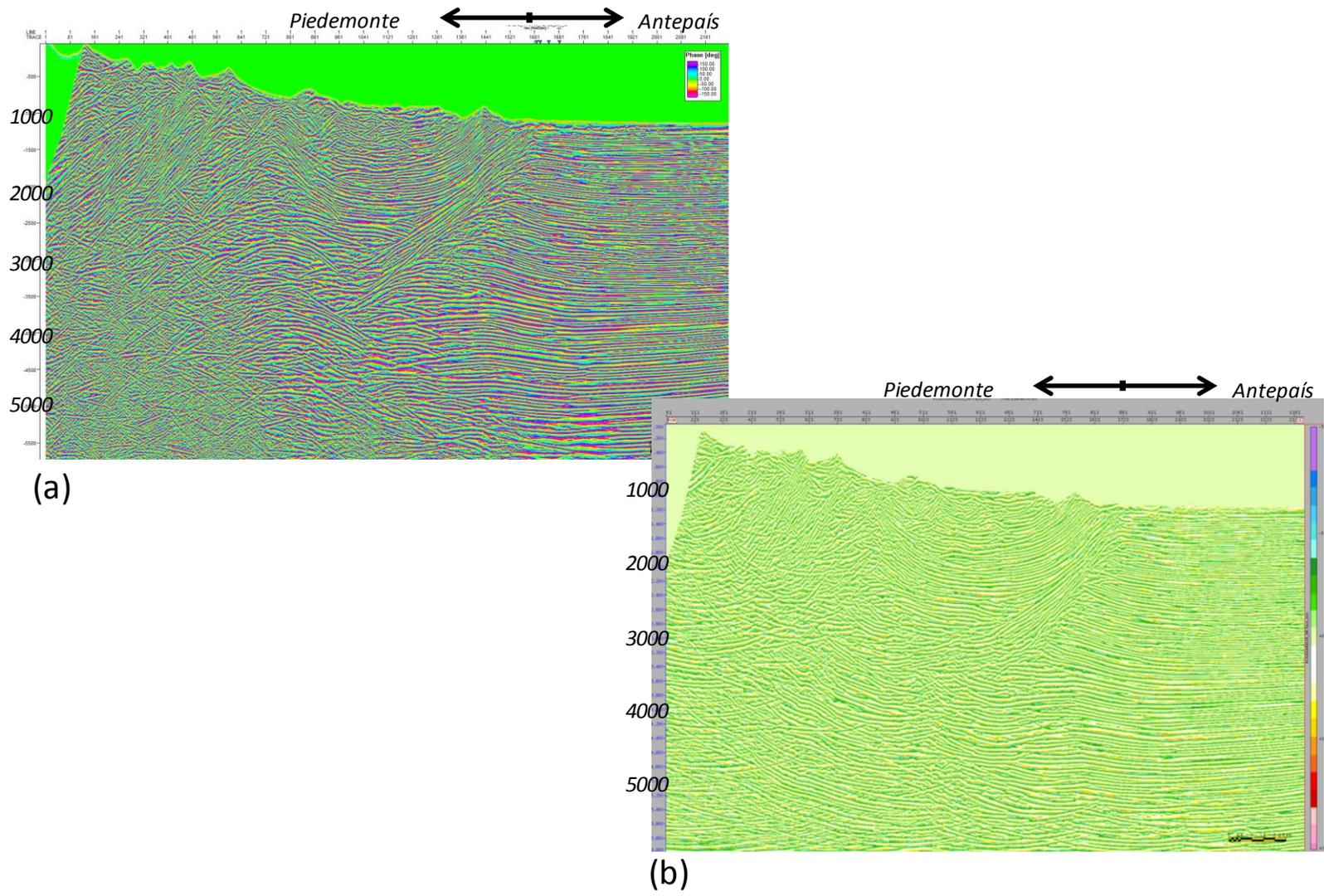


Figura 4-18: Fase. . Línea Apilada MF(a), Línea MF Post (b).

5. Interpretación y Descripción de Resultados. Comparación de tipo cuantitativo

5.1 Repetibilidad, Rms Normalizada Y Predictibilidad.

Diferencias residuales en los datos al comparar dos secciones iguales, como es el caso de la línea merge procesada mediante la técnica convencional y la técnica MF, son independientes de los cambios en el subsuelo. Estas diferencias dependen de factores como las velocidades utilizadas, e inclusive la interpretación de los datos; Se hace necesario utilizar otro tipo de métrica para cuantificar dichas diferencias.

Una de las métricas comúnmente usadas corresponde a las diferencias rms normalizadas de dos trazas a_t y b_t en una ventana de tiempo t_1 y t_2 (Kragh y Christie, 2002).

$$Nrms = \frac{200 \times rms(a_t - b_t)}{rms(a_t) + rms(b_t)}, \quad (5.1)$$

donde el valor rms de la diferencia entre las dos trazas a y b , dividido por el valor promedio rms de los valores de entrada se expresa como porcentaje, siendo el operador rms definido como

$$rms(x_t) = \sqrt{\frac{\sum_{t_1}^{t_2} (x_t)^2}{N}}, \quad (5.2)$$

N es el número de muestras en el intervalo t_1 - t_2 .

Los valores de $Nrms$ no son intuitivos ni delimitados por el rango 0-100%, es decir, si ambas trazas contienen ruido aleatorio, un valor de $Nrms$ de 141% es posible. Si ambas trazas no son correlacionables (ejemplo, 180 grados fuera de fase, o una de ellas contiene solo valores de

cero) el error Nrms es de 200%, el máximo teórico. Si una traza es la mitad de la amplitud de la otra el valor de error Nrms será de 66.7%

La predictibilidad es otra medida de repetitividad y es equivalente a la coherencia de White (1980) quien la usó para cuantificar la similitud espectral entre sismogramas sintéticos y trazas sísmicas. La predictibilidad en este caso es expresada como porcentaje y se define en términos de correlación (suma de los cuadrados de una correlación en una ventana de tiempo, y dividida por la suma de los productos de autocorrelaciones).

$$\text{PRED} = \frac{\sum \Phi_{ab}(\tau) \times \Phi_{ab}(\tau)}{\sum \Phi_{aa}(\tau) \times \Phi_{bb}(\tau)}, \quad (5.3)$$

donde Φ_{ab} es la correlación cruzada entre las trazas a_t y b_t computadas en la ventana de tiempo t_1 - t_2 cuando se expresa como porcentaje, los valores de predictibilidad se encuentran en el rango 0-100%. La predictibilidad es sensible a la longitud de la ventana de tiempo de correlación; Y no lo es a las estáticas, la fase, o las diferencias de amplitud. También es sensible al ruido y a los cambios de reflectividad. Si ambas trazas no son correlacionables, la predictibilidad es cero, y si lo son, la predictibilidad es del 100%. Si una traza es la mitad de la amplitud de la otra, la predictibilidad es también del 100%. Por el contrario, valores de Nrms son extremadamente sensibles a pequeños cambios en los datos.

La métrica de la repetitividad está directamente relacionada al nivel de la relación señal/ruido, y en las adquisiciones, por lo general, el nivel de ruido es constante, haciendo que esta métrica dependa de la energía de la señal. Pruebas con datos sintéticos (Kragh y Christie, 2002) sugieren que la métrica Nrms es más sensible a cambio en los niveles de la relación señal / ruido que la predictibilidad, la cual, como se mencionó con anterioridad, no es sensible a cambios en las amplitudes, estáticas y fases, pero sí lo es a los cambio en la reflectividad.

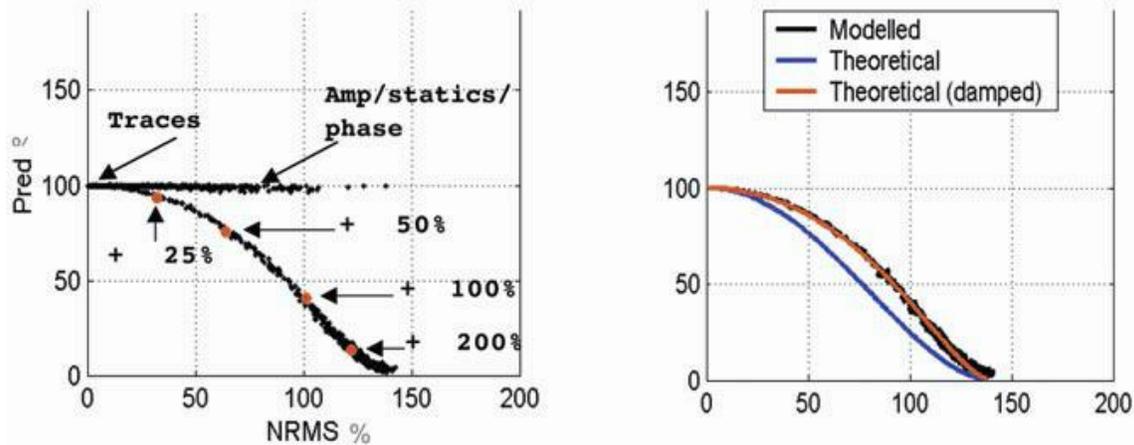


Figura 5-1: NRMS Vs Predictibilidad. Modelo sintético (Der). Curvas teóricas para ruido aleatorio (Izq.) (Kragh Y Christie, 2002).

5.2 Pruebas iniciales y Datos Teóricos.

La Autocorrelación de señales, permite determinar posibles repeticiones de patrones. Al considerar la comparación entre dos señales, se deben tener en cuenta efectos como: escalares, cambios en el datum, cambios en velocidades, y desplazamientos en tiempo.

El análisis cuantitativo de las secciones MF y convencional, fue llevado a cabo mediante el cálculo de valores de predictibilidad y Nrms en trazas sintéticas, para determinar sus comportamientos frente a los diferentes efectos mencionados así:

- Señales idénticas. Se considera aquí una señal X (función coseno) la cual es correlacionada consigo misma obteniendo los siguientes resultados (Figura 5-2 y Anexo A).

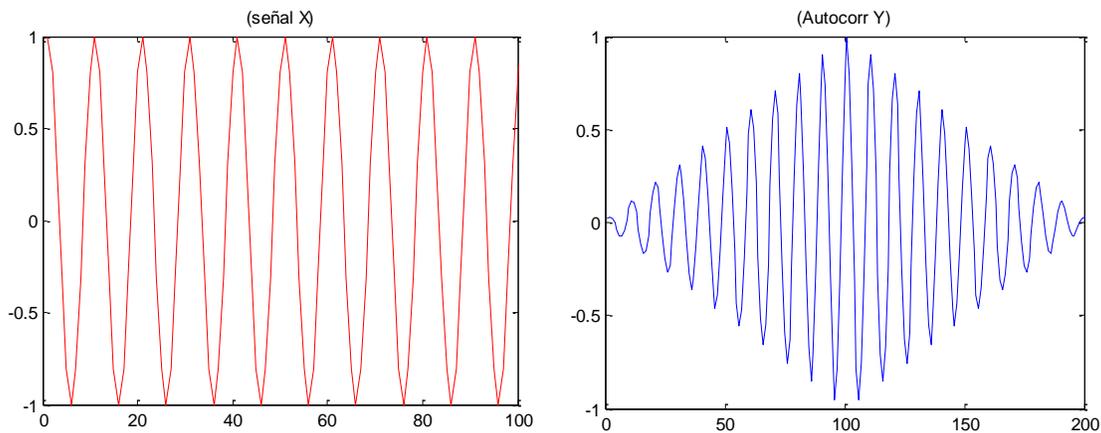


Figura 5-2: Señal X generada y su auto correlación Y. 100 primeras muestras.

Al correlacionar dos señales idénticas (autocorrelación de la señal X), el valor máximo de correlación es 1 (Figura 5-2), este valor positivo obedece a que se considera que las señales están en fase, por tanto los vectores coinciden. Se puede apreciar que la autocorrelación tiene una longitud doble a la señal, esto es debido a que los desplazamientos, a la hora de calcular la autocorrelación, pueden ser positivos o negativos. El índice central corresponde con un desplazamiento cero y, como se mencionó con el valor máximo de dicha correlación.

Los valores de Nrms y Predictibilidad fueron calculados (Anexo A). Y consignados en la tabla 5-1. Se obtuvieron valores de 0 para Nrms y 100% de predictibilidad (Figura 5-3). mostrando completa similitud entre las trazas (Kragh Y Christie, 2002).

<i>TRAZA</i>	<i>NRMS</i>	<i>PREDICTIBILIDAD</i>
X-X	0.0000000	1.0000
X-X2	0.6666667	1.0000
X-B	0.1184740	0.9992
X-RR	0.3106820	0.9722

Tabla 5-1: Valores de NRMS y Predictibilidad para señales idénticas (X-X), Señal amplificada (X-X2), Señal afectada por cambio de fase (X-B) y señal con ruido(X-RR).

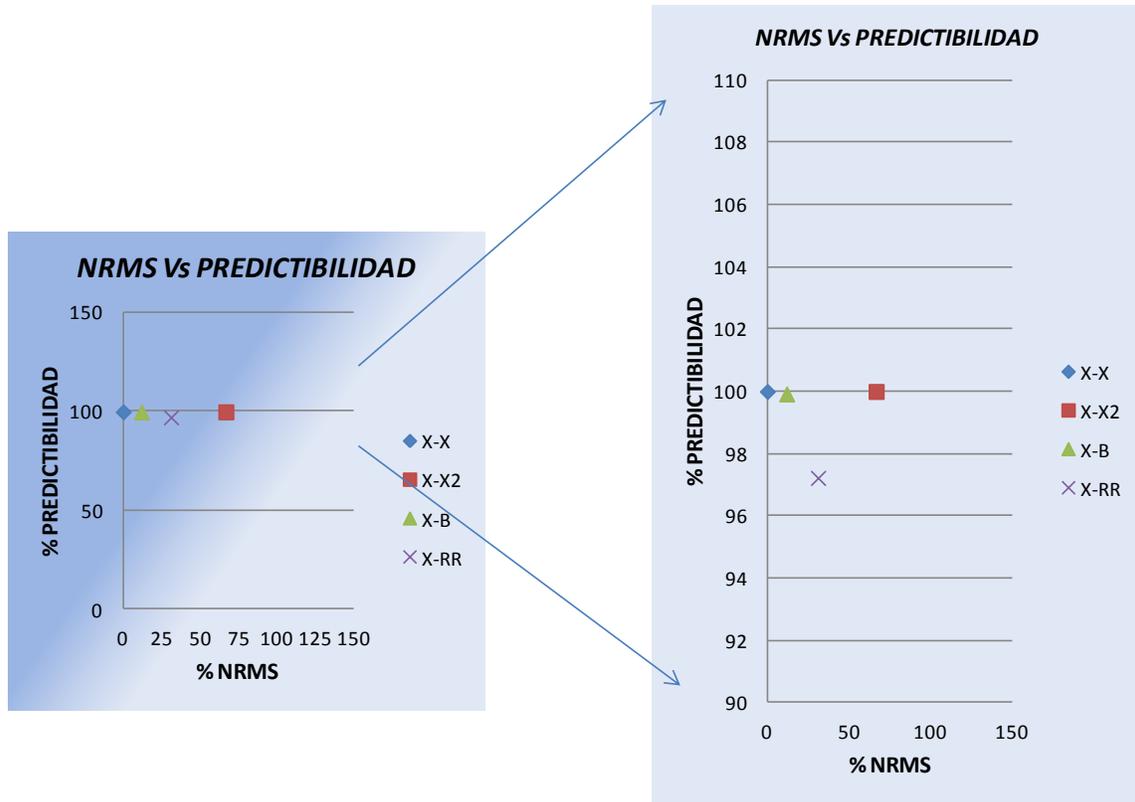


Figura 5-3: NRMS vs Predictibilidad. Trazas calculadas.

- Escalares. Los factores escalares no afectan la medida de predictibilidad. Se considera aquí la correlación entre una señal (X) y una señal con un escalar 2X (Anexo B y Figura 5-4).

El valor de Nrms calculado corresponde a 0.66 (Anexo B) y la Predictibilidad a 100% los valores se encuentran consignados en la Tabla 5-1 y la Figura 5-3. Se muestra como cuando dos señales se diferencian en amplitud (escalares) los valores de predictibilidad se mantienen cercanos a 100% con cambios en el valor de Nrms (Figura 5-1. Kragh Y Christie, 2002).

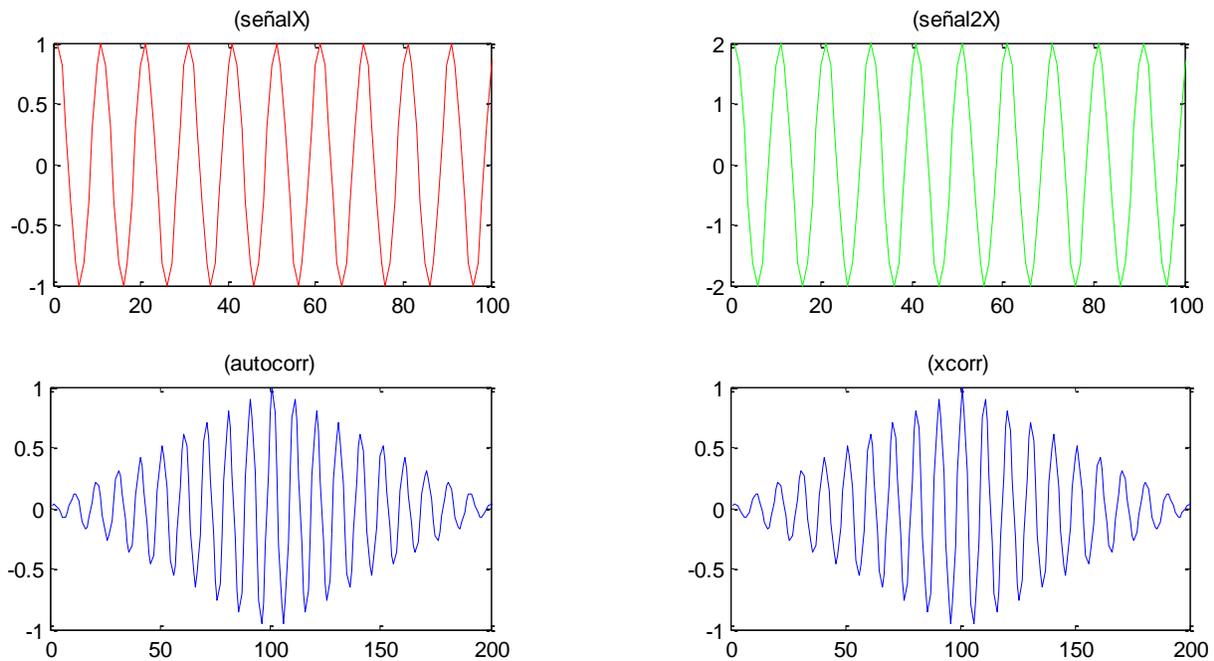


Figura 5-4: Señal X, escalar 2X, Autocorrelación de la señal X y Correlación cruzada de la señal X con su escalar. Primeras 100 muestras.

- Cambios de fase. La misma traza fue modificada en fase aplicando un desplazamiento de 90 grados o $\pi/2$ (Figura 5-5 y Anexo C).

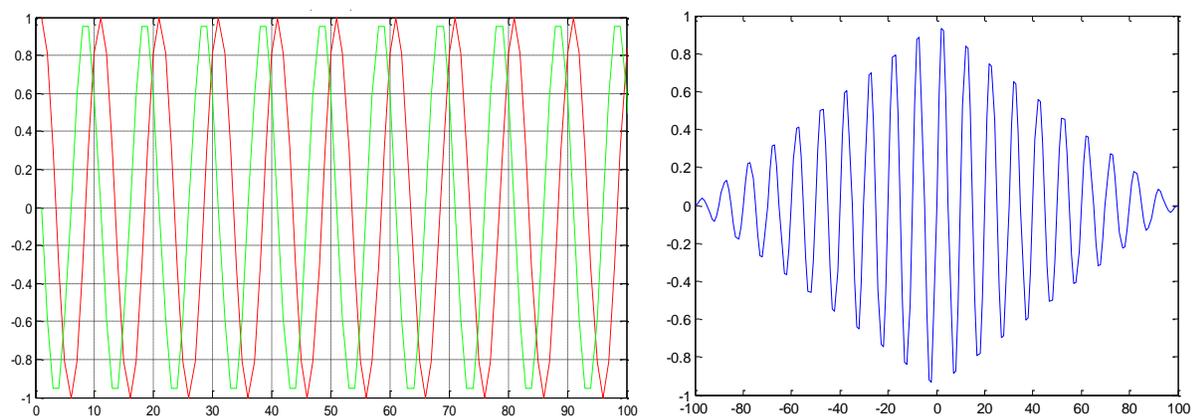


Figura 5-5: Fase. Análisis de las 100 primeras muestras de la señal. Señal 'X' (rojo), señal 'B' desplazada $\pi/2$ (Verde), Correlación (azul).

Aunque la predictibilidad se mantiene cercana a 100 %, el valor de Nrms se incrementa (Figura 5-3 y Tabla 5-1). Esta misma situación se puede presentar por perturbaciones en amplitudes, desplazamientos en tiempo o shifts, o como se mencionó, por problemas en correcciones estáticas.

La correlación cruzada cuadrada es igual al producto de las auto correlaciones.

$$\Phi_{ab}^2 = \Phi_{aa} * \Phi_{bb} . \quad (5.4)$$

- Ruido. La traza sintética fue modificada con ruido blanco (Figura5-6), los valores decaían en el valor de predictibilidad y los valores de Nrms cambiaron (Anexo D) (Figura 5-3 y Tabla 5-1).

La correlación cruzada cuadrada será menor que el producto de las auto correlaciones de los diferentes datos.

$$\Phi_{ab}^2 < \Phi_{aa} * \Phi_{bb} \quad (5.5)$$

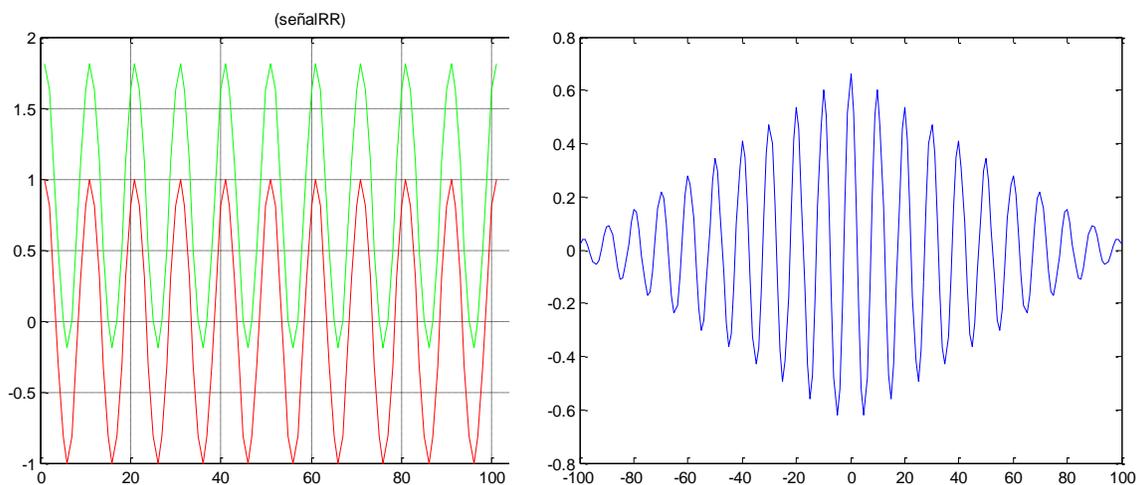


Figura 5-6: Ruido. Análisis de las 100 primeras muestras de la señal 'X' (rojo), y la señal con Ruido (Verde). Correlación (Azul).

5.3 Comparación Procesamiento Técnica Multifoco MF Vs Procesamiento Convencional.

Se realizó la correlación cruzada entre una traza de la sísmica con procesamiento convencional y una traza de la sísmica MF (Figura 5-8 y Anexo E). La traza escogida se encuentra localizada en la región del Piedemonte.

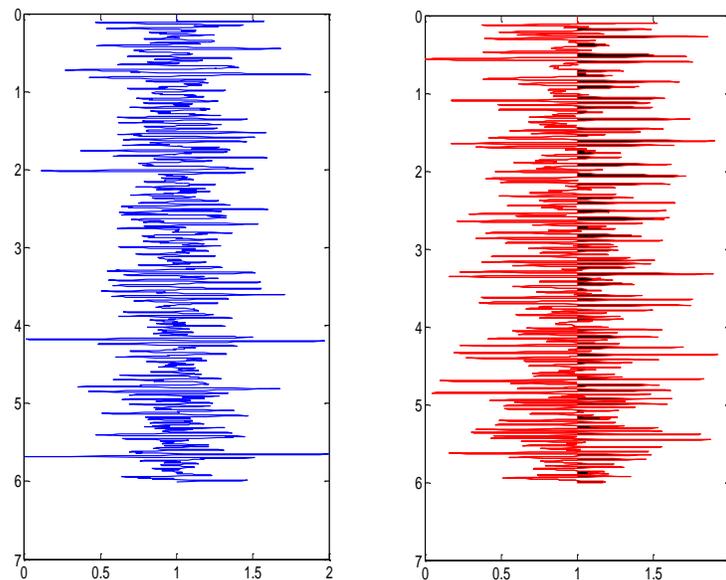


Figura 5-7: Traza 125. En azul traza 125 MF; en Rojo traza 125 convencional.

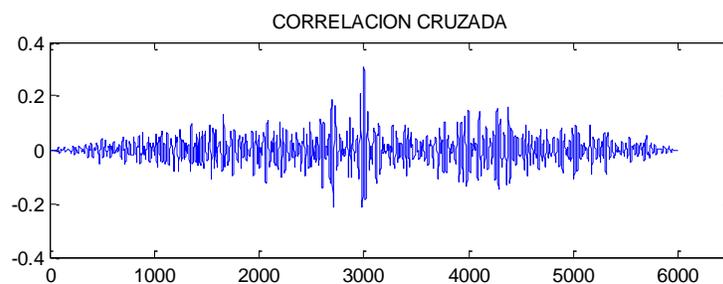


Figura 5-8: Correlación cruzada entre la traza MF y la traza convencional

Realizando los cálculos de Nrms y Predictibilidad, basados en las ecuaciones 5.1 y 5.3 obtenemos los resultados consignados la Tabla 5-2 y Figura 5-9; Los datos obtenidos sugieren una baja correlación debido a la presencia de ruido según pruebas realizadas con datos sintéticos.

<i>TRAZA</i>	<i>NRMS</i>	<i>PREDICTIBILIDAD</i>
MF-Conventional	1.33	0.0139

Tabla 5-2: Valores de Nrms y Predictibilidad para la traza 125 en el apilado con técnica convencional y técnica MF. Los valores fueron calculados en una ventana de tiempo alrededor de la mitad de la traza (4000 ms).

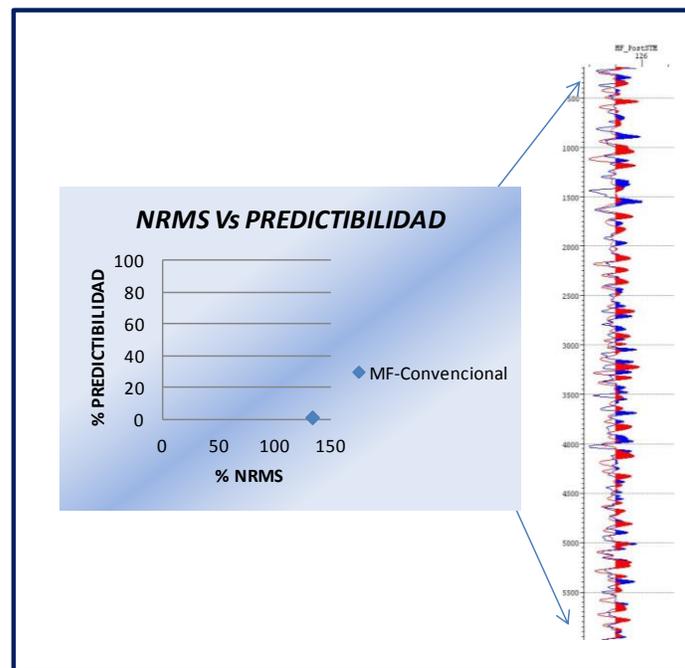


Figura 5-9: NRMS vs Predictibilidad entre la traza 125 PSTM y la traza 125 MF. La traza en Rojo convencional. La traza en Azul MF

Como resultados se obtuvo que las diferencias entre las dos trazas se encuentran vinculadas a la presencia de ruido. Se procedió luego a trabajar con la totalidad de los datos (apilados MF y Convencional).

Como preámbulo a los cálculos numéricos de NRMS y Predictibilidad, es necesario razonar acerca de las frecuencias y las posibles diferencias en tiempo discernidas a partir de cálculos de correlación.

Como se mencionó con anterioridad, los rangos de frecuencias son muy parecidos; Sin embargo, los contenidos de bajas frecuencias se resuelven mejor en el apilado convencional, tal y como lo muestra la figura 5-10.

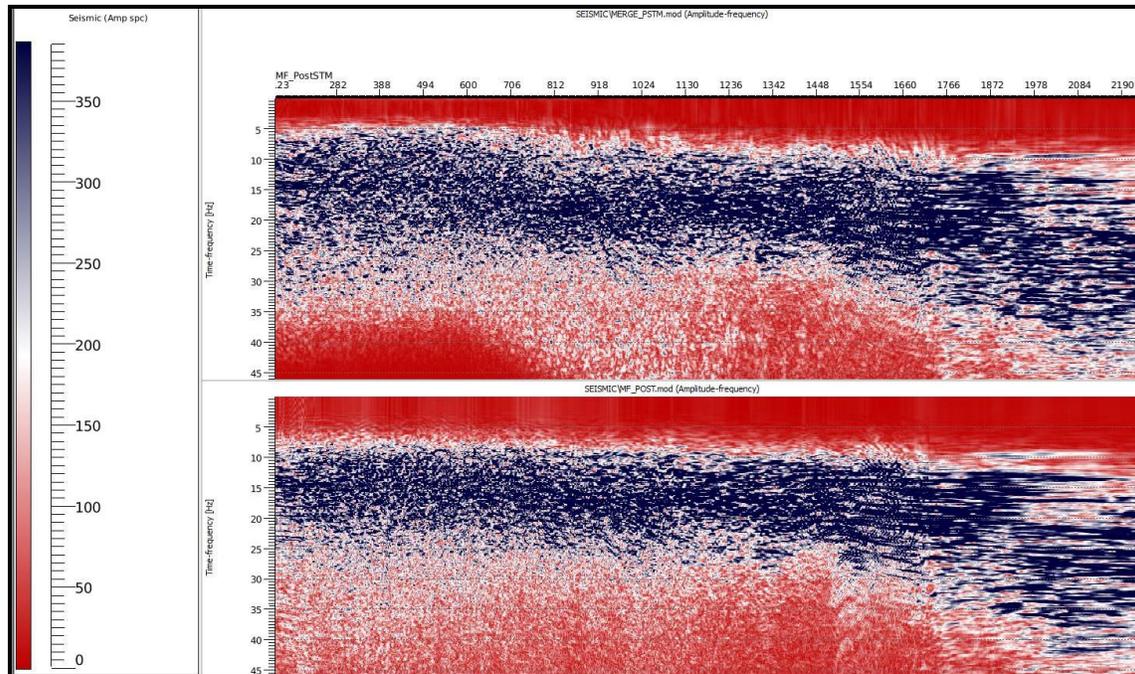


Figura 5-10: Rangos de frecuencia. Apilado convencional (arriba). . Apilado MF (abajo). Note frecuencias desde 5HZ en el apilado convencional.

La correlación calculada entre los dos apilados, muestra una mayor similitud en la zona del Antepaís, (zona con mejor claridad de los cuanto a datos de amplitud espectral) confirmando la evaluación cualitativa. Figura 5-11.

La predictibilidad, como se mencionó al inicio de la sección, es sensible a lo longitud de la ventana de correlación que en este caso está constituida por la totalidad de los apilados (ventana de 0 a 6 segundos). Por esta razón, con el fin de encontrar detalles significativos en términos de comparación, es necesario considerar ventanas más estrechas para la realización de los cálculos.

Se escogieron dos líneas de tiempo alrededor de las cuales se realizaron los cálculos de Nrms y Predictibilidad: La primera, a un tiempo de 2 segundos, incluye las zonas 1 y 3 con una ventana de 500 ms (250 ms hacia arriba y 250 ms hacia abajo); Y la segunda, alrededor de 4 segundos, que incluye la zona 2 con una ventana de 500 ms.

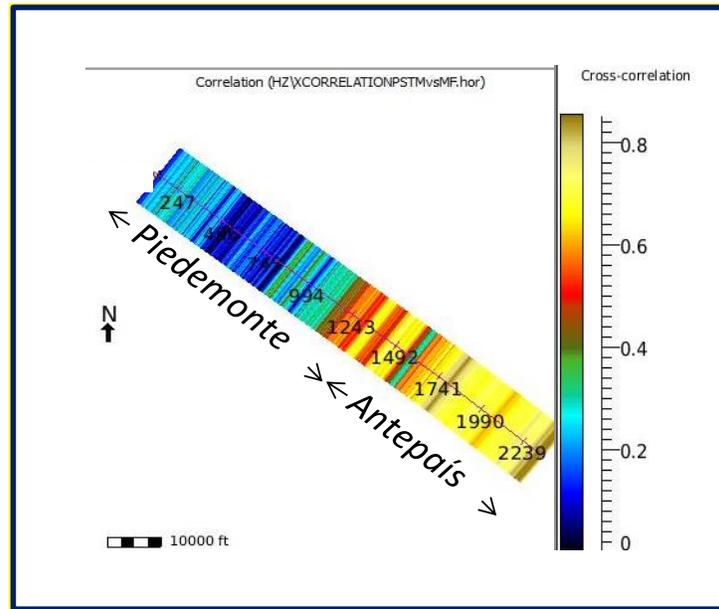
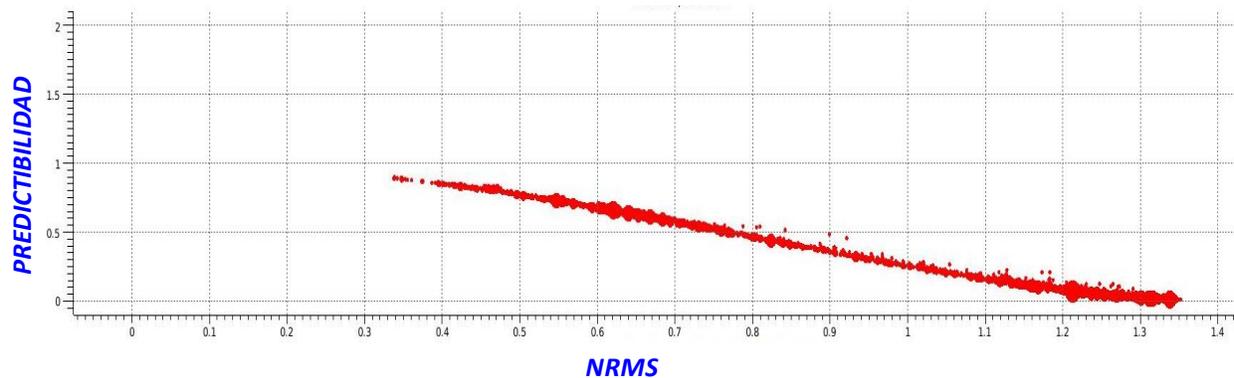


Figura 5-11: Correlación entre Apilado convencional y Apilado MF. Note mejor correlación en el sector del Antepaís.

Al graficar los valores de predictibilidad contra los valores de Nrms Figura 5-12, se observa como las poblaciones de valores se localizan por debajo de 100% en valores de predictibilidad y los valores de Nrms oscilan entre 33% y 135 %, para las dos ventanas de tiempo.

La población de puntos indica mayores diferencias relacionadas a ruido.



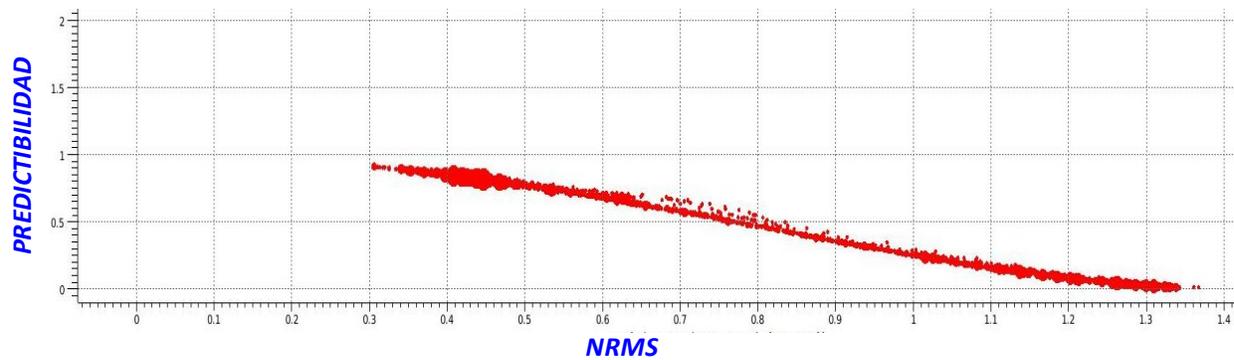


Figura 5-12: NRMS Vs Predictibilidad Apilado convencional y Apilado MF. Sup. alrededor de 2 seg. Inf alrededor de 4 seg.

Una vez identificadas las relaciones Predictibilidad / Nrms en tiempo, se procedió a identificar las diferencias a lo largo de la línea merge, intentando caracterizar el sector del piedemonte y del Antepaís con datos más precisos. La Figura 5-13 muestra los valores obtenidos a lo largo de la línea merge para cada traza a una profundidad de 2 ms (sectores 1 y 3).

Note como en la zona del Antepaís (después de la traza 1720) para el sector 1, los valores de predictibilidad se acercan al 100% y los valores de NRMS se localizan alrededor del 60% mostrando una mayor diferencia entre los dos apilados relacionada al ruido. Hacia el sector 3 en el piedemonte e inclusive, alrededor del rasgo estructural (falla Oriental), los valores en predictibilidad disminuyen y en NRMS aumentan mostrando de igual manera una causal mayor de ruido que en términos cuantitativos, podrían corresponder a un aumento en ruido de más de 100% (Figura 5-1 Kragh Y Christie, 2002).

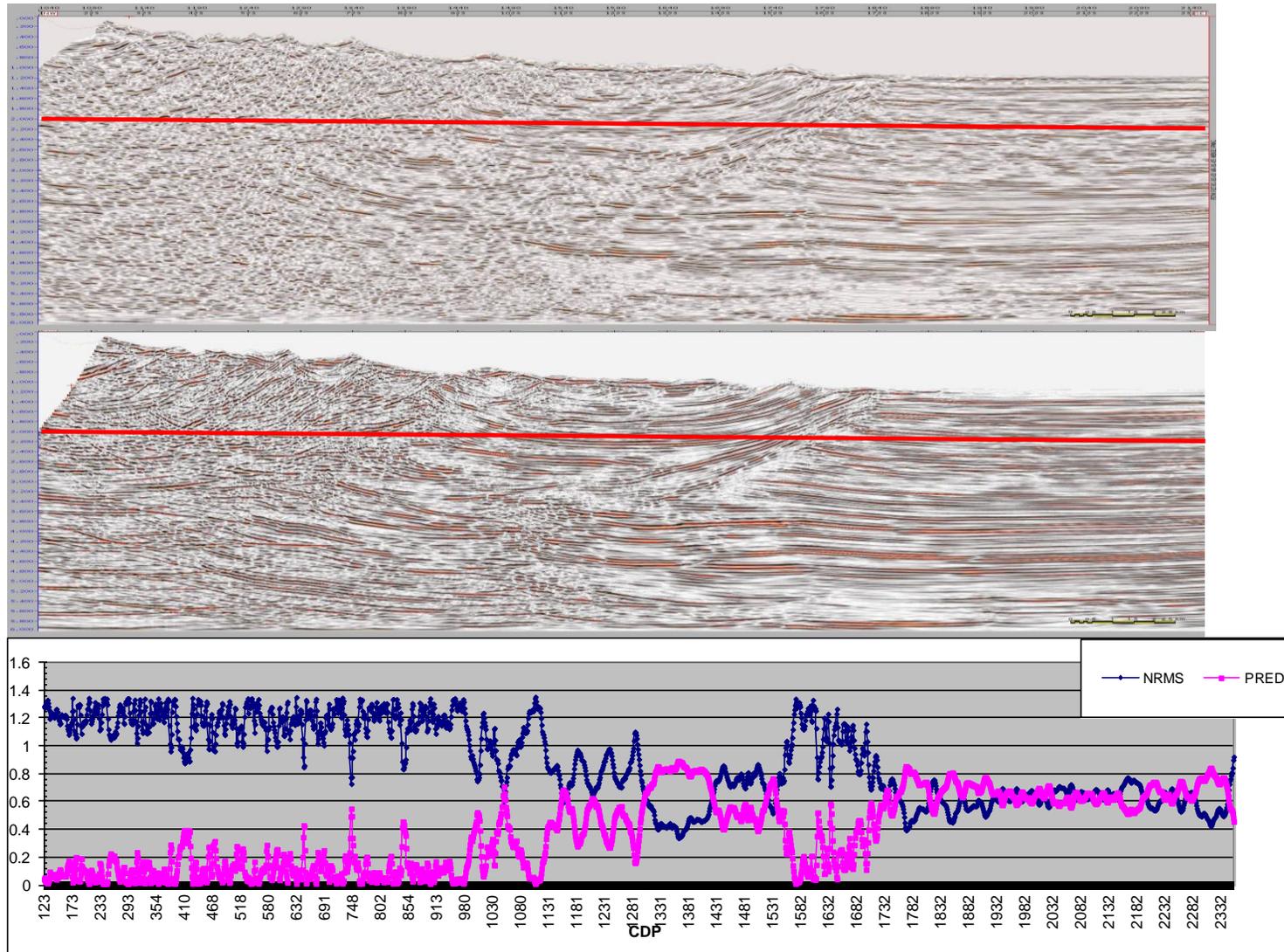


Figura 5-13: NRMS & Predictibilidad a lo largo de 2 segundos. Sup. Línea convencional, Centro. Línea MF, Inf. Nrms Vs Predictibilidad. Línea roja corresponde a 2 seg

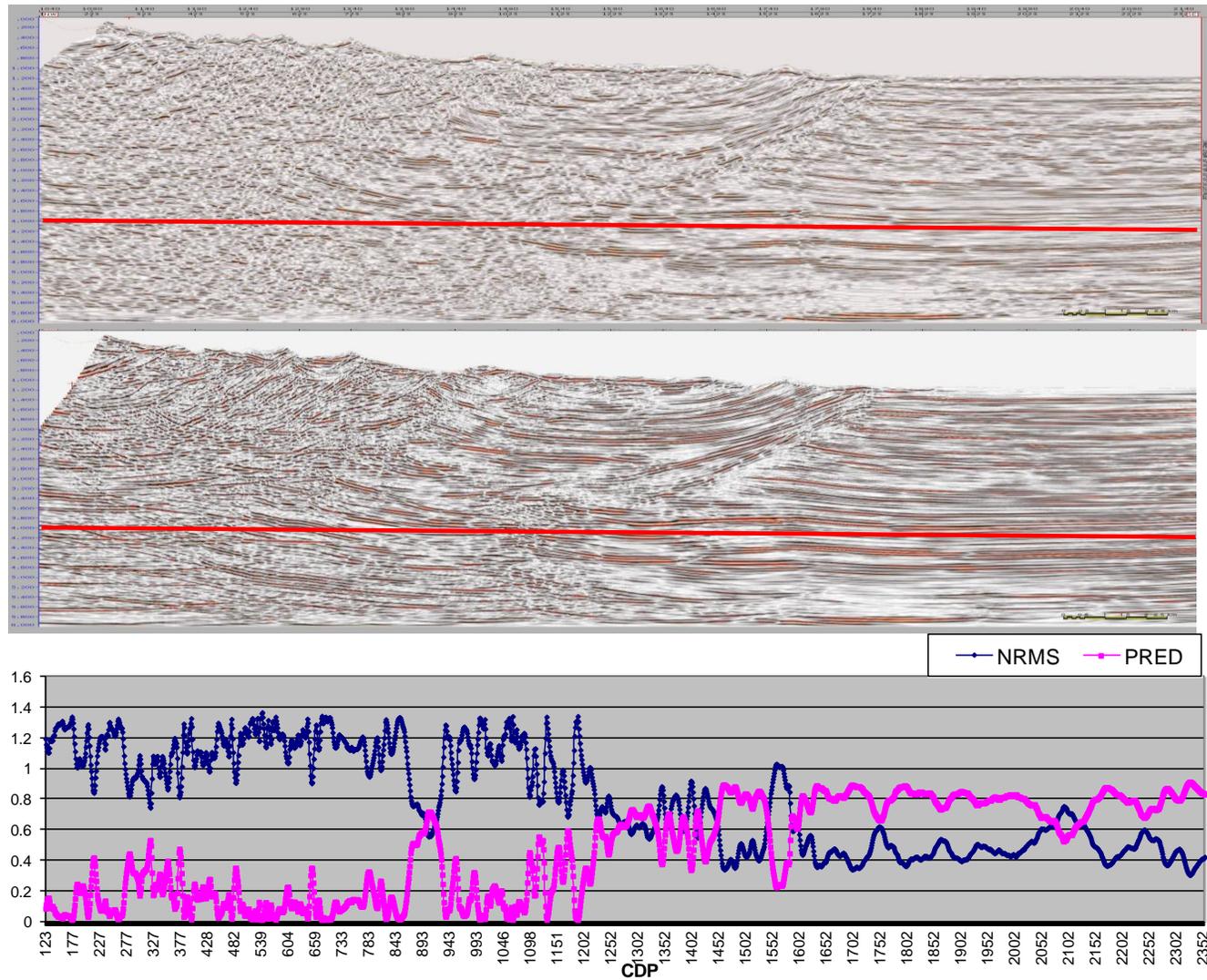


Figura 5-14: NRMS Predictibilidad a lo largo de 4 segundos. Sup. Línea PSTM, Centro. Línea MF post, Inf. Nrms Vs Predictibilidad. Línea roja corresponde a 4 seg.

La Figura 5-14 muestra los valores obtenidos a lo largo de la línea merge para cada traza a una profundidad de 4 ms (sector 2 en el Antepaís). Los valores de predictibilidad se acercan una vez más al 100% y los valores de NRMS se localizan alrededor del 40% mostrando la diferencia asociada a ruido de alrededor de un 25 % (Kragh y Christie, 2002). Hacia el sector del Piedemonte las predictibilidades se disparan de nuevo a 0 y los valores NRMS a 120% igual que alrededor de 2 segundos.

En términos generales, las diferencias entre las secciones sísmicas procesadas con la técnica convencional y la técnica MF se asocian a ruido. Para el sector del Piedemonte este ruido supone incrementos del 100%; Para el sector somero del Antepaís alrededor del 50 %; Y para el sector profundo en un 25 %. Los datos arrojados por el análisis cuantitativo validan la descripción cualitativa en cuanto suponen que el sector en el cual la imagen presenta una mayor distorsión corresponde al sector del Piedemonte; Sin embargo, es la técnica MF la que propone una imagen más limpia, de mayor sentido geológico, eliminando en parte el ruido y evidenciando una mejor resolución reflejada en la continuidad de los eventos sísmicos.

Se puede suponer que una de las causas de esta mejora es que el método MF utiliza una súper familia que agrupa todas las trazas que contribuyen en el momento apilar, teniendo en cuenta todos los arribos de información y las interfases curvas presentes en el subsuelo; Al no considerar la corrección NMO, la imagen MF se presenta libre de el efecto de estiramiento en las trazas (si se consideraran grandes separaciones fuente – receptor); Además, evita el uso de un modelo de velocidades complejo que puede suponer errores iniciales.

Aunque el ruido es disminuido, como se mencionó con anterioridad, la técnica MF no propone su solución.

6. Consideraciones finales.

Al comparar los productos del procesamiento Multifoco obtenidos: Semblagramas, ángulos de emergencia, radios CRE y CEE; Con la línea apilada MF y MF post, se encuentran varias similitudes, entre ellas, las estructuras anticlinales entre los 2600 y 4400 ms en el sector Oriental del Piedemonte. Este rasgo también está presente, aunque poco perceptible, en las líneas con procesamiento convencional.

Los anticlinales que aparecen entre los 2600 ms y los 4800 ms en la región del Antepaís en las secciones convencional y MF, también son reconocidos en las semblanzas y el cálculo de los ángulos CEE de la técnica MF; En las secciones de Angulo emergente y Radio CRE se dibujan con poca claridad.

Comparando las interpretabilidad entre las dos técnicas de procesamiento, con la técnica MF se evidencia una mayor complejidad estructural que aquella percibida en la línea convencional PostSTM e inclusive con la línea PSTM. Rasgos mayores, identificados con los mapas de superficie, son comunes para ambos tipos de procesamiento, sin embargo, la aparición de rasgos menores es más perceptible en el procesamiento MF; Igualmente, diferencias en cuanto a la interpretación en tiempo de los horizontes (Figura 6-2, Anexo I ,Figura 6-3, Anexo J y Figura 6-4, Anexo K) evidencian cómo, a medida que se acrecenta la complejidad estructural (sector del piedemonte), los horizontes pierden continuidad; Esto es más notorio con las líneas convencionales, mientras que se muestran más continuos en la línea procesada con la técnica MF.

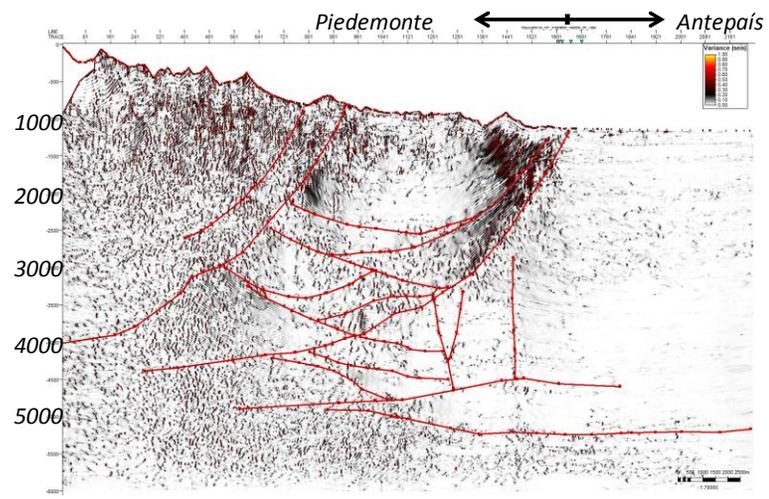
Rasgos como el anticlinal presente en el sector profundo del antepaís y común para ambos tipos de procesamiento, se muestra de mediana amplitud y afectado por

cabalgamientos y retrocabalgamientos en la línea MF Post, mientras que en el procesamiento convencional se muestra más amplio.

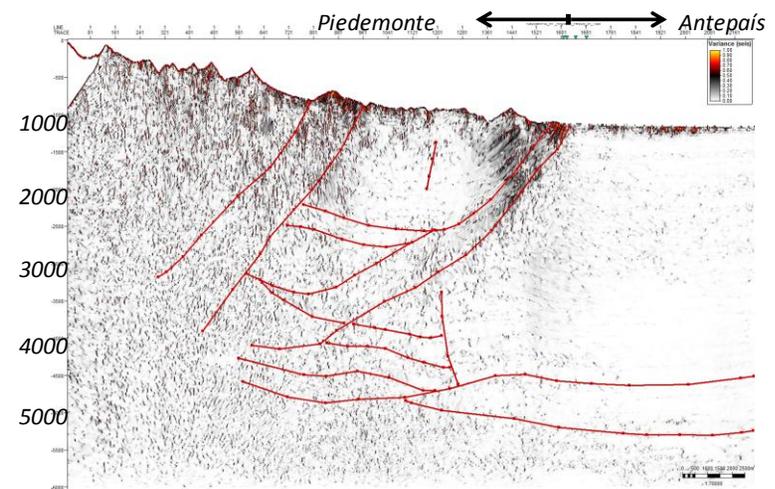
En el sector del Piedemonte, la complejidad estructural es mayor. Los eventos y las reflexiones que así lo demuestran son más perceptibles y de mayor definición en la línea MF Post, que en la línea convencional. Se muestran despegues de mayor envergadura, con límites bien definidos, y claridad en las direcciones de buzamiento de los diferentes horizontes. Igual sucede con la estructura anticlinal al Occidente de la falla frontal, que se muestra con mayor definición y mayor extensión lateral, a diferencia de la línea convencional, en donde dicha estructura es dibujada precariamente y con una extensión menor.

Atributos como la varianza ayudan a medir el grado de variabilidad existente entre dos trazas vecinas, en donde cambios abruptos en el sistema de correlación, pueden ser desplegados, permitiendo que rasgos estructurales como fallas, sean más visibles. Las medidas de varianza son sensibles a la forma de la ondícula y a los cambios laterales en las amplitudes de los reflectores; Para la línea MF la varianza se muestra más marcada que para la línea convencional (Figuras 6-1), es decir, al ser la varianza la medida que refleja el ajuste de una traza X a una traza principal, los resultados en donde todas las trazas son iguales mostrarían varianzas mínimas, y rasgos estructurales como fallas menos definidas.

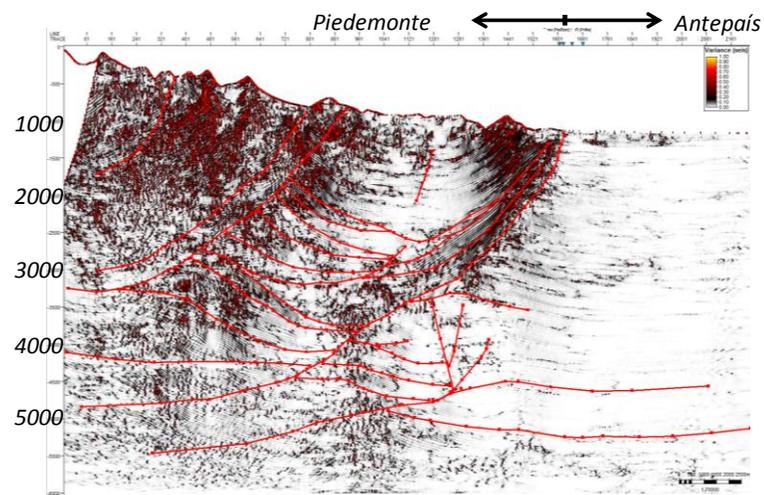
La afirmación de la existencia de una mayor complejidad estructural en una u otra imagen sísmica no implica la veracidad de esta, sin embargo, al considerar las diferentes interpretaciones estratigráficas y estructurales, cuantificaciones de riesgos exploratorios podrían verse afectados.



(a)



(b)



(c)

Figura 6-1: Varianza. Note la definición de los rasgos estructurales. Línea PSTM(a), Línea PostSTM (b), Línea MF Post. (c).

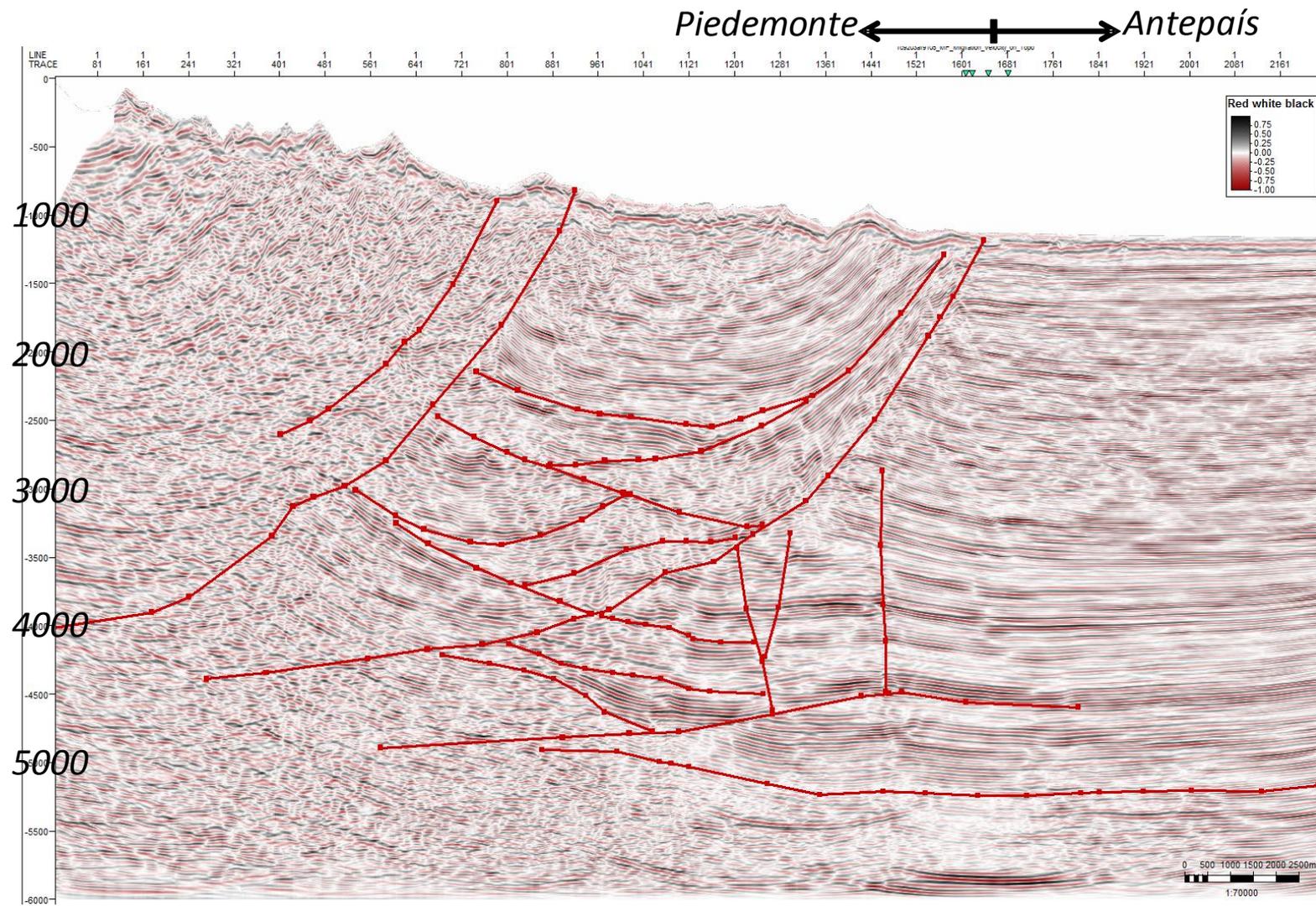


Figura 6-2: Línea PSTM (Amplitudes). Interpretación geológica.

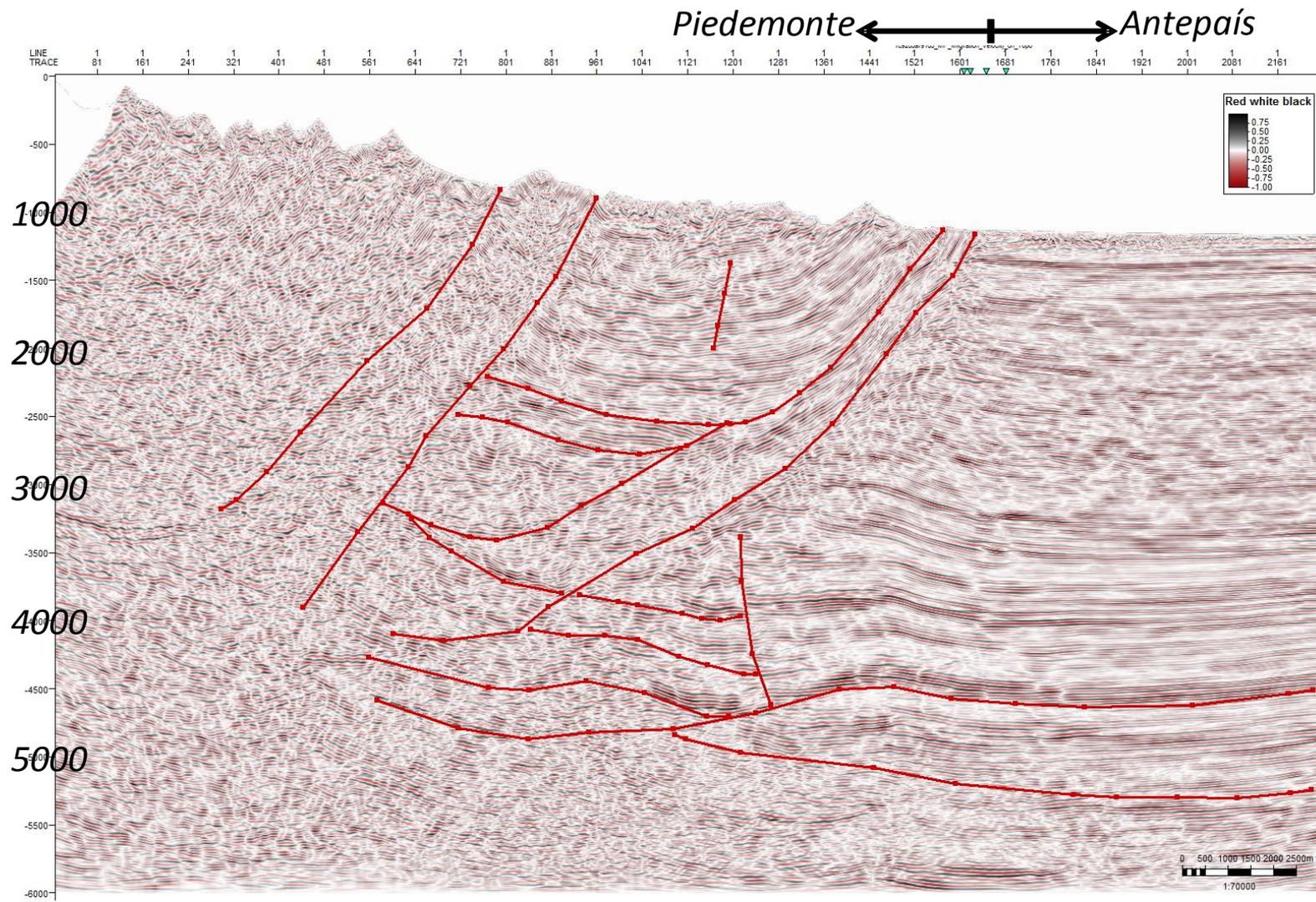


Figura 6-3: Línea PostSTM (Amplitudes). Interpretación geológica.

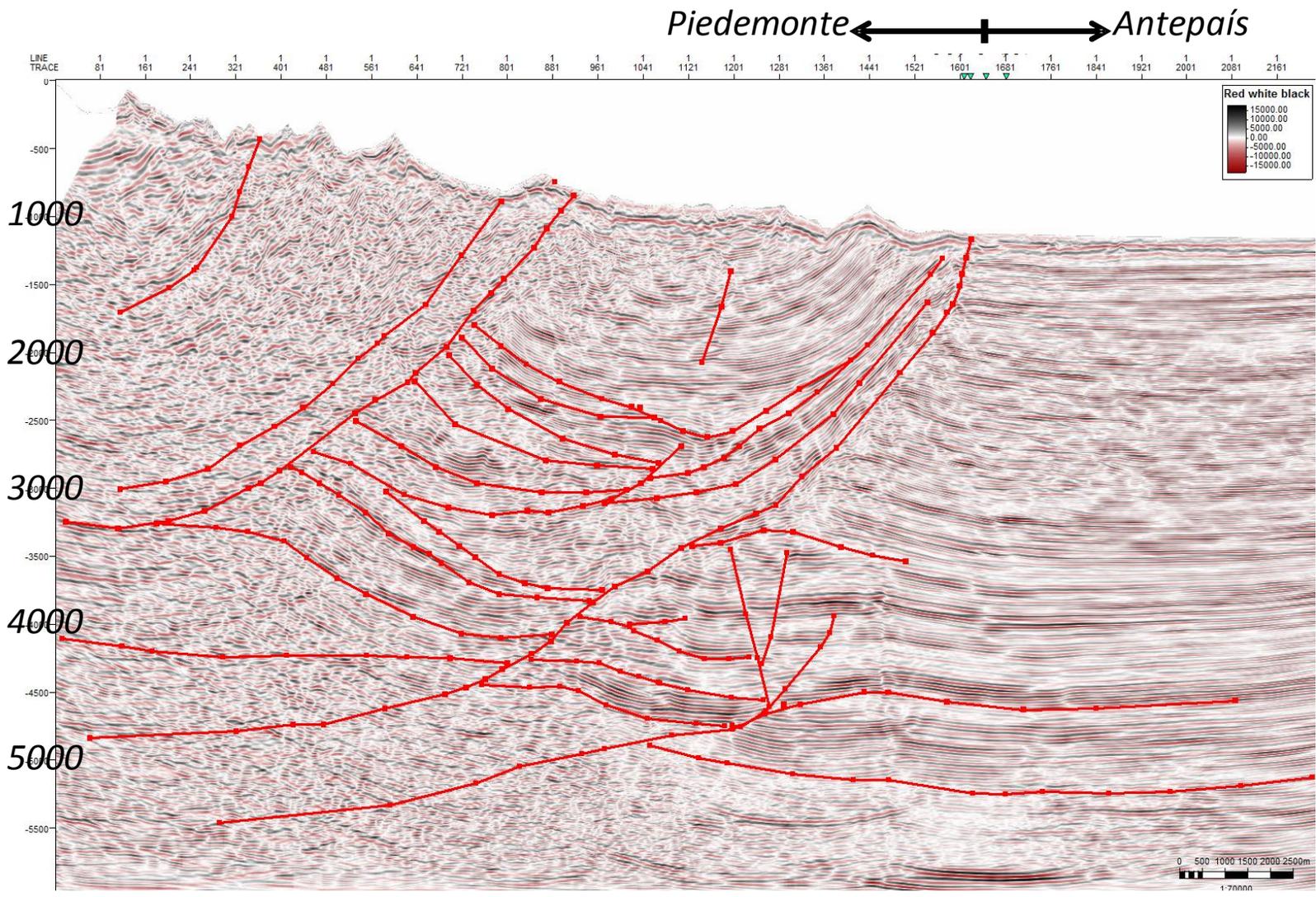


Figura 6-4: Línea Migrada MF Post (Amplitudes). Interpretación geológica.

6.1 Riesgos en la interpretación de los datos.

La evaluación de parámetros como la presencia de la roca reservorio (roca que contiene los hidrocarburos), la geometría de la trampa (Cierres estructurales o estratigráficos), la evaluación de las vías de migración, el periodo de tiempo en la cual esta ocurrió, y la capacidad de sello, está relacionada directa o indirectamente al mejoramiento de la imagen sísmica. La viabilidad de los trazos de las fallas, determina la presencia o no de las trampas estructurales, las posibilidades de escape de potenciales acumulaciones de hidrocarburo, y la continuidad o no de reflectores que representan los horizontes reservorios o sello. Incorrectas interpretaciones estructurales son las causantes de cerca del 43% de los pozos secos (Rose, 2001).

Basados en las consideraciones anteriores, se realizó la cuantificación del riesgo para un lead hipotético basándose en las imágenes obtenidas en tiempo con las dos técnicas de procesamiento (Tabla 6-1). Los valores considerados se basan en los resultados obtenidos en prospectos análogos en el área.

PARAMETRO	DESCRIPCION	Procesamiento Técnica Convencional	Procesamiento Técnica MF	Procesamiento Técnica Convencional	Procesamiento Técnica MF
		%	%	% Total	% Total
ROCA FUENTE	<i>Cantidad / Volumen</i>	90%	90%	90%	90%
	<i>Calidad / Riqueza</i>	90%	90%		
	<i>Maduración</i>	100%	100%		
ROCA RESERVORIO	Presencia	70%	70%	70%	70%
	<i>Calidad</i>	80%	80%		
	<i>Comportamiento</i>	80%	80%		
ROCA SELLO	Presencia	70%	70%	70%	70%
	<i>Calidad</i>	70%	70%		
	<i>Comportamiento</i>	70%	80%		
TRAMPA	<i>Presencia</i>	70%	70%	60%	70%
	<i>Calidad</i>	60%	70%		
	<i>Geometría (Confiable y Control)</i>	60%	70%		
MIGRACION Y TIEMPO	<i>Tiempo del Cierre</i>	70%	70%	70%	70%
	<i>Tiempo de Expulsion</i>	70%	70%		
	<i>Patron efectivo de Migracion</i>	70%	70%		
				19%	22%

Tabla 6-1: Cuantificación del riesgo geológico. Se resaltan los parámetros en los cuales la imagen sísmica ejerce una mayor influencia.

Como resultado se observa que con la imagen obtenida con la técnica de procesamiento MF, el porcentaje de ocurrencia se incrementa en dos puntos. Esta afirmación es subjetiva y valida solo para el presente trabajo; Generalizaciones de disminuciones en los cálculos de riesgo utilizando la técnica MF serian muy arriesgadas.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- La técnica MF se presenta como una alternativa para la evaluación de prospectos aportando un nuevo enfoque en la cuantificación del riesgo exploratorio.
- La comparación entre la técnica convencional de procesamiento y el método MF, muestra que con esta última, es posible identificar un mayor número de rasgos estructurales.
- El procesamiento con la técnica MF permite una mayor definición en cuanto a continuidad de eventos se refiere.
- La línea apilada con la técnica MF muestra claras diferencias con el apilamiento convencional, siendo la primera de mejor calidad y comparable con el producto final migrado MF.
- Angulogramas y radiogramas (particularmente ángulo CEE) reflejan una primera aproximación a la imagen final.
- El Angulograma detecta diferentes paquetes de ondas lo que permite considerar la tendencia de las mismas y su comportamiento en zonas de diferente complejidad estructural (Piedemonte y Antepaís). Cambios bruscos en el Angulograma reflejan rasgos estructurales importantes.
- El Semblagrama se muestra con mejor definición en zonas de baja complejidad estructural.
- Parámetros como Angulogramas, Radiogramas y Semblagramas de la técnica Multifoco, permitieron una primera aproximación al modelo geológico.
- No existen mayores variaciones de frecuencias entre la técnica MF y la técnica convencional.
- La fase calculada, aunque se muestra más constante en la técnica MF que en la técnica de procesamiento convencional, no refleja mayores aportes a las interpretaciones estructurales ni estratigráficas.

- La comparación entre los productos finales muestran a la técnica MF como una técnica más efectiva para el estudio de áreas complejas (Piedemonte), permitiendo la identificación de importantes elementos estructurales como ejes de pliegues y la definición de fallas con mejor precisión. El uso de esta técnica permite, aumentar la relación señal - ruido consiguiendo una sección más limpia, así como un aumento en la resolución y continuidad en los eventos.
- Para el presente trabajo, el estudio de múltiples no fue concluyente.

7.2 Recomendaciones

Al ser este estudio uno de los primeros en intentar demostrar las ventajas y desventajas de la técnica de procesamiento Multifoco Vs la técnica convencional de procesamiento, se recomienda probar la técnica en otras áreas en donde sea posible corroborar las interpretaciones con datos reales de pozos perforados que así lo permitan.

Para trabajos futuros, la implementación sistemática de la metodología de comparación, no solo cualitativa, sino también cuantitativa, deberá permitir un mejor acercamiento a la veracidad de las conclusiones derivadas de las interpretaciones de los datos.

Análisis detallados en las etapas de procesamiento, cualquiera que sea la técnica, deberán ser tenidos en cuenta cuidadosamente, ya que de ellos dependerá la imagen final obtenida, así como el uso de los datos derivados para posteriores reprocesamientos encaminados a la preservación de atributos.

Bibliografía

Babich, V., y Boldyrev, V., 1991. Short – Wavelength diffraction theory: Asymptotic methods. Springer Verlag, Vol 4.

Berkovitch, A., Gelchinsky B., y Keydar, S.,1994. Basic formula for Multifocusing stack. European Association of Exploration Geophysics EAGE, expanded abstract, p140.

Berkovitch, A., 1996. The Multifocusing method for homeomorphic and stacking of seismic data. Ph.D. thesis, Tel-Aviv University, Tel Aviv, Israel.

Berkovitch, A., Keydar, S. Landa, E., y Trachman, P., 1998, Multifocusing in practice, SEG 68th Annual Conference and Exhibition, Expanded Abstracts.

Berkovitch, A., Belfer, I., y Landa, E. 2008. Multifocusing as a method of improving subsurface imaging. The Leading Edge, 27.

Bortfeld, R. 1989. Geometrical ray theory: Rays and travel times in seismic systems (second order approximation of the travel times). Geophysics 54.

Burnside W., y Panton A. 1960. The Theory of Equations With an Introduction To The Theory of Binary Algebraic Forms. Dover, New York.

Cárdenas, A. 2006. Inversión multiparamétrica de tiempos de viaje para un medio estratificado con gradiente constante de velocidad: Tesis maestría en geofísica, Universidad Nacional de Colombia.

Cerveny, V., 1981. Dynamic Ray Tracing in 2D media.

Cerveny, V., 1985. The application of Ray Tracing to the numerical modeling of seismic wavefield in complex structures. Seismic shear waves . Part A.

Cerveny, V., Klimes, L., y Psencik, I., 1988. Application of the dynamic Ray tracing. Earth Planet Interiors, 51.

Cerveny, V., 2001. Seismic ray theory. Cambridge University Press.

De Bazelaire, E., 1988. Normal moveout correction revisited: inhomogeneous media and curved interfaces. Geophysics 53, 143–157.

Dorrie, H. 1965. 100 Great Problems of Elementary Mathematics: Their History and Solutions. Dover, New York.

Fomel, S., y Kazinnik, R. 2009. Non-hyperbolic Common Reflection Surface. University of Texas at Austin. SEG Houston 2009 International Exposition and Annual Meeting.

Garabito, G., Chira, P., Tygel, M., y Santos, T. 2005. A quick review of 2D topographic travel times. Revista Brasileira de Geofísica 23 (1), 5-13.

Gelchinsky, B., 1988. The Common reflecting Element (CRE) Method. Non Uniform asymmetric multifold System. Exploration Geophysics, 19.

Gelchinsky, B., 1989. Homeomorphic Imaging in processing and Interpretation of seismic data (fundamentals and schemes). 59 th Annual International Meeting . SEG. Expanded Abstracts.

Gelchinsky, B., Berkovitch, A., y Keydar, S., 1997. Multifocusing Homeomorphic Imaging: Part 1. Basic concepts and formulae, Transcripts of the special course on Homeomorphic Imaging presented by B. Gelchinsky.

Gelchinsky, B., Berkovitch, A., y Keydar, S., 1999. Multifocusing Homeomorphic Imaging: Part 2. Multifold data set and Multifocusing. Journal of Applied Geophysics 42. Elsevier.

Gurevich, B., Keydar, S. Landa, E., 2002. Multifocusing imaging over an irregular topography. *Geophysics* Vol 67. No 2.

Hubral, P., y Krey, Th.,1980. Interval velocities from seismic reflection time measures . SEG Press.

Jager, R., Mann, J., Hoch, G., y Hubral, P. 2001. Common Reflection Surface Stack. Image and attributes. *Geophysics*, 66.

Jimenez, E. 2008. Metodología de procesamiento CRS para realce de Imagen sísmica. Tesis maestría en geofísica, Universidad Nacional de Colombia.

Keydar, S., Gelchinsky B., Shtivelman, V., y Berkovitch, A .,1990. The common Evolute Elements (CEE) stack imaging (zero offset stacks). 60 th Annual International Meeting . SEG. Expanded Abstracts.

Korabelnikov, A., Kulikova, A., Nevidimova, A., Belfer, A., y Berkovitch, A. 2008. A revised interpretation of the Russkoye field, western Siberia, using Multifocusing Technology. *First Break*, 26,69-75.

Kragh, E., y Christie, P., 2002. Seismic repeatability, normalized rms, and predictability. *The Leading Edge*.

Landa, E., Gurevich, B., Keydar, S., y Trachtman, P., 1999. Application of Multifocusing Method for Subsurface Imaging. *Journal of Applied Geophysics* 42. Elsevier.

Mayne, W.H., 1962. Horizontal data stacking technique: *Supplements to Geophysics*,27, 927-938.

Muller, T., Jager, R., y Hocht, G., 1998. Common Reflection Surface stacking method – imaging with an unknown velocity model. 68th Annual Conference Meeting. SEG. , Expanded Abstracts.

Neumann. P.,. 1998. Reflections on reflection in a spherical mirror. *American Mathematical Monthly* 105.

Rabbel, W., Buittner, R., y Gelchinsky, B., 1991, The common reflecting-element (CRE) method (non-uniform asymmetric multifold system): Phys. Earth Plan. Internat., 67.

Rose, P. 1999. Taking the risk out of petroleum exploration; the adoption of systematic risk analysis by international corporations during the 1990s. The Leading Edge 18.

Rose, P. 2001. Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures. AAPG Methods in Exploration Series, No 12.

Tygel, M., Santos, L., y Schleicher, J., 1999. Multifocusing moveout revisited: derivations and alternative expressions. Journal of Applied Geophysics, 42.

Tygel, M., y Santos, L., 2007. Quadratic normal Moveouts of symmetric reflections in elastic media: A quick tutorial. Studia geophysica et Geodaetica 51.

Ursin, B., 1982. Quadratic wavefront and travel time approximation in inhomogeneous layers from seismic reflections. Zero offset case. Geophysics, 46.

Korneev, V., Goloshubin, G.M., Daley, T.M., Silin, D.B., 2004. Seismic low-frequency effects in monitoring of fluid-saturated reservoirs. Geophysics, VOL. 69, No 2.; P. 522–532.

White, R.E., 1980. Partial Coherence Matching of Synthetic Seismograms with Seismic Traces. Geophysical Prospecting, 28.

Yilmaz, O.Z., 1989. Seismic Data Processing. Society of Exploration Geophysicists, USA.

Yilmaz, O.Z., 2001. Seismic Data Analysis Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data Volume I. Society of Exploration Geophysicists.

A. Anexo: Generación de la señal, Autocorrelación y cálculo NRMS

En “matlab” fueron utilizados los siguientes comandos:

```
%Generación de la señal
```

```
n = 0:3000;           %Generación de un vector n de 3001 muestras de 0 a  
                    % 3000 de uno en uno.
```

```
X = cos(2*pi*n*0.1); %Generación de un vector de 100 valores que se demo  
                    %minara señal X (traza1)
```

```
%Cálculo de la autocorrelación normalizada al valor máximo , es decir, los  
%valores de correlación estarán entre -1 y 1
```

```
Y = xcorr(X,'coeff');
```

```
%Representación grafica de la señal X y la autocorrelación Y.
```

```
subplot(221), plot(X,'y'), title('(señal)')
```

```
subplot(222), plot(Y,'b'), title('(Autocorr)')
```

```
% Calculo NRMS
```

```
%Cálculo del valor RMS
```

```
RMS_X = sqrt(sum(X.*conj(X))/size(X,1));
```

```
RMS_X
```

```
%calculo del valor RMS de la diferencia entre X y X
```

```
a=X-X ;
```

```
RMS_dif = sqrt(sum(a.*conj(a))/size(a,1));
```

```
RMS_dif
```

```
%cálculo del valor NRMS
```

```
nrms=(200*(RMS_dif))/(RMS_X+RMS_X);
```

```
nrms
```

```
escalares
```

B. Anexo: Generación del escalar, correlación cruzada y cálculo NRMS

En “matlab” fueron utilizados los siguientes comandos:

```
%Generando otra señal. Aplicando un escalar de valor 2  
X2 = 2*cos (2*pi*n*0.1);
```

```
%Graficando las dos señales X y X2  
subplot (221), plot(X,'y'), title('(señalX)')  
subplot(222), plot(X2,'g'), title('(señal2X)')
```

```
%Cálculo de la correlación cruzada normalizada entre X y X2  
[Z lag2] = xcorr(X,X2,'coeff'); %correlación cruzada
```

```
%Graficando las dos señales X X2, la Correlación Cruzada y la  
%Autocorrelación  
subplot(221), plot(X,'y'), title('(señalX)')  
subplot(222), plot(X2,'g'), title('(señal2X)')  
subplot(223), plot(Y,'b'), title('(autocorr)')  
subplot(224), plot(Z,'b'), title('(xcorr)')
```

```
% Calculo NRMS  
%Asignación de la variable ue a los datos de la traza A  
ue = X;
```

```
%Cálculo del valor RMS  
RMS_X = sqrt(sum(ue.*conj(ue))/size(ue,1));
```

RMS_X

```
%Asignación de la variable v a los datos de la traza  
%X2  
ve = X2;
```

```
%Cálculo del valor RMS  
RMS_X2= sqrt(sum(ve.*conj(ve))/size(ve,1));
```

RMS_X2

```
%calculo del valor RMS de la diferencia entre X y X2
```

```
we=ue-ve ;
```

```
RMS_dif = sqrt(sum(we.*conj(we))/size(we,1));
```

```
RMS_dif
```

```
%calculo del valor NRMS
```

```
nrms=(200*(RMS_dif))/(RMS_X+RMS_X2);
```

```
nrms
```

C. Anexo: Generación de la señal con cambio de fase y correlación cruzada.

En “matlab” fueron utilizados los siguientes comandos:

```
%Generación de la señal con diferencia de fase de 90 grados (equivalente  
%a un desplazamiento de pi/2)
```

```
%Generación de la señal con cambio de fase
```

```
B = cos(2*pi*n*0.1+ pi/2);
```

```
%Determinación de la correlación cruzada
```

```
[zz lag2] = xcorr(X,B,'coeff'); %correlacion cruzada entre la traza origi  
%nal y la traza desplazada.
```

```
%Representación grafica de las señales original X y desplazada B
```

```
plot(X,'y'), title('(señalX)')  
hold on  
grid on  
plot(B,'g'), title('(señalB)')
```

```
%Representación grafica de correlación cruzada entre la señal original X y  
%la senal desplazada B
```

```
plot(lag2, zz, 'Color','k')
```

D. Anexo: Generación de la señal con ruido y correlación cruzada.

En “matlab”

```
%Generación de la señal con adición de ruido aleatorio
```

```
RR = cos(2*pi*n*0.1)+ rand; %ruido
```

```
%Determinación de la correlación cruzada
```

```
ru = xcorr(X,RR,'coeff'); %correlacion cruzada entre la traza origi  
%nal y la traza ruidosa
```

```
%Representación grafica de las señales original X y ruidosa RR
```

```
plot(X,'y'), title('(señalX)')
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
plot(RR,'g'), title('(señalRR)')
```

```
%Representación grafica de correlación cruzada entre la señal original X y  
%la señal RR
```

```
plot(lag2, ru,'Color','k')
```

E. Anexo: Traza 125 y correlación cruzada.

En “matlab” fueron utilizados los siguientes comandos para la carga de las trazas MF y convencional

```
% Guardar el nombre de la traza1 (traza MF y traza convencional) en una variable  
% tipo caracter;
```

```
file='125_MF_POST.sgy';  
file2='125_Convencional.sgy';
```

```
% Lectura del archivo segy con su encabezado y amplitudes  
[Data,STH,SH]=ReadSegy(file);
```

```
[Data2,STH,SH]=ReadSegy(file2);
```

```
x=[STH.TraceNumber];  
t=SH.time;
```

```
% Grafica de la traza en diferentes presentaciones (trazas y densidad  
% variable)
```

```
subplot(2,2,1)  
wiggles(x,t,Data) % wiggle  
title('Wiggle')  
subplot(2,2,2)  
title('Wiggle')  
wiggles(x,t,Data2,'VA') % variable Area  
title('Variable Area')
```

Y para la correlación cruzada

```
%Determinación de la correlación cruzada  
[tz lag2] = xcorr(Data,Data2,'coeff'); %correlación cruzada entre la traza  
%MF y la traza Convencional.
```

```
%Representación grafica de correlación cruzada entre la señal MF y la  
%señal Convencional
```

```
subplot(221), plot(tz, 'b'), title('xcorr')
```

**F. Anexo: Sección sísmica Migrada
y Pre-apilada en tiempo PSTM.**

**G. Anexo: Sección sísmica Migrada
y Post-apilada en tiempo PostSTM.**

H. Anexo: Sección sísmica Post Apilada Multifoco.

I. Anexo: Sección sísmica Migrada y Pre-apilada en tiempo PSTM con interpretación geológica.

J. Anexo: Sección sísmica Migrada y Post-apilada en tiempo PostSTM con interpretación geológica.

**K. Anexo: Sección sísmica Post
Apilada Multifoco con interpretación
geológica.**