

Comparación de técnicas de conversión sísmica tiempo a profundidad por los métodos vertical stretch y rayo-imagen frente a la migración en profundidad pre-apilamiento de Kirchhoff en zonas geológicas estructuralmente complejas

Rubén Mauricio Vargas Pabón

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Geofísica

Director

José David Sanabria

PhD en Física

Codirector

Nancy Espíndola López

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ciencias

Escuela de física

Magíster en Geofísica

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

*Cuando no tenía a quien acudir,
sabía que podía contar contigo, gracias mamá.*

Agradecimientos

A Dios por darme la motivación para culminar mis estudios.

Al profesor José David Sanabria por confiar en mí y ser mi mentor.

Al ICP en el área de geofísica por brindarme las herramientas para desarrollar mi trabajo, en especial a Patricia Chajín, María Teresa, Herling González, Camilo González, Paola Orejuela, Julián y Nancy Espíndola.

A mi amigo Arley Guerrero Mesa que con su apoyo incondicional me brindo seguridad y consejos de superación para ganar en cada obstáculo surgido durante los años de estudio.

A mis compañeros de maestría Luis Carlos, Alejandra Vesga y Cristian Murillo por acompañarme en este proceso.

A toda mi familia.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Sísmica de reflexión.....	19
1.1 Adquisición sísmica de datos terrestres	19
1.2 Procesamiento de datos sísmicos terrestres	20
1.2.1 Velocidades en procesamiento sísmico terrestre.	23
1.2.2 Migración sísmica y clases de migración.	24
1.2.2.1 Migración pre-apilado en tiempo Kirchhoff PSTM.....	27
1.2.2.2 Migración pre-apilado en profundidad Kirchhoff PSDM.....	27
1.2.3 Conversión a profundidad.....	30
1.2.3.1 Estiramiento vertical.	30
1.2.3.2 Rayo Imagen.	31
1.3 Interpretación sísmica	34
2. Resultados y discusión.....	34
2.1 Resultados obtenidos con el uso de datos sintéticos.	35
2.1.1 Migración preapilada en profundidad PSDM.	36
2.1.2 Rayo Imagen.	37
2.1.3 Estiramiento vertical.	39
2.2 Datos Reales.....	40

2.2.1 Migración preapilada en profundidad PSDM.	43
2.2.2 Rayo Imagen.	44
2.2.3 Estiramiento vertical.	46
2.2.4 Discusión de resultados.....	48
2.2.4.1 Datos sintéticos.	48
2.2.4.2 Datos reales.	49
3. Conclusiones	51
Referencias Bibliográficas	53
Apéndices.....	57

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Arreglo sísmico.....	20
<i>Figura 2.</i> Terminología en el procesamiento sísmico.	22
<i>Figura 3.</i> Punto medio común entre fuentes Si. Geófonos G_i , $i = 1, 2, 3$	25
<i>Figura 4.</i> Rayo generado en un estrato inclinado..	25
<i>Figura 5.</i> Trayectoria de rayos.....	33
<i>Figura 6.</i> Sección PSTM generada en el software Promax para el modelo sintético Overthrust. En la vertical el tiempo (0 hasta 1900 ms), en la horizontal el número de CDP (0 hasta 600). La línea superior horizontal es el nivel de elevación que para el modelo es cero metros sobre el nivel del mar.	35
<i>Figura 7.</i> Migración PSDM desarrollada en datos sintéticos. En la vertical la profundidad (0 a 3800 m), en la horizontal el número de CDP (0 a 600). La línea superior horizontal es el nivel de elevación 0 m.s.n.m. Se resalta en un óvalo reflectores generados probablemente por la aplicación de un control de ganancia (AGC).	36
<i>Figura 8.</i> Velocidad original del modelo Overthrust sobre puesto sobre la imagen PSDM generada. Se observa en la parte central de la imagen en el sinclinal como los reflectores siguieron el modelo de velocidad.	37
<i>Figura 9.</i> Sección generada por rayo imagen para datos sintéticos. En la vertical la profundidad (0 a 3800 m), en la horizontal el número de CDP (0 a 600). La línea superior horizontal es el	

nivel de elevación 0 m.s.n.m. En el ´ovalo negro se observa reflectores convergiendo los cuales se generan por que el método no utiliza migración. 38

Figura 10. Velocidad original del modelo Overthrust sobrepuesto sobre la imagen generada de rayo imagen..... 38

Figura 11. Sección sísmica convertida a profundidad por estiramiento vertical en datos sintéticos. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación 0 m.s.n.m. En el ´ovalo de color negro se observan falsos anticlinales. 39

Figura 12. Velocidad original del modelo Overthrust sobrepuesta sobre la imagen generada por estiramiento vertical..... 40

Figura 13. Modelo de velocidad en tiempo generado en Promax a partir del picado de la semblanza. Tiempo (ms) en la vertical vs CDP..... 41

Figura 14. PSTM generada a partir de datos reales. En la vertical el tiempo (ms), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación. El óvalo negro encierra la zona de mayor complejidad estructural donde la migración en tiempo no visualiza los eventos. 42

Figura 15. Modelo de velocidad en profundidad PSDM. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación. 42

Figura 16. PSDM generada con datos reales. En la vertical la profundidad (0 a 6000 m), en la horizontal el número de CDP (0 a 1400). La línea superior horizontal es el nivel de elevación. El rectángulo negro en la imagen representa la zona somera en donde la migración en profundidad solucionó en parte la visualización de los eventos..... 43

Figura 17. Amarre sísmica pozo para la herramienta PSDM a partir de datos reales. En la vertical la profundidad (0 a 25000 ft), en la horizontal la distancia (ft). La imagen es visualizada en el software DecisionSpace Geosciences (DSG). La ubicación del pozo 2 es sobre un anticlinal afectado por una falla de cabalgamiento..... 44

Figura 18. Imagen obtenida por rayo imagen en profundidad con datos reales. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación. El óvalo negro encierra estructuras con gran buzamiento formando un anticlinal que difieren de la realidad geológica del Catatumbo. 45

Figura 19. Sección en profundidad con amarre sísmica pozo por la técnica rayo imagen. En vertical profundidad (km), en horizontal la distancia (km). La imagen es visualizada en el software DSG..... 46

Figura 20. Imagen sísmica convertida a profundidad por estiramiento vertical. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación. En el óvalo negro se observa falsos sinclinales a profundidad de basamento, debido a que los registros litológicos de pozo muestran que a esta profundidad hay rocas cristalinas y no estratificadas..... 47

Figura 21. Imagen sísmica convertida a profundidad por estiramiento vertical con amarre sísmica- pozo. En la vertical la profundidad (ft), en la horizontal la distancia (ft). Visualizada en DSG..... 47

Figura 22. Picado de velocidades CDP 52. En la vertical el tiempo (ms), en la horizontal la semblanza (se picó con línea blanca los colores agrupados en rojo indicadores de mayor energía), súper gathers (m) y CDP gathers (Se picó una línea negra donde se realzan los eventos)..... 58

<i>Figura 23.</i> Modelo de velocidad de apilado arrojado del picado de la semblanza en los puntos de mayor coherencia. En la vertical el tiempo (ms) y en la horizontal el número de CDP.....	59
<i>Figura 24.</i> Imagen PSTM generada luego de la tercera iteración de migración pre-apilado en tiempo. Tiempo (ms) en la vertical vs CDP en la horizontal.....	59
<i>Figura 25.</i> Secuencia de procesamiento utilizada para obtener la imagen PSTM del modelo Overthrust. Esta secuencia es estándar para cualquier modelo de velocidad inicial utilizado.	60
<i>Figura 26.</i> Modelo Original de velocidad de intervalo en profundidad de Overthrust. En la vertical la Profundidad (m), en la horizontal número de CDP.	61
<i>Figura 27.</i> Imagen de migración pre apilada tiempo con el modelo de velocidad en tiempo.....	62
<i>Figura 28.</i> Rayos imagen normales a la superficie para el modelado de la velocidad. Se observa sitios con menor cubrimiento debido a cambios de velocidad en cuales los rayos cambian de dirección bajando el nivel de confiabilidad.	63
<i>Figura 29.</i> Picado de primeros arribos. En la vertical tiempo (ms), en la horizontal número de canales.....	64
<i>Figura 30.</i> Picado de velocidad de apilado a partir del análisis de semblanza. El color azul es indicador de baja concentración de energía y el rojo de mayor. En la parte media está el CMP (offset) y muestra cómo se están aplanando los gathers a partir del picado, al final están los apilados a distintas velocidades. En la vertical está el tiempo (ms), en la horizontal la velocidad (m/s), offset (m), dyn y la función.	65
<i>Figura 31.</i> Imagen PSTM generada en un área con estructuras geológicas compleja por la presencia de fallas inversas de cabalgamiento. Tiempo (ms) en la vertical vs CPD.....	66
<i>Figura 32.</i> Iteración 1 donde se trabajó la zona somera (0 m a 1000 m) del modelo pues las velocidades interválicas actúan como una columna y se debe mejorar la sección de la parte	

somera e ir avanzando luego a la zona profunda. En la vertical profundidad (m), en la horizontal CDP.....	67
<i>Figura 33.</i> Iteración 3. Migración en profundidad aplicando residual para aplanar los gathers. En la vertical profundidad (m), en la horizontal CDP.....	68
<i>Figura 34.</i> Secuencia de procesamiento utilizada para obtener la imagen PSTM Y PSDM en datos reales terrestres.	69
<i>Figura 35.</i> Imagen PSTM y modelo de velocidad de migración en tiempo utilizados para la conversión a profundidad por rayo imagen.	71
<i>Figura 36.</i> Modelo de velocidad con rayo imagen en la conversión a s'ismica a profundidad. ..	71

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Metodología.....	57

Resumen

TÍTULO: COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE CONVERSIÓN SÍSMICA TIEMPO A PROFUNDIDAD POR LOS MÉTODOS VERTICAL STRETCH Y RAYO-IMAGEN FRENTE A LA MIGRACIÓN EN PROFUNDIDAD PRE-APILAMIENTO DE KIRCHHOFF EN ZONAS GEOLÓGICAS ESTRUCTURALMENTE COMPLEJAS*.

AUTOR: RUBÉN MAURICIO VARGAS PABON**

PALABRAS CLAVE: RAYO-IMAGEN, PSDM, ESTIRAMIENTO VERTICAL.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se presenta la comparación de técnicas de conversión sísmica tiempo a profundidad por los métodos vertical stretch y rayo imagen frente a la migración PSDM utilizando datos sintéticos y reales. Para la industria de los hidrocarburos es de interés obtener imágenes confiables del subsuelo; para esto recurren al método sísmico de reflexión y por medio de un procedimiento de tratamiento de señales se obtiene una imagen del subsuelo en tiempo. Sin embargo, estas imágenes son requeridas en profundidad, para ello se han desarrollado tecnologías que permiten obtenerlas en profundidad. Las herramientas que se emplearon para evaluar el dominio en profundidad fueron migración sísmica antes del apilamiento en profundidad (PSDM), estiramiento vertical (vertical stretch) y rayo imagen. Se generó, imágenes en profundidad para cada una de ellas, partiendo del dominio en tiempo. Se utilizó el modelo sintético de Overthrust (Operto, 2003). Se inició con una imagen en tiempo y un campo de velocidades reverse time migration (RTM) producto de un procesamiento de migración en tiempo pre-apilado de Kirchhoff (PSTM), a partir de los datos obtenidos de esta secuencia se realizó las conversiones a profundidad. Los resultados obtenidos para las técnicas de conversión rayo imagen y estiramiento vertical son rápidos y confiables en sectores con bajos cambios de velocidad lateral, en cuanto a los resultados obtenidos en PSDM se comprobó que hay mayor continuidad de los horizontes en la parte central de los modelos, esta técnica utiliza iteraciones en el procesado y genera migración para obtener la imagen, incluso resuelve el problema de imagen que no estaba solucionado en el procesamiento PSTM, pues la técnica acepta cambios mayores en la velocidad lateral tomando como base velocidades interválicas.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Magíster en Geofísica Director José David Sanabria PhD en Física Codirector ancy Espíndola López Geólogo

Abstract.

TITLE: COMPARISON OF TIME-TO-DEPTH SEISMIC CONVERSION TECHNIQUES BY VERTICAL STRETCH AND IMAGE-RAY METHODS VERSUS PRE-STACK DEPTH MIGRATION IN STRUCTURALLY COMPLEX GEOLOGICAL AREAS*.

AUTHOR: VARGAS PABON RUBEN MAURICIO**

KEYWORDS: IMAGE-RAY, PSDM, VERTICAL STRETCH.

DESCRIPTION:

This paper presents the comparison of time-to-depth seismic conversion techniques by vertical stretch and image-ray methods against PSDM migration using synthetic and real data. It is of interest to the hydrocarbon industry to obtain reliable images of the subsoil; for this they resort to the seismic method of reflection and by means of a signal processing procedure an image of the subsoil is obtained in time. However, these images are required in depth, for this they have developed technologies that allow them to be obtained in depth. The tools used to assess the depth domain were seismic migration before depth stacking (PSDM), vertical stretching (vertical stretch) and image beam. It was generated, in-depth images for each of them, starting from the domain in time. The synthetic model of Overthrust was used (Operto, 2003). It began with a time image and a reverse time migration (RTM) velocity field product of a pre-stacked Kirchhoff (PSTM) migration processing, from the data obtained from this sequence the deep conversions were performed. The results obtained for the techniques of image ray conversion and vertical stretching are fast and reliable in sectors with low lateral velocity changes, as for the results obtained in PSDM it was found that there is greater continuity of the horizons in the central part of the models, this technique uses iterations in the processing and generates migration to obtain the image, it even solves the image problem that was not solved in the PSTM processing, since the technique accepts major changes in lateral velocity based on intervalic velocities.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Magíster en Geofísica Director José David Sanabria PhD en Física Codirector ancy Espíndola López Geólogo

Introducción

La sismica de reflexión ha sido el método más usado para el hallazgo de hidrocarburos, el propósito es obtener una imagen del subsuelo que permita identificar la geometría de las trampas estructurales, estratigráficas, etc. Está basado en la ley de Snell y consiste en términos generales en la propagación de ondas acústicas producidas por una fuente artificial en datos adquiridos en tierra y mar ver (Lowrie, 2007), se utiliza principalmente explosivos de detonación rápida tipo sismigel o placas vibratoras generando energía sísmica.

Las ondas generadas por estas fuentes se propagan por las diferentes unidades litológicas a diversas velocidades dependiendo de la elasticidad y composición de las rocas, para ser retornadas a la superficie mediante el fenómeno de reflexión y refracción, quedando registradas en aparatos diseñados para detectar ondas acústicas llamados geófonos en adquisiciones en tierra, hidrófonos para adquisiciones marinas ver (Kearey, 2013) Los geófonos transmiten la información a un equipo de registro en formato estándar establecido por la Sociedad de Exploración Geofísica SEG y conocido como formato de grabación sísmica SEG-Y o SEG-D, la información queda grabada en unidades de tiempo doble correspondiente al viaje de la onda desde la superficie hasta las diferentes capas geológicas del subsuelo y su retorno a superficie. Una vez cumplida la etapa de registro se prosigue con el procesamiento de los datos sísmicos, para lo cual se usan software comercial o en su defecto versiones académicas de uso libre como Seismic Unix, el procedimiento se inicia con la carga o conversión del formato SEG-Y o SEG-D según el caso, al formato interno del software. Las otras etapas más usadas en procesamiento de datos adquiridos en tierra incluyen atenuación

de ruidos, recuperación y balanceo de amplitudes, deconvolución, correcciones estáticas, análisis de velocidades de la raíz cuadrática media (RMS) y por último la migración pre apilado en tiempo (PSTM). Cabe recordar que la imagen obtenida después de una rigurosa secuencia de procesamiento convencional está en unidades de tiempo dado que el método sísmico de reflexión no tiene posibilidades de registrar las velocidades de propagación de las ondas a través de las diferentes litologías en la profundidad. Para la ubicación de los prospectos petrolíferos y gasíferos se requiere que las imágenes estén en unidades de profundidad, esto ha generado grandes desarrollos tecnológicos que han ayudado a obtener esas imágenes en unidades exigidas por la industria de petrolera. Las técnicas y herramientas de mayor uso han sido la conversión de la sección PSTM a profundidad por el método estiramiento vertical o “vertical stretch” ver (Bacon, 2007) el cual es conocido por generar una imagen confiable en áreas con poca variación de topografía y estructuras geológicas sencillas.

Otro método llamado “rayo imagen” ver (Gjøystdal, 2002) realiza una conversión utilizando rayos que viajan perpendicular a la superficie del subsuelo, promete ser más confiabilidad que el anterior en áreas geológicas complejas. Por último están las técnicas especializadas en procesamiento en profundidad (PSDM) con algoritmos muy robustos para la construcción de modelos de velocidad confiables en profundidad y exigente en los requerimientos computacionales de los diferentes tipos de migración en profundidad, como la migración Reverse Time Migration o RTM, Kirchhoff, Wave Equation Migration o WEM ver (Herrera, 2005).

Esta investigación está enfocada en comparar los dos métodos mencionados anteriormente utilizando datos sintéticos y reales frente a PSDM la cual es una de las técnicas más utilizadas por los centros de proceso, requiere de alto costo computacional y recurso humano calificado. Por lo tanto es de interés conocer la respuesta que puedan dar las herramientas diferente a PSDM

aplicando datos adquiridos en Colombia específicamente en la cuenca del Catatumbo en donde la geología es estructuralmente compleja y con baja exploración pero con alto potencial para incorporar reservas en un futuro.

Para la comprobación de los resultados en este trabajo se desarrollaron dos pruebas una con datos sintéticos y la otra con datos reales, las cuales arrojaron imágenes en profundidad comparables entre sí. El tiempo que tarda el procesamiento de una línea sísmica con cada herramienta frente a PSDM ayudó a tener un estimado de costos, pues entre más tiempo demore la conversión a profundidad, más dinero se debe inyectar al programa exploratorio, la calidad y la confiabilidad de la imagen generada con la presencia de estructuras geológicas coherentes es en sí el factor más relevante a la hora de elegir el método más adecuado. Es de resaltar que rayo imagen se generó en software de uso libre y estiramiento vertical en software licenciado, al obtener los resultados las dos técnicas presentan similitud en estructuras plano paralelas por lo cual la herramienta con software libre es una buena opción para economizar costos. Otro ítem a tener en cuenta fue la precisión y con ello la confiabilidad pues se buscó conocer la estructura del subsuelo, por lo cual se utilizó datos reales con pozos de la cuenca del Catatumbo en donde se encuentran anticlinales y sinclinales afectados por múltiples fallas inversas de cabalgamiento, se tomaron registros evaluando el amarre sísmica pozo, mostrando que PSDM y rayo imagen amarran en gran medida mientras estiramiento vertical no tuvo buena respuesta a ello.

La diferencia entre el uso del software licenciado (DecisionSpace Geosciences 10ep) para estiramiento vertical y el software libre (Madagascar) para rayo imagen, está en que el primero no utiliza teoría de rayos para convertir la imagen solo toma una velocidad de intervalo constante para cada una de las litologías.

1. Sísmica de reflexión

El método sísmico de reflexión constituye una herramienta indispensable para el hallazgo de hidrocarburos en todo el mundo, tanto para búsqueda en el mar “offshore” como en tierra “onshore”. El método lo constituyen 3 etapas; la primera es la adquisición, la siguiente etapa es el procesamiento de datos, en esta se centra el desarrollo del presente trabajo y por último la etapa de interpretación.

1.1 Adquisición sísmica de datos terrestres

La técnica sísmica consiste en primer lugar en ubicar el sitio en el cual se va a explorar generando un diseño de adquisición basado en conocer la geología previa de la región, para luego generar una campaña geofísica donde se hace un tendido topográfico ubicando pozos llamados fuente y estaciones receptoras ver (Sheriff, 1995). En estos pozos se coloca la carga o explosivos para producir la onda que viajará por el subsuelo reflejándose y refractándose siendo detectada por geófonos que han sido previamente ubicados en las estaciones con ello se obtendrá datos del subsuelo como se ilustra en la *Figura 1* donde se tiene una fuente y varios geófonos los cuales transmiten la información a un equipo de registro y quedan grabados en formato SEG-Y o SEG-D. Luego se extraen los datos de topografía del terreno, el patrón de disparo, los comentarios del observador y se introducen en los encabezados la información de ubicación de las fuentes y receptores ver (Yilmaz, 2001).

Los componentes de mayor importancia en el desarrollo de la adquisición son: 1. El reporte del observador en el cual se incluye información del número de identificación de archivos de campo (FFID) de cada sensor, la ubicación de los pozos y geófonos, orden en que se activa la fuente, ruido presente, trazas con amplitud cero (muertas), etc., 2. Reporte de la topografía, 3. Los datos sísmicos registrados en formato SEG Y O SEG D.

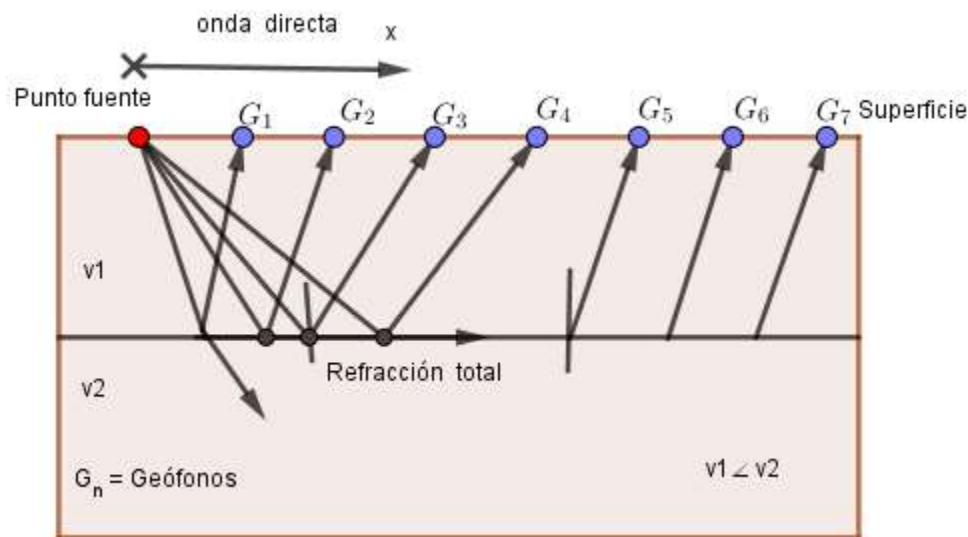


Figura 1. Arreglo sísmico. Tomado y modificado de (Beltrán Jiménez, 2014).

1.2 Procesamiento de datos sísmicos terrestres

Es una secuencia de etapas que conllevan a obtener una imagen del subsuelo, existen en el mercado numerosos software comerciales que permiten la realización de este procedimiento, igualmente se han generado algunas versiones de uso libre como Seismic Unix.

El procesamiento inicia con la carga o conversión de los datos adquiridos en campo que son grabados en diferentes formatos (SEG Y o SEG D), que deben ser compatibles con el software de procesamiento utilizado, para este trabajo de investigación se utilizó SEG Y compatible con el

software Promax, el cual lee todo el conjunto de datos binarios que posee el formato, en este se incluye la información de la adquisición realizada en campo (números de disparos, total de canales, tiempos de lectura, encabezados, trazas ruidosas, etc.), el siguiente paso es la asignación de geometría de los datos, esto significa colocar toda la información relacionada con el diseño de la adquisición. Se prosigue con la etapa de atenuación de ruidos en los datos (CDP, planos de offset y disparos), corrección de amplitud consistente en superficie (SCAC) utilizando divergencias esféricas y deconvolución.

Esta secuencia se denomina un pre-proceso de datos. Debido a que los datos adquiridos son afectados por cambios de elevación en el terreno y a la influencia de la capa meteorizada, se recomienda atenuar utilizando correcciones estáticas de refracción y elevación, para esto es necesario el picado del primer arribo, en donde se busca el tiempo de llegada de la primera onda a cada receptor con el fin de obtener todas las trazas en un plano horizontal sin la presencia de capa meteorizada o de baja velocidad ver (Yilmaz, 2001).

Después de tener los datos con las correcciones anteriores se procede a realizar el picado de velocidades con el fin de encontrar la velocidad con que mejor se pueda horizontalizar una hipérbola de reflexión, obteniendo mejor resultado cuando se realiza el apilamiento ver (Martínez Corredor, 2011) realizando una corrección NMO. El objetivo de hacer la corrección NMO (normal move Out), es transformar las trazas de la reflexión en una línea horizontal en el dominio del tiempo pasando a offset cero, con el fin de tenerlas en fase y poderlas sumar (apilar en punto medio común) ver (Yilmaz, 2001), para posterior utilizar estáticas residuales que son pequeñas correcciones en tiempo para el dominio (organización) de los disparos y receptoras es decir ordenar por punto de disparo o por geófono, lo que permite ajustar mejor la coherencia de los eventos.

La sección apilada en CMP (Punto Medio Común), se simula mediante el trazado de rayos de incidencia normal para el análisis de estructuras complejas generalmente, es importante recordar que la sección apilada casi siempre es una sección de alta señal y cero desplazamientos (Zero-offset) ver (Fagin, 1991).

Los shot gathers (recopilaciones de disparo) y CMP gathers (Recopilación de Punto Medio Común) son modelados por rayos de incidencia variables en un procesamiento sísmico donde la señal se refleja en ángulos rectos a las capas u horizontes del modelo geológico ver (Fagin, 1991).

Las trazas se pueden agrupar en categorías, tipo receptor común cuando hay una representación de trazas sísmicas que comparten un mismo receptor y en tipo de disparo común cuando se comparte una misma fuente, con ello se generan familias de trazas agrupadas en función de los puntos de reflexión en el subsuelo, es decir, se agrupan en una misma serie vertical de puntos comunes ver (Gorelik, 2019).

Cada familia de trazas presenta un aspecto hiperbólico, análogo al de los registros de campo tomando la distancia (x) que se refleja en los tiempos de tránsito (t). Algunos términos utilizados en esta tesis de maestría se ilustran continuación en la *Figura 2*.

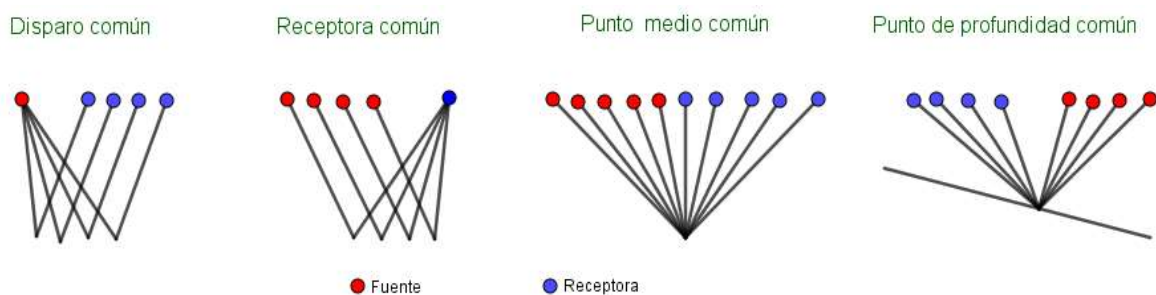


Figura 2. Terminología en el procesamiento sísmico. Tomado y modificado de (Bianco, 2011).

La etapa final de procesamiento la constituye la migración, que traslada las reflexiones a su verdadera posición bajo la superficie, generando el colapso de las difracciones aumentando así la resolución espacial y produciendo una imagen sísmica ver (Yilmaz, 2001).

La solución de la ecuación de onda escalar unidireccional es la base de los algoritmos comunes de migración y se pueden clasificar en 3 categorías: Aquellas que se basan en la solución integral a la ecuación escalar de onda (variación de una función escalar dependiente del tiempo t y de una o más variables espaciales), las que utilizan las soluciones de diferencias finitas y las que implementan la frecuencia del número de onda ver (Chica Quiñones, 2015).

1.2.1 Velocidades en procesamiento sísmico terrestre. Un aspecto importante en la conversión a profundidad es la generación del modelo de velocidad, saber las diferentes velocidades para la construcción del modelo es fundamental, pues se puede presentar cambios de impedancia, por lo tanto, variación en la geometría y espesor de las capas que el objetivo en una imagen sísmica.

La velocidad de intervalo ver Ecuación 1 definida como el cociente entre el espesor y el tiempo de transito vertical se puede obtener de datos de pozo (check shot, sónico y VSP), la cual arroja la velocidad más acertada del comportamiento de las capas en el subsuelo ver (Velasquez, 2007). La velocidad promedio se mide en superficie sobre un punto en profundidad, dividido por el tiempo de viaje vertical de la onda desde la superficie hasta esta profundidad, para el cálculo de esta velocidad en un reflector sin medición directa de tiempo de transito se realiza un promedio de velocidad entre las interfaces superiores, en n -capas se define la sumatoria del producto de la velocidad intervalo de los diferentes estratos y el tiempo de transito dividido por la sumatoria de todos los tiempos de tránsito de los estratos.

$$V_{avg_n} = \frac{(\sum_{j=1}^n v_j \Delta t_j)}{(\sum_{j=1}^n \Delta t_j)}$$

Ecuación 1.

La velocidad cuadrática media (RMS) ver Ecuación 2 definida como el valor de la raíz cuadrada entre la suma de cuadrados de los valores de velocidad en división con el número de valores, se expresa como la velocidad de onda a través de capas estratificadas con diferente velocidad de intervalo a lo largo de un vector de trayectoria específica.

$$V_{rms}^2(T) = \frac{(\sum_{n=0}^{n=N} V_{int}^2(n) T_n)}{(\sum_{n=0}^{n=N} T_n)}$$

Ecuación 2.

T_n es el tiempo de recorrido a través del n -ésimo intervalo, V_{int} es la velocidad de intervalo, esta velocidad es convertida por la ecuación de DIX a interválicas en profundidad y se utiliza para la migración PSDM, mientras la velocidad RMS es utilizada en tiempo para migrar la sección PSTM. La ecuación de Dix convencional es la relación entre la velocidad sísmica de intervalo y la dispersión geométrica de rayos. La trayectoria de un rayo solo describe la propagación de una porción de la perturbación sísmica de una fuente a un receptor ver (Yilmaz, 2001).

1.2.2 Migración sísmica y clases de migración. Al realiza un análisis de velocidades de la sección sísmica tomando en cuenta la corrección NMO y realizando el apilamiento, el reflector geológico se encuentra en la mitad de cada par fuente receptor para condiciones ideales de enterramiento y de baja complejidad estructural ver Figura 3, en sitios que han sufrido grandes esfuerzos con buzamientos altos se puede tener un perfil geológico compuesto de estructuras tipo sinclinal o anticlinal que varían la dirección del rayo en el momento del agrupamiento de las trazas

ver Figura 4, por lo cual es necesario generar la migración para ubicar los eventos en su posición real.

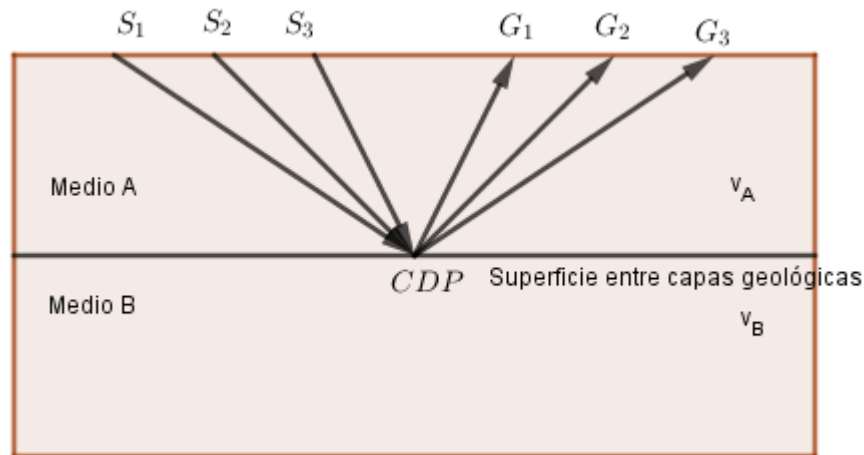


Figura 3. Punto medio común entre fuentes S_i . Geófonos G_i , $i = 1, 2, 3$. Tomado y modificado de (Baars David, 2001).

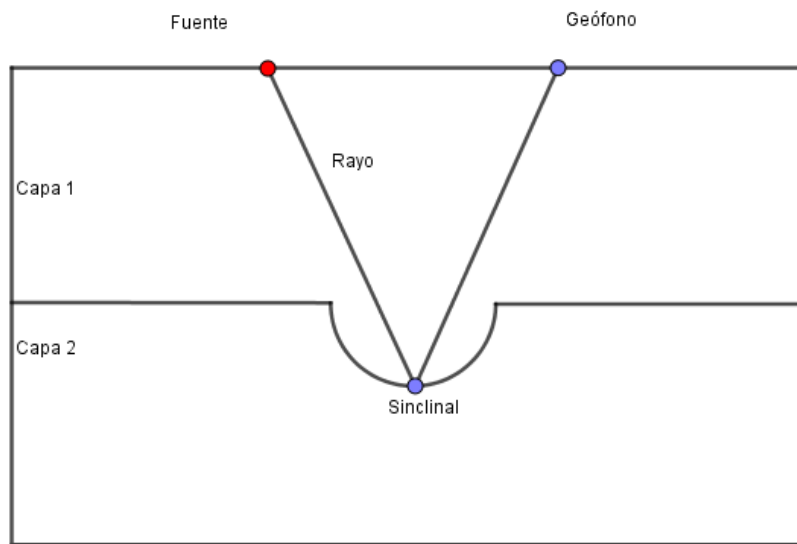


Figura 4. Rayo generado en un estrato inclinado. Tomado y modificado de (Alsadi, 2017).

Existen 2 tipos de desarrollo para la migración sísmica en este trabajo: en tiempo, tomando un modelo de velocidad a partir de las velocidades RMS y en profundidad, a partir de velocidades

interválicas en profundidad aplicando tomografía. En términos generales la migración en tiempo localiza los reflectores midiendo el tiempo de viaje del frente de onda, utilizando coordenadas de tiempo, y los ubica en su posición verdadera en tiempo, mientras que la migración en profundidad suma la energía durante las difracciones y coloca el resultado en una posición en superficie que corresponde al punto difractor, es decir, migra las trazas que componen las reflexiones utilizando coordenadas cartesianas, que son calculadas a partir de datos con coordenadas en tiempo por lo cual se requiere de un modelo de velocidad para su desarrollo.

Al realizar el apilado los datos, estos son migrados para colocar las reflexiones en su posición lateral correcta, los algoritmos comúnmente utilizados para migrar datos denominados algoritmos de migración temporal, dejan un error llamado residual causado al simplificar (agrupar) las superposiciones las cuales son la suma de migrar los disparos separadamente, aunque estas superposiciones se descomponen fácilmente al migrar datos sobre el subsuelo con una fuerte variación de velocidad lateral, hacen que el procedimiento de migración sea computacionalmente eficiente. Los algoritmos de migración en profundidad no hacen estas superposiciones y no generan estos errores sin embargo son de mayor costo computacional ver (Larner, 1981).

Los términos migración en tiempo y migración de profundidad surgen del hecho de que los productos directos de estos algoritmos son secciones migradas a escala de tiempo y escala de profundidad respectivamente ver (Littau, 2002). Sin embargo, es posible obtener escalas en profundidad con secciones migradas en tiempo y también migraciones post-apilado en tiempo y en profundidad como productos secundarios poco usados actualmente.

1.2.2.1 Migración pre-apilado en tiempo Kirchhoff PSTM. Este tipo de migración sísmica reubica geométricamente los eventos en el subsuelo en una escala de tiempo. Para realizar este

método se debe multiplicar los datos de entrada por la oblicuidad y los factores esféricos de propagación ver (Yilmaz, 2001). La oblicuidad describe la dependencia angular de amplitudes y está dada por el coseno del ángulo entre la dirección de propagación y el eje vertical. En esta migración, la hipérbola de difracción suma las amplitudes es decir, agrupa en función del tiempo a cero offset para luego colocarlas en el ápice (encabezado) de cada traza ver (Yilmaz, 2001).

La migración en tiempo pre-apilado de Kirchhoff (PSTM) tiene como objetivo encontrar la verdadera posición horizontal de cada punto difractor que compone las diferentes capas del subsuelo las cuales se consideran sin grandes cambios laterales de velocidad ver (Fomel, 2003), por lo cual se centra en generar imágenes en zonas planas sin complejidad estructural.

1.2.2.2 Migración pre-apilado en profundidad Kirchhoff PSDM. Existen diferentes métodos de migración, la planteada en este trabajo de investigación es la migración Kirchhoff antes del apilamiento en el dominio de la profundidad (PSDM) ver (Jain, 2012).

La migración PSDM es una herramienta probada para el desarrollo de imágenes sísmicas. Ha generado representaciones consistentes con la estructura geológica, y definido fallas y profundidades estimadas con una confiabilidad aceptable. Para obtenerla se requiere de un modelo de velocidad, el cual puede provenir del apilamiento obtenido de la generación de PSTM o de modelos geológicos contruidos en tiempo ver (Prabowo, 2018). En el primero, las velocidades de apilamiento o PSTM se convierten en velocidades de intervalo que luego se convierten a profundidad. Para el segundo se construye un modelo a partir de la interpretación del horizonte temporal con un campo de velocidad, recuperado de la información de pozo o de las velocidades de apilamiento convertidas en velocidades de intervalo ver (Bolívar, 2017).

Se realiza un control de calidad a dichos modelos suavizando en algunos casos el campo de velocidad para reducir las oscilaciones no geológicas ver (Zhang, 2019). Es muy importante tener una imagen precisa de los horizontes poco profundos, porque los errores allí distorsionan horizontes más profundos como errores estáticos. Para desarrollar PSDM se realiza un trazado de rayos a través de tomografía utilizando la velocidad final del procesamiento PSTM convertida a interválicas en profundidad y tomando los gathers pre migración en tiempo, se eligen los planos de offset y se migran pasando a puntos de profundidad común (CDP) para luego apilarlos y realizar un auto picado con análisis de semblanza.

Finalizando, esta herramienta realiza una inversión para generar el modelo, este proceso es iterativo hasta obtener la imagen aceptada a partir, de un modelo de velocidad adecuado (Kessler, 2017).

Un trabajo realizado por (Becerra Bayona, 2010), contempla el análisis de velocidad como un problema inverso con múltiples soluciones por lo cual se debe tener un control en la variación de la velocidad de intervalo. En la investigación se desarrolló un set de datos sintéticos con un modelo de velocidad conocido, y datos marinos de un lugar geológicamente complejo en donde se concluyó que variaciones laterales pequeñas en la velocidad intervalo, en general menores al 9 % pueden producir variaciones significativas (70 a 500 metros) en el posicionamiento de reflectores sísmicos de la imagen PSDM.

Otra investigación desarrollada por ver (Jain, 2012), se enmarcó en el estudio metodológico de la migración de Kirchhoff PSDM a través de la estimación de la velocidad de intervalo, basado en un modelo sintético arrojó buena calidad en la imagen para la zona compleja estudiada. PSTM ayudó a representar bien las características del subsuelo cuando no hay variaciones laterales de velocidad.

El principio matemático que utiliza el algoritmo para el desarrollo de PSDM se da partiendo de un sistema que emite y uno que recibe en la superficie a explorar, se realiza una medición del tiempo que tarda el frente de onda en hacer la trayectoria emisor-reflector-receptor; con este resultado se pueden calcular todos los diversos reflectores ver (Kim, 1997). Con la traza no migrada no es posible decidir en todo el espectro infinito de puntos cual conforma el receptor verdadero por lo tanto se toma otra traza sísmica y se realiza la migración, el resultado obtenido es valorado, este procedimiento se realiza tomando diferentes trazas hasta observar mejoramiento en la continuidad de los reflectores, la migración de Kirchhoff repite este procedimiento (iterativamente) sobre todas las trazas y finalmente suma todas las contribuciones de esta manera forma la imagen del subsuelo ver (Fajardo, 2013).

Si $I(x)$ es la imagen sísmica del subsuelo, $X = x, y, z$. Donde $A(x, r, s)$ es el valor de la amplitud y $d = t, r, s$ son los datos sísmicos de reflexión adquiridos en la posición fuente (s), la posición del receptor (r) y $T_r = T(x, r)$, $T_s = T(x, s)$ corresponden a los tiempos de viaje desde el receptor (r) y la fuente (s) hasta el punto X . Entonces el operador de la imagen Kirchhoff es:

$$I(x) = \int dT \int A(x, r, s) \left(\frac{\delta d(t, r, s)}{\delta t} \right) \delta[t - (T_r + T_s)] dt$$

Ecuación 3.

Según la geometría para calcular la integral, T representa las coordenadas de los geófonos (asociados a los puntos de disparo común), al offset (asociado a puntos fuente comunes) o a puntos medios (asociados a los offset comunes). La migración en profundidad es un proceso iterativo que comienza con los gathers utilizados en el procesamiento antes de la migración en tiempo ver (Furniss, 2000). El análisis de velocidad de intervalo en profundidad se refina por tomografía incorporando informando de pozo si se cuenta con ella, tanto la migración en tiempo PSTM y en

profundidad PSDM utilizan un sistema de difracción para colapsar la energía a lo largo de una hipérbola de difracción hasta su vértice ver (Jain, 2012).

1.2.3 Conversión a profundidad. La creación de imágenes sísmicas en el dominio del tiempo es desarrollado por un proceso robusto y eficaz, el cual es aplicado rutinariamente a los datos sísmicos adquiridos en campo ver (Yilmaz, 2001). La conversión a profundidad es el proceso de transformación de los datos sísmicos de una escala de tiempo (el dominio en el cual son adquiridos), a una escala de profundidad para proporcionar una imagen de la estructura del subsuelo la cual es dependiente de la velocidad.

1.2.3.1 Estiramiento vertical. La conversión a profundidad por estiramiento vertical o vertical stretch se puede realizar con una función matemática sencilla, tomando la velocidad media o promedio como una función lineal de la profundidad. La función lineal está dada a partir de la velocidad media, la cual es una magnitud vectorial conocida y desarrollada como la variación de la posición en la profundidad que no es conocida sobre el tiempo que es conocido. Este método llamado también layer cake se basa en tomar cada unidad por separado de la línea sísmica en tiempo y definirla como una velocidad de intervalo constante pero diferente de una capa a otra, expresando la velocidad de intervalo como una función de enterramiento ver (Marsden, 1989), aunque se ha demostrado que cambios en el espesor de los estratos genera variación de la velocidad de intervalo en la misma formación. Se debe tener un control en las variaciones de velocidad de cada litología, en lugares en donde se registraron cambios estructurales el modelo tipo layer cake puede ser interpolado por medio de velocidades derivadas de la sísmica.

Las siguientes funciones más complejas son empíricas, estas se basan en la observación de los datos y relacionan el tiempo de recorrido bidireccional con el grosor. Estas ecuaciones se calculan trazando el tiempo de recorrido bidireccional en cualquier capa dada (obtenida del registro sísmico integrado, disparo de comprobación o VSP), ajustando una línea de regresión a los datos. Las fórmulas derivadas generalmente predicen un espesor de lecho finito (posiblemente negativo) cuando el tiempo de viaje bidireccional es cero. En este método el cruce de los rayos no se tiene en cuenta pues al ser verticales tienen la misma trayectoria durante todo el tiempo de viaje.

1.2.3.2 Rayo Imagen. Las trayectorias ortogonales a los frentes de onda móviles se designan como rayos, estrictamente hablando el concepto de un rayo es apropiado si la energía tiene un medio donde propagarse, o si tiene un camino en particular como en el caso de una solución óptica geométrica a la ecuación de onda, para resolver las trayectorias de los rayos se han desarrollado métodos y algoritmos numéricos llamados trazadores de rayos basados en el concepto del rayo sísmico ver (Kline, 1962). Los rayos son trayectorias rectas dentro de cada capa. La relación entre la imagen generada en tiempo tomando los tiempos y la frecuencia de los disparos y la conversión a la profundidad está dada por el concepto de rayo de imagen que fue dado por ver (Hubral, 1977). Los rayos imagen son rayos sísmicos que llegan perpendiculares a la superficie de la Tierra. Para capas de diferente composición llamadas reflectores, el rayo normal puede definirse como un rayo que conecta estas capas a la superficie de medición por medio de un vector llamado lentitud, que es normal a dichos reflectores ver (Gjøystdal, 2002). Este vector lentitud representa la lentitud aparente del frente de onda en todas las direcciones a veces es llamado lentitud horizontal si se conserva en la lateral, dado que generalmente la velocidad aumenta con la profundidad en la Tierra la lentitud decrece con la profundidad ver (Iversen, 2008).

La sección migrada en tiempo se representa por rayo imagen, es normal a la superficie del terreno pero se curva a través de las capas u horizontes del modelo geológico. La imagen migrada en profundidad esta demarcada por rayos de incidencia normales, que se extienden sin curvarse desde la superficie hasta los horizontes del subsuelo, estos rayos de incidencia en la vertical no están definidos por un trazado de rayos sino representan la conversión de profundidad a tiempo y tiempo a profundidad que resulta cuando los mapas de tiempo o de profundidad están separados por múltiples mapas de velocidad ver (Fagin, 1991).

La conversión a profundidad en rayo imagen se puede desarrollar por medio de un set de datos migrados y no migrados, en los migrados la trayectoria de los rayos imagen comienza perpendicular a la topografía lo que permite tener claridad del punto inicial, el rayo va en la dirección del vector llamado lentitud que fluctua en cambios laterales de velocidad. Al suponer puntos arbitrarios x_1 , x_2 en un tiempo t inicial, cada punto inicial se mueve a través de la trayectoria del rayo imagen hasta completar el tiempo de ida colocándose en su verdadera posición en profundidad, el proceso es iterativo hasta obtener una imagen confiable y con sentido geológico ver (Iversen, 2008).

El estudio desarrollado por (Druzhinin, 2002) muestra cómo se puede generar un modelo rápido de velocidad que puede ser utilizado como punto de partida para una migración en profundidad, en situaciones estructuralmente complejas tomando velocidades de intervalo y variándolas iterativamente.

Este algoritmo calcula iterativamente el modelo de capas a partir de los tiempos de desplazamientos de los rayos a cero offset, las propiedades de las capas y los datos de reflexión sísmica. La técnica desarrollada trata de reemplazar las funciones de velocidad de intervalo y transforma los datos de reflexión migrados a cero offset a los dominios de tiempo y profundidad.

El camino o trayectoria de rayos es regido por 3 reglas:

- La trayectoria de los rayos no se curva en un medio de velocidad constante.
- Las trayectorias se curvan de acuerdo con la ley de Snell a medida que cruzan interfaces de velocidad, los frentes de onda y su rayo de luz asociado se curvan o refractan cuando encuentran medios de mayor velocidad.
- Se reflejan en un ángulo igual al ángulo de incidencia cuando encuentran cambios de impedancia.

Estas reglas dadas en (Fagin, 1991), indican que los rayos tienden a alejarse de la normal a medida que se propagan hacia la Tierra, es decir, cuando aumenta la velocidad y se acercan a la normal a medida que regresan hacia la superficie, por lo tanto no se curvan ver *Figura 5*.

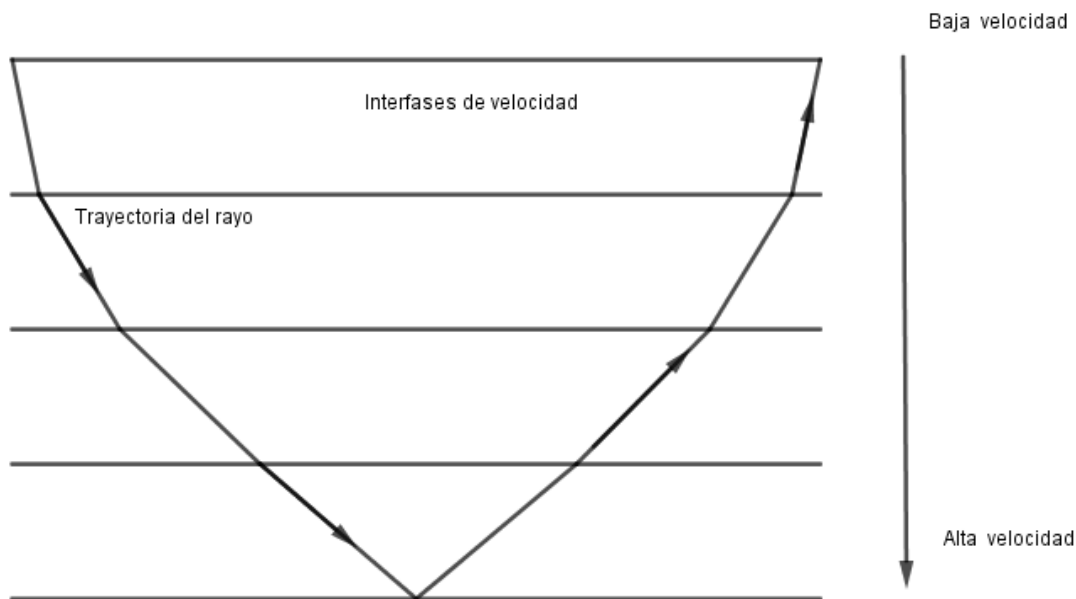


Figura 5. Trayectoria de rayos. Tomado y modificado de (Fagin, 1991).

Al analizar la impedancia de un medio, que es el producto entre la velocidad y la densidad de dicho medio, se puede afirmar que una onda sísmica al encontrar unidades de diferente impedancia

parte de la energía sísmica se dirige hacia la superficie en forma de onda reflejada ver (Iversen, 2008).

Estas tres reglas de trayectoria enumeradas anteriormente gobiernan la propagación de los rayos, cada una de las reglas está sujeta al principio de reciprocidad: la trayectoria del rayo permanece sin cambios independientemente de la dirección del viaje si se intercambian la posición de la fuente y el receptor, los trayectos de rayos y los tiempos de viaje permanecen sin cambios.

Las trayectorias de rayos para un conjunto de disparos se determinan buscando una trayectoria que conduzca desde la fuente a un punto de reflexión en el subsuelo y a un receptor de destino.

1.3 Interpretación sísmica

Es la etapa final del método sísmico en la exploración petrolera, consiste en tomar los productos generados del procesamiento, visualizarlos e interpretarlos geológicamente ver (Bacon, 2007), ubicando estructuras y prospectos para posteriormente definir si se realiza una campaña de perforación de un pozo exploratorio en el sitio de interés.

2. Resultados y discusión

En este capítulo se muestran los resultados y análisis de las imágenes obtenidas en tiempo (PSTM) con las 3 secciones generadas en profundidad: migración PSDM y dos métodos de conversión sísmica estiramiento vertical y rayo imagen para datos sintéticos y reales. Para datos reales el

modelo de velocidad fue generado y tomado como base para las conversiones a profundidad a través de amarres sísmica-pozo para tener control en las secciones.

La comparación se realizó teniendo en cuenta la confiabilidad, el tiempo de desarrollo, el personal calificado para generarla y el uso de software.

2.1 Resultados obtenidos con el uso de datos sintéticos.

Para el desarrollo de las imágenes en profundidad en datos sintéticos se tomó la imagen obtenida de realizar el procesamiento completo en tiempo PSTM de este trabajo investigativo ver *Figura 6*, pero el modelo de velocidad tomado fue el original de Overthrust en profundidad.



Figura 6. Sección PSTM generada en el software Promax para el modelo sintético Overthrust. En la vertical el tiempo (0 hasta 1900 ms), en la horizontal el número de CDP (0 hasta 600). La línea superior horizontal es el nivel de elevación que para el modelo es cero metros sobre el nivel del mar.

El modelo de velocidad original de intervalo en profundidad mostrado en el apéndice A capítulo de metodología ver (Fig.26), se tomó con el fin de ingresar los mismos parámetros a las 3 técnicas y conocer a partir de este modelo de velocidad cual herramienta genera una sección confiable y efectiva.

El desarrollo de un buen modelo de velocidad es el indicador de mayor importancia para utilizar cada técnica pues este ayuda aplanar los gathers al realizar la corrección NMO.

2.1.1 Migración preapilada en profundidad PSDM. La migración PSDM obtenida se ilustra en la *Figura 7* con el modelo de velocidad generado ver *Figura 8*.

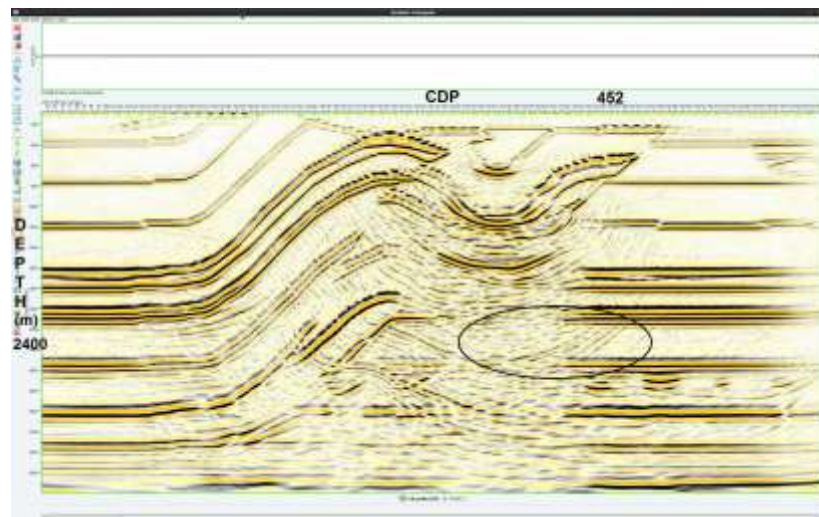


Figura 7. Migración PSDM desarrollada en datos sintéticos. En la vertical la profundidad (0 a 3800 m), en la horizontal el número de CDP (0 a 600). La línea superior horizontal es el nivel de elevación 0 m.s.n.m. Se resalta en un óvalo reflectores generados probablemente por la aplicación de un control de ganancia (AGC).

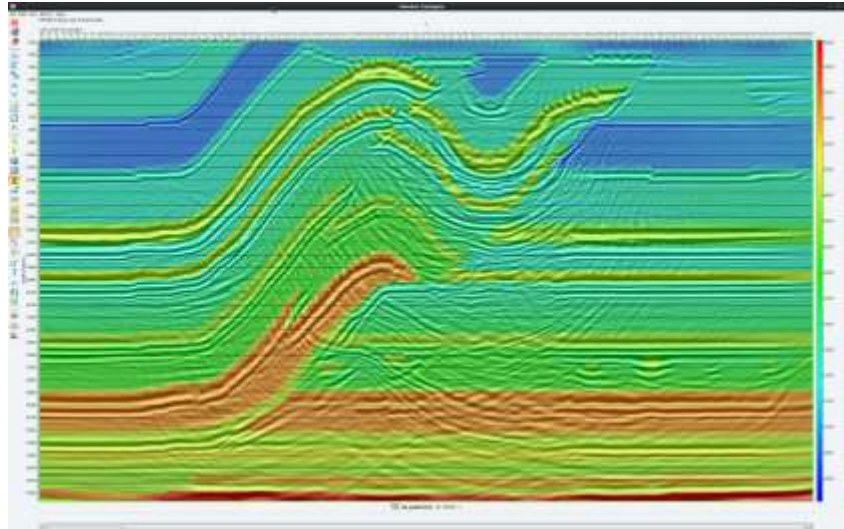


Figura 8. Velocidad original del modelo Overthrust sobre puesto sobre la imagen PSDM generada. Se observa en la parte central de la imagen en el sinclinal como los reflectores siguieron el modelo de velocidad.

Se realizó una prueba con la velocidad original del modelo y la imagen PSDM, sobreponiendo una imagen sobre la otra, para mirar cómo se comportan los reflectores generados, mostrando que los eventos geológicos concuerdan con la velocidad tomada ver *Figura 8*. El modelo de velocidad inicial para datos sintéticos de Overthrust se genera a partir de información geológica de las Montañas Rocosas Canadienses y de las velocidades interválicas obtenidas a partir de velocidades RMS.

2.1.2 Rayo Imagen. La conversión a profundidad por rayo imagen se ilustra en la *Figura 9* y el modelo de velocidad en profundidad se puede ver en la *Figura 10*.

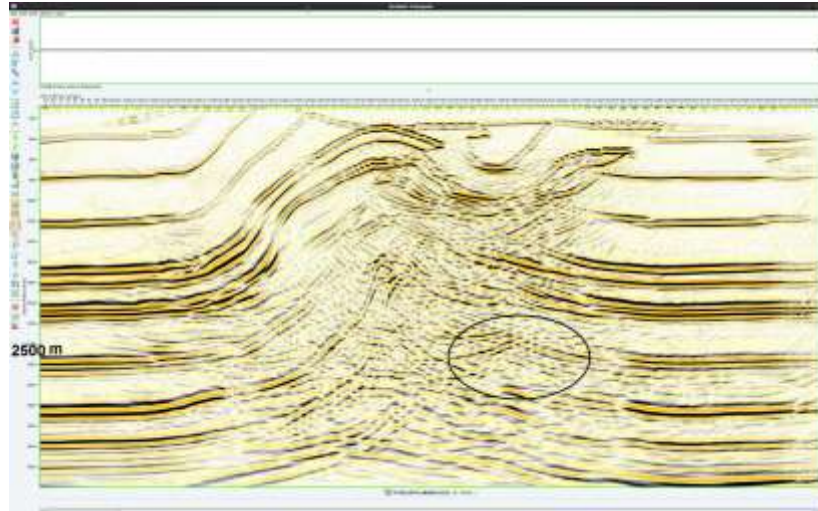


Figura 9. Sección generada por rayo imagen para datos sintéticos. En la vertical la profundidad (0 a 3800 m), en la horizontal el número de CDP (0 a 600). La línea superior horizontal es el nivel de elevación 0 m.s.n.m. En el 'ovalo negro se observa reflectores convergiendo los cuales se generan por que el método no utiliza migración.

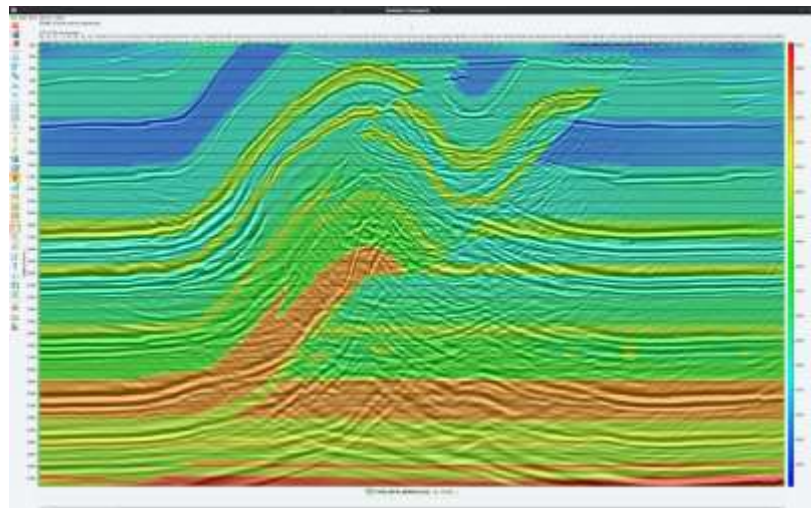


Figura 10. Velocidad original del modelo Overthrust sobrepuesto sobre la imagen generada de rayo imagen.

La velocidad original del modelo y la generada por rayo imagen al sobreponerlas muestran que los eventos en la zona compleja no siguen la velocidad como si lo hace la imagen PSDM ver *Figura 10*.

2.1.3 Estiramiento vertical. En la *Figura 11* se muestra la conversión a profundidad por este método y el modelo de velocidad se ilustra en la *Figura 12*.

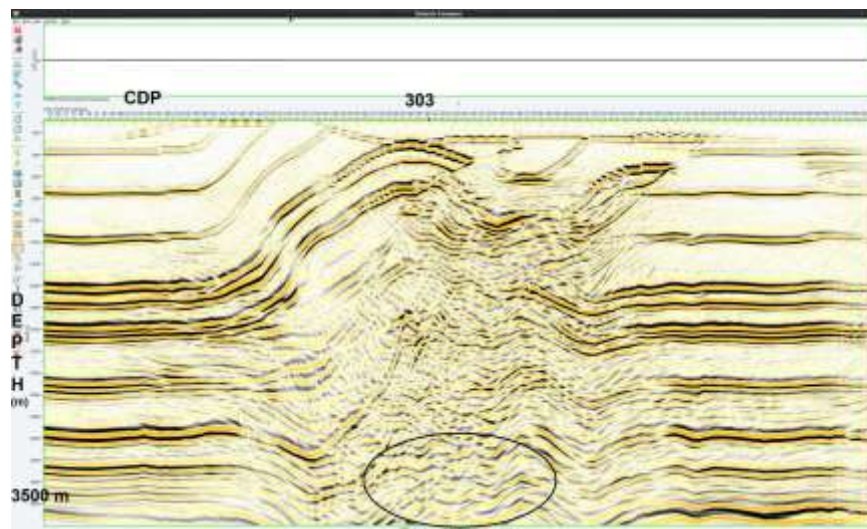


Figura 11. Sección sísmica convertida a profundidad por estiramiento vertical en datos sintéticos. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación 0 m.s.n.m. En el óvalo de color negro se observan falsos anticlinales.

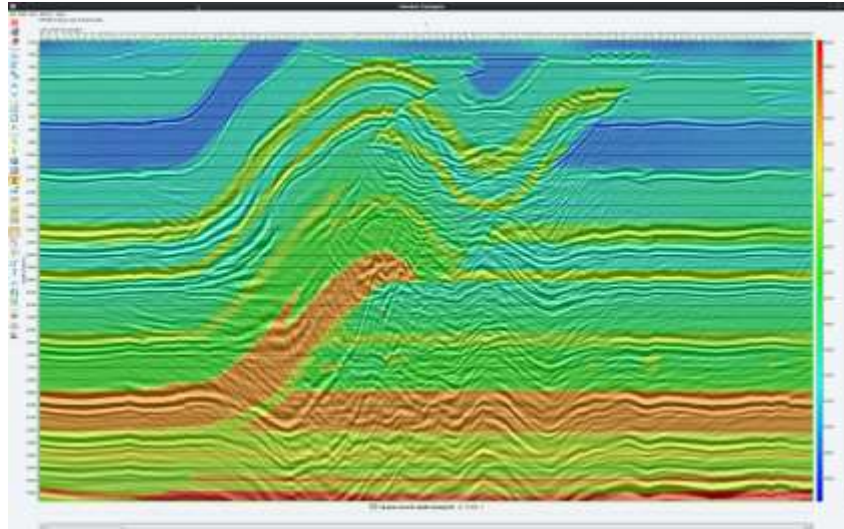


Figura 12. Velocidad original del modelo Overthrust sobrepuesta sobre la imagen generada por estiramiento vertical.

La velocidad original del modelo y la imagen generada por estiramiento vertical al sobreponerlas se observa que los reflectores no siguen la velocidad por lo tanto al compararla con rayo imagen presenta menor confiabilidad ver *Figura 12*.

2.2 Datos Reales.

El modelo de velocidad generado en tiempo se observa en la *Figura 13*, con este se originó la imagen PSTM y se ilustra continuación:

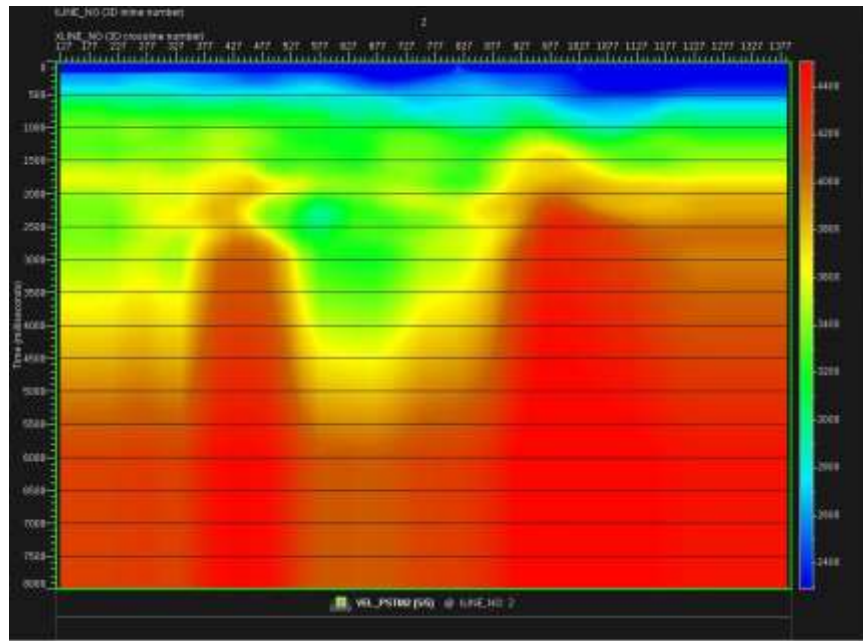


Figura 13. Modelo de velocidad en tiempo generado en Promax a partir del picado de la semblanza. Tiempo (ms) en la vertical vs CDP.

El procesamiento en tiempo PSTM se realizó siguiendo la secuencia enunciada en la metodología para generar una imagen sísmica en tiempo, que sirvió como base para construir las 3 imágenes en profundidad ver *Figura 14*.

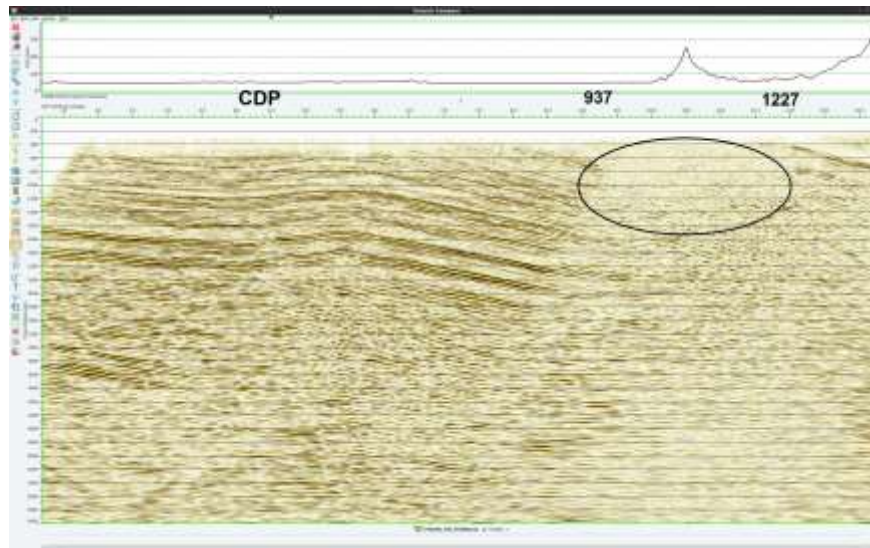


Figura 14. PSTM generada a partir de datos reales. En la vertical el tiempo (ms), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación. El óvalo negro encierra la zona de mayor complejidad estructural donde la migración en tiempo no visualiza los eventos.

Para el desarrollo de las tres técnicas se partió del modelo de velocidad en profundidad, utilizando este mismo modelo se pudo comparar cual herramienta genera una confiabilidad mayor ver *Figura 15*.

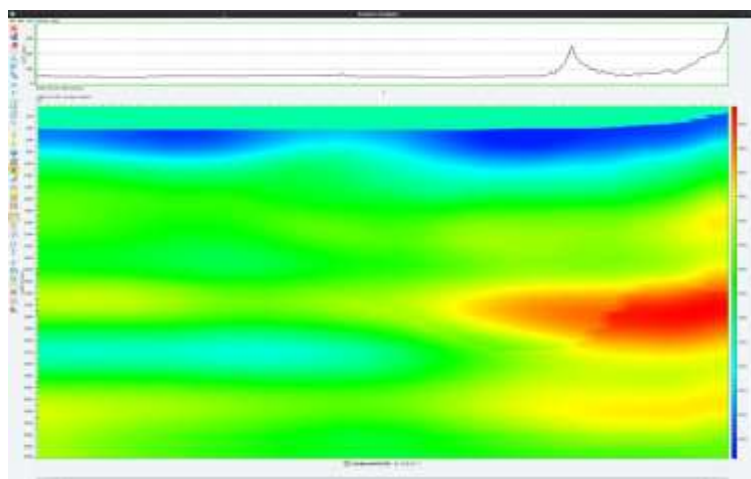


Figura 15. Modelo de velocidad en profundidad PSDM. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación.

2.2.1 Migración preapilada en profundidad PSDM. La migración en profundidad en la tercera iteración se muestra en la *Figura 16*.

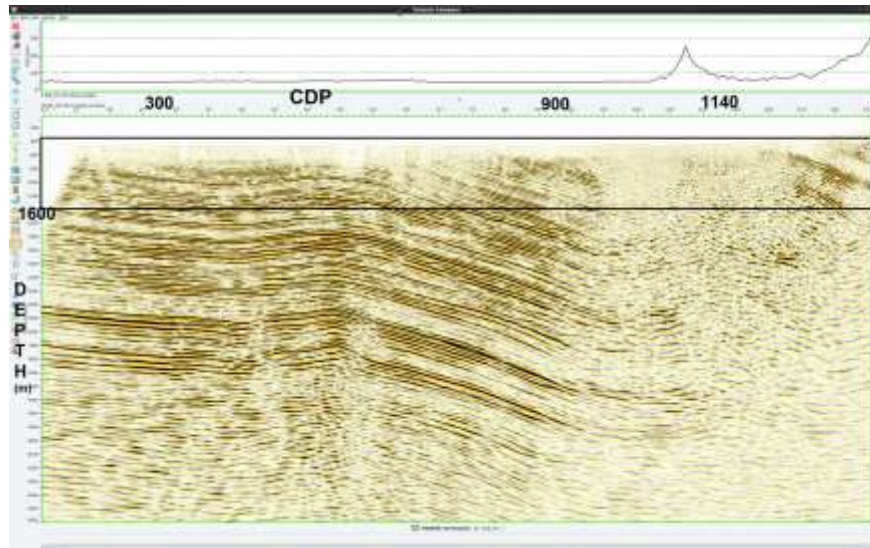


Figura 16. PSDM generada con datos reales. En la vertical la profundidad (0 a 6000 m), en la horizontal el número de CDP (0 a 1400). La línea superior horizontal es el nivel de elevación. El rectángulo negro en la imagen representa la zona somera en donde la migración en profundidad solucionó en parte la visualización de los eventos.

A profundidades mayores de 3600 se encuentra el basamento. Los pozos tomados de amarre muestran este indicador por lo cual los reflectores generados a más de esta profundidad no son acordes a la realidad geológica.

Para tener un control de la sección generada se realizó un amarre sísmica pozo en donde se tomó como referencia tres topes, en especial uno llamado basamento pues hasta esa profundidad se tiene registro estratigráfico del área ver *Figura 17*. Este basamento está compuesto por rocas cristalinas de composición granítica y gnéissica. El pozo 2 fue proyectado sobre la línea sísmica, el pozo 1 perteneciente al área de Sardinanta en Norte Santander esta sobre la línea 2D procesada y los topos fueron extraídos de registros y análisis de ripios en el informe general del pozo.

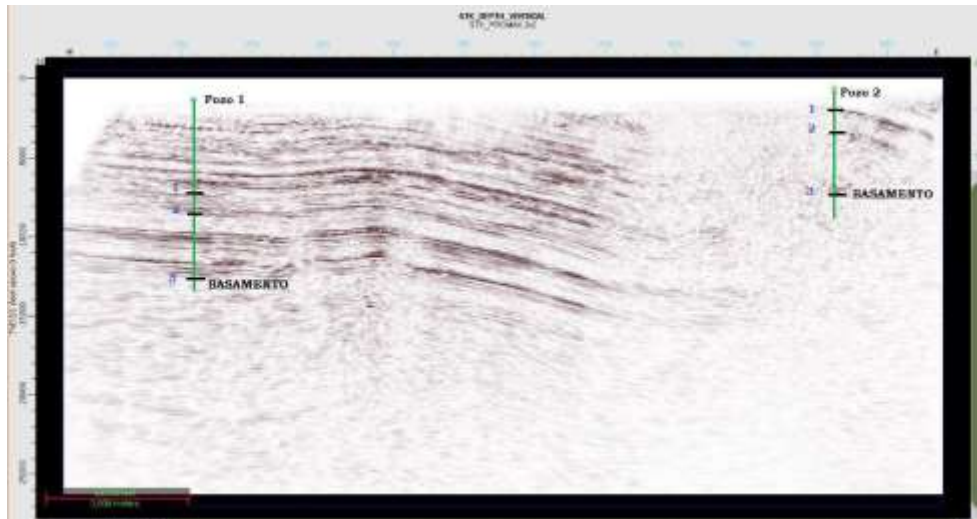


Figura 17. Amarre sísmica pozo para la herramienta PSDM a partir de datos reales. En la vertical la profundidad (0 a 25000 ft), en la horizontal la distancia (ft). La imagen es visualizada en el software DecisionSpace Geosciences (DSG). La ubicación del pozo 2 es sobre un anticlinal afectado por una falla de cabalgamiento.

Lo reflectores observados debajo del tope número 3 (basamento) en el pozo 1 son anomalías que no reflejan la realidad geológica del área, pues los registros del pozo y ripios muestran estructuras cristalinas a esa profundidad.

2.2.2 Rayo Imagen. La imagen obtenida por la técnica de rayo imagen se ilustran en la *Figura 18*, se utilizó el archivo SEG-Y para visualizar esta imagen en el software Promax pues fue generada en Madagascar.

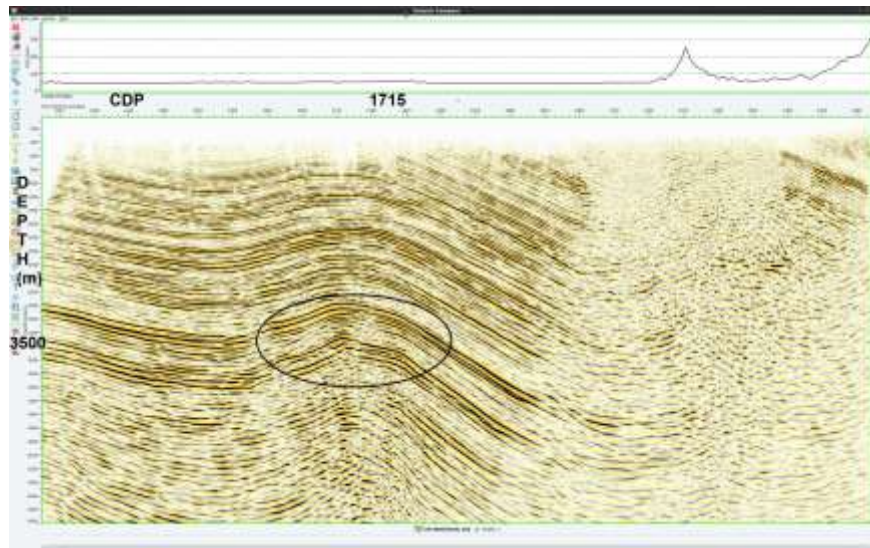


Figura 18. Imagen obtenida por rayo imagen en profundidad con datos reales. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación. El óvalo negro encierra estructuras con gran buzamiento formando un anticlinal que difieren de la realidad geológica del Catatumbo.

Esta línea tiene una longitud de 12.6 km y una profundidad de 6 km, la imagen sísmica sintética tiene una longitud de 8.2 km y una profundidad de 4 km. En el amarre sísmica pozo los reflectores encajan en los topes, se evidencia sentido geológico en la sección generada, la parte del bloque colgante (pozo 2) en donde se encuentra un falla inversa de cabalgamiento la imagen presenta perdida de continuidad en los horizontes, la interpretación se dificulta en ese sector, en comparación con la migración preapilada en profundidad que arroja buen resultado ver *Figura 19*.

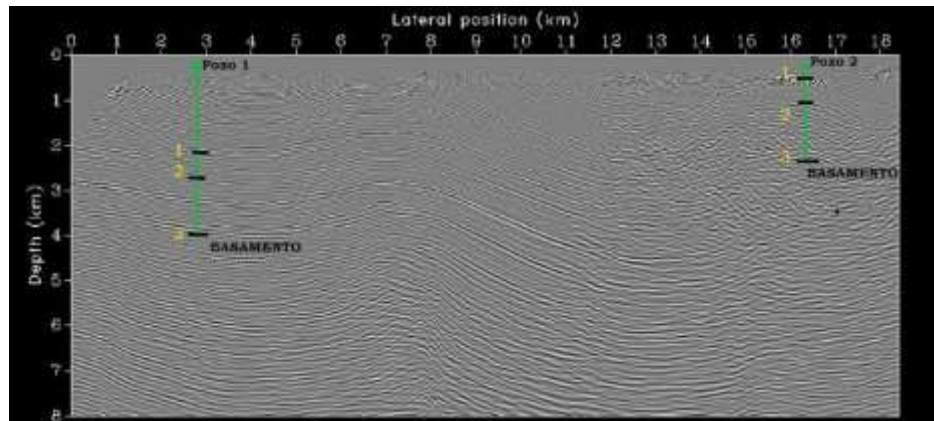


Figura 19. Sección en profundidad con amarre sísmica pozo por la técnica rayo imagen. En vertical profundidad (km), en horizontal la distancia (km). La imagen es visualizada en el software DSG.

El uso de software libre para la conversión facilita el obtener imágenes en profundidad pues los costos para desarrollarla son relativamente bajos. Para la presente investigación en donde hay fallas inversas y estructuras geológicas complejas sinclinales y anticlinales fallados con buzamientos pronunciados la técnica presenta dificultad para desarrollarla.

2.2.3 Estiramiento vertical. El desarrollo de la imagen por este método se muestra en la *Figura 20*.

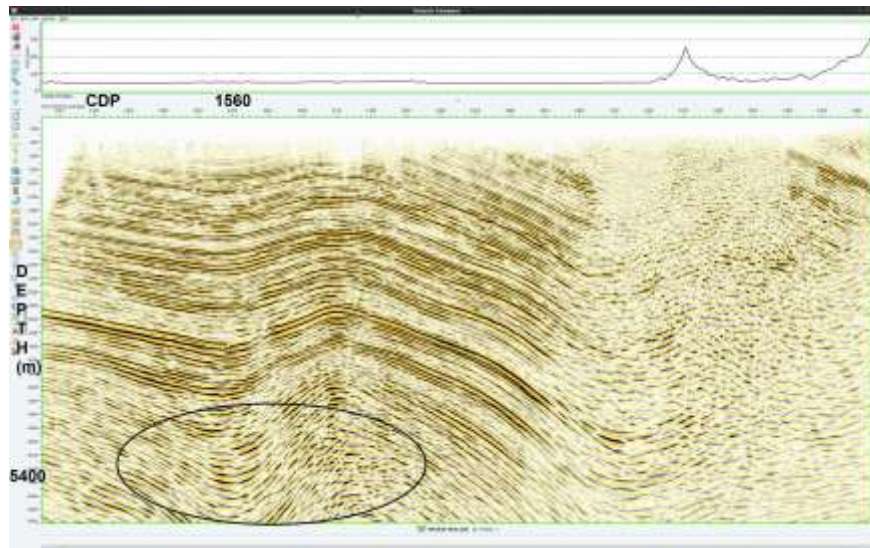


Figura 20. Imagen sísmica convertida a profundidad por estiramiento vertical. En la vertical la profundidad (m), en la horizontal el número de CDP. La línea superior horizontal es el nivel de elevación. En el óvalo negro se observa falsos sinclinales a profundidad de basamento, debido a que los registros litológicos de pozo muestran que a esta profundidad hay rocas cristalinas y no estratificadas.

El amarre con los pozos se ilustra en la Figura 21.

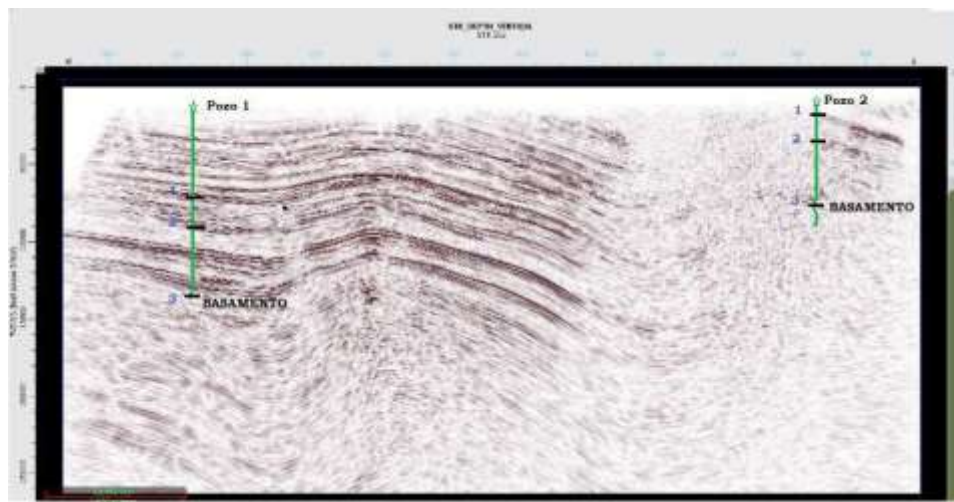


Figura 21. Imagen sísmica convertida a profundidad por estiramiento vertical con amarre sísmica-pozo. En la vertical la profundidad (ft), en la horizontal la distancia (ft). Visualizada en DSG.

2.2.4 Discusión de resultados.

2.2.4.1 Datos sintéticos. La migración PSDM obtenida ver *Figura 7*, genera confiabilidad en el dominio de la profundidad en los sitios de amarre con los pozos pues encajan los reflectores generados con los topes, su desarrollo es de alto costo computacional y se necesitó software licenciado para desarrollarla. En zonas con el nivel de complejidad estructural como el modelo Overthrust la migración pre-apilado en tiempo PSTM no logra resolver con claridad la imagen, pues es muy bien conocida sus limitaciones en zonas con variaciones laterales de velocidad.

La conversión a profundidad por rayo imagen mostrada en la *Figura 9* utilizando el modelo de velocidad en profundidad de Overthrust, genera confiabilidad en la zona somera en los sitios en donde la velocidad no varía fuertemente en la lateral. En estos sitios se asemeja a la imagen PSDM, los reflectores tienen sentido geológico y son fáciles de seguir. En la zona profunda donde se visualizan estructuras tipo sinclinal, las variaciones de velocidad son evidentes y los reflectores tienen poca continuidad. Esta conversión es desarrollada en software libre y el flujo está automatizado, por lo tanto la imagen es generada rápidamente y no necesita un personal altamente capacitado en procesamiento sísmico como si lo requiere PSDM. En la conversión realizada se observa complejidad estructural en la parte central, las velocidades tienen cambios en lateral generando reflectores anómalos visibles a los 2500 metros en profundidad, lo que difieren al resultado obtenido en PSDM.

La *Figura 9* muestra el resultado de la aplicación de la herramienta estiramiento vertical, se puede observar en ella un ovalo resaltando reflectores con buzamientos fuertes en formas de sinclinales y anticlinales entre el CDP 303 y a una profundidad de 3500 a 4000 metros, estas estructuras difieren del modelo de velocidad sobrepuesto sobre en la imagen sísmica como se

muestra en la *Figura 12*. Esta técnica fue desarrollada en software licenciado al igual que PSDM, pero la conversión de la imagen es rápida y automatizada por lo cual su costo es bajo. El personal que utiliza la técnica no necesita capacitación avanzada en procesamiento sísmico.

2.2.4.2 Datos reales. La migración en profundidad PSDM luego de la tercera iteración arrojó una imagen confiable ver *Figura 16* entre los CDP 300 a 900, pues esos sectores corresponden a capas planas, sin pliegues ni fallas de gran tamaño y por lo tanto, las variaciones de velocidades en lateral son bajas. A partir del CDP 930 se observa un sinclinal en el bloque yacente y una estructura cabalgante desmejorando notablemente la calidad hasta el CDP 1140 generado por cambios de velocidad en lateral, por lo cual el modelo en ese sitio es de baja confiabilidad. Al visualizar los topes de los pozos en la *Figura 17* los reflectores encajan para la imagen PSDM, el basamento en la sección corresponde a la realidad geológica del área y es reflejada en la sísmica, por lo cual la imagen presenta alta confiabilidad en ese sector.

Por otro lado, la imagen obtenida por rayo imagen presenta continuidad en los reflectores en la parte superior, dando un resultado similar a PSDM en sectores sin cambios de velocidad en lateral. En la parte compleja estructuralmente se presenta dificultad para seguir los horizontes, generando efectos de pliegues anómalos en forma de anticlinal que levantan toda la estructura con un alto buzamiento en el CDP 1715 y a una de profundidad de 3500 metros ver *Figura 18*, este tipo de estructura no ha sido referenciado en los registros de pozos del área. Es de resaltar que la imagen generada por PSDM no genera grandes buzamientos en esta misma área debido a que la técnica emplea la migración y ubica los reflectores en su posición verdadera ver *Figura 16*. En el amarre sísmica-pozo los reflectores encajan en los topes, se evidencia sentido geológico en la sección generada, la parte del bloque colgante (pozo 2) en donde se encuentra un falla inversa de

cabalgamiento se presenta pérdida de continuidad para los horizontes, la interpretación se dificulta en ese sector en comparación con la migración pre-apilado en profundidad de Kirchhoff que arroja buen resultado ver *Figura 19*.

En cuanto a la técnica de estiramiento vertical se evidencia cambio de espesores cerca al pozo 1 entre el tope 3 y 2. Se generó una cuña al margen izquierdo de la sección y aumentó el espesor a la derecha sin causa geológica, pues en esa área la estructura no reporta cambios de espesor considerable marcando notables diferencias con las 2 técnicas anteriores que muestran espesores continuos ver *Figura 21*. En la parte final del pozo 1 bajo los 5400 metros se observan horizontes estratificados, se puede catalogar como un artefacto pues en esta profundidad ya se encuentra el basamento que fue identificado por los topes de pozos como litologías de rocas cristalinas, por lo cual no debería presentarse estratificación.

En el bloque colgante donde se situa el pozo 2 los reflectores tienen un comportamiento continuo en la sección sísmica y se puede dar una interpretación geológica coherente y comparable a la generada por las otras dos técnicas. Los cambios de velocidad lateral son bajos en este sector.

Finalmente al analizar el procesamiento en tiempo desarrollado por medio de la migración PSTM, la imagen presenta pérdida de continuidad de reflectores a partir del CDP 937 al 1227 esto debido a una geología estructural compleja ver *Figura 14*.

3. Conclusiones

Las imágenes sísmicas generadas en el procesamiento en tiempo y las obtenidas en el dominio de la profundidad, tanto en datos sintéticos como en reales, muestran que las técnicas son muy sensibles al uso de modelos de velocidad y que la dificultad para visualizar y modelar estructuras complejas está condicionado a la información de pozos y la geología presente.

La migración pre-apilado en tiempo PSTM para datos reales en este trabajo presenta dificultad de interpretación, primero porque la imagen no tiene una escala en profundidad por lo cual es difícil encontrar con exactitud las áreas de interés geológico bajo en subsuelo, y segundo, no toma en cuenta sectores con cambios de velocidad lateral contrario a PSDM.

Ninguno de los dos métodos de conversión sísmica a profundidad comparados (rayo imagen y estiramiento vertical) es confiable para las zonas evaluadas en esta investigación con geología estructuralmente complejas, esto fue probado tanto en datos reales como en datos sintéticos. Al comparar los dos métodos para datos reales el método de rayo imagen es ligeramente mejor que estiramiento vertical en los extremos de la sección sísmica, esto debido a que en esta área no hay buzamientos altos, se evidencia una baja complejidad estructural que no hace variar la dirección y sentido de los rayos, y tampoco se tienen grandes variaciones de elevación y cambios de velocidad lateral lo cual afectaría notablemente los resultados. Para las zonas analizadas en este trabajo las técnicas de conversión son aceptables para estructuras plano paralelas o zonas con algún grado de complejidad pero en sectores muy someros de aproximadamente 1200 m en profundidad.

El resultado obtenido al procesar zonas con geología estructural compleja en diferentes sitios (Canadá y cuenca del Catatumbo) muestra que el desarrollo de cada técnica de conversión, al igual que la migración en profundidad PSDM, aún les falta un desarrollo tecnológico mayor para bajar el nivel de incertidumbre que facilite la interpretación del subsuelo y que es necesario contar con pozos de amarre y topes estratigráficos para poder interpretar correctamente la sección sísmica generada.

La migración pre-apilado en profundidad PSDM en la actualidad es el método más confiable para obtener una imagen en profundidad en zonas con presencia de estructuras geológicas complejas, dispone de mecanismos de control de calidad tanto a nivel de gathers, semblanza de velocidad y secciones apiladas.

Referencias Bibliográficas

Alsadi, H. N. (2017). *Processing of seismic reflection data*. Journal of Physics.

Baars David, W. S. (8 de marzo de 2001). *kgs.ku.edu*. Obtenido de www.kgs.ku.edu/publications/oil/primer10.html

Bacon, M. S. (2007). *3-D seismic interpretation*. Cambridge University Press.

Becerra Bayona, C. A. (2010). *Análisis de incertidumbre en las velocidades de intervalo y en la posición de reflectores obtenidas por migración preapilado en profundidad (PSDM)*. Medellín: Master's thesis, Universidad EAFIT.

Beltrán Jiménez, V. F. (2014). *Metodologías para la elaboración de un sismograma sintético y estimación de las propiedades petrofísicas del pozo u. .* México: Instituto Politécnico Nacional.

Bianco, E. (14 de Diciembre de 2011). Obtenido de subsurfwiki: www.subsurfwiki.org/index.php?title=gather&printable=yes

Bolivar, F. C. (2017). *Integrating Seismic Imaging and Inversion* (Vol. 14). AAPG.

Cameron, M. F. (2008). *Time-to-depth conversion and seismic velocity estimation using time-migration velocity* (Vol. 5). Geophysics.

Chica Quiñones, E. J. (2015). *Obtención de imágenes RTM (Reverse Time Migration) en zonas estructuralmente complejas*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Druzhinin, A. (2002). Rapid image-ray inverse data mapping without using an interval velocity model. In *64th EAGE Conference & Exhibition*, (pág. 14). Huston.

- Fagin, S. W. (1991). *Seismic modeling of geologic structures* (Vol. II). SEG Geophysical Development Series.
- Fajardo, C. V. (2013). *Reducción de los tiempos de cómputo de la Migración Sísmica usando FPGAs y GPGPUs: Un artículo de revisión* (17 ed., Vol. 9).
- Fomel, S. (2003). *Time-migration velocity analysis by velocity continuation* (68 ed., Vol. 5). Geophysics.
- Furniss, A. (2000). *An Integrated Prestack Depth Migration Work Flow using Model Based Velocity Estimation and Refinement* (1 ed., Vol. 5). Geohorizon.
- Gjøystdal, H. I. (2002). *Review of ray theory applications in modelling and imaging of seismic data*. (Vol. II). Studia geophysica et geodaetica.
- Gorelik, G. B. (2019). Application of cdp seismic reflection method in buried paleo-valley study. *Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition, I*, pág. 1'7.
- Herrera, C. (2005). *Secuencias básicas de procesamiento sísmicos de datos complejos 2D*. Maturín, Venezuela: Universidad Simon Bolivar.
- Hubral, P. (1977). *Time migration some ray theoretical aspects* (Vol. 25). Geophysical Prospecting.
- Iversen, E. a. (2008). *Image-ray tracing for joint 3d seismic velocity estimation and time-to-depth conversion*. (Vol. 73). Geophysics.
- Jain, R. (2012). Kirchhoff pre-stack depth migration: effective tool for depth imaging. *9th Biennial International Conference y Exposition on Petroleum Geophysics*, 3, págs. 8-15.
- Kearey, P. B. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons.

- Kessler, D. K. (2017). Depth Imaging—More than PSDM. In *15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF* (págs. 1793-1795). Rio de Janeiro, Brazil: Brazilian Geophysical Society.
- Kim, Y. C. (1997). *Hybrid migration: A cost-effective 3-D depth-imaging technique*. (Vol. 2). Geophysics.
- Kline, M. (1962). *Electromagnetic theory and geometrical optics*. . New York: CAMBRIDGE RESEARCH.
- Larner, K. L.-C. (1981). *Depth migration of imaged time sections* (46 ed., Vol. 5). Geophysics.
- Littau, J. S. (2002). *Psdm structural model constraints: Case studies*. CGGVeritas.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Marsden, D. (1989). *Layer cake depth conversion, part i*. (Vol. 1). The Leading Edge.
- Martínez Corredor, R. e. (2011). *Análisis de la calidad de la imagen sísmica en atributos 3d, al aplicar una nueva definición de binning en la migración Kirchhoff pre-apilado*. Universidad EAFIT.
- Operto, S. L. (2003). *3D ray+ Born migration/inversion—Part 2: Application to the SEG/EAGE overthrust experiment*. (Vol. IV). Geophysics.
- Prabowo, A. e. (2018). *Seismic imaging in complex geological area using pre-stack depth migration (psdm) and tomography method*. (Vol. 1). Journal of Physics.
- Sheriff, R. E. (1995). *Exploration seismology*. Cambridge university press.
- Velasquez, A. (2007). *Conversión tiempo-profundidad. metodologías y estudio de casos estudio (cuencas vmm y cat. colombia)*. Bogotá: Ecopetrol S.A.

Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration geophysicist.

Zhang, W. Z. (2019). The Study and Application of the Kirchhoff Q PSDM Technology. *International Petroleum Technology Conference*, (pág. 7). Beijing, China.

Apéndices

Apéndice A. Metodología

La metodología consistió en tomar el modelo sintético canadiense de estribaciones Overthrust desarrollado por la SEG/EAGE y aplicar un procesamiento estándar pre-apilado en tiempo (PSTM), igualmente se realizó un procesamiento pre apilado en profundidad por el método de Kirchhoff, el modelo de velocidad utilizado fue el original de Overthrust. La imagen obtenida del procesamiento en tiempo fue convertida a profundidad por los métodos de rayo imagen y estiramiento vertical comparándolas con la imagen obtenida del procesado en profundidad PSDM. Para datos reales se procesó una línea sísmica 2D con la misma metodología usada en los datos sintéticos, el modelo de velocidad en esta ocasión fue obtenido durante las etapas de procesamiento en tiempo para la imagen PSTM y posteriormente este modelo fue actualizado por tomografía para conseguir la imagen en profundidad PSDM. Las 3 imágenes en profundidad se compararon utilizando pozos amarrados a la sísmica, pues los topes de los pozos son conocidos y encajan con los horizontes generados.

Procesamiento PSTM Y PSDM en datos sintéticos.

Los parámetros de adquisición para los datos sintéticos fueron: 25 metros distancia entre geófonos, 100 metros distancia entre fuentes con 301 canales y un total de 75 disparos.

Para el procesamiento de los datos no se realizó picado de primeros arribos pues no fue un dato real y tampoco presentó efecto de weathering o estrato no consolidado, es decir con bajas velocidades por lo tanto no se hizo necesario modelar el efecto de la capa somera en cuanto a espesores y velocidad.

Debido a que el datum es la misma elevación no se realizaron correcciones de estáticas de elevación. Se tomaron los disparos y se organizaron en familia de gathers en el dominio de CDP. Se realizó un picado de velocidades utilizando la semblanza determinada por los puntos de mayor coherencia, un súper gather para verificar el aplanamiento de los gather y los CDP gather para hacer la selección correcta de velocidades en cada punto ver *Figura 22*.

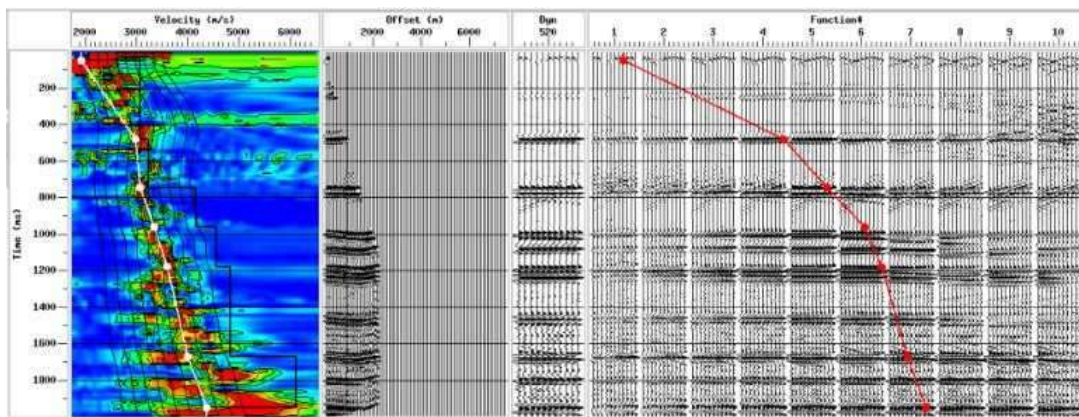


Figura 22. Picado de velocidades CDP 52. En la vertical el tiempo (ms), en la horizontal la semblanza (se picó con línea blanca los colores agrupados en rojo indicadores de mayor energía), súper gathers (m) y CDP gathers (Se picó una línea negra donde se realzan los eventos).

En la *Figura 23* se muestra el modelo de velocidad generado el cual es una aproximación a la velocidad RMS, esta velocidad da mayor coherencia a los eventos, con este modelo se obtuvo la imagen PSTM.

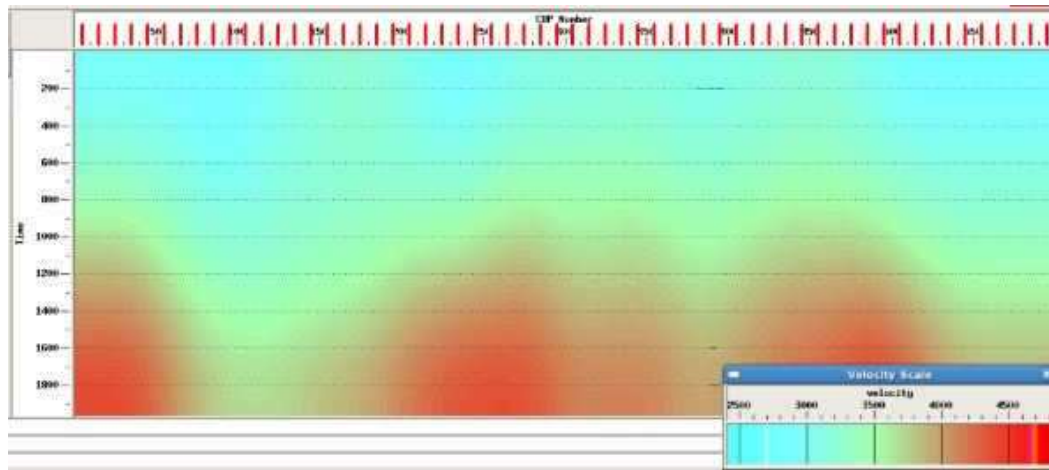


Figura 23. Modelo de velocidad de apilado arrojado del picado de la semblanza en los puntos de mayor coherencia. En la vertical el tiempo (ms) y en la horizontal el número de CDP.

Con este modelo se aplanaron la mayoría de los gathers y fue utilizado para obtener la primera migración en tiempo, este proceso se repitió iterativamente hasta conseguir la mejor imagen PSTM la cual se observa en la Figura 24.

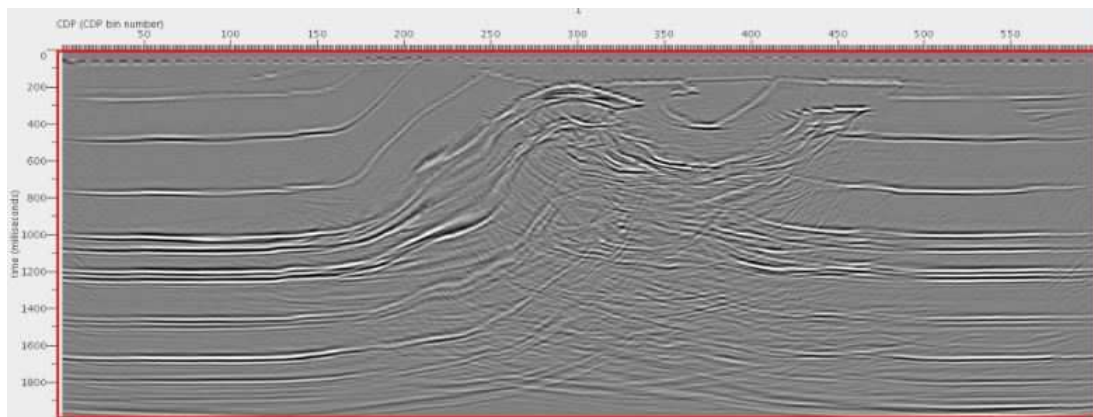


Figura 24. Imagen PSTM generada luego de la tercera iteración de migración pre-apilado en tiempo. Tiempo (ms) en la vertical vs CDP en la horizontal.

La secuencia de procesamiento aplicada para obtener la imagen PSTM en datos sintéticos se ilustra a continuación Figura 25.

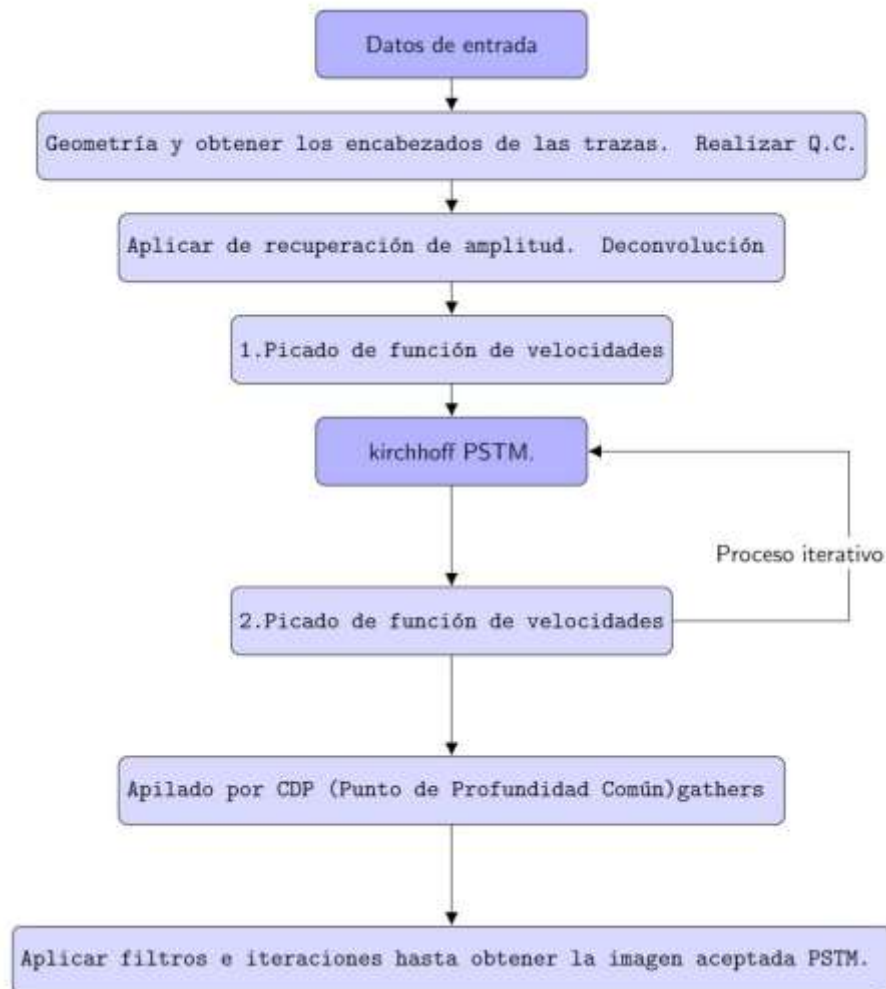


Figura 25. Secuencia de procesamiento utilizada para obtener la imagen PSTM del modelo Overthrust. Esta secuencia es estándar para cualquier modelo de velocidad inicial utilizado.

Al obtener la imagen PSTM se inició la migración a profundidad PSDM. En general, se pueden obtener modelos realistas utilizando dos métodos: con velocidades de apilamiento es decir desde las generadas en procesamiento en tiempo convertidas a profundidad o desde modelos de velocidad con interpretación geológica. Para esta tesis se utilizó el segundo método dado que se disponía del modelo original de velocidades de Overthrust y se procedió hacer solo una iteración para la migración pre apilado en profundidad pues el modelo ya se encontraba validado. La imagen

obtenida fue evaluada y comparada con los dos métodos de conversión a profundidad descritos a continuación.

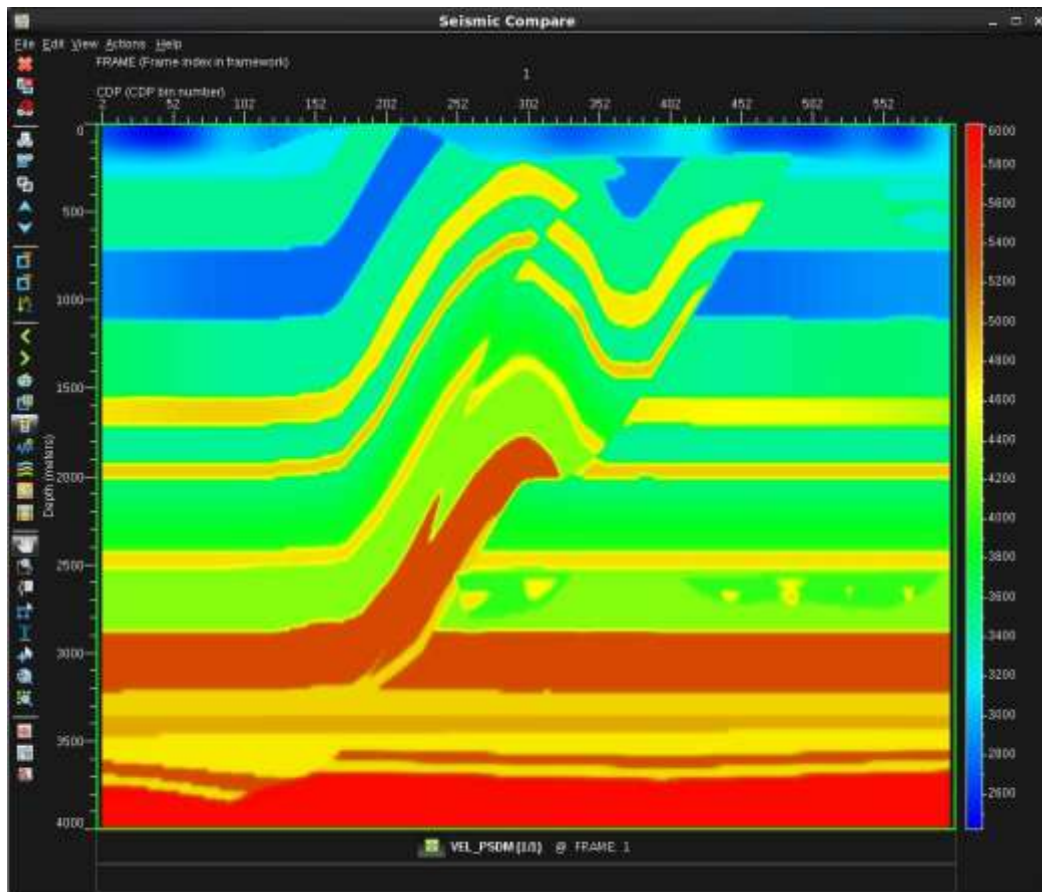


Figura 26. Modelo Original de velocidad de intervalo en profundidad de Overthrust. En la vertical la Profundidad (m), en la horizontal número de CDP.

Conversiones a profundidad.

Estiramiento vertical es un método simple de fácil uso y disponible en la mayoría de software licenciado tanto de procesamiento, interpretación y en versiones libres. Para este estudio se utilizó la imagen en tiempo obtenida en el procesamiento PSTM y las velocidades provenientes del modelo Overthrust. Al tener la velocidad original se realizó la conversión a profundidad utilizando

un gradiente de estiramiento en la vertical y así se obtuvo la imagen en profundidad. El software utilizado fue DecisionSpace de uso comercial.

Para la técnica de rayo imagen se inició con la imagen en tiempo y la velocidad original del modelo Overthrust, esta es la velocidad sísmica final luego de la migración dividida por la dispersión geométrica de los rayos imagen ver *Figura 27*. El software utilizado fue Madagascar de uso libre.

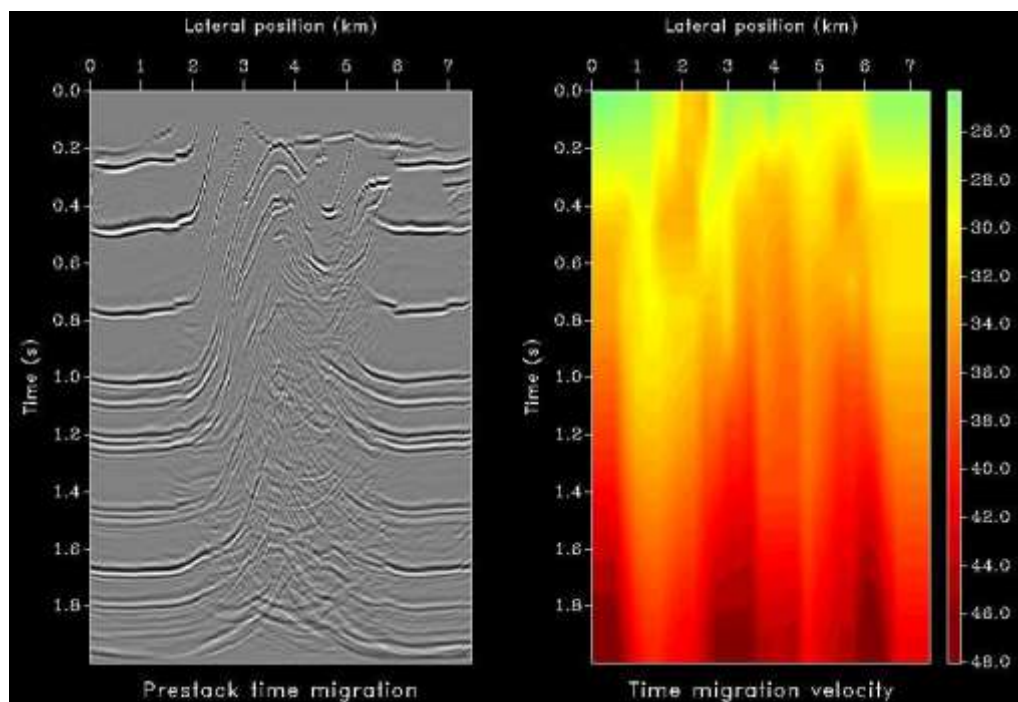


Figura 27. Imagen de migración pre apilada tiempo con el modelo de velocidad en tiempo.

El flujo consistió en 596 trazas a una tasa de muestreo de 0,2 ms de 1000 muestras tomadas. El espaciado entre cada CMP es de 12.5 m, el número de muestras de la sección convertida a profundidad (598 CDP) y un muestreo cada 5 m, un máximo valor en X (7450 m) obtenido de multiplicar el número de trazas (nx) por el espacio entre cada CMP (dx), un máximo valor en Z (3700 m) arrojado de multiplicar el número de muestras de la imagen convertida a profundidad y

el muestreo en profundidad. Se generó un flujo llamado rayos en donde se puede visualizar los rayos sísmicos normales a la superficie de la Tierra ver *Figura 28*.

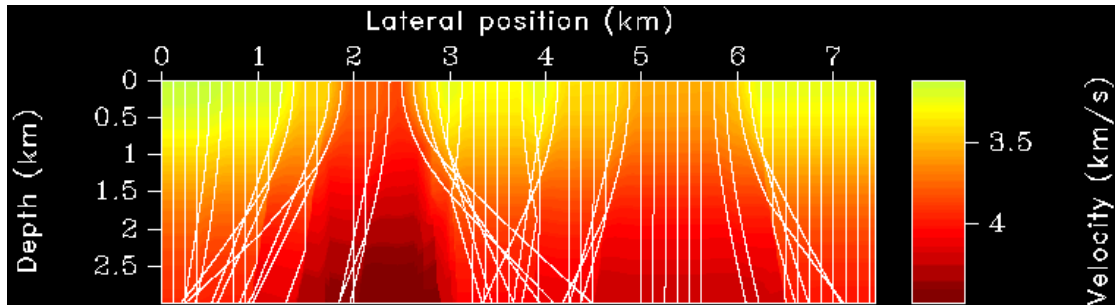


Figura 28. Rayos imagen normales a la superficie para el modelado de la velocidad. Se observa sitios con menor cubrimiento debido a cambios de velocidad en cuales los rayos cambian de dirección bajando el nivel de confiabilidad.

Procesamiento PSTM Y PSDM en datos reales.

Se tomó una línea sísmica con geología estructural compleja y con variaciones laterales de velocidades.

Los parámetros de adquisición fueron: distancia entre receptores 30 metros, distancia entre puntos de disparos 60 metros, número de canales 300, cubrimiento en el subsuelo 75 y número de disparos 295. El área pertenece a un campo productor de hidrocarburos por lo tanto se eligieron dos pozos con su respectivos topes estratigráficos para amarrarlos a la sísmica y evaluar cuál de las 3 imágenes en profundidad es más confiable basada en el amarre sísmica pozos. La separación entre geófonos de los datos sintéticos y reales no influye en las variaciones de velocidad bajo el subsuelo, esta distancia sirve es para un mayor cubrimiento en estructuras con alto buzamiento, entre más cercano estén los geófonos mejor el cubrimiento en dichas zonas. Para obtener la sección sísmica en tiempo PSTM se realizó una secuencia estándar en el software licenciado Promax definida de la siguiente manera: Carga de datos, geometría y asignación de la geometría,

posterior se realizó la atenuación de ruido coherente tipo ground roll y onda de aire con la herramienta denominada “swell noise attenuation”, se prosiguió con la atenuación de ruidos no coherente haciendo uso de la herramienta (Time Frecuence Domain - TFD). Las siguientes etapas consistieron en recuperación de amplitud verdadera (TAR), recuperación de amplitudes consistente con superficie (SCAC) y la deconvolución.

Se realizó un picado de primeros arribos de cada traza ver *Figura 29* para desarrollar la corrección de estáticas de elevación, refracción y corregir las variaciones de topografía y capa meteorizada. Un análisis de velocidad de apilado y una corrección NMO para aplanar los gathers fue implementado ver *Figura 30* identificando la velocidad con que mejor se agrupa la energía (3200 m/s velocidad de reemplazamiento), con ello lo que se obtuvo fue un análisis de semblanza observando los gathers con distintas velocidades desde 1600 milisegundos hasta los 6000 milisegundos para elegir la mejor velocidad de apilamiento.

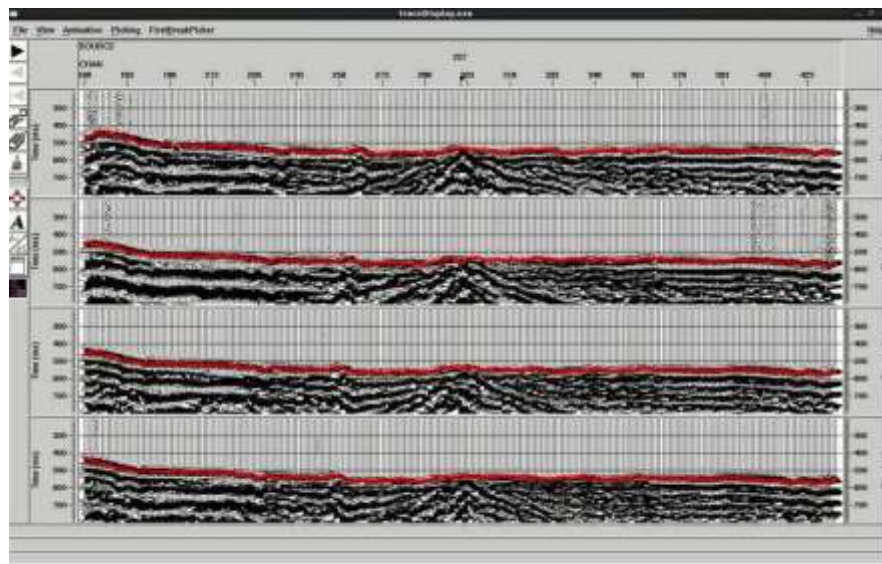


Figura 29. Picado de primeros arribos. En la vertical tiempo (ms), en la horizontal número de canales.

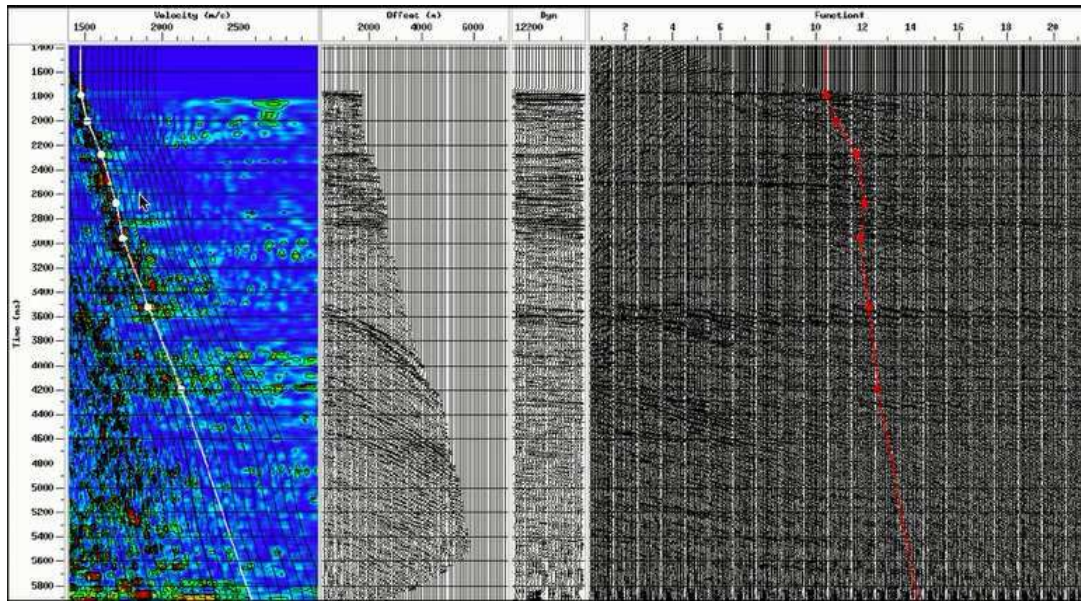


Figura 30. Picado de velocidad de apilado a partir del análisis de semblanza. El color azul es indicador de baja concentración de energía y el rojo de mayor. En la parte media está el CMP (offset) y muestra cómo se están aplanando los gathers a partir del picado, al final están los apilados a distintas velocidades. En la vertical está el tiempo (ms), en la horizontal la velocidad (m/s), offset (m), dyn y la función.

Se realizó un cálculo de estáticas residuales a partir de los datos, observando la coherencia y desarrollando correcciones para fuentes y receptoras. El proceso de picado de velocidad y cálculo de residuales fue iterativo hasta quedar conforme con el modelo, para este caso se realizó dos veces.

Se implementó la atenuación de amplitudes anómalas para el mejoramiento de los datos utilizando filtros de coherencia, luego se ordenaron los datos por planos de offset para hacer la migración pre-apilado de Kirchhoff con 3 iteraciones para el análisis de velocidades. La migración se encargó de ubicar los eventos sísmicos buzantes a su verdadera posición, colapsando las difracciones e incrementando así su resolución espacial produciendo la imagen. Luego de la migración fueron apilados los datos por CDP, para dar mayor realce a la imagen, se aplicaron

algunos filtros y ganancias. La sección PSTM obtenida ver *Figura 31* presenta desde el CDP 927 dificultad para la interpretación geológica por la complejidad estructural del área, pues hay cambios fuertes de velocidad en la lateral.

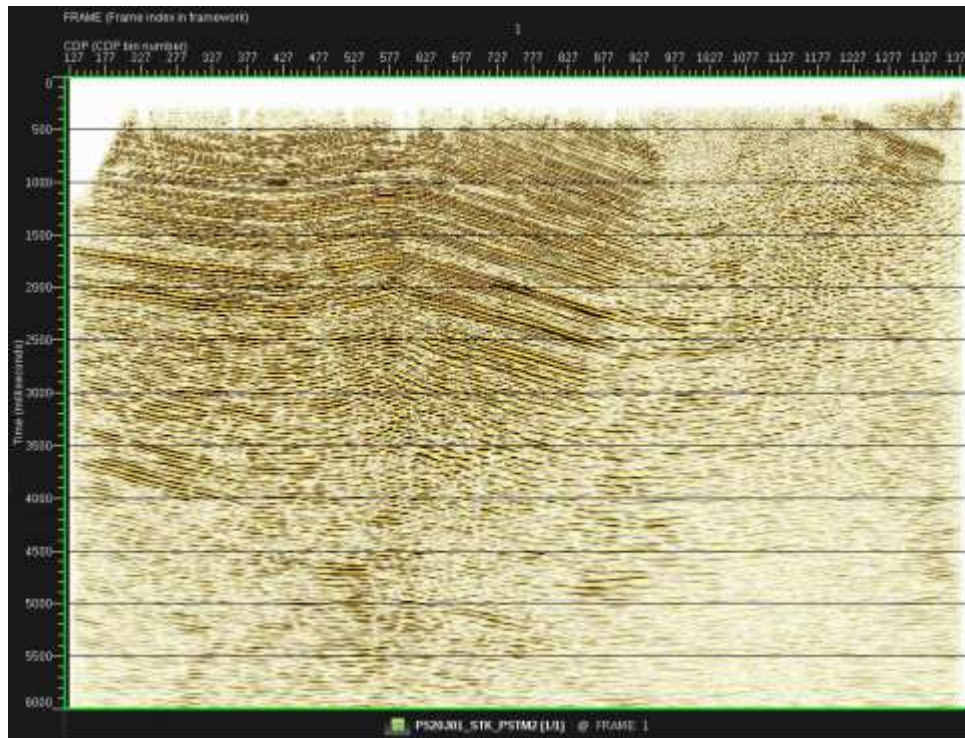


Figura 31. Imagen PSTM generada en un área con estructuras geológicas compleja por la presencia de fallas inversas de cabalgamiento. Tiempo (ms) en la vertical vs CPD.

En la migración en profundidad PSDM se utilizaron los mismos gathers que en la migración en tiempo, para el modelo de velocidades se realizaron 3 iteraciones. En la iteración 1 se trabajó la parte somera de la imagen aplicando un picado de residuales para aplanar los gathers automáticamente ver *Figura 32* y fue actualizado el modelo por tomografía.

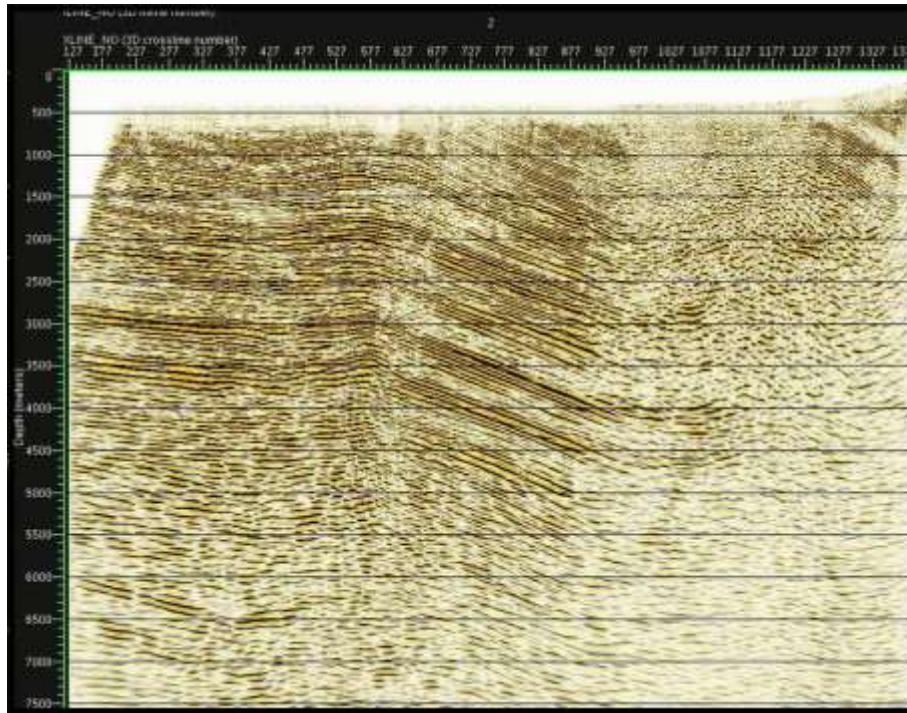


Figura 32. Iteración 1 donde se trabajó la zona somera (0 m a 1000 m) del modelo pues las velocidades interválicas actúan como una columna y se debe mejorar la sección de la parte somera e ir avanzando luego a la zona profunda. En la vertical profundidad (m), en la horizontal CDP.

Para cada una de las iteraciones un trazado de rayos es implementado, los planos de offset fueron migrados y ordenados por CDP para apilarlos y tener un control de calidad a nivel de la imagen migrada.

Los otros controles de calidad corresponden a verificar el aplanamiento de los reflectores en los gathers migrados. Igualmente se hizo una verificación de los residuales de las velocidades calculadas en cada iteración. El residual calculado, el modelo actual con la velocidad y el trazado de rayos en donde se introduce la tomografía se ingresan a una inversión sísmica para generar un nuevo modelo.

En la última iteración se trabajó la zona profunda (4300 m en adelante) del modelo mejorando la continuidad de los reflectores y aplicando un residual ver *Figura 33*.

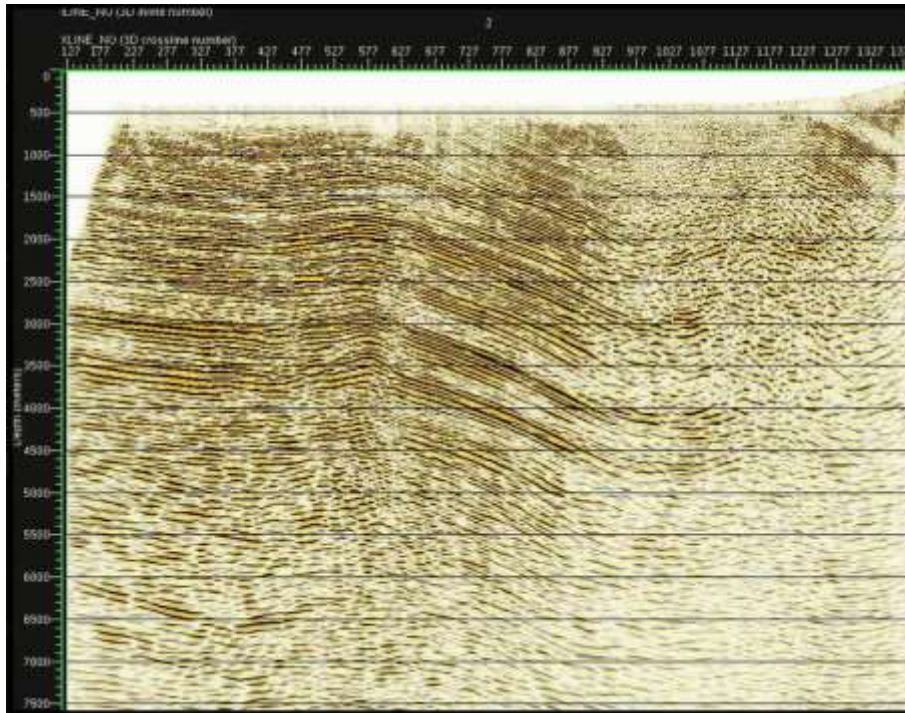


Figura 33. Iteración 3. Migración en profundidad aplicando residual para aplanar los gathers. En la vertical profundidad (m), en la horizontal CDP.

El éxito de una imagen confiable en profundidad depende principalmente de la calidad de los datos sísmicos y de un modelo de velocidad del subsuelo lo más aproximado a la realidad, este es un proceso iterativo donde el modelo se va perfeccionando usando el criterio de interpretación y el ajuste con la información de pozos. El tiempo de cómputo en el desarrollo de esta técnica de migración en profundidad es largo y se necesita de un personal altamente capacitado para desarrollarla.

En la *Figura 34* se describe la secuencia de procesamiento PSTM Y PSDM aplicada a los datos de estudio.

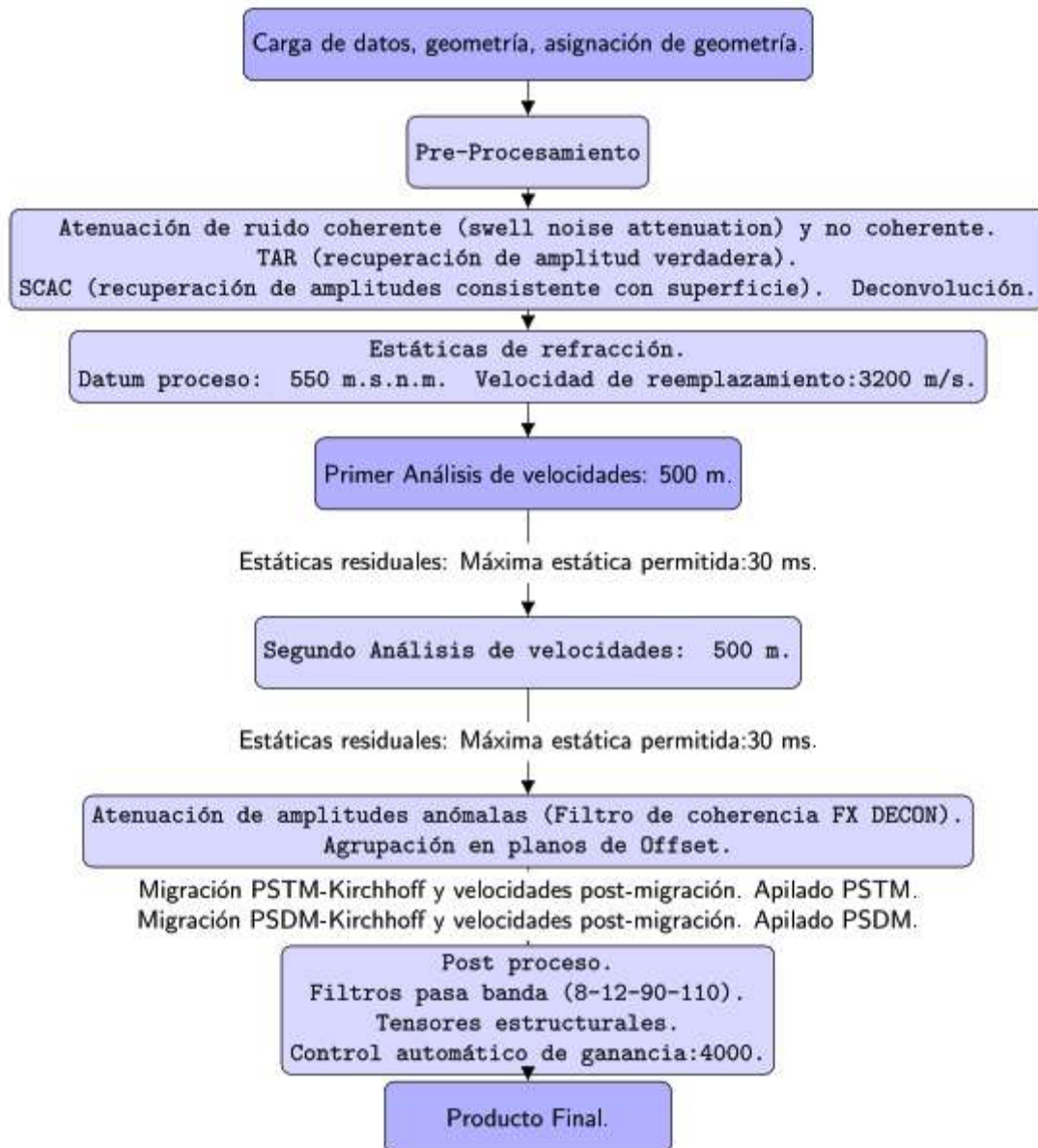


Figura 34. Secuencia de procesamiento utilizada para obtener la imagen PSTM Y PSDM en datos reales terrestres.

Conversiones a profundidad.

Para la conversión en datos reales por la herramienta estiramiento vertical se tomó la imagen PSTM y el modelo de velocidad en tiempo, el modelo de velocidad es convertido a intervalo en

profundidad y a su vez es transformado a velocidad promedio como una función lineal. La imagen fue estirada verticalmente y convertida a profundidad.

En la conversión a profundidad por rayo imagen se tomó el modelo de velocidad generado en tiempo PSTM. La secuencia de conversión se hizo a partir del desarrollo dado por (Cameron, 2008), el cual toma la velocidad en profundidad que se puede obtener de la velocidad de migración en tiempo y se asume como la velocidad real de intervalo dividida por la dispersión geométrica de los rayos imagen para plantear un problema inverso generando la imagen en profundidad. Cada cambio al modelo se hizo iterativamente hasta obtener la imagen más confiable en profundidad. El arreglo consistió en tomar 3001 muestras en tiempo, se hizo un muestreo cada 0.002 Km, 1227 trazas, el espaciado entre cada CMP 15, el número de muestras de la sección convertida a profundidad 1602, el muestreo en profundidad cada 5 m, un máximo valor en X (18400 m) y un máximo valor en Z (8000 m). Se tomó el número de muestras, el SEG-Y PSTM, el apilado y se convirtió la velocidad RMS a velocidad de intervalo utilizando Dix, que es la relación entre la velocidad sísmica de intervalo y la dispersión geométrica de los rayos de imagen con el fin de transformar esa velocidad en un modelo en profundidad e ir delimitando un área particular ver *Figura 35*.

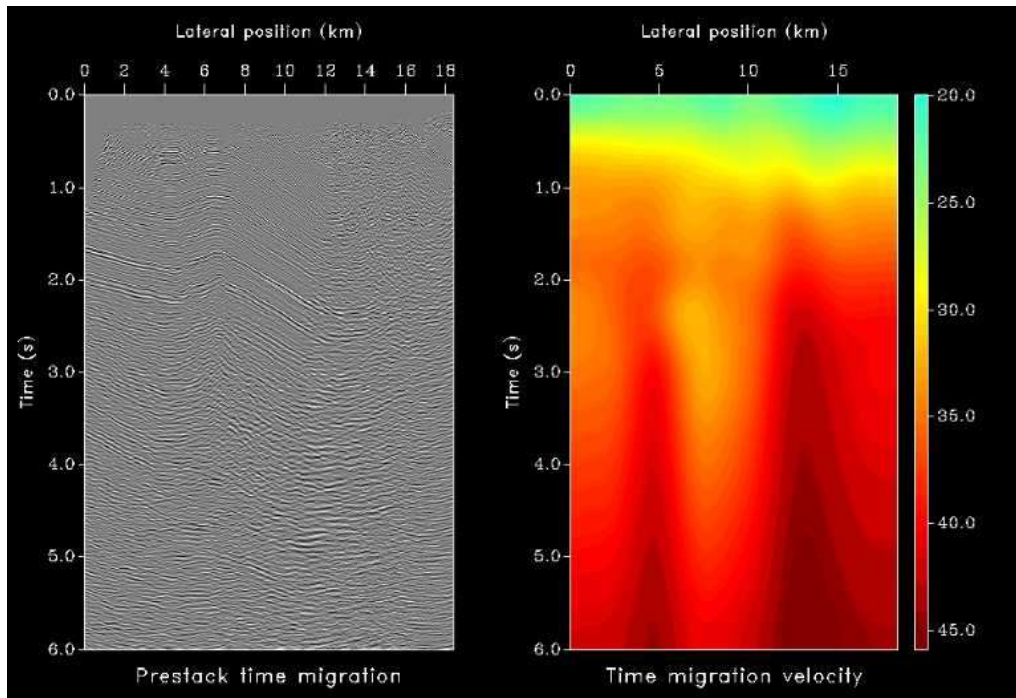


Figura 35. Imagen PSTM y modelo de velocidad de migración en tiempo utilizados para la conversión a profundidad por rayo imagen.

Al tener el modelo de velocidad convertido a velocidad de intervalo para medios lateralmente no homogéneos se generó un trazado de rayos a dichos datos en profundidad ver *Figura 36*.

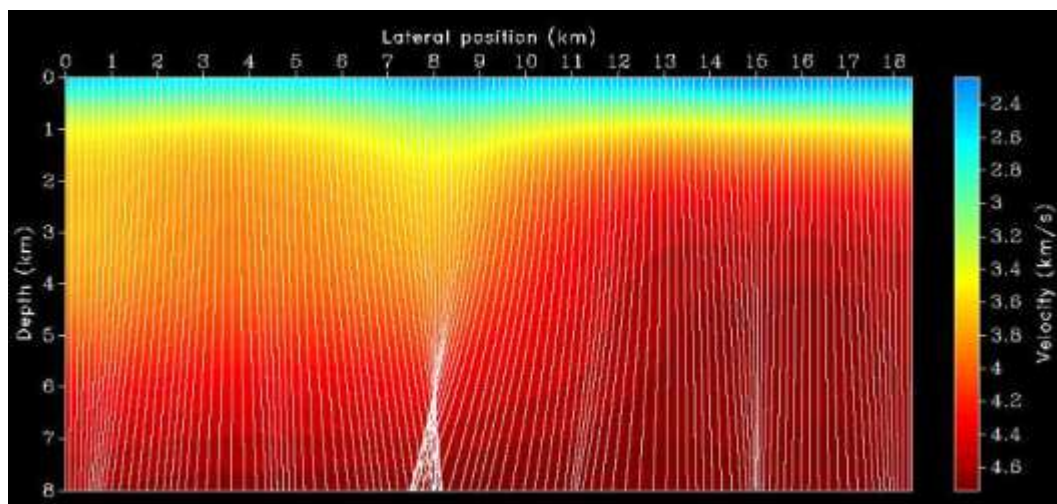


Figura 36. Modelo de velocidad con rayo imagen en la conversión a sísmica a profundidad.