UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA MULTICOMPONENTE UTILIZANDO MODELADO DE REFLECTIVIDADES

Por:
Vanessa Carolina Rodríguez Rahal

PROYECTO DE GRADO
Presentado ante la ilustre Universidad Simón Bolívar
como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Geofísico

Sartenejas, Octubre de 2012

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA MULTICOMPONENTE UTILIZANDO MODELADO DE REFLECTIVIDADES

Por:
Vanessa Carolina Rodríguez Rahal

Realizado con la asesoría de:
Tutor Académico: Profesor Ilich García
Tutor Industrial: Ing. Raúl Cova, (PDVSA, Intevep)

PROYECTO DE GRADO
Presentado ante la ilustre Universidad Simón Bolívar
como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Geofísico

Sartenejas, Octubre de 2012

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
Decanato de Estudios Profesionales
Coordinación de Ingeniería Geofísica

ACTA DE EVALUACIÓN DEL PROYECTO DE GRADO

CÓDIGO DE LA ASIGNATURA: **EP3312** FECHA: **10/07/2012**

ESTUDIANTE: **Vanessa Carolina Rodríguez Rahal** CARNET: **07-41469**

TÍTULO DEL TRABAJO: **"OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA MULTICOMPONENTE UTILIZANDO MODELADO DE REFLECTIVIDADES"**

TUTOR ACADÉMICO: **Prof. Ilich García** TUTOR INDUSTRIAL: **Ing. Raúl Cova**

JURADO: **Prof. Milagrosa Aldana**

APROBADO: [X] REPROBADO : [ ]

OBSERVACIONES: _____

El Jurado considera **por unanimidad** que el trabajo es EXCEPCIONALMENTE BUENO:

SI [ ] NO [ ] En caso positivo, justificar razonadamente: _____

Tutor Académico
Prof. Ilich García

Tutor Industrial
Prof. Raúl Cova

UNIVERSIDAD SIMON BOLIVAR Coordinación de Ingeniería Geofísica

Jurado
Prof. Milagrosa Aldana

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA MULTICOMPONENTE UTILIZANDO MODELADO DE REFLECTIVIDADES

Por:

Vanessa Carolina Rodríguez Rahal

En este trabajo de investigación, se generaron disparos sintéticos basados en las características geológicas, del Bloque 8 ubicado dentro del área de Boyacá en la Faja Petrolífera del Orinoco. El modelado de los datos sintéticos, se realizó a partir del método de las reflectividades, por tener la capacidad de generar datos sísmicos multicomponentes, es decir, componente vertical de propagación de onda P-P y componente radial P-SV. Estos disparos sintéticos, correspondientes a la componente radial y vertical, fueron procesados utilizando una secuencia de procesamiento convencional, que inició con el análisis de velocidades de onda P y onda de cizalla, en el caso de los datos de onda convertida, hasta el apilado de los disparos sintéticos multicomponentes. Luego, se evaluó la influencia de los parámetros de adquisición, en los datos sísmicos de onda convertida: offset máximo y espaciado entre trazas. La evaluación se realizó a partir de la modificación del acondicionamiento de las trazas sísmicas, en las diversas etapas del procesamiento, generando distintas configuraciones de adquisición, para espaciados entre trazas de 40, 30, 20 y 10 metros, y offsets máximos de 650, 1300 y 1950 metros. En general, para espaciados entre trazas de 40 y 30 metros, no se obtuvieron buenos resultados, ya que los disparos sintéticos, presentaban el efecto de aliasing espacial, y las secciones apiladas mostraron una relación S/R baja. Para espaciados de 20 y 10 metros, el efecto de aliasing espacial desapareció y la relación S/R de las secciones apiladas mejoró notablemente. Por otro lado, las secciones apiladas con un offset máximo de 650 metros, no presentaron buenos resultados. En cambio, las secciones apiladas correspondientes a offsets máximos iguales a 1300 y 1950 metros, se caracterizaron por presentar buenas relaciones S/R. Los mejores resultados, se obtuvieron para un offset máximo de adquisición igual a 2 veces la profundidad del objetivo de exploración, 1300 metros, y un espaciado entre geófonos de 20 metros.

A Héctor Rodríguez

A Nouhad Rahal

A Jeniffer Rodríguez

A Jhonny Rodríguez

A Carlos Santoveña

A Venezuela

A nuestra USB

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco con todo el corazón a mis padres: A mi madre, por atenderme, cocinarme, escucharme, consentirme y estar pendiente de mí, en todo momento a lo largo de este proyecto, y de mi carrera universitaria. A mi padre, por ser tan atento y cariñoso conmigo, porque siempre estuvo pendiente de mis exámenes, de mis trabajos, de mis tareas, y de mis avances académicos, así como también, siempre se preocupó por mis subidas y bajadas a Tazón. Son los mejores padres del mundo, les agradeceré hoy, mañana y siempre, por todo el amor que me han brindado, y por siempre estar ahí cuando más los he necesitado. Los amo.

A mis hermanos, Jeniffer y Jhonny, por estar ahí, por hacerme reír, porque ustedes forman parte de lo que soy, gracias por soportar mis amarguras, bipolaridades y cambios sin sentido de humor. Gracias por su apoyo, los amo.

A Carlos Santoveña, mi pareja, mi mejor amigo, mi papá y mi compañero de estudios. Gracias, por lo maravilloso que has sido como novio, por todo el apoyo que me has brindado, por todo el tiempo que me has dedicado, y sobre todo por la paciencia que me has tenido. Eres la mejor persona que he conocido en mi vida, mi otra mitad, mi complemento, espero estar junto a tí el resto de mis días. Te amo Crete hermoso.

A Andrés Bustillos, por ser un amigo incondicional, por estar en las buenas y en las malas, porque compartimos juntos este largo proceso de tesis. Gracias por todo Marga, cuentas conmigo, y de verdad espero que cuando estemos treintones, esta amistad continúe.

A Mónica Rasquin, Francis Peña y a Naileth Mora, mis amigas en las buenas y en las malas, porque aunque hoy estemos distanciadas, les tengo un gran cariño, pasamos momentos inolvidables muchachas, y de verdad les agradezco por compartir conmigo tanto tiempo. Les deseo el mayor de los éxitos.

A Daniel Mata, porque Dios mediante, seremos primos en el futuro, porque has sido más que un amigo, porque has sido mi confidente, porque seremos socios en el futuro, por las parrillas que haremos en tu casa los Domingos, y por todo lo que hemos compartido, gracias Dan, eres tú.

A Ada Zamora, por ser tan bella persona, por ser siempre tan amable y cuchi, por escuchar mis tonterías, estoy muy orgullosa de todo lo que has logrado, Dios sabe que nadie más que tú se lo merece, gracias Moro, siempre estaré para ti.

A Carla Barbara, por ser tan buena amiga, por habernos ayudado a mí y a Carlos, por las noches chéveres en Teatro Bar y Serrano & Manchego, por todo lo que compartimos. Por ese espíritu tan lleno de vida que siempre me contagiaste. Gracias, Carlita.

A Maria Gabriela Labastidas, Magdelin Goitia, GianFranco Lacedre, Alejandro García, Lennon Infante y Freddy Rondón, porque son excelentes personas, porque sé que puedo contar con ustedes. Gracias, por todo el apoyo y la ayuda que me brindaron.

A los muchachos de PDVSA, Intevep: José Pinto, Ketty Flores, Pedro Medina, Yohansel Rodríguez, José Francisco Romero, Carolina González, Elizabeth Rodríguez, Darío Cabrera, Jonathan Palencia, Paula Rivero y Paulina Sánchez, por todos los almuerzos que compartimos, por todas las conversaciones variadas y sobre todo educativas, por los juegos de papelito, pictionary, y por nuestras salidas, tengo muy gratos recuerdos de ustedes muchachos. A los muchachos de la central: Halis, Cesar, Jorge, Atilio, Jesús y Airam, por toda la ayuda que me brindaron.

A Johana Cabeza, porque fue mi apoyo en Intevep, gracias por todas tus explicaciones, por todos los momentos que compartimos, por acompañarme en la lucha del libro y escuchar mis problemas. Espero, que esta amistad que fuimos forjando, no se quede en Intevep, sino que siga creciendo con los años.

A Jonathan Arévalo y Ángel Barreto, por la amistad que hicimos, por todo su apoyo, porque son excelentes personas, de verdad gracias muchachos.

A Raúl Cova, mi tutor industrial, por todas las enseñanzas y conocimientos impartidos, por tener siempre la mejor disposición para ayudarme, porque siempre estuvo cuando más lo necesitaba. Muchas gracias por todo Raúl, eres una persona admirable, te deseo el mayor de los éxitos en todos tus proyectos.

A Ilich García, mi tutor académico, por haberme ayudado a iniciar este proyecto, por todo su apoyo, por todas sus críticas constructivas, por todos sus buenos consejos y enseñanzas. Gracias, profe.

A todos los profesores y preparadores, que a lo largo de mis estudios de pregrado, me otorgaron parte de su conocimiento y me enseñaron las herramientas para enfrentar la vida. En especial, a todos los profesores del Departamento de Ciencias de la Tierra, de la Universidad Simón Bolívar.

ÍNDICE

Resumen……..iv

Dedicatoria……..v

Agradecimientos……..vi

Introducción……...1

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO……..3

1.1. Ubicación geográfica…….....3

1.2. Marco Estructural…...…….……..4

1.3. Marco Estratigráfico……..……...5

1.3.1 Formaciones geológicas presentes en la Secuencia Oligoceno-Mioceno….....7

1.3.1.1 Formación La Pascua…….…….....……7

1.3.1.2 Formación Roblecito…….…….....…….7

1.3.1.3 Formación Chaguaramas…….…….....…….8

CAPÍTULO II: MODELO ESTRATIFICADO DEL ÁREA DE ESTUDIO...……...10

2.1 Revisión y selección de los datos de pozo……..10

2.2. Generación de modelos (Densidad, Velocidad de Onda P y S)…….…...11

2.2.1 Modelo de dos Capas…….....13

2.2.2. Modelo de Cinco Capas.....15

CAPÍTULO III: GENERACIÓN DE DATOS SINTÉTICOS MULTICOMPONENTES MEDIANTE EL MODELADO DE REFLECTIVIDADES.....17

3.1. Sísmica Multicomponente.....17

3.1.1. Fundamentos de ondas convertidas.....19

3.2. Modelado de Reflectividades.....24

3.2.1. Aplicación del modelado de reflectividades: SUREFLPSVSH.....27

3.2.1.1 Parámetros generales.....28

3.2.1.2 Tiempo, Offset, Frecuencia y Parámetro de Rayo.....29

3.2.1.3 Fuente.....30

3.2.1.4 Geófonos.....30

3.2.1.5 Modelo estratificado de la tierra.....30

3.2.2 Influencia de la frecuencia fundamental de la ondicula en los sintéticos.....39

3.2.3 Influencia del parámetro de rayo (p2w) en la generación de los sintéticos.....41

CAPÍTULO IV: PROCESAMIENTO SÍSMICO DE LOS SHOT GATHERS SINTÉTICOS.....43

4.1. Procesamiento de los Shot Gathers sintéticos correspondientes a la componente vertical.....44

4.1.1 Carga de datos en el programa.....44

4.1.1.1. GIN.....45

4.1.1.2. HDRMATH.....46

4.1.1.3. DSOUT.....46

4.1.2. Análisis de Velocidad.....49

4.1.2.1 DSIN.....49

4.1.2.2. AGC (Automatic Gain Control).....50

4.1.2.3. VELDEF.....50

4.1.3. Ganancia por divergencia esférica.....54

4.1.3.1. GAIN.....54

4.1.4. Corrección Normal Move-Out (NMO).....56

4.1.4.1. NMO.....57

4.1.5. Muting.....61

4.1.5.1. MUTE.....61

4.1.6. Apilado de los sintéticos.....65

4.1.6.1. STACK.....65

4.1.6.2. REPEAT.....67

4.2. Procesamiento de los Shot Gathers sintéticos correspondientes a la componente radial.....69

4.2.1 Carga de los datos en el programa.....69

4.2.2 Análisis de Relación Gamma (Vp/Vs).....71

4.2.2.1 DSIN.....71

4.2.2.2 CVELDEF.....71

4.2.3 Ganancia por divergencia esférica.....74

4.2.4 Corrección NMO No hiperbólica.....74

4.2.4.1 CCPNMO.....76

4.2.5 Muting.....79

4.2.6 Apilado de los sintéticos.....81

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA MULTICOMPONENTE.....83

5.1. Variación de parámetros de adquisición sísmica multicomponente.....83

5.1.1. SORT.....84

5.1.1.1. Parámetros generales.....85

5.1.1.2. Parámetros de clasificación de orden primario y secundario.....85

5.2. Análisis Amplitud versus Offset (AVO).....104

5.2.1. Modelo de dos capas.....105

5.2.2. Modelo de cinco capas.....110

Conclusiones y Recomendaciones.....114

Referencias Bibliográficas.....117

APÉNDICE A: Script utilizado para la generación de los disparos sintéticos con el módulo SUREFLPSVSH.....120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación geográfica del área de estudio…….3

Figura 1.2 Sección esquemática de la Faja Petrolífera del Orinoco……..……..5

Figura 1.3 Cuadro Cronoestratigráfico de la Faja Petrolífera del Orinoco, haciendo énfasis en el área de Boyacá……..6

Figura 2.1 Mapa base donde se muestra la ubicación de los pozos……..11

Figura 2.2 Registro Velocidad de onda P, extraído del registro sónico……..……..……..11

Figura 2.3 Registro de pozo: Velocidad de Onda S, extraído del registro sónico……..12

Figura 2.4 Registro Densidad de Bulk……..……..……12

Figura 2.5 Modelo de dos capas. (A) Modelo de Velocidad de Onda P, (B) Modelo de Velocidad de Onda S, (C) Modelo de Densidad……...……..14

Figura 2.6 Modelo de cinco capas. (A) Modelo de Velocidad de Onda P, (B) Modelo de Velocidad de Onda S, (C) Modelo de Densidad……...17

Figura 3.1 Esquema ilustrativo, que muestra las tres direcciones de grabación de la sísmica multicomponente……..……...18

Figura 3.2 Esquema de modo de conversión de energía……19

Figura 3.3 Punto medio (MP) de las ondas P, versus, punto de conversión (CP) de la onda S reflejada……..……..20

Figura 3.4 Comportamiento asintótico del Punto de Conversión……..……...22

Figura 3.5 Variación de la reflectividad con el ángulo de incidencia, para la Onda PP, y la onda P-S, modelado para una interfaz…….....…….23

Figura 3.6 Modelo estratificado……26

Figura 3.7 Shot Gather sintético modelado para dos capas con sus respectivos eventos. (A) Componente Vertical. (B) Componente Radial……..34

Figura 3.8 Shot Gather sintético modelado para cinco capas con sus respectivos eventos. (A) Componente Vertical (B) Componente Radial…….37

Figura 3.9 Variación de la frecuencia fundamental de la Ondícula Ricker, en los sismogramas sintéticos generados para la componente vertical, del modelo de cinco capas, con una longitud de registro de 1 segundo. De izquierda a derecha: 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 Hertz…….....40

Figura 3.10 Influencia del parámetro de rayo, en la generación de los shot Gathers sintéticos. (A) Valor de parámetro de rayo menor a 1. (B) Valor de parámetro de rayo mayor a 1……42

Figura 4.1 Flujograma que describe la secuencia de procesamiento implementada……..43

Figura 4.2 Flujograma de trabajo utilizado para cargar los archivos……44

Figura 4.3 Parámetros utilizados en el Módulo GIN, para la carga de un Shot Gather sintético…….46

Figura 4.4 Parámetros utilizados en el Módulo HDRMATH, para la edición del header de los archivos SEG-Y…….46

Figura 4.5 Parámetros utilizados en el Módulo DSOUT, utilizado para almacenar los archivos de entrada en la base de datos del programa……..47

Figura 4.5 Shot Gathers Sintéticos correspondientes a la componente vertical cargados en Focus, (A) Modelo de dos capas, (B) Modelo de cinco capas……...48

Figura 4.6 Flujograma de trabajo utilizado en el programa, para el almacenamiento de la función velocidad…….49

Figura 4.7 Ventana que muestra los archivos de la base de datos……...49

Figura 4.8 Parámetros utilizados para la aplicación de AGC en la secuencia de procesamiento…….50

Figura 4.9 Modo interactivo del módulo VELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente vertical para un modelado de 2 capas……...52

Figura 4.10 Modo interactivo del módulo VELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente vertical para un modelado de 5 capas……...53

Figura 4.11 Ventana que presenta los valores dados para los parámetros del módulo GAIN, para el modelo de dos capas……..55

Figura 4.12 Ventana que presenta los valores dados para los parámetros del módulo NMO, para el modelo de dos capas……...58

Figura 4.13 Aplicación de la corrección NMO en el shot gather sintético, modelado para dos capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO, la flecha señala el NMO Stretching……..59

Figura 4.14 Aplicación de la corrección NMO en el shot gather sintético, modelado para cinco capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO, la flecha señala el NMO Stretching……..60

Figura 4.15 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para dos capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada…….62

Figura 4.16 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para cinco capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada…….64

Figura 4.17 Rutina de trabajo empleada para el apilado de los shot Gathers sintéticos……...65

Figura 4.18 Traza apilada de un solo disparo, para el modelo de dos capas, luego de aplicar el módulo STACK, para una configuración de adquisición de 400 trazas, con una separación de cinco metros…….....66

Figura 4.19 Traza apilada de un solo disparo, para el modelo de cinco capas, luego de aplicar el módulo STACK, para una configuración de adquisición de 400 trazas, con una separación de cinco metros……66

Figura 4.20 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de 400 geófonos separados 5 metros entre sí, para un modelo de dos capas. Dentro del recuadro, se puede observar el evento de onda PP apilado……...67

Figura 4.21 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de 400 geófonos separados 5 metros entre sí, para un modelo de cinco capas. Dentro del recuadro, se puede observar las reflexiones de onda PP apiladas……68

Figura 4.22 Shot Gathers Sintéticos correspondientes a la componente radial, cargados en Focus, (A) Modelo de dos capas, (B) Modelo de cinco capas……..70

Figura 4.23 Flujograma de trabajo utilizado en el programa, para el almacenamiento de la función Gamma (Vp/Vs)……...71

Figura 4.24 Modo interactivo del módulo CVELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente radial para un modelado de 2 capas……...72

Figura 4.25 Modo interactivo del módulo CVELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente radial para un modelado de 5 capas……...73

Figura 4.26 Aplicación de la corrección NMO al shot gather sintético modelado para dos capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO……...77

Figura 4.27 Aplicación de la corrección NMO al shot gather sintético modelado para cinco capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO……...78

Figura 4.28 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para dos capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada……79

Figura 4.29 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para cinco capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada……80

Figura 4.30 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de 400 geófonos separados 5 metros entre sí, para un modelo de dos capas. (A) Traza apilada correspondiente a un solo disparo. (B) Sección apilada del evento de onda convertida P-S……82

Figura 4.31 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de 400 geófonos separados 5 metros entre sí, para un modelo de cinco capas. (A) Traza apilada correspondiente a un solo disparo. (B) Sección apilada del evento de onda convertida P-S……82

Figura 5.1 Esquema representativo, que muestra las distintas configuraciones de adquisición a evaluar, variando la separación entre trazas. 1) Offset máximo igual a 650 metros. 2) Offset máximo igual a 1300 metros. 3) Offset máximo igual a 1950 metros……84

Figura 5.2 Ventana del programa FOCUS, que muestra los parámetros seleccionados para una configuración de adquisición correspondiente a una separación entre trazas de 40 metros y un offset lejano de 2000 metros……86

Figura 5.3 Ilustración esquemática, que representa en una configuración de adquisición sísmica 2D, la separación entre trazas y el offset máximo……..87

Figura 5.4 Shot gathers sintéticos, modelados para dos capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m……...88

Figura 5.5 Shot gathers sintéticos, modelados para dos capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m……..89

Figura 5.6 Shot gathers sintéticos, modelados para dos capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m……..90

Figura 5.7 Secciones apiladas, para un modelo de dos capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo……...91

Figura 5.8 Secciones apiladas, para un modelo de dos capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo……...92

Figura 5.9 Secciones apiladas, para un modelo de dos capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo……...93

Figura 5.10 Efecto de Aliasing espacial, para el intervalo de 40 y 30 metros entre trazas, para un offset máximo de 1950 metros……....94

Figura 5.11 Shot gathers sintéticos, modelados para cinco capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m……...96

Figura 5.12 Shot gathers sintéticos, modelados para cinco capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m……97

Figura 5.13 Shot gathers sintéticos, modelados para cinco capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m……...98

Figura 5.14 Secciones apiladas, para un modelo de cinco capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo……...99

Figura 5.15 Secciones apiladas, para un modelo de cinco capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo……100

Figura 5.16 Secciones apiladas, para un modelo de cinco capas, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo……101

Figura 5.17 Esquema del modelo de cinco capas, que muestra la proporción de los espesores de los estratos……...102

Figura 5.18 Shot Gathers sintéticos, para un offset máximo de 1950 metros. El evento A corresponde al tope de la formación La Pascua, el B representa el tope del Cretácico, y el C muestra el tope del Pre-Cretácico. Las flechas representan los cambios de fase……103

Figura 5.19 Comparación directa entre los apilados, correspondientes a un solo disparo, para offsets máximos de 1300 y 1950 metros. El recuadro, resalta las amplitudes de los eventos de onda convertida apilados……....105

Figura 5.20 Ejemplo de parámetros definidos en el módulo AMPQC……..…106

Figura 5.21 Shot gather sintético corregido y modelado para dos capas. La flecha blanca representa, los offsets empleados en el análisis de amplitudes……..…107

Figura 5.22 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida, modelado para dos capas. El intervalo rojo, señala las mayores magnitudes……..…108

Figura 5.23 (A) Gráfico de amplitud y fase del evento de onda convertida P-S, correspondiente al modelo de dos capas, según las ecuaciones de Zoeppritz. (B) Sección del gráfico que resalta las amplitudes de mayor magnitud……....109

Figura 5.24 Shot gather sintético corregido y modelado para cinco capas. La flecha blanca representa, los eventos de onda convertida (P-S) A, B y C……110

Figura 5.25 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida A, modelado para cinco capas……...111

Figura 5.26 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida B, modelado para cinco capas……...112

Figura 5.27 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida C, modelado para cinco capas. La flecha indica, la máxima magnitud……..113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores representativos utilizados en el modelo de dos capas. La línea roja, simboliza el tope de la Formación La Pascua, ubicada aproximadamente a 650 metros, la Profundidad promedio del objetivo de exploración……..……..13

Tabla 2.2 Topes interpretados para el pozo MCH-7-26……..…….15

Tabla 2.3 Valores representativos utilizados en el modelo de cinco capas La línea roja, simboliza el tope de la Formación La Pascua, ubicada aproximadamente a 650 metros, la Profundidad promedio del objetivo de exploración……...……16

Tabla 3.1 Parámetros utilizados para la construcción de los sismogramas sintéticos en un modelo de 2 capas, con una configuración de adquisición ideal correspondiente a 400 geófonos con una separación de 5 metros entre sí……..……..32

Tabla 3.2 Parámetros utilizados para la construcción de los sismogramas sintéticos en un modelo de 5 capas, con una configuración de adquisición ideal correspondiente a 400 geófonos con una separación de 5 metros entre sí……..……..……35

Tabla 4.1 Descripción de los archivos que se cargaron en la base de datos del programa……..…..48

Tabla 4.2 Pares tiempo/velocidad seleccionados, para el almacenamiento de la función velocidad, en el modelo de 2 capas……..52

Tabla 4.3 Pares tiempo/velocidad seleccionados, para el almacenamiento de la función velocidad, en el modelo de 5 capas……..53

Tabla 4.4 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de dos capas……..…63

Tabla 4.5 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de cinco capas……..……63

Tabla 4.6 Descripción de los archivos que se cargaron en la base de datos del programa……...69

Tabla 4.7 Pares tiempo/Gamma seleccionados, para el almacenamiento de la función Gamma (Vp/Vs), en el modelo de 2 capas……..73

Tabla 4.8 Pares tiempo/Gamma seleccionados, para el almacenamiento de la función Gamma (Vp/Vs), en el modelo de 5 capas……..74

Tabla 4.9 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de dos capas…….....80

Tabla 4.10 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de cinco capas……..…..81

INTRODUCCIÓN

El proceso de adquisición sísmica, es el método geofísico más usado a nivel mundial para la exploración de hidrocarburos. Los métodos sísmicos utilizan una fuente de energía impulsiva o vibratoria para generar las ondas elásticas que se propagan hacia el subsuelo pasando por capas de rocas que poseen propiedades físicas y litológicas de interés. Las ondas experimentan una partición de energía cada vez que encuentran a su paso una interfaz entre dos capas con velocidades y densidades diferentes; una parte de la energía se transmite y otra se refleja. La energía que se refleja forma el campo de ondas que contiene información de las amplitudes, longitudes de onda, fases y tiempos dobles de los reflectores del subsuelo. Cuando estos campos de onda llegan a la superficie son captados por instrumentos receptores denominados geófonos y esta información se almacena en forma digital en los equipos de grabación, (Herrera y Cooper, 2010).

La exploración petrolera mediante métodos sísmicos se ha basado, desde sus inicios en el uso de ondas compresionales. Con la grabación y el procesamiento de este tipo de onda, se pensaba que era suficiente para poder describir al subsuelo. Al paso de los años la industria petrolera en Venezuela, se ha visto en la necesidad de realizar fuertes inversiones en geófonos multicomponentes, capaces de recibir todo el campo elástico que se propaga en el subsuelo. Esta nueva tecnología adquirida en nuestro país, ha aportado soluciones valiosas a muchos de los problemas en la explotación y exploración de hidrocarburos, que con anterioridad no habían sido resueltos con la sísmica convencional. Debido a la diferencia en la trayectoria de viaje, longitud de onda y reflectividad, las secciones sísmicas de onda convertida, (P-S), podrían mostrar cambios geológicos importantes en las amplitudes o en la caracterización de los eventos, que no aparecen en secciones P-P convencionales. Además, las secciones sísmicas de onda convertida, son de gran utilidad, para trabajar en zonas complejas, donde la calidad de los datos sísmicos convencionales es pobre y la interpretación de éstos no es clara. (Miller, 1996).

El diseño de configuraciones de adquisición multicomponente, es similar al de ondas P, sin embargo se debe tener en cuenta el comportamiento de la reflectividad

de los eventos de onda convertida, ya que a ciertos offsets (distancia fuente-receptor) se presentan cambios de fase en las reflexiones. Al momento del apilado del evento sísmico, se suman trazas con otras de polaridad opuesta que por interferencia destructiva de la energía, se genera una disminución de las amplitudes en los reflectores de interés. Esto se traduce en un importante deterioro de la calidad de las secciones apiladas de onda P-S. Por esta razón, se debe tener cuidado en la determinación del offset máximo de adquisición de datos sísmicos multicomponentes, ya que no necesariamente para offsets máximos de mayor magnitud se obtienen los mejores resultados de las secciones apiladas.

Para determinar que offset máximo sería el mejor, en términos de costos y calidad de resultados. Se generaron datos sintéticos multicomponentes, utilizando el método de las reflectividades, para un modelo estratificado de capas horizontales, basado en datos de pozo del Bloque 8 del área de Boyacá, en la Faja Petrolífera del Orinoco.

Los datos sintéticos de onda convertida, se generaron para distintos parámetros de adquisición: espaciado entre trazas y offset máximo. Luego, estos datos se procesaron, para cada configuración y se evaluó la calidad de la imagen obtenida para cada escenario, en términos de la relación Señal-Ruido de las secciones apiladas P-S, magnitud de amplitud de los eventos de onda convertida, grabación del ruido, presencia de aliasing espacial, entre otros.

CAPITULO I

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1. Ubicación geográfica

El área de Boyacá, tal como se muestra en la figura 1.1, conforma parte del estado Guárico, y limita al norte con el área de Las Mercedes, al este con el área de Junín, al oeste con el borde arbitrario que se extiende hasta la ciudad de Calabozo y al sur limita con las orillas del Río Orinoco.

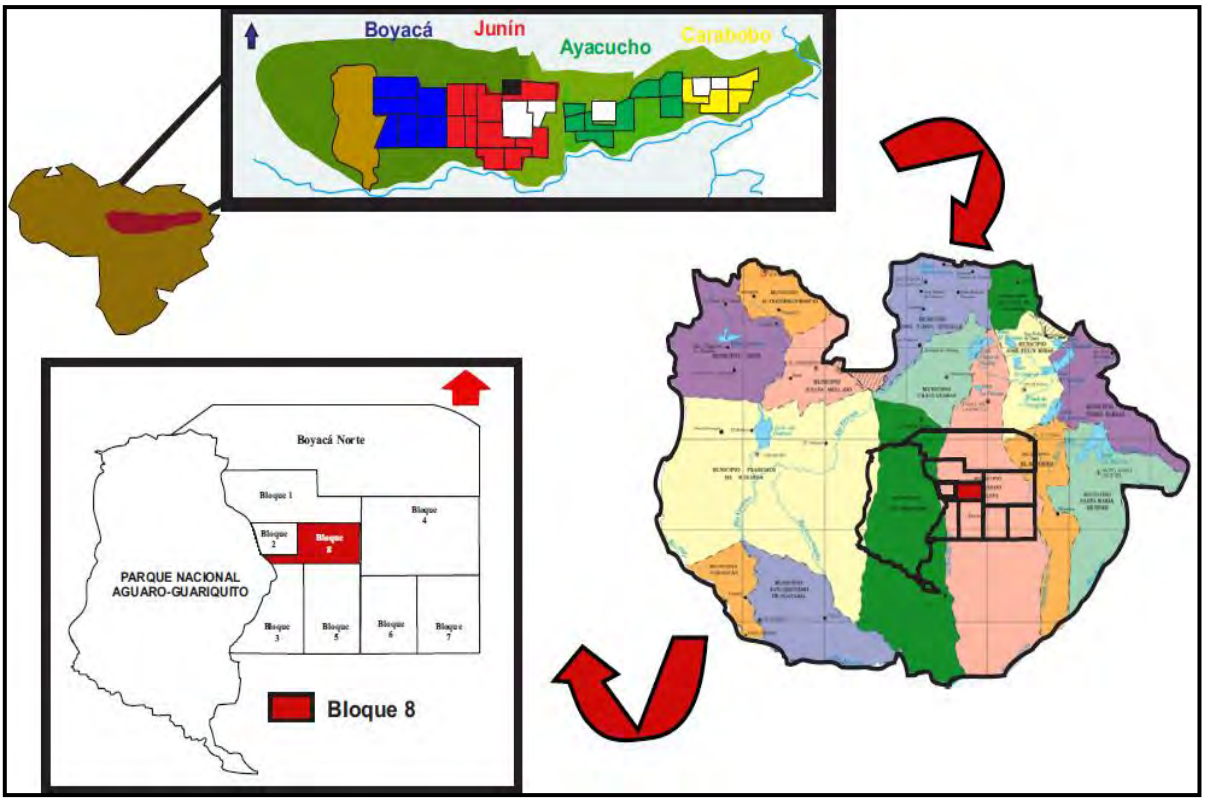


Figura 1.1 Ubicación geográfica del área de estudio, (Modificado de Carrero, 2011)

El bloque 8 ubicado dentro del área de Boyacá, presenta una extensión aproximada de 370 Km² y limita al norte con el bloque 1, al sur con los bloques 3 y 4, al este con el bloque 5 y al oeste con el Parque Nacional Aguaro-Guariquito. El bloque 8 tiene un total de 5 pozos estratigráficos, el pozo MCH-719, perforado en los años 1980-1983, y los pozos MCH-11-8, MCH-11-9, MCH-7-26 y MCH-7-27, que se perforaron durante el año 2007.

Las mejores acumulaciones de Hidrocarburos presentes en este bloque, se encuentran principalmente en las secuencias Oligo-Mioceno y Cretácico. La secuencia del Mioceno es la menos atractiva en términos de explotación de yacimientos. En esta área de estudio, las arenas de interés se encuentran en la secuencia Oligo-Mioceno, correspondiente a las Formaciones La Pascua, Roblecito y Chaguaramas, (Carrero, 2011).

1.2. Marco Estructural

La Cuenca Oriental de Venezuela, se encuentra ubicada en el área centro-este del país; formando una depresión topográfica y estructural limitada al sur por el Río Orinoco, al oeste por el Arco El Baúl y al norte por el Piedemonte de la Serranía del Interior; mientras que al este la cuenca se extiende por debajo del Golfo de Paria. La cuenca se caracteriza por presentar una tendencia este-oeste, una longitud aproximada de 800 kilómetros y anchura de 250 kilómetros. La Cuenca Oriental de Venezuela, se subdivide en dos sub-cuencas, Guárico y Maturín, que se caracterizan por presentar diferencias tectónicas, sedimentológicas y estratigráficas, (González de Juana, 1980).

La Faja Petrolífera del Orinoco se encuentra dividida en dos provincias fisiográficas, separadas por el sistema de fallas de Hato Viejo; que en términos generales refleja la distribución de las formaciones en el área y la estructura geológica regional. La zona oriental, está conformada por las áreas Ayacucho y Carabobo, y en la zona occidental se encuentra el área de Junín y Boyacá, (Ver Figura 1.2).

En términos estructurales, el área de Boyacá se encuentra caracterizada por presentar hacia el sur una zona elevada y hacia el norte una zona fuertemente deprimida; mientras que al oeste, específicamente en el área del Parque Nacional Aguaro-Guariquito, se encuentra influenciada por el levantamiento del Arco El Baúl. El principal mecanismo de entrampamiento es estratigráfico, afectado localmente por varias fallas que facilitan la acumulación de hidrocarburos, (Carrero, 2011).

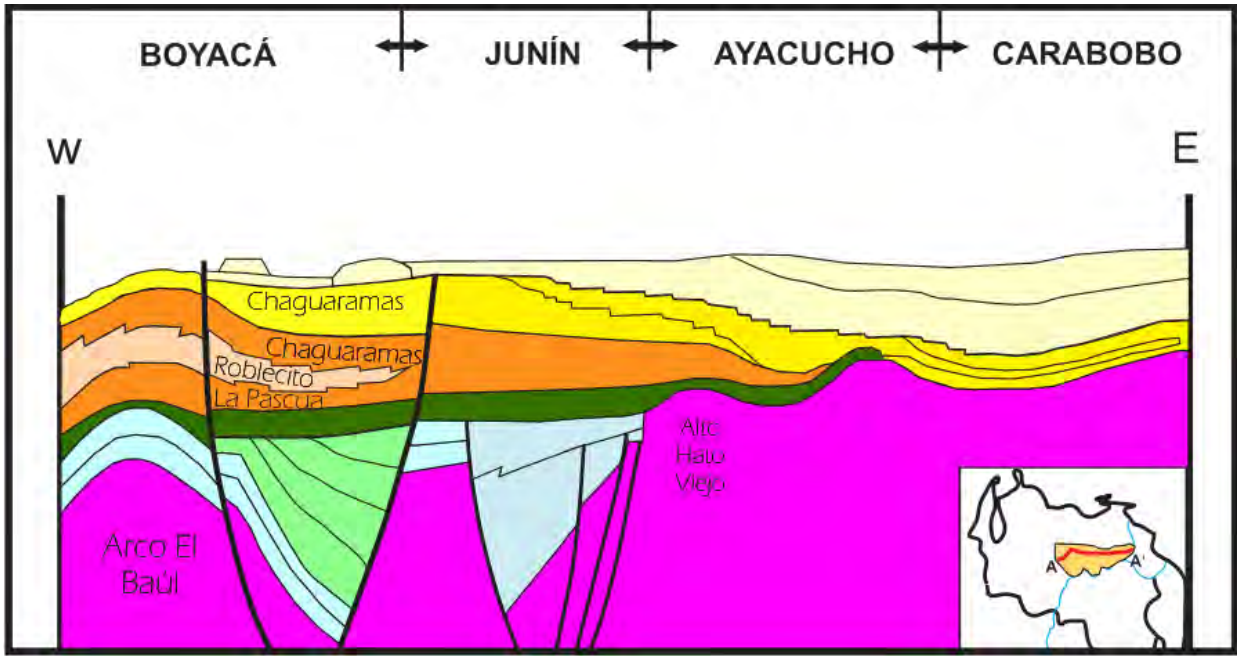


Figura 1.2 Sección esquemática de la Faja Petrolífera del Orinoco, (Modificado de Carrero, 2011)

1.3. Marco Estratigráfico

En esta sección, se definieron las formaciones de interés, presentes en la Secuencia Oligoceno-Mioceno, pertenecientes al área de Boyacá, como son la Formación La Pascua, Formación Roblecito y Chaguaramas.

En la figura 1.3, se presenta un cuadro estratigráfico del área de Boyacá, haciendo énfasis en las formaciones de la secuencia Oligoceno-Mioceno.

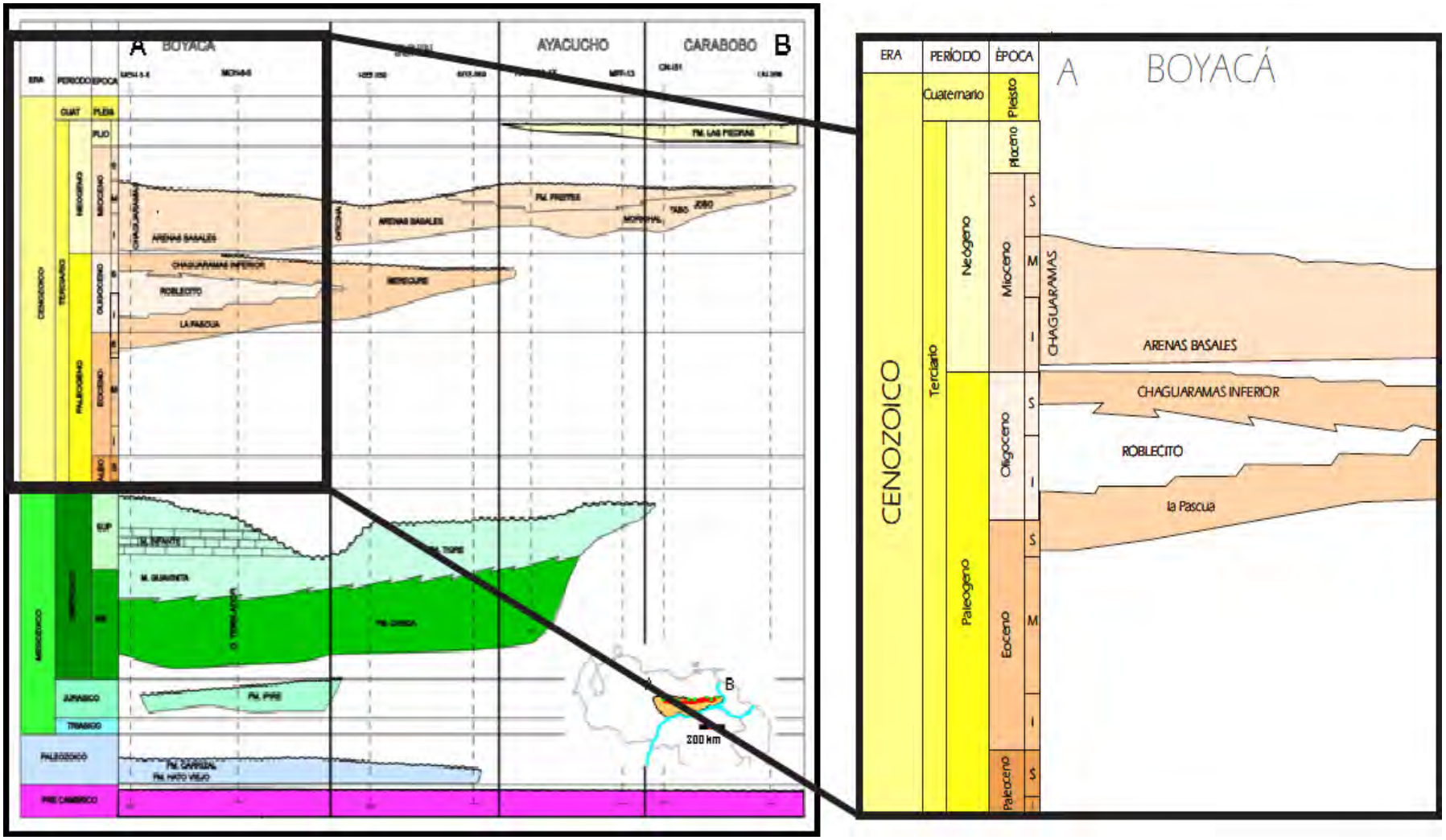


Figura 1.3 Cuadro Cronoestratigráfico de la Faja Petrolífera del Orinoco, haciendo énfasis en el área de Boyacá, (Modificado de Carrero, 2011)

1.3.1. Formaciones geológicas presentes en la Secuencia Oligoceno-Mioceno

1.3.1.1. Formación La Pascua

El Oligoceno comienza con un Sistema Encadenado Transgresivo, que deposita las Arenas Basales de la Formación La Pascua, finalizando con una máxima superficie de inundación que se conoce como la Formación Roblecito. Patterson y Wilson, (1953), caracterizaron estas arenas con grano muy fino a muy grueso, con un pobre a buen escogimiento. El grado de cementación de las arenas es variable, con cemento calcáreo o silíceo, con crecimiento secundario de cristales de cuarzo; además, se tienen intercalaciones de capas delgadas de Caolinita con arenisca. La tendencia de los cuerpos de arena, presenta una orientación en forma de canales NE-SW, con una anchura de hasta 2.45 metros.

La Formación La Pascua, se encuentra por debajo de la Formación Roblecito, y está separada de las formaciones que la infrayacen por una inconformidad en la que gran parte del Cretácico y el Paleoceno fue erosionado. La Formación La Pascua, descansa sobre capas del Cretácico, desde el noreste hasta el suroeste, hasta que se encuentra directamente con el basamento granítico o sobre el suroeste de Carrizal, en la Ciudad de Calabozo.

Fasola et al., (1985), interpretó los ambientes depositacionales de la Formación La Pascua, como ambiente Marino transicional conformado por Pantanos, Estuarios y Bahías Interdistributarias. Isea, (1987), en términos regionales, interpretó areniscas transgresivas en forma de barras, depósitos de playa o de Zona Intermareal, estuarios y algunas lagunas; todos estos con orientación preferiblemente este-oeste.

1.3.1.2. Formación Roblecito

La Formación Roblecito fue definida por Patterson y Wilson, (1953), como una continuación del ciclo transgresivo que se inició con la Formación La Pascua y describen la formación como una unidad de lutita marina que es transicional con las areniscas transgresivas de La Pascua, y gradacional hacia arriba con las

areniscas y lutitas de la Formación Chaguaramas. En el subsuelo, la formación consiste de lutitas gris a gris oscuro, medianamente duras, físiles, no-calcáreas, frecuentemente glauconíticas y microfosilíferas. Los extremos de la formación, se vuelven más limosos y finamente arenosos, carbonáceos y micáceos, gradando en muchos niveles a areniscas laminadas muy arcillosas de grano muy fino. Las lutitas, limolitas y areniscas de la parte basal muestran bioturbaciones, laminaciones onduladas, rizaduras de corriente, estratificación cruzada, cruzada de torrente ("hummocky cross-bedding") y estratificación de espina de pescado ("herringbone cross-bedding"), además de niveles de pelecípodos.

Fasola et al, (1985), basado en los foraminíferos bentónicos, interpretó un ambiente que varía, en orden ascendente, desde nerítico medio a externo (90-180 m), a batial superior, (300-600 m), a marino marginal, a nerítico interno (0-30 m), a marino marginal superior, (0-6 m); con la máxima profundidad durante el Oligoceno. En el área de Boyacá, la Formación Roblecito presenta su mayor espesor hacia el norte, con aproximadamente 700 pies. Esto se debe a que durante el Oligoceno, el depocentro de la cuenca se encontraba en esa dirección. La depositación de Roblecito, La Pascua, y La Formación Chaguaramas ocurrió durante un ciclo completo de sedimentación; La Pascua representa el evento transgresivo, Chaguaramas representa el evento regresivo y la Formación Roblecito representa la máxima superficie de inundación durante el Oligoceno-Mioceno, (Carrero, 2011).

1.3.1.3. Formación Chaguaramas

Patterson y Wilson (1953), describieron la formación como básicamente una secuencia de arenisca-lutita-lignito. En general, la litología de la Formación Chaguaramas, consiste de una alternancia de areniscas, lutitas y lignitos de agua salobre, con desarrollos locales de arcillas de agua fresca y conglomerados de guijarros, (Brown, 1956).

En la primera edición del Léxico Estratigráfico de Venezuela (1956), se sugieren dos tipos distintos de ambientes sedimentarios para la Formación Chaguaramas, (Kamen-Kaye, 1940). Al principio, la Formación Chaguaramas fue depositada en un

ambiente de pantanos costaneros extensos, ambiente que fue marcado por una abundancia de bancos ligníticos delgados intercalados, y una cantidad apreciable de arena micácea con cementación secundaria moderada. Posteriormente, en el tiempo de la sedimentación de Chaguaramas superior, el aspecto de la cuenca cambió; convirtiéndose en llanuras expuestas a secamientos intermitentes y a una fuerte oxidación, lo que produjo una acumulación de arcillas abirragadas. Algunos lignitos fueron depositados en las capas superiores de Chaguaramas, durante intervalos de clima húmedo que se presentaban de vez en cuando; alternando con las arcillas abirragadas y los lignitos, formaron depósitos de origen salobre y a veces de ambiente marino.

En la segunda edición del Léxico Estratigráfico de Venezuela (1970), aparece que la Formación Chaguaramas es concordante y transicional sobre la Formación Roblecito. La porción superior de Chaguaramas ha sido erosionada, excepto en el extremo oriental, donde descansa con leve discordancia, por debajo de las lutitas de la Formación Freites.

CAPÍTULO II

MODELO ESTRATIFICADO DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Revisión y selección de los datos de pozo

En esta primera etapa del trabajo, se seleccionaron los pozos con la información necesaria para la construcción de los modelos, que se utilizaron para la generación de los disparos (shot gathers) sintéticos. Los registros mínimos requeridos por el modelador de datos utilizado, fueron los siguientes:

- Densidad de Bulk (RHOB)
- Lentitud de Onda Compresional (DTC)
- Lentitud de Onda de Cizalla (DTS)

En principio, se tenían datos correspondientes a 4 pozos, localizados en el Bloque 8 del área de Boyacá, en la Faja Petrolífera del Orinoco. Sin embargo, sólo se pudo contar con la información completa del pozo MCH-7-26; por lo tanto, sólo este fue utilizado en este trabajo de investigación (Ver figura 2.1).

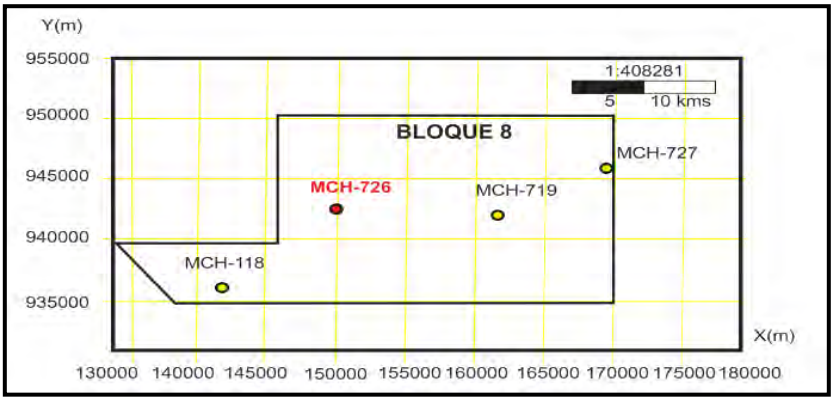


Figura 2.1 Mapa base donde se muestra la ubicación de los pozos.

2.2. Generación de modelos (Densidad, Velocidad de Onda P y S)

El archivo formato LAS, del pozo MCH-7-26 fue cargado como una hoja de cálculo en Excel, para manejar y visualizar con mayor facilidad los datos. Luego, para obtener las velocidades P y S, se crearon dos columnas a partir de los registros sónicos, con el inverso de la lentitud, realizando la conversión de unidades de ft/μseg a m/seg. Con esta información, se procedió a graficar los registros de velocidades y de densidad en Excel. En las figuras 2.2, 2.3 y 2.4, se graficaron los registros de velocidad de onda P, velocidad de onda S y densidad, respectivamente.

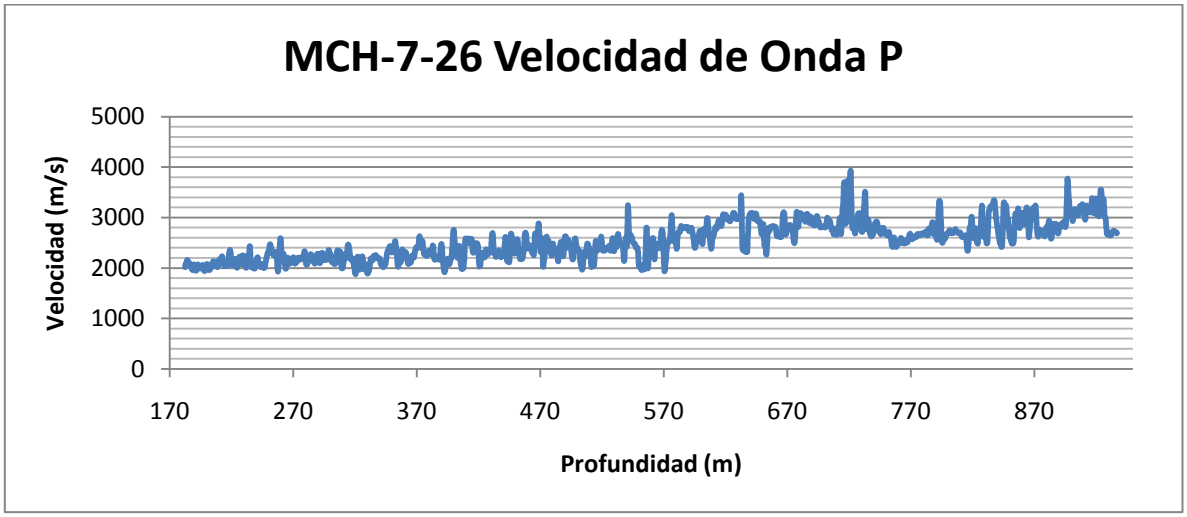


Figura 2.2 Registro Velocidad de onda P, extraído del registro sónico.

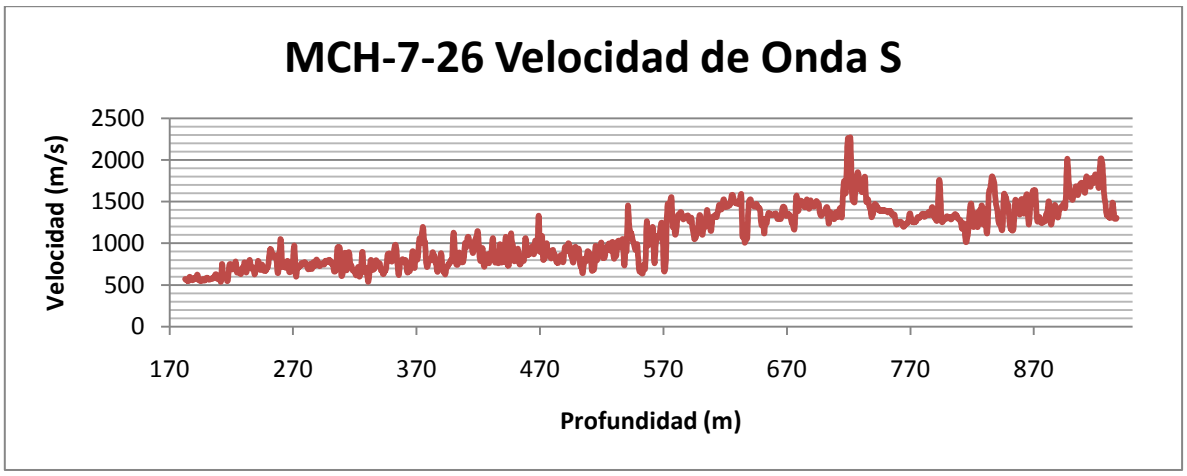


Figura 2.3 Registro de pozo: Velocidad de Onda S, extraído del registro sónico.

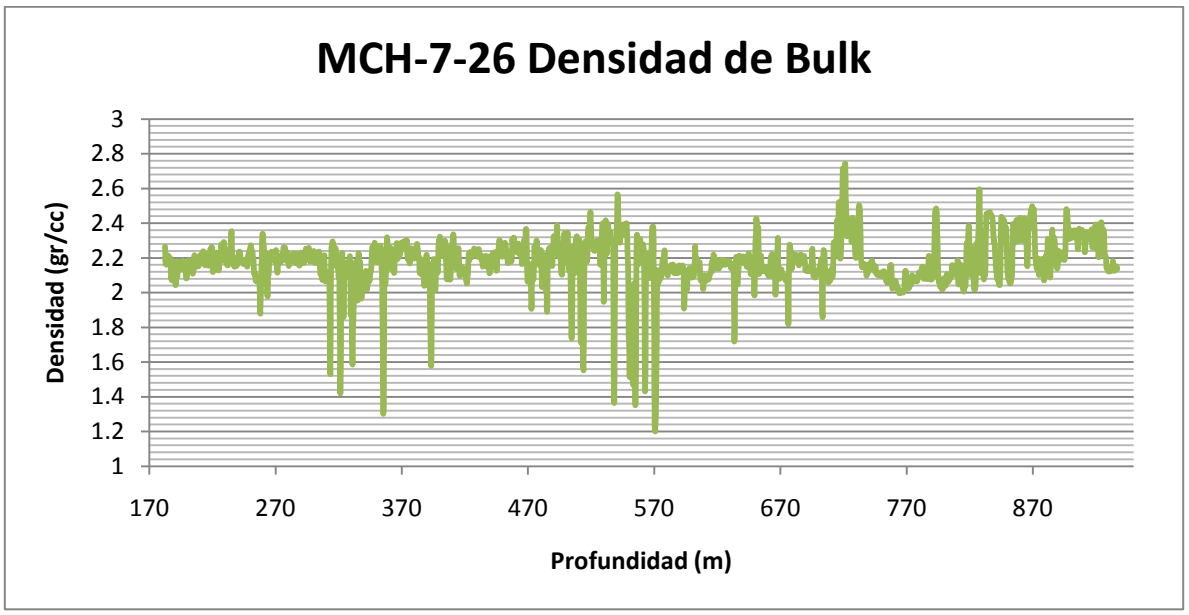


Figura 2.4 Registro Densidad de Bulk.

A partir de los registros que se muestran en las figuras 2.3, 2.4 y 2.5, se crearon dos modelos homogéneos, de capas horizontales. El primer modelo, estuvo conformado por solo dos capas, utilizando como límite entre estratos, únicamente el tope de la Formación La Pascua. El segundo modelo, se construyó para cinco estratos, de manera de caracterizar la columna litológica de la zona, de forma más completa.

2.2.1. Modelo de dos Capas

Se realizó un promedio de los registros de Densidad, Velocidad P y Velocidad S, por intervalos, de manera de obtener los valores más representativos de los estratos. Para este modelo, se promediaron las formaciones por encima de la Formación La Pascua, como un solo estrato, y las formaciones por debajo de ésta, como otro estrato infrayacente. De esta manera, se pudo estudiar individualmente, la reflexión proveniente del tope de la Formación La Pascua, que es el objetivo de exploración.

En la tabla 2.1, se muestran los valores que definen el espesor, densidad y velocidad de los estratos del modelo.

En la figura 2.5 (A), (B), (C), se presentan los gráficos de los modelos de Velocidad de onda P, Velocidad de onda S y Densidad, respectivamente.

Tabla 2.1 Valores representativos utilizados en el modelo de dos capas. La línea roja, simboliza el tope de la Formación La Pascua, ubicada aproximadamente a 650 metros, la Profundidad promedio del objetivo de exploración.

Modelo de Dos Capas

Capa	Velocidad Onda P Promedio (m/s)	Velocidad Onda S Promedio (m/s)	Densidad Promedio (gr/cc)	Espesor (m)
1	2538.55	1080.98	2.17	654.00
2	2887.67	1280.49	2.16	284.00

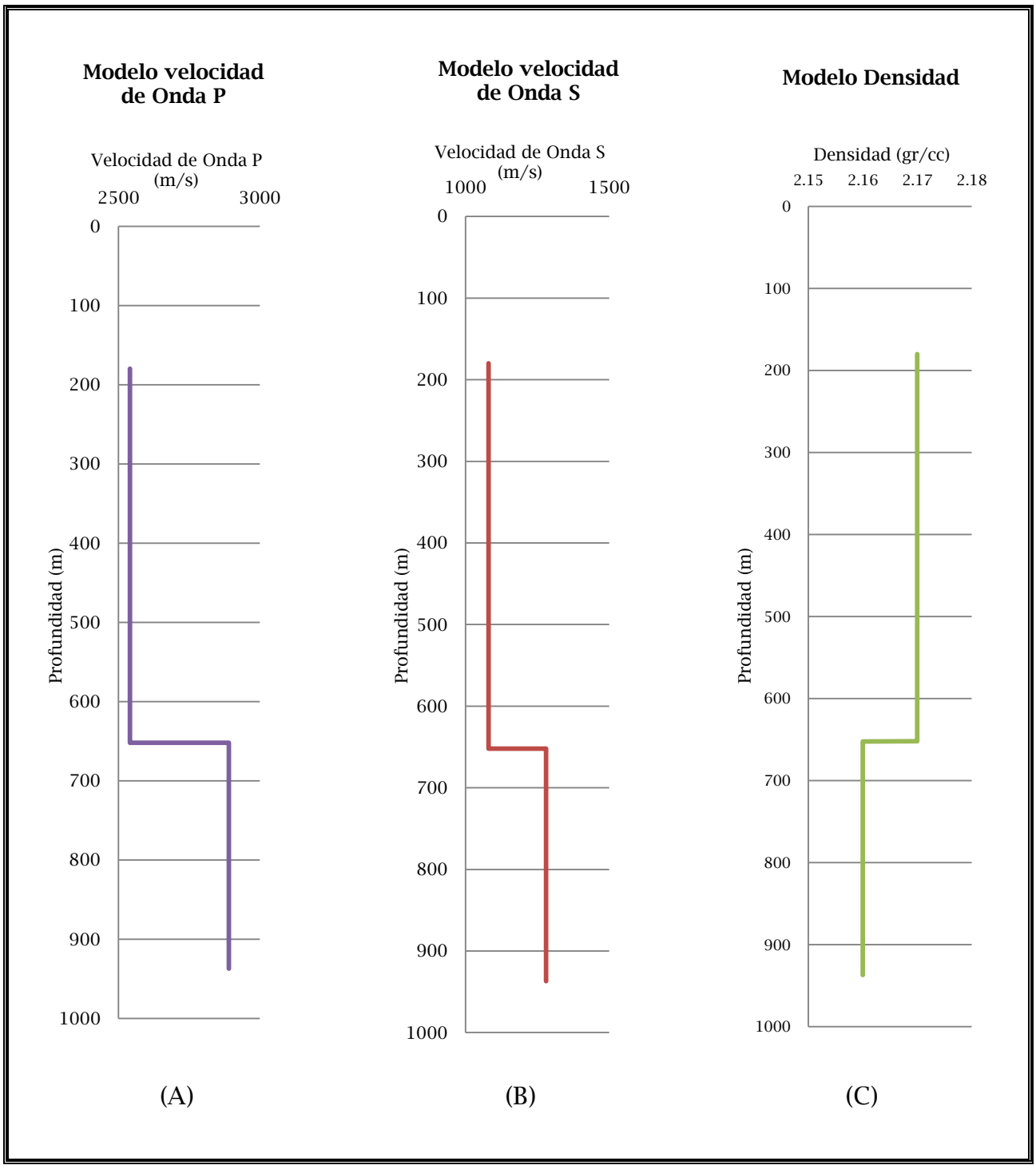


Figura 2.5 Modelo de dos capas. (A) Modelo de Velocidad de Onda P, (B) Modelo de Velocidad de Onda S, (C) Modelo de Densidad.

2.2.2. Modelo de Cinco Capas (Modelo Original)

En esta sección, se creó un modelo de cinco estratos, realizando un promedio de los registros de Densidad, Velocidad P y Velocidad S, siguiendo los intervalos asignados por los topes de las formaciones: Chaguaramas, Roblecito, La Pascua, Cretácico y Pre-Cretácico. En la tabla 2.2, se definen los límites entre estratos del modelo de cinco capas, que se basaron en datos de topes estratigráficos, que proporcionó la empresa PDVSA, Intevep.

Tabla 2.2 Topes interpretados para el pozo MCH-7-26

Topes	**Profundidad MD (m)**
Chaguaramas	554.93
Roblecito	648.35
La Pascua	653.98
Cretácico	712.16
Pre-Cretácico	896.11

En la tabla 2.3, se muestran los valores que definen el espesor, densidad y velocidad de los estratos del modelo.

En la figura 2.6 (A), (B), (C), se presentan los gráficos de los modelos de Velocidad de onda P, Velocidad de onda S y Densidad, respectivamente.

Tabla 2.3 Valores representativos utilizados en el modelo de cinco capas La línea roja, simboliza el tope de la Formación La Pascua, ubicada aproximadamente a 650 metros, la Profundidad promedio del objetivo de exploración

Modelo de Cinco Capas

Topes	Capa	Vp Promedio (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Densidad Promedio (gr/cc)	Espesor (m)
Chaguaramas	**1**	2240.00	774.00	2.17	650
Roblecito	**2**	2682.71	1227.39	2.22	4
La Pascua	**3**	2816.29	1372.15	2.14	60
Cretácico	**4**	2782.42	1380.35	2.20	184
Pre-Cretácico	**5**	3064.31	1615.17	2.29	40

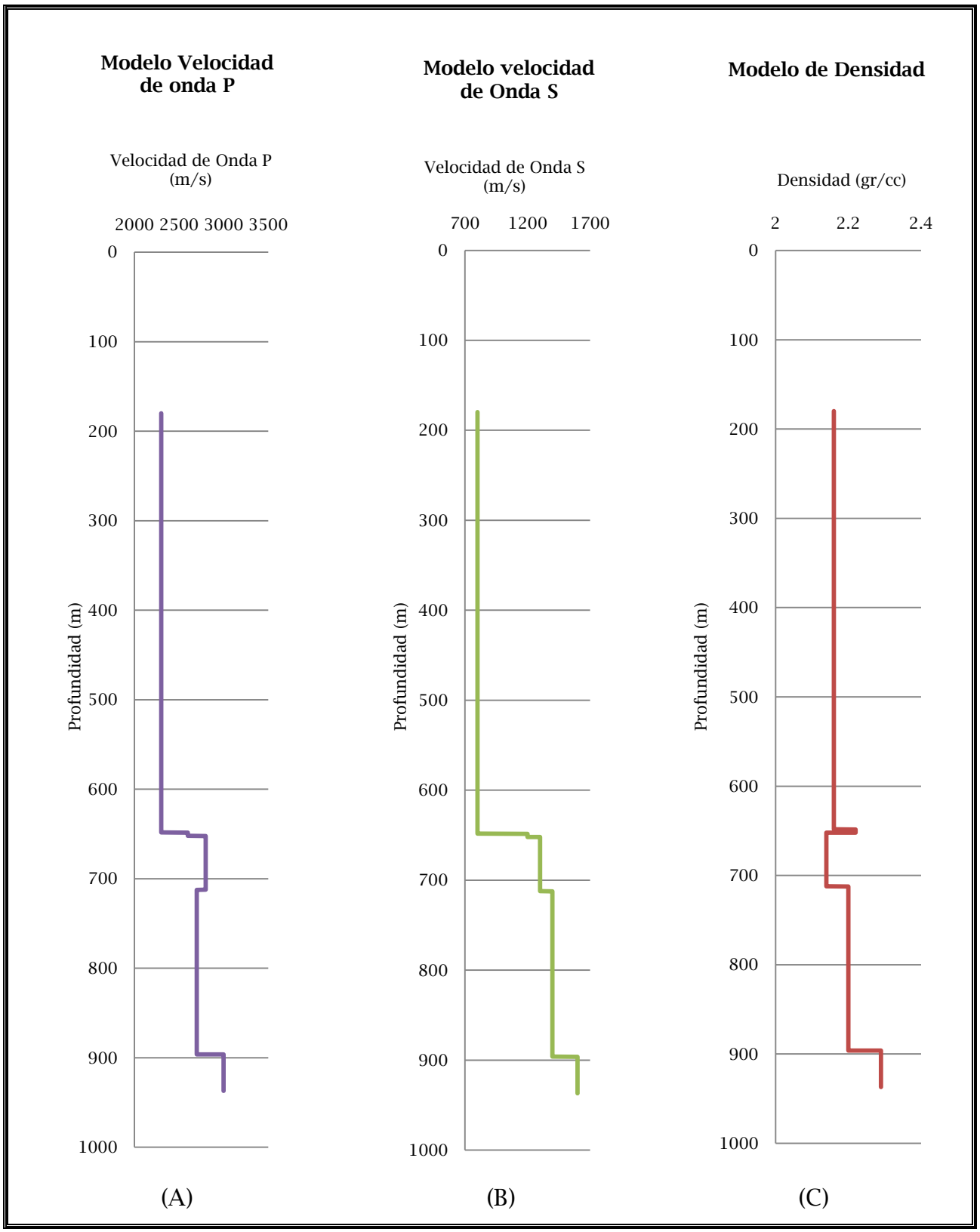


Figura 2.6 Modelo de cinco capas. (A) Modelo de Velocidad de Onda P, (B) Modelo de Velocidad de Onda S, (C) Modelo de Densidad.

CAPÍTULO III

GENERACIÓN DE DATOS SINTÉTICOS MULTICOMPONENTES MEDIANTE EL MODELADO DE REFLECTIVIDADES

3.1. SÍSMICA MULTICOMPONENTE

La sísmica multicomponente, consiste básicamente en la grabación del movimiento de la partícula, generado por la propagación del frente de ondas, en sus tres dimensiones: Vertical, Horizontal Inline, Horizontal Crossline, (Ver figura 3.1).

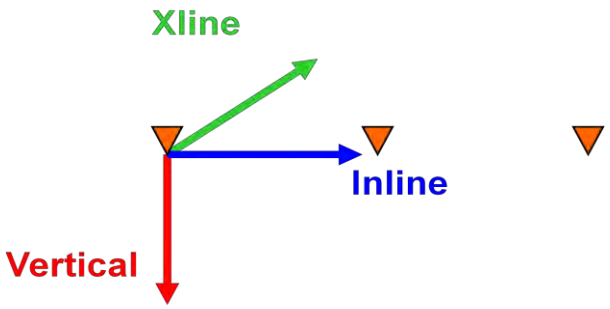


Figura 3.1 Esquema ilustrativo, que muestra las tres direcciones de grabación de la sísmica multicomponente, (Cova, 2011).

La adquisición de datos multicomponentes, presenta como ventaja la capacidad de registrar el movimiento horizontal, producto del frente de ondas, permite al método sísmico multicomponente, estudiar el comportamiento de las ondas S. Además, las características particulares de las ondas P y las ondas S, permiten

resolver ambigüedades y caracterizar de manera más completa la respuesta del subsuelo, (Cova, 2011).

3.1.1. Fundamentos de ondas convertidas

Las ondas convertidas (P-S), se generan a partir del proceso de conversión de energía que ocurre cuando una onda compresional (P), incide en una interfaz, con un ángulo diferente de 90 grados, reflejándose en dirección hacia arriba como onda de cizalla (S). En la figura 3.2, se representan los modos posibles de conversión de energía de la onda P, al incidir una interfaz del subsuelo.

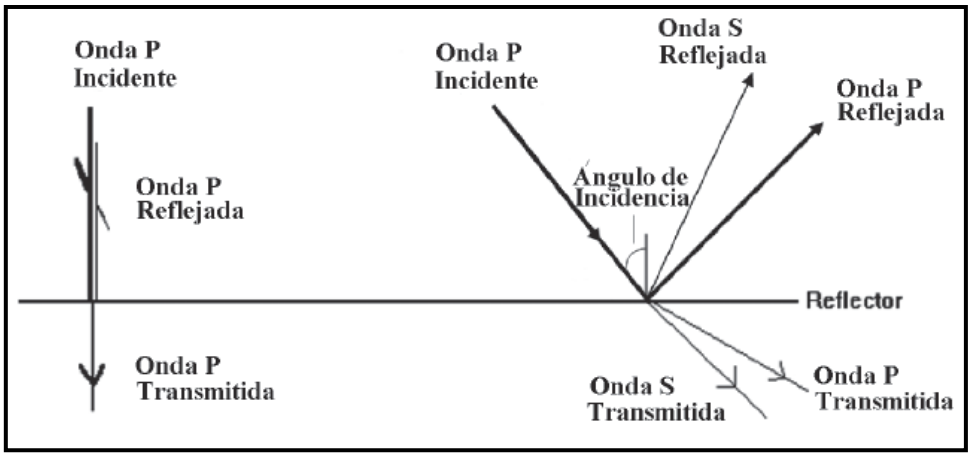


Figura 3.2 Esquema de modo de conversión de energía (Herrera y Cooper, 2010)

El registro de datos sísmicos multicomponentes, captura el campo de onda de una manera más completa, en comparación con el método sísmico convencional, en el que se registran solamente las ondas P. Las ondas compresionales se usan más en la industria sísmica, ya que son las primeras que llegan a los geófonos, tienen relaciones S/R altas y son generadas por la mayoría de las fuentes de energía disponibles. Sin embargo, existe el potencial de obtener más información del subsuelo usando ondas convertidas que con sólo datos P. El diseño de programas multicomponentes, es similar al de ondas P, sin embargo hay que tener en cuenta la reflectividad y las trayectorias de rayos asimétricas, (Stewart et al., 2002).

En la Figura 3.3, se observa que el punto medio de las ondas P (MP), difiere del punto de conversión de las ondas S (CP), para un mismo par fuente-receptor. Esta asimetría se puede explicar usando Ley de Snell mostrada en la ecuación 3.1,

$$\frac{sin\,\theta}{v_p} = \frac{sin\,\Phi}{v_s} \qquad (3.1)$$

en donde θ es el ángulo de incidencia de la onda P, ϕ es el ángulo de reflexión de la onda S, Vp es la velocidad de la onda P y Vs es la velocidad de la onda S. En un mismo material, Vs es menor que Vp, por tanto, la onda S llega al mismo receptor con un ángulo más vertical y el punto medio es diferente al punto de conversión.

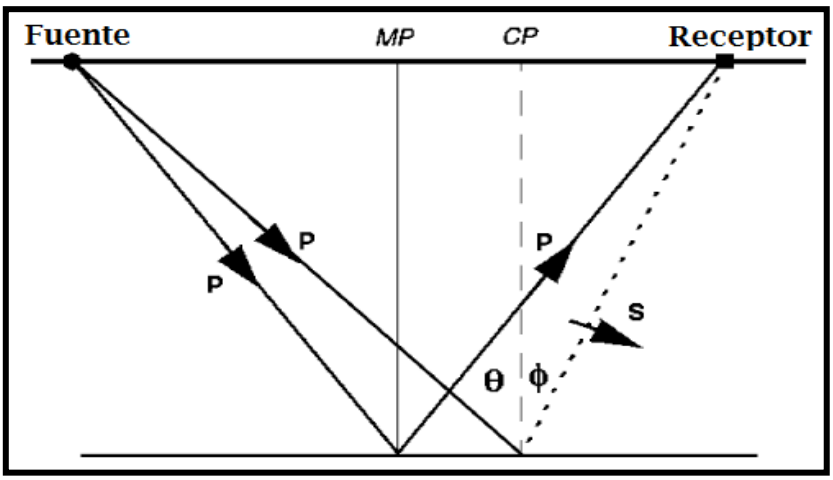


Figura 3.3 Punto medio (MP) de las ondas P, versus, punto de conversión (CP) de la onda S reflejada (Modificado de Stewart et al., 2002).

El punto de conversión, varía con la profundidad como se observa en la Figura 3.4. A medida que aumenta la profundidad, los puntos de conversión convergen en una asíntota; este comportamiento se puede describir matemáticamente por la aproximación asintótica de los puntos de reflexión, dada por la siguiente relación:

$$X_a = \frac{X}{\left(1 + \frac{v_p}{v_s}\right)} \qquad (3.2)$$

en donde, Xa es la distancia de la fuente al punto de conversión, X es el offset (distancia fuente-receptor), Vp es la velocidad de las ondas P y Vs es la velocidad de

las ondas S (Ver figura 3.4). Esta ecuación representa una aproximación válida para grandes profundidades, con respecto al offset.

Para un mejor análisis, el comportamiento asintótico del punto de reflexión, fue recalculado, para cada traza, en función de la variable G y de un offset dado, (Zhang, 1992),

$$X_a^2 = \frac{\sqrt{1 + \frac{1-G}{1+G} G T_{PS}(0)(V_P^2)}}{G + \sqrt{1 + \frac{1-G}{1+G} G T_{PS}(0)(V_P^2)}} X_a^{n-1} \qquad (3.3)$$

en donde, G es la relación (Vp/Vs), Xa es la distancia de la fuente al punto de reflexión, Tps(0), es el doble tiempo de viaje a cero offset, Vp es el campo de velocidad de onda compresional y n representa el número de traza o muestra en tiempo.

La relación Vp/Vs varía según la litificación de las rocas. Para materiales consolidados y litificados (más profundos), la relación Vp/Vs puede variar entre 1.8 y 2.5. Si los materiales son menos consolidados y menos litificados, se tiene una relación Vp/Vs mayor, que puede variar entre 2.5 y 5. En cuencas sedimentarias, es común observar Vp/Vs altos para reflectores someros y Vp/Vs menores para reflectores profundos, (Herrera y Cooper, 2010).

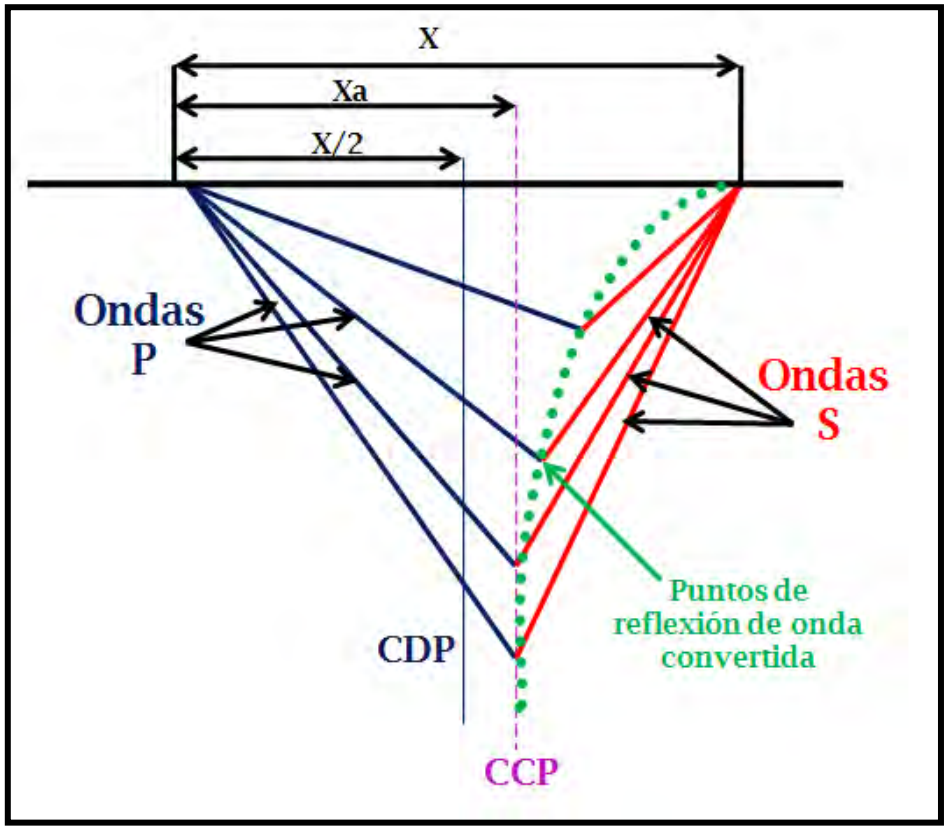


Figura 3.4 Comportamiento asintótico del Punto de Conversión, (Modificado de Manual de Focus, 2007).

Con respecto a la reflectividad de las ondas convertidas P-S, las amplitudes varían sinusoidalmente según la ecuación de Zoeppritz, definida para una interfaz, (Stewart et al., 2002),

$$R_{PS} = -\frac{v_p \tan\Phi}{2v_s}\left[\left(1+\left(-\frac{2(\sin\Phi)^2}{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2}+\frac{2\cos\Phi\cos\theta}{\frac{v_p}{v_s}}\right)\right)\frac{\Delta\rho}{\rho} + 2\left(-\frac{2(\sin\Phi)^2}{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2}+\frac{2\cos\Phi\cos\theta}{\frac{v_p}{v_s}}\right)\frac{\Delta v_s}{v_s}\right] \quad (3.4)$$

en donde, θ es el ángulo de incidencia de la onda P, ϕ es el ángulo de reflexión de la onda S, Vp es el promedio de la velocidad de onda compresional de la interfaz, Vs es el promedio de las velocidad de onda de cizalla de la interfaz, ΔVs es la diferencia entre la Vs de la capa inferior y la Vs de la capa superior a la interfaz, ρ

es el promedio de las densidades de la interfaz y $\Delta\rho$ es la diferencia entre las densidades de la capa superior e inferior.

En la figura 3.5, se observa como la reflectividad de la onda convertida P-S aumenta con el ángulo de incidencia o lo que es lo mismo, se eleva con el offset. Este comportamiento de las ondas convertidas, se debe tomar en cuenta en el diseño de configuraciones de adquisición sísmica multicomponente, de manera de poder registrar señales de onda convertida con amplitudes mayores y así obtener mejoras en la relación S/R de los datos multicomponentes adquiridos.

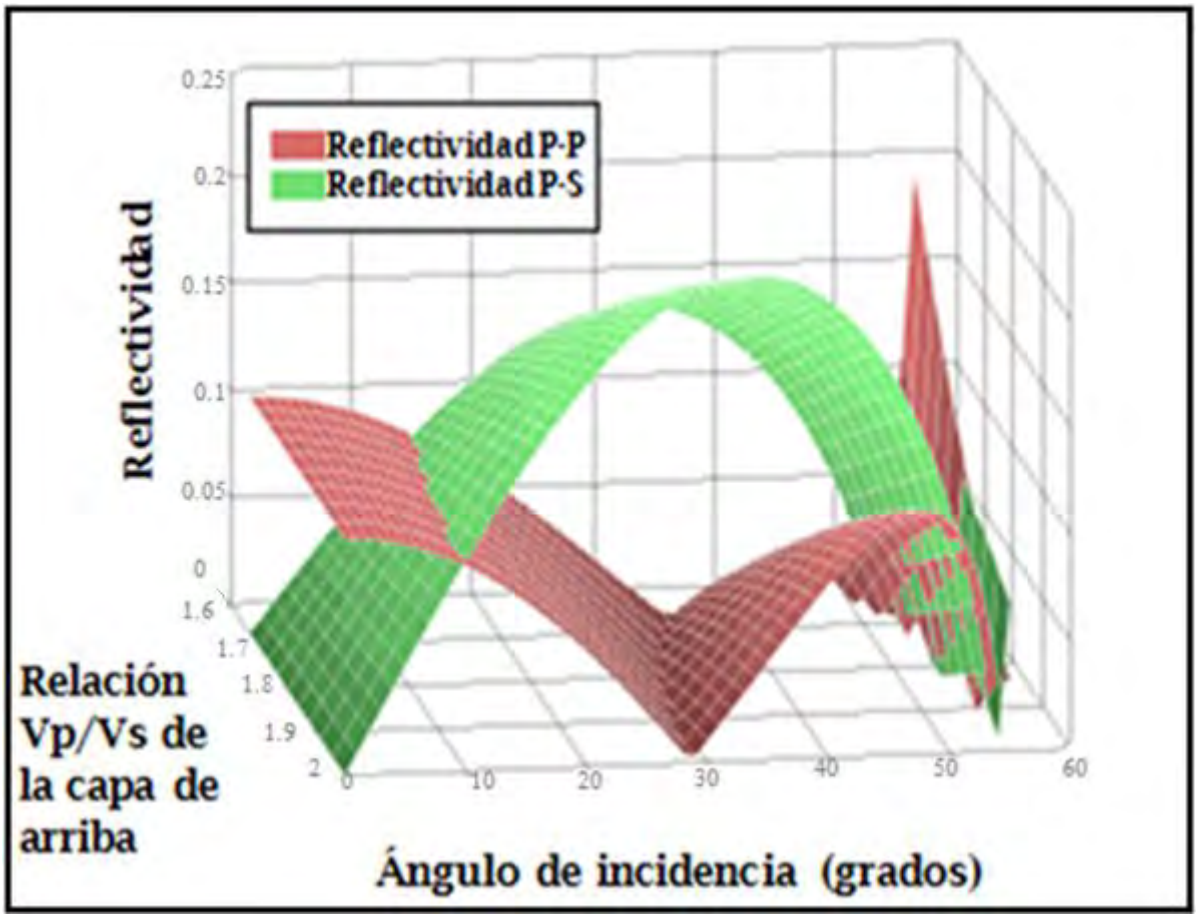


Figura 3.5 Variación de la reflectividad con el ángulo de incidencia, para la Onda PP, y la onda P-S, modelado para una interfaz, (Modificado de CREWES, 2011).

3.2. MODELADO DE REFLECTIVIDADES

Los métodos numéricos para el modelado de datos sísmicos, representan una herramienta poderosa para la creación de imágenes sísmicas, interpretación e inversión. La propagación de las ondas en modelos complejos de la tierra, puede ser simulada gracias a los sofisticados algoritmos de modelado y alto rendimiento en la tecnología de la computación. Aunque la ecuación de onda basada en métodos de modelado y otras técnicas cómo: Métodos de diferencias finitas y el método de trazado de rayos, juegan un papel cada vez más relevante en el modelado numérico, el método del modelado de Reflectividades, todavía es ampliamente utilizado, debido a sus características únicas, (Carcione et al, 2002).

Este método, tiene la capacidad de modelar la mayoría de los tipos de propagación de ondas, en un medio elástico o inelástico, con alta estabilidad numérica y precisión; sin embargo, puede significar un alto costo computacional. El modelado de reflectividades además, puede simular la propagación de ondas en un modelo estratificado con capas delgadas de la tierra. El método siempre se ha desarrollado en un sistema de coordenadas cilíndricas, debido a que de esta manera se pueden reducir las ecuaciones de onda a una sola dimensión.

La teoría del modelado describe el comportamiento de la onda en un medio estratificado, donde todos los tipos de onda, pueden ser descompuestos según la dirección de propagación en ascendentes y descendentes, al mismo tiempo que pueden ser desacopladas en ondas tipo P-SV y SH, (Kennett,1983). Este método modela reflexiones, transmisiones, conversiones de todos los modos de onda. Además, el modelado en el dominio F-K (Frecuencia-Número de onda), permite manejar con mayor facilidad las absorciones en un medio inelástico, (Temme and Müller, 1982).

En términos matemáticos, al igual que otros métodos, se inicia con la integración de la ecuación de movimiento de Cauchy y la relación constitutiva Esfuerzo-Deformación,

$$-\rho\omega^2 u = \Delta \cdot \tau + f \qquad (3.5)$$

$$\tau_{ij} = C_{ijkl}\ \varepsilon_{kl} \qquad (3.6)$$

en donde, ρ es la Densidad, f es la Fuerza externa, ω es la frecuencia angular, u es el campo de desplazamiento elástico, τ_{ij} es el tensor de esfuerzos, siendo ij, la notación indicial que define la dirección de los esfuerzos, C_{ijkl} es el tensor elástico de cuarto orden, siendo ijkl, la notación indicial, que define las propiedades físicas del medio, ε_{kl} es el tensor de deformación, siendo kl, la notación que define la dirección de la deformación.

La ecuación 3.5, presenta una dependencia espacio-temporal, y es de derivadas parciales separables. Por tanto, se supone que el campo de desplazamiento $\vec{u}(\vec{x},t)$, puede ser separado en $\vec{u}(\vec{x},t) = \vec{u}(\vec{x}).e^{i\omega t}$. Luego, se aplica la transformada de Fourier-Hankel y la ecuación 3.7 es convertida en la ecuación 3.8, (Kenneth, 1983),

$$\frac{\delta b}{\delta z} = \omega A b + F \qquad (3.7)$$

en donde, b es el vector de desplazamiento, A es la matriz de reflectividades del medio, F es la fuerza externa y ω es la frecuencia Angular.

La condición de contorno, para la propagación de ondas en el modelo, es que el vector desplazamiento b es continuo cuando las ondas crucen las interfaces. A continuación, se presenta la fórmula dada por Müller (1985), para calcular el campo de onda P-SV, para un modelo estratificado en la superficie, (Ver figura 3.6),

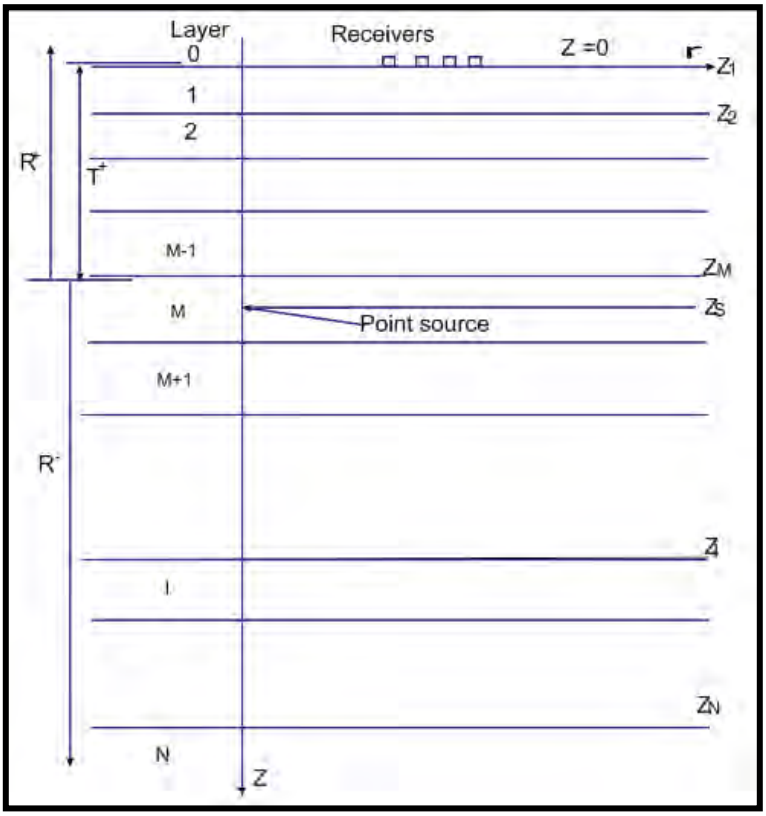


Figura 3.6 Modelo estratificado (Modificado de Ma, Y et al, 2004)

$$\begin{pmatrix} u_r \\ u_z \end{pmatrix} = \frac{\omega}{4\pi\rho_m} \sum_{i=1}^{2} \epsilon_i \int_0^{\infty} J_i T^{+} [I - R^{-} R^{+}]^{-1} (S_i^u + R^{-} S_i^d) du \tag{3.8}$$

en donde:

u_r es la componente de desplazamiento radial de la onda.

u_v es la componente de desplazamiento vertical de la onda.

ω es la frecuencia angular

ϵ_i representa el número de fuentes, ubicadas a distintas profundidades Z_s

J_i, J_o, J_1 son matrices relacionadas a las funciones de Bessel de primera clase

ρ_m es la densidad promedio de los estratos hasta una profundidad z_m

R^{+} es la matriz de coeficientes de reflexión comprendidos entre las profundidades z_m y z_1

R^{-} es la matriz de coeficientes de reflexión comprendidos entre la profundidad z_m y el semi-espacio que se encuentra debajo de esta.

I es la matriz relacionada a la reflectividad de la capa I, ubicada a una profundidad Zi.

T^+ es la matriz de transmisión entre z_m y z_1

S_i^u es la matriz relacionada a la propagación de la fuente en dirección hacia arriba

S_i^d es la matriz relacionada a la propagación de la fuente en dirección hacia arriba

El cálculo de los coeficientes de las matrices, se obtiene a partir de la aplicación de un algoritmo recursivo, que viene dado por, (Müller, 1985):

$$\mathrm{MT_i} = \mathrm{E_i MB_i E_i} \qquad (3.9)$$

$$\mathrm{MB_i} = R_{i+1}^d + T_{i+1}^u + [I - \mathrm{MT_{i+1}} R_{i+1}^u]^{-1} \mathrm{MT_{i+1}} T_{i+1}^d \qquad (3.10)$$

En las ecuaciones 3.9 y 3.10, se denotan los exponentes u y d, como las direcciones hacia arriba y hacia abajo, respectivamente. Las matrices $\mathrm{MT_i}$ y $\mathrm{MB_i}$, se refieren a las reflectividades en el tope y en la base de la capa i, respectivamente. $\mathrm{T_{i+1}}$ es la matriz de transmisión en la capa i+1. $\mathrm{E_i}$ es el término de cambio de fase en la capa i.

3.2.1. Aplicación del modelado de reflectividades: SUREFLPSVSH

Se realizó un proceso de revisión de distintos códigos y programas, para luego seleccionar como módulo definitivo para la generación de los sintéticos, el código correspondiente a SUREFLPSVSH, perteneciente al paquete de Seismic Unix.

Este módulo fue seleccionado principalmente porque tiene la capacidad de modelar ondas convertidas, objetivo principal de esta investigación, y emplea el método de modelado de reflectividades, que se caracteriza por una potente estabilidad numérica, precisión y buenos resultados de propagación de onda.

En primer lugar, se estudió y se revisó todos los parámetros a modificar en el código y se generó un archivo, de manera de variar la configuración de los

parámetros de adquisición por corrida, utilizando un modelo de capas horizontales, basado en el Capítulo II de esta investigación. Los parámetros de SUREFLPSVSH que se modificaron, para la generación de los Shot Gathers fueron los siguientes:

3.2.1.1 Parámetros generales

Estas variables definen, las características esenciales del campo de propagación de la onda, que se generará en los disparos sintéticos multicomponentes:

- int_type: Método para calcular la integración de la lentitud (=1 Trapezoidal o =2 Esquema de Filon)

- wtype: Tipo de onda a calcular en el modelado (=1 PSV o =2 SH)

- stype: Tipo de fuente a seleccionar (=1 Energía producto de una Falla o =2 Explosivos)

- wfield: Campo de Onda (=1 Desplazamiento, =2 Velocidad o =3 Aceleración)

- wavelet_type: Tipo de ondícula (=1 Spike, =2 Ricker o =3 Akb)

- fpeak: Frecuencia fundamental de la ondícula [Hz]

- nlayers: Número de capas presentes en el modelo.

- verbose: Parámetro que le permite al usuario indicar cómo se mostrarán los resultados procesados. Si el valor es 0 no se muestran los resultados, para un valor igual a 1 los resultados se mostrarán en pantalla, si el valor es igual a 2, los resultados se guardarán en un archivo y si verbose presenta un valor igual a 3 los resultados se mostrarán en pantalla y se guardarán en un archivo.

- decay: Factor de decaimiento, para evitar el aliasing temporal.

- red_vel: Factor aplicado para reducir la velocidad de onda P.

3.2.1.2 Tiempo, Offset, Frecuencia y Parámetro de Rayo.

Estas variables, definen la configuración de la adquisición sísmica, que se generará en los disparos sintéticos como: tiempo total de grabación, offset máximo de la adquisición, número de geófonos, espaciado entre trazas, entre otros.

- tsec: Tiempo de grabación en el sismograma [seg].

- dt: Intervalo de tiempo de muestreo.

- nt: Número de muestras en tiempo.

- bx: Offset asignado a la primera traza [Km].

- fx: Offset asignado a la última traza [Km].

- nx: Número total de trazas (valor máximo eje X).

- dx: Espaciado entre trazas [Km].

- nw: Número de frecuencias, a procesar.

- nf: Número de frecuencias, a imprimir en pantalla.

- bp: Valor del parámetro de rayo más lento para los sismogramas [s/Km].

- p2w: Valor de parámetro de rayo máximo

3.2.1.3 Fuente

Estos parámetros definen las características y la ubicación de la fuente sísmica.

- lsource: Tope de la capa, donde se coloca la fuente.
- stype: Tipo de fuente = Explosivo.
- h1: Parte lineal vertical de la fuente.
- m0: Momento Sísmico.
- m1: [1][1] Componente del Tensor de Momento.
- m2: [1][2]=[2][1] Comp. del Tensor de Momento.
- m3: [2][2] Componente del Tensor de Momento.

3.2.1.4 Geófonos

Estos parámetros definen las características y la ubicación de los receptores.

- nor: Número de profundidades, donde los geófonos serán colocados (>1 En caso de VSP).
- lobs: Tope de la capa, donde serán colocados los geófonos.

3.2.1.5 Modelo estratificado de la tierra

En esta sección, se definen las características de los estratos que conforman el modelo. Se debe especificar la velocidad de onda P, velocidad de onda S, densidad, atenuación y espesor de cada estrato.

- cl: Vector que presenta los Valores de Velocidad de Onda P de cada capa del

modelo [Km/seg].

- ct: Vector que presenta los Valores de Velocidad de Onda S de cada capa del modelo [Km/seg].

- ql: Vector que presenta los Valores de Q-Compresional de cada capa del modelo (atenuación).

- qt: Vector que presenta los Valores de Q-Cizalla de cada capa del modelo (atenuación).

- rho: Vector que presenta los Valores de densidades pertenecientes a cada capa del modelo [gr/cc].

- t: Vector que presenta los Valores de espesores de cada capa del modelo [Km].

El módulo SUREFLPSVSH, fue probado sobre los dos modelos descritos en el capítulo anterior, utilizando una configuración ideal de adquisición de 400 geófonos espaciados cada 5m. Esta configuración, fue escogida a fin de poder estudiar variaciones en la distancia entre receptores, en incrementos de 5 metros, así como las variaciones del offset máximo hasta 3 veces la profundidad del objetivo. En las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran los valores utilizados para cada corrida.

En las figuras 3.7 (A) y (B), se muestran los disparos sintéticos modelados para dos capas, a partir de los valores definidos en la tabla 3.1, para la componente vertical y radial, respectivamente.

En las figuras 3.8 (A) y (B), se muestran los disparos sintéticos modelados para cinco capas, a partir de los valores definidos en la tabla 3.2, para la componente radial y vertical, respectivamente.

Tabla 3.1 Parámetros utilizados para la construcción de los sismogramas sintéticos en un modelo de 2 capas, con una configuración de adquisición ideal correspondiente a 400 geófonos con una separación de 5 metros entre sí.

int_type	1
wtype	1
stype	2
wfield	3
wavelet_type	2
fpeak	30 hertz
nlayers	4
verbose	3
decay	50
red_vel	0
tsec	3 segundos
Dt	0.001 segundos
Nt	3000
Bx	0.05 kms
Fx	2 kms
Nx	400
Dx	0.005 kms
Nw	500

nf	500
bp	0
p2w	0.8
lsource	3
stype	2
h1	1.0
m0	1.0
m1	1.0
m2	0.0
m3	1.0
nor	1
lobs	2
cl	2.54,2.54,2.54,2.9 km/seg
ct	0.8,0.8,0.8,1.5 km/seg
ql	1000,1000,1000,1000
qt	1000,1000,1000,1000
rho	2.17,2.17,2.17,2.21 gr/cc
t	0.001,0.014,0.64,0.288 kms

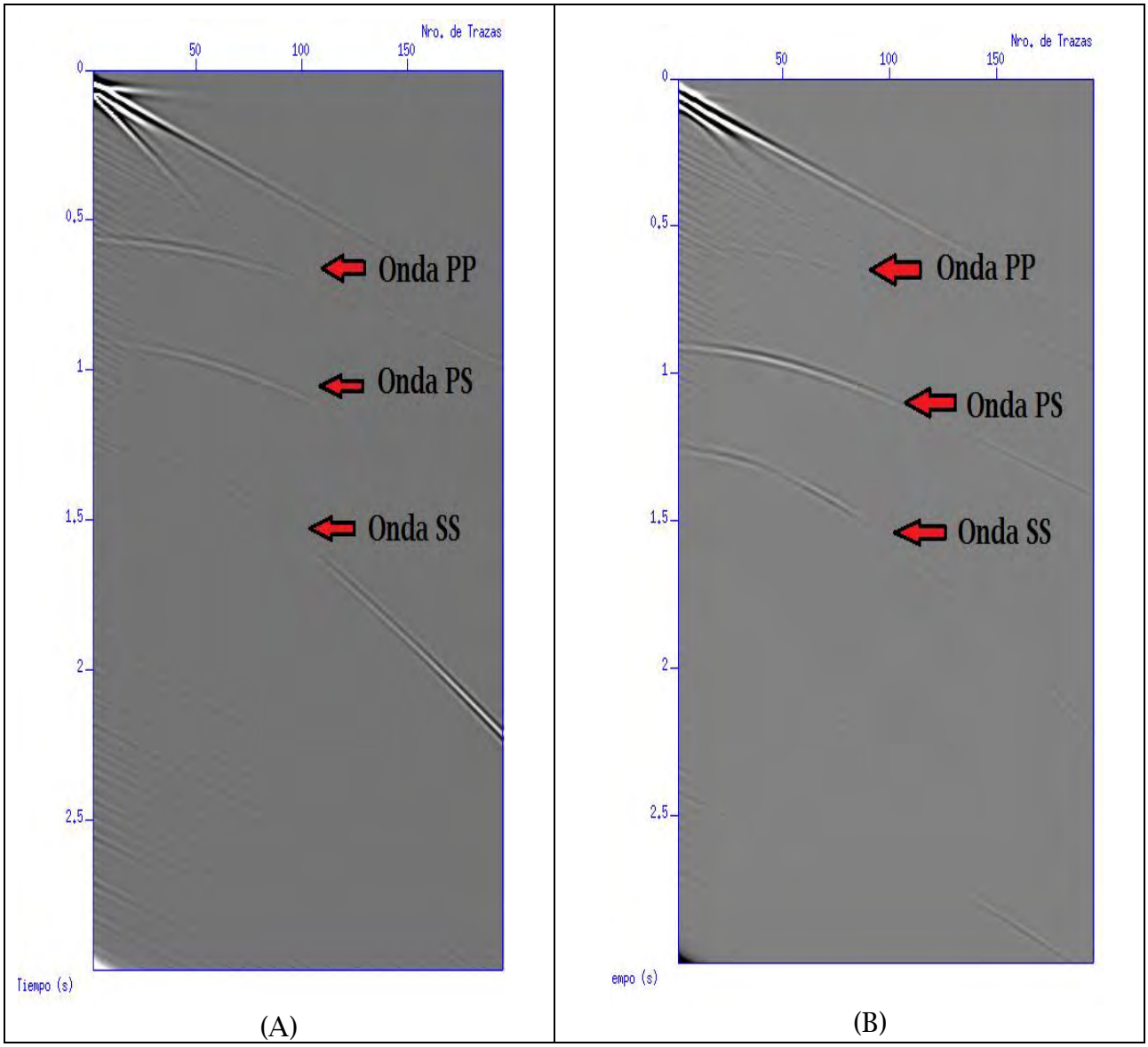


Figura 3.7 Shot Gather sintético modelado para dos capas con sus respectivos eventos. (A) Componente Vertical. (B) Componente Radial.

En la figura 3.7, se puede observar el modelado de reflectividades para un modelo correspondiente a una sola interfaz. Es importante destacar, las diferencias entre el shot gather sintético presentado para la componente radial y vertical. La componente vertical, (Ver figura 3.7, A), presenta altos valores de amplitudes para los eventos PP, mientras que para la componente radial, (Ver figura 3.7, B), se tiene que el evento PP, es casi imperceptible y se acentúan sólo las amplitudes de los eventos correspondientes a la dirección horizontal PS y SS. De igual forma, es

importante señalar que tal como se esperaba, las amplitudes del evento PS son bajas en las primeras trazas (offsets cercanos) y, aumentan hasta cierto offset a partir del cual vuelven a disminuir. Este fenómeno, será estudiado en el capítulo V.

Tabla 3.2 Parámetros utilizados para la construcción de los sismogramas sintéticos en un modelo de 5 capas, con una configuración de adquisición ideal correspondiente a 400 geófonos con una separación de 5 metros entre sí.

int_type	1
Wtype	1
Stype	2
Wfield	3
wavelet_type	2
fpeak	40 hertz
nlayers	7
verbose	3
decay	50
red_vel	0
tsec	3 segundos
dt	0.001 segundos
nt	3000
bx	0.05 kms
Fx	2 kms
Nx	400
Dx	0.005 kms

Nw	500
Nf	500
Bp	0
p2w	0.8
lsource	3
Stype	2
h1	1.0
m0	1.0
m1	1.0
m2	0.0
m3	1.0
Nor	1
Lobs	2
Cl	2.3,2.3,2.3,2.6,2.9,2.7,3 km/seg
Ct	0.8,0.8,0.8,1.2,1.4,1.6,1.8 km/seg
Ql	1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000
Qt	1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000
Rho	2.1,2.1,2.1,2.25,2.15,2.2,2.35 gr/cc
T	0.001,0.014,0.64,0.004,0.06,0.18,0.04 kms

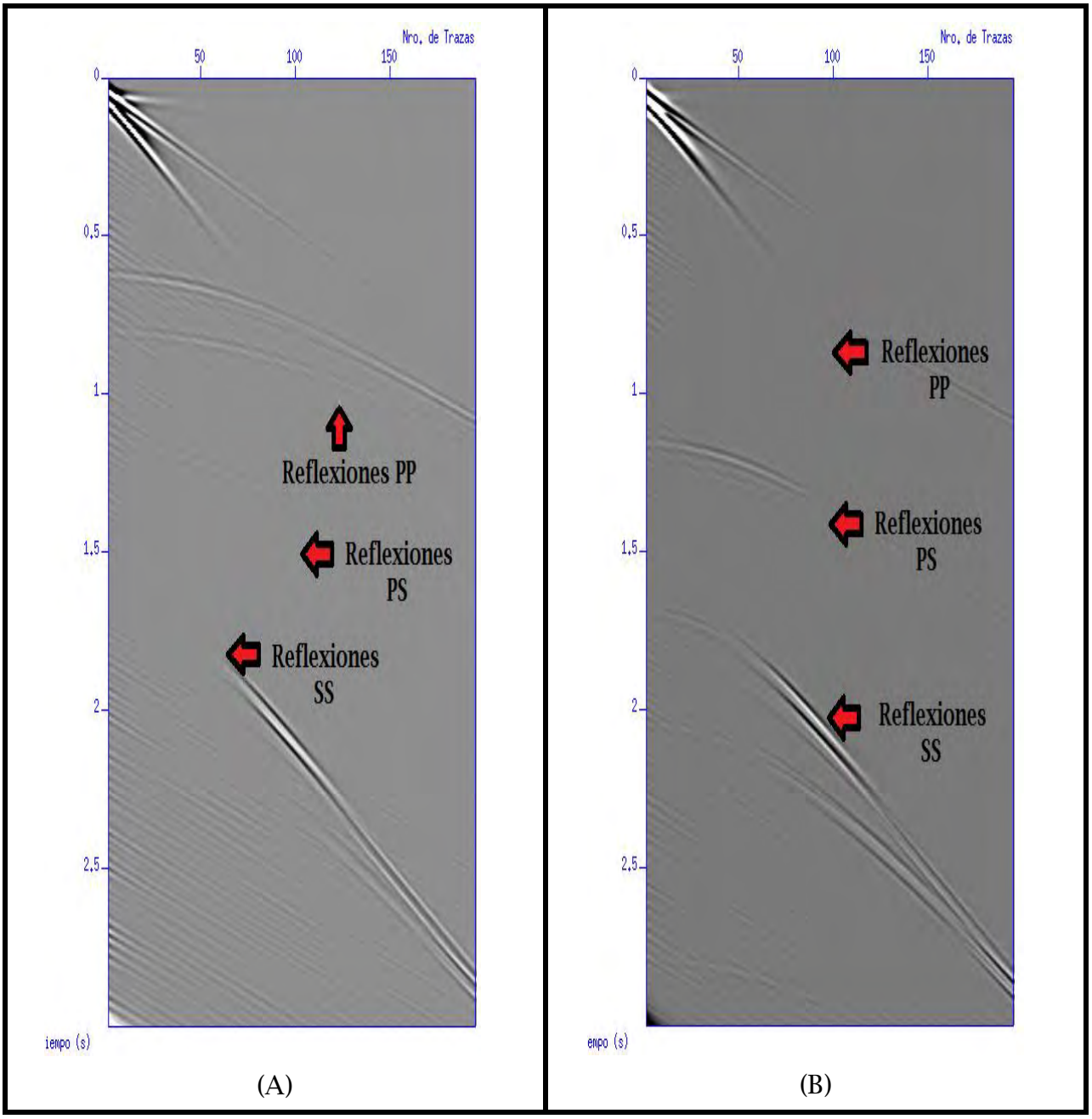


Figura 3.8 Shot Gather sintético modelado para cinco capas con sus respectivos eventos. (A) Componente Vertical (B) Componente Radial.

En la figura 3.8, se puede observar el modelado de reflectividades, para un modelo correspondiente a cuatro interfaces. Es importante destacar, las diferencias entre el shot gather sintético presentado para la componente radial y vertical. La componente vertical, (Ver figura 3.8, A), presenta una acentuación de las

amplitudes para el paquete de reflexiones correspondiente a la onda PP; mientras que las amplitudes para los eventos de onda convertida (P-S) y onda SS, son prácticamente despreciables. Para la componente radial, (Ver figura 3.8 B), se tiene que los eventos de onda PP, son casi imperceptibles y se acentúan sólo las amplitudes de los eventos correspondientes a la dirección horizontal de propagación de onda convertida y SS.

Es notable que en los parámetros de la corrida de SUREFLPSVSH: cl, ct, ql, qt, rho, y t, los modelos presentan dos capas más que el número real de estratos (Ver parámetro nlayer: tabla 3.1 y 3.2), esto se debe a que se añadieron dos capas ficticias: la primera con un metro de espesor y la segunda con 14 metros de espesor, para ubicar los geófonos a un metro de profundidad y la fuente a 15 metros de profundidad, respectivamente. Estos parámetros fueron seleccionados tomando en cuenta las variables reales de adquisición, que están siendo utilizadas actualmente por la empresa PDVSA para adquirir datos sísmicos en la Faja Petrolífera del Orinoco.

Es necesario, establecer los valores de los parámetros de m0 y p2w, ya que el código no le otorga a estas variables valores predeterminados, y los vectores: cl, ct, ql, qt, rho y t, deben ser de la misma longitud, igual siempre al número de capas que presenta el modelo (parámetro nlayer).

Para la visualización de los sismogramas sintéticos creados, se utilizó el módulo SUXIMAGE; y se realizó la conversión del formato .SU que presentaban los Shot Gathers creados con el comando SUREFLPSVSH a SEG-Y, a partir de los módulos SEGYHDRS y SEGYWRITE. El primero se utilizó para crear el header del SEGY y el segundo se empleó para poder escribir los resultados con la estructura del formato correspondiente.

Para finalizar esta sección, es importante resaltar que se realizaron dos corridas del código, con una configuración correspondiente a 400 geófonos, espaciados cada 5 metros, y se generó cuatro archivos formato SU, que posteriormente se rescribieron en formato SEG-Y. Los primeros dos para el modelo de dos capas

(Componente radial y Componente vertical) y los dos últimos para el modelo de cinco capas (Componente radial y Componente vertical). El código utilizado para la generación de los sismogramas sintéticos, se muestra en el **apéndice A.**

3.2.2. Influencia de la frecuencia fundamental de la ondícula en los sintéticos

Luego de generar los sismogramas sintéticos, con una ondícula tipo Ricker y frecuencia fundamental de 25 Hertz, se observó que para la componente vertical del modelo de 5 capas, no se podían resolver bien los eventos ubicados a tiempos menores de 1 segundo. Por esta razón, se generaron varias corridas; modificando solamente el parámetro Fpeak correspondiente a la frecuencia fundamental de la ondícula Ricker, entre 25-60 Hertz, variando cada cinco Hz.

A continuación, se muestra en la figura 3.9, el efecto de la variación del parámetro Fpeak, en los sintéticos generados. Es notable que para 25, 30 y 35 Hertz, los dos eventos de onda PP, ubicados alrededor de 0.5-0.6 segundos, no se pueden diferenciar con claridad, principalmente para offsets lejanos. En cambio, si se emplea una frecuencia pico de 40, 45 y 50 Hertz, se logra distinguir mejor un evento de otro. Los sintéticos generados, con una frecuencia fundamental igual a 55 y 60 Hertz, presentan una seria disminución de la relación S/R.

Por lo tanto, es necesario que el usuario establezca un valor razonable del parámetro Fpeak, ya que esto va a influir directamente en la resolución de los eventos correspondientes a cada reflexión. No se debe emplear, una frecuencia baja, que sacrifique la resolución de los eventos, pero tampoco una muy alta que destruya la relación S/R de los shot gathers sintéticos.

Para este modelo, los valores de 40, 45 y 50 Hertz, representan frecuencias aceptables que generan muy buenos resultados.

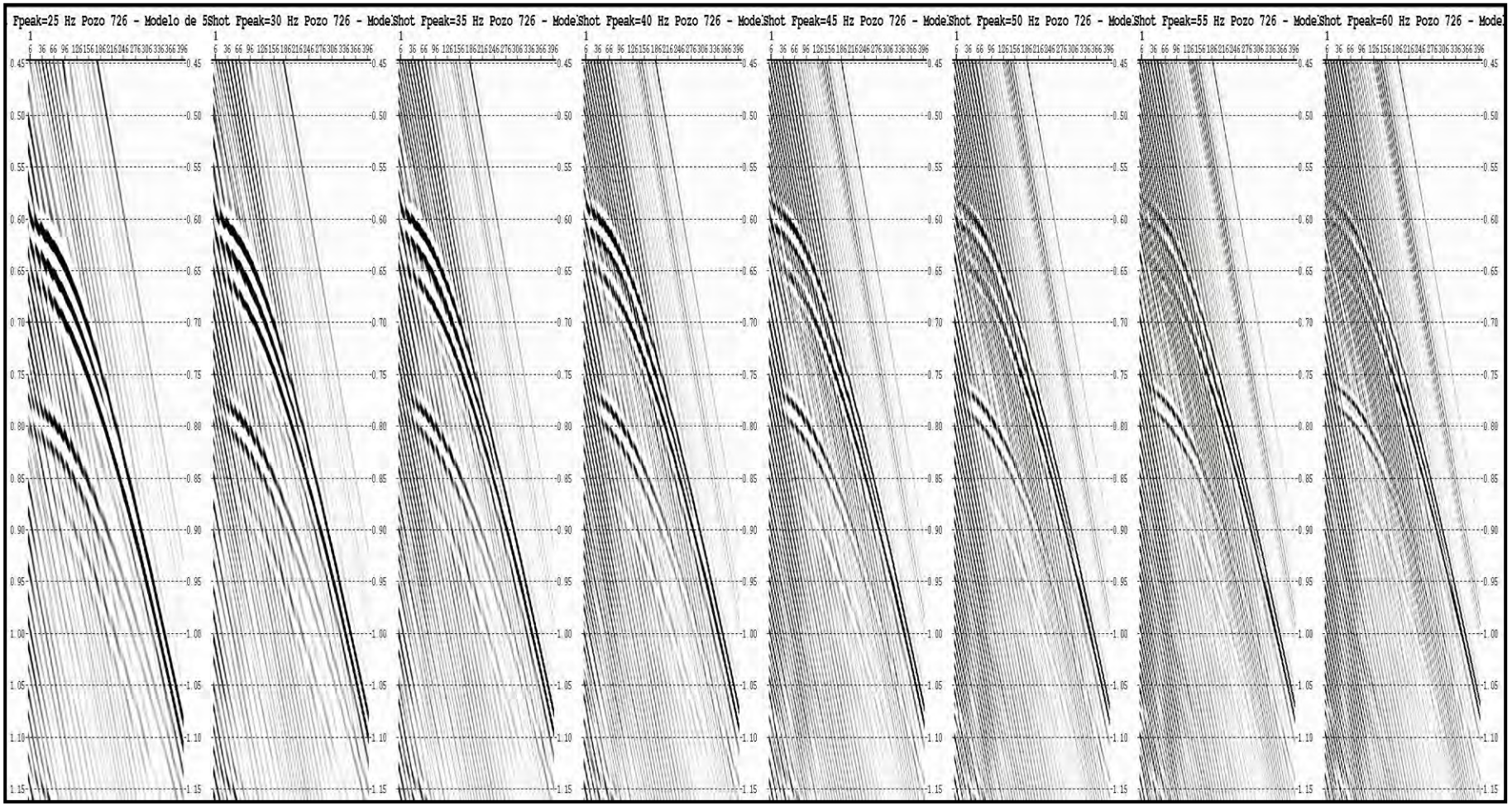


Figura 3.9 Variación de la frecuencia fundamental de la ondícula Ricker, en los sismogramas sintéticos generados para la componente **vertical**, del modelo de **cinco** capas, con una longitud de registro de 1 segundo. De izquierda a derecha: 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 Hertz..

3.2.3 Influencia del parámetro de rayo (p2w) en la generación de los sintéticos

Luego de generar varias corridas, con el módulo SUREFLPSVSH, fue notable que el aumento del valor parámetro de rayo máximo (p2w), era proporcional al incremento del tiempo computacional empleado para la generación de los shot Gathers sintéticos. Este hecho, debe ser tomando en cuenta, para la utilización de este módulo, ya que valores mayores a 1 de este parámetro, retarda en gran magnitud la generación de datos.

Por otro lado, se varío este parámetro (s/Km), para distintos valores, y se concluyó que este producía, dos tipos de comportamiento en los datos sintéticos generados.

El primer comportamiento, se muestra en la figura 3.11 (A), y corresponde a valores menores a 1. Para este trabajo de investigación, el valor empleado fue 0.8 en la elaboración de los datos sintéticos, ya que valores menores a este en el código, generaba errores en la corrida, (Ver tabla 3.1 y 3.2).

El segundo comportamiento, se describe en la figura 3.11 (B), correspondiente a valores de parámetro de rayo máximo, mayores o iguales a 1, donde se observa la generación de ruido coherente, pertinente a la simulación de la propagación de reflexiones de ondas Rayleigh y Love (Ground-Roll). Debido a que este evento, no corresponde a información de reflexiones primarias, no se tomó en cuenta este comportamiento para el procesamiento de datos sísmicos en esta investigación. Además, SUREFLPSVSH no permite modelar el carácter dispersivo del Ground-Roll, razón por la que este evento se observa con una una frecuencia constante y una sola velocidad.

Es importante resaltar que para valores de p2w mayores a 1, se tiene mayor definición de los eventos y una disminución clara de ruido numérico, para offsets cercanos.

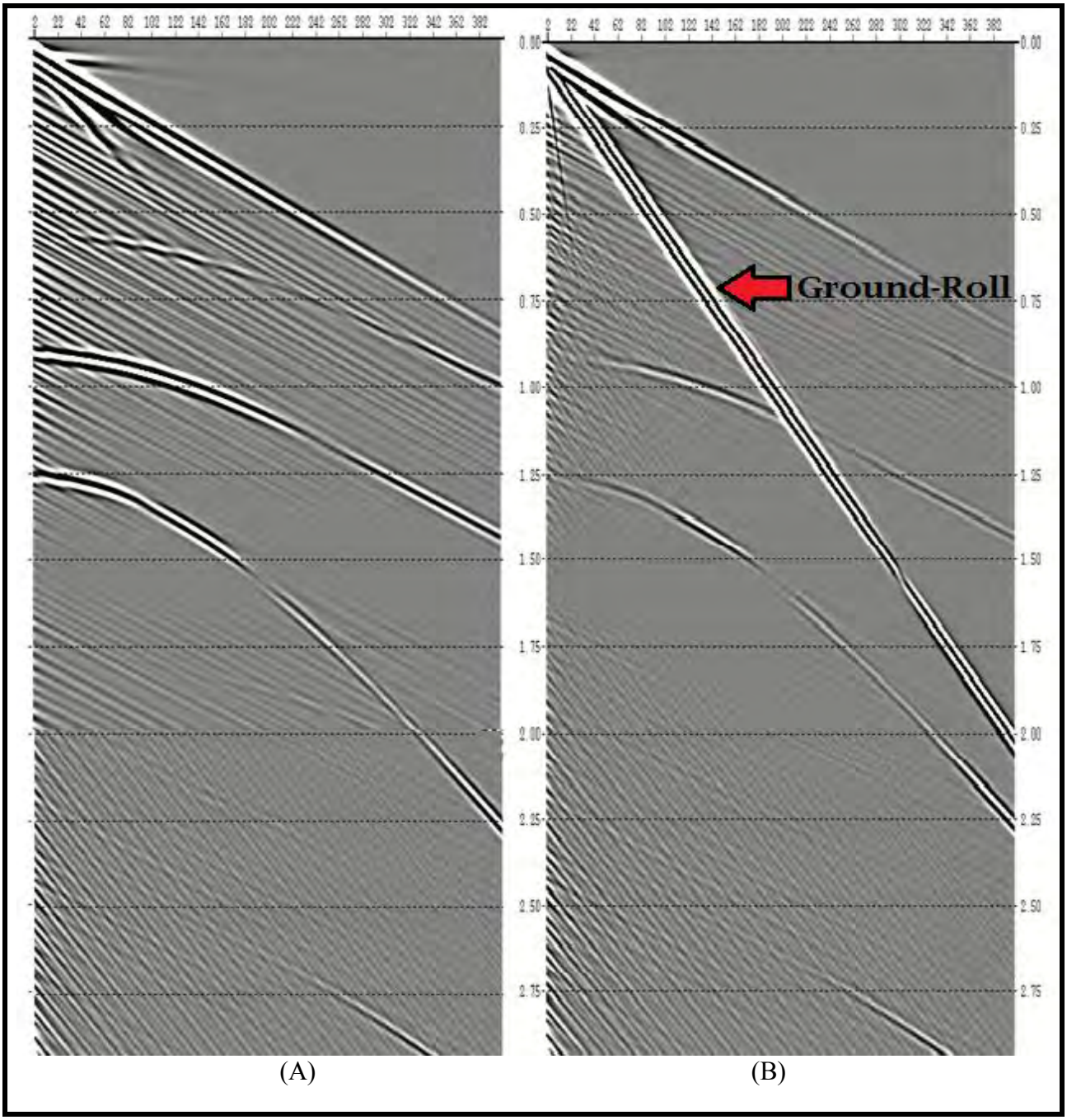


Figura 3.10 Influencia del parámetro de rayo, en la generación de los shot Gathers sintéticos. (A) Valor de parámetro de rayo menor a 1. (B) Valor de parámetro de rayo mayor a 1.

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO SÍSMICO DE LOS SHOT GATHERS SINTÉTICOS

En este capítulo se explicará la secuencia de procesamiento desarrollada para los datos sintéticos, correspondiente a la componente vertical y radial. El software de procesamiento sísmico utilizado fue FOCUS versión 5.4, desarrollado por la compañía PARADIGM.

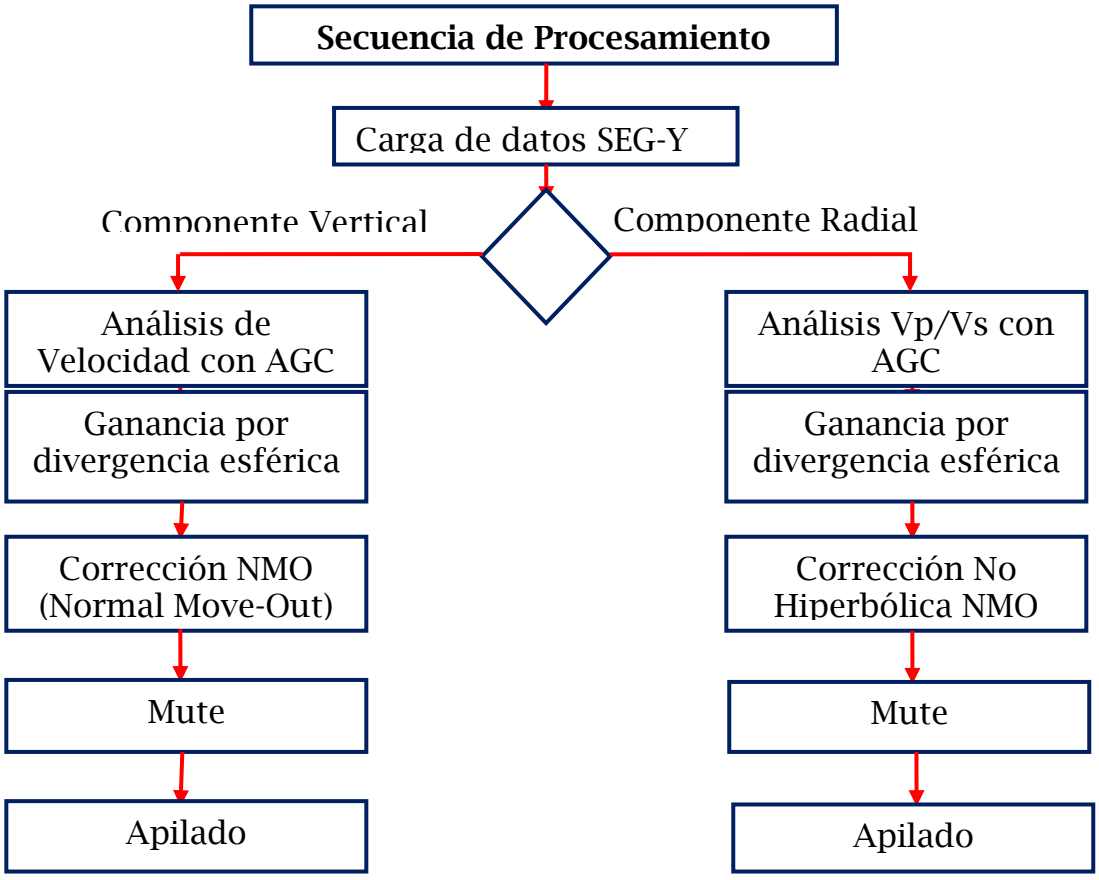


Figura 4.1 Flujograma que describe la secuencia de procesamiento implementada

4.1. PROCESAMIENTO DE SHOT GATHERS SINTÉTICOS CORRESPONDIENTES A LA COMPONENTE VERTICAL

En esta sección, se explicará brevemente cada uno de los módulos empleados para el procesamiento de los datos sintéticos generados con el módulo SUREFLPSVSH, correspondiente a la componente vertical.

4.1.1. Carga de datos en el programa

Esta rutina de trabajo, le permite al usuario ingresar a la base de datos del proyecto, archivos con formato SEGY.

En la figura 4.2, se presentan los módulos utilizados para la carga de datos de los archivos SEG-Y generados con anterioridad, a través del módulo SUREFLPSVSH del paquete Seismic Unix. A continuación, se explicará brevemente cada uno de los módulos empleados en esta rutina de trabajo:



Figura 4.2 Flujograma de trabajo utilizado para cargar los archivos

4.1.1.1. GIN

Este módulo se utiliza para cargar archivos con formato .SEGY, a la base de datos del proyecto. Los parámetros requeridos para su utilización, son los siguientes:

- LENGTH: Longitud del registro en milisegundos
- DT: Intervalo de tiempo de muestreo
- MAXNTR: Número máximo de trazas por arreglo
- ENSEMBL: Parámetro que caracteriza la organización de los datos.
- DIR: Parámetro que indica la dirección en la que fueron organizados los datos (ascendente o descendente).
- FORMAT: Indica el formato del archivo, que se carga a la base de datos (Por ejemplo: SEGY).
- TAPEOPT: Parámetro que se utiliza para indicar la ruta donde se encuentra el archivo, que se desea cargar a la base de datos de Focus. El formato de la ubicación del archivo debe ser el siguiente:
  /TAPEFILE="diskexample1/userdir/example.sgy"

Los parámetros definidos para la utilización del módulo GIN, se presentan en la figura 4.3.

```
3000        LENGTH  - Data length (ms)
1           DT      - Sample rate (ms)
400         MAXNTR  - Maximum number of traces/ensemble
SHOT        ENSEMBL - Sort order of data
INCR        DIR     - Direction
SEGY        FORMAT  - Tape format

            TAPEOPT - Tape Option Parameters
              SYSINFO - Tape processing information
/tapefile="/geofsrv/datos7/rodriguezval/Vanessa/726/5b/404000.005.sgy"
```

Figura 4.3 Parámetros utilizados en el Módulo GIN, para la carga de un Shot Gather sintético

4.1.1.2. HDRMATH

Este módulo se utilizó con la finalidad de modificar el header del archivo SEG-Y, para poder ordenar los datos sísmicos, por la variable SHOT, ya que se tiene un solo disparo por configuración.

En la figura 4.4, se muestra la edición del encabezado de los datos SEG-Y de entrada.

```
            HCADD   - Add Trace Header to a Constant (H1 + C)
SHOT          NAME1   - Header 1 (H1)
1             CONST   - Constant (C)
SHOT          OUTPUT  - Name of output header entry
```

Figura 4.4 Parámetros utilizados en el Módulo HDRMATH, para la edición del header de los archivos SEG-Y.

4.1.1.3. DSOUT

Este comando, le permite al programa convertir los archivos de entrada formato SEG-Y en archivos PDS (Paradigm Data Set). Los parámetros requeridos para el uso de este módulo fueron los siguientes:

- MODE: Este parámetro indica, si el archivo crea un nuevo registro, o modifica uno ya existente dentro de la base de datos del programa

- TRORG: Especifica el formato de un conjunto de datos

- ENCODE: Especifica el tipo de codificación del archivo (Por ejemplo: IEEE Floating Point).

- STARTTM: Tiempo mínimo de grabación en milisegundos.

- ENDTM: Tiempo máximo de grabación en milisegundos.

- LABEL: Se utiliza para especificar el nombre con el que se guardará el archivo de entrada en la base de datos del programa.

Las variables definidas para la utilización del módulo DSOUT, se presentan en la figura 4.5.

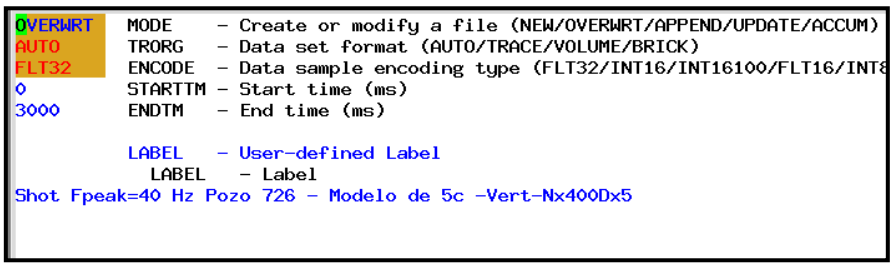
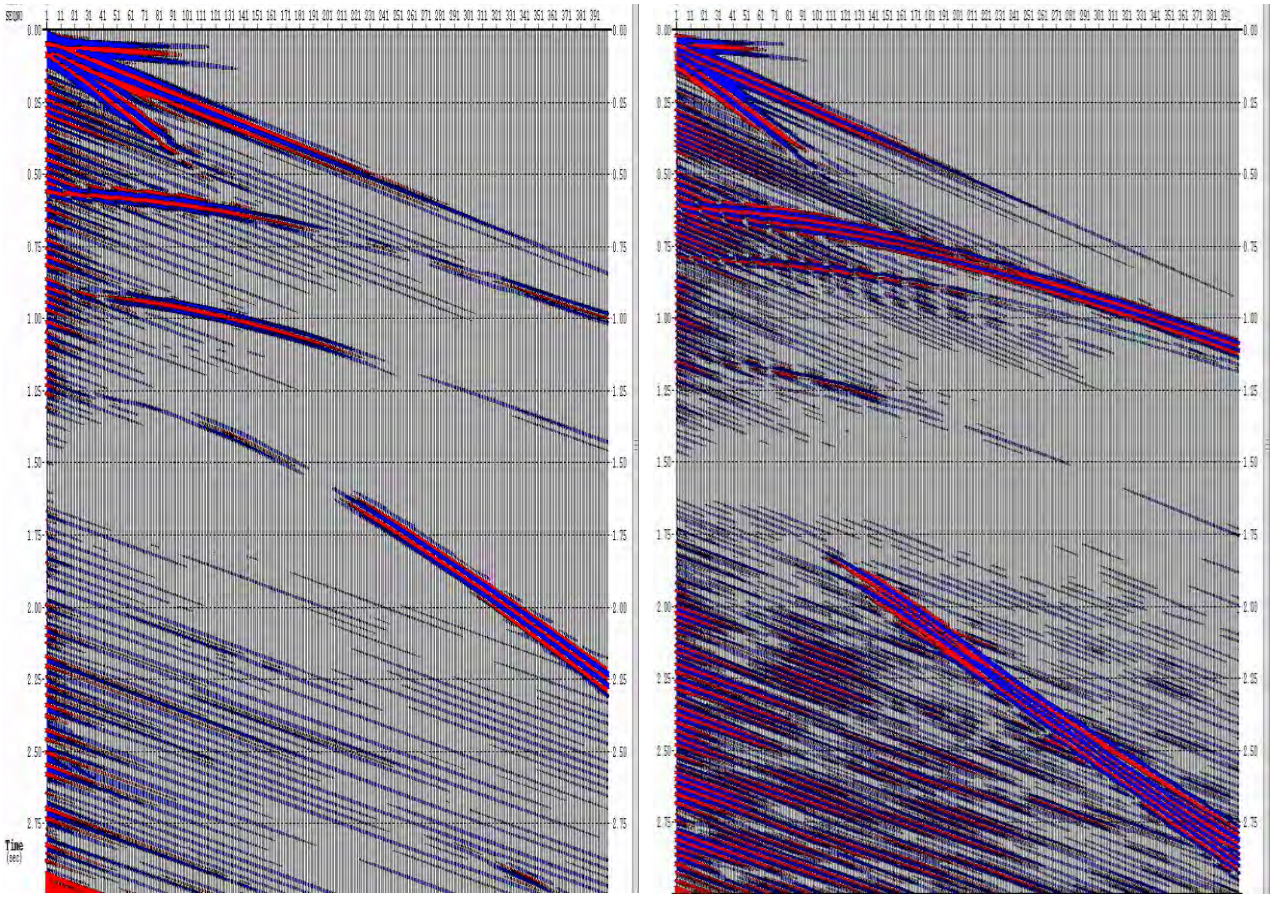


Figura 4.5 Parámetros utilizados en el Módulo DSOUT, utilizado para almacenar los archivos de entrada en la base de datos del programa.

Luego de aplicar esta rutina de trabajo, dos veces consecutivas, se cargaron los archivos correspondientes a la componente vertical, con formato SEG-Y, que se caracterizan por presentar un amplio contenido de 400 trazas, separadas cada 5 metros (Ver tabla 4.1). En las figuras 4.2 (A) y (B), se observan los disparos sintéticos, correspondientes al modelo de dos capas y cinco capas, que fueron cargados a la base de datos del programa,

Tabla 4.1 Descripción de los archivos que se cargaron en la base de datos del programa.

Número	Modelo	Componente	Número de trazas	Intervalo entre trazas
1	2 Capas	Vertical	400	5 metros
2	5 Capas	Vertical	400	5 metros



(A) (B)

Figura 4.5 Shot Gathers Sintéticos correspondientes a la componente vertical cargados en Focus, (A) Modelo de dos capas, (B) Modelo de cinco capas.

4.1.2. Análisis de Velocidad

En esta sección se explicará brevemente, los módulos utilizados en focus, para el almacenamiento de la función velocidad, determinante para la horizontalización de las trazas sísmicas, a partir de la corrección NMO. El procedimiento utilizado se muestra en la figura 4.6.

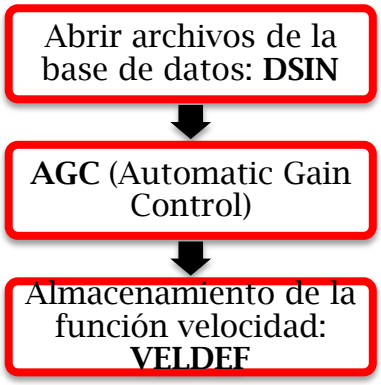


Figura 4.6 Flujograma de trabajo utilizado en el programa, para el almacenamiento de la función velocidad.

4.1.2.1. DSIN

Este módulo le permite al usuario, seleccionar cualquier archivo que se encuentre guardado en la base de datos del proyecto, (Ver figura 4.7).

Name	Data Type	Data Subtype
	All Items	All Items
M5-726 Stack Nx17 Dx40 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx33 Dx40 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx50 Dx40 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx33 Dx20 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx65 Dx20 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx98 Dx20 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx65 Dx10 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx130 Dx10 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M5-726 Stack Nx195 Dx10 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M2-726 Stack Nx17 Dx40 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude
M2-726 Stack Nx33 Dx40 Componente Horizontal	Seismic	Amplitude

Figura 4.7 Ventana que muestra los archivos de la base de datos

4.1.2.2. AGC (Automatic Gain Control)

La función principal de este módulo, es mejorar la visibilidad de eventos débiles como los que se encuentran a offsets lejanos y tiempos profundos, en los que se produce un decaimiento de las amplitudes. Este módulo, multiplica las amplitudes por un escalar, que es calculado a partir del promedio RMS de las amplitudes, que se encuentran dentro de la ventana de cálculo. Esta ventana se va deslizando a lo largo de toda la traza, llevando todas las amplitudes a un mismo nivel de referencia, eliminando así el efecto del decaimiento. Los parámetros que se definen son: AGCGATE y SFACTOR, el primero corresponde a la longitud de la ventana de tiempo (ms) y el segundo es el factor de escalamiento, que se aplica para la ganancia, (Ver figura 4.8).

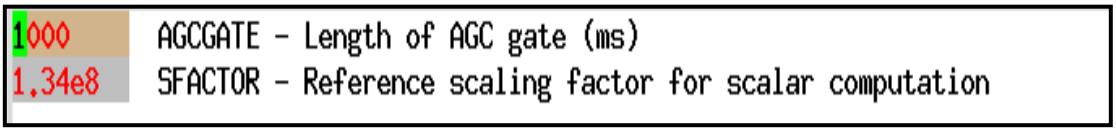


Figura 4.8 Parámetros utilizados para la aplicación de AGC en la secuencia de procesamiento.

4.1.2.3. VELDEF

Este módulo se utilizó con la finalidad de almacenar una función velocidad, en la base de datos del proyecto. La función velocidad creada por VELDEF, se almacena en forma de pares (tiempo, velocidad). Es importante resaltar, que este módulo no procesa la data sísmica. La función velocidad creada, se almacena y luego otros módulos pueden accesar a ésta, para procesar los datos: aplicando correcciones NMO, migraciones, muting, entre otros.

Para el almacenamiento de la función velocidad, el módulo VELDEF, se puede utilizar en modo interactivo; presentando al lado izquierdo, el shot gather sintético

y al lado derecho, el mapa de semblanza correspondiente al Shot Gather, (Ver figuras 4.9 y 4.10), de manera de poder realizar el "picking" o selección de los pares tiempo/velocidad, que mejor horizontalicen las reflexiones registradas en el Shot Gather sintético.

La semblanza, es una medida cuantitativa de la coherencia de datos sísmicos, igual a la energía de la traza apilada, dividida por la energía elevada al cuadrado, de cada una de las trazas que conforman el apilado. En términos matemáticos, si se considera un gather con una sola reflexión, la amplitud apilada S, a un tiempo doble de viaje a cero-offset, se define como, (Yilmaz, 2001):

$$\boldsymbol{S = \sum_{i=1}^{M} f_{i,t_i}} \qquad (4.1)$$

$$\boldsymbol{t(i) = \sqrt{\left(t_0^2 + \frac{x_i^2}{v_{stk}^2}\right)}} \qquad (4.2)$$

en donde, $\boldsymbol{f_{i,t_i}}$ es el valor de la amplitud, correspondiente a la traza número i, a un tiempo doble de viaje t(i), t(0) es el doble tiempo de viaje, asociado a offset cero, M es el número de trazas y x(i) es el offset asociado a la traza i. El tiempo doble de viaje t(i), se encuentra a lo largo del apilado de la hipérbola asociada a la velocidad de apilamiento Vstk. Entonces, se define la semblanza como:

$$\boldsymbol{NE = \frac{1}{M} \frac{\sum_t \sum_{i=1}^{M} f_{i,t_i}}{\sum_t \sum_{i=1}^{M} f_{i,t_i}^2}} \qquad (4.3)$$

En este trabajo de investigación, se almacenaron dos funciones velocidad, que se emplearon posteriormente para horizontalizar las trazas correspondientes a los datos sísmicos convencionales (componente vertical). La primera función velocidad se denominó VELTEST, (Ver tabla 4.2), utilizada para el Shot gather sintético

modelado para dos capas; y la segunda se nombró VELTEST5, (Ver tabla 4.3), empleada para el Shot gather sintético modelado para cinco capas.

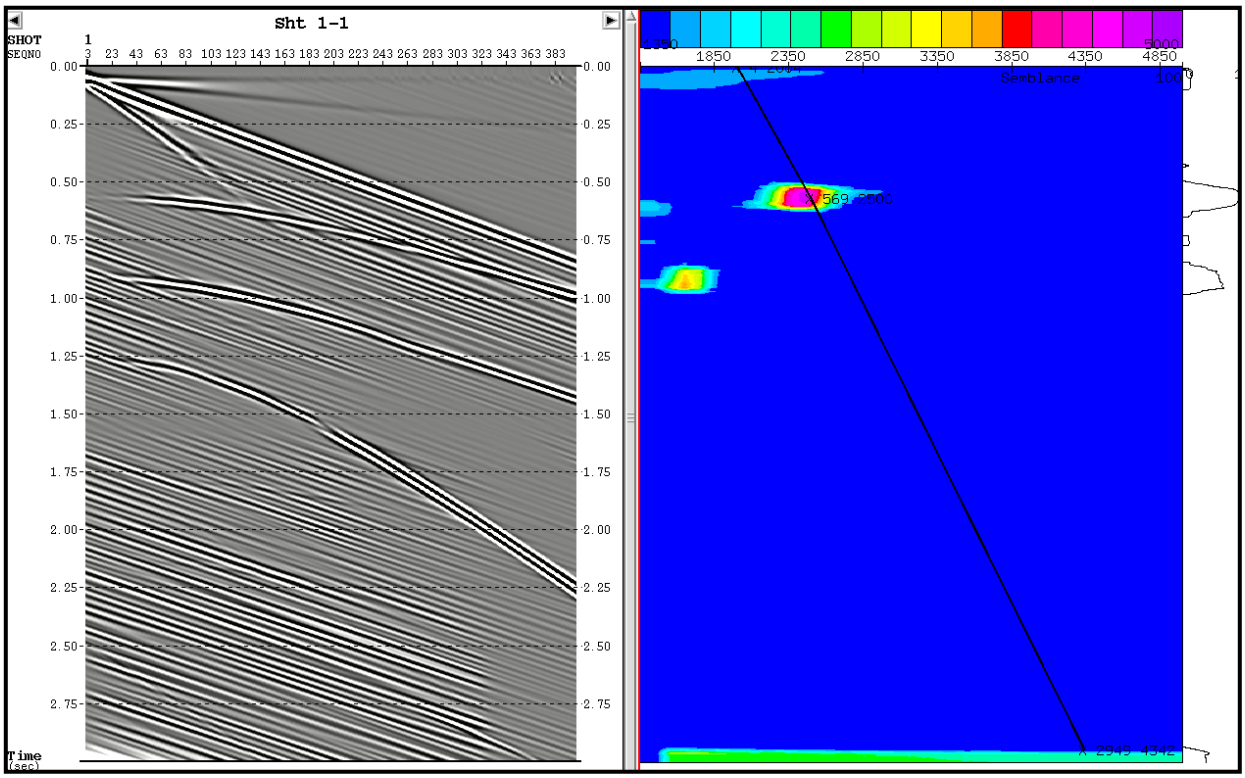


Figura 4.9 Modo interactivo del módulo VELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente vertical para un modelado de **2 capas**

Tabla 4.2 Pares tiempo/velocidad seleccionados, para el almacenamiento de la función velocidad, en el modelo de **2 capas**

Nro.	Tiempo (ms)	Velocidad (m/s)
1	4	2004
2	569	2500
3	2949	4342

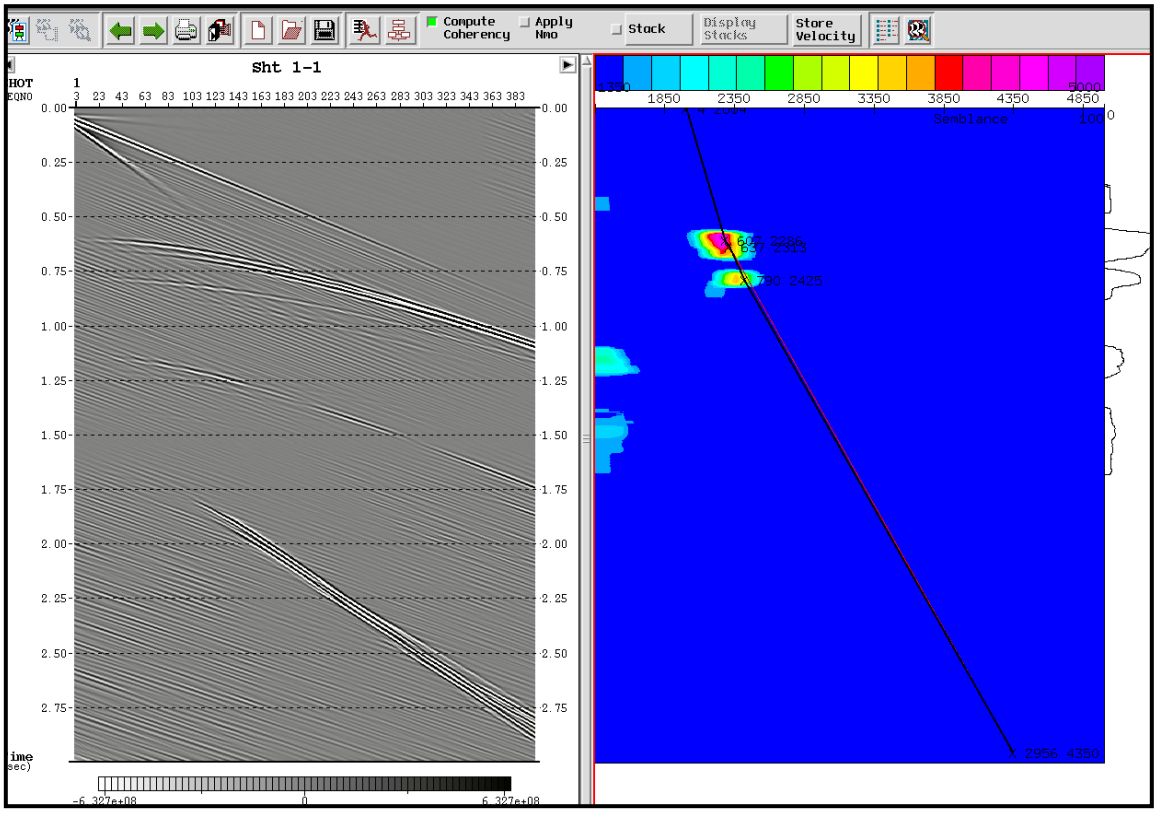


Figura 4.10 Modo interactivo del módulo VELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente vertical para un modelado de **5 capas**

Tabla 4.3 Pares tiempo/velocidad seleccionados, para el almacenamiento de la función velocidad, en el modelo de **5 capas**

Nro.	Tiempo (ms)	Velocidad (m/s)
1	4	2004
2	607	2286
3	637	2313
4	290	2425
5	2956	4350

4.1.3. Ganancia por divergencia esférica

Se aplica ganancia por divergencia esférica, para contrarrestar la atenuación de las amplitudes debida al decaimiento de energía, producto del aumento de las dimensiones del frente de ondas durante su propagación. El módulo que realiza esta corrección de amplitudes se denomina GAIN.

4.1.3.1. GAIN

Este módulo, le permite al usuario aplicar ganancia por divergencia esférica a las trazas sísmicas. Los parámetros definidos para este módulo fueron los siguientes (Ver figura 4.11):

- FACTOR: Designa un escalar general por el que las trazas serán multiplicadas, luego que la función velocidad haya sido aplicada.

- OFFDEP: Especifica si la corrección de las amplitudes por divergencia esférica, será dependiente o independiente del offset. Los valores válidos para este parámetro son: NONE, PRENMO, POSTNMO; el primero aplica la corrección independientemente del offset, el segundo aplica la ganancia dependiente del offset y antes de realizar la corrección NMO, y el tercero es dependiente del offset, sin embargo aplica la ganancia por divergencia esférica luego de haber aplicado la corrección NMO. En este trabajo de investigación, se aplicó la opción PRENMO, que se basa en la ecuación 4.4, (Ursyn, 1990):

$$\mathbf{SCALAR(Tx)} = \frac{\mathbf{V_{rms}^2\,T(0) - \left[2\left(\frac{V_{rms}}{V_o}\right)^2 - 1\right]x^2 + \frac{1}{T^2(0)}\left(\frac{1}{V_0^2} - \frac{1}{V_{rms}^2}\right)x^4}}{\mathbf{SCMAX}} \qquad (4.4)$$

donde,

Vrms: Velocidad RMS (Root Mean Square)

V_0: Velocidad RMS para un tiempo igual a cero

T(0): Tiempo para un offset igual a cero

SCMAX= $V_0(V_{rms} * V_{rms} * T_{max})$

x: Offset

- VOPTION: Especifica el valor de la potencia del promedio de la velocidad. Este parámetro no influye en la aplicación de la ganancia cuando se elige que la corrección es dependiente del offset, por tanto, se utilizan los valores predeterminados por el programa.

- TOPTION: Especifica el valor del exponente al que son elevados lo valores de tiempo T. Este parámetro sólo es utilizado, cuando se elige la opción OFFDEP=NONE, al igual que VOPTION.

- IDENT: Indica el nombre del archivo que contiene la función de velocidad.

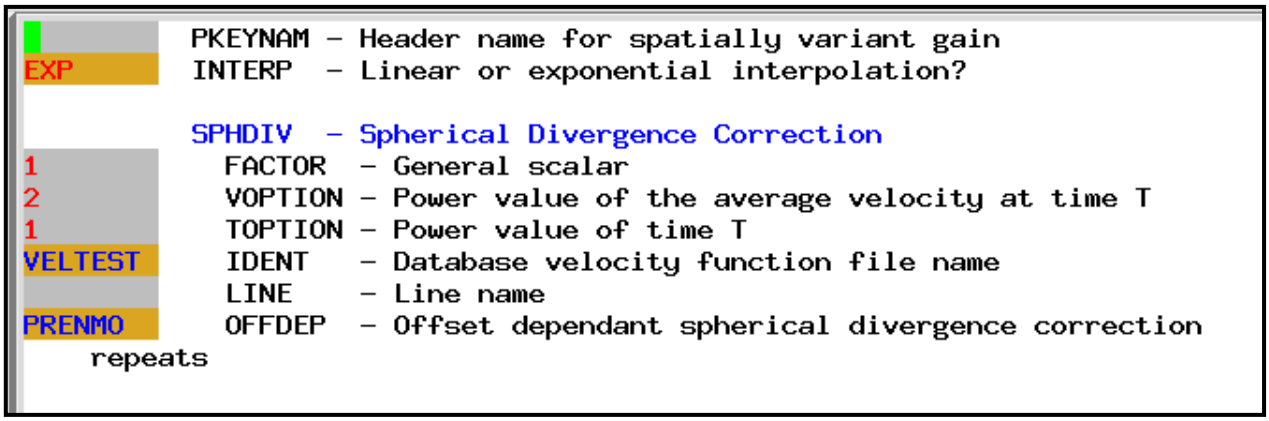


Figura 4.11 Ventana que presenta los valores dados para los parámetros del módulo GAIN, para el modelo de dos capas.

Los parámetros utilizados para la aplicación del módulo GAIN en el modelo de cinco capas, fueron exactamente iguales a los que se muestran en la Figura 4.11, excepto por IDENT, que es igual a VELTEST5.

4.1.4. Corrección Normal Move-Out (NMO).

Durante la adquisición de datos sísmicos, un pulso de energía generado por la fuente, es transmitido a través de la tierra, y reflejado en cada interfaz del subsuelo, para luego esta energía ser grabada por múltiples receptores localizados en la superficie de la tierra. Los receptores, son ubicados a distintas distancias (offset) de la fuente. En el caso de los geófonos, que se encuentren localizados a separaciones más grandes de la fuente, la energía reflejada debe viajar mayores distancias, y por tanto este registro adquirido está retrasado en tiempo.

La cantidad de tiempo de retraso, va a depender principalmente de la velocidad del medio y del offset. Para realizar el apilado de las reflexiones de energía, a distintos offsets, una corrección debe ser aplicada por el incremento en el retraso del tiempo de llegada. Este tiempo de retraso, se denomina “Normal Move Out”, (NMO), y se define como la diferencia entre el tiempo doble de viaje, a un offset dado, y el tiempo doble de viaje, a offset igual cero, en un evento de reflexión sísmica, y viene dado por, (Yilmaz, 2001),

$$t_x = t_o^2 + \frac{x^2}{v_{nmo}^2} \qquad (4.5)$$

en donde:
tx es igual al tiempo doble de viaje, a offset x (ms)
to es el tiempo doble de viaje, a cero offset.
x es el offset
Vnmo es la Velocidad NMO

$$\Delta t_{nmo} = t_x - t_0 \qquad (4.6)$$

Si se sustituye la ecuación 4.5 en 4.6, se obtiene la corrección NMO, en función de la velocidad:

$$\Delta t_{nmo} = t_0 \left\{ \sqrt{\left[1 + \left(\frac{x}{v_{nmo}\, t_0} \right)^2 \right]} - 1 \right\} \tag{4.7}$$

Es importante resaltar, que las ecuaciones anteriormente descritas, suponen que la trayectoria de las ondas sísmicas ocurre en capas horizontales, la onda se propaga en línea recta, y la velocidad de propagación es constante desde el plano de referencia hasta la interfaz reflectora, (Yilmaz, 2001).

A continuación, se aplicará el módulo NMO, a los datos sintéticos obtenidos a partir del módulo SUREFLPSVSH, correspondientes a la componente vertical.

4.1.4.1. NMO

La función principal de este módulo es realizar la corrección NMO, a un conjunto de datos sísmicos. Además, puede remover correcciones NMO previas. Los parámetros definidos fueron los siguientes, (Ver Figura 4.12):

- IDENT: Especifica el nombre del archivo que contiene la función velocidad, previamente creada para el evento sísmico con el módulo VELDEF.

- NMOSW: Este parámetro especifica, la acción que realizará el módulo. Los valores válidos para este parámetro son: NMOAPP, NOMUTE, NMOREM, OVCAPP y OVCREM el primero aplica una corrección NMO regular, con la aplicación de muting automático para trazas que se crucen entre sí, el segundo realiza una corrección normal sin aplicación de muting, el tercero remueve correcciones NMO regulares, el cuarto aplica sobre-correcciones y el último las remueve, facilitando la eliminación de múltiples.

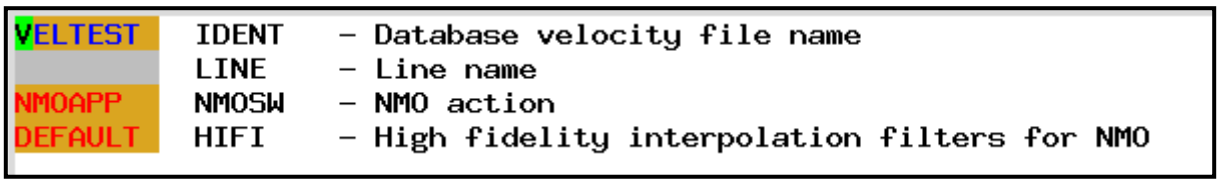
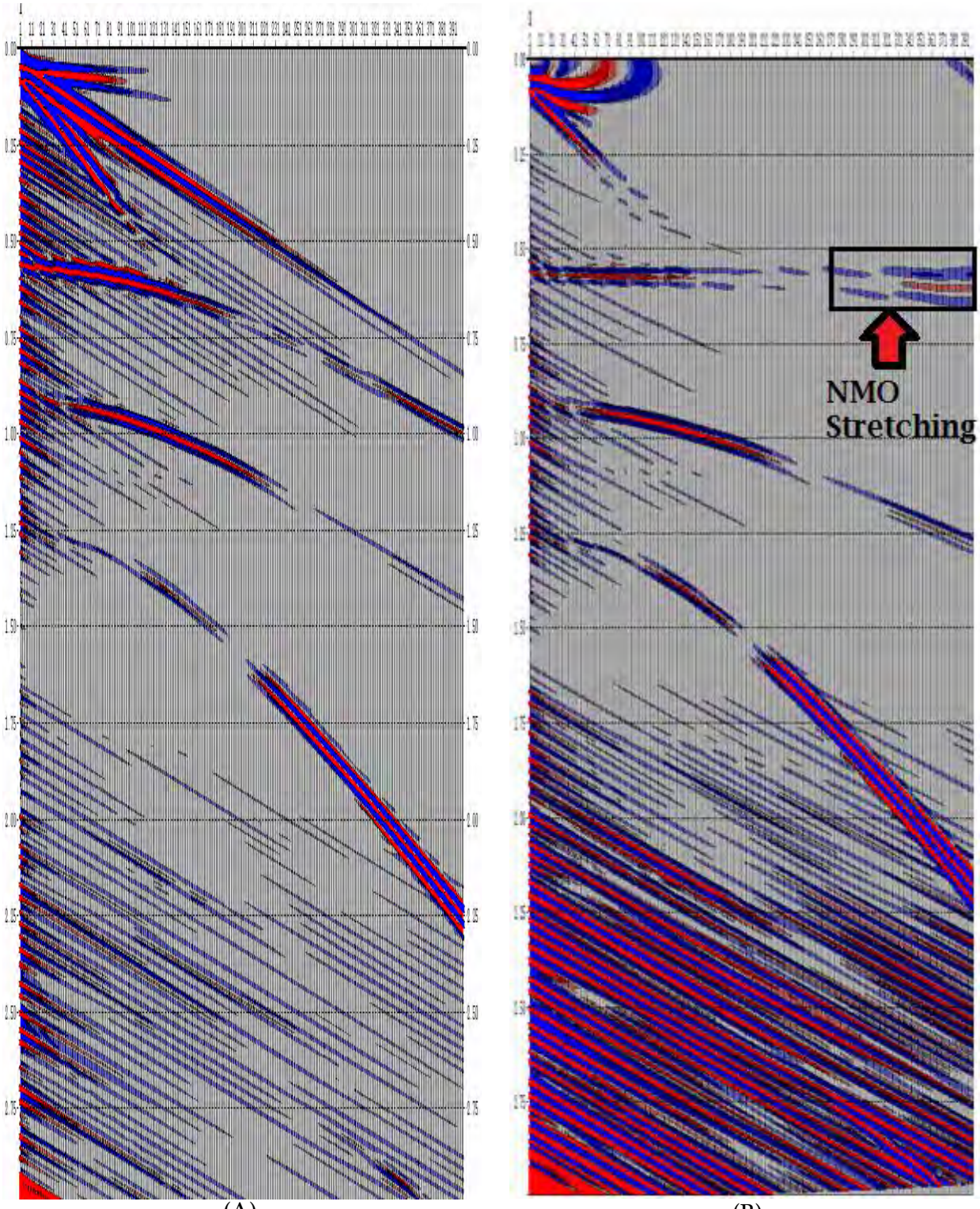


Figura 4.12 Ventana que presenta los valores dados para los parámetros del módulo NMO, para el modelo de dos capas.

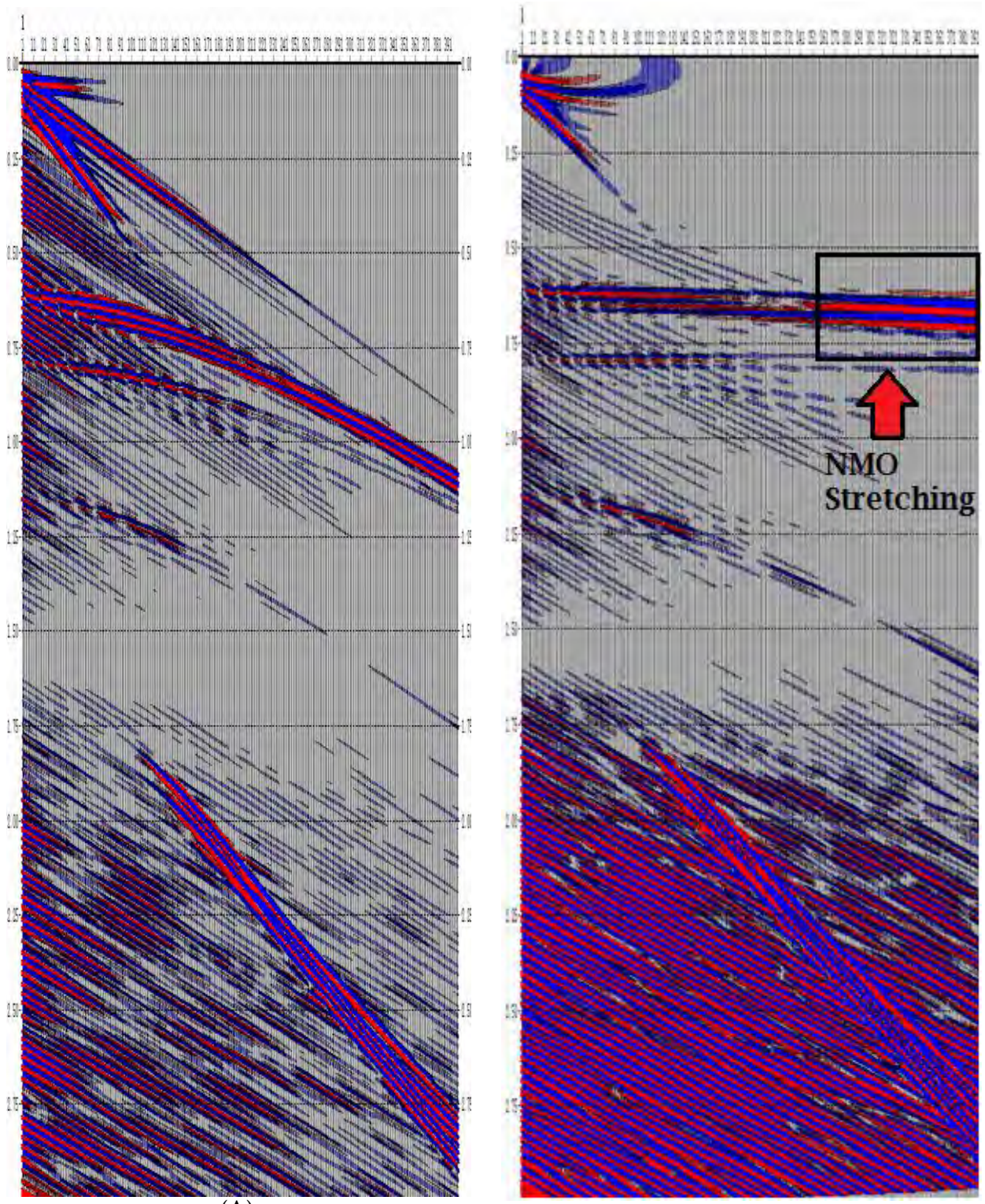
Los parámetros utilizados para la aplicación del módulo NMO en el modelo de cinco capas, fueron exactamente iguales a los expuestos en la figura 4.12, excepto por IDENT, que es igual a VELTEST5.

En la figura 4.13 y 4.14, se muestra la aplicación de la corrección NMO, para los eventos de onda PP, sin la aplicación de Muting. Se puede observar, como a offsets lejanos y tiempos someros, se observa una distorsión en la frecuencia de los eventos, denominada como NMO Stretching, (Yilmaz, 2001).



(A) (B)

Figura 4.13 Aplicación de la corrección NMO en el shot gather sintético, modelado para dos capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO, la flecha señala el NMO Stretching.



(A) (B)

Figura 4.14 Aplicación de la corrección NMO en el shot gather sintético, modelado para cinco capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO, la flecha señala el NMO Stretching.

4.1.5. Muting

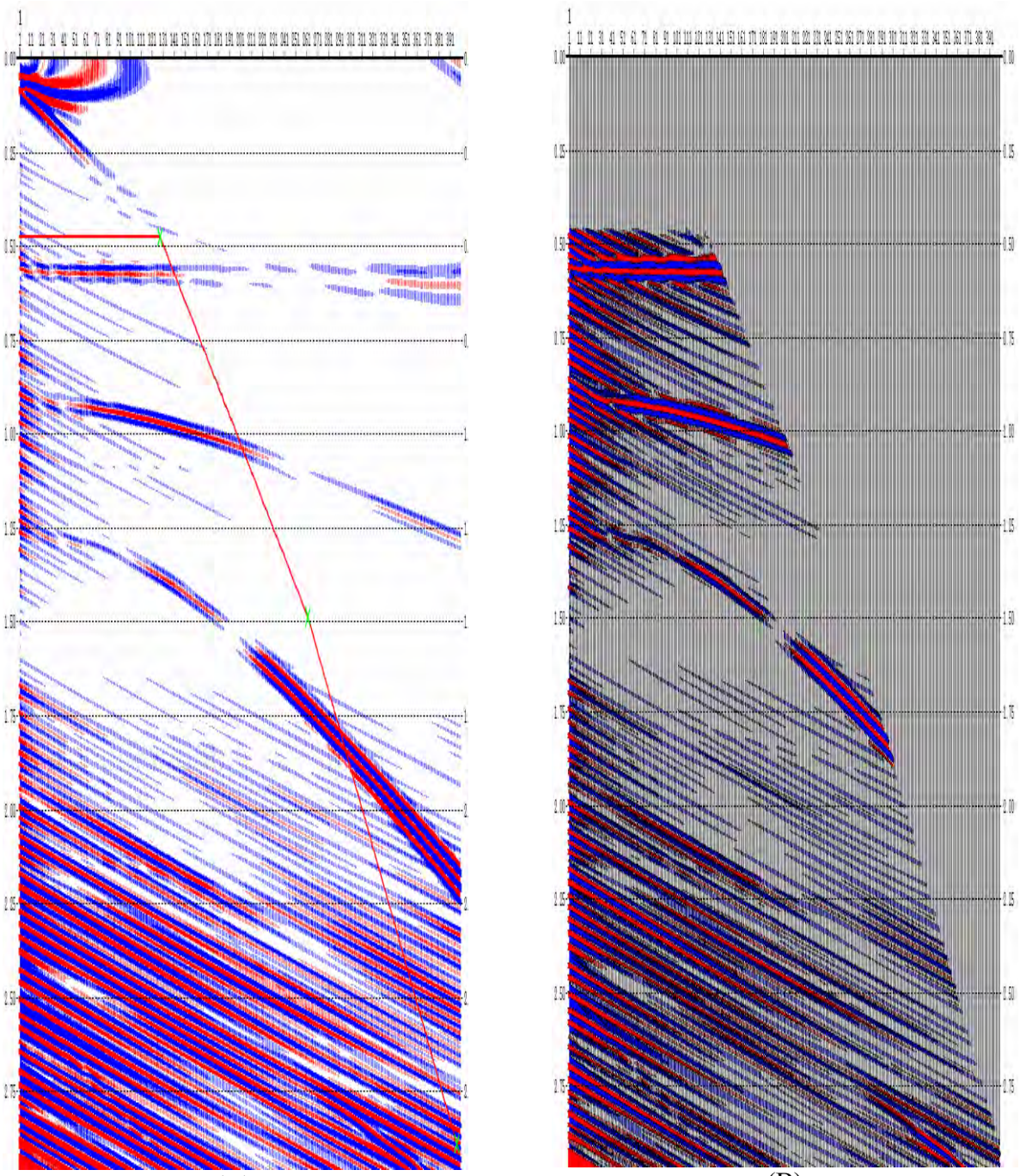
Para evitar el efecto adverso que produce el NMO Stretching, a tiempos someros y offset lejanos, en el apilado de las trazas, se aplicó en esta sección una función lineal de Mute, que silenció las trazas, es decir, redujo las amplitudes a valor cero en las zonas mencionadas. El módulo que se utilizó, se llama Mute.

4.1.5.1. MUTE

Este módulo, se aplicó con la opción MUTE tipo “Ramp On Muting”, que se usa normalmente para eliminar datos que se distorsionan luego que la corrección NMO fue aplicada, o para eliminar patrones de primeros quiebres de refracción en datos sísmicos. Esta opción, le permite al usuario, silenciar las trazas, desde cero milisegundos, hasta un tiempo específico, preservando el resto de las amplitudes sin ninguna modificación. La aplicación del módulo MUTE, se puede realizar en modo “interactivo”, realizando directamente “el picking” o selección de los pares Offset-tiempo directamente sobre el shot gather sintético. A continuación, se muestran las funciones lineales de Muting, aplicadas a los sintéticos, correspondientes a la componente vertical.

En las tablas 4.4 y 4.5, se muestran los valores de offset/tiempo que conforman las funciones lineales de Muting, aplicadas a los disparos modelados para dos y cinco capas, respectivamente.

En las figuras 4.15, B y 4.16, B, se observan los resultados obtenidos, para el modelo de dos capas y cinco capas, luego de la aplicación de las funciones lineales de Muting.



(A) (B)

Figura 4.15 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para dos capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada.

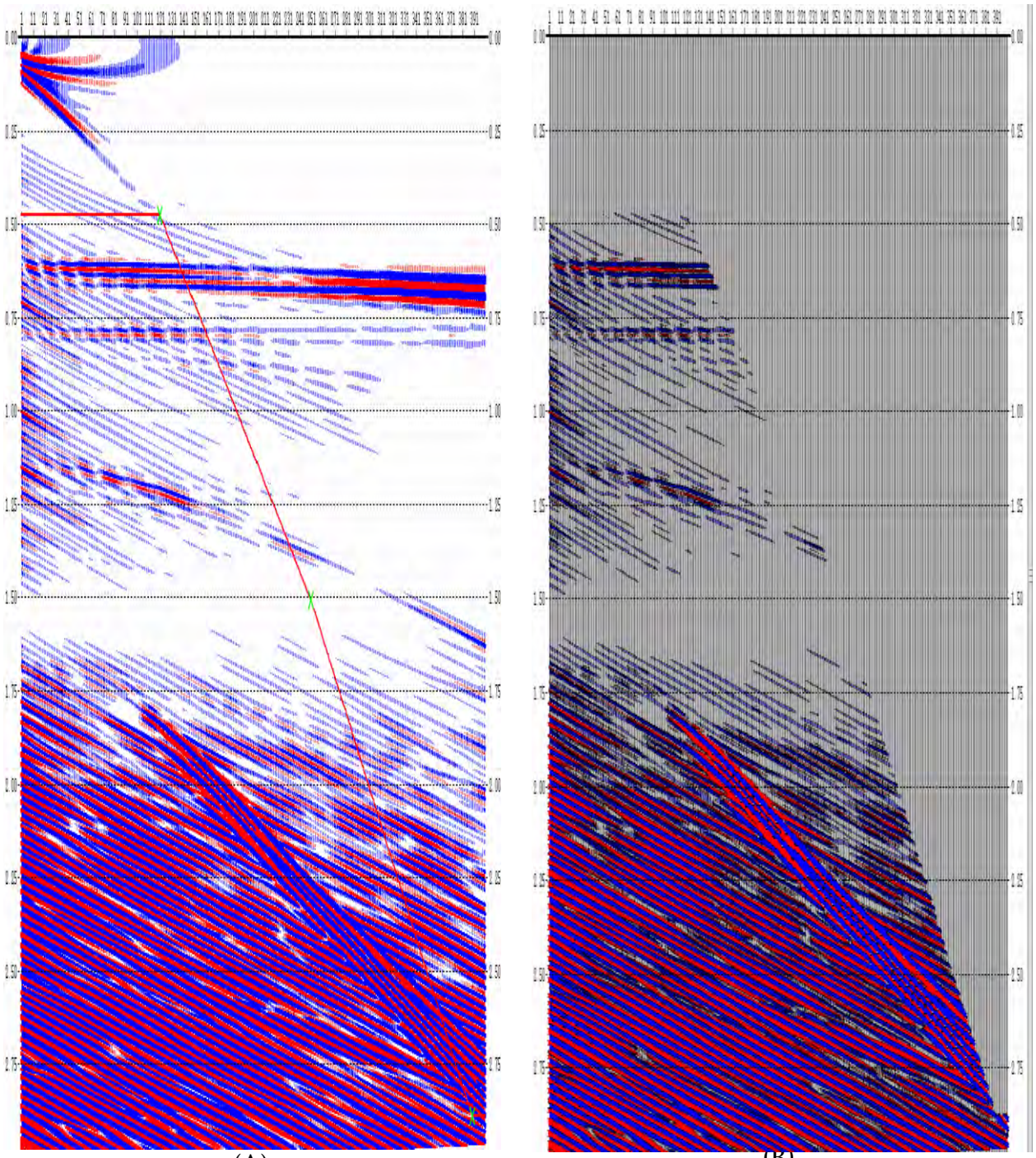
Tabla 4.4 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de dos capas.

Nro.	Offset (m)	Tiempo (ms)
1	659	430
2	1339	1443
3	1990	2890

Para el modelo de cinco capas, se aplicó el mismo procedimiento, para el silenciado de las trazas. La selección de pares offset-tiempo, que conforma la función lineal de Muting, se presenta a continuación en la tabla 4.5

Tabla 4.5 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de cinco capas.

Nro.	Offset (m)	Tiempo (ms)
1	645	475
2	1314	1485
3	1990	2890



(A) (B)

Figura 4.16 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para cinco capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada.

4.1.6. Apilado de los sintéticos

En esta sección, se realiza el apilado de los shot gathers sintéticos, correspondientes a los eventos de onda PP.

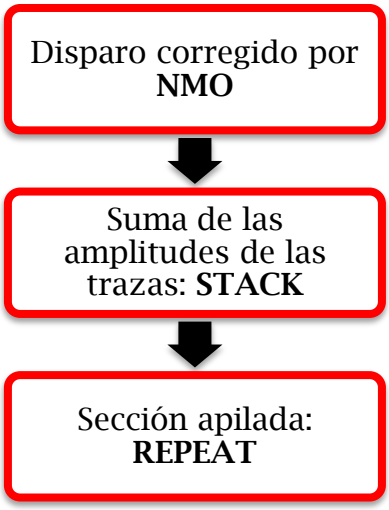


Figura 4.17 Rutina de trabajo empleada para el apilado de los shot Gathers sintéticos

Para generar los apilados, se utilizaron los módulos STACK y REPEAT:

4.1.6.1. STACK

El módulo STACK, suma las amplitudes de las trazas, de manera algebraica; teniendo como resultado, una sola traza por cada disparo. Este módulo, básicamente depende del parámetro MXFOLD, el número de trazas que suma por cada arreglo. El usuario, tiene la opción de suministrar el dato MXFOLD, o dejar que el programa utilice el valor predeterminado MXNTR, que es el máximo número de trazas adquiridas por disparo, este valor viene dado por los archivos SEG-Y de entrada. Cada muestra de traza sumada, es dividida por el valor MXFOLD.

En las figuras 4.18 y 4.19, se muestran los apilados obtenidos para un solo disparo, luego de la aplicación del módulo STACK, para el modelo de dos capas y el modelo de cinco capas, respectivamente.

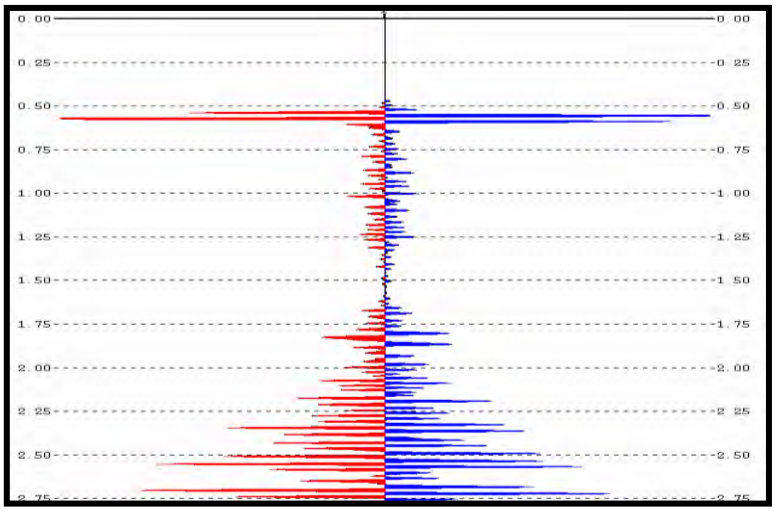


Figura 4.18 Traza apilada de un solo disparo, para el modelo de dos capas, luego de aplicar el módulo STACK, para una configuración de adquisición de 400 trazas, con una separación de cinco metros.

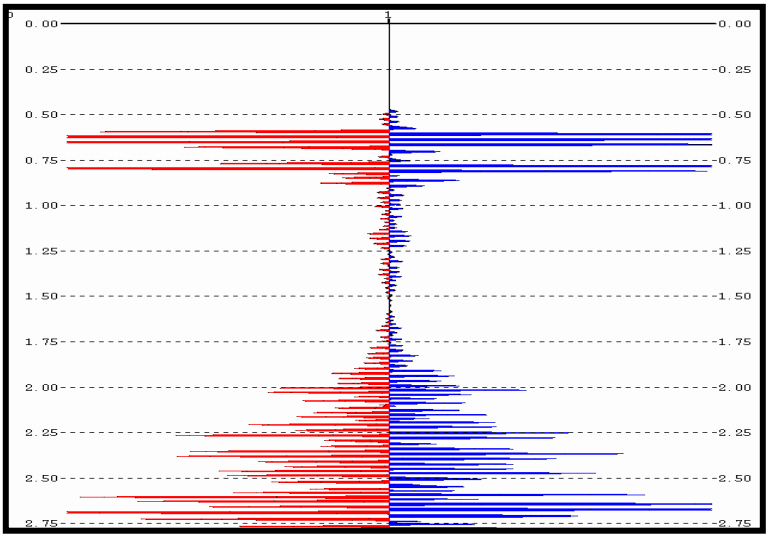


Figura 4.19 Traza apilada de un solo disparo, para el modelo de cinco capas, luego de aplicar el módulo STACK, para una configuración de adquisición de 400 trazas, con una separación de cinco metros.

4.1.6.2. REPEAT

El módulo REPEAT, es una función que permite duplicar un conjunto de datos sísmicos. Para utilizar este módulo el usuario, debe especificar el valor de los parámetros SAVES y CYCLES, el primero representa el número de datos de entrada a copiar y el segundo indica el número de copias que se realizarán.

Este módulo fue utilizado, en este trabajo de investigación, debido a que se tenía un solo disparo (SAVES=1), entonces, se copió veinte veces la misma traza apilada (CYCLES=20), para poder obtener la sección apilada de la configuración.

En las figuras 4.20 y 4.21, se muestran las secciones apiladas obtenidas, luego de la aplicación del módulo REPEAT, para el modelo de dos capas y el modelo de cinco capas, respectivamente.

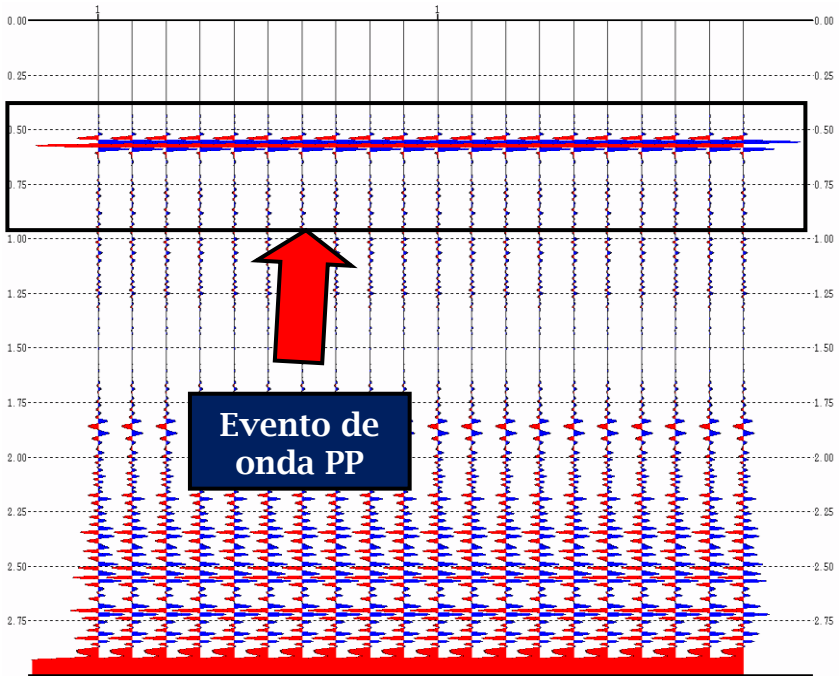


Figura 4.20 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de **400** geófonos separados **5 metros** entre sí, para un modelo de **dos capas**. Dentro del recuadro, se puede observar el evento de **onda PP** apilado.

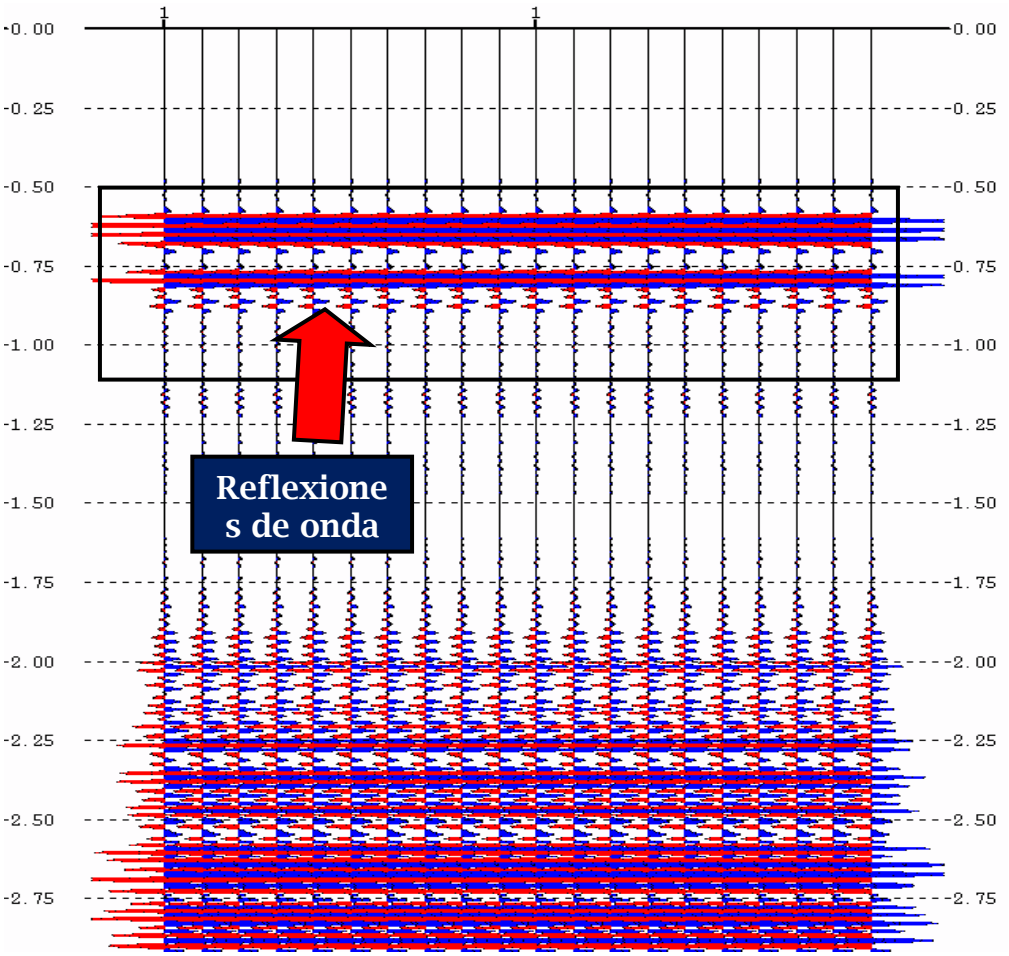


Figura 4.21 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de **400** geófonos separados **5 metros** entre sí, para un modelo de **cinco capas**. Dentro del recuadro, se puede observar las reflexiones de **onda PP** apiladas.

4.2. PROCESAMIENTO DE SHOT GATHERS SINTÉTICOS CORRESPONDIENTE A LA COMPONENTE RADIAL

En esta sección, se explicará brevemente cada uno de los módulos empleados para el procesamiento de los datos sintéticos generados con el módulo SUREFLPSVSH, correspondiente a los datos de onda convertida (Componente radial).

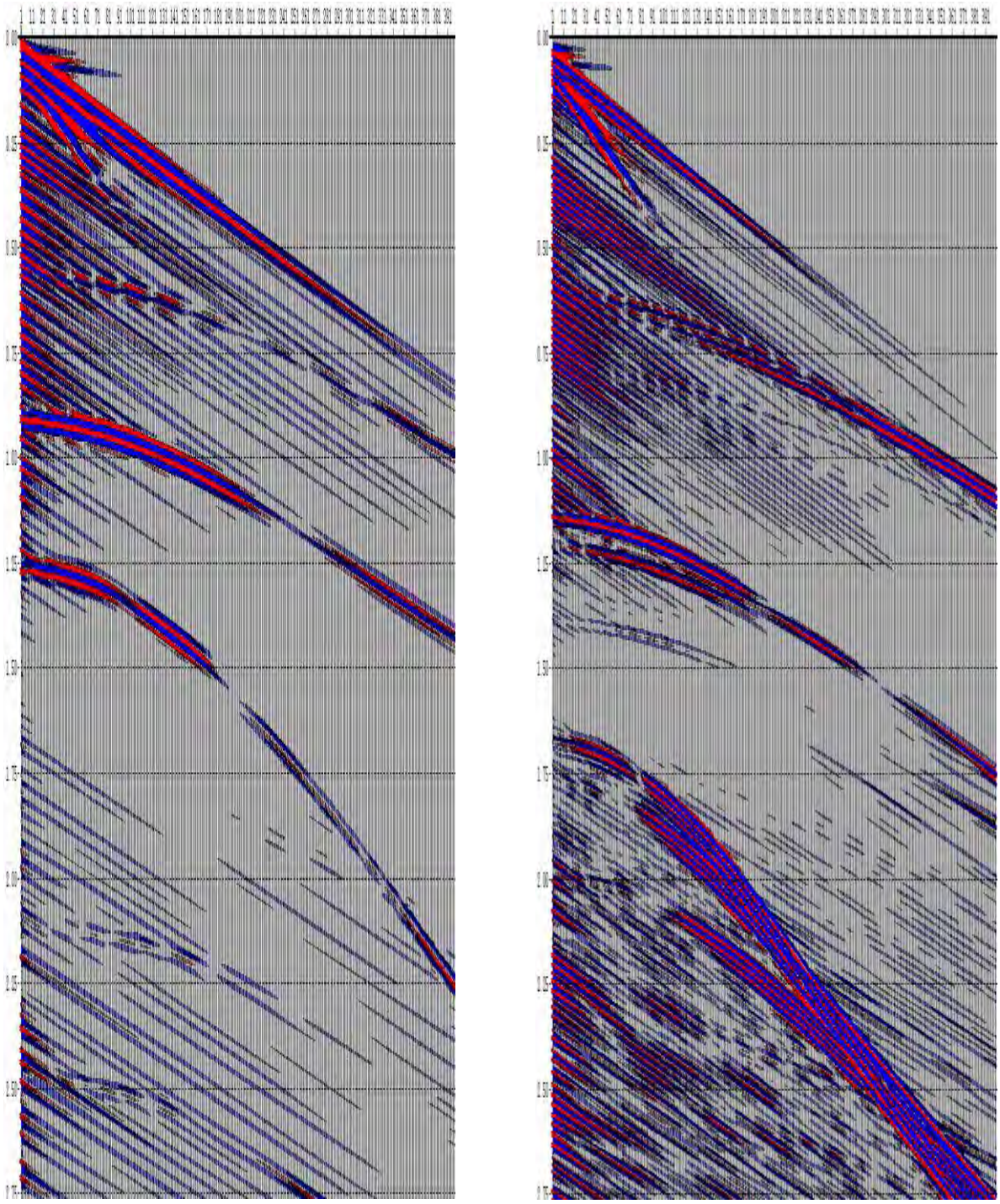
4.2.1 Carga de los datos en el programa

En esta sección, se empleó el mismo procedimiento que en la secuencia de procesamiento para los sintéticos correspondientes a la componente vertical, por tanto, no se explicarán los módulos utilizados, (Ver Sección 4.1.1). Se cargó a la base de datos del programa, un total de dos archivos SGY, que se caracterizan por presentar un amplio contenido de 400 trazas, separadas cada 5 metros, correspondientes a la componente radial, (Ver tabla 4.6).

En las figuras 4.22 (A) y (B), se observan los disparos sintéticos, correspondientes al modelo de dos y cinco capas, que fueron cargados a la base de datos del programa,

Tabla 4.6 Descripción de los archivos que se cargaron en la base de datos del programa.

Número	Modelo	Componente	Número de trazas	Intervalo entre trazas
1	2 Capas	Radial	400	5 metros
2	5 Capas	Radial	400	5 metros



(A) (B)

Figura 4.22 Shot Gathers Sintéticos correspondientes a la componente radial, cargados en Focus, (A) Modelo de dos capas, (B) Modelo de cinco capas.

4.2.2 Análisis de Relación Gamma (Vp/Vs)

En esta sección se explicará brevemente, los módulos utilizados en focus, para el almacenamiento de la función Gamma, determinante para la aplicación de correcciones NMO no hiperbólicas a los datos sísmicos de onda convertida. El Flujograma de trabajo utilizado, se muestra en la figura 4.23:

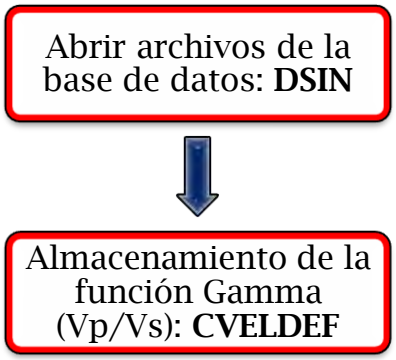


Figura 4.23 Flujograma de trabajo utilizado en el programa, para el almacenamiento de la función Gamma (Vp/Vs).

4.2.2.1 DSIN

El módulo DSIN, encargado de abrir los archivos almacenados en la base de datos del programa, fue explicado con detalle, en la sección 4.1.2.1 de este trabajo de investigación.

4.2.2.2 CVELDEF

Este módulo permite almacenar una función Gamma (Vp/Vs), empleada para procesar datos de ondas convertidas. Las funciones se construyen en forma de pares Tiempo/Gamma, que se definen de forma interactiva por el usuario, en zonas específicas a lo largo de la sección sísmica.

Es necesario resaltar que la función Gamma, presenta una dependencia de los valores de Velocidad de onda Compresional RMS, por esto, primero se debe definir la función de velocidad (VELDEF), a partir de las secciones sísmicas de componente vertical, para luego almacenar la función Gamma, empleada para realizar correcciones NMO no hipérbolicas, a los datos sísmicos de componente radial.

En este trabajo de investigación se almacenaron dos funciones Gamma (Vp/Vs), que se emplearon posteriormente para horizontalizar las trazas correspondientes a los datos sísmicos de onda convertida (componente radial). La primera función Gamma se denominó VELTEST, (Ver figura 4.24), utilizada para el Shot gather sintético modelado para dos capas; y la segunda se nombró VELTEST5 (Ver figura 4.25), empleada para el Shot gather sintético modelado para cinco capas. Las funciones Gamma, se deben identificar con el mismo nombre que las funciones velocidad, definidas en la sección anterior.

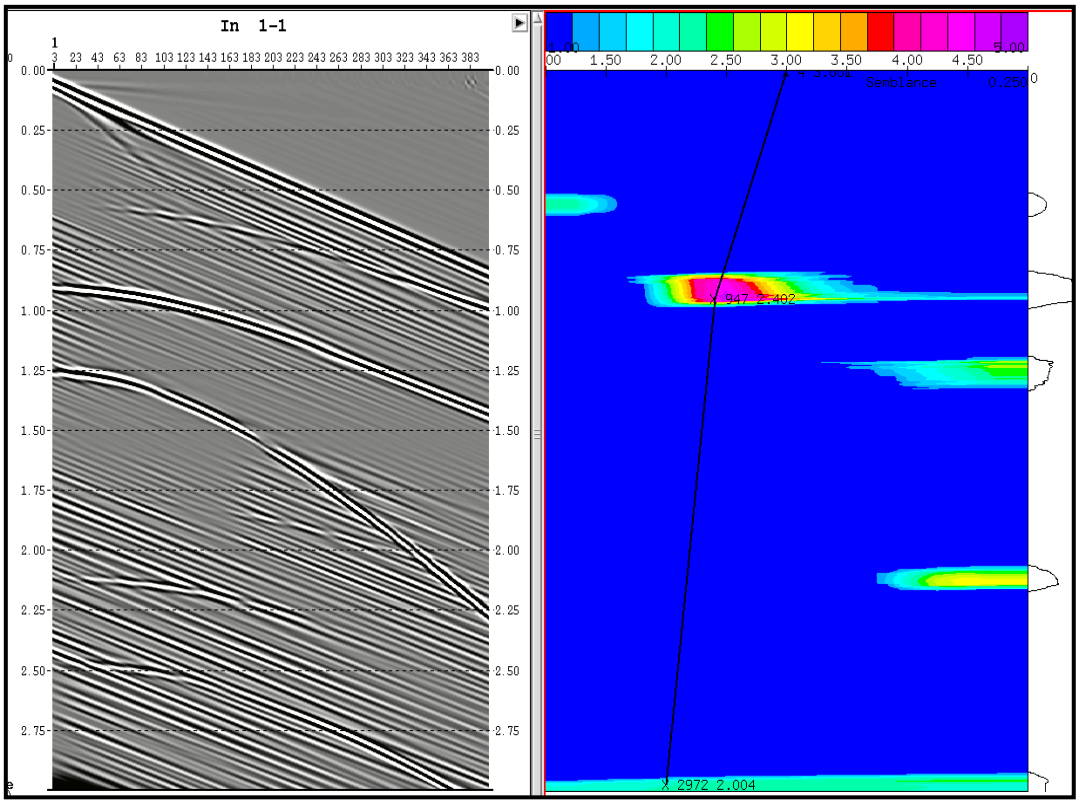


Figura 4.24 Modo interactivo del módulo CVELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente radial para un modelado de **2 capas**

En las tablas 4.7 y 4.8, se muestran los pares tiempo/Gamma, que se almacenaron en las funciones Gamma, denominadas VELTEST y VELTEST5, correspondientes al modelo de dos capas y cinco capas, respectivamente.

Tabla 4.7 Pares tiempo/Gamma seleccionados, para el almacenamiento de la función Gamma (Vp/Vs), en el modelo de **2 capas**

Nro.	Tiempo (ms)	Gamma (Vp/Vs)
1	4	3.001434
2	947	2.402123
3	2972	2.003584

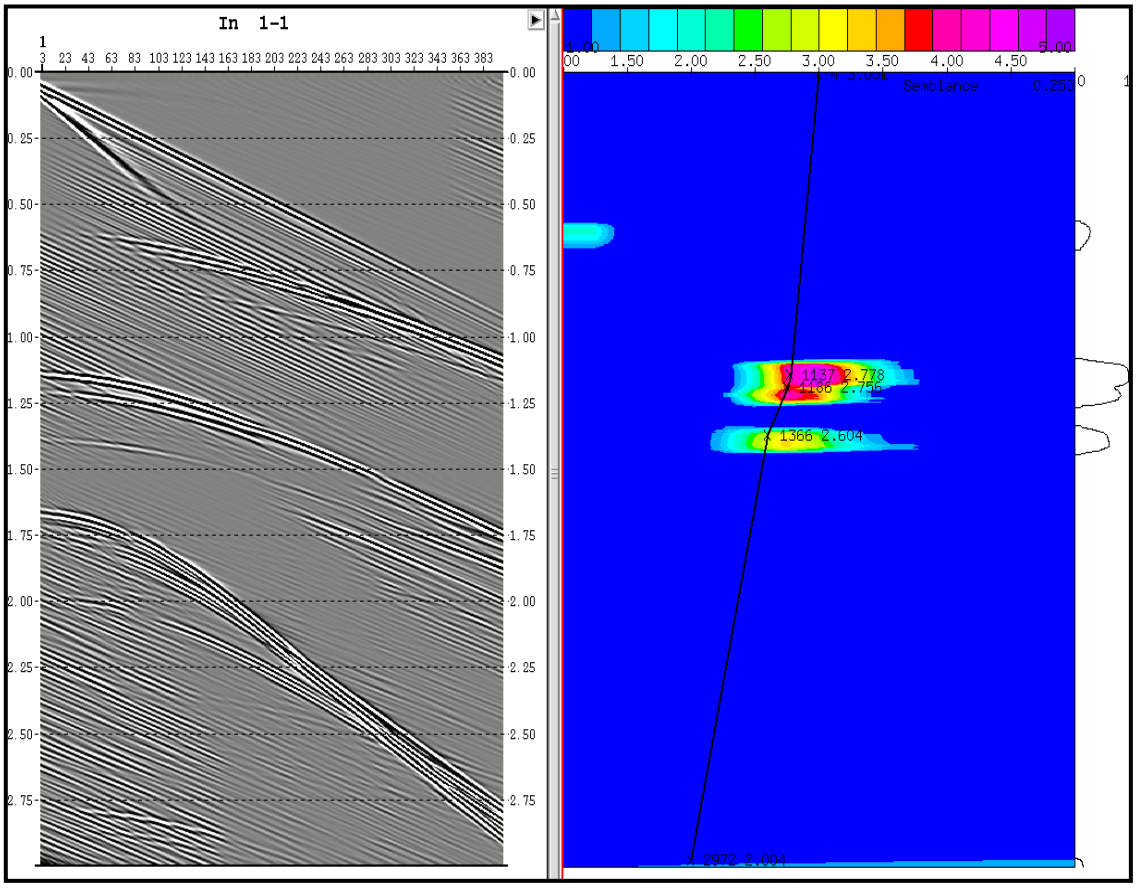


Figura 4.25 Modo interactivo del módulo CVELDEF, para el shot gather sintético, correspondiente a la componente radial para un modelado de 5 capas

Tabla 4.8 Pares tiempo/Gamma seleccionados, para el almacenamiento de la función Gamma (Vp/Vs), en el modelo de 5 capas

Nro.	Tiempo (ms)	Gamma (Vp/Vs)
1	4	3.001434
2	1137	2.777778
3	1186	2.756098
4	1366	2.604336
5	2972	2.003584

4.2.3 Ganancia por divergencia esférica

En esta sección, se empleó el mismo procedimiento que en la secuencia de procesamiento para los sintéticos, correspondientes a los datos de onda convertida, por tanto, no se explicarán los módulos utilizadas para la corrección de amplitudes por divergencia esférica, (Ver Sección 4.1.3).

4.2.4 Corrección NMO No hiperbólica

Las ondas convertidas, presentan una trayectoria de reflexión asimétrica (Ver Capítulo II, Sección 2.1). Debido al comportamiento asintótico que presenta el grupo de puntos de reflexión o conversión (CCP) de las ondas PS, se requiere la aplicación de una corrección NMO no hiperbólica, descrita por la siguiente relación,

$$T_{PS}(X) = \frac{1}{V_P}\sqrt{Z^2 + X_a^2} + \frac{1}{V_S}\sqrt{Z^2 + (X - X_a)^2} \qquad (4.8)$$

donde, Tps es el tiempo doble de viaje de la onda convertida PS, a un cierto offset

X, Vp corresponde al campo de velocidad de onda compresional (P), Vs corresponde al campo de velocidad de onda de cizalla (S), Z es la profundidad del reflector, X es el offset (distancia fuente-receptor) y Xa es la distancia de la fuente al punto de conversión o reflexión.

La ecuación 4.8, puede ser reescrita en función de la relación Vp/Vs (Variable G) y del doble tiempo de viaje de la onda convertida a cero offset Tps(0):

$$T_{PS}(X) = \sqrt{\left(\frac{X_a}{V_P}\right)^2 + \left(\frac{G}{1+G}T_{PS}(0)\right)^2} + \frac{1}{G}\sqrt{\left(\frac{X - X_a}{V_P}\right)^2 + \left(\frac{G}{1+G}T_{PS}(0)\right)^2} \qquad (4.9)$$

A continuación, se aplicará el módulo CCPNMO, que tiene como función principal, realizar la corrección NMO no hiperbólica a datos de onda convertida, para compensar en un mismo evento sísmico, el retardo en los tiempos de viaje desde la fuente al receptor para diferentes offsets.

4.2.4.1 CCPNMO

La función principal de este módulo, es realizar la corrección NMO no hiperbólica, para un conjunto de trazas sísmicas, correspondientes a eventos de onda convertida (PS). Además, este módulo tiene la capacidad de remover correcciones NMO no hiperbólicas, aplicadas con anterioridad.

Es importante, recordar que el módulo CVELDEF recupera el campo de velocidad de Onda P y escanea un rango de relaciones Vp/Vs definidas por el usuario, generando gráficos de semblanza, de los que el usuario puede seleccionar los pares Vp/Vs que representen la mejor semblanza de las trazas.

El usuario debe identificar el archivo de la base de datos del proyecto, que contiene la función velocidad de onda P (VELDEF) y la función Vp/Vs con el parámetro IDENT. La función de velocidad de onda P y la función Gamma (Vp/Vs), se almacenará con el mismo nombre IDENT, sin embargo serán guardados como

archivos de distintas clases. CCPNMO, recupera de la base de datos estos archivos, los interpola, calcula las correcciones NMO no hiperbólicas, a partir de la ecuación 4.9, y aplica las correcciones pertinentes a las trazas de entrada.

Con el parámetro NMOSW, el usuario selecciona cual modalidad del parámetro CCPNMO, desea aplicar a sus datos:

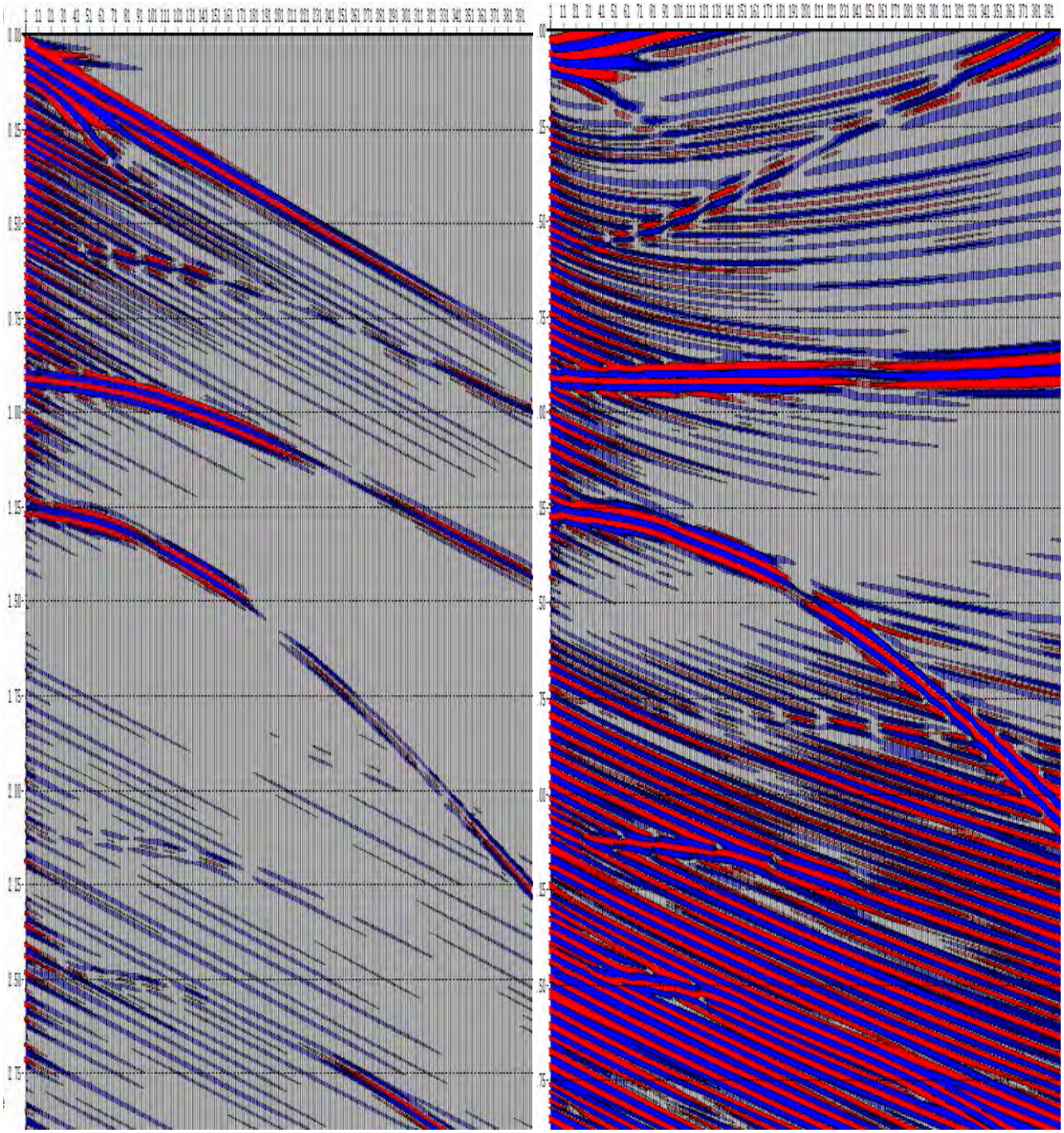
a) NMOAPP (Valor predeterminado): Aplica una corrección NMO no hiperbólica, con la aplicación automática, de Muting para trazas cruzadas. Si este parámetro es seleccionado, el programa chequea los cruces de la pendiente "move-out" desde la traza de cero offset hasta la traza para la que está siendo calculada el "move-out". Estos cruces, pueden ocurrir en áreas de baja velocidad y a offsets lejanos, por tanto, se debe tener cuidado en estas zonas, ya que se pueden producir falsas amplitudes luego de la aplicación de la corrección.

b) NOMUTE: Aplica una corrección NMO no hiperbólica, sin la aplicación de Muting.

c) NMOREM: Remueve correcciones NMO no hiperbólicas.

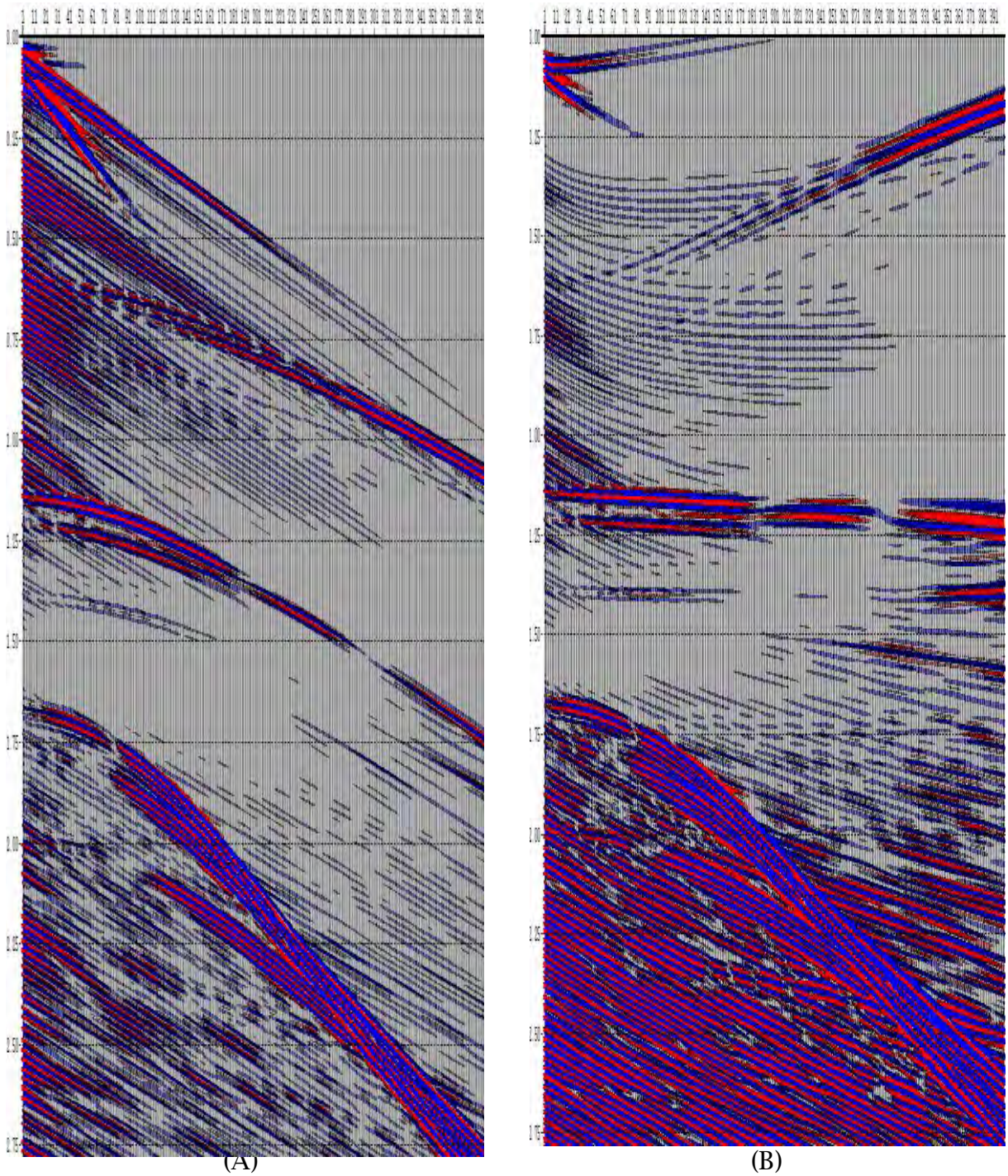
Los mismos parámetros fueron utilizados para el modelado de cinco capas, de de onda convertida; el único cambio aplicado fue que la función velocidad y Gamma (Vp/Vs) es distinta al modelo de dos capas y se denomina VELTEST5.

Los resultados que se obtuvieron, luego de aplicar la corrección NMO no hipérbolica, en los datos del modelo de dos capas y cinco capas, se presentan en las figuras 4.26, B y 4.27, B, respectivamente.



(A) (B)

Figura 4.26 Aplicación de la corrección NMO al shot gather sintético modelado para dos capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO



(A) (B)

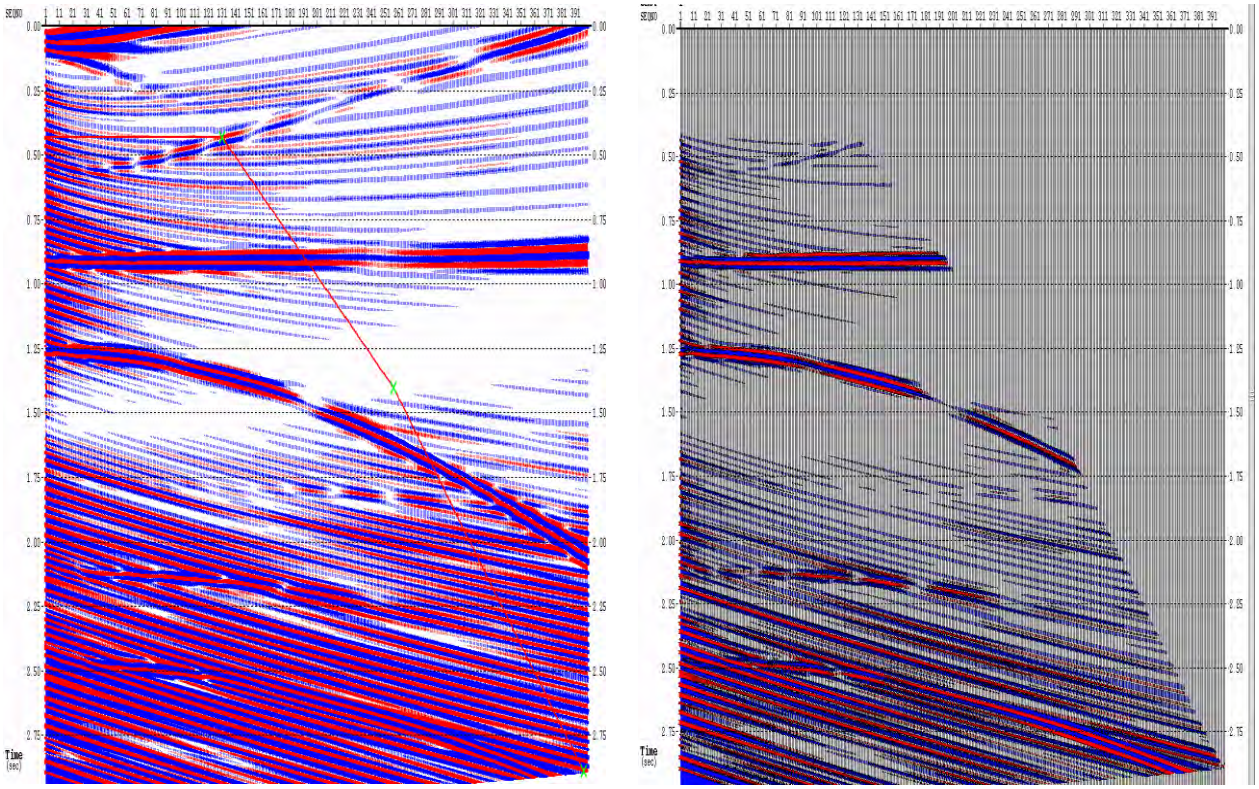
Figura 4.27 Aplicación de la corrección NMO al shot gather sintético modelado para cinco capas (A) Antes de aplicar la corrección NMO, (B) Después de aplicar la corrección NMO

4.2.5 Muting

El módulo aplicado en esta sección y el procedimiento aplicado, para el silenciado de las trazas sísmicas se definió y describió en la sección 4.1.5.

En las tablas 4.9 y 4.10, se presentan los pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada, al modelo de dos y cinco capas, respectivamente.

En las figuras 4.28, B y 4.29 B, se muestran los resultados obtenidos, luego de la aplicación de la función lineal de Muting, para el modelo de dos capas y cinco capas, respectivamente.

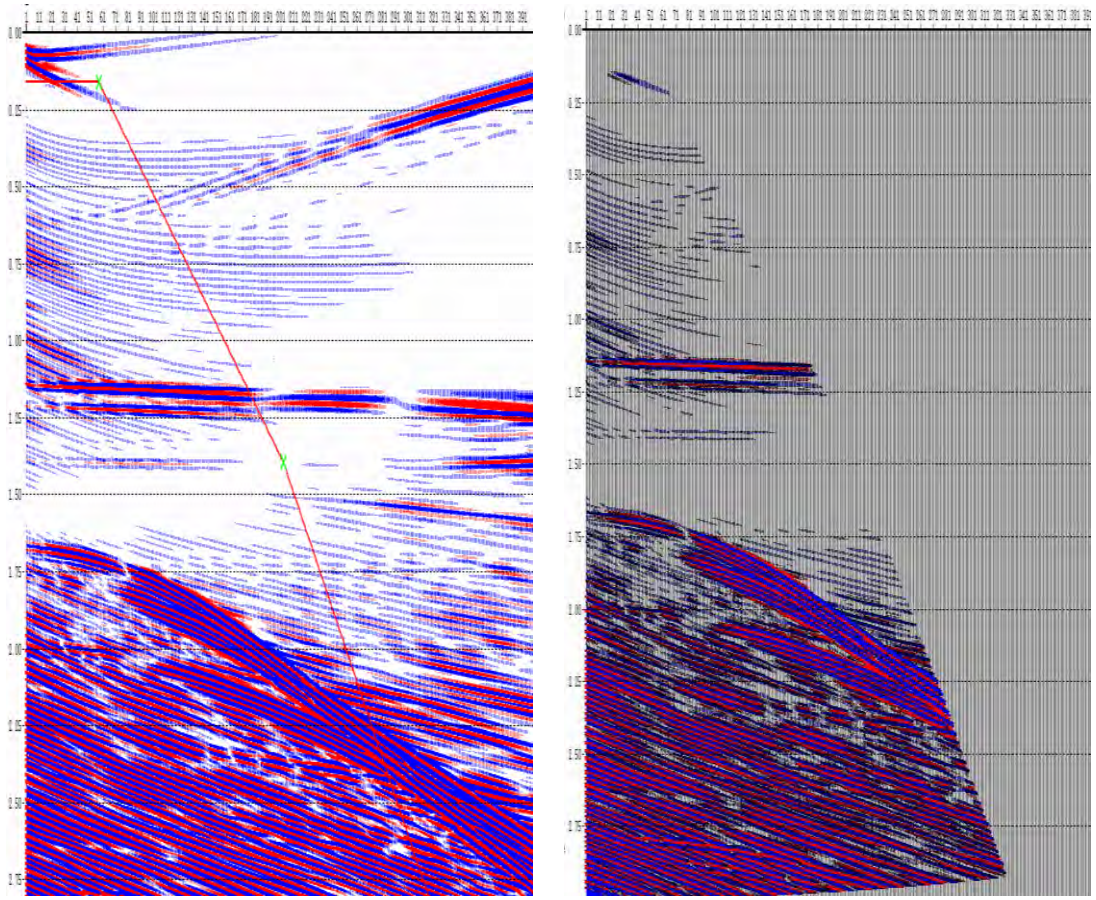


(A) (B)

Figura 4.28 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para dos capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada.

Tabla 4.9 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de **dos capas**.

Nro.	Offset (m)	Tiempo (ms)
1	659	430
2	1339	1443
3	1990	2890



(A) **(B)**

Figura 4.29 Aplicación de Muting al shot gather sintético modelado para cinco capas. (A) Antes del Muting (B) Después del Muting. Las líneas rojas, muestran la función lineal de mute aplicada.

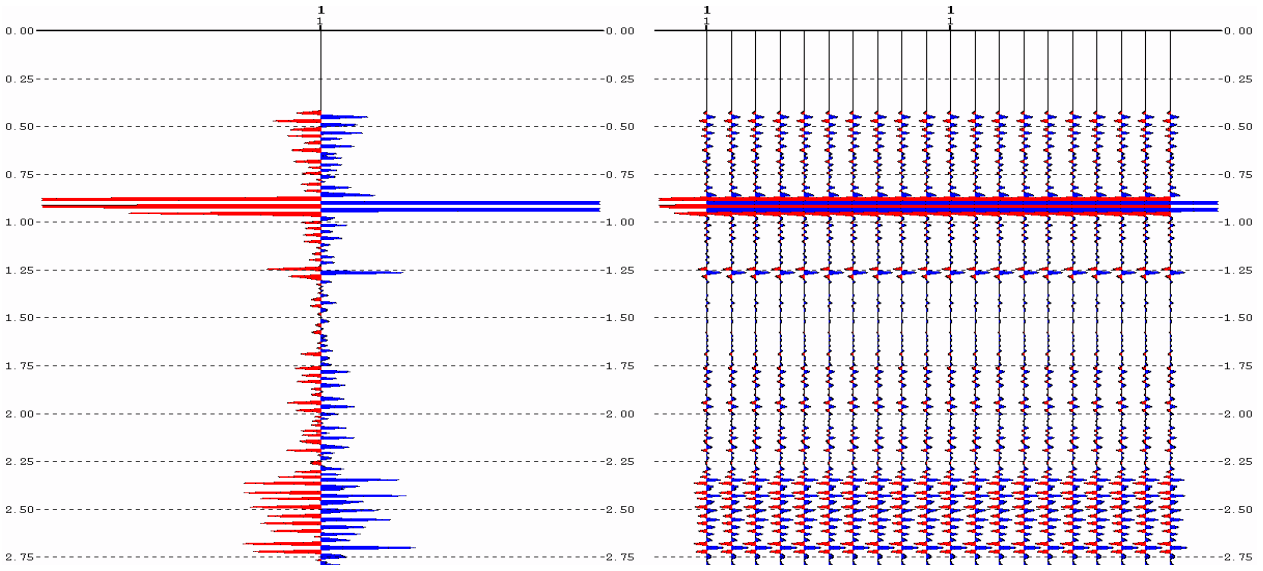
Tabla 4.10 Pares offset-tiempo, que conforman la función lineal del Muting aplicada al modelo de **cinco capas**.

Nro.	Offset (m)	Tiempo (ms)
1	285	161
2	1010	1395
3	1660	3000

4.2.6 Apilado de los sintéticos

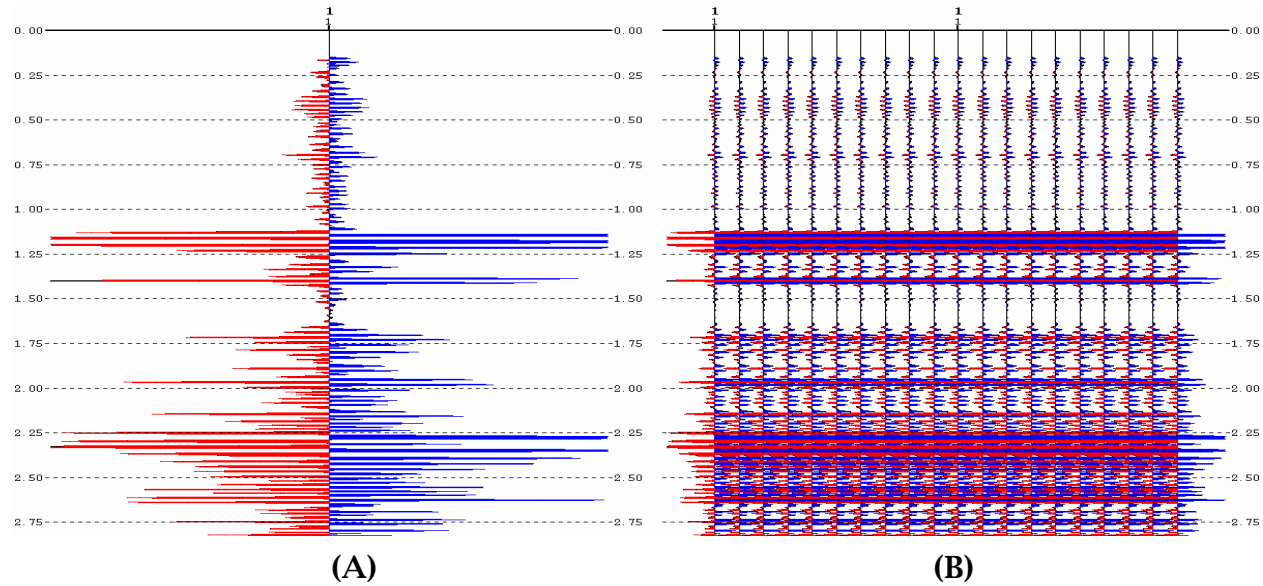
En esta sección, se realiza el apilado de los shot gathers sintéticos, correspondientes a los eventos de onda convertida. Los módulos utilizados en esta sección, fueron los mismos que se emplearon para el apilado de los sintéticos correspondientes a los datos de componente vertical, por tanto, el procedimiento empleado y la descripción de los módulos utilizados se encuentran en la sección 4.1.6.

A continuación, se mostrará los datos obtenidos para datos sísmicos de onda convertida, luego de la aplicación de los módulos STACK y REPEAT en las figuras 4.30 y 4.31, para el modelado de dos capas y cinco capas, respectivamente.



(A) **(B)**

Figura 4.30 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de **400** geófonos separados **5 metros** entre sí, para un modelo de **dos capas**. (A) Traza apilada correspondiente a un solo disparo. (B) Sección apilada del evento de onda convertida P-S..



(A) **(B)**

Figura 4.31 Apilado del Shot Gather sintético correspondiente a una configuración de adquisición de **400** geófonos separados **5 metros** entre sí, para un modelo de **cinco capas**. (A) Traza apilada correspondiente a un solo disparo. (B) Sección apilada del evento de onda convertida P-S.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA MULTICOMPONENTE

5.1. Variación de parámetros de adquisición sísmica multicomponente

En esta sección, se utilizó el módulo SORT del software FOCUS, para decimar los Shot Gathers sintéticos, correspondientes a la componente radial. En principio, se tienen Shot Gathers sintéticos con un contenido de 400 trazas, separadas cada 5 metros entre sí. El proceso de decimación, básicamente consiste en generar a partir de estos shot gathers sintéticos que tienen las configuraciones de adquisición ideales, otros shot Gathers sintéticos, que presenten un contenido de trazas y un intervalo entre éstas diferente al disparo original.

Es notable, que los shot gathers de entrada, presentan una separación entre trazas de 5 metros. Este espaciamiento, en términos de costos funcionales de adquisición sísmica es sumamente costoso, por tanto, lo que se realizó en esta sección, fue aumentar este espaciamiento y verificar la calidad de los datos sísmicos para una separación entre trazas de: 10, 20, 30 y 40 metros.

Además de variar la separación entre trazas (separación entre geófonos), se modificó el offset máximo (distancia fuente-receptor, también definida como la multiplicación del número de trazas por el espaciado entre éstas), en los datos sintéticos. Para realizar esto, se modificó el número de trazas del disparo, para obtener datos sísmicos que muestren una buena distribución de offsets cercanos, medios y lejanos correspondientes al objetivo primario de exploración tomando en

cuenta que el mismo es el reflector correspondiente al tope de la Formación La Pascua, ubicada a una profundidad aproximada de 650 metros. Los offsets, que se evaluaron en esta investigación fueron (Ver figura 5.1): offsets cercanos (650 m), offsets medios (1300 m), offsets lejanos (1950 m); debido a que guardan una relación con la profundidad del objetivo principal, el offset cercano es igual a la profundidad del objetivo, el offset medio es el doble de ésta, y el lejano representa el valor de tres veces la profundidad del objetivo.



Figura 5.1 Esquema representativo, que muestra las distintas configuraciones de adquisición a evaluar, variando la separación entre trazas. 1) Offset máximo igual a 650 metros. 2) Offset máximo igual a 1300 metros. 3) Offset máximo igual a 1950 metros.

A continuación, se explicará brevemente el uso del módulo SORT, para realizar el proceso de decimado de las trazas:

5.1.1. SORT

Este módulo se utilizó en esta sección, con la finalidad de generar distintas configuraciones de adquisición, para evaluar la influencia de los parámetros intervalo entre trazas y offset máximo, en la calidad de los datos sísmicos obtenidos. En general, este programa tiene la capacidad de acondicionar las trazas

sísmicas, en el orden y forma que el usuario especifique. Los variables definidas para el uso de este módulo fueron las siguientes, (Ver Figura 5.2):

5.1.1.1. Parámetros generales:

- MAXFOLD: Máxima cobertura
- WINDOW: Número de trazas que contiene el dato sísmico de entrada.
- RESTYPE: Especifica el almacenamiento del archivo de salida
- PRINT: Indica si se mostrará o no se mostrará en pantalla el archivo de salida.

5.1.1.2. Parámetros de clasificación de orden primario y secundario

- KEY: Nombre del encabezado (Header) para el tipo de clasificación.
- DIRECT: Especifica la dirección numérica, en la que serán acomodados los datos. Este parámetro permite dos entradas: NORMAL para una salida de datos ordenados en orden ascendente y REVERSE para una salida de datos organizados en orden numérico descendente.
- FIRST: Especifica la enumeración de la primera traza que contendrá el archivo de salida.
- LAST: Especifica la enumeración de la última traza que se quiera mostrar en el archivo de salida.
- INCR: Especifica un incremento entre trazas, es decir, el espaciamiento entre estas.

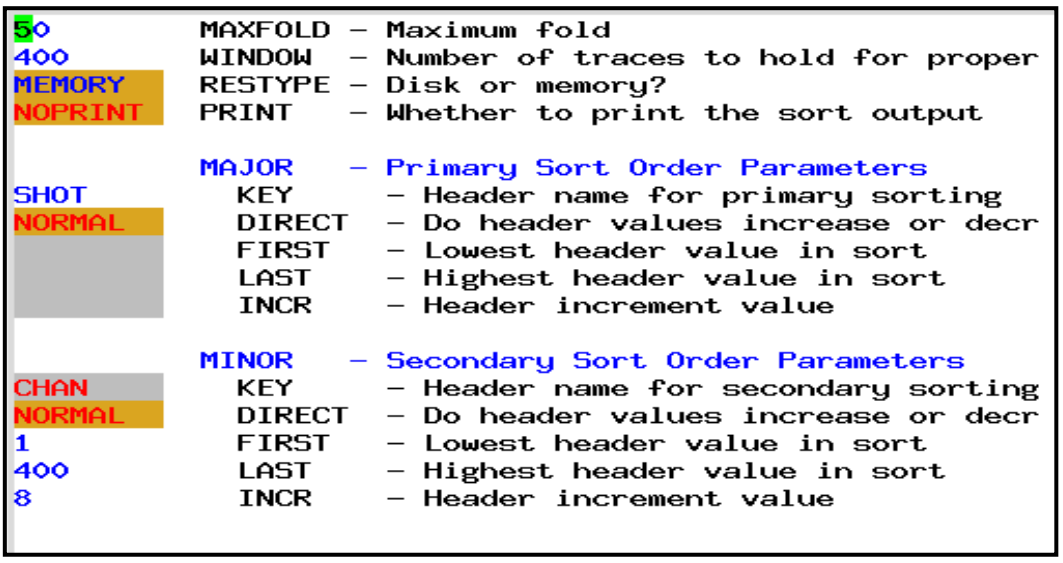


Figura 5.2 Ventana del programa FOCUS, que muestra los parámetros seleccionados para una configuración de adquisición correspondiente a una separación entre trazas de 40 metros y un offset lejano de 2000 metros.

En la figura 5.2, se muestran los parámetros utilizados para decimar un shot gather sintético de entrada, que presenta un contenido amplio de 400 trazas con una separación de 5 metros por traza. La configuración de adquisición, que se obtuvo con los parámetros definidos en la figura, corresponde a una separación entre trazas de 40 metros y a un offset lejano de 2000 metros. El acondicionamiento de las trazas, para lograr este escenario de adquisición, resulta de un juego de parámetros del comando SORT. En principio, la **separación entre trazas** se logra al modificar el parámetro INCR que, en el ejemplo (Ver Figura 5.2), corresponde a un 8. Tomando en cuenta que el shot gather original contiene trazas separadas cada 5 metros, si se multiplica esa separación de 5 metros por el incremento que es igual a 8 trazas, se obtiene una separación entre trazas igual a 40 metros. Por ejemplo, si en lugar de una separación entre trazas de 40 metros, se quisiera una de 20 metros, el incremento debería ser igual al cociente de 20 entre 5, obteniendo que el incremento entre trazas deba ser igual a 4.

Para variar el **offset máximo** de la adquisición, los parámetros que se deben modificar son MAXFOLD, FIRST y LAST. El parámetro MAXFOLD, corresponderá al número de trazas, que deberá tener el archivo de salida (número de geófonos).

Los otros dos parámetros son FIRST y LAST, que básicamente indican el inicio y el final de la configuración, para todos los casos FIRST será igual 1, ya que todas las configuraciones comienzan por la primera traza, mientras que, LAST, será igual a la multiplicación de MAXFOLD por INCR, que para el ejemplo en la figura 5.2, es igual a 400.

Por otro lado, si lo que se quiere, por ejemplo, es obtener un offset medio de 1320 metros, MAXFOLD (cociente entre el offset medio y la separación entre trazas), deberá ser igual a 33 y el parámetro LAST igual a 264.

El proceso de decimación se aplicó en cualquier etapa de la secuencia de procesamiento, para evaluar la influencia de la variación del offset y el espaciado entre trazas en la resolución de los eventos, el comportamiento de las amplitudes, la grabación del ruido, y la calidad de las secciones apiladas.

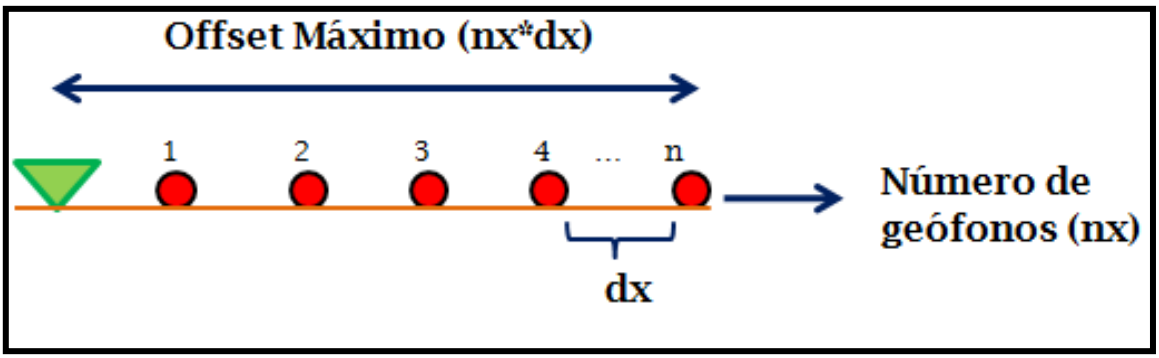


Figura 5.3 Ilustración esquemática, que representa en una configuración de adquisición sísmica 2D, la separación entre trazas y el offset máximo.

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron a partir del proceso de decimación, con distintas configuraciones de adquisición para el **modelo de dos capas** (Ver Figuras 5.4 a 5.9).

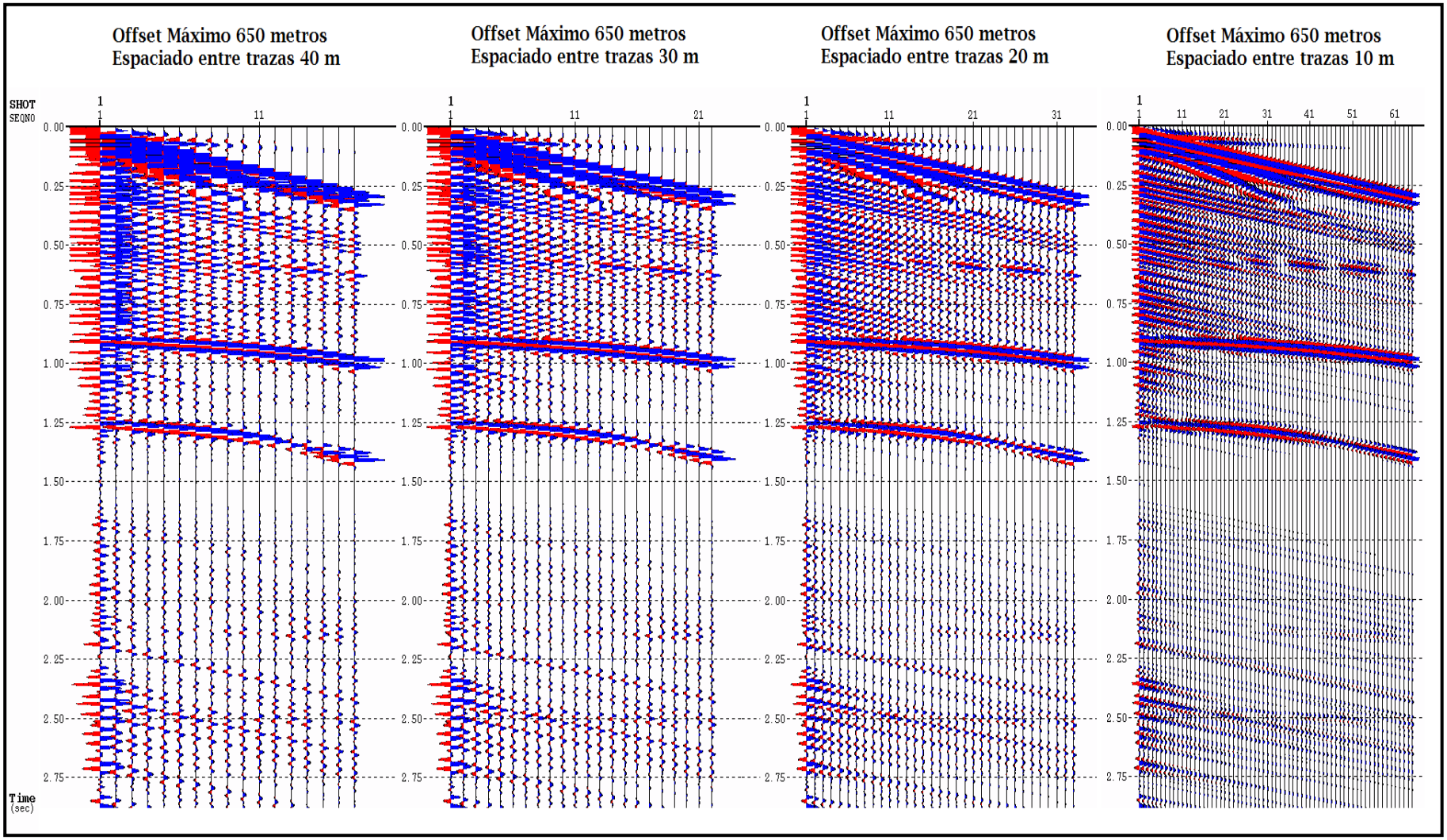


Figura 5.4 Shot gathers sintéticos, modelados para **dos capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m.

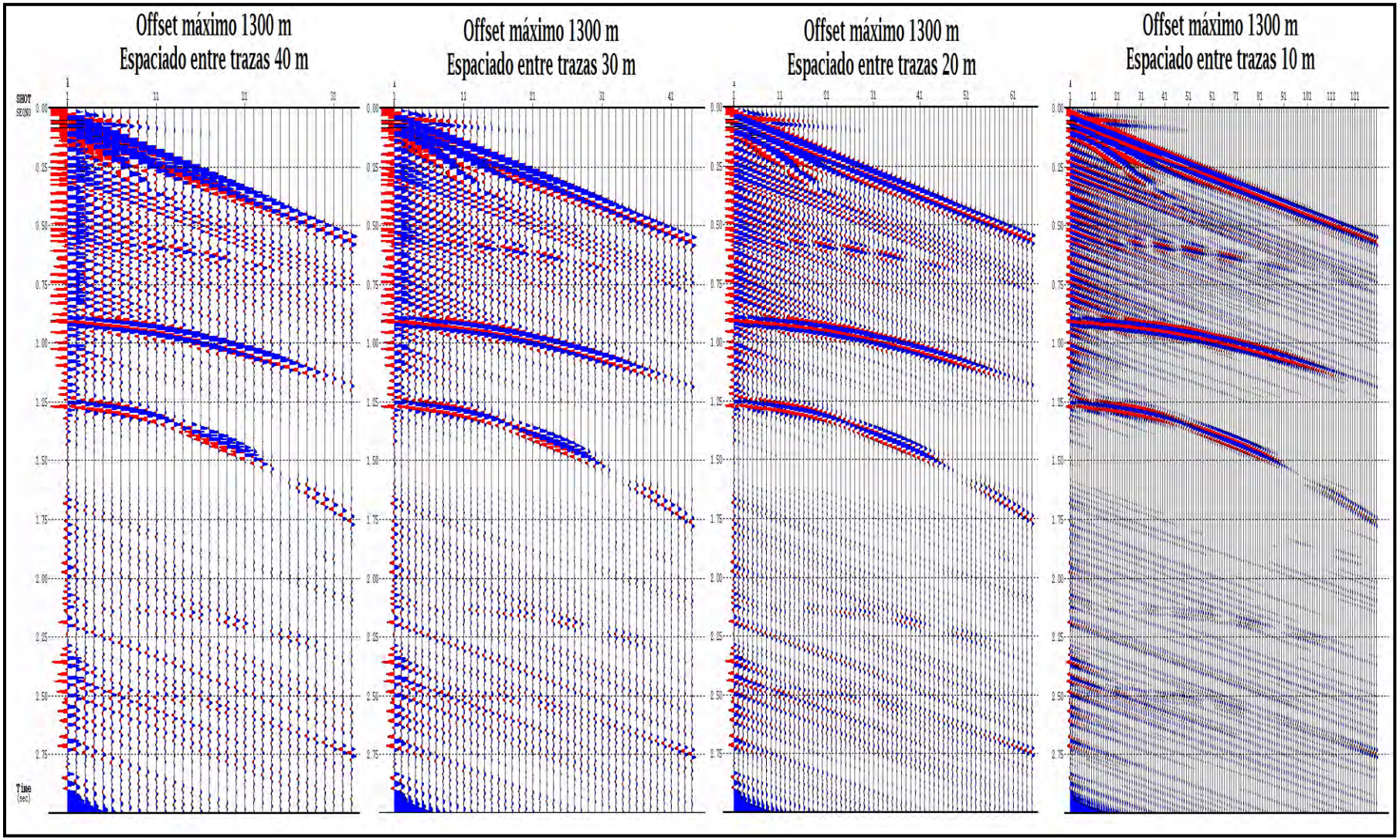


Figura 5.5 Shot gathers sintéticos, modelados para **dos capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m.

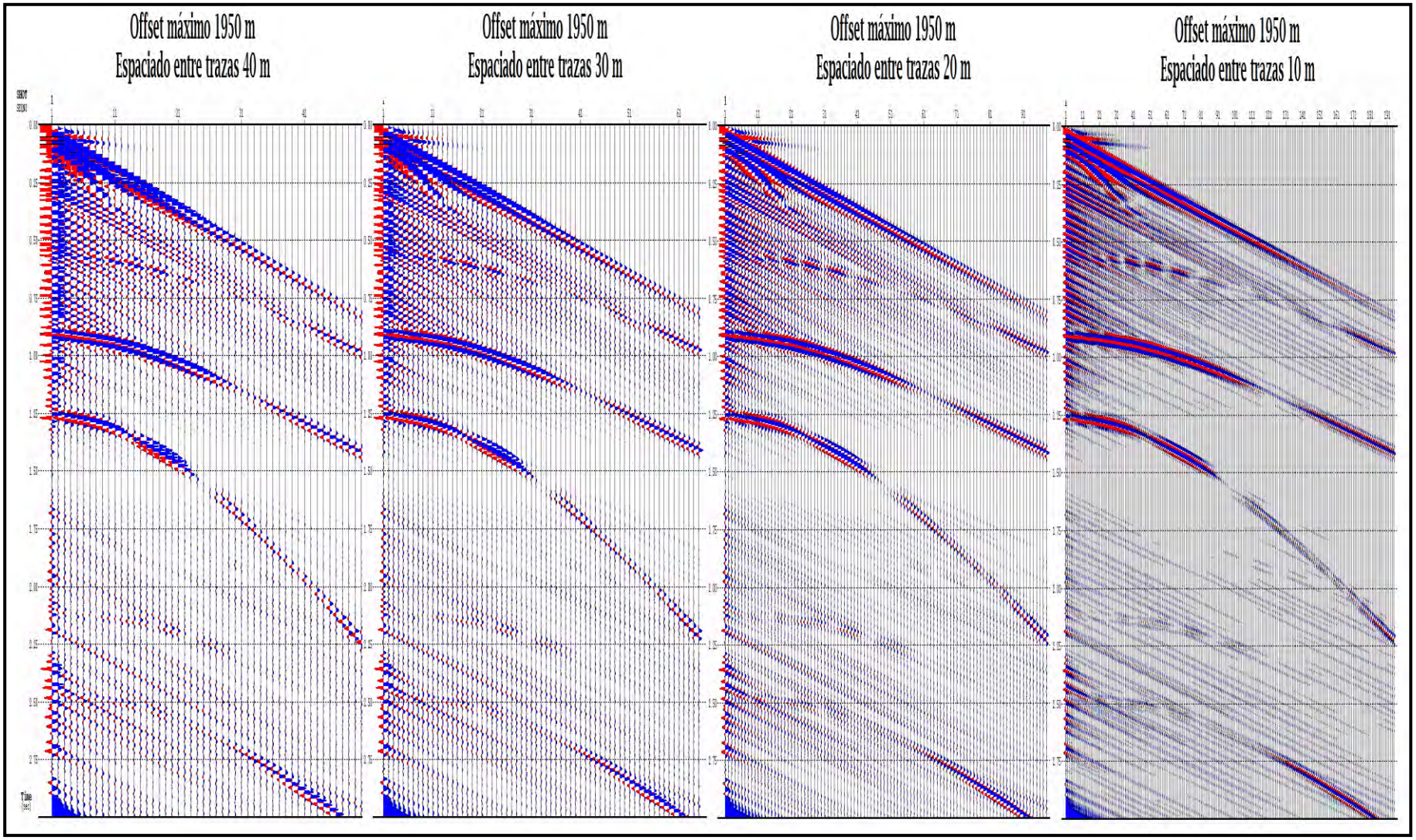


Figura 5.6 Shot gathers sintéticos, modelados para **dos capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m.

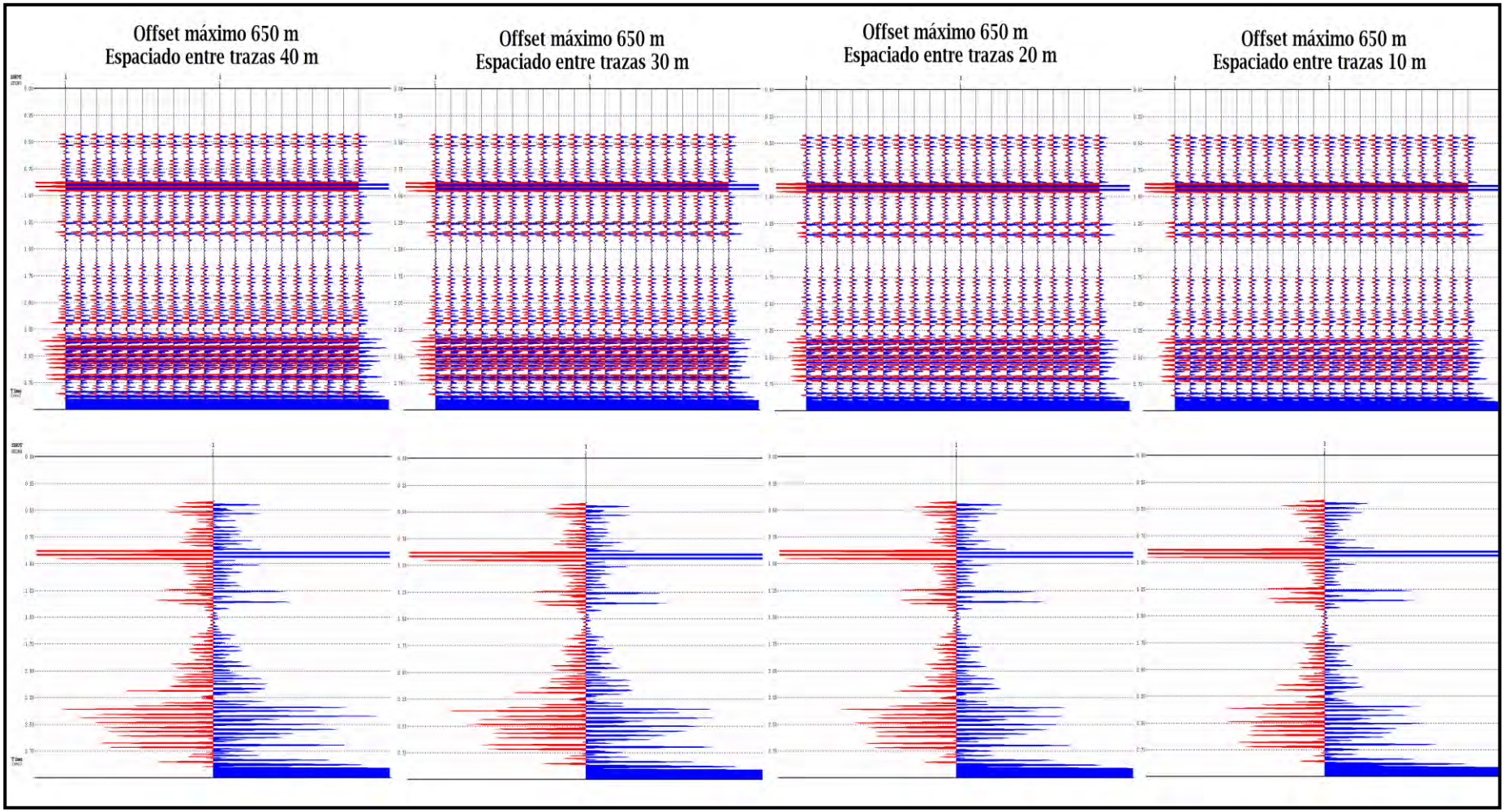


Figura 5.7 Secciones apiladas, para un modelo de **dos capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo.

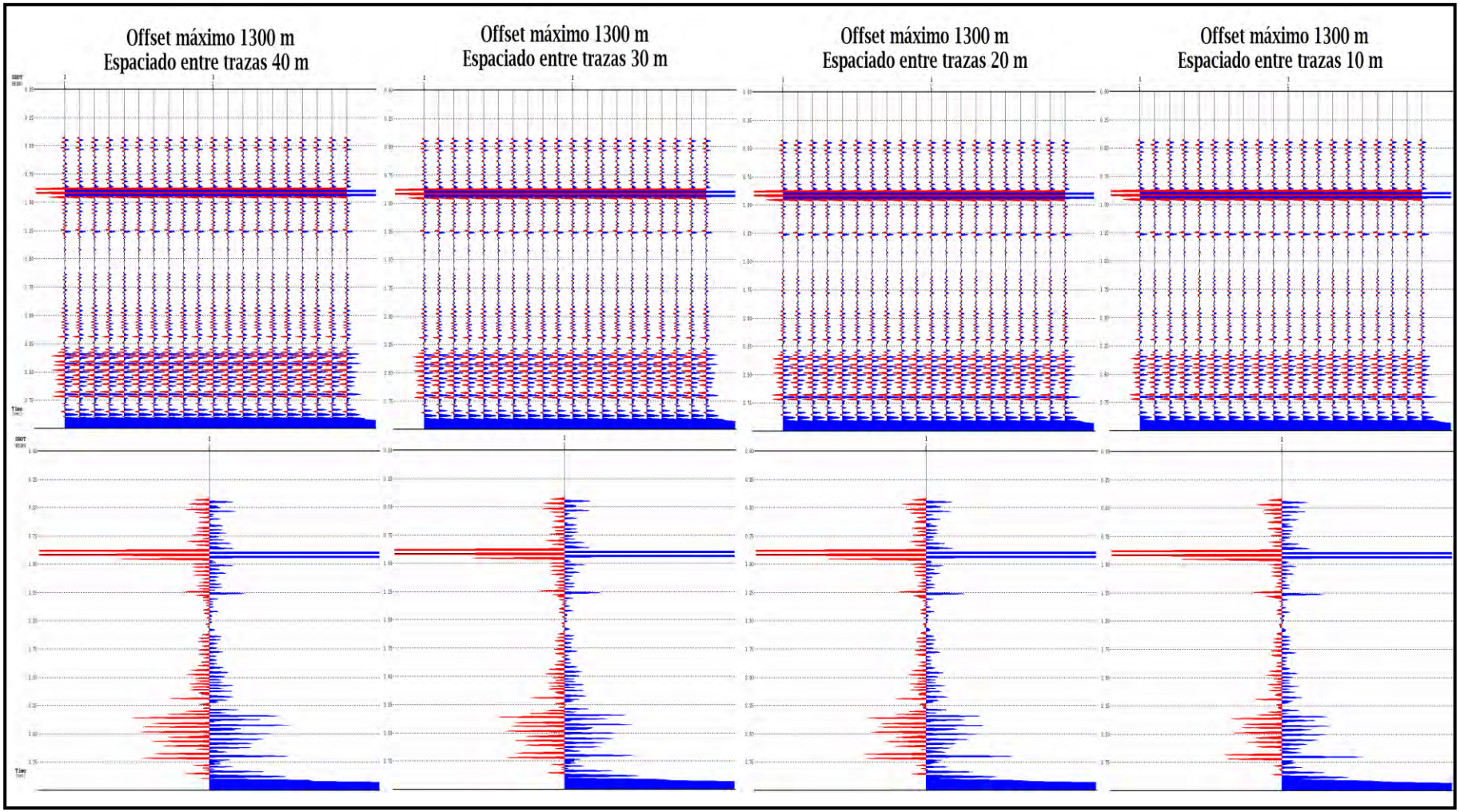


Figura 5.8 Secciones apiladas, para un modelo de **dos capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo.

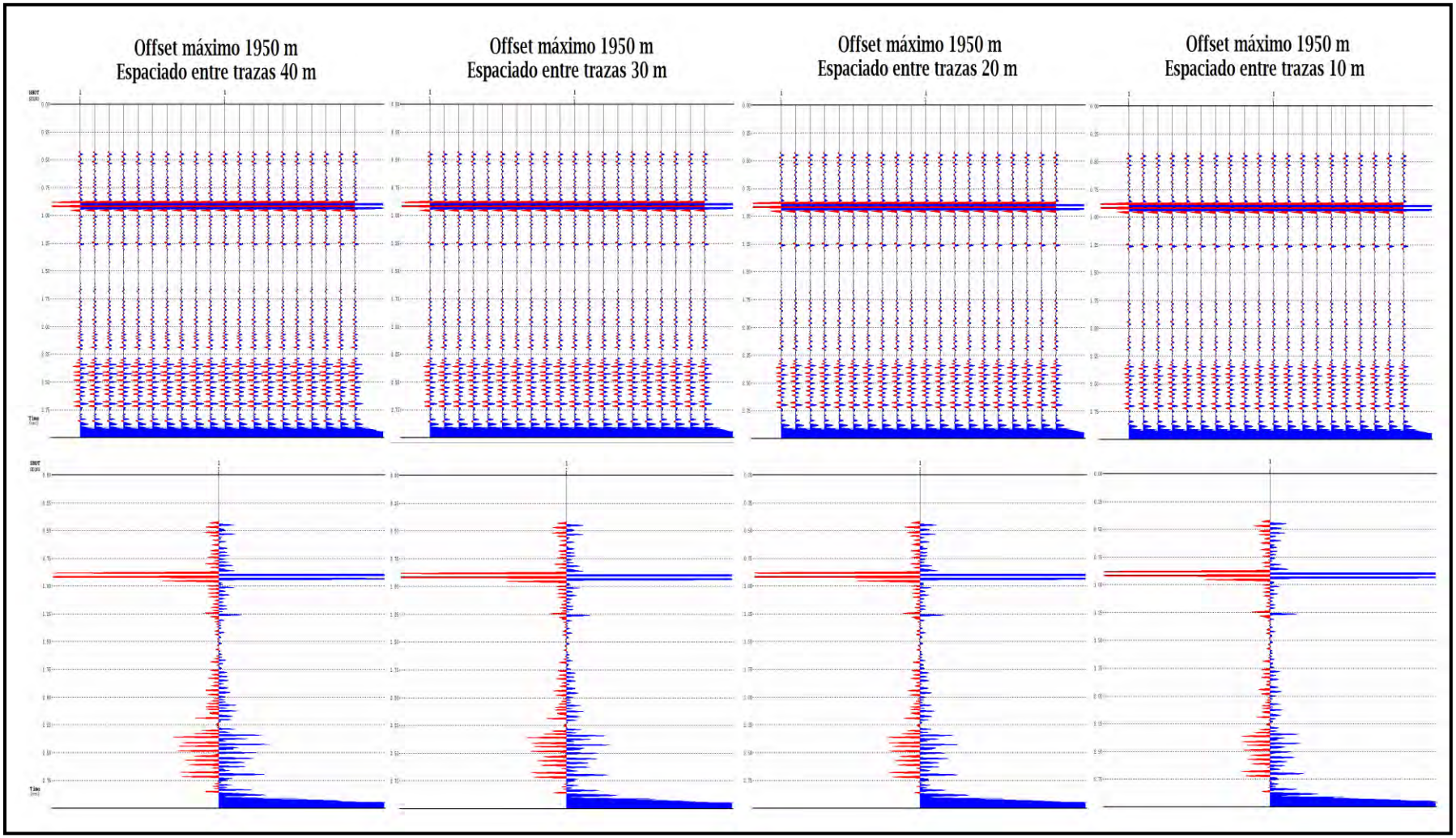


Figura 5.9 Secciones apiladas, para un modelo de **dos capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo.

En la figura 5.4, se presentan los shot Gathers sintéticos, que se obtuvieron luego del proceso de decimación de las trazas, el offset máximo de adquisición es de 650 metros, igual a la profundidad del objetivo de interés modelado como el tope de la Formación La Pascua, (Ver Capítulo III). Se puede observar con claridad, como para una separación entre trazas de 40 y 30 metros, la grabación de la señal y el ruido no es adecuada, ya que la señal se encuentra mal muestreada, es decir, se tiene el efecto conocido como aliasing espacial. Mientras que, para 10 y 20 metros, se tiene que tanto la señal como el ruido, presentan un buen muestro.

En la figura 5.5 y 5.6, se presentan los shot Gathers sintéticos, con un offset máximo, proporcional a la profundidad del objetivo de exploración de 1300 y 1950 metros, respectivamente. Para un intervalo entre trazas de 40 y 30 metros, se presenta el efecto de aliasing espacial (Ver Figura 5.10); mientras que para 20 y 10, se tiene un buen muestreo de la señal.

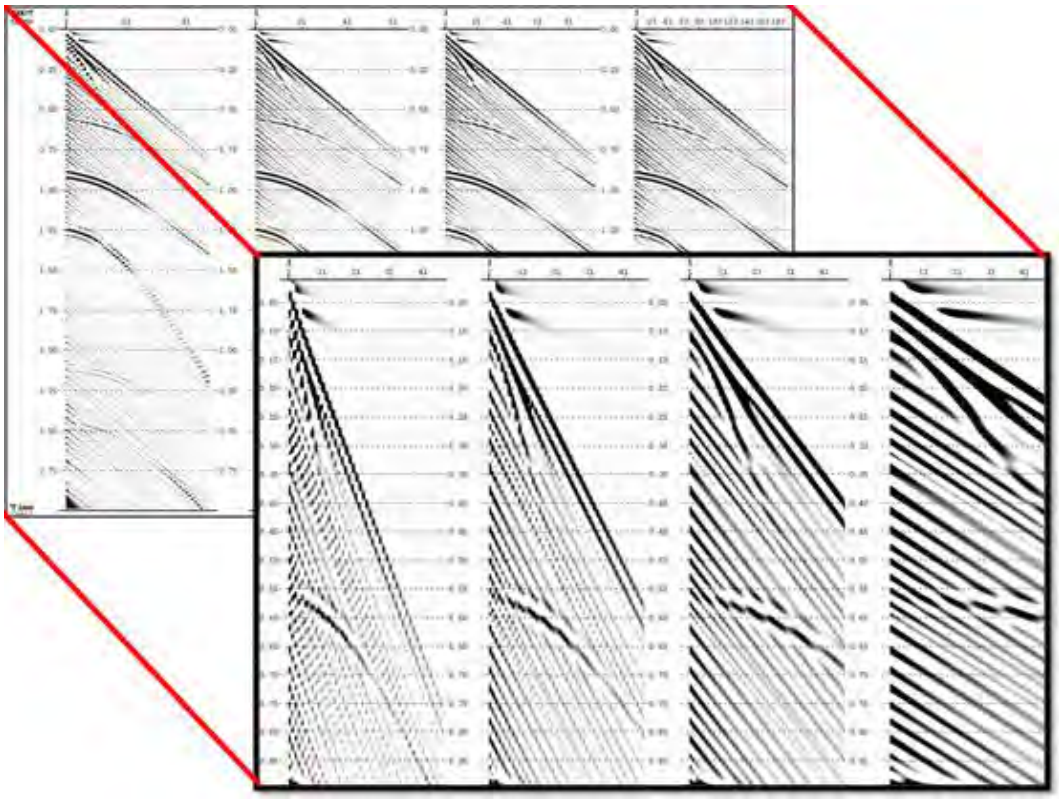


Figura 5.10 Efecto de Aliasing espacial, para el intervalo de 40 y 30 metros entre trazas, para un offset máximo de 1950 metros.

Además, se observa una importante disminución de las amplitudes para el evento de onda convertida, ubicado alrededor de 0.9 segundos, a 1100 metros de offset, que vuelve a aumentar alrededor de 1300 metros de offset, (Ver Figura 5.6). Este cambio de fase, es típico del comportamiento sinusoidal de la reflectividad de la onda convertida, (Ver Sección 3.1.1), y se debe tomar en cuenta, para el establecimiento de parámetros de adquisición sísmica multicomponente.

En las figuras 5.7, 5.8 y 5.9, se presentan las secciones apiladas para cada configuración de adquisición, mostrada en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, respectivamente. En específico, se tiene que las secciones apiladas, correspondientes a un offset máximo cercano, igual a 650 metros, presentan una relación señal-ruido muy baja. Sin embargo, las secciones apiladas, pertinentes a offset máximo igual a 1300 y 1950 metros (medio y lejano), muestran una relación señal-ruido alta.

La disminución del espaciado entre trazas, para offset cercano, medio y lejano, genera una importante disminución de ruido numérico en las secciones, sobre todo para tiempos profundos, a partir de dos segundos en adelante. Por otro lado, si se realiza una comparación directa entre las secciones apiladas para distintos offsets, indiscutiblemente, los apilados correspondientes a un offset máximo de 1950 metros, presentan las relaciones S/R más alta; sin embargo, en esta investigación, se requiere evaluar los parámetros de adquisición, de manera de seleccionar los mejores parámetros en términos de costos y funcionalidad. Debido a esto, si se realiza una comparación entre las secciones apiladas para offset medio y lejano, iguales a 1300 y 1950 metros, se tiene para ambas secciones, (Ver Figuras 5.9 y 5.10), un buen muestreo de la señal, sin embargo al utilizar un offset máximo de 1950 m se puede correr el riesgo de incluir en el apilado, el segmento reflexión que posee la polaridad invertida, razón por la que un offset de 1300 m sería suficiente para registrar de manera óptima el evento en cuestión.

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron a partir del proceso de decimación, con distintas configuraciones de adquisición para el modelo de cinco capas, (Ver Figuras 5.11 a 5.16).

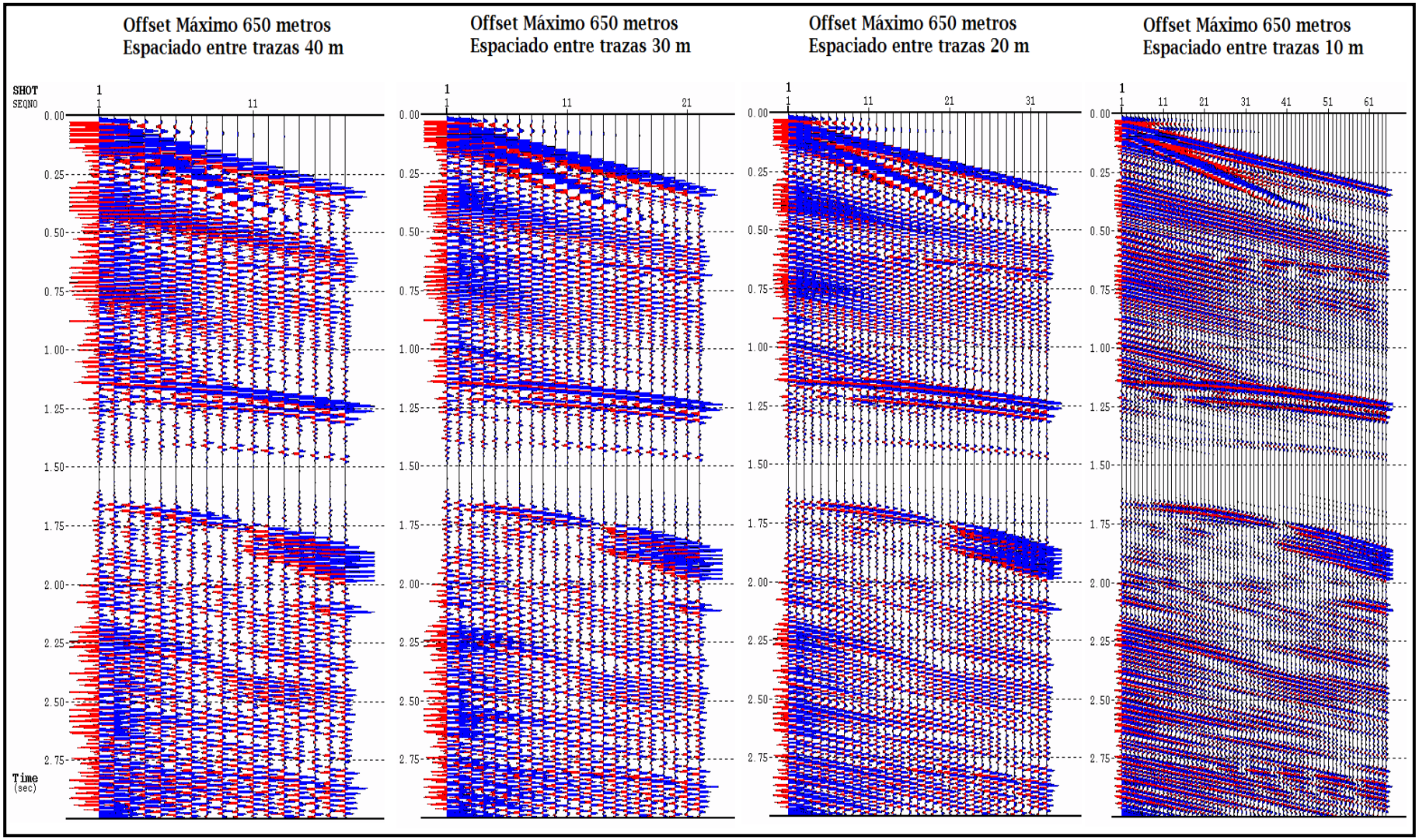


Figura 5.11 Shot gathers sintéticos, modelados para **cinco capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m.

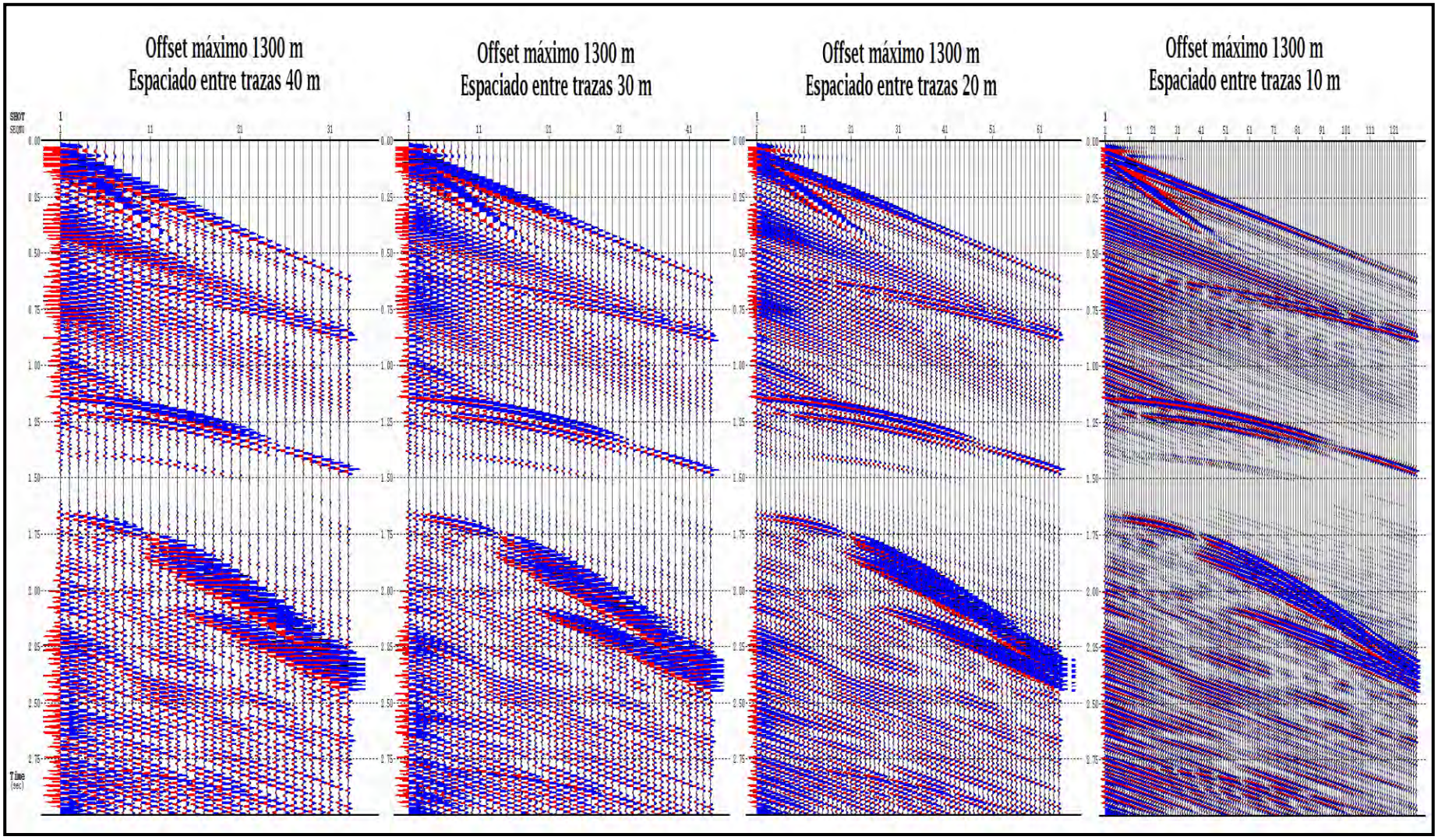


Figura 5.12 Shot gathers sintéticos, modelados para **cinco capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m.

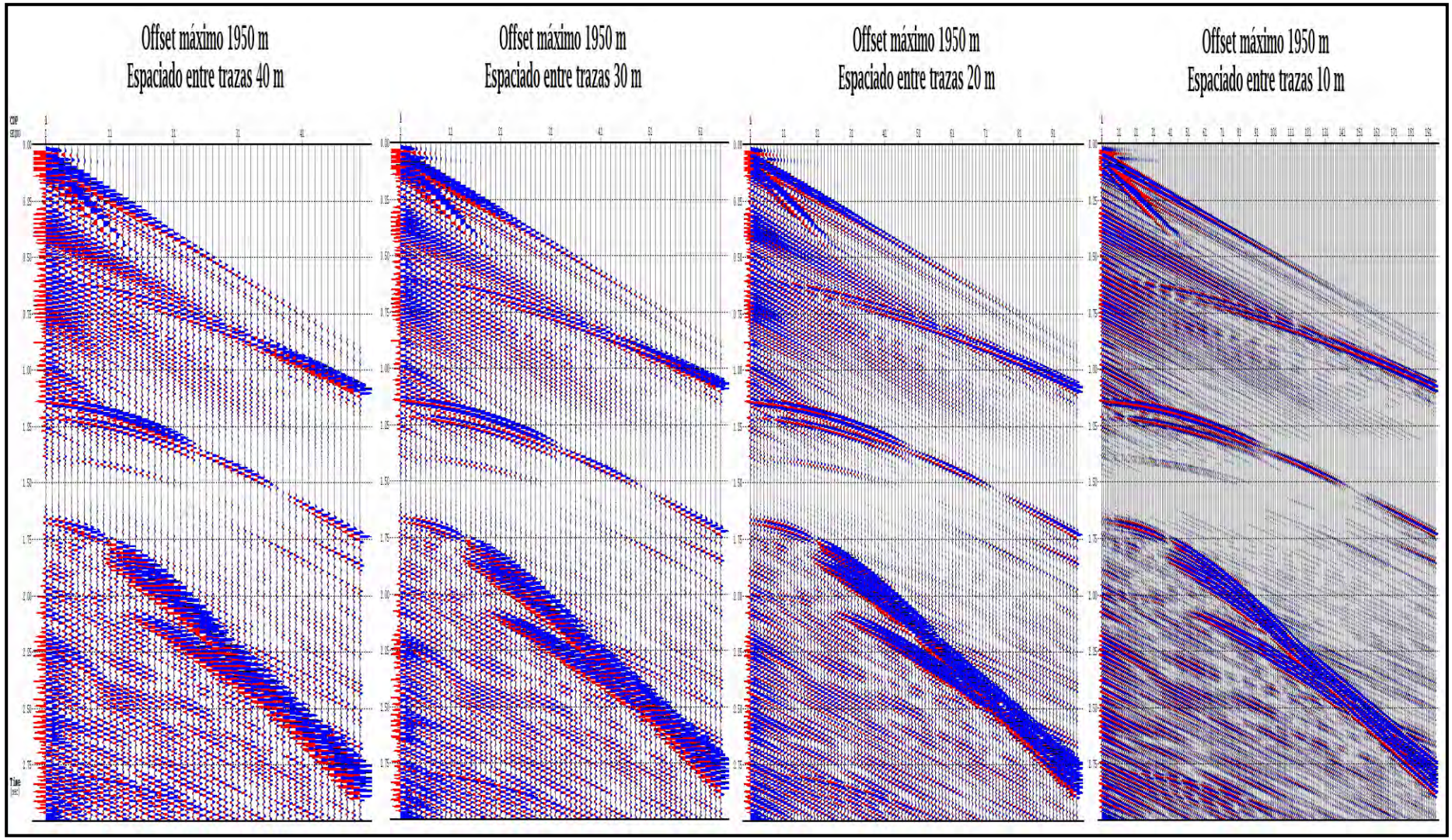


Figura 5.13 Shot gathers sintéticos, modelados para **cinco capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m.

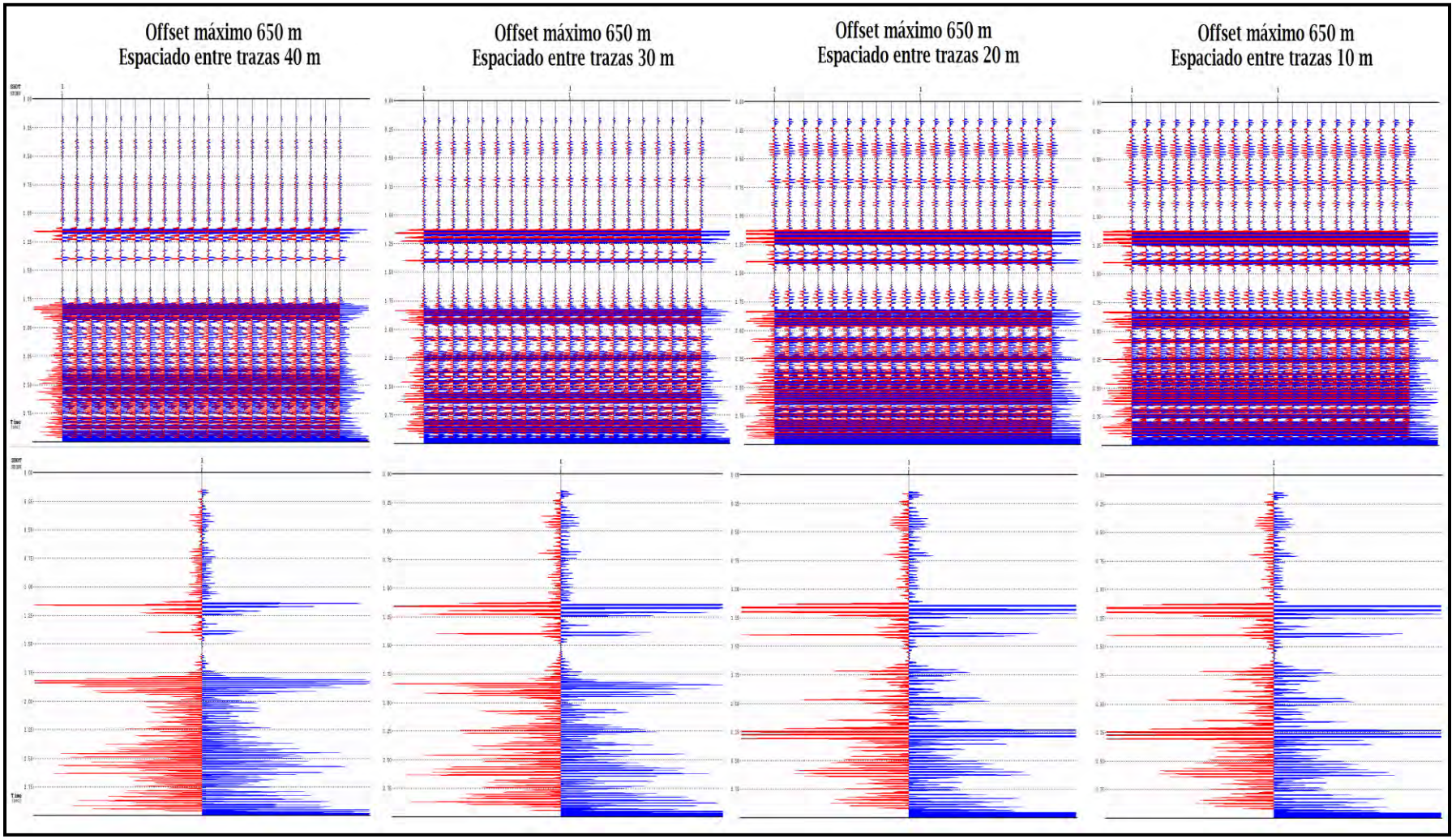


Figura 5.14 Secciones apiladas, para un modelo de **cinco capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 650 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo.

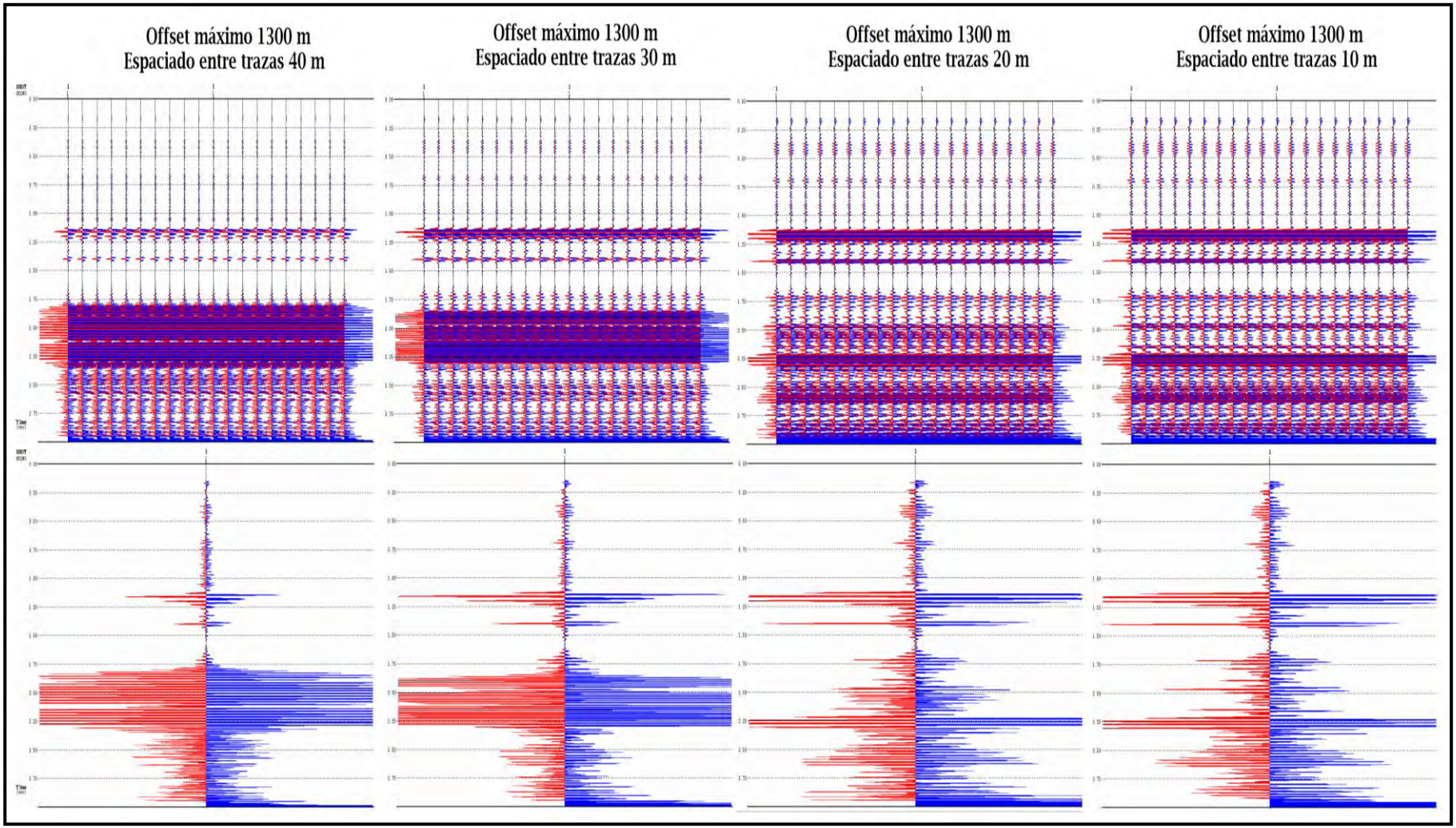


Figura 5.15 Secciones apiladas, para un modelo de **cinco capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1300 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo.

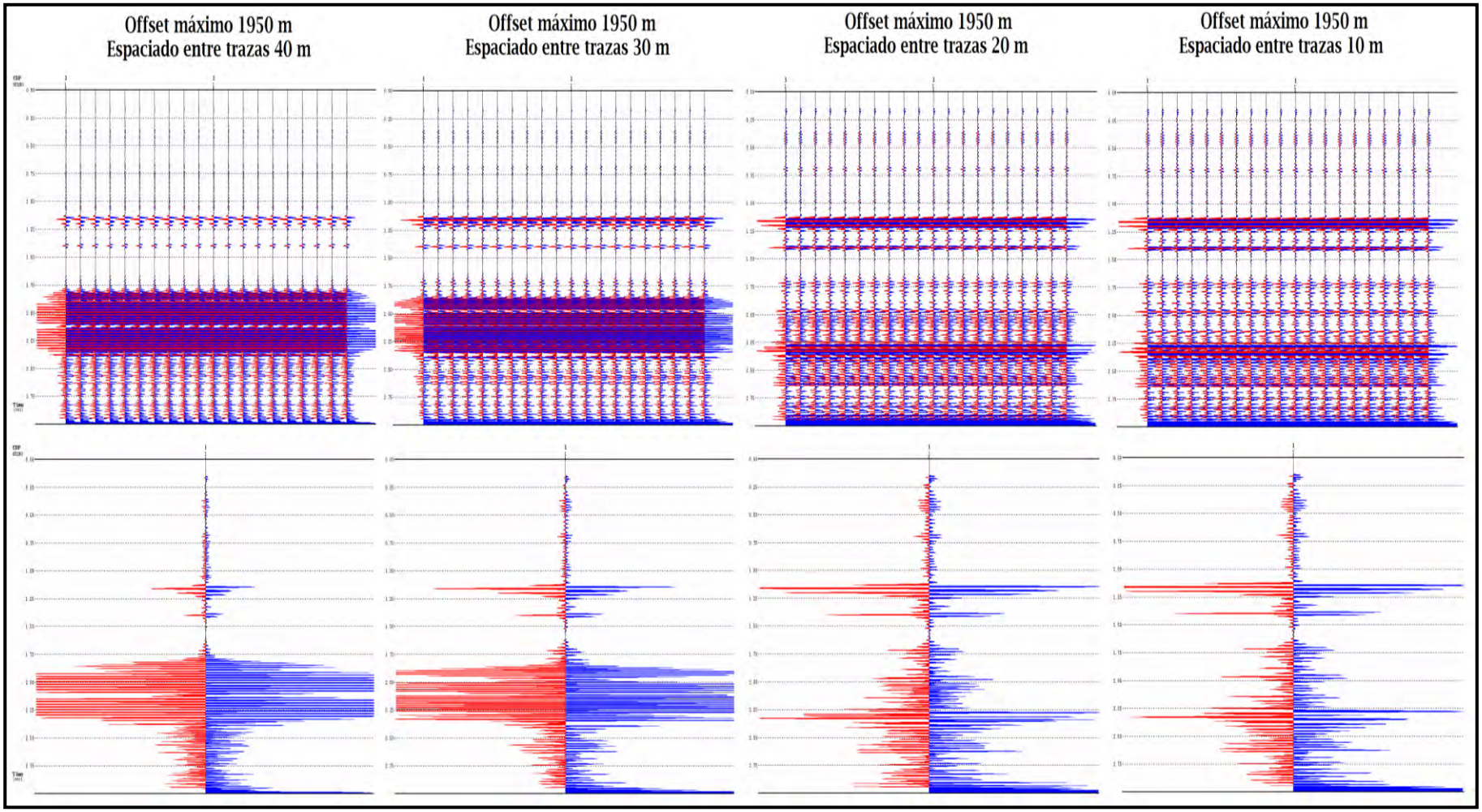


Figura 5.16 Secciones apiladas, para un modelo de **cinco capas**, pertinentes a la componente radial. De izquierda a derecha, disminuye el espaciado entre trazas: 40, 30, 20 y 10 metros con un offset máximo fijo de 1950 m. Arriba muestra la Sección apilada y abajo el apilado para un solo disparo.

En las figuras 5.11, 5.12 y 5.13, se muestran los shot Gathers sintéticos, que se obtuvieron luego del proceso de decimación de las trazas, para el modelado de cinco capas. Los reflectores de interés, pertinentes a los eventos de onda convertida (P-S), se encuentran ubicados alrededor de 1.15, 1.25 y 1.4 segundos, correspondientes a las reflexiones de los topes de la Formación La Pascua, Cretácico y Pre-Cretácico. El tope de la Formación Roblecito, no se observa ya que en el modelo programado, esta formación consta de apenas cuatro metros de espesor, (Ver Figura 5.17), por tanto, la contribución en las reflectividades es imperceptible. Además, es importante resaltar que el tercer evento de onda convertida, correspondiente a 1.4 segundos, se caracteriza por presentar trazas con amplitudes bajas; esto se debe a que no existe un contraste de impedancia significativo entre la última capa, (Ver Capítulo II), que corresponde al Pre-Cretácico y la contribución de los estratos que la suprayacen, (Ver Figura 5.18).

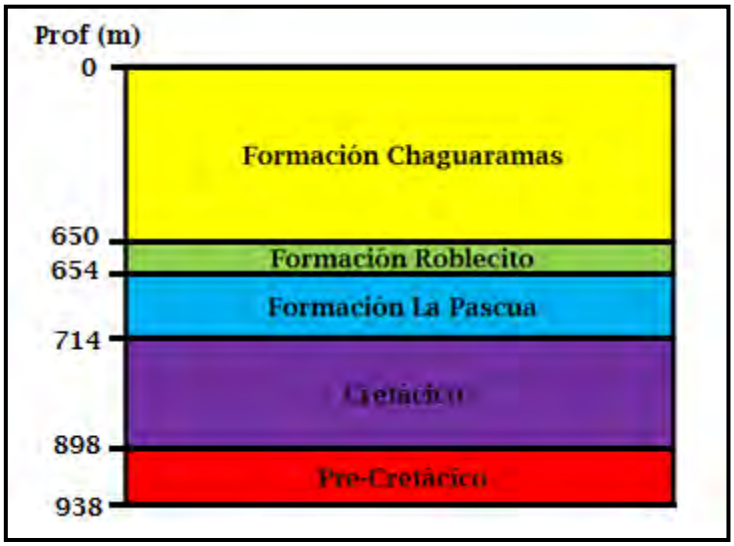


Figura 5.17 Esquema del modelo de cinco capas, que muestra la proporción de los espesores de los estratos.

Además, es importante resaltar nuevamente, el comportamiento sinusoidal de la reflectividad en los eventos de onda convertida, (Ver figura 5.18). Se tiene, que para el evento A y B, se presentan dos cambios de fase; sin embargo, a partir de 950 m de offset, no se puede distinguir con claridad un reflector de otro, posiblemente por la interferencia de ruido numérico y múltiples. El evento más profundo,

nombrado con la letra C, presenta una seria disminución de amplitud a partir de 900 metros de offset.

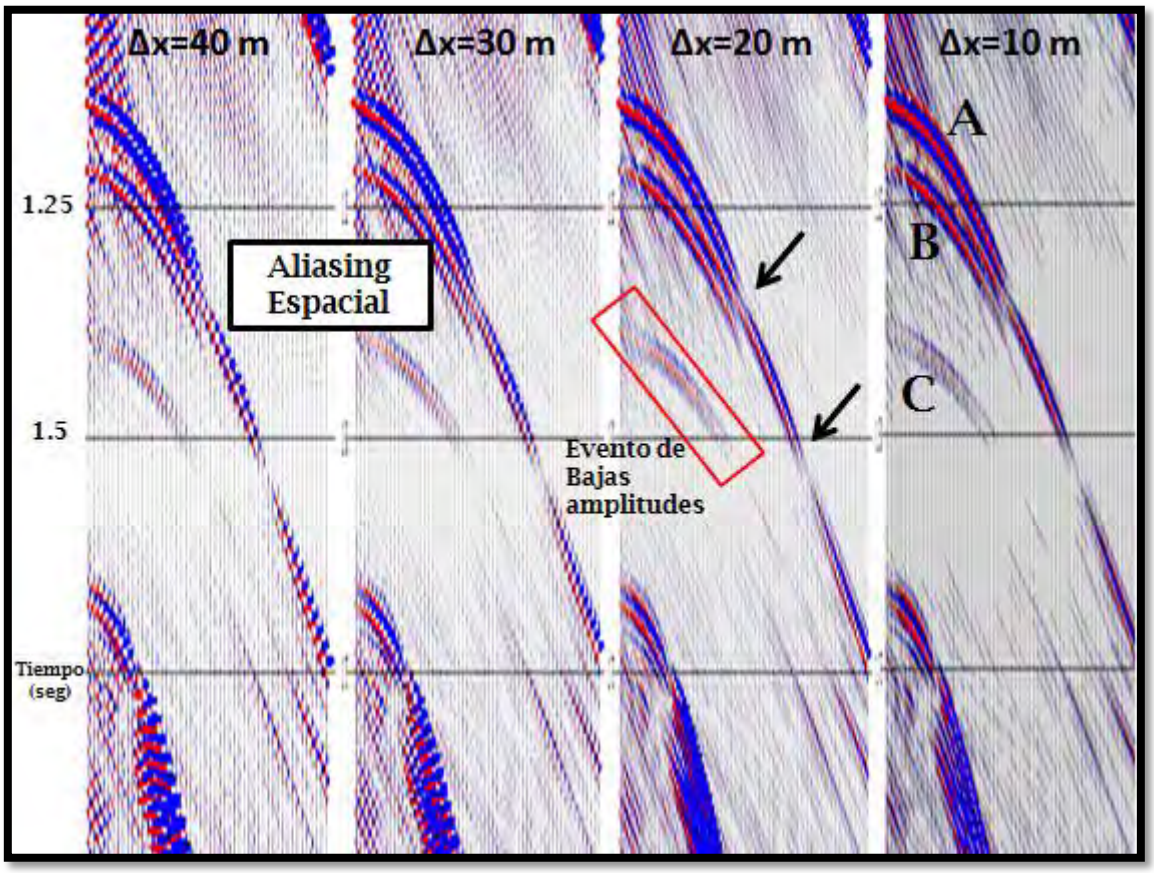


Figura 5.18 Shot Gathers sintéticos, para un offset máximo de 1950 metros. El evento A corresponde al tope de la formación La Pascua, el B representa el tope del Cretácico, y el C muestra el tope del Pre-Cretácico. Las flechas representan los cambios de fase.

Las secciones apiladas para los distintos offsets máximos, correspondientes a las figuras 5.14, 5.15 y 5.16, presentan un aumento notable de la relación S/R, a medida que se disminuye el intervalo entre trazas. Los mejores resultados, se obtuvieron para el espaciado de 20 y 10 metros, con offsets máximos de 1300 y 1950 metros, ya que estas secciones, se caracterizaron por amplitudes altas en los eventos apilados y una disminución notable de ruido para tiempos profundos. En cambio, para 40 y 30 metros de intervalo entre trazas, las secciones presentan ruido excesivo, a partir de 1.75 segundos en adelante.

Por otro lado, luego de haber realizado una comparación, entre los apilados correspondientes a un solo disparo, para configuraciones a offsets máximos de 1300 y 1950 metros. Se concluyó que los mejores apilados, correspondían a las secciones de offsets máximos medios (1300 metros); aunque los apilados con menor cantidad de ruido, fueron los de offsets máximos lejanos (1950 metros). Las secciones de offset máximo igual a 1300 metros, presentaron las mayores amplitudes en los eventos apilados de onda convertida, (Ver Figura 5.19).

5.2. Análisis Amplitud versus Offset (AVO).

En esta sección, se realizó un análisis de las variaciones de las amplitudes de los eventos de onda convertida, con la distancia fuente receptor (offset). Los datos sísmicos de entrada, deben ser corregidos previamente, por el módulo CCPNMO, encargado de realizar la corrección NMO no hiperbólica, a los datos de onda convertida P-S, (Ver Sección 4.2.4). Los módulos utilizados, para realizar la extracción de las amplitudes de los eventos horizontalizados fueron: AMPQC y TABLE. El primero encargado básicamente, de extraer para un tiempo definido por el usuario, todas las amplitudes del dato sísmico de entrada; y el segundo tiene como función principal imprimir en pantalla los valores de amplitud y offset, proporcionados por el parámetro AMPQC.

En específico las variables que se definen, para el uso del parámetro AMPQC, son las siguientes, (Ver Figura 5.20):

- METHOD: El usuario indica, si la amplitud extraída será del tipo RMS, promedio, o el valor absoluto de la amplitud

- OPTION: El usuario específica, si los datos de salida, se imprimen en las trazas o en el “Header”.

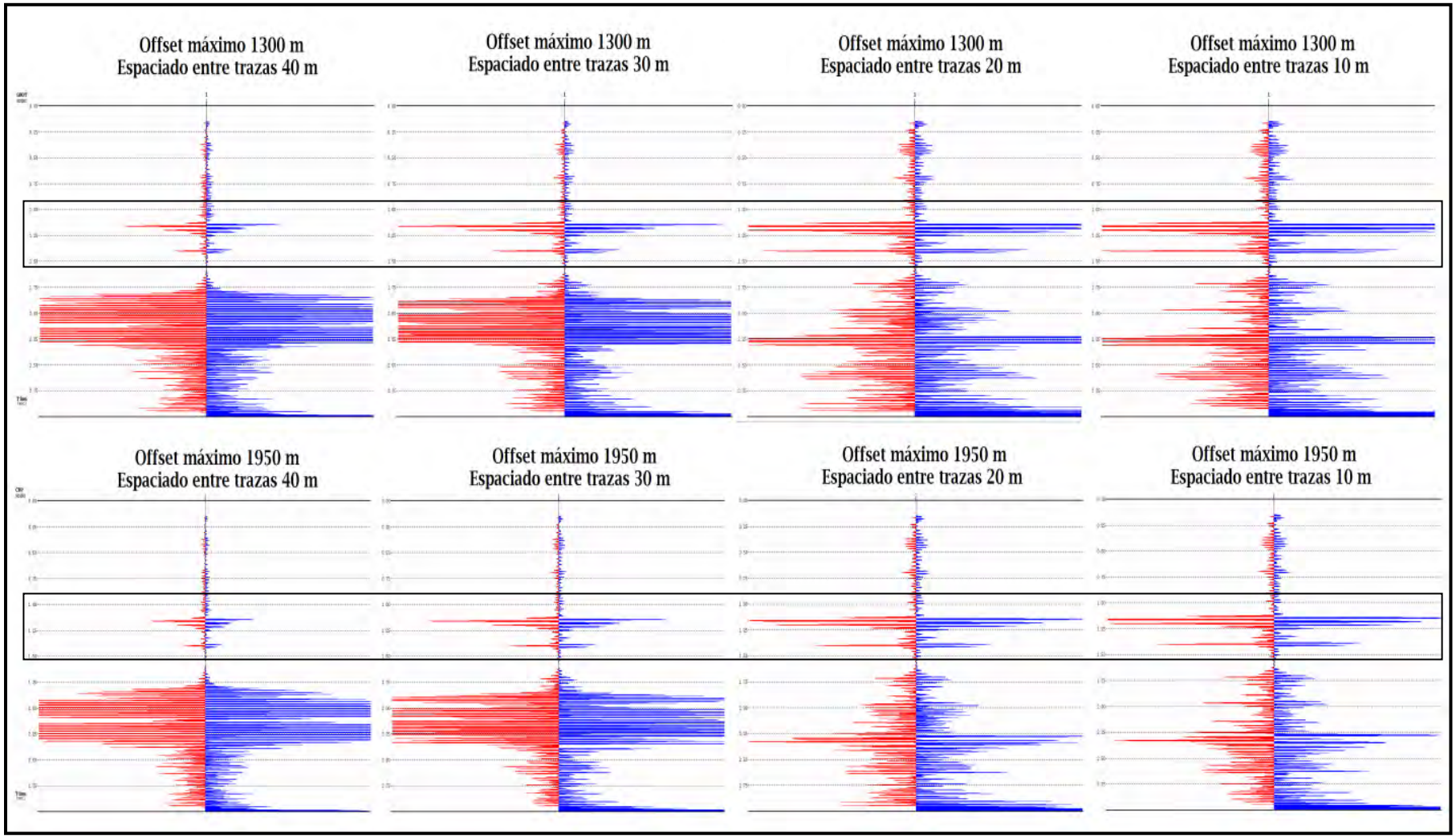


Figura 5.19 Comparación directa entre los apilados, correspondientes a un solo disparo, para offsets máximos de 1300 y 1950 metros. El recuadro, resalta las amplitudes de los eventos de onda convertida apilados.

- DTOUT: Se utiliza para definir el muestreo de las amplitudes. Por ejemplo, si se elige DTOUT igual a 2, se extrae un valor de amplitud para cada 2 trazas del dato de entrada.

- HDRNAME: Específica el nombre del Header, donde se guardarán los datos de salida.

- GATE: Con este parámetro, el usuario indica los pares de tiempo, que definirá el inicio, y el final la ventana de tiempo, de donde se extraerán las amplitudes de los datos sísmicos.

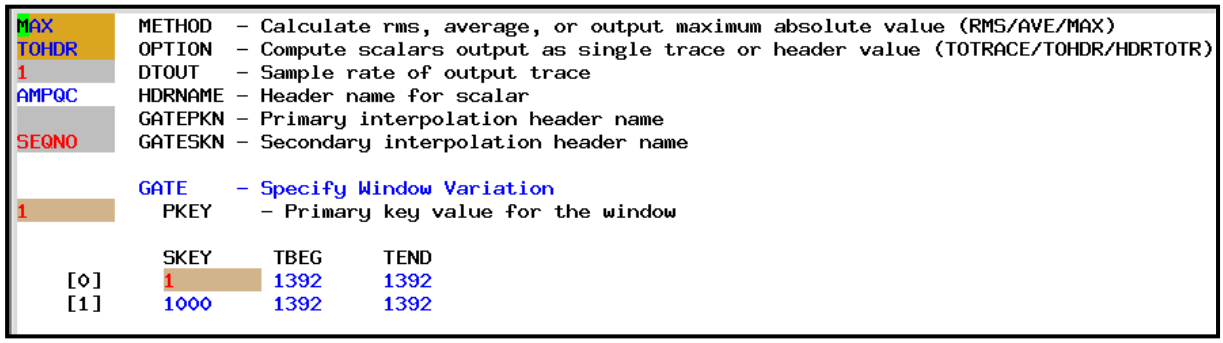


Figura 5.20 Ejemplo de parámetros definidos en el módulo AMPQC

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los eventos de onda convertida (P-S), modelados para dos y cinco capas.

5.2.1. Modelo de dos capas

En esta sección, se realizó el análisis de amplitudes del reflector, correspondiente al evento de onda convertida P-S, del tope de la Formación La Pascua, (Ver Figura 5.21).

Se realizó un gráfico, (Ver Figura 5.22), de las amplitudes negativas del reflector, pertinentes a la interfaz reflejada, en función del offset. En este gráfico, se muestran dos curvas, la primera de color azul, que representa la variación real de las amplitudes del evento de onda convertida (P-S), con el offset y, la segunda de color rojo, que representa una curva polinómica de tercer orden, que suaviza la tendencia de la curva real de los datos.

Además se realizó un último gráfico, que muestra la variación de la amplitud y fase del evento de onda P-S, en función de la relación, offset entre el doble de la profundidad del reflector, descrita en el modelo, (Ver Figura 5.23). Este gráfico, se basa en las ecuaciones de Zoeppritz, descritas en la ecuación 3.4 de esta investigación, (Ver Capítulo III). Las amplitudes de mayor magnitud, encontradas para este gráfico teórico, se encontraron para el intervalo 0.3-0.5 aproximadamente.

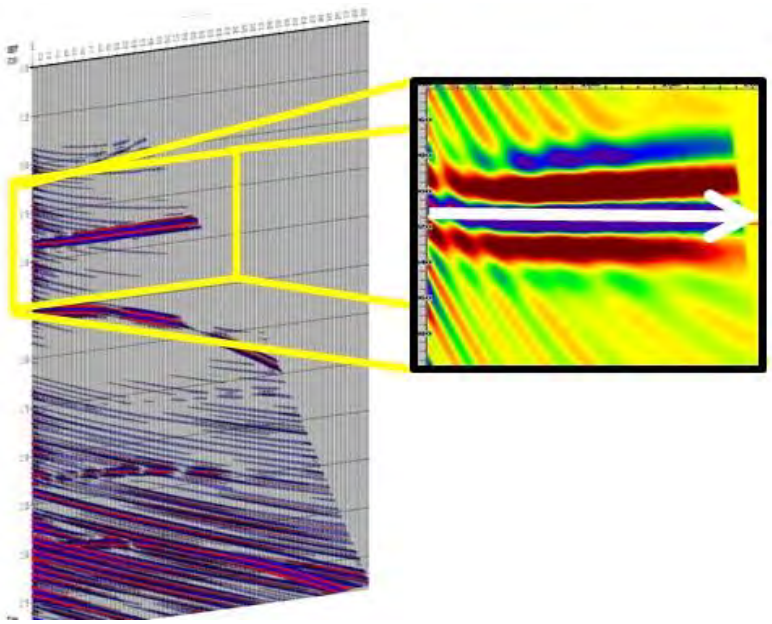


Figura 5.21 Shot gather sintético corregido y modelado para dos capas. La flecha blanca representa, los offsets empleados en el análisis de amplitudes.

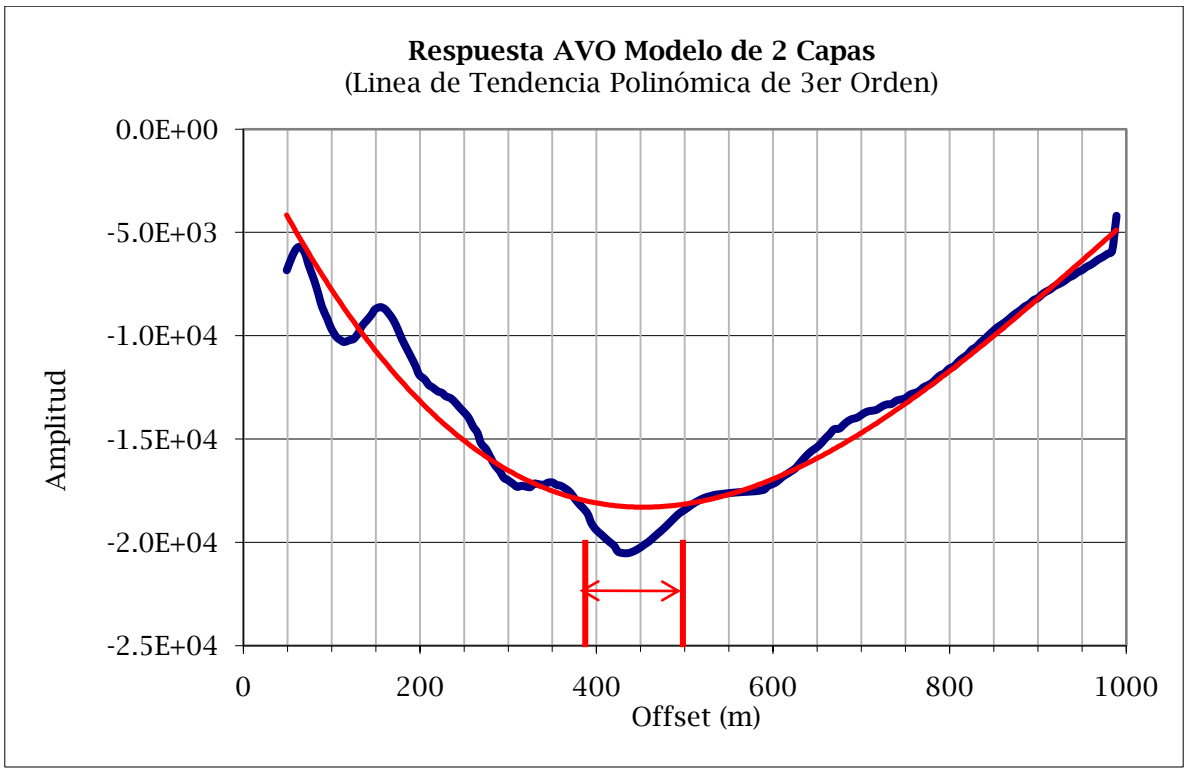


Figura 5.22 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida, modelado para dos capas. El intervalo rojo, señala las mayores magnitudes.

Es notable, en el gráfico 5.22, que las amplitudes más altas, en términos de magnitud, se encuentran para offsets comprendidos entre 390-450 metros. Si se realiza una equiparación entre los datos obtenidos en la figura 5.22, y la figura 5.23, se puede relacionar, la teoría de reflectividades desarrollada por Zoeppritz, para este modelo, con los datos multicomponentes obtenidos, para el modelo de dos capas, (Ver figura 5.22).

Para realizar esta correlación, se debe convertir los valores de offset obtenidos para las mayores amplitudes, a offset entre el doble de la profundidad del reflector, para verificar la correspondencia entre los resultados obtenidos y la teoría de Zoeppritz, (Ver Figura 5.23). Es conocido, que en el modelo de dos capas, el tope del reflector, se modeló para una profundidad de 650 metros, (Ver Capítulo II). Entonces, se dividió el intervalo de offset comprendido entre 390-450 metros, entre el doble de la profundidad, y se obtuvo el intervalo de 0.3 a 0.35, correspondiente a valores de Offset/2Profundidad.

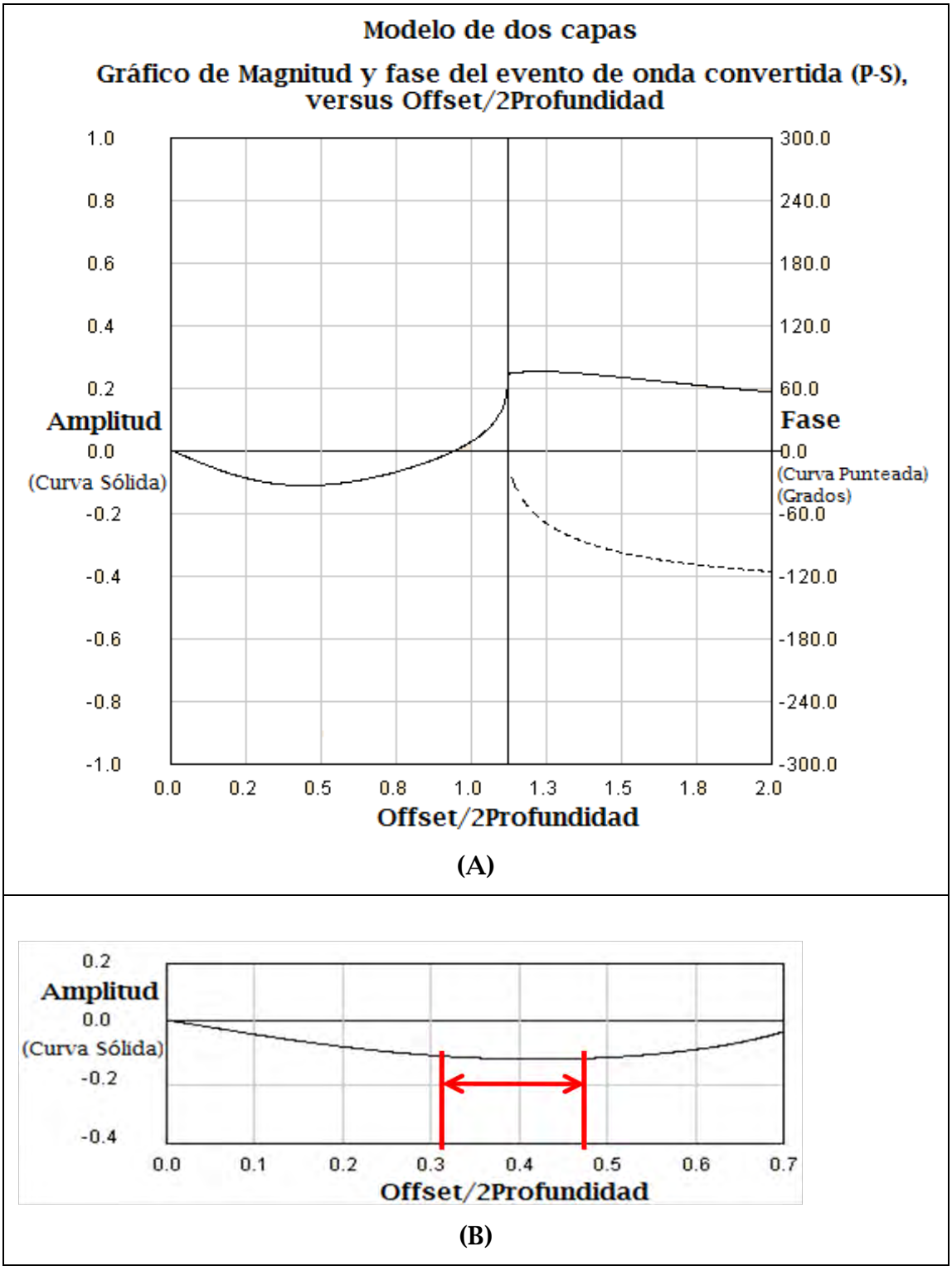


Figura 5.23 (A) Gráfico de amplitud y fase del evento de onda convertida P-S, correspondiente al modelo de dos capas, según las ecuaciones de Zoeppritz, (B) Sección del gráfico que resalta las amplitudes de mayor magnitud, (Modificado de CREWES Reflectivity Explorer 2.0).

Por lo tanto, se puede concluir que existe una buena correspondencia, entre las mayores magnitudes, que se obtuvieron en los resultados sintéticos modelados para dos capas, y las mayores amplitudes teóricas, definidas por las ecuaciones de Zoeppritz. Debido a que, los resultados de 0.3 a 0.35, correspondientes a Offset/2Profundidad, que se obtuvieron para el modelo de dos capas, se encuentran dentro del intervalo de valores teóricos, de máxima amplitud, que se definieron en el gráfico 5.23.

5.2.2. Modelo de cinco capas

En esta sección, se realizó el análisis de amplitudes de los reflectores, correspondientes a los eventos de onda convertida P-S, en función del offset, para el modelo de cinco capas. Se realizaron tres gráficos Amplitud versus offset, (Ver Figuras 5.25 a 5.27), para los eventos A, B y C, definidos en la Figura 5.24.

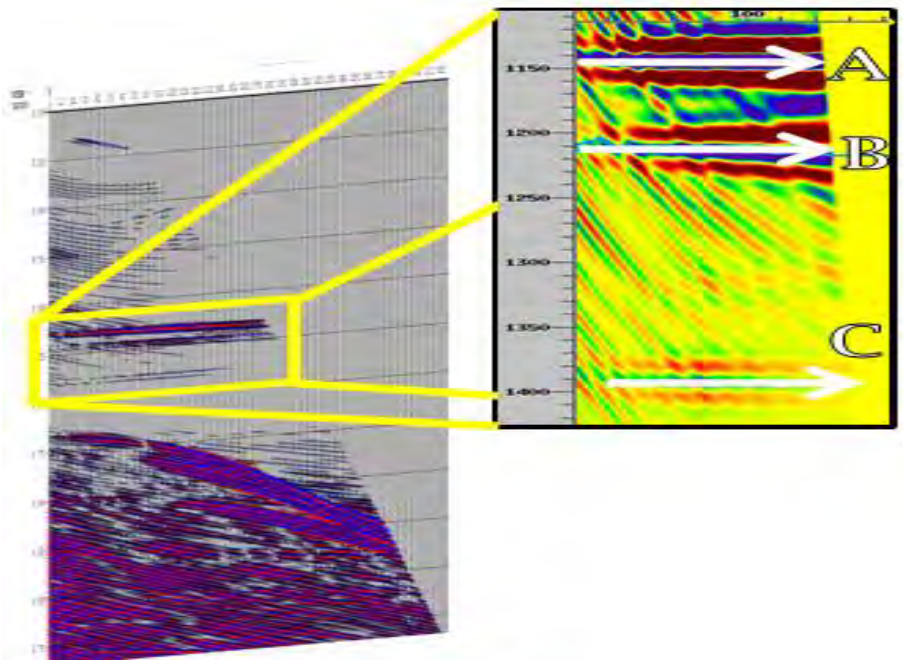


Figura 5.24 Shot gather sintético corregido y modelado para cinco capas. La flecha blanca representa, los eventos de onda convertida (P-S) A, B y C.

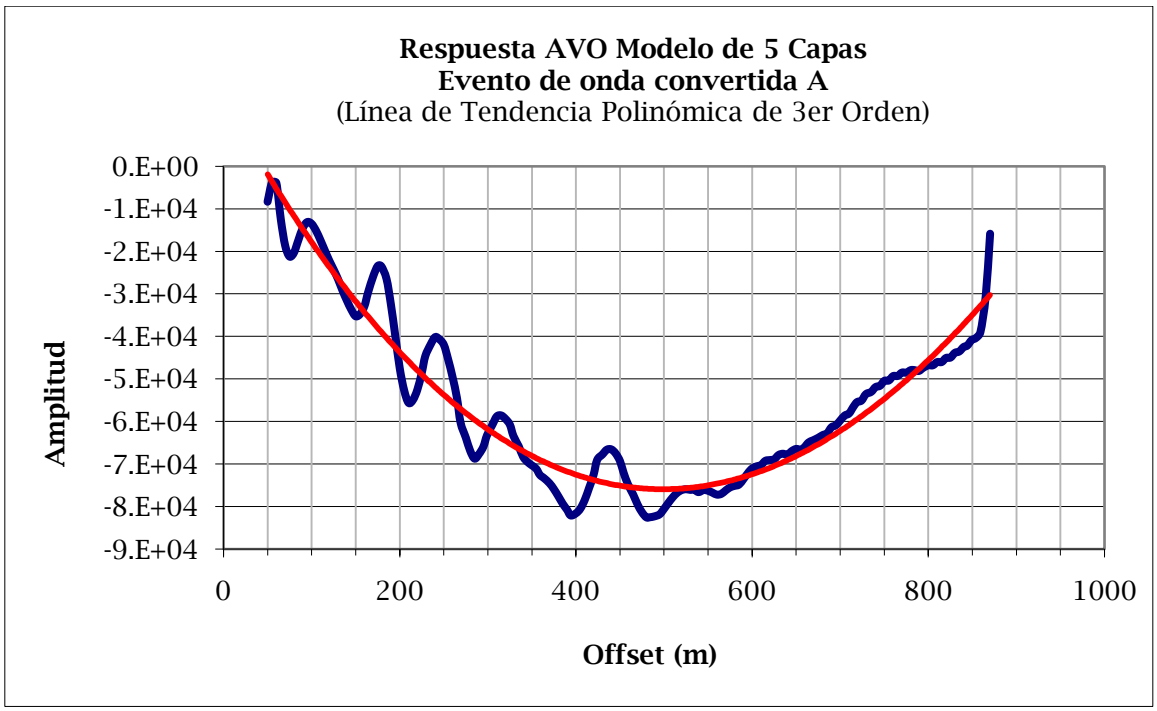


Figura 5.25 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida A, modelado para cinco capas.

En la Figura 5.25, se muestra la variación de amplitud con el offset, para el primer reflector de onda convertida, correspondiente al tope de la formación La Pascua, objetivo de exploración sísmica. Es importante resaltar, que para el intervalo entre 0 y 450 offset (metros), la curva está conformada por un conjunto de altos y bajos, hasta que en 550 offset, se estabiliza y comienza con un comportamiento polinómico, semejante a la línea de tendencia de tercer orden. El comportamiento de la curva, para offsets menores a 550 metros, se debe a la interferencia de abundante ruido numérico y ruido coherente en forma de múltiples. Los dos picos de amplitud máxima, se encuentran en 400 y 480 metros de offset, producto de la interferencia constructiva del ruido numérico y las amplitudes del reflector en estudio, por lo tanto, estos valores deben ser descartados. Es importante resaltar que las amplitudes más altas, realmente se obtienen alrededor de 550 m de offset, ya que cercano a este rango la curva de tendencia muestra que las amplitudes se estabilizan en los valores negativos de mayor magnitud.

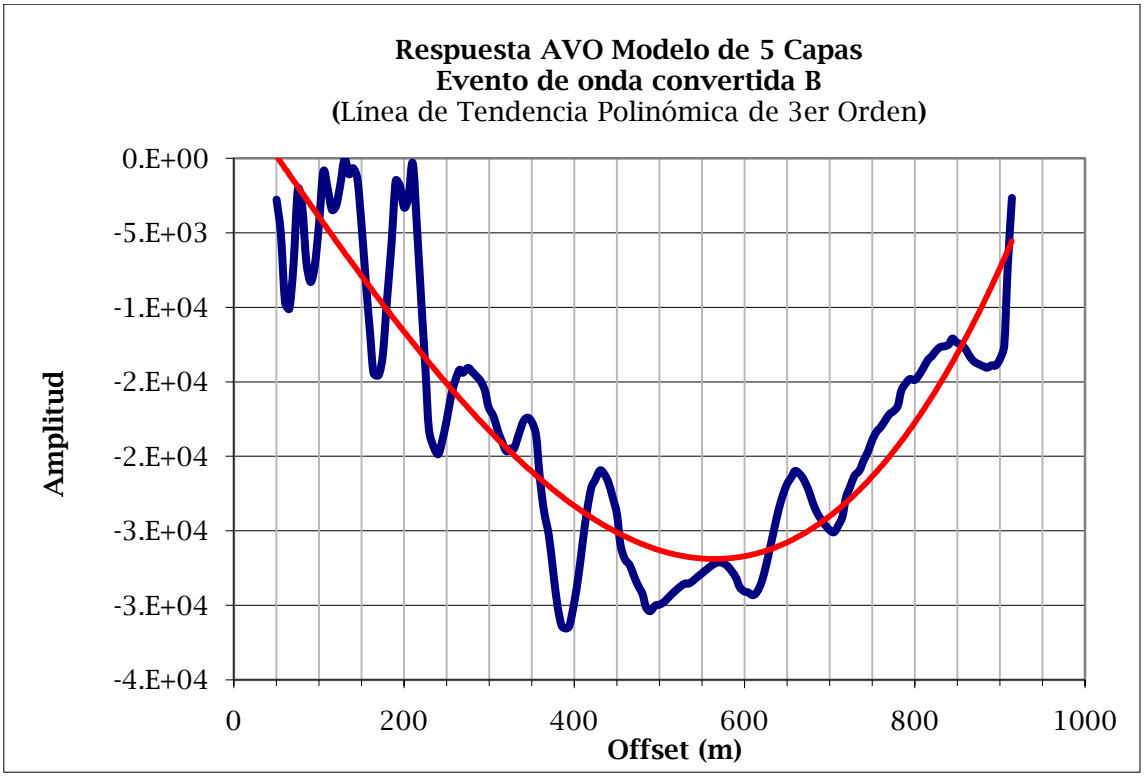


Figura 5.26 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida B, modelado para cinco capas.

En la Figura 5.26, se presenta la variación de amplitud con el offset, para el segundo reflector de onda convertida, correspondiente al tope del Cretácico. Es importante resaltar, que la curva no presenta un patrón definido, debido a la interferencia del ruido. Así como en el evento A, el máximo de amplitud que se observa a 400 m, no es un valor aceptable, ya que es producto de la interferencia del ruido numérico con la reflexión. En este caso, la marcada inestabilidad de la curva se debe a que las amplitudes de la reflexión son muy débiles y sus valores son comparables a los del ruido numérico. Es por ello que no se debe confiar en la curva propiamente dicha, sino más bien en la curva de tendencia. Según esta última, los valores de máxima amplitud se encuentran alrededor de 575 m.

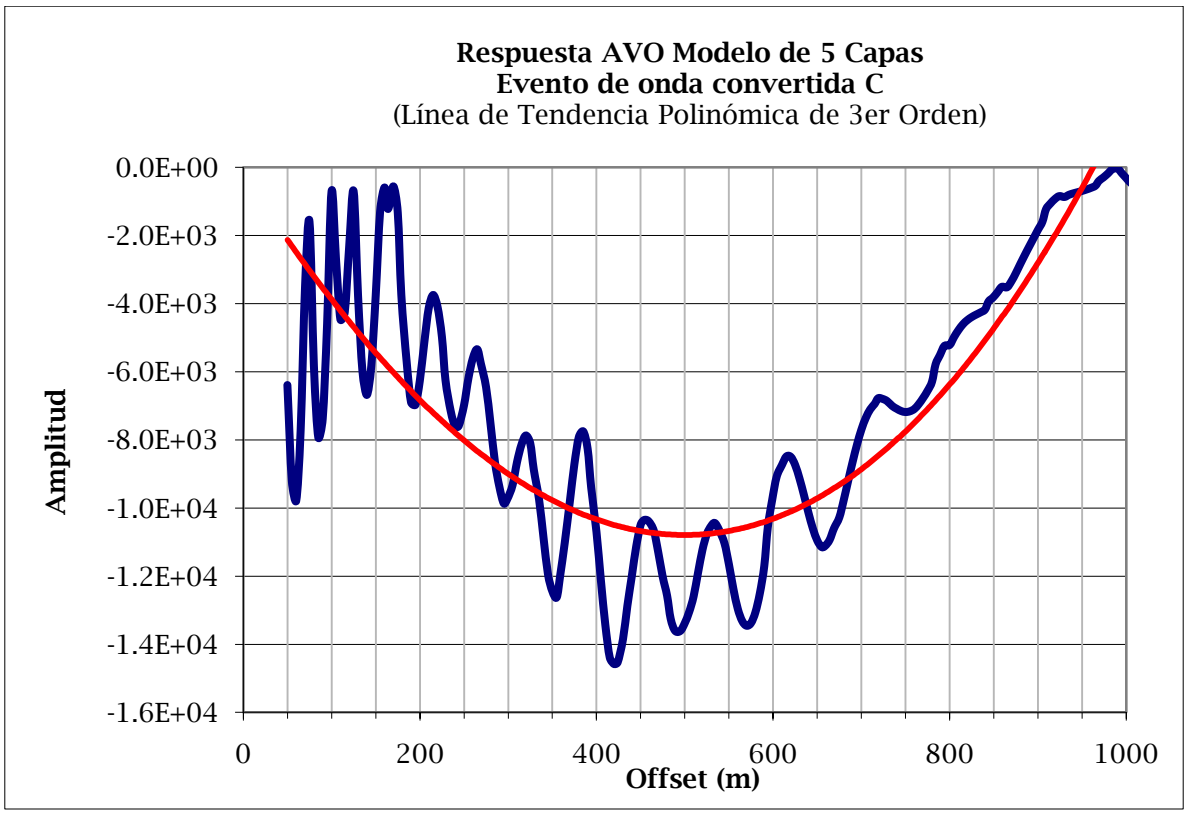


Figura 5.27 Gráfico Amplitud versus offset, para el evento de onda convertida C, modelado para cinco capas. La flecha indica, la máxima magnitud.

Por último, se presenta la variación de amplitud con el offset, para el tercer reflector de onda convertida, correspondiente al tope del Pre-Cretácico. Es importante resaltar, que la gráfica presenta un comportamiento muy variado, conformado por un conjunto de altos y bajos hasta 700 metros de offset, luego la curva, se torna parecida a la línea de tendencia polinómica de tercer orden. Este reflector, denominado como evento C, (Ver Figura 5.24), presenta este comportamiento debido a la interferencia de ruido numérico y coherente, al igual que los primeros dos eventos mencionados con anterioridad. Por lo tanto, los valores de máxima amplitud deben ser interpretados sobre la curva de tendencia, ya que en la curva real los valores de amplitud de la reflexión están interferidos por el ruido numérico. Según la curva de tendencia, los valores de máxima amplitud se encuentran alrededor de 500 m.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, se generó una serie de datos sísmicos multicomponentes utilizando modelado de reflectividades, con el módulo SUREFLPSVSH del paquete Seismic Unix, a los que se le aplicó una secuencia de procesamiento convencional, para luego evaluar la influencia de los parámetros offset máximo y espaciamiento entre trazas, en los disparos sintéticos y en las secciones apiladas. Además, se realizó un análisis AVO de los eventos. Por lo tanto, se puede concluir:

1) El método de reflectividades, es un método de alta potencia y precisión numérica, que tiene la capacidad de modelar el campo completo de propagación de onda, permitiendo la expansión del estudio del comportamiento de las ondas convertidas.

2) El módulo SUREFLPSVSH, perteneciente al paquete Seismic Unix y fundamentado en el modelado de reflectividades, representa una herramienta muy útil y realista de simulación de datos sintéticos multicomponentes.

3) El procesamiento sísmico de datos multicomponentes, correspondientes a la componente radial, requieren el procesamiento previo de los datos convencionales de componente vertical.

4) Es importante, que las configuraciones de adquisición, no solo tomen en cuenta la señal sísmica, sino también la adecuada grabación del ruido, ya que en esa medida, el procesamiento y filtración de éste, será realizado con mayor calidad.

5) Los shot Gathers sintéticos, con un espaciado entre trazas de 30 y 40 metros, presentaron para todos los offsets, el efecto de aliasing espacial. Por lo tanto, el intervalo entre trazas de 40 y 30 metros fue descartado como posible parámetro de adquisición multicomponente.

6) Las secciones apiladas, para offsets máximos iguales a la profundidad del objetivo de exploración (650 metros), presentaron relaciones S/R muy bajas para el modelo de dos y cinco capas. Por lo tanto, este offset máximo fue

eliminado como opción de un parámetro de adquisición multicomponente óptimo.

7) Existe una relación importante entre menor espaciado entre trazas y mayor relación S/R en los resultados obtenidos. Sin embargo, las secciones apiladas, para espaciados de 10 y 20 metros, no variaron notablemente. Por lo tanto, se seleccionó el intervalo entre trazas correspondiente a 20 metros como el mejor, debido a sus buenos resultados en términos de amplitudes de los eventos de interés de onda convertida, adecuada grabación del ruido numérico y coherente, y buena relación S/R.

8) Los offsets máximos correspondientes a 1300 y 1950 metros presentaron, en general, buenos resultados, con secciones apiladas caracterizadas por altas relaciones S/R. Sin embargo, el offset máximo seleccionado para esta investigación fue igual al de dos veces la profundidad del objetivo de exploración, correspondiente a 1300 metros. Esta selección se debe a que las secciones apiladas de onda convertida presentaban mayores amplitudes al utilizar este offset máximo en comparación con las secciones apiladas, correspondientes a un offset máximo igual a tres veces la profundidad del objetivo de exploración. Esto se debe al comportamiento sinusoidal de la reflectividad de la onda convertida.

9) El análisis AVO indicó que las amplitudes de mayor magnitud, para todos los eventos y modelos, se encontraron entre 500 y 600 metros de offset.

10) Los valores de amplitud máxima obtenidos a partir de la respuesta AVO del evento de onda convertida, para el modelo de dos capas, correspondió con el rango de valores de magnitud máxima obtenido en el gráfico de reflectividad teórico, basado en las ecuaciones de Zoeppritz. Este hecho permitió comprobar la veracidad de los resultados que se obtuvieron para este modelo.

11) La respuesta AVO de los eventos de onda convertida, para el modelo de dos y cinco capas, corresponde a una Arena tipo II según los modelos propuestos por Ostrander, Rutherford y Williams.

12) La selección de un offset máximo menor, que guarde una relación de 1.5 veces la profundidad del objetivo, también sería un valor de offset máximo óptimo y aceptable. Debido a que, a partir de este offset comenzó el cambio de fase en la reflectividad de los eventos de onda convertida y, por interferencia destructiva de la energía, al no tener todas las ondículas con la misma fase se puede deteriorar la calidad del apilado. El uso de este offset máximo de menor magnitud, generaría resultados iguales o mejores en las secciones apiladas, que para el offset máximo de 1300 metros, abaratando costos en la adquisición.

13) Para la utilización del módulo SUREFLPSVSH, es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Las variables momento sísmico y parámetro de rayo máximo (m0 y p2w), deben ser definidas, ya que de otra forma, el código arrojará errores.
- Los geófonos y la fuente, deben ser colocados a partir de la segunda capa del modelo en adelante ya que, de lo contrario, el programa no imprime en pantalla los resultados.
- El modelo debe presentar la misma cantidad de valores de velocidad de onda P, S, densidad y atenuación, como de número de capas.
- El aumento del parámetro máximo de rayo (p2w) es proporcional al aumento del tiempo computacional. Esta variable debe ser menor a la unidad, si no se quiere modelar ruido coherente en los datos sintéticos.
- Para resolver mejor los eventos a offsets lejanos, es de gran ayuda el aumento del parámetro Fpeak, correspondiente a la frecuencia fundamental de la ondícula.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CARRERO, N., "Static Characterization of the Oligo-Miocene sequence (Formations La Pascua, Roblecito and lower Chaguaramas) in the Block 8 of Boyacá area, Orinoco Oil Belt", Informe de exploración, PDVSA, Marzo, 2011

[2] CHELOTTI, L., "Procesamiento sísmico de reflexión", Cátedra de geofísica aplicada, Chubut, Argentina, 2009.

[3] FUCHS, K., MÜLLER, G., "Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method andcomparison with observations", Geophys. J. R. astr. Soc., **23**, 417–433, 1971

[4] GONZALÉZ DE JUANA, C., ITURRALDE, J., PICARD, X., "Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas", Tomo I y II, 1980.

[5] HERRERA, Y., COOPER, N., "Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia", Universidad Nacional de Colombia, Enero, 2010.

[6] LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA, 3ra Edición, Diciembre, 1997, Disponible en internet: http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm. Consulta realizada: septiembre de 2011

[7] MA, Y., LOURES, L., MARGRAVE, G., "Seismic modelling with the reflectivity method", CREWES Research Report, Volumen 16, Universidad de Calgary, 2004.

[8] MALLICK, S., FRAZER, N., “Practical aspects of reflectivity modelling”, Geophysics, Volumen 52, Nro 10: p. 1355-1364, Octubre, 1987.

[9] MILLER, S., “Multicomponent Seismic Data Interpretation”, Tesis de Maestría, Universidad de Calgary, Diciembre, 1996.

[10] MÜLLER, G., “The reflectivity method: a tutorial”, J. Geophysics, Volumen 58: p. 153-174, 1985.

[11] PARADIGM GEOPHYSICAL, “Focus 5.4 Basic Training Guide Epos 3 Third Edition Rock & Fluid Canvas”, Manual del software FOCUS, Marzo, 2007.

[12] SCHLUMBERGER OILFIELD GLOSSARY, Disponible en internet: http://glossary.oilfield.slb.com, Consultado el 2 de septiembre de 2011.

[13] SIMMONS, J., BACKUS, M., “An introduction – Multicomponent. The Leading Edge”, Volumen 22, No. 12: p. 1227-1262. Diciembre, 2003

[14] STEWART, R., GAISER, J., BROWN, J., LAWTON, D., “Converted wave seismic exploration: Methods”. Geophysics, Vol 67, No. 5: p. 1348-1363. Septiembre-Octubre, 2002.

[15] TESSMAN, D., MAXWELL, P., “Full-Wave digital seismic recording and the impact of vector fidelity on improved P-wave data”, The Recorder, Octubre. p. 22-24. 2003

[16] THOMSEN, L., “Converted-wave reflection seismology over inhomogeneous, anisotropic media”. Geophysics 64: p. 678-690, Año: 1999.

[17] YILMAZ, Ö., “Fundamentals of Seismic Processing”, Series: Investigations in geophysics, 2da Edición, 2001.

[18] YILMAZ, Ö., “Velocity Analysis and Statics Corrections”, Series: Investigations in geophysics, 2da Edición, 2001.

[19] ZHANG, Y., “Common Conversion Point Stacking for P-SV converted waves”, Tesis Ph.D Universidad de Tulsa, 1992.

APÉNDICE A
SCRIPT UTILIZADO PARA LA GENERACIÓN DE LOS DISPAROS SINTÉTICOS CON EL MÓDULO SUREFLPSVSH

```
#! /bin/sh

# output files
wfr=./radial        # wfr: Sismograma sintético, generado para la componente radial
wfz=./vertical      # wfz: Sismograma sintético, generado para la componente
                    # vertical



#Parámetros introducidos por el usuario.
# 1) Parámetros Generales
int_type=1          # Cálculo de la lentitud: Regla trapezoidal
wtype=1             # Tipo de Onda, en nuestro caso PSV.
stype=2             # Tipo de fuente a seleccionar: Explosivos.
wfield=3            # Campo de Onda: Aceleración.
wavelet_type=2      # Tipo de ondícula: Ricker.
fref=1.0            # Frecuencia de Referencia [Hertz].
fpeak=30.0          # Pico máximo de la ondÃcula Ricker [Hz]
nlayers=7           # Número de capas presentes en el modelo.
verbose=3           # Imprimir Datos de Salida: Archivo y en pantalla.
decay=50            # Factor de decaimiento, para evitar el aliasing
                    # temporal, el valor recomendado es 50.
red_vel=0.0         # Factor aplicado para reducir la velocidad de onda P.

# 2) Tiempo, Offset, Frecuencia, parámetro de rayo.

tsec=3              # Máximo valor de tiempo para las trazas [seg].
dt=0.001            # Tiempo de Muestreo.
nt=3000             # Número de muestras en tiempo.
bx=0.05             # Offset asignado a la primera traza [Kms].
```

```
fx=2            # Offset asignado a la última traza [Kms].
nx=390          # Número total de trazas (valor máximo eje X).
dx=0.005        # Espaciado entre trazas [Kms].
nw=500          # Número de frecuencias, a procesar.
nf=$nw          # Número de frecuencias, a imprimir en pantalla.
bp=0.0          # Valor del parámetro de rayo más lento para los
                # sismogramas.
p2w=0.8         # Parámetro de rayo máximo.


# 3) Fuente

lsource=3       # Tope de la capa, donde se coloca la fuente.
stype=2         # Tipo de fuente = Explosivo.
h1=1.0          # Parte lineal vertical de la fuente.
m0=1.0          # Momento Sísmico.
m1=1.0          # [1][1] Componente del Tensor de Momento.
m2=0.0          # [1][2]=[2][1] Comp. del Tensor de Momento.
m3=1.0          # [2][2] Componente del Tensor de Momento.

# 4) Geófonos

nor=1           # Número de profundidades, donde los geófonos
                # serán colocados (>1 En caso de VSP).
lobs=2          # Tope de la capa, donde serán colocados los geófonos.

# 5) Modelo de capas: Los valores expuestos, corresponden al modelo de cinco
#capas

cl=2.3,2.3,2.3,2.6,2.9,2.7,3          # Valores de Velocidad de Onda
                                      # P capa por capa [Km/seg].
ct=0.8,0.8,0.8,1.2,1.4,1.6,1.8        # Valores de Velocidad de Onda S
                                      # capa por capa [Km/seg].
```

```
ql=1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000   # Valores de q-compresional para el
                                        # modelo.
qt=1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000   # Valores de q-cizalla para el
                                        # modelo.
rho=2.1,2.1,2.1,2.25,2.15,2.2,2.35      # Valores de densidades para el
                                        # modelo [gr/cc].
t=0.001,0.014,0.64,0.004,0.06,0.18,0.04 # Valores de espesor absoluto de
                                        # cada capa del modelo [Kms]
```

```
sureflpsvsh fs=$fs decay=$decay flt=$flt lsource=$lsource nw=$nw nor=$nor \
tsec=$tsec dt=$dt lobs=$lobs bx=$bx fx=$fx dx=$dx nx=$nx \
pw1=$pw1 pw2=$pw2 pw3=$pw3 pw4=$pw4 p2w=$p2w \
stype=$stype h1=$h1 h2=$h2 m0=$m0 m1=$m1 m2=$m2 m3=$m3 delta=$delta \
        cl=$cl ct=$ct ql=$ql qt=$qt rho=$rho t=$t nlayers=$nlayers \
wtype=$wtype wfield=$wfield red_vel=$red_vel nf=$nf \
wavelet_type=$wavelet_type verbose=$verbose \
nt=$nt fpeak=$fpeak wfr=$wfr$nw$nx$dx$p2w.su wfz=$wfz$nw$nx$dx$p2w.su
```

```
# Imprimiendo en pantalla los sismogramas sintéticos obtenidos para la

#componente radial y vertical

suximage < $wfr$nw$nx$dx$p2w.su title="PSV Comp. Radial 5 capas"  perc=99.8 \
        label1='Tiempo (s)' xbox=600 label2='Nro. de Trazas' titlesize=10 &

suximage < $wfz$nw$nx$dx$p2w.su title="PSV Comp. Vertical 5 capas" perc=99.8 \
        label1='Tiempo (s)' xbox=600 label2='Nro. de Trazas' titlesize=10 &
```

```
#################################################################
#                  CONVERSION FORMATO .SU A FORMATO .SEGY       #
#################################################################

#Se crea el header de los disparos sintéticos

segyhdrs < $wfr$nw$nx$dx$p2w.su bfile=$wfr$nx$dx.bhead
hfile=$wfr$nx$dx.ehead

segyhdrs < $wfz$nw$nx$dx$p2w.su bfile=$wfz$nx$dx.bhead
hfile=$wfz$nx$dx.ehead

# Convertimos el archivo .su en .segy

# Componente Radial

segywrite < $wfr$nw$nx$dx$p2w.su tape=$nx$dx.sgy bfile=$wfr$nx$dx.bhead
hfile=$wfr$nx$dx.ehead endian=0

# Componente vertical

segywrite < $wfz$nw$nx$dx$p2w.su tape=$p2w$nx$dx.sgy
bfile=$wfz$nx$dx.bhead hfile=$wfz$nx$dx.ehead endian=0

exit
```