

CORRECCIONES ESTÁTICAS POR CAPA METEORIZADA  
USANDO LAS TÉCNICAS WAVE EQUATION DATUMING Y  
DELAY TIME

CATALINA ALEXANDRA PEREA PINEDA

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ciencias  
Maestría en Geofísica  
Escuela de Física  
Bucaramanga  
2016

CORRECCIONES ESTÁTICAS POR CAPA METEORIZADA  
USANDO LAS TÉCNICAS WAVE EQUATION DATUMING Y  
DELAY TIME

CATALINA ALEXANDRA PEREA PINEDA

Trabajo de Investigación presentado como requisito para optar al título  
de:

Magister en Geofísica

DIRECTOR  
JOSÉ DAVID SANABRIA GÓMEZ, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ciencias  
Maestría en Geofísica  
Escuela de Física  
Bucaramanga  
2016

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mis papás Alix Pineda y Jesús Perea, por su apoyo incondicional y su gran generosidad y dedicación. Agradezco a mi codirector Robiel Martínez y a mi director de proyecto Jose David Sanabria Gomez por su respaldo y enseñanza, también agradezco a las personas que me acompañaron durante el proceso de elaboración de mi trabajo, Alberto Silva por su gran apoyo, por su valiosa amistad. También agradezco a Herling González por haber sido un eslabón importante durante el desarrollo de mi trabajo, a Camilo Andrez González por su extraordinaria personalidad tan servicial y generosa, por todo lo que aprendí a su lado y por su dedicación, a Andy Burch por su gran ayuda y apoyo durante el desarrollo de mi trabajo. Pero sobre todo agradezco a Fito por existir y acompañarme a diario.

## Tabla de Contenido

<b>Introduction</b>	<b>15</b>
<b>1. Correcciones en los tiempos de arribo de las ondas sísmicas</b>	<b>18</b>
1.1. Correcciones estáticas . . . . .	18
1.2. Métodos para corregir estáticas . . . . .	23
1.2.1. Métodos basados en tiempos de refracción sísmica	25
1.2.2. Metodos basados en la continuacion del campo de onda . . . . .	28
<b>2. Flujo de procesamiento de datos sísmicos</b>	<b>31</b>
2.1. Consideraciones sobre el flujo de trabajo y procesamiento de los datos . . . . .	32
2.2. Modelos Sintéticos Generados . . . . .	33
2.3. Procesamiento de Datos Sintéticos y Datos Reales . . . .	36
<b>3. Análisis y Resultados</b>	<b>50</b>
3.1. Resultados del modelo 1: capas planas . . . . .	50
3.2. Resultados del modelo 2: capa meteorizada buzante . . .	50
3.3. Resultados del modelo 3: capa meteorizada curva . . . .	52
3.4. Resultados del modelo 4: capa meteorizada variable . . .	54
3.5. Resultados del modelo 5: topografía abrupta y capa me- teorizada . . . . .	56
3.6. Resultados procesamiento de datos reales . . . . .	59
<b>4. Conclusiones</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>

## Lista de Figuras

1.	Trayectoria del rayo desde la fuente hasta el receptor, donde se evidencia el objetivo de las correcciones estáticas. En la parte superior de la imagen se observa la fuente y el receptor en superficie. En la parte inferior de la imagen se ilustra la relocalización de fuente y receptor en el datum de referencia plano. Tomado de [3] . . . . .	19
2.	Comparación entre la trayectoria de los rayos teniendo en cuenta cambios estáticos y propagación del campo de onda. Tomado de [10] . . . . .	20
3.	Referenciación del <i>datum</i> de referencia plano y del <i>datum</i> flotante, que evidencia un suavizado de la topografía. Tomado de [14] . . . . .	21
4.	Imagen apilada de una línea sísmica real 2D, en el panel <i>a</i> se presenta la línea sísmica procesada sin correcciones, y en el panel <i>b</i> se presenta la misma línea después de haber realizado las correcciones. Tomado de [10] . . . . .	24
5.	Trayectoria de los rayos para la onda directa, onda reflejada y onda refractada, tomado de [14] . . . . .	25
6.	Tiempo de retardo desde <i>S</i> hasta <i>R</i> , donde <i>S</i> es posición de fuente y <i>R</i> posición del receptor. Tomado de [13] . . . . .	28
7.	Trayectoria del rayo y ángulo emergente entre el datum de entrada y datum de salida. Tomado de [2] . . . . .	31
8.	Flujo convencional de procesamiento sísmico. . . . .	33
9.	Captura de pantalla del script empleado para realizar la adquisición de los datos. . . . .	35
10.	Modelos sintéticos 2D, para una capa meteorizada plana y una capa meteorizada buzante. . . . .	36
11.	Modelos sintéticos 2D, con variaciones en la base de la capa meteorizada . . . . .	37
12.	Modelo que simula topografía abrupta y capa meteorizada, velocidades de las capas: primer capa 1100m/s, segunda capa 2500m/s y tercer capa 3600m/s. . . . .	38

13.	Picado de primeros arribos, la línea roja corresponde a los picados de la onda refractada y onda directa . . . . .	39
14.	Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de $DT$ para el modelo de capas planas, espesor calculado $160m$ aproximadamente. . . . .	39
15.	Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de $DT$ para el modelo de capa meteorizada buzante, espesor calculado varía de $60m$ a $160m$ aproximadamente. . . . .	40
16.	Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de $DT$ para el modelo de capa meteorizada curva, espesor calculado varía de $60m$ a $120m$ aproximadamente. . . . .	40
17.	Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de $DT$ para el modelo de capa meteorizada variable, espesor calculado varía de $10m.$ a $160m$ aproximadamente . . . . .	41
18.	Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de $DT$ para el modelo con variaciones topográficas, espesor calculado varía de $2m$ a $50m$ aproximadamente. . . . .	42
19.	Propagación del campo de onda desde la superficie de entrada sobre topografía hasta la base de la capa meteorizada. Donde $P_i$ es el campo de entrada, $P_j$ campo de salida y $T_{ij}$ tiempo de viaje. . . . .	42
20.	Captura de pantalla de PROMAX para carga de datos. . . . .	44
21.	Captura de pantalla de PROMAX para la asignación de parámetros en el proceso de carga de datos. . . . .	45
22.	Captura de pantalla de PROMAX para asignación de geometría a los datos. . . . .	46
23.	Captura de pantalla de PROMAX para calculo de las estáticas por medio de refracción. . . . .	46
24.	Captura de pantalla de PROMAX la asignacion de parámetros en el proceso para calculo de las estáticas por medio de refraccion. . . . .	47
25.	Captura de pantalla de PROMAX para el proceso y la asignación de parámetros para corrección de estáticas por medio de Wave Equation Datuming. . . . .	47

26.	Captura de pantalla de PROMAX para análisis y picado de velocidades. . . . .	48
27.	Captura de pantalla de PROMAX para el proceso de apilado. . . . .	48
28.	Captura de pantalla de PROMAX para el proceso de migración. . . . .	49
29.	Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas. . . . .	51
30.	Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada después de la corrección por <i>DT</i> . . . . .	51
31.	Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada después de la corrección por <i>WED</i> . . . . .	52
32.	Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas. . . . .	53
33.	Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada buzante, migrada después de la corrección por <i>DT</i> . . . . .	53
34.	Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada buzante, migrada después de la corrección por <i>WED</i> . . . . .	54
35.	Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas. . . . .	54
36.	Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por <i>DT</i> . . . . .	55
37.	Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por <i>WED</i> . . . . .	55
38.	Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas. . . . .	56
39.	Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por <i>DT</i> . . . . .	57
40.	Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por <i>WED</i> . . . . .	57
41.	Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas. . . . .	58
42.	Imagen resultante para el modelo con topografía abrupta y presencia de capa meteorizada, migrada después de la corrección por <i>DT</i> . . . . .	58

43.	Imagen resultante para el modelo con topografía abrupta y presencia de capa meteorizada, migrada después de la corrección por <i>WED</i> . . . . .	59
44.	Representación alterna de la figura 29, donde se logra visualizar la topografía de elevación para el modelo generado. . . . .	59
45.	Imagen resultante de la migración sin correcciones estáticas para una línea 2D de datos reales. . . . .	60
46.	Imagen resultante para una línea 2D de datos reales, migrada después de la corrección por <i>DT</i> . . . . .	61
47.	Imagen resultante para una línea 2D de datos reales, migrada después de la corrección por <i>WED</i> . . . . .	61

## Abstract

TITLE: STATIC CORRECTIONS FOR WEATHERING LAYER USING WAVE EQUATION DATUMING AND DELAY TIME TECHNIQUES.<sup>1</sup>

AUTHOR: CATALINA ALEXANDRA PEREA PINEDA.<sup>2</sup>

KEYWORDS: Delay Time, Wave Equation Datuming, wave field extrapolation, rugged topography, reference datum, replacement velocity.

During the seismic land acquisition, the data presents variations in the wave arrival times because of the weathering layer and topography effects, which may complicate the correct interpretation of the data. For that reason, it is important to do an adequate processing flow that takes in to account corrections in the seismic trace arrival times.

This work was to compare two techniques of correcting the arrival times of seismic waves. One static method called *Delay Time (DT)* and the other dynamic method called *Wave Equation Datuming (WED)*. For this four 2D synthetic models simulating the presence of the weathered layer were created, and a model which simulates rugged topography and weathered layer. Afterwards the same methods were applied in real 2D seismic data acquired in a flat and topographic area.

The results are showed through the stacked and migrated images. It was found that *DT* corrects the seismic data more efficiently when a high velocity contrast exists between values of 900m/s and 2,500m/s; however *WED* improves the correction of the seismic data when a rugged topography and low velocity contrast exist, between values of 1200m/s and 2500m/s. It was verified that when the seismic data has lateral velocity variation, the problem is solved in similar conditions, showing similar resolution in the migrated images. In real 2D data, *WED* highlighted the

---

<sup>1</sup>Research Work

<sup>2</sup>School of Science. Department of Physics. Master in Geophysics. Advisor, Jose David Sanabria Gómez.

events in the rugged topographic area, and some depth events in the flat area.

## Resumen

TÍTULO: CORRECCIONES ESTÁTICAS POR CAPA METEORIZADA USANDO LAS TÉCNICAS WAVE EQUATION DATUMING Y DEALY TIME.<sup>3</sup>

AUTORA: CATALINA ALEXANDRA PEREA PINEDA.<sup>4</sup>

PALABRAS CLAVE: Delay Time, Wave Equation Datuming, extrapolación del campo de onda, topografía abrupta, datum de referencia, velocidad de reemplazamiento.

Durante el proceso de adquisición de datos sísmicos, los tiempos de arribo de las ondas captadas por los geófonos, presentan variaciones debido a la presencia de la capa meteorizada y a las condiciones topográficas del terreno donde se realiza la adquisición, dificultando así la correcta interpretación de los datos. Por tal motivo es importante efectuar un adecuado flujo de procesamiento sísmico, en el que se tengan en cuenta las estáticas y se corrijan los tiempos de arribo de las trazas sísmicas.

El presente trabajo consistió en comparar dos técnicas para corregir los tiempos de arribo de las ondas sísmicas, una técnica de tipo estático *Delay Time DT* y otra de tipo dinámico *Wave Equation Datuming (WED)*. Para esto se realizaron cuatro modelos sintéticos 2D, que simulan la presencia de la capa meteorizada y un modelo que simula topografía abrupta y capa meteorizada. Después se aplicaron las mismas técnicas de corrección en una línea sísmica de datos reales 2D, que se adquirió en una zona con terreno plano y terreno con topografía.

Los resultados obtenidos se presentan a través de las imágenes apiladas y migradas. Se encontró que *DT* corrige mejor datos con altos contrastes de velocidad entre 900m/s y 2500m/s; mientras que *WED* corrige mejor datos con topografía y datos con bajos contrastes de velocidad entre

---

<sup>3</sup>Trabajo de Investigación.

<sup>4</sup>Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Maestría en Geofísica. Director, Jose David Sanabria Gómez.

1200m/s y 2500m/s. Se comprobó que en datos con variaciones en la base de la capa meteorizada y variaciones laterales de velocidad entre 900m/s y 1200m/s, *DT* y *WED* corrigen el problema de manera que la resolución de las imágenes apiladas es similar. También se encontró que en los datos reales 2D, *WED* resalta la continuidad de eventos someros en zonas topográficas y algunos reflectores profundos en la zona plana.

## Introducción

El método de reflexión sísmica se basa en la generación de frentes de ondas, que penetran en el subsuelo y su energía es reflejada en las distintas interfases que lo componen en respuesta a contrastes de impedancia elástica. Este método se usa para prospección geofísica y emplea diferentes técnicas para relacionar los fenómenos físicos de propagación de ondas con la estructura geológica donde se efectúa la perturbación. Muchos autores han empleado el método de reflexión sísmica para conocer las rocas que conforman el subsuelo y encontrar zonas petrolíferas [5]. Para llevar a cabo el proceso de adquisición de datos sísmicos se emplean fuentes, desde donde se producen las señales (empleando dinamita o vibroseis) y geófonos donde se registran.

Cuando se consideran zonas con cambios abruptos de topografía, se hace necesario realizar correcciones en el tiempo de arribo de las trazas sísmicas adquiridas en campo; las cuales tienen en cuenta un *datum* o plano de referencia donde se reposicionan las fuentes y los receptores a un mismo nivel. Estas correcciones se aplican a los datos para eliminar las anomalías generadas por la topografía y pueden ser de dos tipos: estáticas o dinámicas. Los métodos convencionales como *delay time* (*DT*), presentado por Barry en 1967 [17], son de tipo estático y tienen en cuenta cambios de tiempo constante, para llevar los reflectores a un *datum* de referencia plano donde se emplea una velocidad de reemplazamiento. Por otro lado los métodos dinámicos tienen en cuenta la solución de onda acústica, para extrapolación de los puntos a una superficie plana teniendo en cuenta un *datum* de entrada y los tiempos de cada punto, método denominado *wave equation datuming* (*WED*) [1].

El concepto de *WED* fue presentado por primera vez por Berryhill en el año de (1979), primero para datos post-apilados y luego para datos pre-apilados en el año de (1984), es un método que consiste en la extrapolación del campo de onda, donde se reposiciona el plano de referencia o datum como si esta fuera una interface que hace que las reflexiones sísmicas se originen por debajo o sobre la superficie. Este esquema de

extrapolación se basa en la ecuación de onda, y no es mas que la continuación del campo hacia arriba o hacia debajo teniendo en cuenta los tiempos de arribo de los datos sísmicos.

Wiggins y Resehf[19] tuvieron en cuenta los efectos causados por topografías para incluir este fenómeno en sus algoritmos de migración. Wiggins empleó la formulación de Kirchoff para introducir la topografía directamente en migración pre-apilada de una superficie irregular. Por otro lado, Beasley y Lynn[19] realizaron un sencillo algoritmo que consistía en corregir el error en el desplazamiento de los tiempo de arribo de las ondas sísmicas causado por las estáticas, basado en el concepto de capa de velocidad cero (cero velocity layer), lo que hacen es migrar los datos después de realizar la corrección por estáticas. Shtivelman y Canning[19] ponen en evidencia las limitaciones de las correcciones estáticas convencionales y la necesidad de aplicar la extrapolación del campo de onda, cuando existen diferencias por elevaciones muy significativas y un modelo de velocidad muy complejo. Plantean un método para eliminar distorsiones causadas por la topografía, continuando los datos sobre un plano de referencia arbitrario ubicado sobre la topografía más alta. Scott Mackay[19] propone la continuación hacia arriba y hacia debajo de los datos usando diferencias finitas. Schneider[19] aplica la misma idea de algunos autores anteriores la cual es reemplazar la capa de baja velocidad de una sección afectada por la topografía. Emplea análisis de refracciones para estimar la velocidad de la capa meteorizada, seguido por la propagación del campo de onda, para la extrapolación por debajo de los datos hacia la base de la capa meteorizada con la velocidad estimada. Bevc en (1997)[2] propuso la propagación del campo de onda en su flujo de procesamiento para luego aplicar extrapolación de los datos por encima de la superficie hasta un datum plano, llamó a esta técnica inundación de la topografía, donde no es necesario un conocimiento detallado de la velocidad cercana a la superficie.

Para el presente trabajo de grado se generaron datos sintéticos 2D empleando el método de diferencias finitas, que simulan el subsuelo terrestre bajo cinco diferentes escenarios, con presencia de una capa meteorizada

con variaciones de velocidades y espesores, con el fin de evaluar los métodos *DT* y *WED* y determinar en qué casos un método corrige mejor que otro después de haberlos aplicado en los diferentes datos sintéticos y reales 2D, adquiridos en una zona de Colombia que presenta áreas planas y áreas con topografía abrupta. Los datos fueron suministrados por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), luego la ubicación y coordenadas de la zona es estrictamente confidencial.

## 1. Correcciones en los tiempos de arribo de las ondas sísmicas

A continuación se presenta un resumen acerca de las correcciones estáticas y los métodos más relevantes que existen para realizar estas correcciones. También se describen los dos métodos empleados para el desarrollo del presente trabajo, evidenciando la importancia de llevar a cabo esta etapa del procesamiento sísmico, debido a que por medio de las correcciones estáticas se logran posicionar las trazas sísmicas de manera que formen una hipérbola, necesaria para el análisis de velocidades.

### 1.1. Correcciones estáticas

Las correcciones estáticas [22] se aplican a los tiempos de las trazas sísmicas, ya que por efecto de la topografía del terreno y la presencia de la capa meteorizada (también llamada capa de baja velocidad o *weathering*) estos se desajustan. Estos desajustes en los tiempos de llegada de las trazas sísmicas son causados por el cambio de nivel o plano desde el cual son situados fuentes y receptores, y también por los contrastes de velocidad producidos por las irregularidades de la capa meteorizada. Se establece un plano de referencia denominado *datum*, el cual debe situarse encima o debajo de la capa meteorizada y desde el cual se calcularán los nuevos tiempos, al ubicar fuentes y receptores a un mismo nivel. Como se puede observar en la Fig. 1, el objetivo de estas correcciones es determinar los tiempos de arribo o llegada de las reflexiones, las cuales habrían sido observados si todas las medidas hubieran sido tomadas en un *datum* plano sin presencia de la capa meteorizada o material de baja velocidad presente

Existen dos formas de determinar el espesor y velocidad de la capa meteorizada, una de estas es tomar medidas directas a través de un tiro vertical de verificación denominado *check – shot*, el cual representa la forma mas acertada para realizar el calculo de espesor y velocidad. La otra forma de determinar estos valores se hace a traves de refracción sísmica. Luego de haber caracterizado la superficie se determina un datum de referencia para ajustar los tiempos de llegada de las ondas desde la super-

ficie hasta el datum plano de referencia para cada rayo de la línea sísmica.

Existen diferentes escenarios de adquisición que deberían ser considerados para la ubicación del *datum* en la corrección de estáticas [9]:

- Fuente o receptor en la superficie.
- Datos a profundidad donde la base del disparo o receptor esta debajo de la capa meteorizada.
- Datos a profundidad donde la base del disparo o receptor esta dentro de la capa meteorizada.

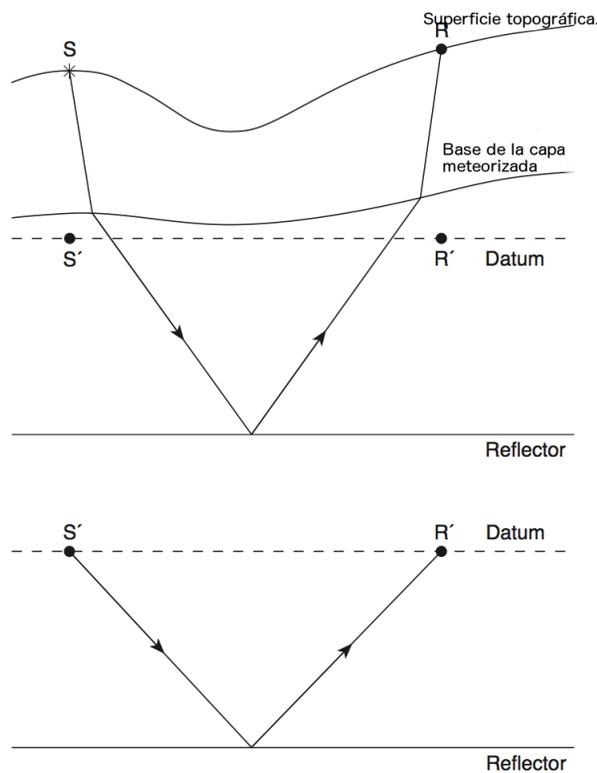


Figura 1: Trayectoria del rayo desde la fuente hasta el receptor, donde se evidencia el objetivo de las correcciones estáticas. En la parte superior de la imagen se observa la fuente y el receptor en superficie. En la parte inferior de la imagen se ilustra la relocalización de fuente y receptor en el datum de referencia plano. Tomado de [3]

Las correcciones aplicadas a las trazas de los datos sísmicos pueden ser de

dos tipos: estáticas y dinámicas. Las correcciones estáticas asumen una trayectoria vertical de los rayos refractados, que pasan de una capa de mayor velocidad a una de menor velocidad, basándose en la ley de Snell que dice que el valor del seno del ángulo incidente sobre la velocidad de la capa 1, o capa de baja velocidad, es igual al valor del seno del ángulo refractado sobre la velocidad de la capa 2 es decir, la capa ubicada debajo de la capa meteorizada. Para casos donde el contraste de velocidades entre estas dos capas es grande, el ángulo refractado se va aproximar a 90 grados, es decir, se va aproximar a la dirección normal y va ser críticamente refractado. Por otro lado, cuando el contraste de velocidad entre estas capas no es suficientemente grande, la aproximación vertical de rayo no es considerable, y en esos casos las correcciones dinámicas son más aproximadas al tener en cuenta las trayectorias oblicuas de los rayos refractados, como se muestra en la Fig. 2.

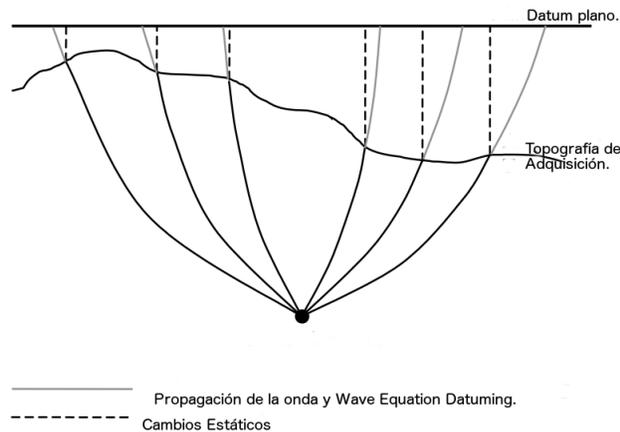


Figura 2: Comparación entre la trayectoria de los rayos teniendo en cuenta cambios estáticos y propagación del campo de onda. Tomado de [10]

Las correcciones estáticas pueden ser:

- Correcciones por estáticas de elevación, las cuales representan elevaciones variables de fuentes y receptores.
- Correcciones de estáticas por capa meteorizada, las cuales representan variaciones laterales en la velocidad y espesor de la capa meteorizada.

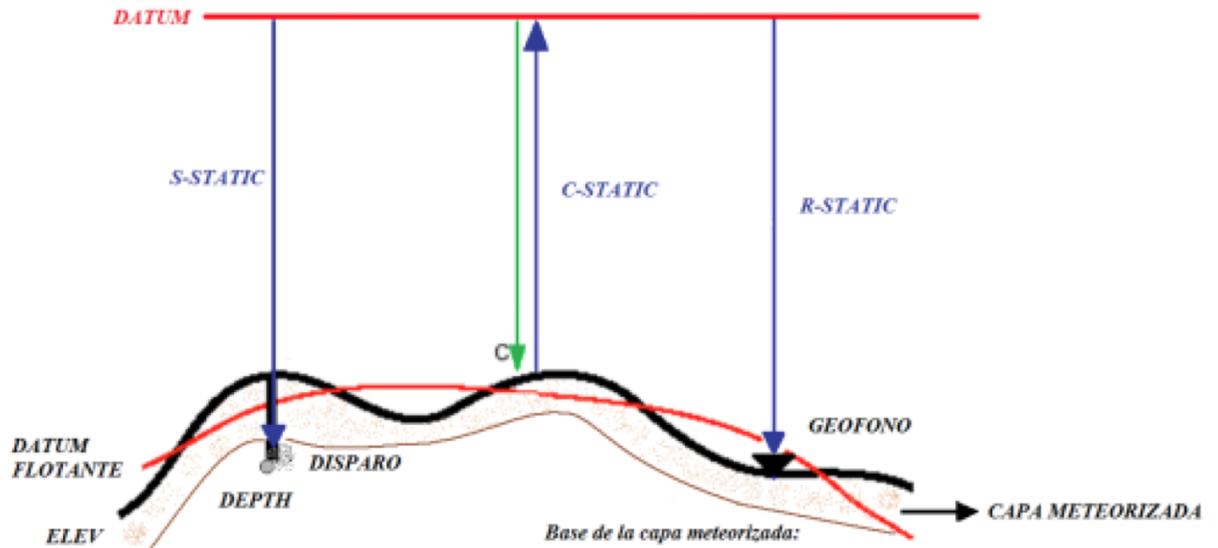


Figura 3: Referenciación del *datum* de referencia plano y del *datum* flotante, que evidencia un suavizado de la topografía. Tomado de [14]

### *Datum de referencia*

El *datum* de referencia representa el nivel sobre el cual se calcularán los tiempos de arribo para ser corregidos. El tema de *datum* sísmico es definido por Sheriff[20] como: “una superficie de referencia arbitraria, para la cual se minimiza topografía local y efectos cerca de la superficie. La determinación de tiempos sísmicos y velocidades son referidas a un *datum* plano como si las fuentes y geófonos hubieran sido localizados en éste y como si no existiera capa de baja velocidad”. La Fig. 3 muestra la referenciación del *datum* para una topografía irregular, donde se evidencia el reposicionamiento de fuentes y receptores. El espacio comprendido entre la superficie y el *datum* es llenado con una velocidad de reemplazamiento, el cual debe ser un valor promedio y cercano al valor de la capa ubicada bajo la capa meteorizada. Al emplear una velocidad de reemplazamiento se asume que los efectos de estructuras en tiempo son removidos de manera consistente.

### *Datum flotante*

Es el *datum* [3] resultante del suavizado de la superficie, el cual es usado para realizar las correcciones estáticas y para suavizar la superficie irregular causada por la topografía. Este datum se requiere para diferentes etapas del procesamiento como por ejemplo en el análisis de velocidad. Los procesos que se realizan a nivel del punto de disparo común (CDP) requieren que las estáticas calculadas para disparos y receptores sean proyectadas al CDP. Es un datum intermedio sobre el cual se efectúan cálculos de corrección en tiempo de las trazas sísmicas, sin embargo siempre es necesario llevar los datos a un datum final plano, que será la superficie inmediatamente posterior a la corrección encargada de mover o reposicionar las trazas sísmicas.

Después de determinar la ubicación del datum de referencia se realiza el ajuste de tiempo por separado en los dominios del disparo, del receptor y del CDP, como se muestra en la Fig. 3. Los cálculos que se realizan para determinar el valor de la estática en cada dominio se determinan al efectuar las siguientes ecuaciones:

$$s - static = \frac{datum - esp + prof}{vel_{rep}}, \quad (1)$$

$$r - static = \frac{datum - e_{rec} + prof}{vel_{rep}} + uphole, \quad (2)$$

$$c - static = \frac{datum - f - datum}{vel_{rep}}, \quad (3)$$

donde

s-static = estática en el dominio del disparo,

esp = elevación de la fuente,

prof = profundidad de la fuente,

vel-rep = velocidad de reemplazamiento,

r-static = estática en el dominio del receptor,

e-rec = elevación del geófono o receptor,

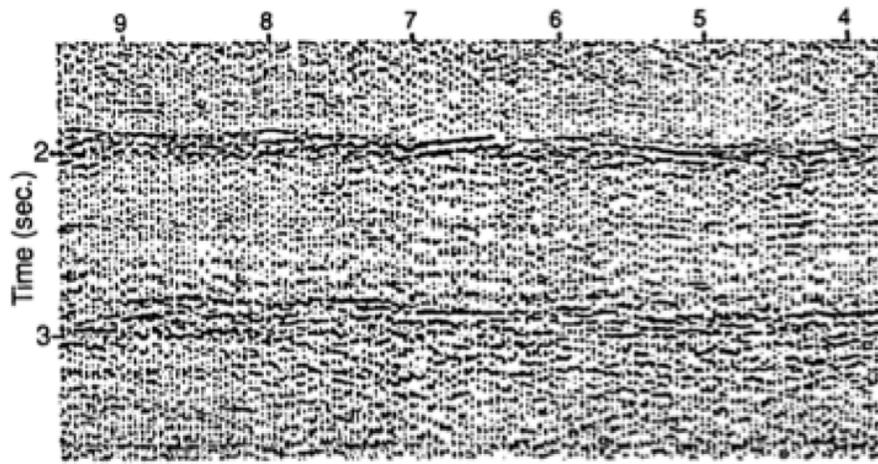
uphole = tiempo que tarda la onda desde la base de la fuente hasta la superficie,  
c-static = estática en el dominio del CDP. Lleva las trazas entre el Datum y el Datum flotante,  
datum = nivel de referencia plano,  
datum-f = datum flotante, que representa la curva suavizada promedio de la elevación.

Algunos resultados obtenidos después de aplicar correcciones estáticas se muestran la Fig. 4. En la parte (a) se observa una imagen apilada sin corrección de estáticas, y en la parte (b) se observa la imagen apilada después de haber aplicado las correcciones estáticas, se evidencia la resolución de la imagen y la continuidad de eventos.

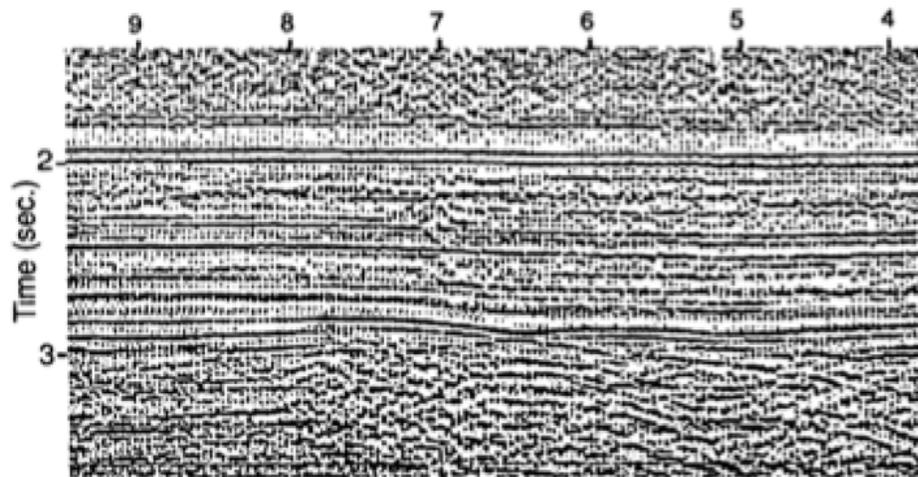
## 1.2. Métodos para corregir estáticas

Existen diferentes métodos para llevar a cabo las correcciones en los tiempos de arribo de las trazas sísmicas, algunos de estos métodos se basan en los tiempos verticales de pozo, denominado: *Uphole – based statics* los cuales consisten en obtener información en puntos discretos a lo largo de la línea de datos sísmicos, en este caso es necesario interpolar la información entre varios puntos de control. Este método representa la mejor forma de llevar a cabo la corrección de estáticas ya que se tiene información de la primer capa del subsuelo con medidas factibles tomadas directamente del pozo.

Otros métodos se basan en calculos de refracción sísmica para determinar, por medio de primeros arribos de las ondas primarias, los tiempos de retardo de las ondas que pasan por la capa de baja velocidad. Estos métodos son denominados *First – Break Statics* y hacen parte de los más comunes de corrección de estáticas especialmente cuando se usan fuentes en superficie. Por otro lado existen métodos que se basan en continuar el campo de onda hacia arriba o hacia abajo entre dos superficies arbitrarias, denominados *Datuming Methods* los cuales se basan en extrapolación del campo de onda y emplean diferentes técnicas.



(a)



(b)

Figura 4: Imagen apilada de una línea sísmica real 2D, en el panel *a* se presenta la línea sísmica procesada sin correcciones, y en el panel *b* se presenta la misma línea después de haber realizado las correcciones. Tomado de [10]

### 1.2.1. Métodos basados en tiempos de refracción sísmica

Para hablar de los métodos que se basan en refracción sísmica es necesario hablar primero acerca del método de refracción. La refracción es definida como un fenómeno ondulatorio en el cual la propagación de las ondas cambia sus características debido al cambio de propiedades del medio. En sísmica ocurre cuando la onda pasa de una capa de baja velocidad a otra con diferente velocidad, haciendo que el rayo se desvíe. Si se genera un impacto en la superficie o cerca de la superficie, se generará un frente de onda con múltiples trayectorias; sin embargo los receptores solo recibirán información de tres tipos de eventos sísmicos: la onda directa, la cual se propaga por la superficie desde la fuente hasta el receptor, la onda reflejada que proviene de una interfase en la que se produjo el fenómeno de reflexión y la onda refractada al incidir con un ángulo crítico genera un ángulo de refracción de  $90^\circ$ , la cual se propaga finalmente con la velocidad del medio de mayor velocidad en un tiempo mínimo. Las primeras llegadas de energía sísmica desde una fuente hasta un detector siempre representa la onda directa y la onda refractada.

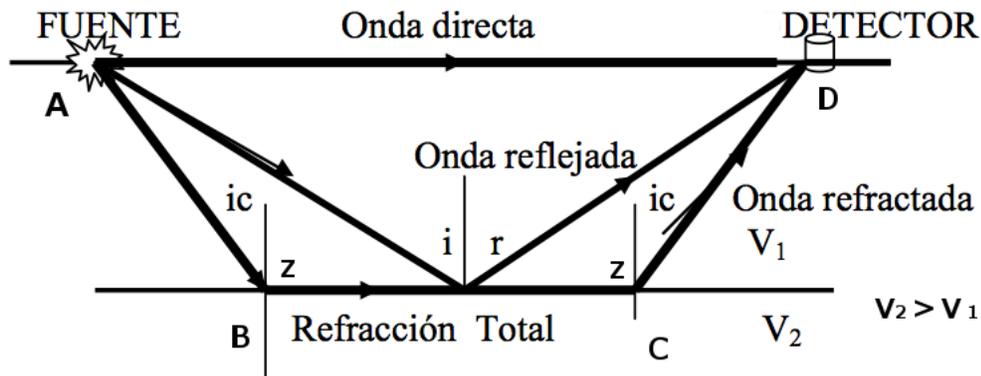


Figura 5: Trayectoria de los rayos para la onda directa, onda reflejada y onda refractada, tomado de [14]

En la Fig. 5 se ilustra la trayectoria de las ondas generadas en un medio con contraste de velocidades. La onda directa viaja horizontalmente a través de la capa superior desde el punto A hasta el punto D con una velocidad  $V_1$ ; la onda refractada viaja a través de la primer capa del

subsuelo y regresa a la superficie con una velocidad  $V_1$  a lo largo del trayecto del punto AB y CD que ha sido críticamente refractada debido al alto contraste de velocidades, existirá un ángulo tal que la trayectoria del rayo cambiará y será críticamente refractado, éste ángulo es llamado ángulo crítico  $ic$ , a partir del cual el rayo viaja a través de la interface entre B y C con la mayor velocidad, es decir, la velocidad de la capa inferior  $V_2$ . Luego el tiempo que tardará la onda refractada será menor, y en algunos casos estas ondas llegarán primero, que las ondas directas, a superficie ya que estas ondas viajarán con la velocidad de la capa inferior a la capa meteorizada, luego el tiempo que tarda la onda refractada en viajar por todo el trayecto ABCD, será el tiempo que tarde la onda en pasar por la primer capa, es decir el trayecto AB y CD con velocidad  $V_1$ , mas el tiempo que tarda en el trayecto BC con velocidad  $V_2$ , lo cual se describe en la siguiente fórmula, donde el tiempo AB y el tiempo de CD son iguales:

$$t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} = \frac{z}{v_1 \cos ic} + \frac{x - 2z \tan ic}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cos ic}. \quad (4)$$

Según la ley de Snell

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2}; \quad (5)$$

y teniendo en cuenta que la onda será críticamente refractada con un ángulo de  $90^\circ$ , y considerando que el  $\sin 90^\circ = 1$  se tiene que:

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1}{v_2} = \sin ic = \frac{v_1}{v_2}. \quad (6)$$

Luego la expresión de arriba, considerando que  $\tan ic = \sin ic / \cos ic$  y reemplazando en la ecuación 4, puede ser expresada de la siguiente forma:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \cos ic}{v_1} = \frac{x}{v_2} + t_i, \quad (7)$$

donde  $t_i$  representa el tiempo de retardo que experimenta la onda sísmica al pasar por la capa de baja velocidad, este  $t_i$  representa el tiempo del rayo al bajar desde el punto A hasta el punto B, y el tiempo que tarda en subir desde el punto C hasta el punto D.

### *Metodo Delay Time*

Presentado por primera vez por Barry, es un método que se utiliza para el análisis de datos de refracción sísmica [11], donde se calculan las primeras llegadas de cada traza encontrando las velocidades de la primer capa consolidada por cada zona, y restando los tiempos de tránsito para esta capa, estimando un espesor para la capa meteorizada y empleando una velocidad de reemplazo. En la Fig. 6, la suma de los tiempos de las trayectorias de los rayos  $AB$  y  $BC$  menos los tiempos de la trayectoria  $AC$ , se emplearán para determinar los tiempos de retardo en la posición de la fuente  $B$ .

Para determinar los tiempos de retardo que experimentan las ondas debido al efecto de topografía y capa meteorizada es necesario determinar el tiempo de viaje de las ondas primarias llegando a una distancia  $x$ , este tiempo está dado por la fórmula (7), donde el intercepto  $t_i$  puede ser considerado como la composición de los dos tiempos de retardo, resultantes de la capa superior para cada uno de los rayos. Así el tiempo de retardo es definido como la diferencia en tiempo entre el trayecto  $AB$ , a través de una capa superior con velocidad baja y el tiempo que debería requerirse para que el rayo viaje a lo largo del trayecto  $BC$ , con una velocidad de la capa debajo de la superior. Luego la ecuación 4 muestra que el tiempo total de viaje, es el tiempo que tardaría la onda en viajar a una distancia  $x$  con velocidad  $2 (v_2)$ , mas el tiempo que tardaría en subir y bajar desde el punto de disparo y el punto de receptor con una velocidad de la capa superior meteorizada. Es decir, una velocidad baja y variable lateralmente. Estos dos extra componentes son los denominados tiempos de retardo del disparo y el receptor.

Teniendo en cuenta la Fig. 6 estos tiempos de retardo pueden ser calcu-

lados de la siguiente manera:

$$dT = \frac{Z \cos \theta}{v_1} = \frac{h_s}{V_1 \cos i_c} - \frac{h_s \tan i_c}{V_2} = \frac{h_s \cos i_c}{V_1}. \quad (8)$$

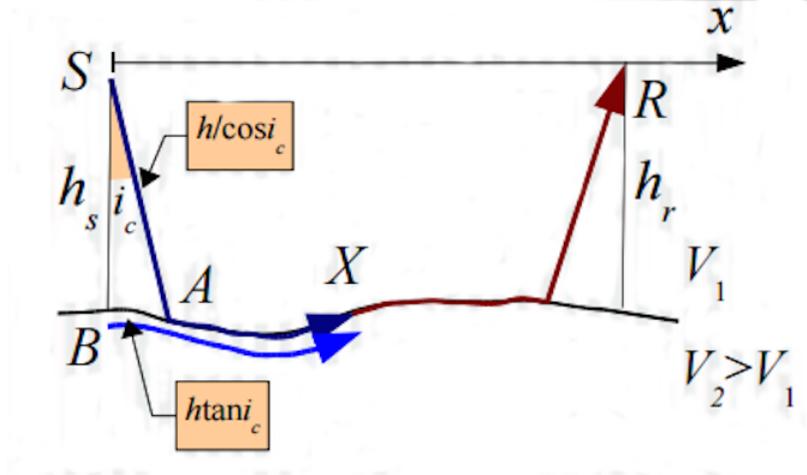


Figura 6: Tiempo de retardo desde  $S$  hasta  $R$ , donde  $S$  es posición de fuente y  $R$  posición del receptor. Tomado de [13]

### 1.2.2. Metodos basados en la continuacion del campo de onda

Existen dos formas de corregir los tiempos de arribo de las ondas en los datos sísmicos [2], uno de estos es de tipo estático y representa el movimiento de las trazas sísmicas hacia arriba o hacia abajo teniendo en cuenta un datum de referencia, y el otro método de tipo dinámico considera la continuación de la propagación de las ondas entre dos superficies arbitrarias. Existen algunos métodos que se basan en la propagación del campo de onda, entre los cuales se encuentran: One Way Wave Equation Extrapolation, Wavefield Datuming, Interferometric Datuming[11], Wave Equation Datuming[19]. Para el presente trabajo se empleó el método WED, el cual será explicado a continuación.

#### *Wave Equation Datuming*

Consiste en determinar el campo de onda de salida sobre un datum de referencia específico, teniendo en cuenta unos datos de entrada del regis-

tro de los tiempos, velocidad, ángulo de propagación sobre una superficie determinada, normalmente la superficie real de adquisición sobre la topografía.

Las técnicas para corregir el problema causado por la irregularidad de la topografía y las variaciones laterales de velocidad debido a la presencia capa meteorizada, se basan en aproximaciones de ángulo de emergencia normal, sin embargo cuando la velocidad cercana a la superficie es comparable con la velocidad del subsuelo y los ángulos emergentes del parámetro de rayo son grandes, estas aproximaciones estáticas no son adecuadas.

El concepto de *datuming* de la ecuación de onda fue presentado por primera vez por Berryhill, para aplicaciones después del (stack) apilamiento, y luego fue aplicado a pre apilamiento. Esta técnica difiere del datuming de las estáticas convencionales debido a que elimina las distorsiones causadas por la topografía de manera consistente empleando la propagación del campo de onda, además de que posiciona las reflexiones sísmicas tanto lateral como verticalmente (en respuesta a observaciones de tiempos profundos).

El procedimiento matemático, implementado en los algoritmos para realizar el procesamiento de los datos teniendo en cuenta el datuming de la ecuación de onda, se basa en el enfoque de Kirchhoff, teniendo en cuenta que el campo de onda se basa en el principio de Huygens, donde cada geófono se sustituye por una pequeña fuente que produce la señal sísmica previamente registrada en ese lugar.

La ecuación que emplea *wave equation datuming* para el cálculo de las estáticas, es la siguiente:

$$P_j(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int dA_0 \frac{\cos \theta}{r^2} \left[ P_i(x_0, z_0, \tau_{ij} - \frac{r}{c}) + \frac{r}{c} \frac{\partial}{\partial t} P_i(x_0, z_0, \tau_{ij} - \frac{r}{c}) \right], \quad (9)$$

donde  $P_j$  es el escalar de la propagación del campo de salida con velocidad  $c$ ,  $\tau_{ij} = r/c$  es el tiempo usado para viajar desde  $P_i(x_0, y_0, z_0)$  en

el datum de entrada hasta el punto  $P_j(x, y, z)$  en el datum de salida. El objetivo es calcular  $P_j$  para todos los tiempos en los puntos  $(x, y, z)$  sobre una superficie infinita  $A_0$ . Este proceso se aplica a cada grupo de disparos y luego a cada grupo de receptores, extrapolando fuentes y receptores por separado.

El método consiste en suponer que en vez de reflectores, la tierra contiene un gran número de fuentes de pequeños impulsos distribuidas uniformemente sobre lo que formalmente se llama superficie reflectora, y que todas estas fuentes son activadas al mismo tiempo en un  $t = 0$  y la sección sísmica es el resultado de un gran número de detectores grabando simultáneamente en separados canales o trazas. Desde este punto de vista, para el único tiempo  $t = 0$ , un frente de onda emerge paralelo a cada superficie, y la trayectoria del rayo emerge perpendicular a la superficie y al frente de onda. Los tiempos de llegada serán computados considerando solamente los frentes de onda y trayectorias de rayos que representarán correctamente el viaje de ida y vuelta si se reducen a la mitad todas las velocidades. Algunos aspectos del comportamiento de las amplitudes en una sección apilada no son consistentes desde este punto de vista, sin embargo, los tiempos de llegada que resultan son perfectamente aproximados. *WED* provee la capacidad de operar simultáneamente en múltiples trazas para mover de manera lateralmente coherente la señal de manera consistente con la teoría de la propagación de onda. Luego estos procesos de extrapolación dependen de la inmersión en el tiempo y por lo tanto son sensibles al ángulo de incidencia del frente de onda y la trayectoria del rayo sobre un datum como se muestra en la Fig. 7

## 2. Flujo de procesamiento de datos sísmicos

Consiste en llevar a cabo una serie de etapas con el fin de mejorar las señales sísmicas obtenidas durante el proceso de adquisición y reposicionar los eventos sísmicos en su posición correcta en el espacio. Las etapas del procesamiento de datos sísmicos terrestres son: 1) pre-procesamiento, que comprende los procesos de: carga de datos, asignación de geometría, aplicación de filtros, ganancias, corrección de estáticas, 2) apilamiento, que comprende los procesos de: análisis de velocidad y apilamiento, 3) migración pre apilado, 4) post apilamiento, que comprende los procesos de migración, apilado final.

Durante el procesamiento se aplica la secuencia básica descrita en la Fig. 8 con el objetivo de darle el adecuado tratamiento a los datos sísmicos crudos, eliminando el ruido y de esta manera obtener una imagen apilada que pueda ser fácilmente interpretada. Para llevar a cabo el procesamiento sísmico es necesario aplicar rutinas computacionales, y aunque no existe una correcta y definitiva secuencia de procesamiento para un conjunto de datos, es necesario introducir algunas etapas durante la manipulación de los datos, dependiendo de la forma en que fueron grabados, las condiciones del campo, la organización y el contenido, factores que pueden variar dependiendo la zona y la forma en que fueron adquiridos los datos. Para llevar a cabo el procesamiento sísmico, es necesario realizar la etapa de adquisición de datos. En la adquisición sísmica

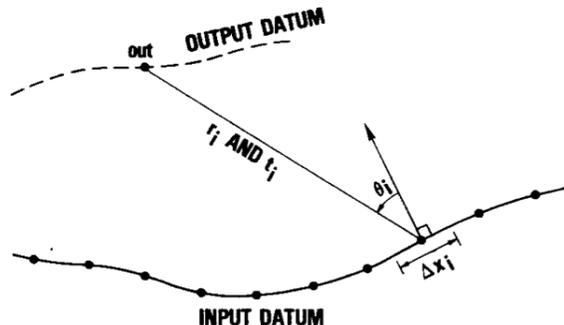


Figura 7: Trayectoria del rayo y ángulo emergente entre el datum de entrada y datum de salida. Tomado de [2]

se usan fuentes y geófonos. Las fuentes se encargan de emitir la señal a través de frentes de onda que penetran en el subsuelo y los geófonos se encargan de captar la señal por medio del registro de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas.

Muchas veces es necesario volver a procesar datos pues las etapas que se efectúan para obtener las imágenes sísmicas apiladas y migradas no dan como resultado secciones que evidencien continuidad de reflectores, una de las principales causas son las estáticas, responsables de distorsionar la posición de los reflectores, para lo cual se hace necesario corregir éste efecto para ubicar los reflectores en sus correspondientes fases de tiempo y así lograr la coherencia en la geometría de las hipérbolas que habrá que horizontalizar en la etapa de análisis de velocidad. Si las correcciones estáticas no se efectúan adecuadamente, las trazas en los arreglos de punto medio común (CMP Gathers) no serán apiladas correctamente. La correcta determinación de las correcciones estáticas es uno de los más importantes problemas que deberían ser resueltos y superados en el procesamiento sísmico terrestre[3], que consiste en manipular los datos sísmicos adquiridos en campo por medio del uso de algoritmos y parámetros, para mostrar una imagen del subsuelo donde pueda determinarse la estructura, las capas y las rocas que lo componen.

### **2.1. Consideraciones sobre el flujo de trabajo y procesamiento de los datos**

La metodología empleada para realizar la comparación de las técnicas para corregir estáticas y un adecuado procesamiento de los datos es la siguiente: generación de datos sintéticos que simulan las capas del subsuelo terrestre, teniendo en cuenta diferentes geometrías en la base de la capa meteorizada, con variaciones de velocidad y espesor y algunos datos que simulan topografía. Después se procede a realizar el procesamiento de los datos generados, empleando dos diferentes técnicas en la etapa de corrección de estáticas. Una de estas técnicas fue ligeramente modificada en su planteamiento original. Luego se procede a realizar el procesamiento de los datos reales para una línea sísmica 2D con zonas



Figura 8: Flujo convencional de procesamiento sísmico.

planas y zonas topográficas, empleando las dos técnicas para corrección de estáticas. Finalmente se evalúan y comparan los resultados, teniendo en cuenta resolución de las imágenes, continuidad de eventos someros y profundos. Todo lo anterior se verá reflejado y expresado en los modelos presentados a continuación.

## 2.2. Modelos Sintéticos Generados

Para generar un modelo del subsuelo terrestre, es necesario conocer las velocidades de las capas, densidades y estratigrafía; información necesaria para determinar un sismograma sintético, el cual está compuesto por una ondícula convolucionada con el perfil de reflectividad de la tierra.

Modelo	Nx	Nz	dh	Fq	dt	Ox	Om	ds	dg	Ng	Ns
1	10km	2km	2	50	0.3ms	1km	6.25m	12.5m	12.5m	160	160
2	10km	2km	2	37.5	0.3ms	1km	6.25m	12.5m	12.5m	160	160
3	10km	2km	2	37.5	0.3ms	1km	6.25m	12.5m	12.5m	160	160
4	10km	2km	2	37.5	0.3ms	1km	6.25m	12.5m	12.5m	160	160
5	1km	1km	2	45.8	0.3ms	0.3km	0.5m	2.5m	2.5m	240	240

Cuadro 1: Descripción de parámetros de adquisición de los datos sintéticos 2D para los cinco modelos generados, donde Nx= dimensiones del modelo en x, Nz= dimensiones en z, dh= tamaño de malla, Fq= frecuencia máxima del modelado, dt=paso de tiempo, Ox= offset máximo, Om= offset mínimo, ds= espaciamento entre fuentes, dg= espaciamento entre geófonos, Ng= número de geófonos, Ns= número de fuentes.

Para llevar a cabo la simulación y generación de datos sintéticos existen varias metodologías: trazado de rayos, diferencias finitas, elementos finitos. Para el presente trabajo se generaron los datos sintéticos empleando diferencias finitas 2D, a través del software Madagascar[6] con el script que se presenta en la Fig. 9 realizado por el *Ms.C Herling Gonzalez*, funcionario del Instituto Colombiano del Petróleo, adaptado por la autora para los diferentes modelos que se muestran en las Figs. 10-12. El modelado se hizo empleando el método de diferencias finitas centradas, con cuarto orden de aproximación.

Se diseñaron varios modelos del subsuelo terrestre, teniendo en cuenta dos parámetros importantes para abordar el problema, el primer parámetro fue incorporar en los modelos la presencia de la capa meteorizada con diferentes variaciones tanto de espesor como de velocidad, el segundo parámetro fue simular topografía abrupta para la adquisición de los datos. Los parámetros de adquisición que se tuvieron en cuenta para la generación de los modelos fueron los que se presentan en el tabla 1.

Teniendo en cuenta lo anterior, se generaron cuatro modelos sintéticos con diferentes geometrías en la base de la capa meteorizada, y un modelo que simula topografía abrupta, teniendo en cuenta variaciones de velocidad, con el fin de determinar en qué casos particulares el método de corrección de estáticas por *DT* funciona mejor que el método dinámico *WED*.

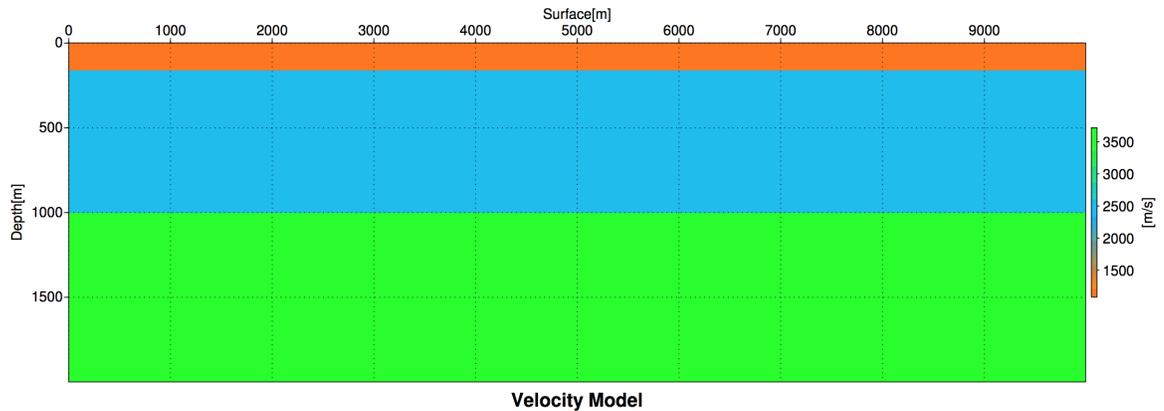
```

from rsf.proj import *
from math import *
#compila el codigo de modelado
exe=Program('acous-fdtd.c')
#parametros del modelado sismico
Nx=10000 #dimension del modelo
Nz=2000 #dimension del modelo
dh=2. #tamagno de malla
cmax=3600.
cmin=900.
Fq=cmin/(2*dh*6) #frecuencia central [Hz]
dt=dh/(cmax*sqrt(8/3.)) #paso de tiempo
dt=0.0003 #basado en la condicion de estabilidad
t0=1.0/Fq
timesteps=4000 #pasos de tiempo
#parametros de adquisicion Terrestre
Ox=1000 #offset maximo [m]
Om=6.25 #offset minimo [m]
ds=12.5 #intervalo entre disparos [m]
dg=12.5 #intervalo entre receptores [m]
Long=Nx*dh #logitud del modelo [m]
Lt=Ox*2 #longitud tendido [m]
Ng=int(Lt/dg) #numero de receptores
Ns=int((Long-Lt)/ds) #numero de disparos
## Initial Source location
Sx=Lt/2. #coordenadas del primer disparo [m]
Sz=6. #coordenadas en profundidad [m]
#genera la funcion ondicula
Flow('ricker',None,
    '''sfmath n1=%d d1=%g o1=%g
        output="(1-2*((%g*%g)^2)*((x1-%g)^2))*exp(-((%g*%g)*(x1-%g))^2)"
    '''%(timesteps,dt,0,pi,Fq,t0,pi,Fq,t0)
#genera datos disparo por diasparo
dfile={} #It's empty array and you can fill it with strings
gx={} #It's empty array and you can fill it with strings
gz={} #It's empty array and you can fill it with strings
for i in range(Ns):
    count = str(i).zfill(2) #creando un formato
    dfile[i] = 'shot-gather'+count
    gx[i]='Gx'+count
    gz[i]='Gz'+count
    ## ground Gathers/Receivers location
    Flow(gx[i],None, '''math n1=%d d1=%g o1=%g output="x1"
        ''' %(Ng,dg,(Sx+i*ds)-Lt/2.))
    Flow(gz[i],None, '''math n1=%d d1=%g o1=%g output="%g"
        ''' %(Ng,dg,0,Sz))
    #ejecuta el modelado sismico
    Flow(dfile[i],'ricker %s model/vp model/rho %s %s' %(exe[0],gx[i],gz[i]),
        '''./${SOURCES[1]} vel=${SOURCES[2]} rho=${SOURCES[3]}
            Rx=${SOURCES[4]} Rz=${SOURCES[5]}
            Sx=%1f Sz=%1f mkmov=0 skip=80
        '''%(Sx+i*ds,Sz))
    Flow('2ms-'+dfile[i],dfile[i],'sfwindow j1=7 ') #submuestrea a 2ms
Result('movie','''sfput label1="Depth" label2="Coordinates" unit2=m |title="Wave Propagation
End()

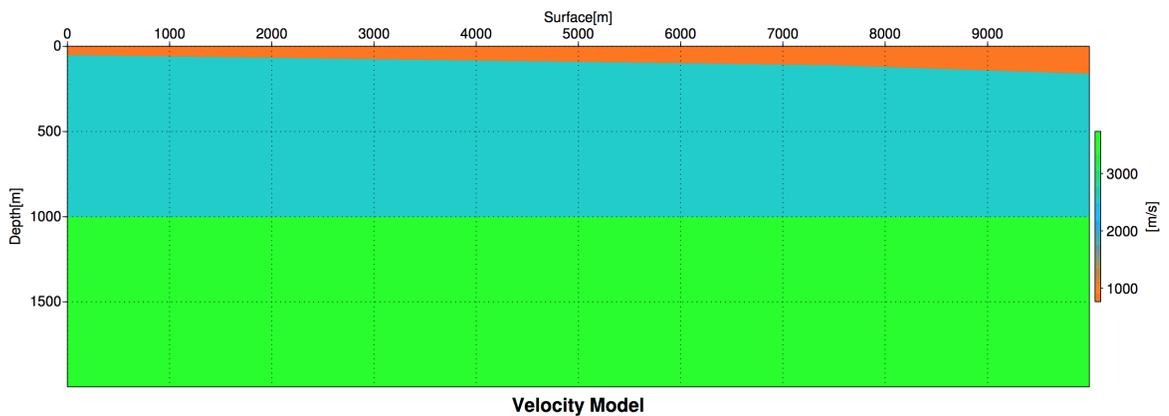
```

Figura 9: Captura de pantalla del script empleado para realizar la adquisición de los datos.

En las Figs. 10 -12 se muestran los modelos de velocidades 2D que se utilizaron para el modelado numérico de las propagación de las ondas:



(a) Modelo de capas planas, velocidades de las capas: primer capa 1200m/s, segunda capa 2500m/s y tercer capa 3600m/s.

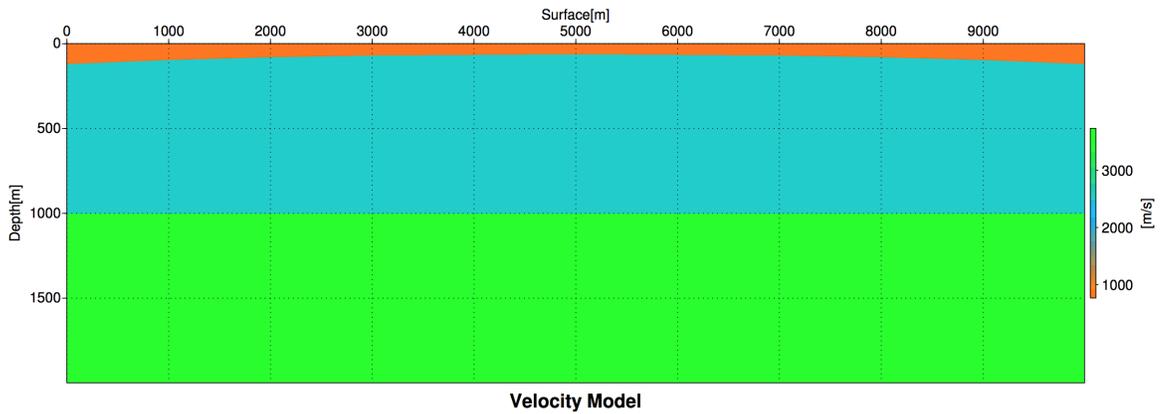


(b) Modelo de capas planas y capa meteorizada buzante, velocidades de las capas: primer capa 900m/s, segunda capa 2500m/s y tercer capa 3600m/s.

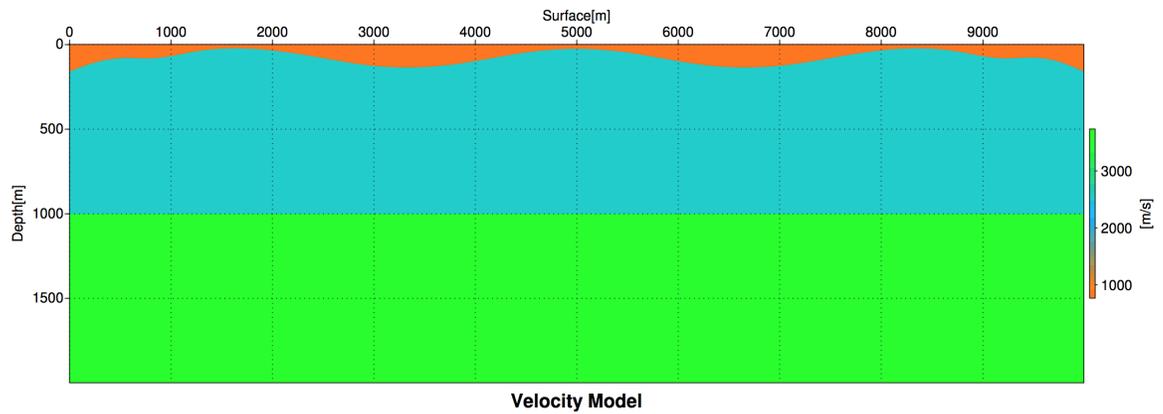
Figura 10: Modelos sintéticos 2D, para una capa meteorizada plana y una capa meteorizada buzante.

### 2.3. Procesamiento de Datos Sintéticos y Datos Reales

Para llevar a cabo el procesamiento de los datos sintéticos, se efectuó el procedimiento convencional que se muestra en la Fig. 8, comenzando por la asignación de la geometría, paso que consiste en relacionar las posiciones de fuentes y géofonos con los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, para asignarle una secuencia a las trazas sísmicas y poderlas manipular fácilmente. De igual forma, en este paso se agrupan las tra-



(a) Modelo de capas planas y capa meteorizada curva, velocidades de las capas: primer capa 900m/s a 1200m/s, segunda capa 2500m/s y tercer capa 3,600m/s.



(b) Modelo de capas planas y capa meteorizada sinusoidal, velocidades de las capas: primer capa 900m/s, segunda capa 2500m/s y tercer capa 3600m/s.

Figura 11: Modelos sintéticos 2D, con variaciones en la base de la capa meteorizada

zas por punto medio común, que es el punto situado a mitad de camino cuando una onda se propaga desde una fuente hasta un reflector y desde allí hasta un receptor. Luego de haber asignado la geometría y de haber organizado los datos por número de disparo de manera ascendente, se procedió a realizar las correcciones estáticas. Para esto fue necesario hacer el picado de primeros arribos como se observa en la Fig. 13, que consiste en seleccionar las trazas que corresponden a la onda directa y la onda refractada. Estas trazas contienen información referente a la primer capa del subsuelo necesaria para corregir su efecto en los datos sísmicos. Después de haber realizado el picado de primeros arribos, se procedió a calcular el espesor y velocidad de la primer capa del subsuelo. Para esto

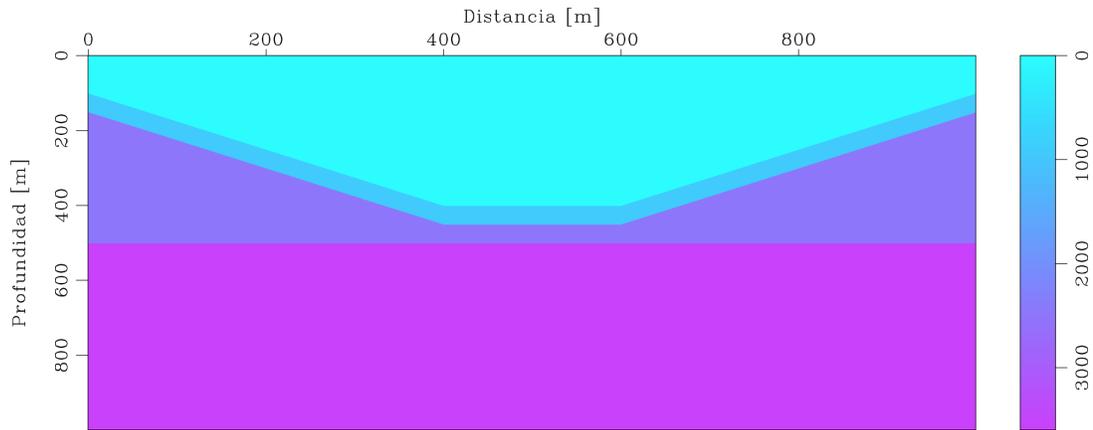


Figura 12: Modelo que simula topografía abrupta y capa meteorizada, velocidades de las capas: primer capa 1100m/s, segunda capa 2500m/s y tercer capa 3600m/s.

se empleó la técnica  $DT$ , por medio de la cual se calcula el valor de  $z$  de la fórmula (8), introduciendo un valor promedio de velocidad de reemplazamiento que corresponde al valor de la velocidad de la capa ubicada debajo de la capa meteorizada. Para el caso particular, en los 5 modelos la velocidad de la segunda capa fue 2500m/s. Con esta información, y un valor aproximado de la primer capa, el método calcula y reconstruye de manera iterativa la capa meteorizada. En las Fig.14-18 se presentan las imágenes de la reconstrucción de la capa meteorizada modelada por medio de la técnica  $DT$ . Para los 5 diferentes modelos sintéticos se realizaron 10 iteraciones al momento de calcular el espesor  $z$ , esto debido a que a partir de la decima iteracion la reconstruccion de la capa meteorizada no presentaba cambios. Se hicieron varias pruebas en las cuales se ejecutaron 2, 5, 7 y 10 iteraciones, dando como resultado que las primeras iteraciones no daban como resultado una buena aproximación al espesor real de la primer capa de los modelos, sin embargo a partir de la decima iteración, esta reconstrucción permanecería constante.

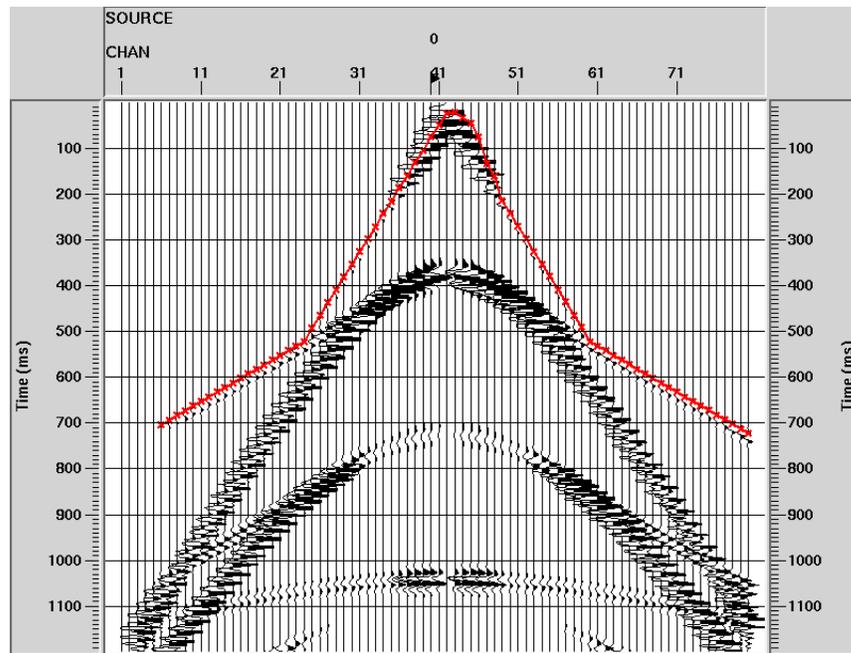


Figura 13: Picado de primeros arribos, la línea roja corresponde a los picados de la onda refractada y onda directa

:

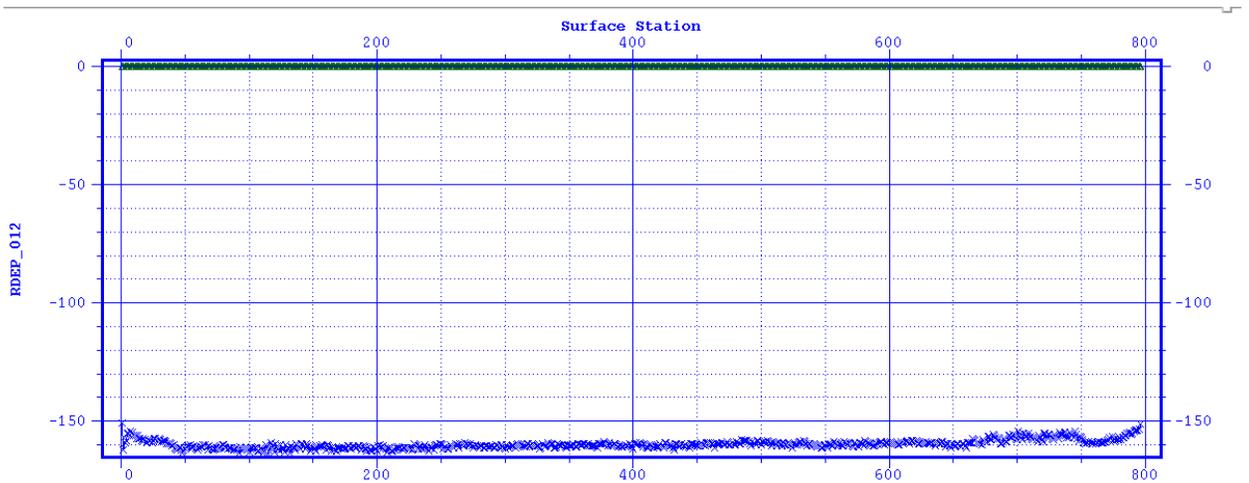


Figura 14: Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de  $DT$  para el modelo de capas planas, espesor calculado  $160m$  aproximadamente.

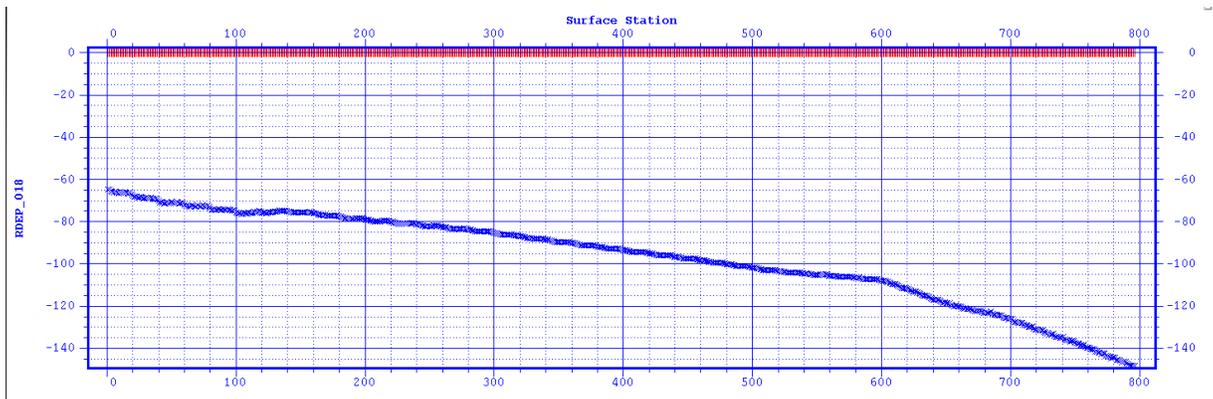


Figura 15: Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de  $DT$  para el modelo de capa meteorizada buzante, espesor calculado varía de  $60m$  a  $160m$  aproximadamente.

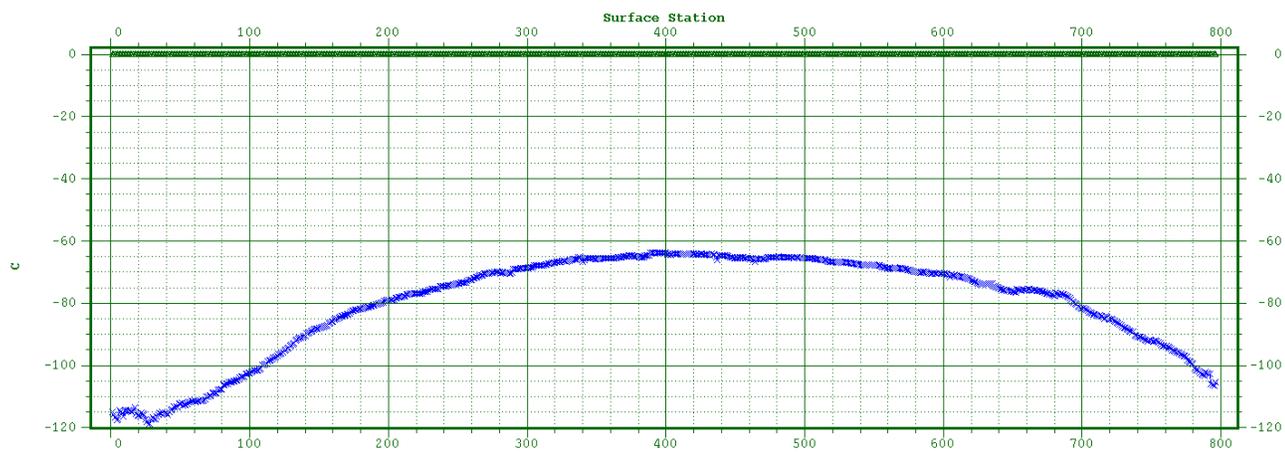


Figura 16: Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de  $DT$  para el modelo de capa meteorizada curva, espesor calculado varía de  $60m$  a  $120m$  aproximadamente.

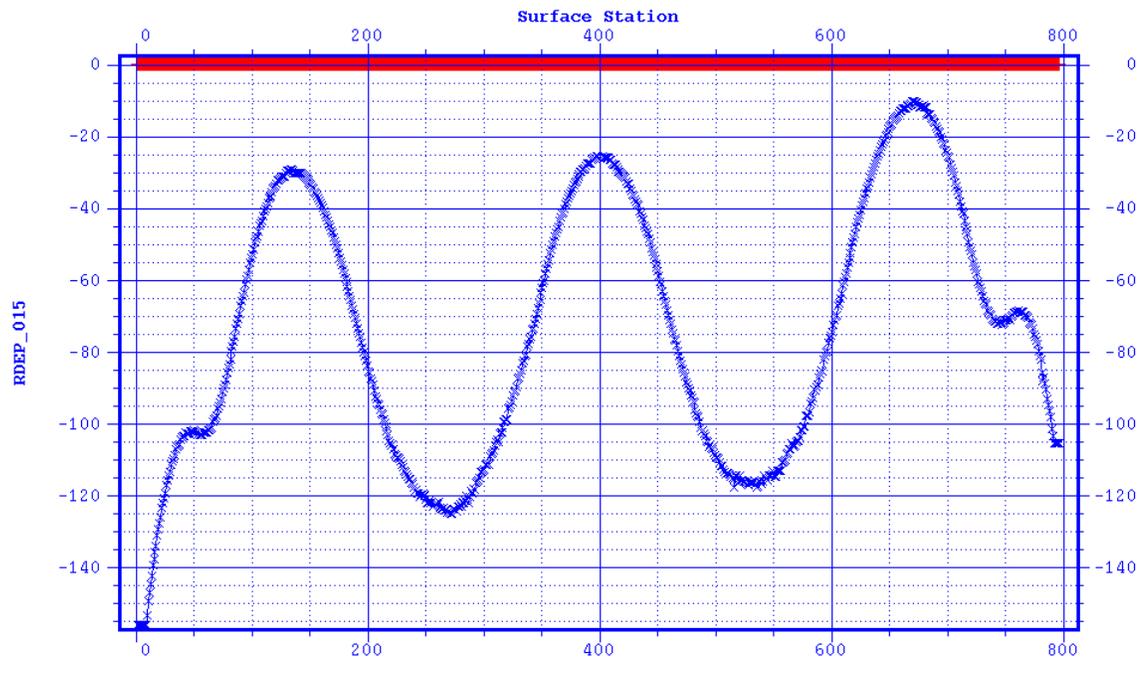


Figura 17: Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de  $DT$  para el modelo de capa meteorizada variable, espesor calculado varía de  $10m.$  a  $160m$  aproximadamente

A partir de las estimaciones resultantes de espesor y velocidad de la capa meteorizada para cada modelo, se efectuó la corrección de los datos. Primero, una corrección por estática de elevación, eligiendo un *datum* de referencia sobre el máximo nivel de elevación de la topografía y luego una corrección estática por capa meteorizada. Para la corrección por elevación se asignó una velocidad de reemplazamiento cercana a la de la capa meteorizada, para los datos sintéticos se conoce este valor el cual es  $900m/s$ . Para la corrección por refracción se aplicaron las estáticas calculadas por medio del método  $DT$ , proceso que consiste en calcular los tiempos de retardo que experimentan las ondas al pasar por la capa de baja velocidad. Seguido a esto, se procedió a realizar las correcciones empleando el método dinámico ( $WED$ ). Para esto se modificó la metodología normal empleada por el software PROMAX[8], la cual realiza el cálculo de las estáticas teniendo en cuenta un *datum* de referencia plano, por encima o por debajo de la capa meteorizada; sin considerar el espesor particular ni la geometría específica de la base de esta capa, afectando así, la calidad de la imagen sísmica resultante.

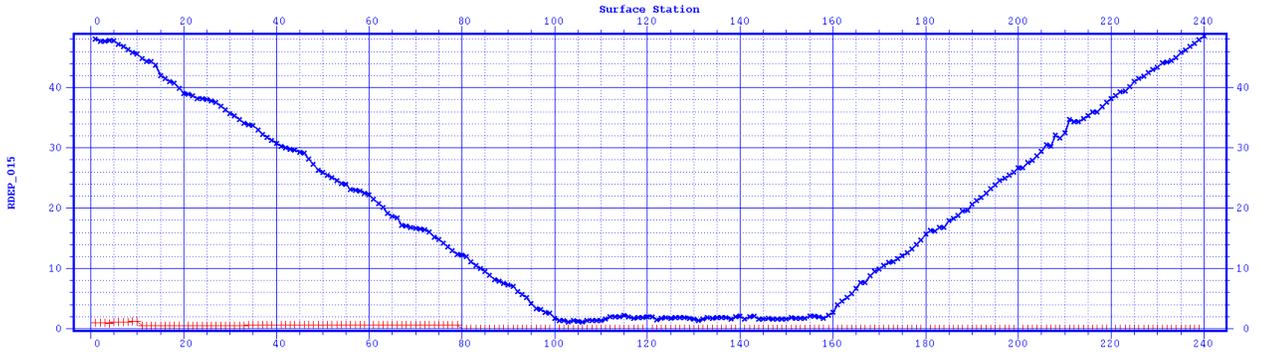


Figura 18: Reconstrucción de la capa meteorizada por medio de  $DT$  para el modelo con variaciones topográficas, espesor calculado varía de  $2m$  a  $50m$  aproximadamente.

La metodología propuesta se llevo a cabo para cada fuente y cada géofono por separado para realizar la propagación del campo de onda para cada disparo teniendo en cuenta la profundidad de la capa meteorizada y la localización en superficie sobre la topografía de cada fuente y receptores. De esta manera, se procede a realizar la corrección por medio de la propagación del campo asignándole como *datum* de entrada la superficie real de adquisición sobre topografía y el *datum* o plano de referencia sobre el cual se calculará el campo de salida la base de la capa meteorizada, como se muestra en la Fig. 19.

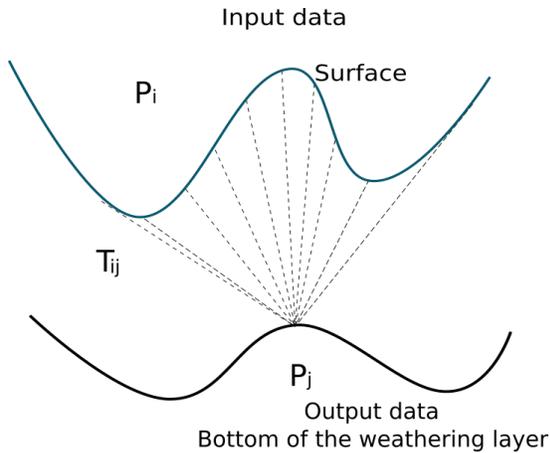


Figura 19: Propagación del campo de onda desde la superficie de entrada sobre topografía hasta la base de la capa meteorizada. Donde  $P_i$  es el campo de entrada,  $P_j$  campo de salida y  $T_{ij}$  tiempo de viaje.

Después de haber reubicado las fuentes y los receptores sobre un nue-

vo *datum*, se llevaron los datos hasta un *datum* plano ubicado sobre la mayor elevación por medio de una corrección estática para la fuente y el receptor teniendo en cuenta una velocidad de reemplazamiento. Una vez calculadas las estáticas para llevarlas a un *datum* plano, se calculó una estática en el dominio CMP para llevar los datos a un *datum* flotante mediante el promedio de la estática total de las trazas dentro de cada CMP. Se planteó la metodología debido a que *WED* no tiene en cuenta la capa meteorizada, puesto que fue diseñado para corregir las variaciones en la topografía.

De acuerdo con lo expuesto, se realizó el análisis de velocidad para cada modelo. Después se realizó un primer apilado bruto, teniendo en cuenta el análisis de velocidad sin correcciones estáticas, para determinar el efecto de la capa meteorizada sobre los datos sísmicos en casos donde no se realizan las correcciones, o se realizan de manera incorrecta. Consecuentemente, se realizó el apilado teniendo en cuenta el análisis de velocidad, donde se consideraron las estáticas de refracción tanto para el análisis como para el apilado. Después se efectuó el mismo procedimiento pero esta vez aplicando el método dinámico para corrección de tiempo de arribo de las trazas sísmicas. Finalmente, se llevo a cabo la migración en tiempo post apilado, proceso que consiste en desplazar los eventos inclinados en una línea sísmica desde sus localizaciones aparentes hasta sus localizaciones verdaderas en el tiempo. Los flujos empleados para llevar a cabo el procesamiento de los datos se describen a continuación.

Lo primero que se lleva a cabo es cargar los datos en la herramienta PROMAX[8], de acuerdo al proceso que se describe en las Figs. 20 y 21. El cual consiste en ingresar el archivo *SEGY*, extraer los archivos de la base de datos y finalmente generar un disco de datos de salida. Este proceso se realiza ya que se debe cambiar el formato de lectura de los datos de entrada para que tengan el formato empleado por el software promax. La herramienta *ensable redefine*, se emplea para redefinir el numero de trazas de los datos, esto se llevo a cabo en los datos sinteticos. La herramienta *trace header math*, se emplea para definir la geometria de adquisicion de los datos, asignandole posicion de fuentes y geofonos, asi

como la separacion entre estos, y la secuencia ascendente de las fuentes. Una vez asignados los anteriores parametros de adquisicion en los datos se procede a extraer la base de datos y finalmente generar un disco de datos que continene el formato empleado por el software PROMAX.

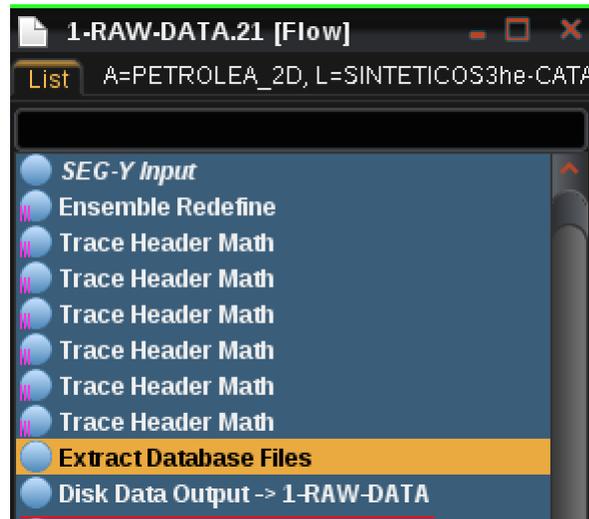


Figura 20: Captura de pantalla de PROMAX para carga de datos.

Después de cargar los datos, se procede a asignar la geometría como se muestra en la Fig. 22, para esto se seleccionan los datos que se cargaron anteriormente empleando la herramienta *disk data input*, después se procede a carga la geometría empleando la herramienta *inline geometry header load* y finalmente se genera un nuevo disco de datos de salida con la geometría asignada, donde los datos estarán ordenados por punto medio a profundidad común CDP.

El paso siguiente consiste en calcular las estáticas por medio de refracción, para esto se asignaron los parámetros que se muestran en la Fig. 25. Se selecciona el archivo que contiene el picado de primeros arribos, al igual que la separación entre fuentes y geófonos que se tendrá en cuenta para la selección de las trazas con información del picado de primeros arribos. Se especifica la velocidad en el tiempo cero, es decir la velocidad de la superficie cercana, para el caso de los modelos sintéticos 900m/s. El datum final de elevación, que se tendrá en cuenta para la corrección.

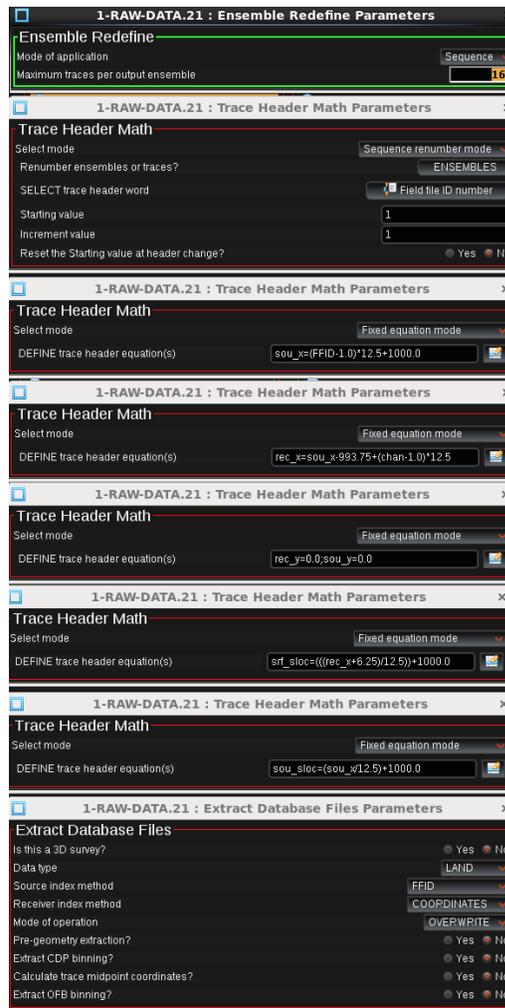


Figura 21: Captura de pantalla de PROMAX para la asignación de parámetros en el proceso de carga de datos.

La velocidad de reemplazamiento y número de iteraciones, es decir, el número de veces que la herramienta realizará el proceso de cálculo de espesor  $Z$ , para realizar las correcciones y determinar el espesor de la capa meteorizada.

Después de calcular el espesor de la capa meteorizada, se procede a realizar la corrección empleando  $WED$ , para realizar esta corrección se empleó en cada flujo de proceso el datum como la diferencia entre la elevación y la profundidad de base de la capa meteorizada para cada fuente y cada geófono por separado. En el intervalo de localización de superficie se



Figura 22: Captura de pantalla de PROMAX para asignación de geometría a los datos.

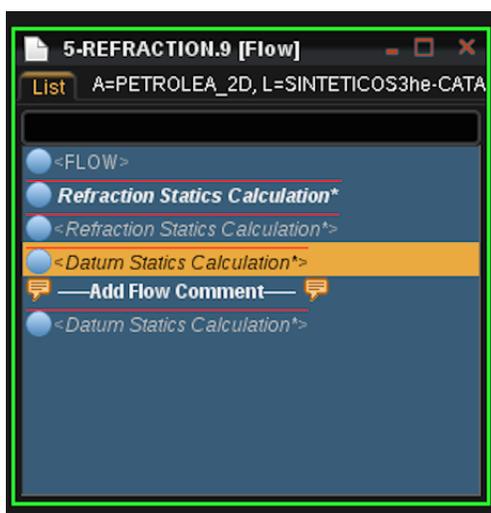


Figura 23: Captura de pantalla de PROMAX para calculo de las estáticas por medio de refracción.

empleo el doble del CDP, que corresponde al espaciamiento entre fuentes, la frecuencia máxima de cada modelo y la velocidad de reemplazamiento como la velocidad de la primer roca consolidada.

Seguido a esto se procede a realizar el picado de velocidades, en el cual se efectúa el flujo descrito en la Fig. 26 donde se ingresan los datos, se hace un pre cómputo de análisis de velocidades y se genera un disco de datos de salida con la información generada. En este proceso se seleccionan las

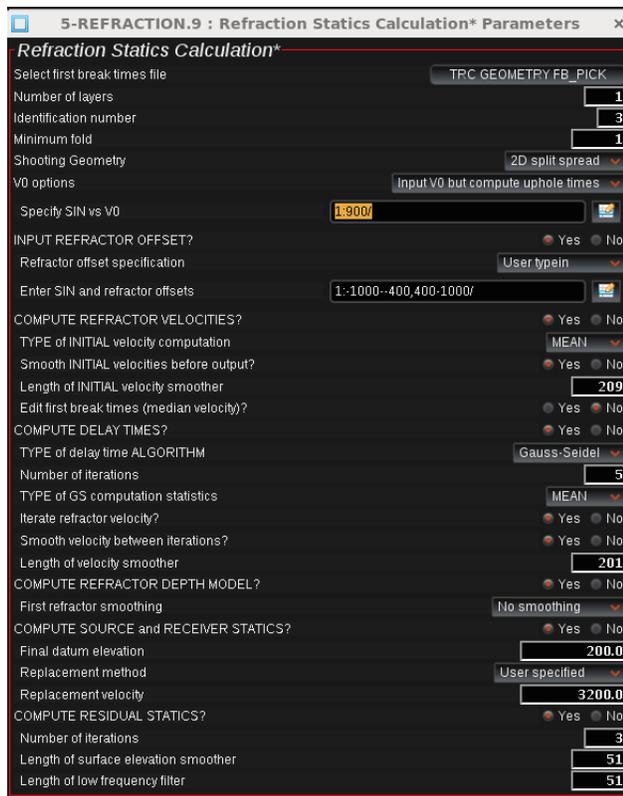


Figura 24: Captura de pantalla de PROMAX la asignación de parámetros en el proceso para calculo de las estáticas por medio de refraccion.

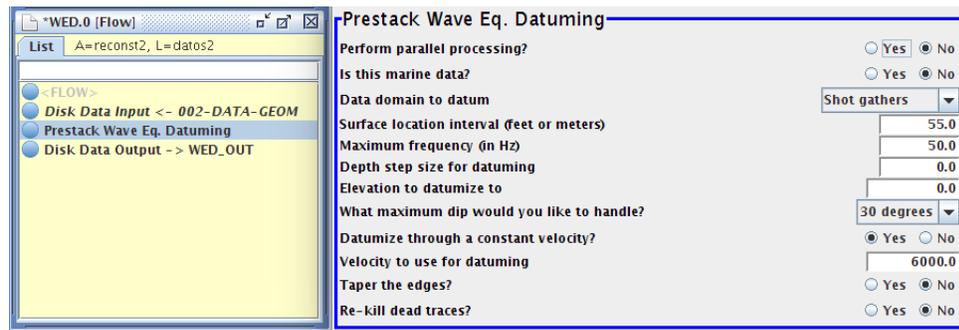


Figura 25: Captura de pantalla de PROMAX para el proceso y la asignación de parámetros para corrección de estáticas por medio de Wave Equation Datuming.

velocidades para las cuales los reflectores se vuelven horizontales, para el caso de los datos sintéticos solo se debía seleccionar una velocidad que correspondía al reflector de la capa plana ubicada bajo la capa meteorizada.

Después de haber realizado el análisis de velocidades, se procede a rea-

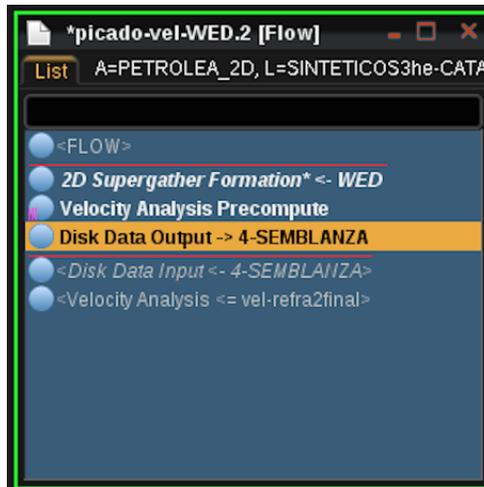


Figura 26: Captura de pantalla de PROMAX para análisis y picado de velocidades.

lizar el apilado, llevando a cabo el proceso que se muestra en la Fig. 27, en donde se tiene en cuenta un datum plano final sobre el cual se ubicaran las trazas una vez sean apiladas, este datum corresponde al datum aplicado en cada una de las correcciones. Para el presente trabajo se realizaron tres apilados: uno sin considerar las correcciones estáticas, otro teniendo en cuenta la corrección estática y otro teniendo en cuenta corrección dinámica.

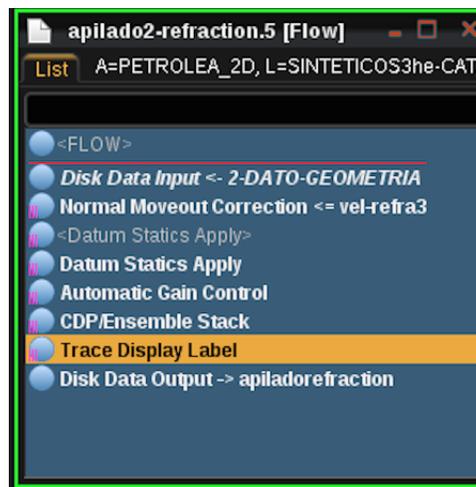


Figura 27: Captura de pantalla de PROMAX para el proceso de apilado.

Finalmente se realiza el proceso de migración, teniendo en cuenta el flujo

que se muestra en la Fig. 28 en el cual se presentan las herramientas necesarias para ejecutar la migración post apilado en tiempo. Se ingresa el disco de datos de entrada de los datos apilados, seguido a esto, la herramienta *Kirchhoff Time Migration* teniendo en cuenta el picado de velocidades, control de ganancias, y un filtro pasabanda.



Figura 28: Captura de pantalla de PROMAX para el proceso de migración.

### 3. Análisis y Resultados

A continuación, se presentan las imágenes resultantes del procesamiento sísmico de los datos sintéticos para los cinco diferentes modelos generados. La primer imagen de cada modelo representa los datos después de haber realizado el primer apilado bruto sin correcciones, la segunda imagen muestra la migración después de haber aplicado correcciones estáticas por el método  $DT$  y la tercer imagen representa la migración después de haber aplicado correcciones dinámicas por el método  $WED$ .

#### 3.1. Resultados del modelo 1: capas planas

Para este modelo de capas planas, se logra observar que la resolución de la imagen después de haber hecho las correcciones por  $WED$  incrementa. De igual forma se evidencia con mayor precisión la continuidad del reflector plano ubicado bajo la capa meteorizada. En este caso se puede observar que  $WED$  proporciona un mejor resultado. El contraste de velocidades entre las dos capas no es muy grande. La primer capa o capa de baja velocidad tiene un valor de 1200 m/s y la capa ubicada debajo de esta tiene una velocidad de 2500 m/s. La teoría menciona que cuando el contraste de velocidad entre estas dos capas no es muy grande, la trayectoria de los rayos refractados no será necesariamente vertical, luego la aproximación de  $DT$  no es válida en éste caso, dando como resultado una baja resolución y calidad de la imagen migrada después de haber efectuado la corrección por el método estático como se muestra en la Fig. 30.

#### 3.2. Resultados del modelo 2: capa meteorizada buzante

En los resultados del modelo 2, en el cual la capa meteorizada presenta un buzamiento, se logra observar el efecto de las estáticas en los datos sísmicos, pues la capa ubicada debajo de la capa meteorizada que debía ser plana según el modelo sintético generado que se observa en la Fig. 10b, tiene la misma geometría de la base de la capa meteorizada, es decir, se encuentra inclinada. Debido a esto, la imagen resultante sin correcciones podría prestarse para falsas interpretaciones en cuanto al buzamiento de

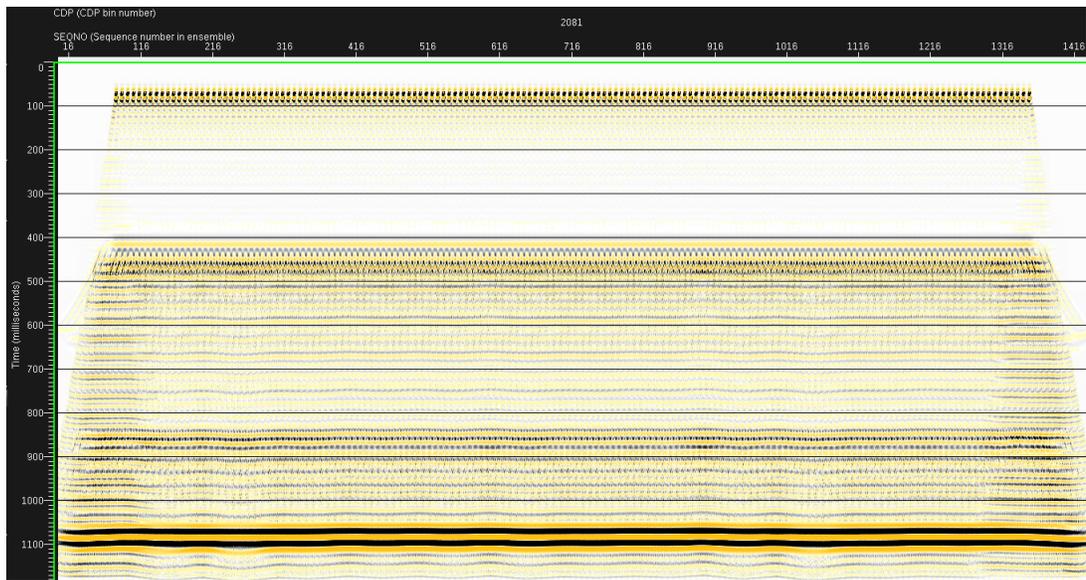


Figura 29: Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas.

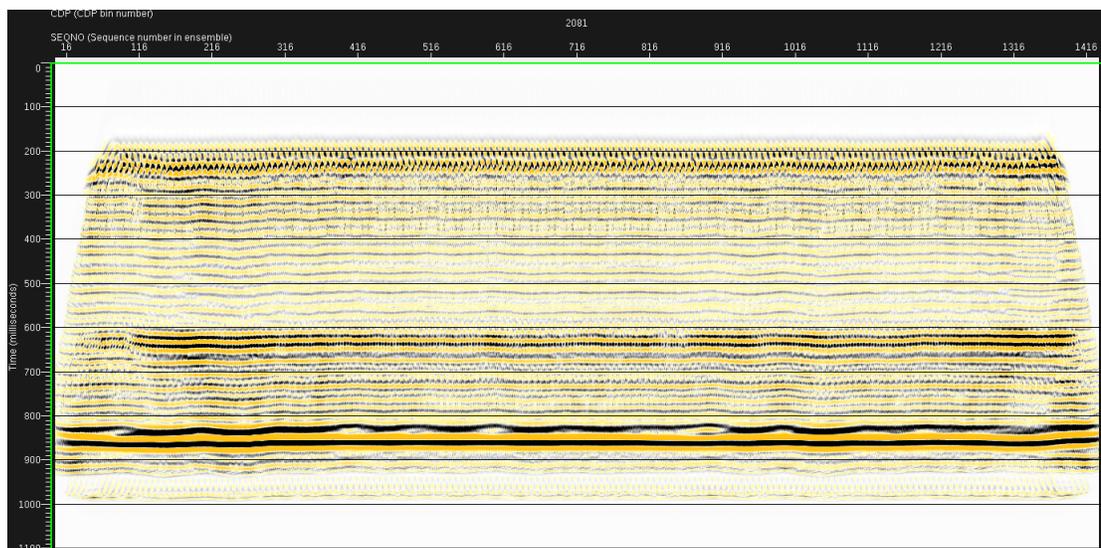


Figura 30: Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada después de la corrección por  $DT$ .

las capas del subsuelo terrestre. Sin embargo, después de haber efectuado las correcciones por ambos métodos, tanto estático como dinámico, el problema de las estáticas es corregido, dando como resultado la continuidad del reflector plano. En cuanto a la resolución de las imágenes migradas resultantes, la imagen correspondiente a la corrección estática

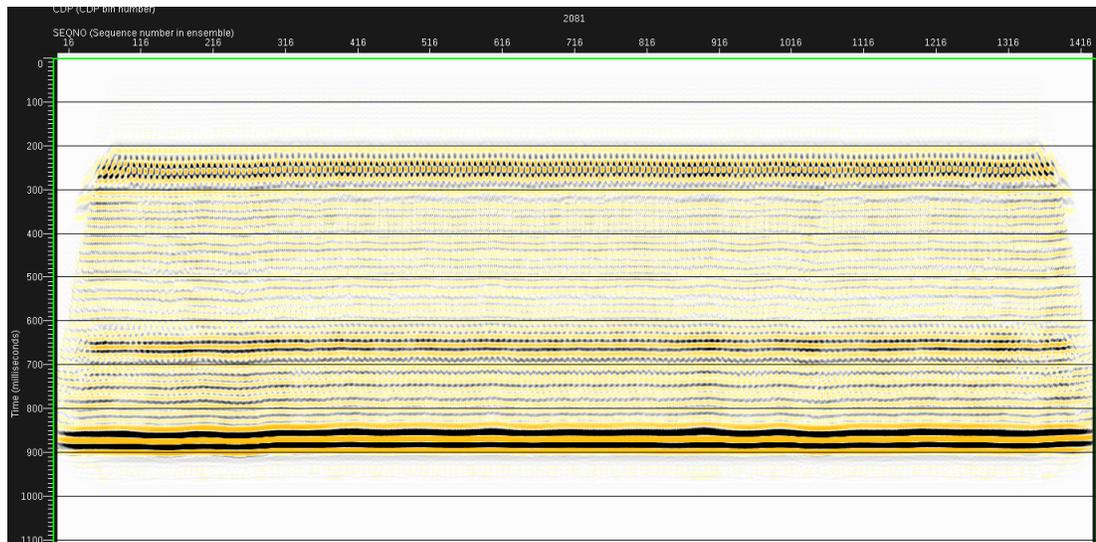


Figura 31: Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada después de la corrección por *WED*.

o *DT* representa una mayor continuidad y calidad de la imagen. Este resultado podría explicarse debido a que los contrastes de velocidad en este modelo varían desde 900 m/s para la primer capa, y 2500 m/s para la capa ubicada debajo de la capa meteorizada. En este caso, el contraste de velocidad es mayor y la corrección estática proporciona una buena aproximación al resultado esperado.

### 3.3. Resultados del modelo 3: capa meteorizada curva

Para el tercer modelo sintético 2D, que muestra una curva en la base de la capa meteorizada, los resultados obtenidos al aplicar correcciones por ambos métodos fueron similares. El problema fue corregido, pues la capa que se encuentra debajo de la capa meteorizada que tenía la misma forma geométrica de esta, es decir curva, se encuentra plana después de haber hecho las correcciones. La resolución de la imagen apilada y migrada es similar tanto para las correcciones por *DT* como para las correcciones por *WED*. En este modelo la velocidad varía tanto en profundidad, como lateralmente al presentar diferentes velocidades que varían de 900m/s a 1200 m/s en las zonas donde se encuentra la curvatura de la base de la capa meteorizada, luego habrán zonas en las que el contraste de velocidad es alto y zonas en las que el contraste es bajo, de esta forma ambas

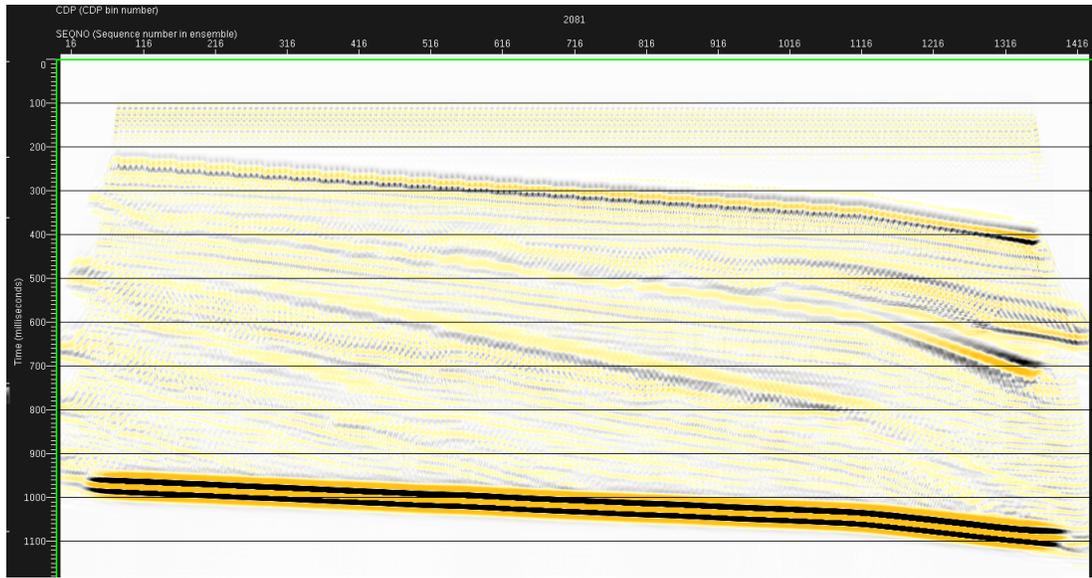


Figura 32: Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas.

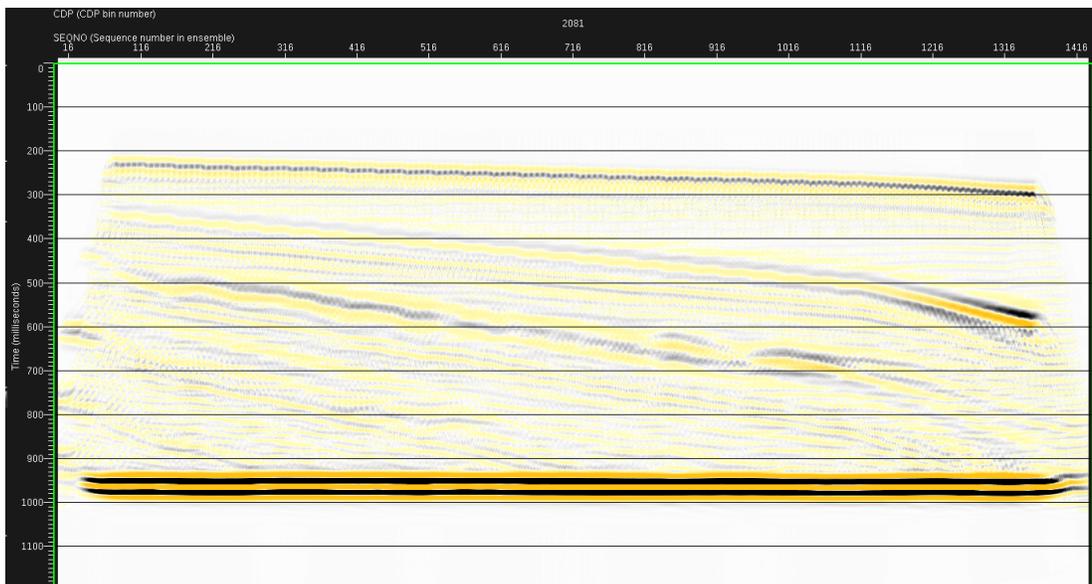


Figura 33: Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada buzante, migrada después de la corrección por  $DT$ .

correcciones corrigen el problema y las imágenes resultantes presentan una resolución similar.

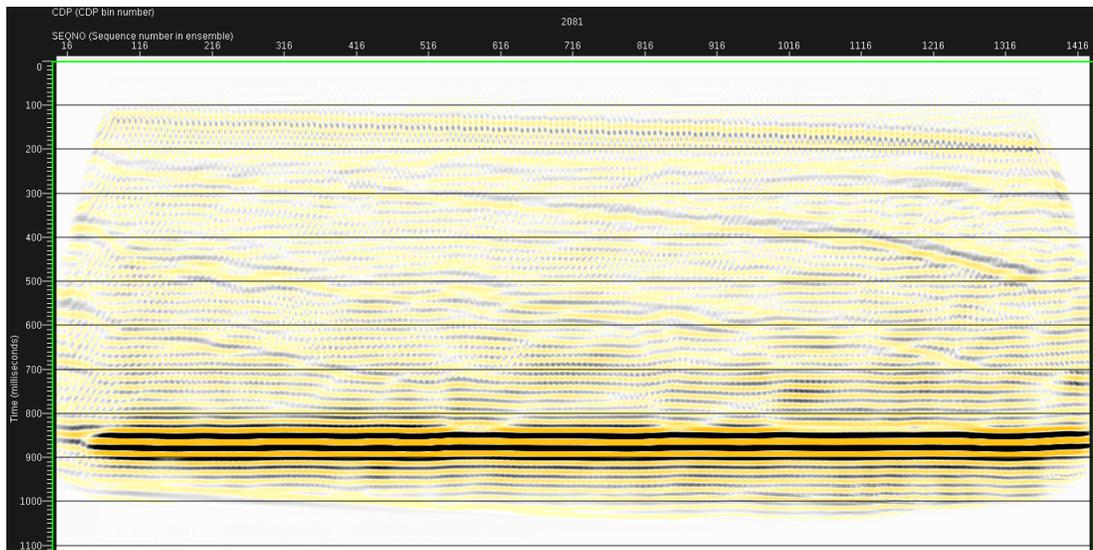


Figura 34: Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada buzante, migrada después de la corrección por *WED*.

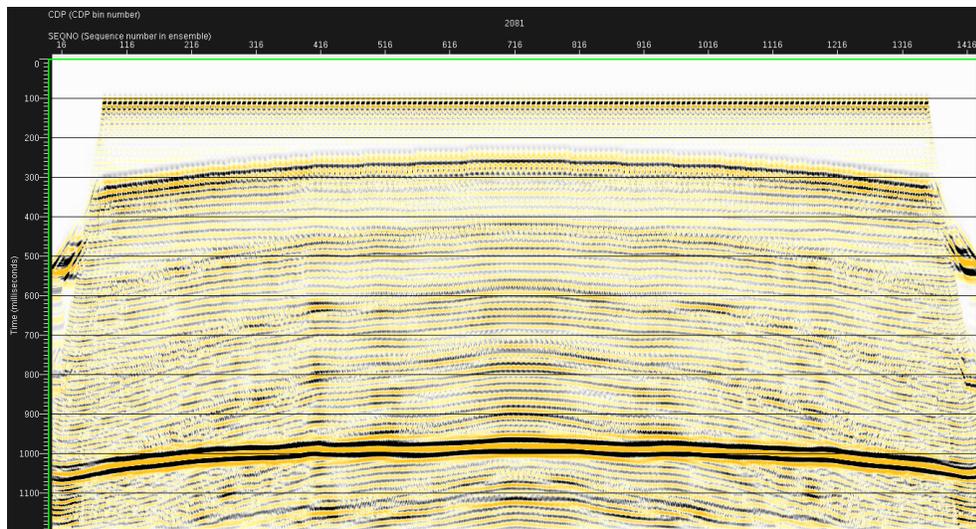


Figura 35: Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas.

### 3.4. Resultados del modelo 4: capa meteorizada variable

Los resultados del modelo 4, de una capa meteorizada de base variable muestran el gran efecto de las estáticas en un modelo más realista, pues la primer capa del subsuelo normalmente presentan geometrías bastante variables, afectando así las capas que se encuentran ubicadas debajo de esta al introducir diferentes tiempos de llegada en las trazas sísmicas. Las

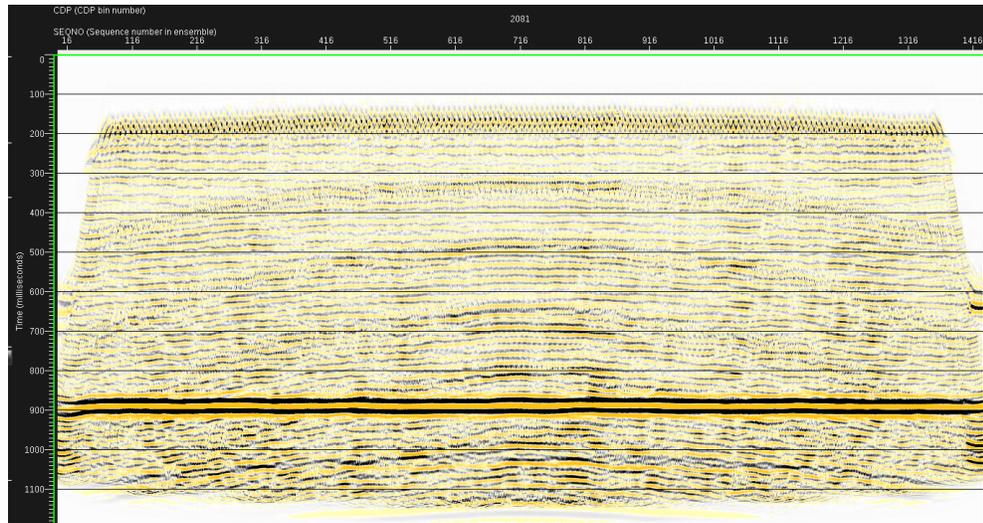


Figura 36: Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por  $DT$ .

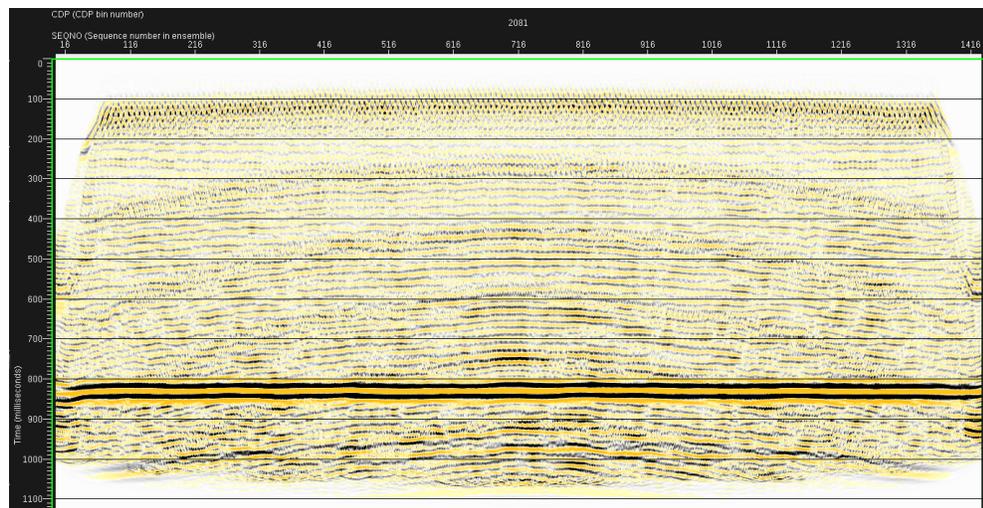


Figura 37: Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por  $WED$ .

correcciones después de aplicar  $DT$  y  $WED$  mejoran significativamente la continuidad de los reflectores de la segunda capa de este modelo, al corregir la geometría de esta segunda capa que es plana. En cuanto a la calidad de las imágenes apiladas y migradas, la resolución de la imagen después de aplicar corrección esática muestra mayor continuidad del reflector plano de la segunda capa, mientras que la corrección por  $WED$  presenta algunos problemas al introducir reverberaciones en la

imagen, sin embargo se logra observar la continuidad del reflector plano. El modelo de velocidades presenta variaciones en la base de la capa meteorizada y los contrastes de velocidad varían de 900m/s para la primera capa, y 2500m/s para la segunda capa. Aunque ambas aproximaciones tanto estática como dinámica proporcionan un resultado aproximado de corrección en los tiempos de arribo de las trazas sísmicas,  $DT$  resalta la resolución de la imagen sísmica, debido a que el modelo presenta altos contrastes de velocidad entre las capas.

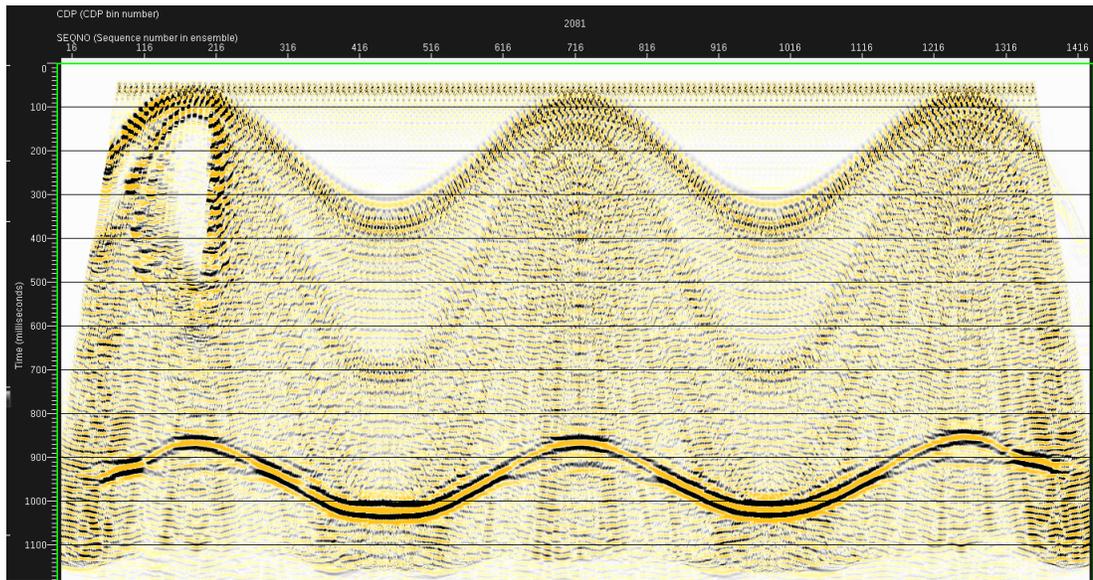


Figura 38: Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas.

### 3.5. Resultados del modelo 5: topografía abrupta y capa meteorizada

Se presentan las imágenes apiladas del modelo sintético que simula topografía abrupta y presencia de la capa meteorizada. En este modelo, se logra observar otro de los grandes efectos de las estáticas en los datos, pues la topografía abrupta introduce tiempos de retardo en las trazas sísmicas, como se logra observar en la Fig. 41 que representa el resultado de un primer apilado bruto, en donde la geometría de la capa ubicada de bajo de la capa meteorizada es inversa a la geometría de la topografía, es decir, que el efecto de la topografía en los datos sísmicos es la inversión de la geometría de las capas ubicadas debajo de la superficie cercana,

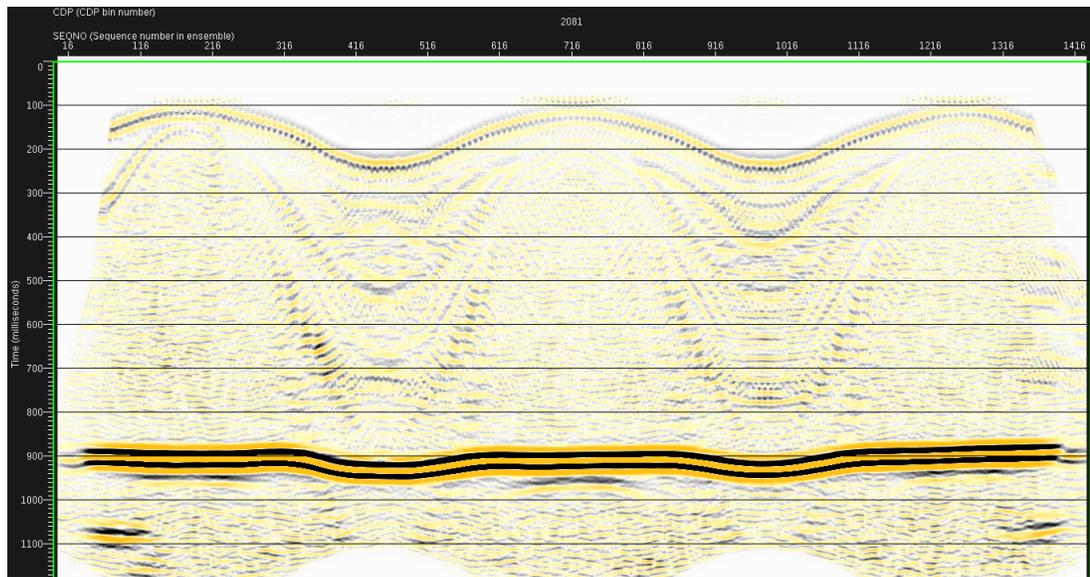


Figura 39: Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por  $DT$ .

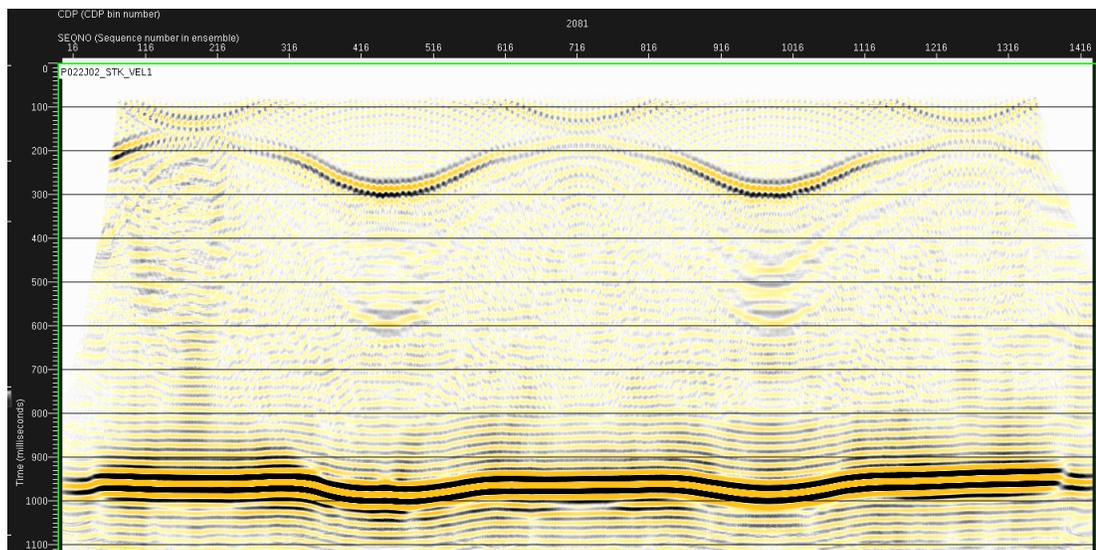


Figura 40: Imagen resultante para el modelo de capa meteorizada curva, migrada después de la corrección por  $WED$ .

lo cual se presta para falsas interpretaciones de la imagen sísmica. Sin embargo, después de aplicar las correcciones estáticas, la geometría de la capa se corrige y se observa plana, como es realmente según el modelo de velocidades presentado en la Fig. 12. Para este modelo, ambas correcciones tanto estáticas como dinámicas corrigen el problema, y evidencian

la continuidad del reflector de la capa plana ubicada debajo de la meteorizada. Sin embargo, después de haber hecho la corrección por *WED* la resolución de la imagen mejora, se puede observar la continuidad del reflector plano, y la topografía se suaviza. Esto es debido a que *WED* se basa en la propagación del campo de onda y corrige los efectos de la topografía, pues fue diseñado con tal propósito. Sin embargo, este sigue representando un gran inconveniente para el procesamiento sísmico.

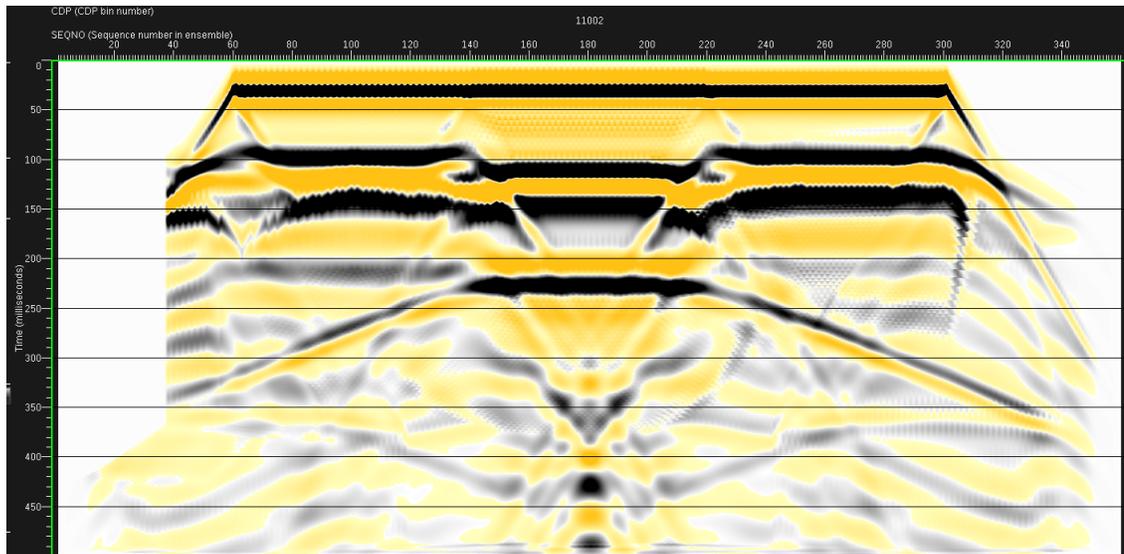


Figura 41: Imagen resultante para el modelo de capas planas, migrada sin considerar correcciones estáticas.

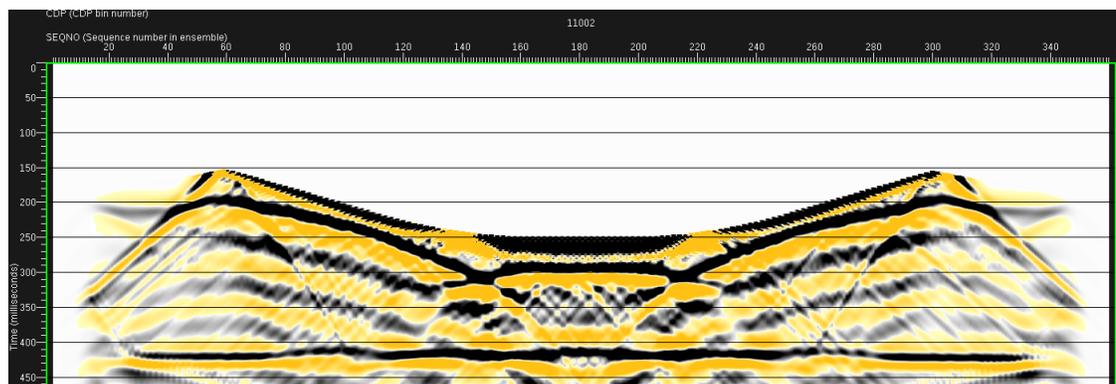


Figura 42: Imagen resultante para el modelo con topografía abrupta y presencia de capa meteorizada, migrada después de la corrección por *DT*.

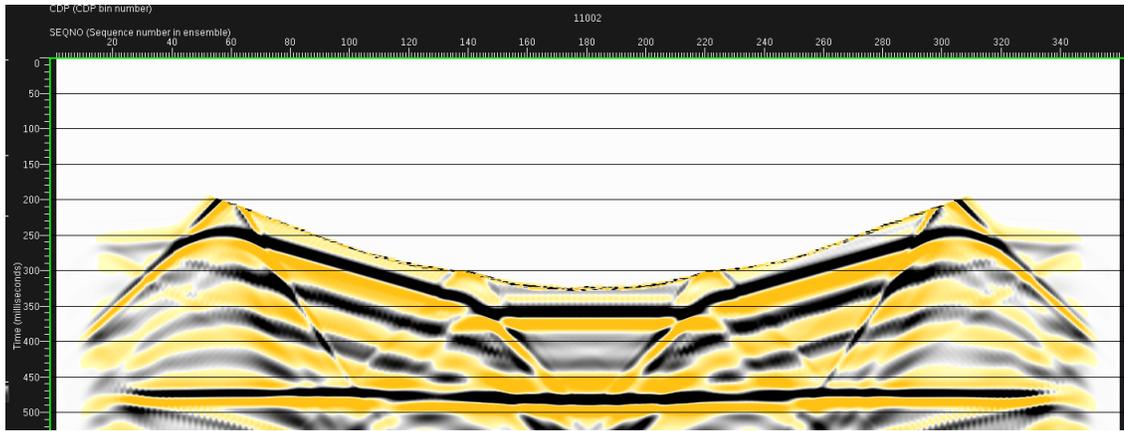


Figura 43: Imagen resultante para el modelo con topografía abrupta y presencia de capa meteorizada, migrada después de la corrección por *WED*.

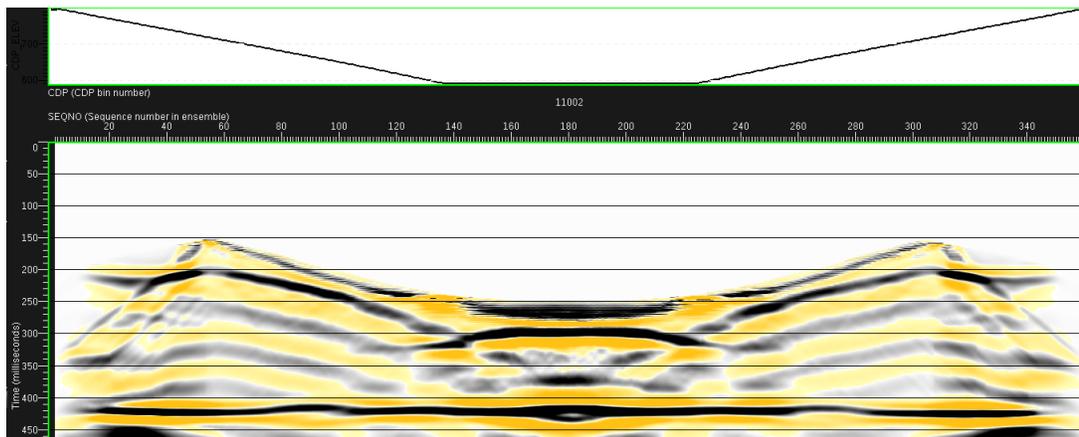


Figura 44: Representación alterna de la figura 29, donde se logra visualizar la topografía de elevación para el modelo generado.

### 3.6. Resultados procesamiento de datos reales

Los resultados obtenidos del procesamiento de datos sísmicos para una línea 2D real de unos datos adquiridos en una zona de Colombia, que presenta terreno plano y terreno con topografía abrupta. La línea de datos sísmicos fue suministrada por el Instituto Colombiano del Petróleo y su referenciación es de carácter confidencial. Los resultados se muestran en las imágenes apiladas y migradas sin correcciones y después de realizar las correcciones por *DT* y por el método *WED*. En la parte superior de las figuras se muestra la geometría del terreno donde se realizó la adquisición de los datos, siendo la parte izquierda más plana que la par-

te derecha que presenta una zona topográfica. Después de realizar las correcciones por el método *DT*, se resalta la resolución y continuidad de los reflectores en la imagen apilada y migrada. Sin embargo, la zona de la derecha que contiene topografía abrupta aún no se logra corregir, pues no se evidencia la continuidad de los reflectores. Después de aplicar corrección por *WED*, la resolución de la zona donde se encuentra la topografía incrementa al resaltar los reflectores de la zona somera, donde los contrastes de velocidad varían aproximadamente entre 1200m/s para la primer capa y 2300m/s para la segunda capa. Sin embargo, a profundidad siguen existiendo deficiencias en los datos, pues no se evidencia claramente la continuidad de los reflectores entre la zona plana y la zona topográfica. En la zona plana se resalta la resolución de los reflectores a profundidad. En este caso, la resolución y calidad de la imagen despues de aplicar *WED* aumenta, debido que *WED* fue diseñado para corregir los problemas causados por la topografía abrupta en el procesamiento de datos sísmicos terrestres. Sin embargo en la zona comprendida entre el cambio de terreno plano a terreno con topografía abrupta no se percibe la continuación de los reflectores debido a la complejidad de la zona donde fueron adquiridos los datos.

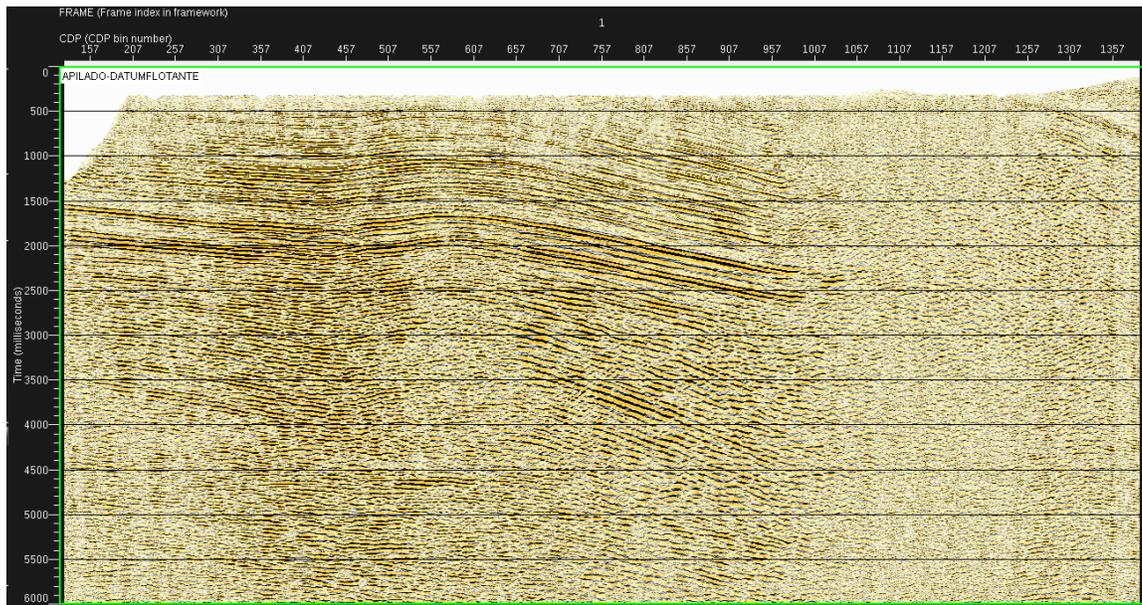


Figura 45: Imagen resultante de la migración sin correcciones estáticas para una línea 2D de datos reales.



## 4. Conclusiones

Se generaron datos sintéticos 2D haciendo uso del software Madagascar, que cumplía con las condiciones necesarias para realizar las pruebas de comparación de las dos técnicas para corregir estáticas, es decir, unos datos que representaban presencia de la capa meteorizada y variaciones laterales de velocidad y otros que representaban topografía abrupta y presencia de la capa meteorizada. Por medio de la técnica *DT* se reconstruyó la capa meteorizada para cada modelo, con lo cual se logró determinar el espesor de esta capa para el cálculo de los tiempos. Al realizar el procesamiento de los datos, se determinó que aunque ambos métodos proveen una solución aproximada, *WED* requiere mayor tiempo computacional, debido a que la herramienta tardó 15 minutos para cada modelo sintético y 30 minutos para la línea de datos reales, haciendo éste método más costoso al momento de implementarlo. Por otro lado, *DT* solo requirió 8 minutos para realizar las correcciones en modelos sintéticos y 15 para las correcciones en datos reales. Se encontraron tres principales resultados que se enuncian a continuación.

1. Se procesaron los datos sintéticos 2D, teniendo en cuenta las dos técnicas para corrección de estáticas dando como resultado que en los casos en los que los contrastes de velocidad entre la capa meteorizada y la capa ubicada debajo de esta eran altos (valores entre 900m/s para la primer capa y 2500m/s para la segunda) el método *DT* dió un mejor resultado. Para bajos contrastes de velocidad (valores entre 1200 para la primera capa y 2500 para la segunda) al igual que para los casos en los cuales existe topografía, *WED* corrige mejor los tiempos de arribo de los datos, dando como resultado imágenes apiladas con mayor resolución, en las cuales se puede observar con mayor detalle la continuidad de los reflectores.
2. Se procesaron los datos reales 2D, los resultados muestran la continuidad de los reflectores con mayor resolución después de haber aplicado ambas correcciones *DT* y *WED*, sin embargo al aplicar *WED* se logra apreciar una mejora en la calidad de la imagen en la

parte somera y algunos reflectores en la zona con topografía en la cual se observa con mayor detalle el buzamiento de los reflectores.

3. Se modificó la implementación de la técnica para corregir los datos por medio de *WED*, considerando la base de la capa meteorizada como *datum* de referencia de salida y la elevación topográfica como datum de entrada desde la cual se realizó la propagación del campo de onda, dando como resultado imágenes apiladas y migradas que representan una mejor aproximación al modelo real.

Igualmente, se pueden hacer las siguientes recomendaciones para futuros trabajos:

1. Es necesario introducir mejoras en la herramienta *WED* del software *Promax*, pues aún no resuelve completamente el problema de las estáticas en zonas con topografía abrupta.
2. La metodología propuesta para corregir los datos por *WED* teniendo en cuenta las variaciones de la base de la capa meteorizada y la topografía, aumenta considerablemente la resolución de la imagen sísmica resultante. Se recomienda implementarla en el software *Promax*.

## Bibliografía

- [1] Berryhill, J.R. Wave Equation Datuming. *Geophysics* **44** 1329-1344 (1979).
- [2] Bevc, D. Flooding the topography: Wave-equation datuming of land data with rugged acquisition topography. *Geophysics* **62** 1558-1569 (1997).
- [3] Cox, Michael JG, Eugene F. Scherrer, and Roland Chen. Static corrections for seismic reflection surveys. *SEG* **9** (1999).
- [4] Cordsen Andreas, Galbraith Mike, Pierce John. Planning land seismic surveys. *SEG* **9** (2000).
- [5] Dobrin, Milton Burnett, and Carl H. Savit. Introduction to geophysical prospecting. *McGraw-hill* (1960).
- [6] Fomel, Sergey. Madagascar: Open-source software project for multidimensional data analysis and reproducible computational experiments.. *Journal of Open Research Software* *1.1* (2013).
- [7] Hernández Navea. Procesamiento de datos de sísmica de reflexión de alta resolución para la obra: Plataforma del corredor norte-noroeste del tren de alta velocidad ubicado en Ourense, Galicia, España. *Universidad de Galicia* (2008).
- [8] Halliburton. Seisspace seismic processing and and analysis training manual. *Landmark software and services* (2011).
- [9] Hileman, J. A., Embree, Pflueger, J. C. Automated static corrections. Geophysical Prospecting. *Geophysics* **51** 326-358 (1968).
- [10] Marsden, Dave1. Static corrections-a review, Part 1. *The leading edge* **43** 43-495 (1993).
- [11] Mikesell, van Wijk, Ruigrok, Lamb., & Blum, T. E. A modified delay-time method for statics estimation with the virtual refraction. *SEG* **77** A29-A33 (2012).

- [12] Mousa, Wail A and Abdullatif . Processing of Seismic Reflection Data Using MATLAB2. *Claypool Publishers* (2011).
- [13] Nicanoff Leandro, Perez Yolanda. A case study for imaging complex structures in the Andean Thrust Belt of Bolivia. *SEG* (2006).
- [14] Pedraza Edgardo. Modelo de velocidad de reemplazamiento para correcciones asociadas a topografías abruptas en datos de sísmica de reflexión. *Universidad Nacional de Colombia* (2011).
- [15] Pugin, A, & Pullan, S. E. First-arrival alignment static corrections applied to shallow seismic reflection data . 1. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* **5.1** 7-15 (2000).
- [16] Robinson, C, & Larner, K. Datuming and layer replacement: When are static corrections sufficient. *Ann. Internat. Mtg SEG* **47** 2040-2043 (2000).
- [17] Rusell B & Rusell H. Static corrections - A tutorial. *Calgary, commitment to quality and turnaround* (1979).
- [18] Salinas Garnica, T, & Larner, K.. Comparison of datuming alternatives in areas of rough terrain. *67th SEG Meeting Dallas, USA* **67** (1997).
- [19] Salinas Garnica, Trino. The influence of near surface time anomalies in the imaging process. *MIT* (1996).
- [20] Sheriff, R.E. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. *SEG* (1991).
- [21] Shtivelman, V, & Canning, A. Datum correction by wave-equation extrapolation. *SEG* **53.10** 1311-1322 (1988).
- [22] Yilmaz, Özdoan. Seismic data analysis. *SEG* (2001).