

**Inversión de Onda Completa (FWI) en tiempo para datos sísmicos
adquiridos usando una geometría *blended*.**

KATHERINE ALEXANDRA FLOREZ RAMIREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga

2016



**Inversión de Onda Completa (FWI) en tiempo para datos sísmicos adquiridos
usando una geometría *blended*.**

KATHERINE ALEXANDRA FLOREZ RAMIREZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

Director

PhD. Ana Beatriz Ramírez Silva

Co-director

Ing. Julián Gonzalo Mantilla Arias

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
Bucaramanga
2016**

*A Dios por ser mi guía y darme el privilegio de pertenecer a esta familia,
a mi madre por su fortaleza y consejo en todos los instantes de mi vida,
a mi padre por su constante apoyo y acompañamiento,
y a mi hermana Karen, por ser mi mayor compañía y darme todo su cariño.*

*A Rodolfo, Mercedes y Domingo, así como a todos los que dejamos en España,
por creer en mí y sembrar las bases de lo que hoy soy.*

*A mi tío Omar, mi tía Neida y a toda mi familia,
por estar conmigo en los momentos de alegría y tristeza,
a Cesar por brindarme su amor y apoyo incondicional,
y a todos aquellos que con su presencia me han acompañado en esta meta.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es apoyado por la empresa Colombiana de Petróleo ECOPETROL y COLCIENCIAS como parte del proyecto de investigación 0266de 2013 y acta de cooperación 04 de 2014. La autora agradece al grupo de investigación de CPS de la Universidad Industrial de Santander por su apoyo constante.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. EXPLORACIÓN SÍSMICA MARINA	17
2.2. ADQUISICIÓN BLENDED	19
2.3. INVERSIÓN DE ONDA COMPLETA CON DATOS BLENDED	21
3. RESULTADOS	24
3.1. DISEÑO GEOMETRIA BLENDED	24
3.2. FWI PARA DATOS BLENDED	30
3.3. FACTOR BLENDED	39
4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	43
4.1. CONCLUSIONES	43
4.2. OBSERVACIONES	43
4.3. TRABAJO FUTURO	44
REFERENCIAS	45
BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema general FWI	13
Figura 2. Towed Streamer	17
Figura 3. Adquisición tradicional y <i>blended</i>	18
Figura 4. Modelo de velocidad inicial.	24
Figura 5. Codificación disparos <i>blended</i> sin restricciones.	26
Figura 6. Dato en superficie super-shot 3 sin restricciones.	26
Figura 7. Codificación disparos <i>blended</i> con restricciones.	28
Figura 8. Dato en superficie super-shot 3 con restricciones.	28
Figura 9. Modelo de velocidad suavizado.....	30
Figura 10. Tiempo iteración FWI <i>blended</i> , 4 super-shots	33
Figura 11. Tiempo iteración FWI <i>blended</i> , 20 disparos.....	33
Figura 12. Modelo de velocidad final con 1 super-shot <i>blended</i>	35
Figura 13. Modelo de velocidad final con 5 disparos tradicionales.	35
Figura 14. Modelo de velocidad final con 2 super-shots <i>blended</i>	36
Figura 15. Modelo de velocidad final con 10 disparos tradicionales.	36
Figura 16. Modelo de velocidad final con 3 super-shots <i>blended</i>	37

Figura 17. Modelo de velocidad final con 15 disparos tradicionales.	37
Figura 18. Modelo de velocidad final con 4 super-shots <i>blended</i>	38
Figura 19. Modelo de velocidad final con 20 disparos tradicionales.	38
Figura 20. Factor blended de 3.	39
Figura 21. Factor blended de 5.	40
Figura 22. Factor blended de 8.	40
Figura 23. Factor blended de 10.	41
Figura 24. Evolución error relativo L2	42
Figura 25. Evolución razón de tiempo.....	42

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetro m , frecuencia 3[Hz] y 5 disparos	31
Tabla 2. Resultados para FWI multiscale, frecuencia 15[Hz].....	32

RESUMEN

Título:

INVERSION DE ONDA COMPLETA (FWI) EN TIEMPO PARA DATOS SISMICOS ADQUIRIDOS USANDO UNA GEOMETRIA BLENDED.¹

Autor: Katherine Alexandra Flórez Ramírez²

Palabras Claves: Inversión de onda completa, Adquisición *blended*, *super-shot*.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un método FWI (por sus siglas en inglés para Full Waveform Inversion) en tiempo, que utiliza los datos sísmicos adquiridos usando geometría *blended*. La geometría *blended* implica la superposición temporal y espacial de múltiples disparos ubicados al azar en la misma adquisición, mientras que la adquisición tradicional utiliza espaciado regular de los receptores y un solo disparo a la vez.

El método FWI emplea la ecuación de onda acústica 2D con densidad constante para encontrar las trazas sísmicas modeladas, y la norma l_2 como función error entre las trazas observadas y modeladas. La geometría de adquisición *blended* fue diseñada para obtener sintéticamente los datos sísmicos en la superficie con 5, 10, 15 y 20 disparos simultáneos, utilizando el tamaño de modelo marmousi de 3,025 kilómetros x 12,425 kilómetros (con una rejilla de 121 x 497 puntos) como de velocidad. El método FWI estima un modelo de velocidad utilizando una versión suavizada del marmousi como modelo inicial, la cual actualiza de forma iterativa disminuyendo el gradiente.

El método FWI para geometría *blended* y tradicional fue implementado y probado en el mismo equipo en condiciones controladas, para un mismo número de disparos e iteraciones. Los resultados experimentales de los modelos de velocidad obtenidos utilizando geometrías *blended* y tradicional tienen error cuadrático similares, y el tiempo de ejecución de la FWI para la adquisición *blended* es hasta 1.8 veces más rápido que el método FWI para la adquisición tradicional.

¹ Trabajo de Grado modalidad en investigación

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Ana Beatriz Ramirez Silva. Codirector: M.Sc Julián G. Mantilla Arias.

ABSTRACT

TITLE:

FULL WAVEFORM INVERSION (FWI) IN TIME FOR SEISMIC DATA ACQUIRED USING A BLENDED GEOMETRY³

AUTHOR: Katherine Alexandra Flórez Ramírez⁴

KEYWORDS: Full waveform inversion, blended acquisition, super-shot.

This work presents the development of a Full Waveform Inversion (FWI) method in time, that uses seismic data acquired using a blended geometry. Blended geometry involves temporal and spatial overlap of multiple shots, randomly located in the same acquisition, whereas the traditional acquisition uses regular spacing of the receivers and one single shot at a time.

The FWI method uses the acoustic wave equation with constant density 2D to find the modeled data, and a l_2 - error norm as misfit function between the observed and modeled data. The blended geometry acquisition was designed to obtain synthetically the seismic data at the surface with 5, 10, 15 and 20 simultaneous shots, using the marmousi model size of 3.025 km x 12.425 km (with a grid of 121 x 497 points) as true subsurface velocity model. The FWI method estimates the velocity using a smoothed version of the marmousi as initial model, and it updates the velocity model iteratively using a gradient descent method.

The FWI method for blended and traditional geometries was implemented and tested on the same computer under controlled conditions, for the same number of shots and iterations. The experimental results of the velocity models obtained using blended and traditional geometries have similar quadratic error norm, and the execution time of the FWI for the blended acquisition is up to 1.8 time faster than the FWI method for the traditional acquisition.

³ Degree Project

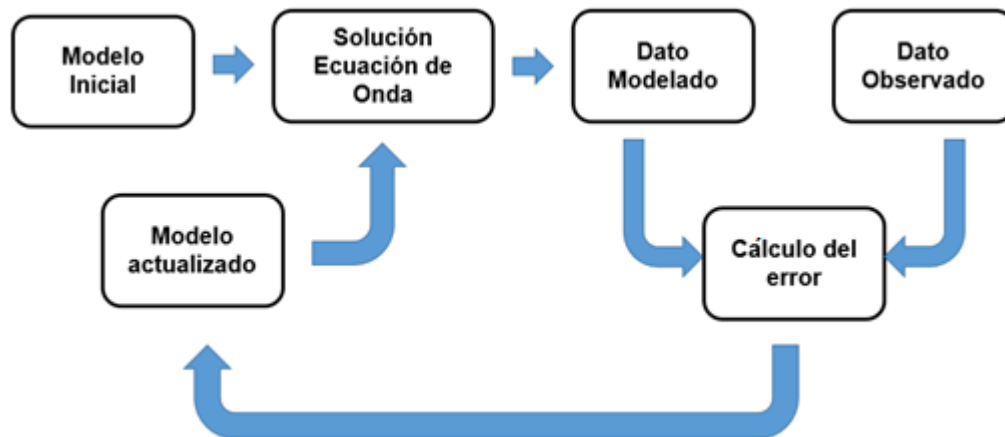
⁴ Faculty of Physics Mechanics Engineering. Electrical, Electronics Engineering and Telecommunications School. Director: PhD Ana Beatriz Ramirez Silva Codirector: M.Sc. Julián G. Mantilla Arias.

INTRODUCCIÓN

La inversión de onda completa (FWI por sus siglas en inglés) ha sido utilizada recientemente para estimar modelos de velocidad, generando modelos de mayor resolución que aquellos logrados por métodos de inversión tradicional. En la exploración sísmica de petróleo y gas en zonas geológicas complejas es necesario el desarrollo de técnicas para la estimación de modelos de velocidad confiables, con el fin de generar una correcta migración de las trazas sísmicas. Esto permite disminuir el riesgo durante la etapa de exploración.

El método FWI utiliza un modelo de velocidad inicial, las trazas sísmicas adquiridas en campo, y la ecuación de onda acústica para actualizar de forma iterativa el modelo de velocidades usando el método de Newton [1].(ver Figura1).

Figura 1. Esquema general FWI



A pesar de los buenos resultados obtenidos por medio de la FWI para datos adquiridos de forma tradicional, es un método con un alto coste computacional. El uso de codificación en la localización de las fuentes puede ser utilizado para mejorar la eficiencia computacional de la FWI [2]. Esta técnica puede reducir en

gran medida la carga computacional mediante la toma de disparos simultáneos codificados (fuentes *blended*).

En la actualidad esta técnica es utilizada en la exploración sísmica marina. La geometría más ampliamente usada de forma comercial es el *Towed Streamer*, [3] donde uno o más cables que contiene los transductores son estratégicamente localizados para obtener el número deseado de trazas a partir del disparo de fuentes *blended*.

Un disparo *blended* implica superposición espacial y temporal de múltiples disparos en la misma adquisición. Sin embargo, la interferencia entre las diferentes fuentes individuales durante la adquisición del *super-shot* puede conducir a la pérdida de información relevante en las trazas. Este problema aumenta con un número mayor de disparos en el *super-shot* [4].

Esta tecnología emergente reduce los costos de adquisición por la disminución en el número de datos registrados [5]. También disminuye el número de veces que el barco debe pasar a través del camino trazado, lo que reduce los costos de operación durante una adquisición sísmica. Sin embargo, una vez que el *super-shot* es adquirido, el método de procesamiento sísmico tradicional requiere un proceso de *de-blending* o separado de *shot-gathers* para la estimación del modelo de velocidad y la migración sísmica.

En este trabajo, se ha desarrollado un método de FWI que utiliza los datos de adquisición *blended* para la reconstrucción del modelo de velocidad. Este método de FWI evita el paso de separación o *de-blending* y requiere menos recursos computacionales que el método FWI aplicado sobre una adquisición tradicional, ya que utiliza un conjunto menor de datos al emplear *super-shots*.

El documento de trabajo de grado consta de cuatro capítulos que reflejan el desarrollo del proyecto de investigación. El primer capítulo presenta los objetivos general y específicos planteados en el trabajo, el segundo capítulo expone la teoría en exploración sísmica marina, adquisición con enfoque *blended* e inversión de onda completa para fuentes simultaneas; donde se hace referencia a las principales fuentes bibliográficas estudiadas para el desarrollo del proyecto. El tercer capítulo muestra el diseño de la geometría de adquisición propuesta y estudiada en este proyecto y la implementación de la FWI *blended*. Por último, en el cuarto capítulo se exponen las conclusiones y observaciones extraídas del análisis de resultados.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un método de Inversión de Onda Completa (FWI) en tiempo para datos sísmicos adquiridos usando una geometría *blended*, empleando la ecuación de onda acústica con densidad constante 2D.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

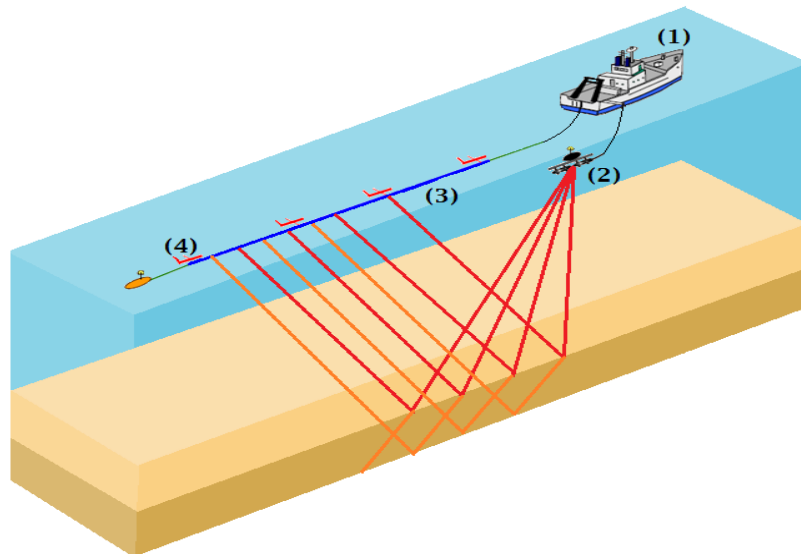
- Diseñar la geometría de adquisición *blended* para obtener los datos sísmicos en superficie.
- Implementar la FWI acústica con densidad constante 2D para datos sísmicos adquiridos con geometría *blended*, usando Matlab.
- Comparar los modelos de velocidades obtenidos con la FWI, cuando se utiliza geometría *blended* y tradicional.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EXPLORACIÓN SÍSMICA MARINA

En la exploración sísmica marina, la geometría más empleada de forma comercial es el *Towed Streamer* (ver Figura 2), en donde se emplea uno o varios cables según la densidad de fuentes y receptores deseada de medida. Ubicando estratégicamente los transductores a lo largo de los cables para obtener el número de trazas deseado. [6]

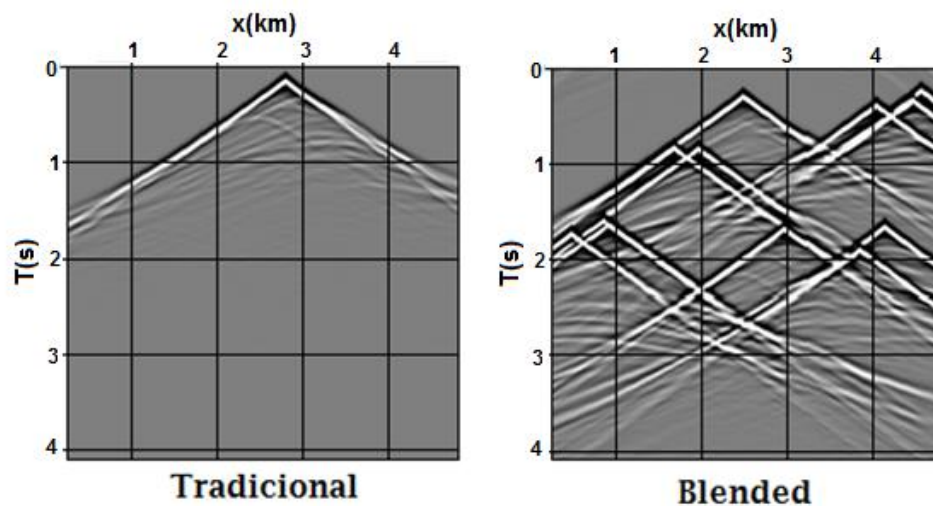
Figura 2. Towed Streamer, (1) Buque de exploración sísmica, (2) Fuente sísmica, (3) cable o streamer (4) Flotador o bird.



El número de fuentes de sonido, su tamaño y distribución se seleccionan según el diseño de la geometría con el fin de reducir los efectos de atenuación y proveer una fuente dirigida [3].

El uso de fuentes *blended* supone la superposición de múltiples disparos ubicados aleatoriamente en una misma adquisición. Una adquisición tradicional usa espaciamiento regular de sensores y único disparo (ver Figura 3). El procesamiento de los datos, puede tomarse desde dos perspectivas: realizando primero la separación de los disparos para trabajarlos posteriormente como un dato adquirido en forma tradicional, o bien procesar los datos mezclados. La elección de este último enfoque reduce el tiempo de procesamiento en proporción al número de fuentes recogidas en cada conjunto de disparos, *super-shot* [7].

Figura 3. Adquisición tradicional y *blended*. Tomado de [7]



2.2. ADQUISICIÓN BLENDED

La geometría *blended* implica la adquisición de un *super-shot* obtenido a partir de múltiples fuentes localizadas de forma aleatoria y con diferentes tiempos de disparo, produciendo una superposición entre disparos. Este método de adquisición genera interferencia que afecta el resultado del procesamiento de datos sísmicos posterior como la FWI. Con el fin de reducir el efecto de la interferencia en las fuentes, estas son codificadas aleatoriamente usando fase aleatoria [8] o retardo en tiempo aleatorio [9]. En este trabajo, se utilizó posiciones y retardos en tiempo aleatorios (fuente *blended*), de manera que el efecto de la interferencia en la fuente es reducido.

La expresión para fuentes tradicionales del campo de onda en la superficie en el dominio del tiempo, es obtenido con la solución numérica de la ecuación de onda acústica 2D incluyendo una fuente puntual, *src*. Para el caso de densidad constante, está dado por:

$$src(x_0, t_0) = \frac{\partial^2 \mathbf{p}(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{p}(x, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\mathbf{m}^2(x, z)} \frac{\partial^2 \mathbf{p}(x, z, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

donde x_0 y t_0 , es la posición espacial y el retardo en tiempo de la fuente puntual respectivamente, \mathbf{m} es la velocidad acústica del medio en función de la distancia (x, z) y \mathbf{p} es el campo de presión. El campo de onda de presión en la superficie está dado por $P(x - x_0, z = 0, t - t_0)$. El dato observado blended en superficie es dado a partir de la suma linear de los N disparos con codificación en retardo en tiempo " t_n " y posición " x_n " [10].

$$P_{bl} = \sum_{n=1}^N P(x - x_n, z, t - t_n), \quad (2)$$

Siendo x_n y t_n la posición espacial y el retardo en tiempo para cada una de las fuentes, con $P_{bl} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_t}$ el campo de onda en superficie adquirido con datos *blended* y $P \in \mathbb{R}^{N_x \times N_t}$ el campo de onda tradicional en superficie.

2.3. INVERSIÓN DE ONDA COMPLETA CON DATOS BLENDED

La FWI es un método que estima los parámetros del subsuelo (como la velocidad de propagación de las ondas) a partir de los parámetros de un modelo inicial y de un dato adquirido. Este actualiza el modelo del subsuelo iterativamente disminuyendo el error dado por la norma l_2 de la diferencia entre el dato adquirido \mathbf{d} , y el dato modelado *blended* $P_{bl}(\mathbf{m})$. La función error está dada por [11] :

$$J(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d} - P_{bl}(\mathbf{m})\|_2^2. \quad (3)$$

Usando un método de Newton la función error puede ser minimizada, por medio de la actualización del modelo de velocidad iterativamente como [1] :

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \Delta\mathbf{m}, \quad (4)$$

$$\Delta\mathbf{m} = -\alpha_k \cdot G(\mathbf{m}_k), \quad (5)$$

donde $G(\mathbf{m}_k)$ es el gradiente de la función error, evaluado en \mathbf{m}_k , y α_k es el valor del tamaño de actualización en la dirección del gradiente en la iteración k .

La función gradiente es dada por [12] :

$$G(\mathbf{m}_k) = -\frac{2}{\mathbf{m}_k^3} \int_0^T \mathbf{q}_s(x, z, T - t) \frac{\partial^2 \mathbf{p}_s(x, z, t)}{\partial t^2} dt, \quad (6)$$

donde T es el tiempo de grabado, \mathbf{p}_s es el dato obtenido por las fuentes puntuales en la superficie, \mathbf{q}_s la retropropagación del residual del campo de onda, obtenido utilizando la misma ecuación de onda acústica de \mathbf{p}_s , pero usando el residual $P_{bl}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}$ como fuentes.

La convergencia del método FWI en pocas iteraciones requiere una longitud de paso α_k o una dirección de búsqueda $\Delta \mathbf{m}$ tal que la función error $J(\mathbf{m})$ disminuya rápidamente. En este trabajo se utilizó el método L-BFGS para calcular la dirección de búsqueda $\Delta \mathbf{m} = -\alpha_k \mathbf{h}_k$ que no solo usa el gradiente presente $G(\mathbf{m}_k)$ sino los gradientes y modelos de velocidades generados en las m previas iteraciones, siendo $m \leq 10$. El procedimiento recursivo para calcular \mathbf{h}_k eficientemente, se da en el algoritmo 1 [13] [14].

Algoritmo 1. Método L-BFGS

```

q  $\leftarrow G(\mathbf{m}_k)$ ;
for  $i = k - 1 : -1 : k - m$ 
     $\epsilon_i \leftarrow \sigma_i \mathbf{s}_i^T \mathbf{q}$ ;
     $\mathbf{q} \leftarrow \mathbf{q} - \epsilon_i \mathbf{y}_i$ ;
end (for)
r  $\leftarrow D_k^0 \mathbf{q}$ ;
for  $i = k - m : +1 : k - 1$ 
     $\beta \leftarrow \sigma_i \mathbf{y}_i^T \mathbf{r}$ ;
     $\mathbf{r} \leftarrow \mathbf{s}_i (\epsilon_i - \beta)$ ;
end (for)

```

Donde, $\mathbf{s}_k = \mathbf{m}_{k+1} - \mathbf{m}_k$ es el cambio en los modelos de velocidad, $\mathbf{y}_k = G(\mathbf{m}_{k+1}) - G(\mathbf{m}_k)$ es el cambio en los gradientes, y

$$\sigma_k = \frac{1}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}, \quad D_k^0 = \gamma_k \mathbf{I}, \quad \gamma_k = \frac{\mathbf{s}_{k-1}^T \mathbf{y}_{k-1}}{\mathbf{y}_{k-1}^T \mathbf{y}_{k-1}}.$$

El factor γ_k es el factor de escalamiento de la matriz de dirección de búsqueda \mathbf{h}_k , la cual está dada por:

$$\mathbf{h}_k = -\mathbf{r}. \quad (7)$$

Este procedimiento escala la dirección de búsqueda \mathbf{h}_k adecuadamente, y el factor de longitud de paso se ajusta a $\alpha_k = 1$, si se cumple la siguiente condición:

$$J(\mathbf{m}_{k+1}) < J(\mathbf{m}_k), \quad (8)$$

donde $J(\mathbf{m}_k)$ es el valor de la función error obtenido a partir de la propagación del campo de onda en el modelo de velocidad \mathbf{m}_k , y $J(\mathbf{m}_{k+1})$ es el valor de la función error obtenido con la actualización del modelo de velocidad dado por el método L-BFGS.

Si la condición dada en la ecuación (8) no se cumple, entonces la longitud de paso α_k disminuye a la mitad hasta que la condición sea satisfecha.

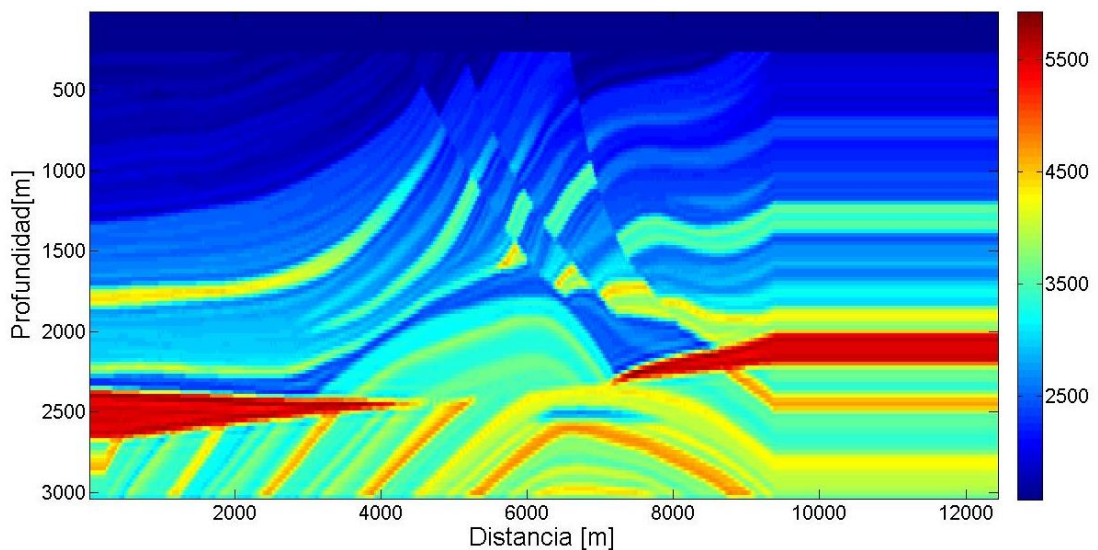
3. RESULTADOS

3.1. DISEÑO GEOMETRIA BLENDED

La solución discreta de la ecuación de onda acústica 2D con densidad constante dada en la ecuación 1, se realiza por medio de diferencias finitas de segundo orden temporal y espacial centradas [15], aplicando fronteras absorbentes CPML de 20 puntos (500 metros) en los límites o fronteras laterales e inferior.

Se utiliza el modelo marmousi de tamaño 3.025 km x 12.425 km (con muestras de 25 metros, obteniendo una cuadrícula de 121 x 497 puntos) como modelo original de velocidad del subsuelo, (ver figura 4). Se define el rango de trabajo en distancia horizontal de 500 a 11925 metros de tal forma que el modelo restante se utiliza como fronteras laterales.

Figura 4. Modelo de velocidad inicial.



Se define el retardo de la fuente en un intervalo de 0 a 0.7 segundos, tomando adquisiciones de 2.5 segundos, de manera que en el límite superior del intervalo se obtiene al menos 1.8 segundos de propagación y por lo tanto suficiente

información del subsuelo. Debido a que la codificación en tiempo para disparos *blended*, ecuación 2, debe generar aleatoriamente tanto el localizador espacial x_n como la codificación en tiempo t_n ; se emplea las funciones `randi()` y `rand()` de MATLAB para obtener el vector de localización espacial y la codificación en tiempo, respectivamente. Estas funciones generan números aleatorios a partir de una distribución de probabilidad uniforme la cual asigna la misma probabilidad de aparición a todos los números.

Para este proyecto se determina que un disparo *blended* o *super-shot* está formado a partir de cinco disparos tradicionales, por lo tanto, es necesario generar 5 posiciones y 5 retardos aleatorios diferentes dentro del rango de trabajo delimitado para cada *super-shot*. El empleo de un número pequeño de disparos para la generación de números aleatorios por medio de las funciones de Matlab produce datos que a pesar de regirse por una distribución uniforme se presentan concentrados en el mismo rango tanto en distancia como en retardo en tiempo, generando superposición entre disparos y grandes zonas sin información.

La figura 5 representa la codificación de 4 *super-shots* empleando directamente los datos generados por las funciones `randi()` y `rand()` de Matlab; obteniendo 4 sets de 5 disparos cada uno codificados en tiempo en el intervalo de 0 a 0.7 segundos. Los vectores de localización son x_{Pbl1} [116 131 148 122 140], x_{Pbl2} [344 320 459 364 428], x_{Pbl3} [365 394 375 336 459] y x_{Pbl4} [146 174 288 251 270], para los *super-shots* 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

Figura 5. Codificación disparos *blended* sin restricciones.

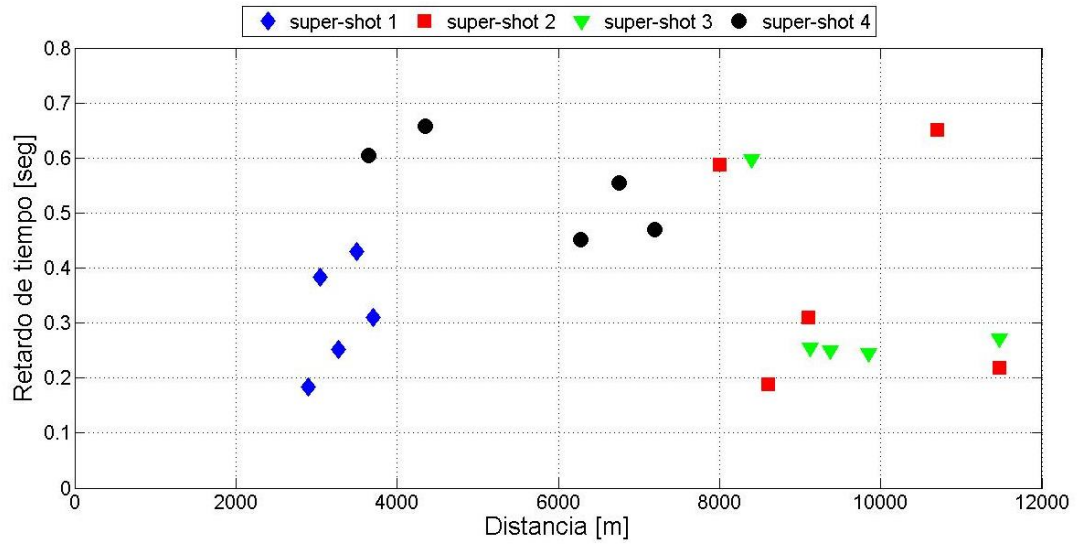
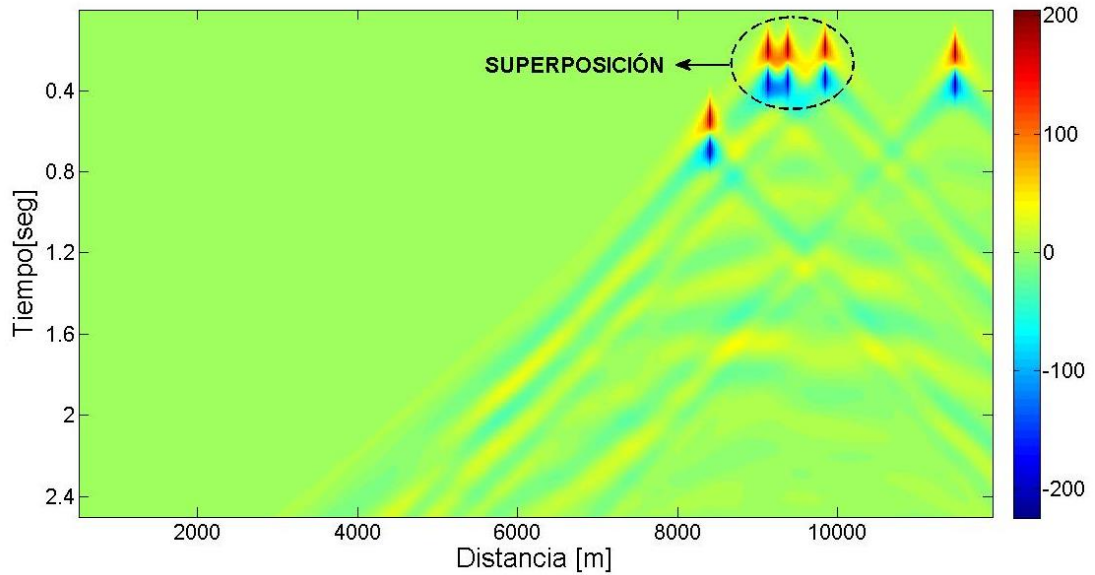


Figura 6. Dato en superficie super-shot 3 sin restricciones.



Como se puede observar en la figura 6 se representa el super-shot 3 en superficie, con localizador espacial $x_{p_{bl3}}$ [365 394 375 336 459] y función codificación en tiempo $t_{p_{bl3}}$ [0.2545 0.2461 0.2507 0.5985 0.2715]. En esta figura se observa que los tres disparos centrales se encuentran cercanos tanto en tiempo como en

distancia superponiéndose y distorsionando la zona del disparo que es la de mayor energía. Además no se cuenta con información en el rango de 0 a 4000 metros de la región de exploración. Resultados similares se obtienen en el resto de los *super-shots* presentes en la figura 5.

Por lo tanto, fue necesario restringir la generación de números aleatorios de manera que haya un espaciamiento mínimo entre los datos generados, tanto de distancia como de retardo en tiempo. Para limitar la generación de los datos sin perder el hecho de que sea aleatoria se definió el espaciamiento como:

$$esp = \frac{\lim_{sup} - \lim_{inf}}{2k}, \quad (9)$$

siendo k el número de disparos dentro del *super-shot*. De esta manera, cada dato generado con las funciones `randi()` y `rand()` de MATLAB, deben estar separados al menos por $\pm esp$ de los anteriores, dentro de cada *super-shot*. Para generar más de un *super-shot* el vector de localización espacial y la codificación en tiempo del set de datos anteriores debe ser almacenado y compararse con los nuevos valores generados de manera que no existan disparos con la misma codificación.

En la figura 7 se observa que la implementación de las restricciones genera disparos espaciados dentro de cada *super-shot* en la región de trabajo definida y sets de datos diferentes para cada *super-shot*. Los nuevos vectores de localización son: x_{pbl1} [371 89 207 130 421], x_{pbl2} [450 175 78 253 320], x_{pbl3} [25 215 297 400 105] y x_{pbl4} [152 43 264 455 351], para los *super-shots* 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

Cada *super-shot* de forma individual obtiene información de toda el área de adquisición sin presentar superposiciones en la región cercana a la fuente como se puede observar en la figura 8, que representa el *super-shot* 3 con localizador

espacial x_{pbl3} [25 215 297 400 105] y función codificación en tiempo t_{pbl3} [0.3512 0.5489 0.1524 0.4328 0.6212].

Figura 7. Codificación disparos *blended* con restricciones.

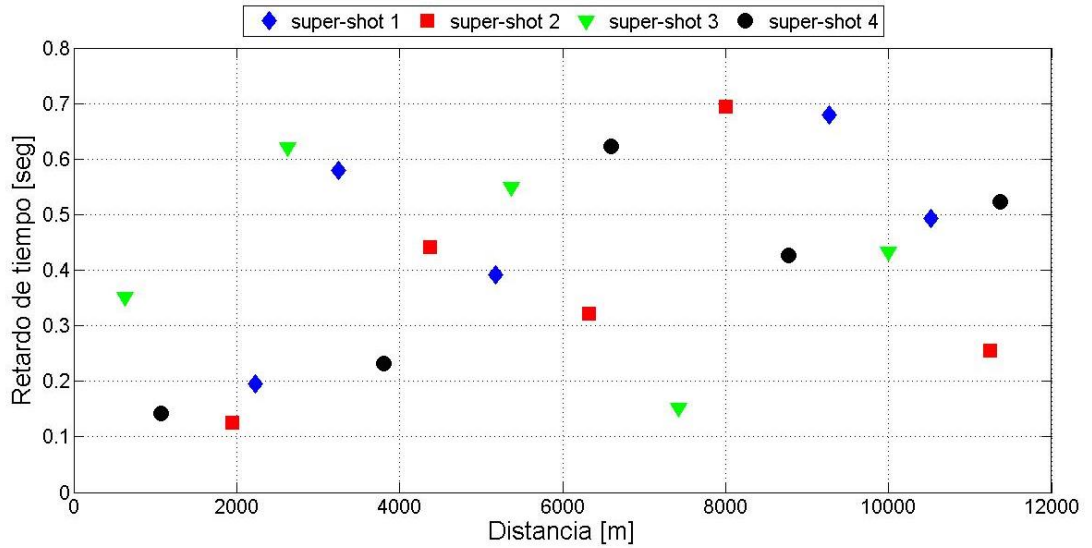
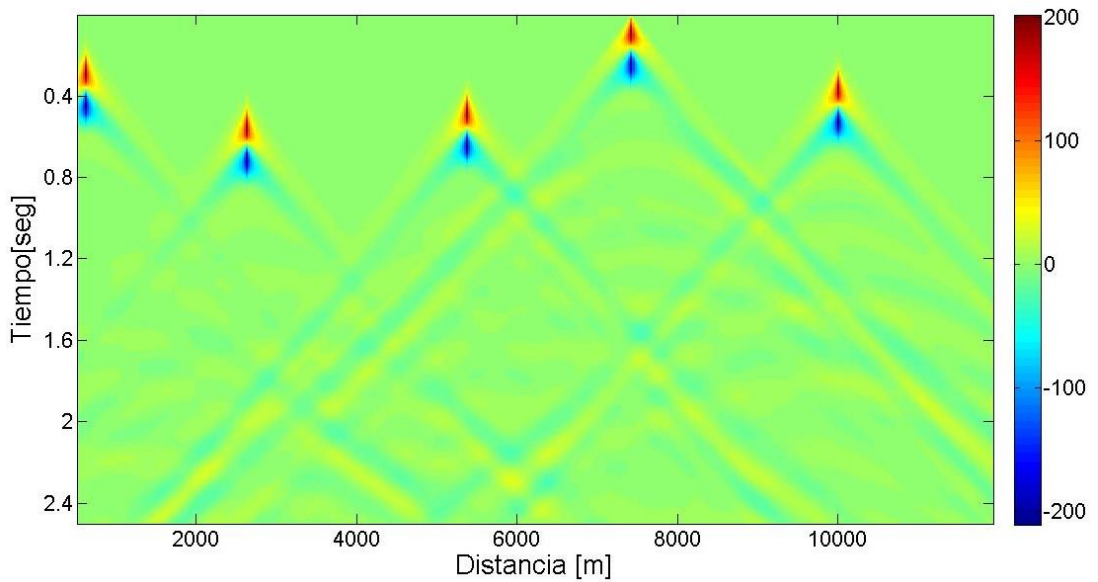


Figura 8. Dato en superficie super-shot 3 con restricciones.

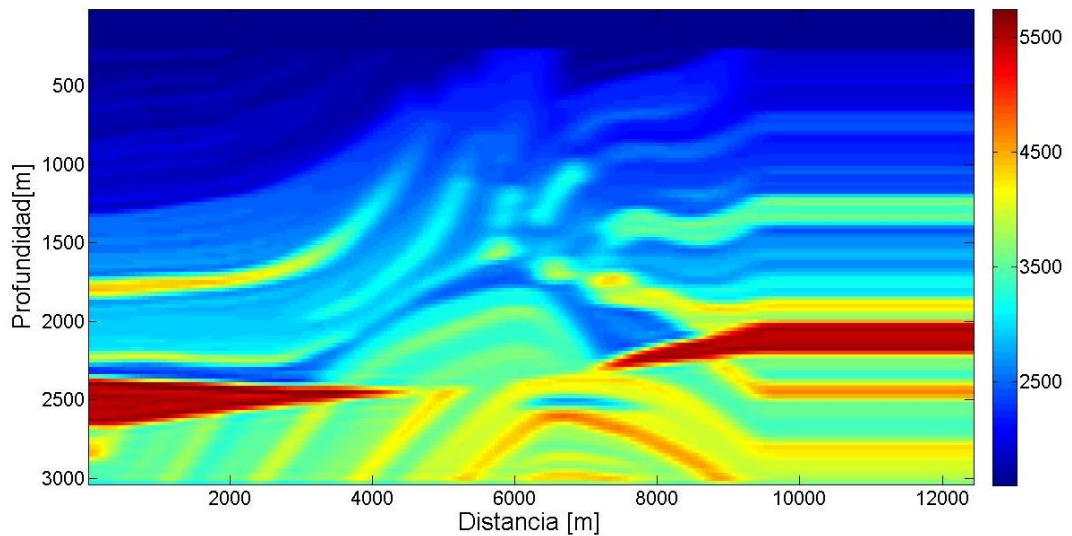


Los datos sintéticos adquiridos, necesarios para la realización de la inversión, fueron generados empleando la codificación con restricciones tomando el mismo número de disparos tanto en geometría tradicional como en la geometría *blended*, con fuentes simultáneas (*super-shot*) creadas a partir de 5 fuentes aleatoriamente codificadas. Obteniendo cuatro sets de datos diferentes con 5, 10, 15 y 20 disparos; siendo 1, 2, 3, y 4 *super-shots* respectivamente.

3.2. FWI PARA DATOS BLENDED

El modelo de velocidad inicial para el modelo FWI se presenta en la figura 9, el cual es una versión suavizada del modelo marmousi original, (ver figura 8). La versión suavizada se obtiene promediado el modelo original 20 veces con una ventana de 5 pixeles en el eje horizontal.

Figura 9. Modelo de velocidad suavizado.



El primer paso para la implementación de la inversión de onda completa usando el método L-BFGS, es la determinación del número de elementos previos que van a ser almacenados (parámetro m). Para este propósito se realiza una FWI para ambas geometrías, *blended* y tradicional, tomando diferentes valores de m (2,4,6,8,10) con criterio de parada de 50 iteraciones y un dato adquirido de cinco disparos (1 *super-shot*) con frecuencia de la ondícula fuente de 3[Hz].

La tabla 1 muestra el tiempo promedio de ejecución de 150 iteraciones, excepto las dos primeras iteraciones que emplean un factor de escalamiento constante. La tabla presenta también la norma l_2 del error entre el modelo estimado y el modelo real, para cada valor del parámetro m . Por medio de esta medida de error, entre el

modelo de velocidad final y el modelo de velocidad original, es posible determinar la semejanza entre éstos. Para un menor valor de error, se espera que el modelo estimado sea más cercano al modelo original.

El comportamiento de la inversión al aumentar el número de datos acumulados (parámetro m) tanto en la geometría *blended* como en la geometría tradicional es el esperado del método L-BFGS, a mayor información almacenada de los gradientes y modelos obtenidos en iteraciones anteriores; se obtiene una aproximación mejor en la siguiente iteración, obteniendo un valor menor de la norma l_2 a medida que aumenta el número de datos almacenados.

A pesar de la mejora en el modelo de velocidad comparando los resultados para $m=2$ y $m=10$, siendo estos los extremos evaluados del método L-BFGS, la mejora del modelo representa solo el 0.22% en los datos *blended* y de 0.44% en los tradicionales. Por otro lado, incrementa el tiempo de ejecución por iteración en un 40% y 53%, para $m=2$ y $m=10$, respectivamente, duplicando aproximadamente el tiempo empleado en ambas geometrías. Para todas las pruebas que se presentan a continuación se seleccionó $m=2$.

Tabla 1. Parámetro m , frecuencia 3[Hz] y 5 disparos

m	Geometría <i>blended</i>		Geometría tradicional	
	Tiempo FWI (min)	l_2 modelo	Tiempo FWI (min)	l_2 modelo
2	2.989 \pm 0.056	2.9714 10^4	4.126 \pm 0.067	2.9209 10^4
4	3.270 \pm 0.022	2.9710 10^4	4.550 \pm 0.036	2.9202 10^4
6	3.582 \pm 0.030	2.9684 10^4	5.123 \pm 0.031	2.9147 10^4
8	3.914 \pm 0.043	2.9678 10^4	5.702 \pm 0.044	2.9136 10^4
10	4.198 \pm 0.058	2.9649 10^4	6.294 \pm 0.039	2.9081 10^4

Para la realización de la FWI en todos los experimentos se utilizó el enfoque multiescala [16], donde la inversión se lleva a cabo de baja a alta frecuencia;

siendo el modelo de velocidad final generado por una frecuencia, la entrada para la inversión de la siguiente frecuencia. Con el fin de comparar el algoritmo FWI para geometría *blended* y tradicional se utilizaron tres frecuencias: $f = 3, 8, 15$ [Hz] durante la inversión, con un número de 50 iteraciones por frecuencia.

La tabla 2 muestra el tiempo promedio de ejecución de la FWI para 150 iteraciones en ambas geometrías. Se puede notar que el tiempo de ejecución es menor para una adquisición con datos *blended* que para una adquisición tradicional. De hecho, es 1.8 veces más rápido cuando se emplean como dato observado 4 *super-shots* (20 disparos), aumentando la relación a medida que se aumenta el número de *super-shots* en la inversión.

Tabla 2. Resultados para FWI multiscale, frecuencia 15[Hz]

Disparos	Geometría <i>blended</i>			Geometría tradicional		
	Tiempo FWI (min)	l_2 modelo	$J(m)$	Tiempo FWI (min)	l_2 modelo	$J(m)$
5	2.989 ± 0.056	$2.7808 \cdot 10^4$	$4.5293 \cdot 10^5$	4.126 ± 0.067	$2.5807 \cdot 10^4$	$2.8980 \cdot 10^5$
10	5.999 ± 0.102	$2.6376 \cdot 10^4$	$1.3287 \cdot 10^6$	9.137 ± 0.089	$2.4837 \cdot 10^4$	$7.3092 \cdot 10^5$
15	8.840 ± 0.087	$2.5586 \cdot 10^4$	$2.0281 \cdot 10^6$	14.429 ± 0.085	$2.4606 \cdot 10^4$	$1.1054 \cdot 10^6$
20	11.682 ± 0.07	$2.5018 \cdot 10^4$	$2.9205 \cdot 10^6$	21.085 ± 0.087	$2.4418 \cdot 10^4$	$1.6715 \cdot 10^6$

La implementación del método L-BFGS en la inversión implica que no todas las iteraciones obtendrán el mismo valor de tiempo, ya que este está ligado al número de ciclos que realiza el método hasta obtener el gradiente escalado de forma correcta; obteniendo diferentes rangos de tiempo para una misma FWI. Esto se puede observar en las figuras 10 y 11, donde presentan los tiempos para 150 iteraciones de una FWI realizada con 20 disparos tanto para geometría *blended* (4 *super-shots*) como para geometría tradicional.

Una correcta implementación de método L-BFGS, implica que la mayoría de las iteraciones cumplan la condición de aceptación, (ver ecuación 8), sin tener que pasar por el ciclo de escalamiento; siendo esta la franja de tiempo inferior en las figuras 10 y 11. El tiempo promedio por iteración para cada FWI se calculó empleando los tiempos de las iteraciones que no necesitan ciclo de escalamiento. El comportamiento en tiempo de todas las implementaciones de FWI es similar al mostrado en las figuras 10 y 11.

Figura 10. Tiempo iteración FWI blended, 4 super-shots

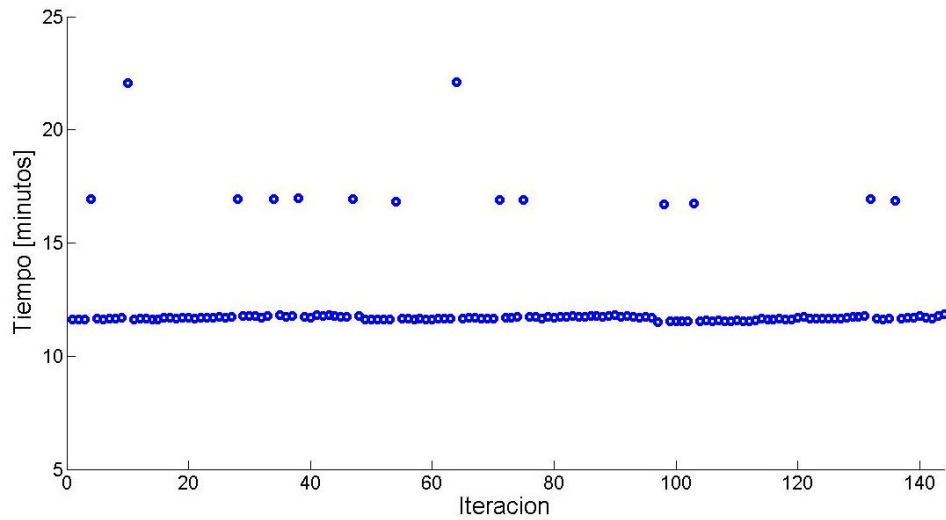
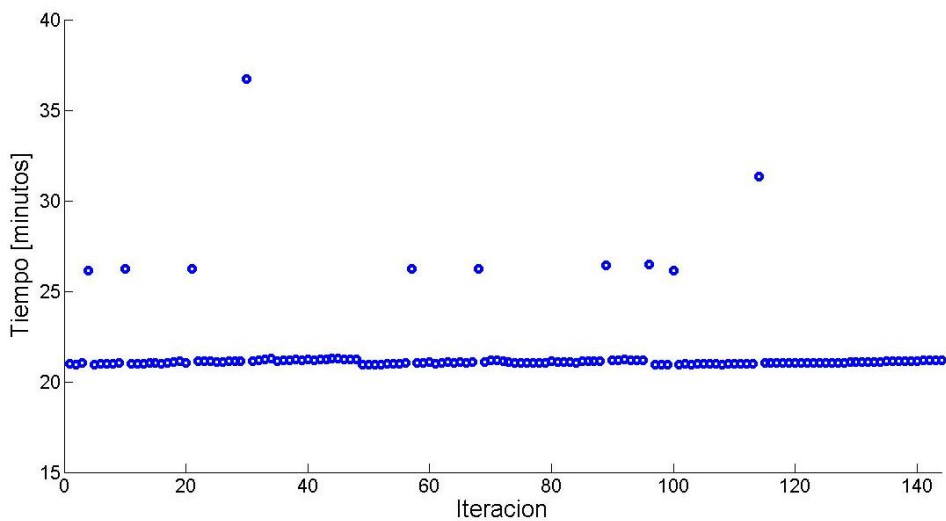


Figura 11. Tiempo iteración FWI blended, 20 disparos



La tabla 2 también presenta el error dado por la norma l_2 de la diferencia entre el modelo de velocidad final, obtenido después de la FWI multiescala, y el modelo de velocidad original; tanto para geometría tradicional como geometría *blended*. Este error muestra que el modelo estimado usando ambas geometrías es similar, y es claro que el incremento del número de disparos genera un modelo estimado más cercano al modelo original. Finalmente, la última columna de la tabla 2 muestra el último valor de la función error entre trazas $J(\mathbf{m})$. Dado que el parámetro de parada se establece para que sea tras un número de iteraciones en ambas geometrías, el último valor de la función error $J(\mathbf{m})$ varía para diferente número de fuentes.

Las figuras 12, 14, 16 y 18 muestran el modelo final de la FWI multiescala usando geometría *blended* con 1, 2, 3 y 4 *super-shots*, respectivamente. Figuras 13, 15, 17 y 19 el modelo de velocidad estimado empleando geometría tradicional con 5, 10, 15 y 20 disparos. Se puede observar en los resultados de la FWI con datos *blended* que, a pesar de una adecuada recuperación del modelo, están presentes pequeños artefactos o errores en la imagen resultante. Estos errores se obtienen debido a la superposición de las fuentes *blended*; presentando menor interferencia en modelos con mayor número de *super-shots*, (ver figura 18). Una forma de mejorar el modelo de velocidad estimado se puede obtener mediante el uso de un mayor número de fuentes y frecuencias para la ondicula fuente.

Figura 12. Modelo de velocidad final con 1 super-shot *blended*.

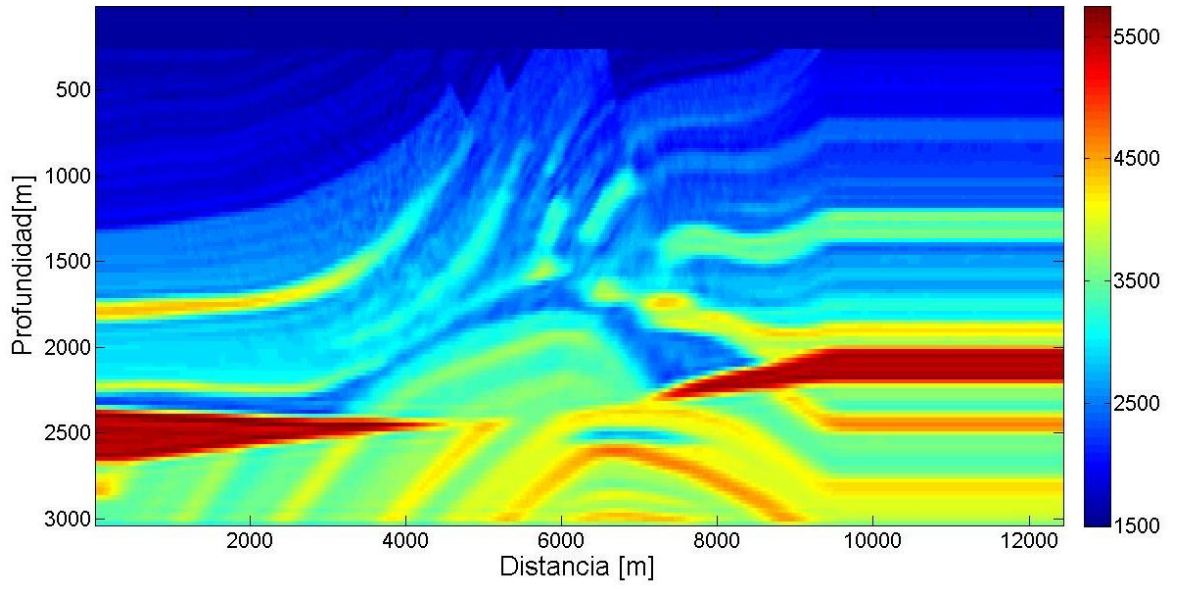


Figura 13. Modelo de velocidad final con 5 disparos tradicionales.

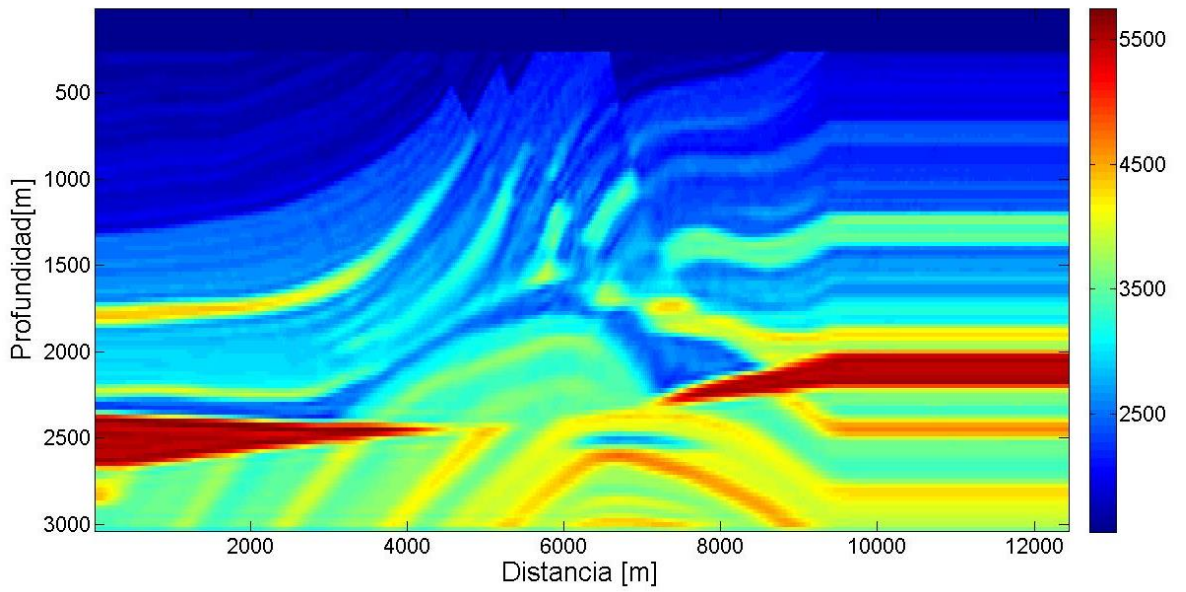


Figura 14. Modelo de velocidad final con 2 super-shots *blended*.

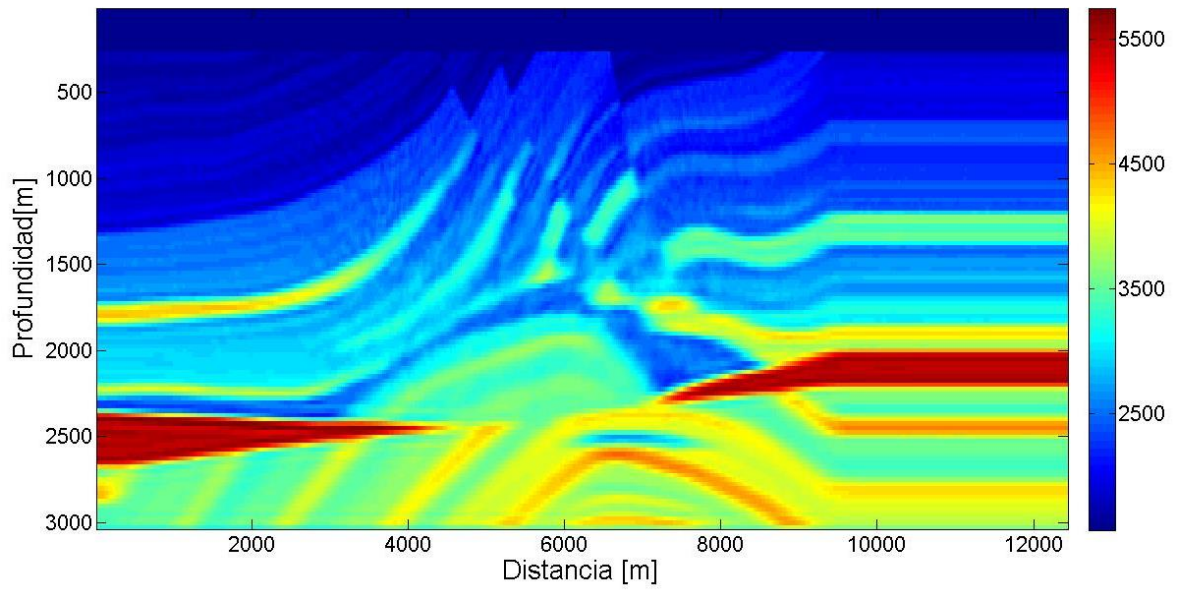


Figura 15. Modelo de velocidad final con 10 disparos tradicionales.

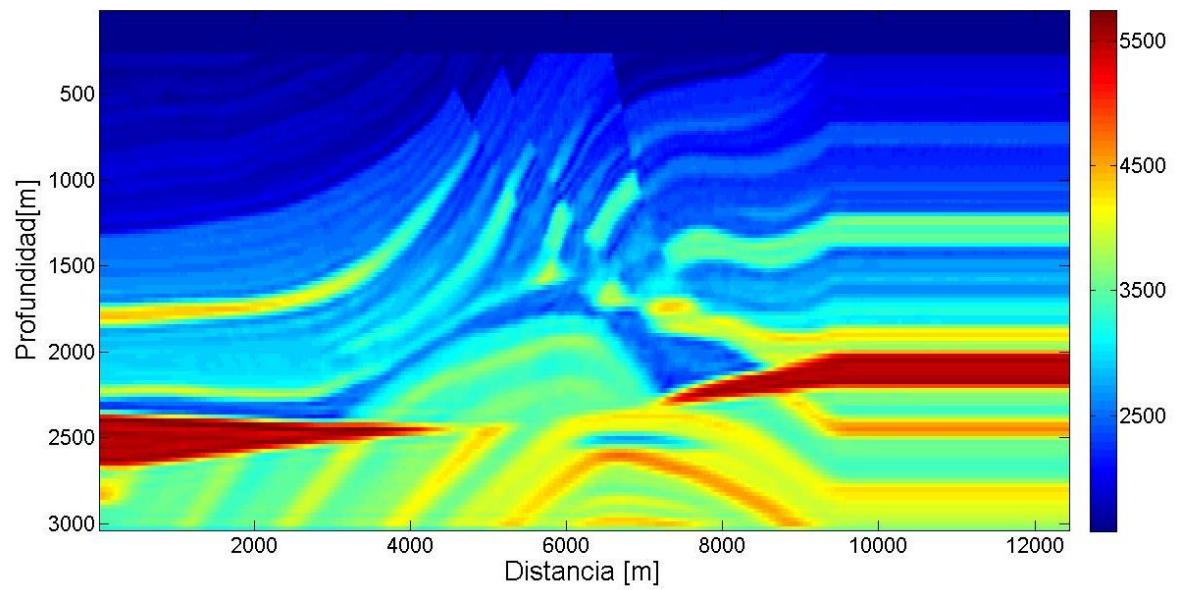


Figura 16. Modelo de velocidad final con 3 super-shots *blended*.

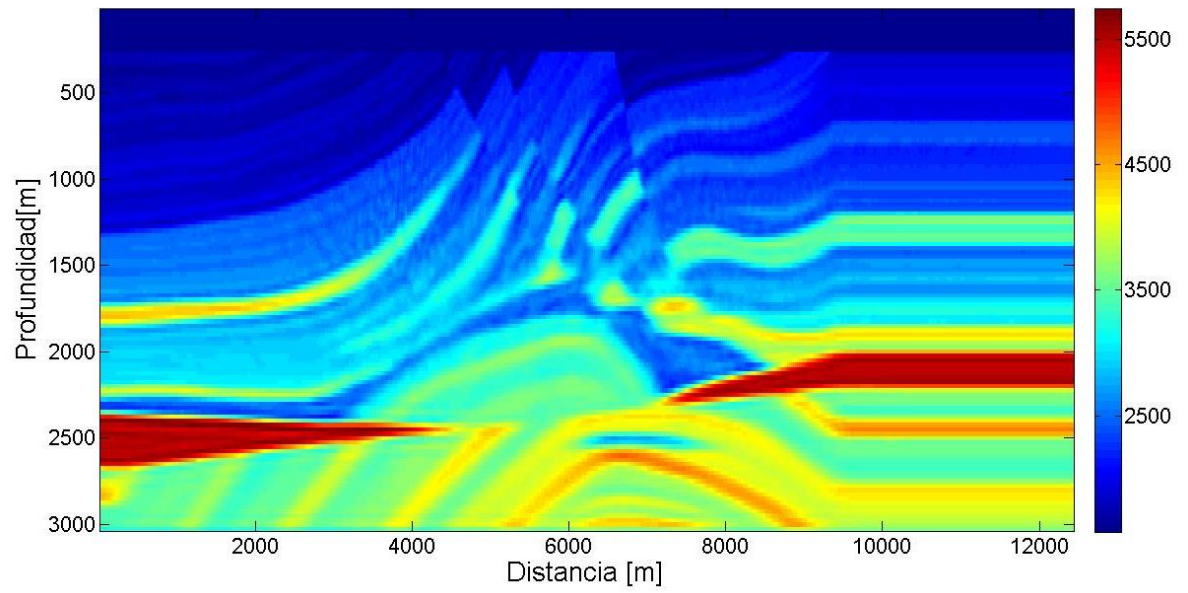


Figura 17. Modelo de velocidad final con 15 disparos tradicionales.

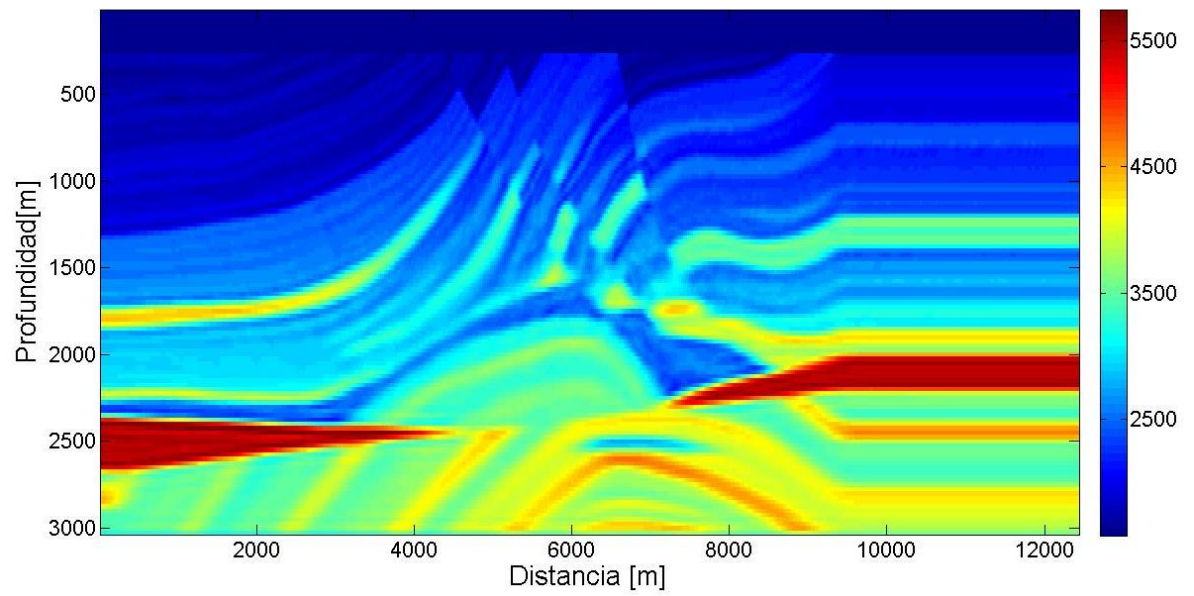


Figura 18. Modelo de velocidad final con 4 super-shots *blended*.

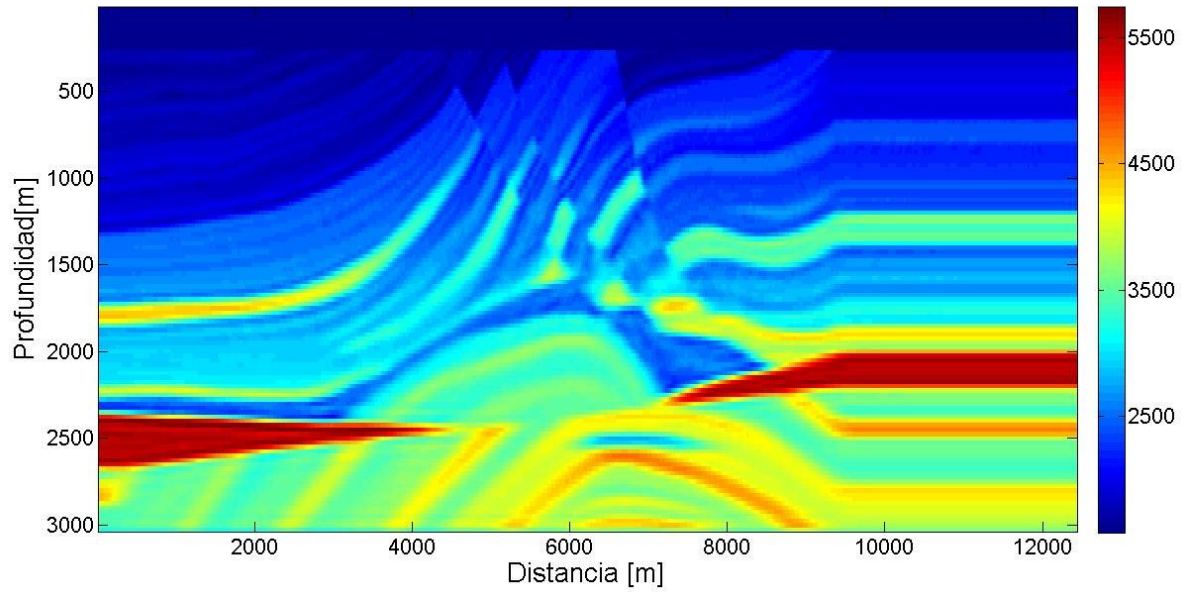
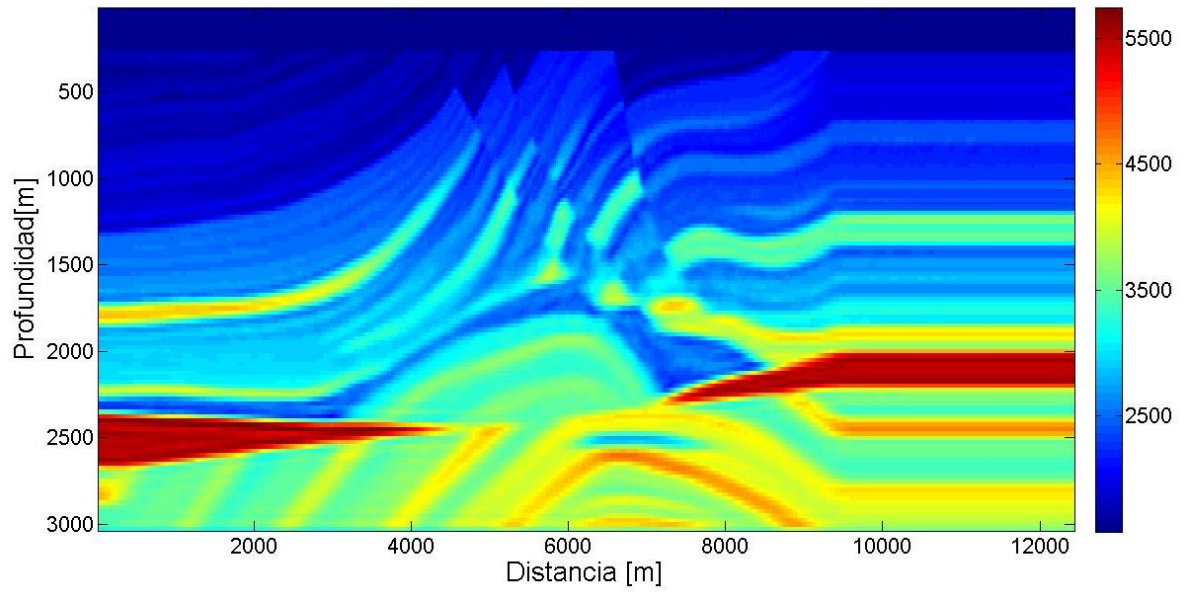


Figura 19. Modelo de velocidad final con 20 disparos tradicionales.



3.3. FACTOR BLENDED

Si en lugar de aumentar el número de *super-shots* en la realización de la FWI *blended*, se decide aumentar el número de disparos simultáneos contenidos dentro del *super-shot*, se debe tener en cuenta el factor *blended*, la razón entre el número de disparos tradicionales contenidos dentro del disparo *blended* o *super-shot*.

$$\text{Factor blended} = \frac{\# \text{ disparos tradicionales}}{\# \text{ disparos blended}}, \quad (7)$$

Se realiza la implementación de la FWI *blended* utilizando diferente número de disparos simultáneos, haciendo un barrido de 2 a 10 disparos. En las figuras 20, 21, 22 y 23 se presentan los modelos de velocidad finales para factores blended de 3, 5, 8 y 10 respectivamente; de manera que a medida que aumentamos el número de disparos simultáneos la imagen final presenta mayor distorsión.

Figura 20. Factor blended de 3.

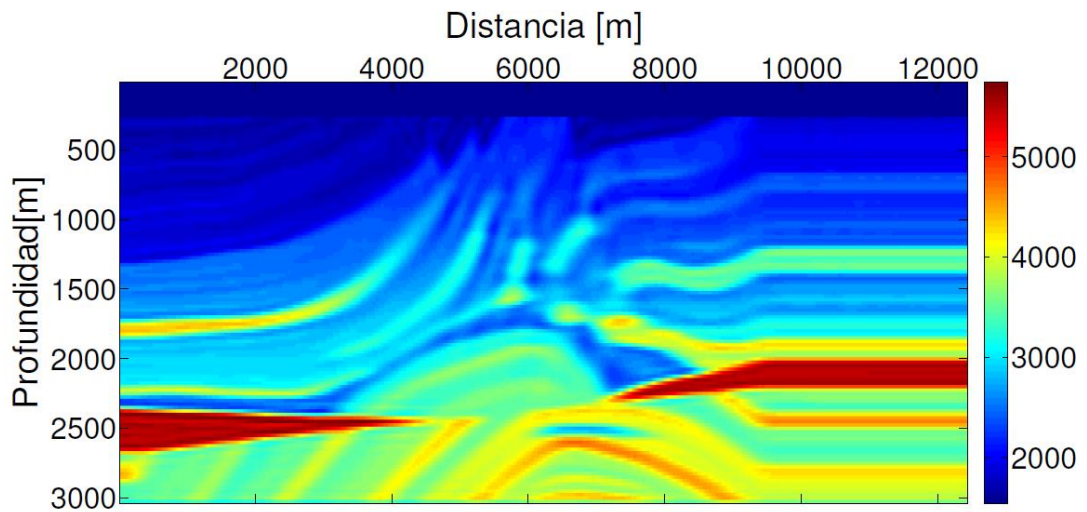


Figura 21. Factor blended de 5.

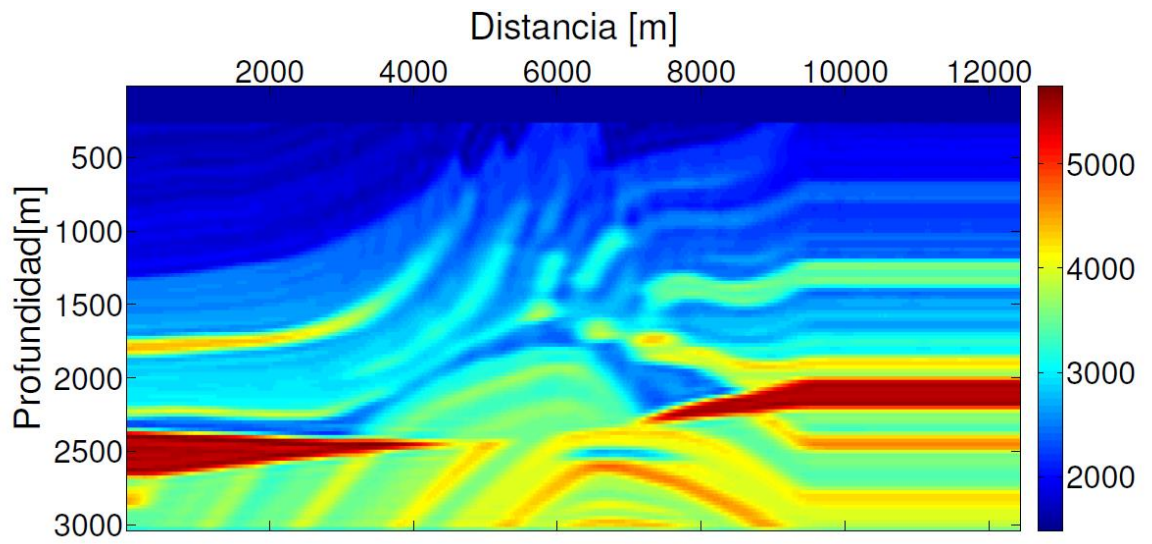


Figura 22. Factor blended de 8.

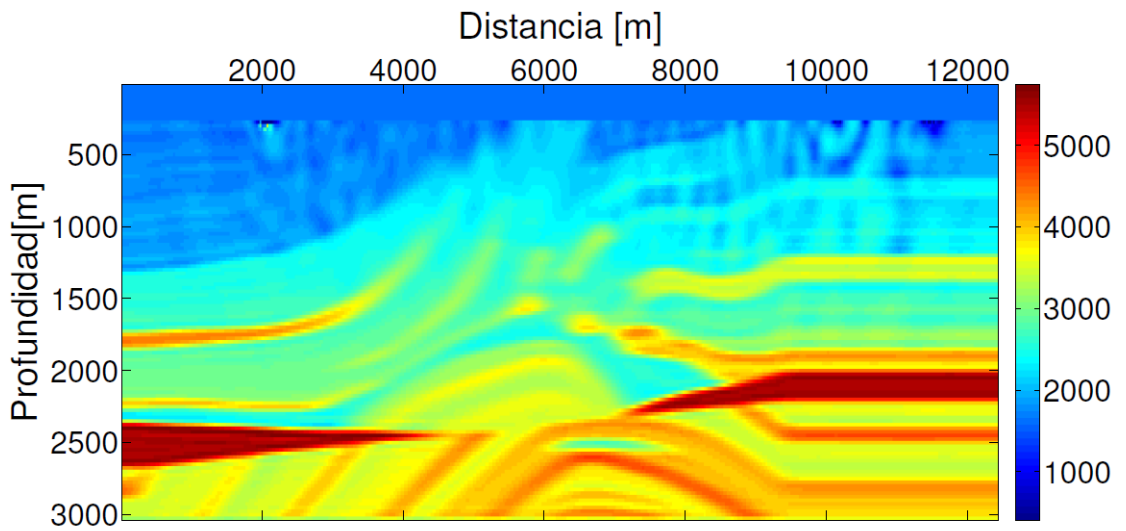
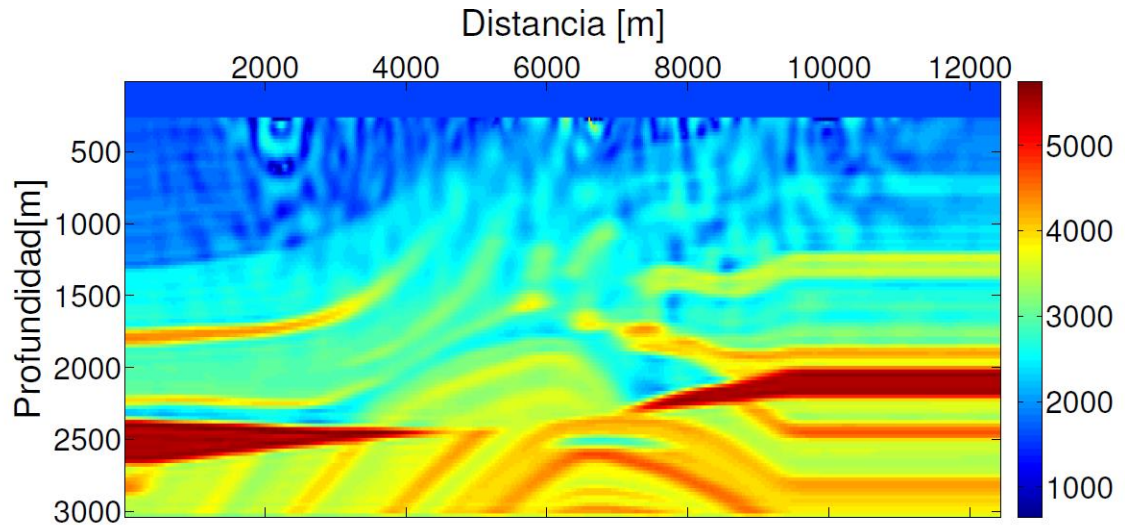


Figura 23. Factor blended de 10.



La evolución del error relativo entre el modelo de velocidad final con geometría *blended* y el modelo de velocidad final con geometría tradicional se presenta en la figura 23. Aumentando la diferencia entre los modelos a medida que aumentamos el número de disparos simultáneos dentro del *super-shot*.

De la misma forma a medida que aumentamos el factor *blended*, la aceleración de la FWI *blended* con respecto a la FWI tradicional aumenta, (ver figura 24) ya que el número de retropropagación disminuye con respecto a una geometría tradicional. De manera que es necesario determinar un punto de equilibrio entre la aceleración de la FWI y la calidad de la imagen resultante. Para este proyecto se determina que el punto de equilibrio es de 5 disparos simultáneos, obteniendo para un solo *super-shot* una aceleración de 1.38 veces más rápido y un error relativo de 1.76 % con respecto a la FWI tradicional.

Figura 24. Evolución error relativo L2

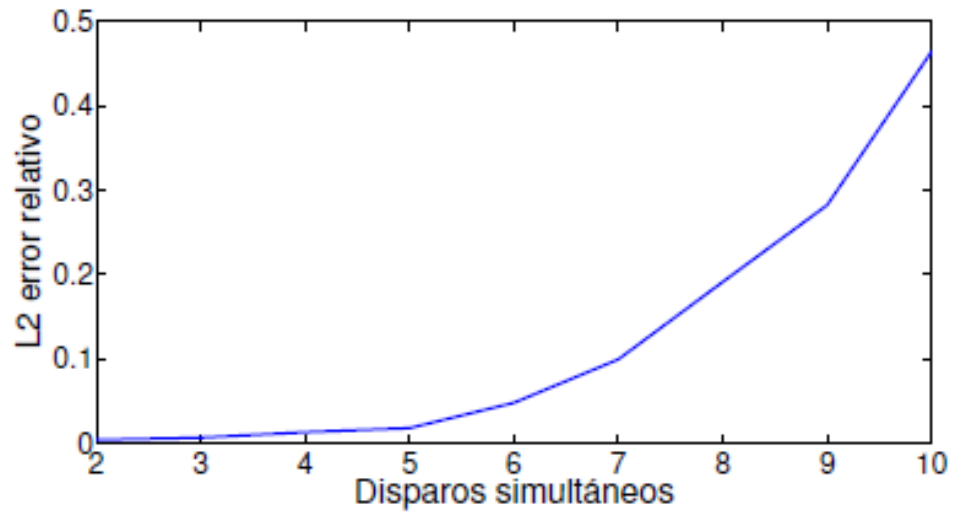
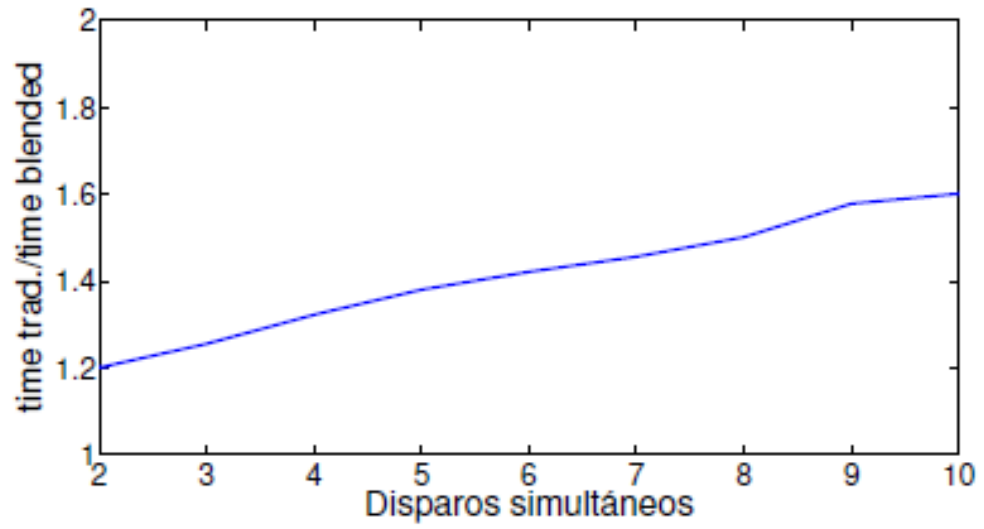


Figura 25. Evolución razón de tiempo.



4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1. CONCLUSIONES

- Se realizó un diseño de la geometría de adquisición *blended* empleando codificación aleatoria en posición espacial y retardo en tiempo, con restricción en el espaciamiento mínimo entre los datos generados; obteniendo *super-shots* sin superposiciones en la región cercana a la zona de disparo.
- En este trabajo, se ha presentado un método para FWI a partir de datos sísmicos *blended*. La estrategia FWI evita el *de-blending*, o separación de disparos, etapa necesaria cuando la adquisición sísmica marina se realiza con fuentes codificadas.
- En este trabajo de investigación se comparó los modelos de velocidades obtenidos con la FWI para ambas geometrías. La implementación del método de inversión de onda completa para geometría *blended* muestra que es adecuado para estimar modelos de velocidad y emplea menos tiempo de ejecución que la FWI para datos sísmicos adquiridos de forma tradicional.

4.2. OBSERVACIONES

- Incrementando el número de disparos *blended* permite recuperar un modelo de velocidad mejor, reduciendo la interferencia destructiva presente en la imagen.
- La reducción en el tiempo de ejecución se obtiene porque el gradiente se calcula utilizando únicamente la retropropagación del residual para cada

super-shot, mientras que para la FWI tradicional requiere tantas propagaciones del residual como número de disparos estén disponibles.

- La distorsión en la imagen del modelo de velocidad final, para el caso *blended*, fue causada por la pérdida de información obtenida en la superposición de las fuentes. Esta interferencia destructiva puede ser reducida incrementando el número de *super-shots* o incluyendo restricciones adicionales en el proceso inverso.

4.3. TRABAJO FUTURO

Se propone la generación de la codificación aleatoria para las fuentes *blended* empleando métodos capaces de ubicar de manera óptima, tanto temporal como espacialmente, los disparos. Esto permite obtener datos con menor superposición entre disparos necesarios para recuperar un modelo de velocidad libre de interferencia.

REFERENCIAS

- [1] VIRIEUX, Jean & OPERTO, Stéphane. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, 2009, vol. 74, no 6, p. WCC1-WCC26.
- [2] KREBS, Jerome R.; ANDERSON, John E.; HINKLEY, Davis; NEELAMANI, Ramesh; LEE, Sunwoong; BAUMSTEIN, Anatoly y LACASSE & Martin-D. Fast full-wavefield seismic inversion using encoded sources. *Geophysics*, 2009, vol. 74, no. 6, p. WC177-WCC188.
- [3] OGP. An overview of marine seismic operations. 2011, vol. 448.
- [4] BEN-HADJ-ALI, Hafedh; OPERTO, Stéphane & VIRIEUX, Jean. An efficient frequency-domain full waveform inversion method using simultaneous encoded sources. *Geophysics*, 2011, vol. 76, no 4, p. R109-R124.
- [5] ANAGAW, Amsalu Y. & SACCHI, Mauricio D. Full Waveform Inversion Using Blended Acquisition Geometry with Different Frequency Strategies. En 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. 2012.
- [6] BEASLEY, Craig J.; CHAMBERS, Ronald E.; JIANG, Zerong & others. A new look at simultaneous sources. 1998, vol. 17, no. 1, p. 133-135.
- [7] MARTINELLI, José C.; SOUZA, Alan A.; BULCÃO, André; PEREIRA-DIAS, Bruno; FILHO, Djalma M.; FARIAS, Fernanda F.; ALVES, Gustavo C.; SANTOS, Luiz A.; DA CRUZ, Ricardo F & LOUREIRO, Felipe P. Full Waveform Inversion: Confronting Conventional and Blended Acquisition. (*ed.*). *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013*. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2013. p. 303-306

- [8] ROMERO, Louis A.; GHIGLIA, Dennis C.; OBER, Curtis C. & MORTON, Scott A. Phase encoding of shot records in prestack migration. 1999, vol. 65, no. 2, p. 426-436.
- [9] BERKHOUT, A. J.; BLACQUIÈRE, Gerrit; VERSCHUUR, Eric & others. From simultaneous shooting to blended acquisition. *En 2008 SEG Annual Meeting*. Society of Exploration Geophysicists.
- [10] MAHDAD, Araz. Deblending of seismic data. TU Delft, Delft University of Technology, 2012.
- [11] TARANTOLA, Albert. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 1984, vol. 49, no 8, p. 1259-1266.
- [12] PLESSIX, R.-E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications. *Geophysical Journal International*, 2006, vol. 167, no 2, p. 495-503
- [13] NOCEDAL, Jorge. Updating quasi-Newton matrices with limited storage. *Mathematics of computation*, 1980, vol. 35, no 151, p. 773-782.
- [14] NOCEDAL, Jorge & WRIGHT, Stephen. *Numerical optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [15] ABREO C., Davis L. Implementacion de una inversion de onda completa(FWI) 2-D sobre una arquitectura GPU. Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, 2015.

- [16] SIRGUE, Laurent & PRATT, R. Gerhard. Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies. *Geophysics*, 2004, vol. 69, no 1, p. 231-248.
- [17] ANAGAW, Amsalu Y. & SACCHI, Mauricio D. Comparison of multifrequency selection strategies for simultaneous-source full-waveform inversion. *Geophysics*, 2014, vol. 79, no 5, p. R165-R181.

BIBLIOGRAFÍA

ABREO C., Davis L. Implementación de una inversión de onda completa (FWI) 2-D sobre una arquitectura GPU. Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, 2015.

ANAGAW, Amsalu Y. & SACCHI, Mauricio D. Full Waveform Inversion Using Blended Acquisition Geometry with Different Frequency Strategies. En 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. 2012.

ANAGAW, Amsalu Y. & SACCHI, Mauricio D. Comparison of multifrequency selection strategies for simultaneous-source full-waveform inversion. *Geophysics*, 2014, vol. 79, no 5, p. R165-R181.

BEASLEY, Craig J.; CHAMBERS, Ronald E.; JIANG, Zerong & others. A new look at simultaneous sources. 1998, vol. 17, no. 1, p. 133-135.

BEN-HADJ-ALI, Hafedh; OPERTO, Stéphane & VIRIEUX, Jean. An efficient frequency-domain full waveform inversion method using simultaneous encoded sources. *Geophysics*, 2011, vol. 76, no 4, p. R109-R124.

BERKHOUT, A. J.; BLACQUIÈRE, Gerrit; VERSCHUUR, Eric & others. From simultaneous shooting to blended acquisition. *En 2008 SEG Annual Meeting*. Society of Exploration Geophysicists.

KREBS, Jerome R.; ANDERSON, John E.; HINKLEY, Davis; NEELAMANI, Ramesh; LEE, Sunwoong; BAUMSTEIN, Anatoly y LACASSE & Martin-D. Fast full-wavefield seismic inversion using encoded sources. *Geophysics*, 2009, vol. 74, no. 6, p. WC177-WCC188.

MAHDAD, Araz. Deblending of seismic data. TU Delft, Delft University of Technology, 2012

MARTINELLI, José C.; SOUZA, Alan A.; BULCÃO, André; PEREIRA-DIAS, Bruno; FILHO, Djalma M.; FARIAS, Fernanda F.; ALVES, Gustavo C.; SANTOS, Luiz A.; DA CRUZ, Ricardo F & LOUREIRO, Felipe P. Full Waveform Inversion: Confronting Conventional and Blended Acquisition. (ed.). *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013*. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2013. p. 303-306.

NOCEDAL, Jorge. Updating quasi-Newton matrices with limited storage. *Mathematics of computation*, 1980, vol. 35, no 151, p. 773-782.

NOCEDAL, Jorge & WRIGHT, Stephen. Numerical optimization. Springer Science & Business Media, 2006.

PLESSIX, R.-E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications. *Geophysical Journal International*, 2006, vol. 167, no 2, p. 495-503.

OGP. An overview of marine seismic operations. 2011, vol. 448.

ROMERO, Louis A.; GHIGLIA, Dennis C.; OBER, Curtis C. & MORTON, Scott A. Phase encoding of shot records in prestack migration. 1999, vol. 65, no. 2, p. 426-436.

SIRGUE, Laurent & PRATT, R. Gerhard. Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies. *Geophysics*, 2004, vol. 69, no 1, p. 231-248.

TARANTOLA, Albert. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 1984, vol. 49, no 8, p. 1259-1266.

VIRIEUX, Jean & OPERTO, Stéphane. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, 2009, vol. 74, no 6, p. WCC1-WCC26.