

# Implementación de un filtro de polarización basado en la descomposición en valores singulares para la atenuación de ruido coherente *ground roll*

IVAN JAVIER SÁNCHEZ GALVIS  
JHEYSTON OMAR SERRANO LUNA



Universidad Industrial de Santander  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Bucaramanga  
2014

**Implementación de un filtro de polarización  
basado en la descomposición en valores singulares  
para la atenuación de ruido coherente *ground roll***

**IVAN JAVIER SÁNCHEZ GALVIS  
JHEYSTON OMAR SERRANO LUNA**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico**

**Director  
Msc. Carlos Andrés Niño Niño**

**Codirector  
PhD. Daniel Alfonso Sierra Bueno**

**Universidad Industrial de Santander  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Bucaramanga  
2014**

*Dedicado a Dios Todopoderoso,  
a mis padres y hermanos*

*Ivan Javier Sánchez Galvis*

*Dedicado a Dios, mi familia  
y amigos.*

*Jheyston Omar Serrano Luna*

# Agradecimientos

A la UIS por desarrollar nuestras competencias como profesionales y brindarnos el espacio para conocer compañeros y profesores que influyeron en nuestra formación. A nuestro director el profesor Msc. Carlos Andrés Niño por su compromiso e ideas oportunas en el desarrollo de este proyecto. Gracias profe. A nuestro codirector el profesor PhD. Daniel Alfonso Sierra por sus valiosos aportes en este trabajo.

A todos los compañeros, amigos y familiares que de alguna u otra forma permitieron que nuestro sueño se hiciera realidad.

Finalmente nuestro más grande agradecimiento a Dios por darnos la oportunidad de vivir y conocer las maravillas creadas por Él.

Muchas Gracias

# Índice general

<b>1. Introducción General</b>	<b>14</b>
1.1. Introducción . . . . .	14
1.2. Antecedentes . . . . .	15
<b>2. Fundamentos de Sismología</b>	<b>17</b>
2.1. Ondas Sísmicas . . . . .	17
2.1.1. Ondas Internas . . . . .	17
2.1.2. Ondas Superficiales . . . . .	19
2.2. Adquisición de señales sísmicas . . . . .	21
2.2.1. Fuentes Sísmicas . . . . .	22
2.2.2. Géofonos . . . . .	23
2.2.3. Sísmica Multicomponente . . . . .	23
<b>3. Procesamiento de datos en sísmica de reflexión</b>	<b>25</b>
3.1. Sismogramas . . . . .	26
3.2. Ruido Sísmico . . . . .	27
3.2.1. Ruido Incoherente . . . . .	27
3.2.2. Ruido Coherente . . . . .	28
<b>4. Ground Roll</b>	<b>30</b>
4.1. Caracterización del <i>Ground Roll</i> . . . . .	31
4.1.1. Velocidad . . . . .	32
4.1.2. Polarización . . . . .	33
<b>5. Descomposición En Valores Singulares</b>	<b>34</b>
5.1. Cálculo de la SVD de una matriz . . . . .	35
5.2. Aplicaciones de la SVD . . . . .	38
<b>6. Métodos para atenuar el <i>ground roll</i></b>	<b>40</b>
6.1. Filtrado F-K . . . . .	40
6.2. Transformada K-L . . . . .	41
6.3. Dominio de patrones para el filtrado del ruido <i>ground roll</i> . . . . .	43
6.4. Transformada S . . . . .	45
6.5. Filtro Basado En La Descomposición En Valores Singulares . . . . .	46
6.5.1. Filtrado de frecuencia . . . . .	46
6.5.2. Identificación . . . . .	47
6.5.3. Filtrado Adaptativo . . . . .	50

6.6. Contraste entre métodos para atenuar <i>ground roll</i> . . . . .	51
<b>7. Resultados</b>	<b>54</b>
7.1. Datos Sintéticos . . . . .	54
7.2. Datos Reales . . . . .	56
<b>8. Conclusiones</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>

# Índice de figuras

2.1.	Representación de la propagación de las ondas sísmicas. Fuente [1]	17
2.2.	Ondas P	18
2.3.	Representación de la propagación de las ondas internas. Fuente [1]	19
2.4.	Onda S	20
2.5.	Ondas Rayleigh. Fuente [2]	20
2.6.	Ondas Love. Fuente [1]	21
2.7.	Adquisición. Fuente [3]	21
2.8.	Métodos Sísmicos	22
2.9.	Geófono. Fuente [3]	23
2.10.	Adquisición multicomponente. Fuente [4]	23
3.1.	Respuesta al impulso del subsuelo. Fuente [5]	25
3.2.	Geometría del sismograma	27
3.3.	Ruido sísmico coherente	29
4.1.	Generación de las ondas Rayleigh. Fuente [6]	30
4.2.	Movimiento elíptico del <i>ground roll</i>	31
4.3.	Superposición. Fuente Autores	33
5.1.	Descomposición en valores singulares de la matriz $\mathbf{A}$ . Fuente: [7]	35
5.2.	Diagramas de flujo para la realización de la SVD. Fuente: Los autores	37
5.3.	Dispersión de datos de las dimensiones $x$ y $y$ . Fuente: Los autores	38
6.1.	Transformación F-K, Fuente: [8]	41
6.2.	Picado y dominio mapeado del <i>ground roll</i> [9].	42
6.3.	Dominio mapeado datos originales, <i>ground roll</i> y la señal filtrada [9]	43
6.4.	Resultados datos originales, <i>ground roll</i> y la señal filtrada [9]	43
6.5.	Línea continua - espectro promedio en amplitud. Línea punteada – interpretación del espectro de la señal. La línea de puntos – interpretación del espectro del ruido. Fuente [10]	44
6.6.	Espectros del <i>ground roll</i> y de las reflexiones	46
6.7.	Ventana de tiempo deslizante para descomposición SVD. Fuente: [11]	47
6.8.	Elipsoide formada por los valores y vectores propios de la matriz de correlación. Fuente [12]	48
6.9.	Parámetro $e$ correspondiente a una traza de un sismograma sintético. Fuente: Los autores	49
6.10.	Determinación del valor $e_g$ . Fuente: Los autores	49

7.1. Contorno correspondiente al parámetro $e$ . Fuente: Los autores . . . .	55
7.2. Parámetros asociados a la traza 150 de la componente vertical antes y después del filtrado. Fuente: Los autores . . . . .	55
7.3. Contorno correspondiente al parámetro $e$ . Fuente: Los autores . . . .	56
7.4. Señal de la traza 425 antes (azul) y después (rojo) del filtrado. Fuente: Los autores . . . . .	57
7.5. Transformada S de la traza 425 original (arriba) y filtrada (abajo). Fuente: Los autores . . . . .	57
7.6. Resultados en la componente vertical, Fuente: Los autores . . . . .	58
7.7. Resultados en la componente radial, Fuente: Los autores . . . . .	59
7.8. Componente vertical. Fuente: Los autores . . . . .	60
7.9. Componente vertical filtrada. Fuente: Los autores . . . . .	61
7.10. Resta entre sin filtrar y filtrado en la componente vertical. Fuente: Los autores . . . . .	62
7.11. Componente radial. Fuente: Los autores . . . . .	63
7.12. Componente radial filtrada. Fuente: Los autores . . . . .	64
7.13. Resta entre sin filtrar y filtrado en la componente radial. Fuente: Los autores . . . . .	65
7.14. Componente transversal. Fuente: Los autores . . . . .	66
7.15. Componente transversal filtrada. Fuente: Los autores . . . . .	67
7.16. Resta entre sin filtrar y filtrado en la componente transversal. Fuente: Los autores . . . . .	68

# Índice de Tablas

6.1. Tabla comparativa entre métodos para atenuar <i>ground roll</i> . . . . .	51
--	----

## RESUMEN

### TÍTULO:

IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO DE POLARIZACIÓN BASADO EN LA DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES PARA LA ATENUACIÓN DE RUIDO COHERENTE *GROUND ROLL*<sup>1</sup>

### AUTORES:

IVAN JAVIER SÁNCHEZ GALVIS  
JHEYSTON OMAR SERRANO LUNA <sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Sísmica multicomponente, *Ground roll*, Descomposición en valores singulares, Filtro de polarización.

### DESCRIPCIÓN:

En este Trabajo se presenta el desarrollo de la implementación de un filtro de polarización basado en la descomposición de valores singulares que permita la atenuación del ruido coherente debido al *ground roll* presente en registros sísmicos multicomponente. A manera de introducción se presenta la descripción del problema así como los objetivos específicos que se deben cumplir para que el objetivo principal de este trabajo tenga feliz término.

Los primeros capítulos sintetizan los fundamentos de sismología necesarios para entender los fenómenos físicos que rodean el problema, así como los conceptos matemáticos en los cuales se basa el filtro de polarización que se desea implementar. Seguidamente se presenta un reporte de técnicas usadas para lograr la atenuación del *ground roll*, dejando ver las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Los capítulos siguientes describen a profundidad las características usadas para identificar el *ground roll* y del funcionamiento del filtro seleccionado para su atenuación. Luego se presentarán los resultados logrados tanto en datos sintéticos (mediante *Seismic Unix*) como en datos reales con la implementación de un algoritmo el cual se desarrollará con un código en MATLAB. El último capítulo estará orientado a las conclusiones determinadas por el análisis de resultados y a las labores que le pueden dar continuidad a este trabajo.

---

<sup>1</sup>Proyecto de Grado

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Msc. Carlos Andrés Niño, Codirector PhD. Daniel Alfonso Sierra

## ABSTRACT

**Title:**

IMPLEMENTATION OF A POLARIZATION FILTER BASED ON SINGULAR VALUE DECOMPOSITION TO ATTENUATION OF COHERENT NOISE GROUND ROLL<sup>3</sup>

**AUTORS:**

IVAN JAVIER SÁNCHEZ GALVIS

JHEYSTON OMAR SERRANO LUNA<sup>4</sup>

**KEY WORDS:** Seismic multicomponent, *Ground roll*, singular value decomposition, polarization filter.

**DESCRIPTION:**

This work present the development and implementation of a polarization filter, based on singular value decomposition for ground roll noise attenuation in multicomponent seismic records. The introduction shows the problem description and the specific objectives to accomplish in order to to succeed in the main goal.

The folowing fourth chapters summarize the seismic fundamentals needed to understand the psychic phenomena behind the problem, and the mathematical concepts in which the designed polarization filter is based on. The following chapter presents a report of common used techniques for the ground roll noise attenuation indicating the advantages and disadvantages for each one.

The chapters 5 Y 6 describes the main properties needed to identify the ground roll noise and the operation of the selected filter, in order to attenuate the identified ground roll noise. The chapter 7 present an analysis of the results achieved from either: synthetic (usign Siesmic Unix) and real data sources using an algorithm that will be developed in MATLAB. The last chapter will show the conclusions based on the result analysis.

---

<sup>3</sup>Degree Project

<sup>4</sup>Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications School. Advisor Msc. Carlos Andrés Niño, Co-advisor PhD. Daniel Alfonso Sierra

# Capítulo 1

## Introducción General

### 1.1. Introducción

Las ondas sísmicas son generadas por explosiones que se propagan por las diferentes capas de la tierra haciendo que las ondas se reflejen, refracten o se disipen en el medio [2]. Cuando las ondas reflejadas llegan a la superficie son capturadas por receptores (geófonos) para luego transmitir los datos para su respectivo procesamiento e interpretación. Gran parte de la energía de estas señales está dada por el ruido implícito en ellas; usualmente los registros sísmicos presentan una relación señal a ruido (SNR, *Signal Noise Ratio*) menor que 1 [5].

Se puede decir que existen dos tipos de ruido en los registros sísmicos: Ruido aleatorio y ruido coherente. El primero se debe a la energía generada por todas aquellas perturbaciones presentes en los datos sísmicos que carecen de coherencia entre trazas adyacentes y que están presentes en todo el ancho de banda, razón por la cual este tipo de ruido es considerado también ruido no coherente [13]. Debido a que el ruido aleatorio tiene un comportamiento gaussiano, es fácilmente removido usando filtros Gabor o técnicas de apilamiento, donde esta última suprime gran parte del ruido no coherente en un factor que depende de la cantidad de trazas apiladas [14]. Por su parte el ruido coherente, como lo describe su nombre, es toda aquella energía indeseable generada por las fuentes y por lo tanto tienen relación con los registros sísmicos. Esta energía puede deberse a varios factores, entre los cuales están: las múltiples reflexiones de las señales, las ondas superficiales como el *ground roll*, las corrientes de aire y las dispersiones de ondas coherentes [14]. Debido a que este tipo de ruido tiene gran relación con la información de interés, su eliminación inadecuada puede afectar el procesamiento de los datos y la interpretación de los mismos, por lo que el estudio de técnicas para la adecuada atenuación del ruido coherente es de vital importancia para el posterior análisis de las estructuras geológicas [2].

El factor principal de ruido coherente es el causado por las ondas superficiales Rayleigh, también conocidas como *ground roll*. Existen varias causas por las cuales el *ground roll* representa un gran problema en el procesamiento de señales sísmicas. En primer lugar, los geófonos capturan aproximadamente el 65% de su energía en ondas Rayleigh (*ground roll*) y solamente el 8% en ondas P [11]. En segundo lugar, porque estas se propagan cerca de la superficie y tiene un frente de onda cuasi-cilíndrica. Por lo tanto, su amplitud disminuye de manera proporcional a la inversa

de la raíz cuadrada de la distancia de la fuente, mientras que el factor de dispersión geométrico del cuerpo de onda es proporcional a la inversa de la distancia y por lo tanto es mayor. En tercer lugar, en un medio verticalmente heterogéneo, es decir, un medio estratificado, el *ground roll* se vuelve dispersivo, por lo que los componentes de frecuencia viajan a diferentes velocidades, lo que resulta en largos y complejos trenes de onda distribuidos en zonas con forma de abanico que cambian a medida que la longitud del recorrido aumenta.

Por último, cuando se propagan las ondas superficiales, estas pueden ser dispersadas de manera significativa por los accidentes topográficos y las heterogeneidades en la superficie cercana. Esta energía retro dispersada expande el área contaminada por ruido sobre los registros opacando la información deseada [11].

En este proyecto se implementa un filtro de polarización que permitirá la atenuación del ruido coherente *ground roll* basado en la descomposición de valores singulares, para conseguir esto se secciono en tres etapas. Caracterizar el comportamiento de las ondas *ground roll* presentes en señales sísmicas multicomponentes, contrastar las distintas técnicas desarrolladas que permiten la atenuación del *ground roll* y finalmente implementar y verificar el desempeño de un filtro de polarización utilizando la descomposición de valores singulares. Para llevar a cabo cada uno de los alcances propuestos, es necesario definir una serie de actividades que permitirán el buen término del proyecto dentro de los límites de tiempo establecidos. Por consiguiente, se han definido cinco etapas dentro de las cuales se desarrollarán los objetivos específicos definidos junto con el progreso de los indicadores de los resultados que se obtendrán en este trabajo de investigación. La primera etapa consiste en analizar la información sobre el comportamiento del *ground roll* así como los diferentes tipos de filtros de polarización que se han desarrollado hasta el momento, en especial los basados en la descomposición de valores singulares. Una segunda etapa permitirá adquirir destrezas en el manejo del software Seismic Unix, el cual permitirá modelar las características elípticas del *ground roll* por medio de datos sintéticos. Una vez concluido lo anterior, se seleccionará el filtro basado en la descomposición de valores singulares que mejor se adapte a las condiciones definidas por el comportamiento del *ground roll*. Luego, se implementará el filtro seleccionado por medio de un algoritmo descrito en un código en MATLAB que permitirá dar solución al problema planteado en esta investigación. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos para registrarlos en las conclusiones.

## 1.2. Antecedentes

A nivel local se han desarrollado algunos trabajos para atenuar el *ground roll* presente en datos sísmicos. Trabajos de investigación como el de Vera [15] proponen una técnica para atenuar la energía de las ondas Rayleigh por medio de dominios transformados. Este trabajo se basó en la descomposición tiempo-frecuencia mediante el uso de la Transformada S, la cual se basa en el principio de la transformada localizada de Fourier (STFT por sus siglas en inglés. *Short-time Fourier Transform*) pero con ventanas escalables con la frecuencia tal como lo hacen las wavelets [16]. Otro trabajo a nivel local es el realizado por Castilla [17], el cual propone trabajar con la Descomposición en valores singulares (SVD, *Singular Value Decomposition*)

para la identificación y atenuación del *ground roll* presente en datos sintéticos y reales.

A nivel internacional han sido varios los trabajos propuestos para la atenuación del *ground roll*. Primeramente se usó el análisis F-K de filtrado de velocidad propuesto por Embree [18], en donde se usan arreglos de geófonos para luego tener un gráfico frecuencia-número de onda, en donde la mayor parte de la energía se concentra en frecuencias por debajo de los 50 Hz, debido que la presencia del *ground roll* se encuentra dentro de esta banda de frecuencias. El principal problema con este tipo de análisis es que requiere de suficientes muestras para no tener problemas relacionados con el traslape. Avances más recientes permiten obtener registros sísmicos multicomponente que brindan nuevas oportunidades para el filtrado del *ground roll*, ya que durante la propagación de las ondas Rayleigh las partículas presentan un movimiento elíptico que se puede aprovechar para detectar y atenuar el *ground roll*, de hecho, muchos de los filtros de polarización se han diseñado basados en la polarización elíptica como los trabajos de Filnn [19] y Bobbit [20] que definieron funciones de ponderación adaptativa de datos a partir de la matriz de covarianza multicomponente. Los trabajos basados en SVD comenzaron con el trabajo de Jackson y otros [21], en donde se tomaron ventanas de tiempo de un registro sísmico multicomponente para hacer la descomposición SVD que permitiera obtener una matriz de rotación de los datos en las direcciones dadas por los valores propios. La selección de esta ventana de tiempo es crucial para el éxito del análisis y se rige por tres consideraciones: la ventana sólo debe contener un arribo; la ventana debe ser tal que la relación de señal a ruido se maximice, y la ventana debe ser lo suficientemente larga como para ser capaz de discriminar el ruido aleatorio de la señal. Más adelante, De Franco y Musacchio [22] diseñan un filtro de polarización que consiste en la suma de las dos primeras autoimágenes de la SVD de la matriz de la señal que dependen de funciones de peso definidas por la intensidad de la polarización. Luego, Jin y Ronen [12] utilizan el filtro diseñado por Jackson, pero introducen un nuevo atributo que depende de los valores singulares y sirve para cuantificar la elipticidad y la energía de los registros para detectar *ground roll*. Finalmente en el trabajo desarrollado por Tiapkina [11] se mejora el atributo presentado por Jin y Ronen permitiendo identificar la presencia de *ground roll* de manera que sea menos sensible al ruido aleatorio y más sensible a las ondas Rayleigh.

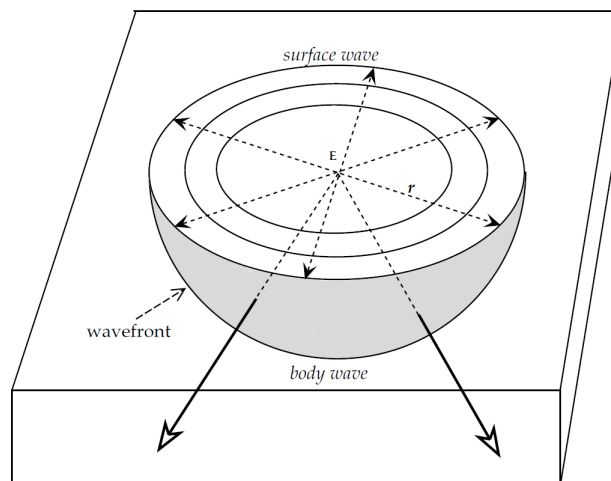
# Capítulo 2

## Fundamentos de Sismología

### 2.1. Ondas Sísmicas

Una perturbación como un terremoto o una explosión en cualquier punto de la Tierra, produce ondas energéticas conocidas como **ondas sísmicas**. Para exploraciones sísmicas, estas ondas se generan artificialmente por medio de fuentes explosivas controladas o camiones vibradores que sacuden la tierra provocando algunas deformaciones y movimientos de partículas que se propagan como ondas elásticas sobre el subsuelo y la superficie terrestre. Tal propagación lleva a que las ondas sísmicas se clasifiquen en ondas internas ( **body waves**) y ondas superficiales ( **surface waves**).

Figura 2.1: Representación de la propagación de las ondas sísmicas. Fuente [1]



#### 2.1.1. Ondas Internas

Las ondas internas corresponden a la energía de las explosiones que se propagan al interior de la tierra. Estas ondas se pueden dividir en dos tipos, **ondas compresio-**

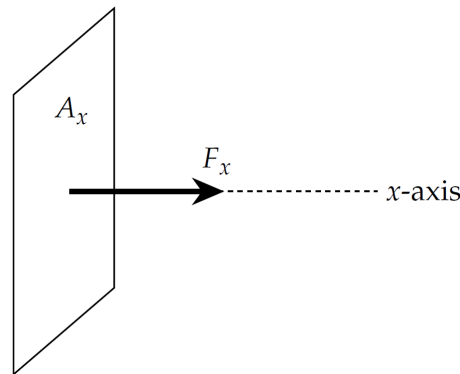
**nales** (mejor conocidas como ondas P) y **ondas transversales** (también conocidas como ondas S). Las primeras, como lo indica su nombre, se debe a la compresión y dilatación del esfuerzo de las partículas en la dirección de la propagación. Las segundas se deben a deformaciones de corte puro en dirección perpendicular a la dirección de propagación de las ondas P. [2]

### Ondas Compresionales

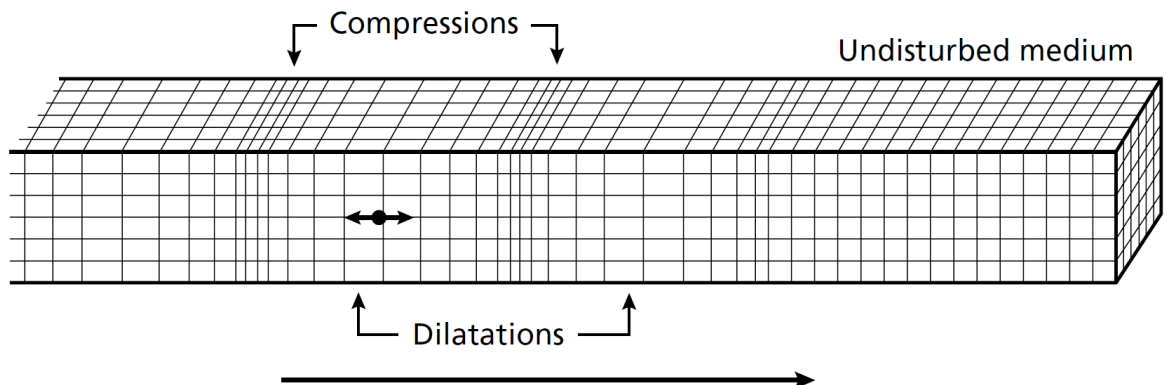
Después de ocurrida la explosión, las ondas compresionales son las primeras en ser registradas por los geófonos, de ahí que también reciban el nombre de *ondas primarias* u *ondas P* [4]. Como se muestra en la Figura 2.2a, las ondas compresionales son el resultado del movimiento longitudinal de las partículas debido a la tensión  $F_x$ , que actúa en dirección de la propagación (el cual se nombrara como eje  $x$ ) sobre el área transversal del medio. La Figura 2.2b deja ver que las ondas primarias tienen un movimiento armónico, dicho movimiento se debe a que el medio presenta compresiones y dilataciones paralelas a la dirección de la propagación de la onda [1].

Figura 2.2: Ondas P

(a) Fuente: [1]



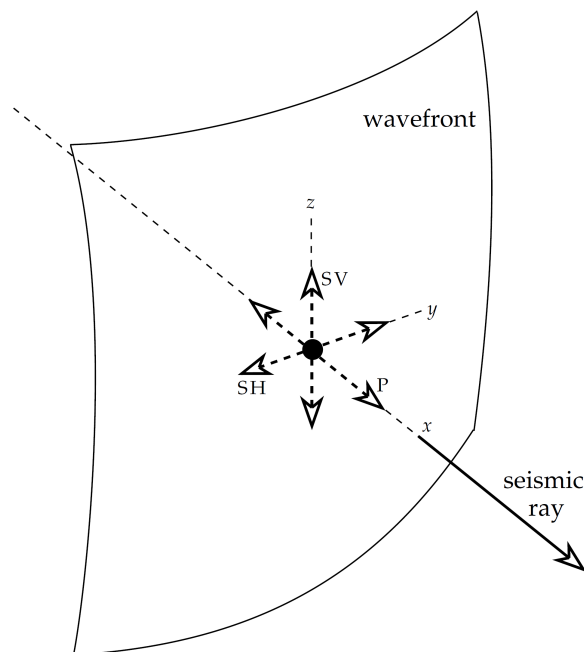
(b) Fuente: [2]



## Ondas Transversales

Las ondas transversales tienen una velocidad menor que las ondas compresionales, según el radio de Poisson; las ondas compresionales son aproximadamente  $\sqrt{3}$  veces más rápidas que las ondas transversales. Debido a que las ondas transversales son las segundas en arribar, son llamadas *ondas secundarias* u *ondas S* [1]. Estas ondas se propagan en dirección paralela al plano formado por el frente de onda, es decir, perpendicular a la dirección de propagación de las ondas P. Tomando como referencia los ejes coordenados de la Figura 2.3, la onda S tiene una componente que se propaga sobre el eje  $z$ , llamada SV (*Secondary Vertical*), y otra componente que se propaga sobre el eje  $y$  llamada SH (*Secondary Horizontal*) [1] [4].

Figura 2.3: Representación de la propagación de las ondas internas. Fuente [1]



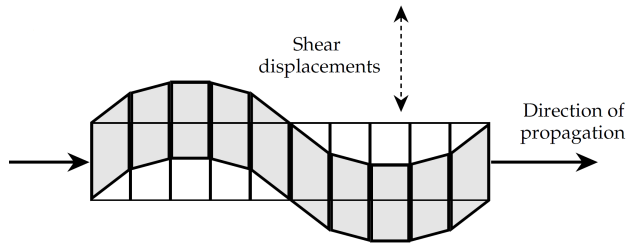
El movimiento de las ondas S es similar al que se observa al agitar una cuerda, en donde los segmentos se mueven hacia arriba y hacia abajo, cambiando repentinamente de tener una forma de rectángulo, a un paralelogramo con ángulos diferentes, ver Figura 2.4a [1]. Tal deformación hace que las ondas S tengan un movimiento oscilatorio como se muestra en la Figura 2.4b

### 2.1.2. Ondas Superficiales

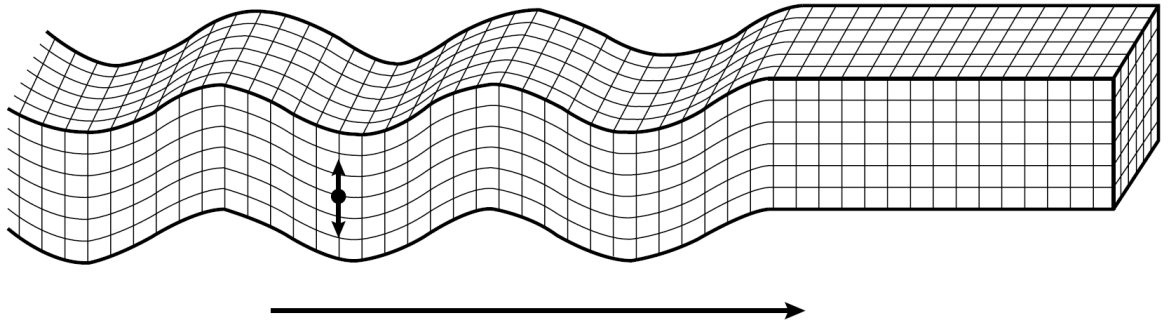
A diferencia de las ondas internas, las cuales se propagan al interior de la tierra, las ondas superficiales corresponden a la parte de la energía que se propaga sobre la corteza terrestre. Existen dos tipos de ondas superficiales, las **ondas Rayleigh** y las **ondas Love**. Las primeras deben su nombre a Lord Rayleigh, quien en 1885 describió la propagación de las ondas superficiales sobre la superficie libre de un medio espacial elástico semi-infinito [1]. Las segundas deben su nombre al matemático A. E. H. Love quien predijo la existencia de estas ondas en 1911 [1].

Figura 2.4: Onda S

(a) Fuente: [1]



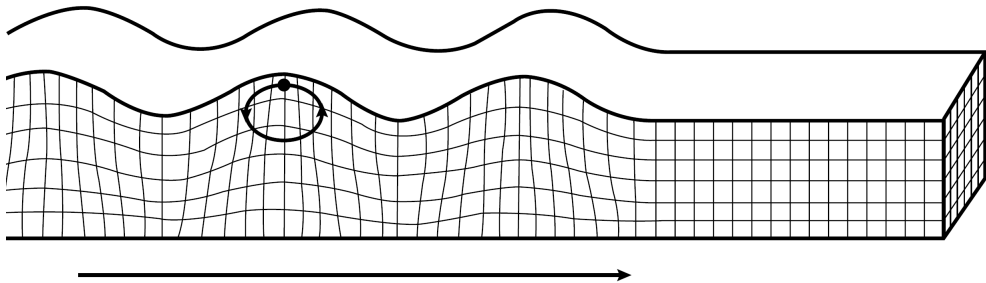
(b) Fuente: [2]



## Ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh son las ondas superficiales que se generan debido a la interacción entre las ondas P y las ondas SV. Tal interacción provoca un movimiento elíptico-retrógrado de las partículas parecido al movimiento de las ondas del mar (Figura 2.5) [23]. Las ondas Rayleigh son las ondas sísmicas que presentan mayor amplitud; por tal razón afecta la adecuada lectura de los registros sísmicos presentándose como un tipo de ruido coherente llamado *ground roll*, el cual se tratará con mayor detalle en el capítulo 4.

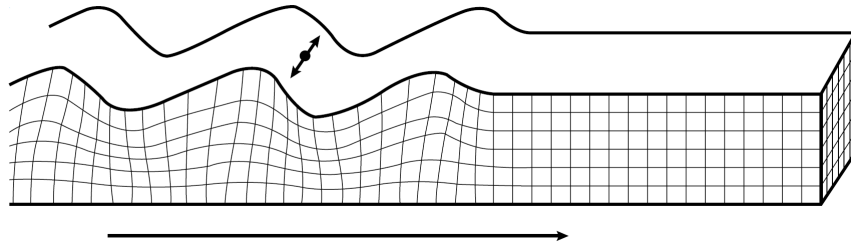
Figura 2.5: Ondas Rayleigh. Fuente [2]



## Ondas Love

Las ondas Love son ondas de corte con polarización lineal donde el movimiento de las partículas es paralelo a la superficie libre y perpendicular a la dirección de propagación de la onda, ver (Figura 2.6) [2]. Las ondas Love son el producto de las reflexiones de las ondas SH que inciden en la superficie con un ángulo super crítico haciendo que la energía se propague a lo largo de la capa superficial [1].

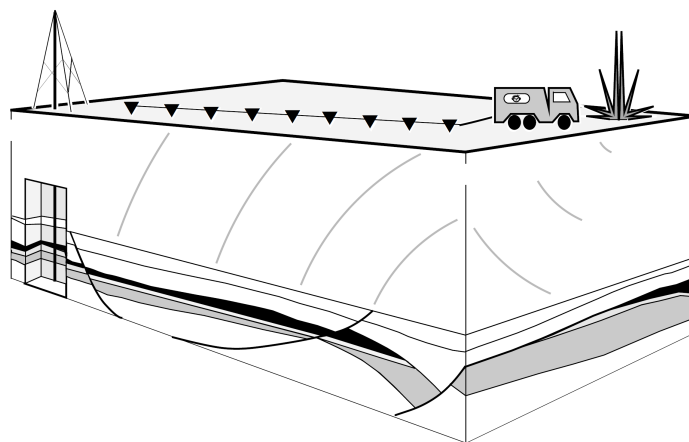
Figura 2.6: Ondas Love. Fuente [1]



## 2.2. Adquisición de señales sísmicas

La adquisición de señales sísmicas consiste en la recolección de datos sísmicos con el objetivo de realizar una imagen sísmica de lo que se encuentra debajo de la superficie. Para realizar dicha adquisición se debe primero realizar una excitación del medio que provoque la liberación de energía que se propague en ondas elásticas que luego sean registradas por medio de sensores llamados **geófonos**, los cuales captan el movimiento de las partículas del subsuelo que se esté explorando, ver Figura 2.7.

Figura 2.7: Adquisición. Fuente [3]

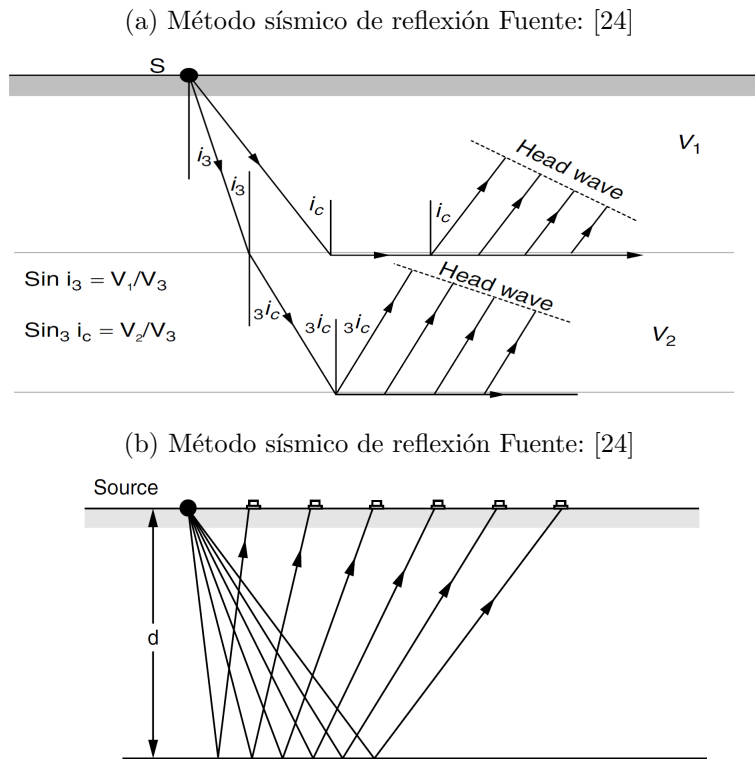


Existen dos métodos de adquisición sísmicas. Estos métodos son conocidos como el **método sísmico de refracción** y el **método sísmico de reflexión**

El método sísmico de refracción usa la energía sísmica que retorna a la superficie luego de viajar a través de la tierra siguiendo una trayectoria de rayo refractado, ver Figura 2.8a . Este método se basa en la observación de los tiempos de propagación de las ondas refractadas desde la fuente hasta los receptores. La información del tiempo de propagación permite calcular la profundidad de las diferentes interfaces de refracción.

De igual forma, el método sísmico de reflexión se basa en la medición de tiempos, pero esta vez es el tiempo que demora la energía sísmica que se refleja y retorna a la superficie, ver Figura 2.8b. Este método es el más común en las exploraciones sísmicas y los datos con los cuales se trabajan en este proyectos son adquiridos en este método.

Figura 2.8: Métodos Sísmicos



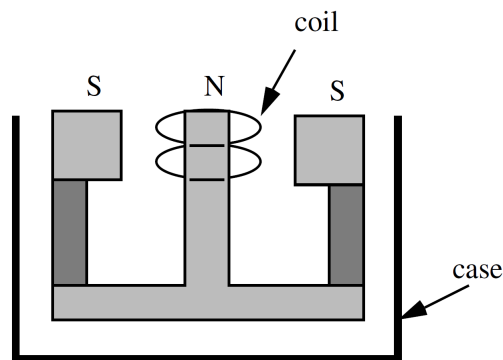
### 2.2.1. Fuentes Sísmicas

Para las exploraciones sísmicas existen dos tipos de fuentes comunmente usadas. La **dinamita** y la **vibroseis**. La dinamita es una fuente explosiva que simula entrada impulsional al subsuelo, por lo tanto se podrá determinar un modelo del mismo [3]. Por su parte, la **vibroseis** es un sistema en donde un vehículo vibrador genera ondas sísmicas mediante oscilaciones forzadas en donde la base del vibrador golpea la superficie. La fuerza aplicada por los vibradores es comúnmente suministrada por un sistema hidráulico, aunque también existen vibradores con suministros de sistemas electrodinámicos y sistemas por levitación magnética [3].

### 2.2.2. Géofonos

Independientemente de la fuente que se use para la generación de ondas sísmicas, es indispensable captar los movimientos que presenta el medio para poder caracterizarlo. Esto hace que sea necesario convertir el movimiento de la tierra en una magnitud física fácil de manipular y analizar. Por tal motivo se han diseñado transductores que tomen la información del movimiento de las partículas y la conviertan en señales de tensión eléctrica. Como ya se mencionó, estos transductores son llamados geófonos y funcionan según el principio de un micrófono, es decir, el geófono dispone de una bobina que se deforma con los cambios de presión en una sola dirección mecánica generando diferentes niveles de tensión, ver Figura 2.9.

Figura 2.9: Geófono. Fuente [3]

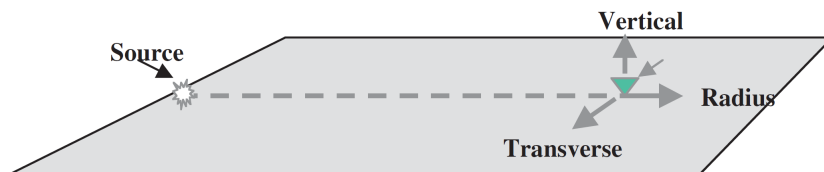


Para la sísmica multicomponente es necesario captar los cambios de presiones en más de una dirección. Por tal motivo el uso de geófonos digitales (acelerómetros con tecnología MEMS) se dispone para la adquisición de vibraciones en diferentes direcciones.

### 2.2.3. Sísmica Multicomponente

La sísmica convencional usa geófonos para captar los cambios de presión sólo en la componente vertical, sin embargo cada vez es más común el uso de la sísmica multicomponente, en donde se disponen geófonos que registren los cambios de presión en tres direcciones que son:

Figura 2.10: Adquisición multicomponente. Fuente [4]



- **Vertical:** La información captada en la componente vertical es la misma que se puede obtener en la sísmica convencional. Gran parte de la energía registrada en esta dirección corresponde a ondas P.
- **Radial:** Es una componente horizontal que registra la información de las ondas en la dirección en que está el arreglo de geófonos, ver Figura 2.10. Como se verá en el siguiente capítulo, esta componente obtiene gran parte de la energía correspondiente al *ground roll*.
- **Tangencial:** Es otra componente horizontal la cual registra la información en dirección perpendicular a la radial. Esta componente se caracteriza por registrar gran parte de las ondas Love.

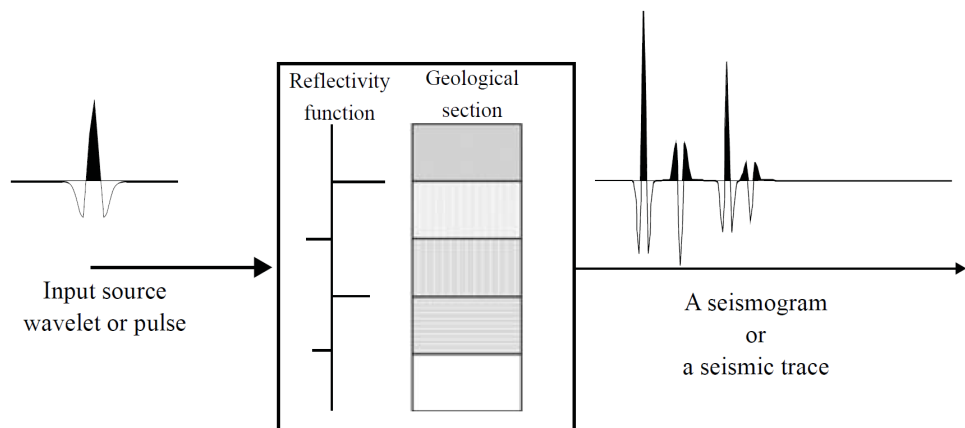
La principal ventaja de la adquisición sísmica multicomponente con respecto a la sísmica convencional, es que al registrar el movimiento horizontal permite estudiar el comportamiento de las ondas S, además permite estudiar las características particulares de las ondas P, por lo tanto se puede caracterizar de manera más exacta el modelo del subsuelo.

## Capítulo 3

# Procesamiento de datos en sísmica de reflexión

La sísmica de reflexión es el método sísmico más comúnmente usado. Parte de su éxito radica en el hecho de que los datos sísmicos se procesan en bruto, produciendo secciones sísmicas que conforman una imagen de la estructura del subsuelo. El análisis de los datos sísmicos de reflexión se basa en la teoría de identificación de sistemas en donde se toma al subsuelo como el sistema que se desea analizar y la fuente como la señal de excitación de entrada [5]. En ese sentido, la información captada por los geófonos vendría a ser la respuesta al impulso del sistema, ver Figura 3.1.

Figura 3.1: Respuesta al impulso del subsuelo. Fuente [5]



Las señales registradas por los geófonos en una dirección determinada se denominan **trazas**. Las trazas son señales dependientes del tiempo donde la amplitud representa el movimiento de las partículas en la dirección en que el geófono está registrando el movimiento. Para las adquisiciones sísmicas lo que se usa es un arreglo de geófonos que cubren el área en estudio. Una vez se tienen las trazas captadas por cada uno de estos geófonos, se agrupan para conformar un **sismograma**, el cual es analizado por geólogos y geofísicos para determinar las características de lo que se encuentra debajo de la superficie (*gather*).

### 3.1. Sismogramas

Un sismograma se puede ver como una matriz donde los vectores columna son las trazas adquiridas en la exploración, de tal modo que el eje horizontal está en unidades de distancia (medidas desde la fuente hacia los geófonos) y el eje vertical en unidades de tiempo (Aumentando hacia abajo). Hoy en día existen software capaces de simular las adquisiciones sísmicas obteniéndose así sismogramas sintéticos donde se pueden controlar las diferentes variables que se puedan presentar en el medio. La Figura 3.2b es un ejemplo de un sismograma sintético.

Los sismogramas contienen información no sólo de las reflexiones de las ondas sísmicas, también se registran otros fenómenos físicos que ocurren durante la adquisición de los datos. Estos otros fenómenos se deben a que la energía sísmica dada por la fuente puede llegar a los receptores por diferentes caminos. La Figura 3.2a deja ver tres caminos diferentes por donde las ondas sísmicas pueden llegar a la zona de recepción.

Analizando los datos en el sismograma de la Figura 3.2b, se observan tres tipos de ondas registradas, estas ondas son:

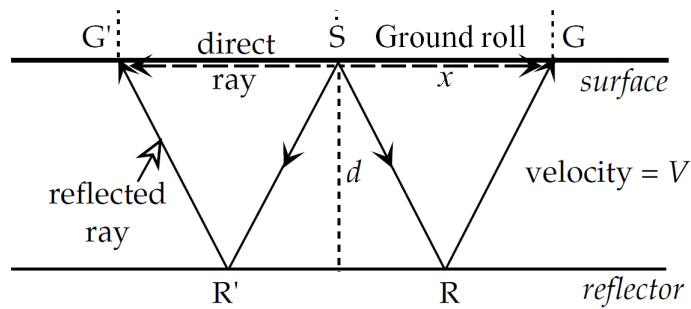
1. **Onda Directa:** Es una onda P que viaja en línea recta justo sobre la superficie de la tierra. Esta onda posee una velocidad constante pues viaja por un solo medio.
2. **Ondas Superficiales:** Las ondas de superficie que mas energía concentran los datos en dirección vertical son las ondas Rayleigh. Estas ondas tienen una velocidad menor que las ondas directas.
3. **Ondas Reflejadas:** En su mayoría corresponden a las ondas P que viajan internamente al subsuelo y se reflejan cuando inciden en interfaces entre dos medios con diferentes propiedades. A diferencia de las ondas directas, el tiempo de viaje de las ondas reflejadas no tiene un comportamiento lineal con respecto a la distancia entre sensores. Si se analiza la trayectoria de las ondas reflejadas (Figura 3.2a), se puede ver que forman un triángulo donde la base es la distancia entre la fuente y el sensor. Un alargamiento de la base provoca un cambio no lineal en el perímetro del triángulo. Se tiene entonces que el tiempo de viaje de la onda es:

$$t_{ref} = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{V^2}} \quad (3.1)$$

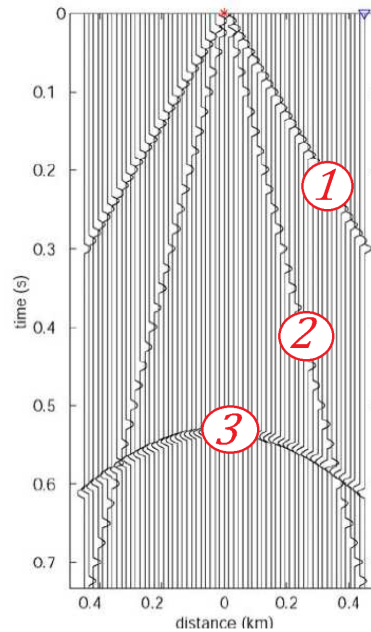
Cuando  $x = 0$ , el  $t_{ref}$  no es cero, a diferencia de los que pasa con la onda directa y los ruidos superficiales. Medir en  $x = 0$  no es recomendable debido que la energía en ese punto es muy grande y los geófonos se romperían. Por lo tanto se deben realizar observaciones a un rango de valores  $x$  que puedan ser extrapoladas para encontrar  $t_0$ .

Figura 3.2: Geometría del sismograma

(a) Caminos posibles de llegada a los geófonos. Fuente [1]



(b) Sismograma correspondiente a la adquisición. Fuente [25]



## 3.2. Ruido Sísmico

Los sismogramas reales están altamente contaminados por información que no es de interés para las exploraciones sísmicas. Esta información indeseada es conocida como **ruido sísmico**. En el procesamiento de datos sísmicos es importante atenuar esta información para que se pueda resaltar las reflexiones que es lo realmente importante en los registros sísmicos. El ruido sísmico puede ser clasificado en **ruido incoherente** o aleatorio y **ruido coherente** [5].

### 3.2.1. Ruido Incoherente

El ruido incoherente es causado por la falta de homogeneidad del medio, en el cual están presentes rocas, raíces y otros elementos que hacen que las ondas se dispersen a nivel local. Debido a su carácter local, el ruido es diferente entre trazas,

a menos que los registros sísmicos adyacentes estén muy cerca. Para la atenuación del ruido aleatorio se han presentado diferentes técnicas, entre las mas usadas están:

- Deconvolución con estimación wavelet [26]
- Análisis mediante estructura wavelet [27]
- Filtrado mediante representación Gabor [28]
- Técnica de apilamiento [14] [2]

### 3.2.2. Ruido Coherente

Este tipo de ruido recibe su nombre debido a la alta correlación que presenta con los datos sísmicos, haciendo que la atenuación de este tipo de ruido sea una tarea compleja.

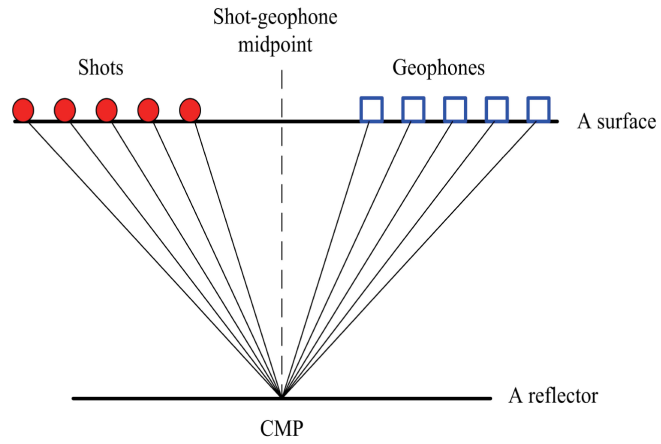
Existen dos causas principales para que exista ruido coherente en los simogramas, el ya mencionado ***ground roll*** y las **múltiples reflexiones** .

El *ground roll* es la parte de la información en el sismograma correspondiente a las ondas Rayleigh, que por ser ondas superficiales poseen gran amplitud en los registros sísmicos. Como se ve en la Figura 3.3b, (donde se encuentra la letra **A**) el *ground roll* genera un cono el cual tapa las reflexiones opacando la información deseada.

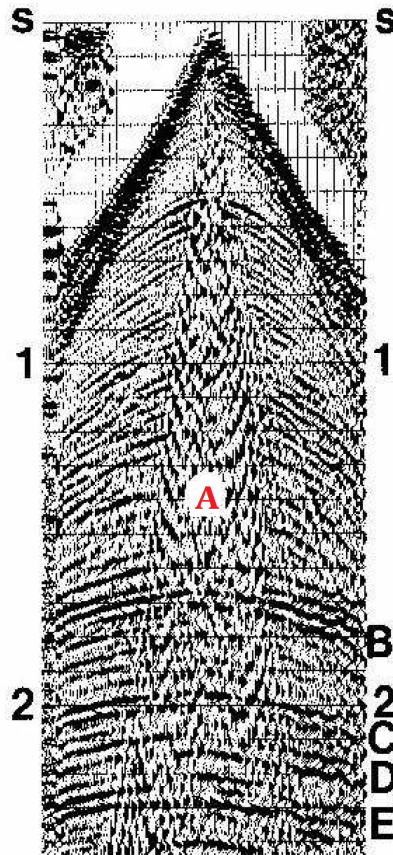
Por su parte, las múltiples reflexiones son causas muy comunes de ruido coherente cuando el medio es estratificado. Debido a que el coeficiente de reflexión del espacio libre es aproximadamente -1, todas las primeras reflexiones que llegan a la superficie son reflejadas nuevamente hacia el subsuelo, provocando nuevas reflexiones que son registradas por los geófonos [1]. Por esta razón es común hacer adquisiciones sísmicas por el método de punto medio común CMP (*Common Mid-Point*) [2] en el cual varias fuentes generan las ondas sísmicas y son adquiridas por un arreglo de geófonos, ver Figura 3.3a.

Figura 3.3: Ruido sísmico coherente

(a) Adquisición por punto medio común CMP. Fuente: [5]



(b) Sismograma real con *ground roll*. Fuente [25]



# Capítulo 4

## Ground Roll

Como se mostró en el capítulo anterior, el *ground roll* es un ruido implícito en los sismogramas, donde atenuarlo es una tarea principal en el procesamiento de datos sísmicos, además de ser el objetivo principal de este proyecto. Debido a la coherencia que el *ground roll* presenta con los datos, es necesario hacer una caracterización de las ondas Rayleigh (que son las causantes de que se presente este tipo de ruido) para diferenciar la información correspondiente a las reflexiones y al *ground roll*.

En el capítulo 2 se definió que las ondas Rayleigh son ondas superficiales correspondientes a la interacción entre las ondas P y las ondas SV. Pues bien, dado que la velocidad  $\beta$  de la onda SV es menor que la velocidad  $\alpha$  de la onda P, existe un ángulo crítico de incidencia de la onda SV entrante que produce una onda P refractada que se propaga horizontalmente a lo largo de la interfaz entre la tierra y la superficie libre, ver Figura 4.1. La refracción de la onda P no sería posible a menos que exista una onda SV incidente, pues la sola onda P refractada no satisface la condición de borde libre de estrés y no podría propagarse a lo largo de la interfaz sin un acoplamiento con la onda SV incidente. Tal acoplamiento produce un movimiento de las partículas en el plano vertical (Figura 4.2a) con polarización elíptica el cual es retrógrado a poca profundidad pero cambia a un movimiento prógrado a altas profundidades, ver Figura 4.2b.

Figura 4.1: Generación de las ondas Rayleigh. Fuente [6]

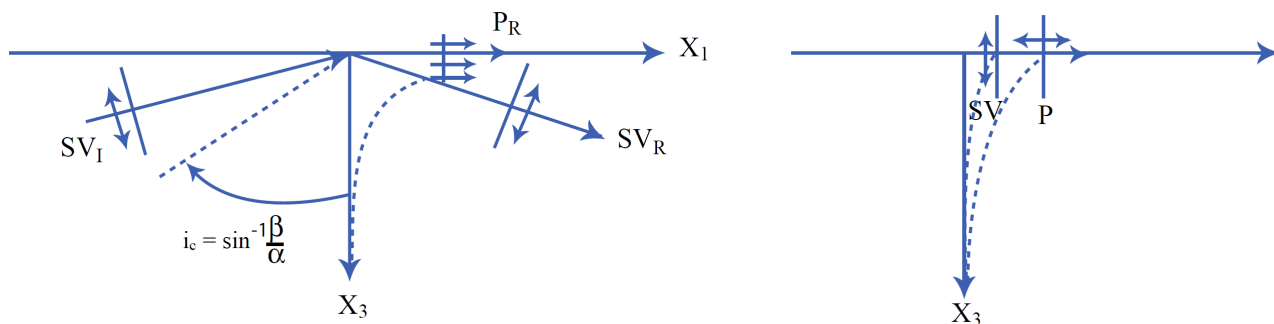
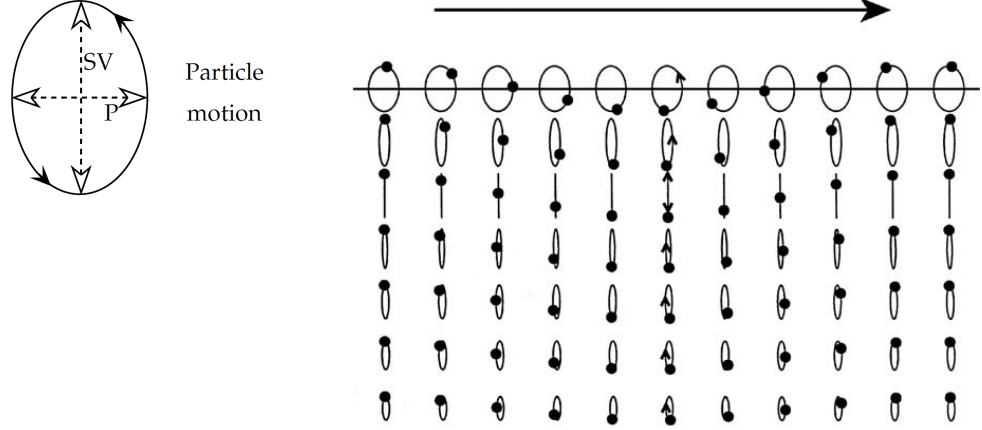


Figura 4.2: Movimiento elíptico del *ground roll*

- (a) Movimiento de las partículas. Fuente [1]      (b) Movimiento retrogrado y progrado de las ondas Rayleigh: [23]



## 4.1. Caracterización del *Ground Roll*

La ecuación de onda sísmica se desarrolla mediante la teoría de estrés y esfuerzo. A continuación se mostrará una descripción matemática que permita caracterizar el comportamiento de las ondas Rayleigh. La ecuación de onda sísmica para la propagación de ondas elásticas en un medio homogéneo e isotrópico presentada en [23] está dada por:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu\nabla^2\mathbf{u} = \rho\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t} \quad (4.1)$$

Donde  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$  es el vector desplazamiento con el sistema de referencia de la Figura 2.3,  $\rho$  es la densidad del medio,  $\mu$  es una constante de Lamé (definida por el matemático francés G. Lamé) conocida como el modulo de cizalla o rigidez,  $\lambda$  es otra constante de Lamé que no tiene significado físico por sí misma pero ayuda a definir las propiedades elásticas del medio cuando se combina con  $\mu$ .

El vector desplazamiento se puede expresar en términos de los campos  $\Phi$  (campo para las ondas P) y  $\Psi = (\Psi_x, \Psi_y, \Psi_z)$  (campo para las ondas S) como sigue:

$$\mathbf{u} = \nabla\Phi + \nabla \times \Psi \quad (4.2)$$

Combinando las ecuaciones (4.1) y (4.2) se obtiene la siguiente expresión para los campos:

$$\nabla^2\Phi = \frac{1}{\alpha^2}\frac{\partial\Phi}{\partial t}, \quad \nabla^2\Psi = \frac{1}{\beta^2}\frac{\partial\Psi}{\partial t} \quad (4.3)$$

Donde

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4.4)$$

La constante  $\alpha$  corresponde a la velocidad de propagación las ondas P y  $\beta$  a la velocidad de propagación de las ondas S.

Acorde a la ecuación (4.2) las componentes del vector desplazamiento se pueden expresar en términos de los campos de la siguiente forma:

$$u_x = \frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{\partial\Psi_z}{\partial y} - \frac{\partial\Psi_y}{\partial z}, \quad u_y = \frac{\partial\Psi_x}{\partial z} - \frac{\partial\Psi_z}{\partial x}, \quad u_z = \frac{\partial\Psi_y}{\partial x} - \frac{\partial\Psi_z}{\partial y} \quad (4.5)$$

En el capítulo 2 se mostró que las ondas transversales están compuestas por una componente vertical y una horizontal y que van en dirección perpendicular a la propagación de la onda P, de tal forma que  $\Psi_x = 0$  y el campo de las ondas S se puede expresar como una suma así:

$$\Psi = \Psi_{SV} + \Psi_{SH} \quad (4.6)$$

Donde:

$$\Psi_{SV} = (0, \Psi_y, 0), \quad \Psi_{SH} = (0, 0, \Psi_z) \quad (4.7)$$

Por lo tanto el vector desplazamiento también puede expresarse como la suma de dos términos:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{P-SV} + \mathbf{u}_{SH} \quad (4.8)$$

Como lo que se desea conocer son las características del *ground roll*, sólo se tendrá en cuenta el desplazamiento compuesto por las ondas P y SV, para lo cual se toma que  $\Psi_z = 0$ . Obteniéndose así:

$$u_x = \frac{\partial\Phi}{\partial x} - \frac{\partial\Psi_y}{\partial z}, \quad u_y = 0, \quad u_z = -\frac{\partial\Psi_y}{\partial x} \quad (4.9)$$

Ahora se debe tener en cuenta las condiciones de frontera en la superficie, las cuales son:

- La superficie del medio es libre, por lo tanto las componentes de estrés son nulas.
- La amplitud la onda debe ser cero a altas profundidades debido a que son evanescentes.

#### 4.1.1. Velocidad

Aplicando las condiciones de frontera como en [29], se obtiene la siguiente expresión para las velocidades:

$$\left(2 - \left(\frac{c}{\beta}\right)^2\right)^2 = 4\sqrt{1 - \left(\frac{c}{\alpha}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{c}{\beta}\right)^2} \quad (4.10)$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh. Dado que por el radio de Poisson  $\alpha = \sqrt{3}\beta$ , la ecuación (4.10) se puede expresar como:

$$\frac{c^6}{\beta^6} - 8\frac{c^4}{\beta^4} + \frac{56}{3}\frac{c^2}{\beta^2} - \frac{32}{3} = 0 \quad (4.11)$$

Esta ecuación presenta tres soluciones reales, las cuales son:  $(\frac{c}{\beta})^2 = 4, 2 + \frac{2}{\sqrt{3}}, 2 - \frac{2}{\sqrt{3}}$ . La solución debe cumplir la condición de que la amplitud decrezca al aumentar con la profundidad, esto se asegura haciendo  $c < \beta$ . Con esta condición sólo la tercera de las soluciones es la que cumple con los requerimientos. Así que la velocidad las ondas Rayleigh viene dada por:

$$c = 0,919\beta \quad (4.12)$$

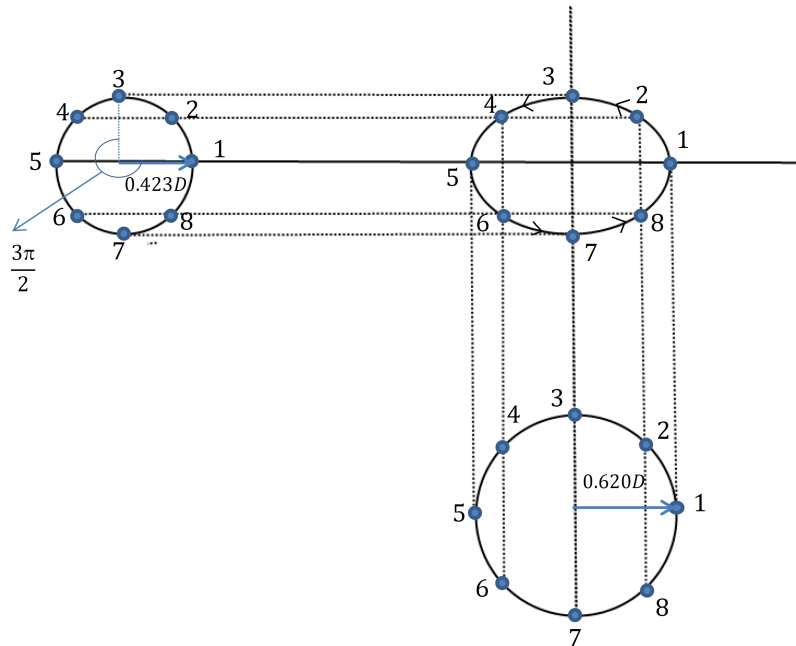
### 4.1.2. Polarización

Las soluciones para las componentes  $u_x$  y  $u_z$  del desplazamiento como se presentan en [29] son:

$$u_x = 0,423D \sin(\omega t - kx), \quad u_z = 0,620D \cos(\omega t - kx) \quad (4.13)$$

Donde  $D$  es una constante para la amplitud de las señales,  $\omega$  es la frecuencia de las ondas Rayleigh y  $k = \frac{\omega}{c}$  es el número de onda. Haciendo el análisis de superposición presentado en [30], se tiene que las ondas Rayleigh presentan una polarización elíptica debido a que las magnitudes de  $u_x$  y  $u_y$  son diferentes y además se encuentran desfasados  $\frac{3\pi}{2}$  el uno con respecto del otro, ver Figura 4.3.

Figura 4.3: Superposición. Fuente Autores



## Capítulo 5

# Descomposición En Valores Singulares

Cuando se realizan operaciones con matrices surge la necesidad de hacer operaciones de factorización que permitan descomponer las matrices en productos de dos o más matrices. En ese sentido se ha destacado la diagonalización de matrices simétricas positivas definidas, si  $\mathbf{A}$  es una matriz simétrica positiva definida, se puede descomponer en el producto de tres matrices así:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}^T \quad (5.1)$$

Donde  $\mathbf{Q}$  es una matriz ortogonal donde sus columnas son los vectores propios de  $\mathbf{A}$  y  $\mathbf{\Lambda}$  es una matriz diagonal compuesta por los valores propios de  $\mathbf{A}$  [31].

El problema surge cuando se desea hacer una descomposición a una matriz que no sea simétrica positiva definida. Es en esta situación cuando se usa una descomposición más general llamada **Descomposición de valores singulares**. La importancia de esta descomposición es que permite una factorización general de cualquier matriz real o compleja basada en bases ortonormales que permitan obtener el espacio de las filas y columnas de dicha matriz.

Formalmente, la descomposición SVD de una matriz  $\mathbf{A}$  de  $m \times n$  real o compleja es:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (5.2)$$

Donde  $\mathbf{U}$  es una matriz unitaria real o compleja de  $m \times m$ ,  $\mathbf{\Sigma}$  es una matriz diagonal rectangular de  $m \times n$  con números reales no negativos sobre la diagonal y  $\mathbf{V}^T$  (la traspuesta conjugada de  $\mathbf{V}$ ) es una matriz unitaria real o compleja de  $n \times n$ .

El corazón de la descomposición de valores singulares es encontrar una base ortonormal  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots$

$\mathbf{v}_r, \dots, \mathbf{v}_n$  para el espacio de las filas de  $\mathbf{A}$ ; una base ortonormal  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_r, \dots, \mathbf{u}_m$  para el espacio de las columnas de  $\mathbf{A}$  y un conjunto de valores  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$  asociados a las bases descritas de tal forma que la ecuación(5.2) se puede ver como en la Figura 5.1 [32]. En esta figura se presentan algunas de las características de la SVD que son:

- el rango( $\mathbf{A}$ )=rango( $\mathbf{\Sigma}$ )= $r$ .
- El espacio columna de  $\mathbf{A}$  abarca las primeras  $r$  columnas de  $\mathbf{U}$ .

- El espacio fila de  $\mathbf{A}$  abarca las primeras  $r$  filas de  $\mathbf{V}^T$ .

Figura 5.1: Descomposición en valores singulares de la matriz  $\mathbf{A}$ . Fuente: [7]

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{A} \\
 m \times n
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \mathbf{U} \\
 m \times m
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \mathbf{\Sigma} \\
 m \times n
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \mathbf{V}^T \\
 n \times n
 \end{array}$$
  

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{A} \\
 m \times n
 \end{array}
 =
 \left( \begin{array}{c|c|c|c}
 \mathbf{u}_1 & & & \\
 & \dots & & \\
 & & \mathbf{u}_r & \\
 & & & \mathbf{u}_{r+1} \\
 & & & & \dots & \\
 & & & & & \mathbf{u}_m
 \end{array} \right)
 \left( \begin{array}{c}
 \sigma_1 \\
 \vdots \\
 \sigma_r \\
 \mathbf{0} \\
 \vdots \\
 \mathbf{0}
 \end{array} \right)
 \left( \begin{array}{c}
 \text{row}(A) \\
 \vdots \\
 \mathbf{v}_1^T \\
 \vdots \\
 \mathbf{v}_r^T \\
 \mathbf{v}_{r+1}^T \\
 \vdots \\
 \mathbf{v}_n^T \\
 \text{null}(A)
 \end{array} \right)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{col}(A)} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{col}(A^T)}$

Al desarrollar la descomposición SVD de la matriz  $\mathbf{A}$  con respecto a los elementos de las matrices  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{\Sigma}$  y  $\mathbf{V}$ , se pueden obtener las autoimágenes de  $\mathbf{A}$ , las cuales son sus componentes principales.

$$\mathbf{A} = \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T + \sigma_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{v}_2^T + \dots + \sigma_r \mathbf{u}_r \mathbf{v}_r^T = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_r \quad (5.3)$$

Donde  $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_r$  son las autoimágenes de la matriz  $\mathbf{A}$  de rango  $r$ .

## 5.1. Cálculo de la SVD de una matriz

Supongase que se tiene una matriz  $A$  a la cual se le desea hacer la descomposición en valores singulares. Para realizar la SVD de  $A$  es necesario calcular su traspuesta y multiplicarla por la matriz original así:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{V} \mathbf{\Sigma} \mathbf{U}^T \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T = \mathbf{V} \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_r^2 & \\ & & & 0 \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & & 0 \end{pmatrix} \mathbf{V}^T \quad (5.4)$$

Donde  $\sigma_1^2, \dots, \sigma_r^2$  son los valores propios de  $A^T A$  y  $\mathbf{V} = [v_1 \ \dots \ v_n]$  los vectores propios. Dado que  $\mathbf{U}$  es una matriz real y unitaria, el resultado de  $\mathbf{U}^T \mathbf{U}$  es una matriz identidad.

Ahora sólo falta obtener la matriz  $\mathbf{U}$  para finalizar la descomposición SVD. Para esto se puede realizar el mismo paso anterior pero ahora se multiplica  $\mathbf{A}$  a su traspuesta así:

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T\mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^T = \mathbf{U} \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \sigma_r^2 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 0 \end{pmatrix} \mathbf{U}^T \quad (5.5)$$

Donde las columnas de  $\mathbf{U}$  serán los vectores propios de  $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ . Otra forma de obtener las columnas de  $\mathbf{U}$  es multiplicando la matriz  $\mathbf{A}$  por cada una de las columnas de  $\mathbf{V}$  de tal forma que se cumple:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i = \sigma_i \mathbf{u}_i \quad (5.6)$$

### Ejemplo

Calcular la descomposición en valores singulares de:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Primero se calcula  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 5 & 3 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

De los valores propios de  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  se obtiene  $\sigma_1 = \sqrt{2}$ ,  $\sigma_2 = 2\sqrt{2}$  asociados a los vectores propios:

$$\mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sqrt{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

Ahora se hace:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_1 = \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1 = \sigma_1 \mathbf{u}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_2 = \sigma_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{v}_2^T \mathbf{v}_2 = \sigma_2 \mathbf{u}_2 = \begin{pmatrix} 2\sqrt{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Finalmente se obtiene que:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 2\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

### Métodos Numéricos

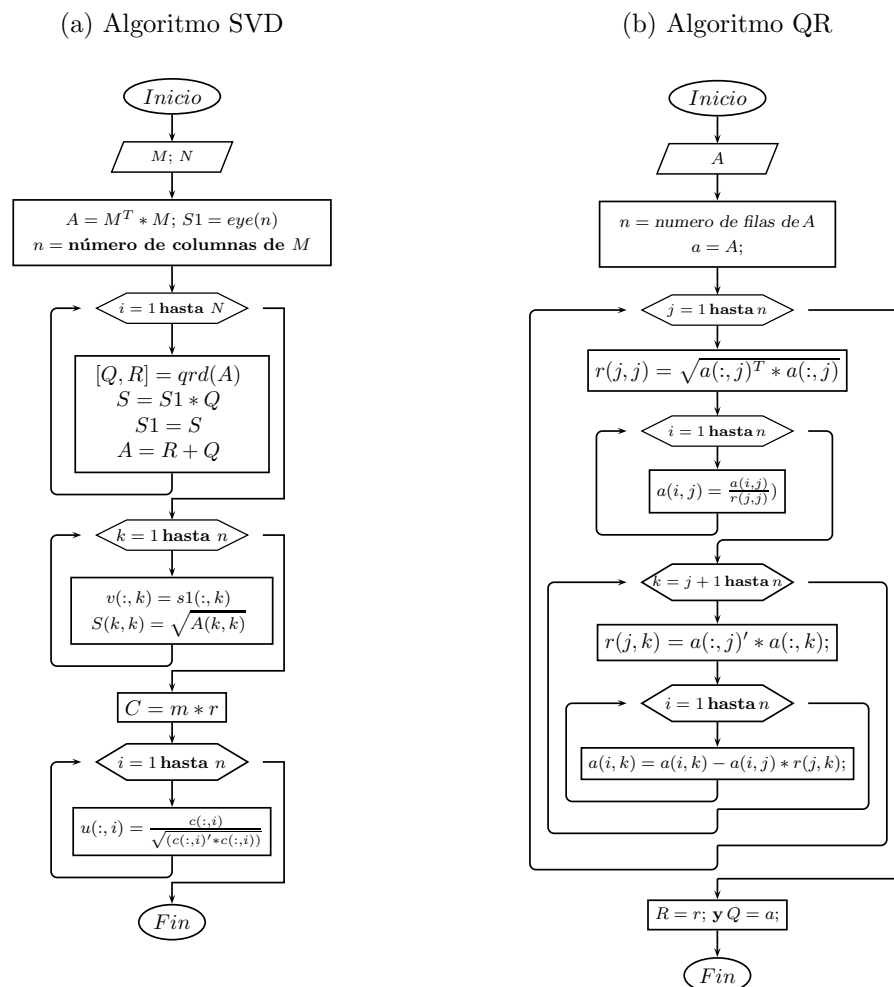
Cómo se acaba de ver, la dificultad en el cálculo de la descomposición en valores singulares de una matriz se reduce a la obtención de los vectores y valores propios de la misma. Hasta el momento en este documento se ha realizado esta tarea de forma

analítica, teniendo en cuenta que las dimensiones de la matriz examinada tan solo era de dos dimensiones. Cuando se desee realizar la descomposición SVD en matrices de un mayor tamaño, la forma analítica se vuelve tediosa y surge la necesidad de tener un método numérico que permita realizar los cálculos programando computadoras que obtengan los resultados en poco tiempo.

En MATLAB existe una función llamada `svd` que permite el cálculo de la descomposición en valores singulares de cualquier matriz. Viendo la necesidad de implementar un método numérico para el cálculo de la SVD en cualquier lenguaje de programación (Fortran y C son muy usados en la comunidad de Geofísica), a continuación se propone un diagrama de flujo que permite obtener la SVD de una matriz, basado en el algoritmo QR para el cálculo de valores y vectores propios.

La Figura 5.2a presenta el algoritmo para hallar la descomposición en valores singulares, donde el dato de entrada es la matriz  $M$  y los datos de salida son las matrices  $U$ ,  $S$  y  $V$ . En la Figura 5.2b se presenta el algoritmo QR perteneciente a la función `qrd` usada en el algoritmo para SVD. En esta función el dato de entrada es la matriz  $A$  y los datos de salida son la matrices  $Q$  y  $R$ .

Figura 5.2: Diagramas de flujo para la realización de la SVD. Fuente: Los autores



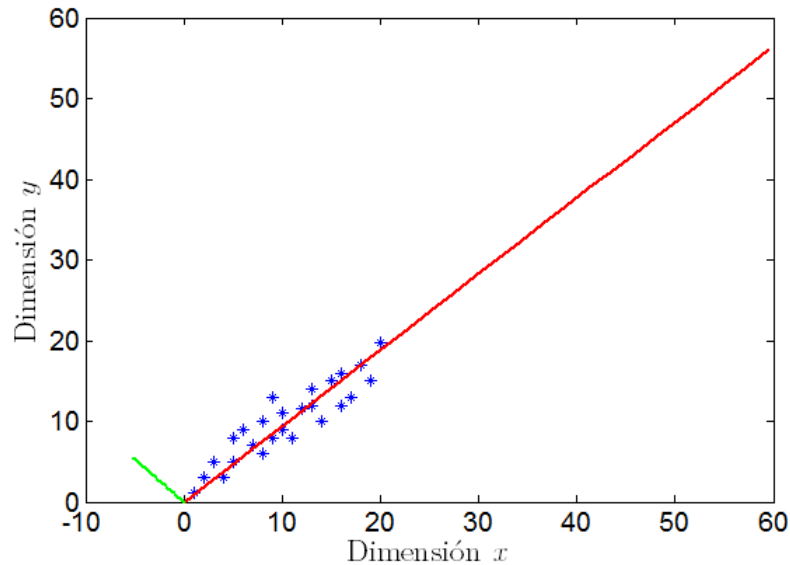
## 5.2. Aplicaciones de la SVD

La SVD presenta distintas características que hacen que su uso sea común en el análisis de datos y en el procesamiento de señales e imágenes. La SVD permite realizar tres importantes acciones:

- Transformar variables correlacionadas en un conjunto de variables no correlacionadas que exponen mejor las diversas relaciones entre los elementos de los datos originales.
- Identificar y ordenar las dimensiones sobre las cuales los datos exhiben la mayor variación.
- Encontrar la mejor aproximación de los puntos de datos originales utilizando menos dimensiones.

Para contextualizar estas ideas, considérese la dispersión de datos en dos dimensiones de la Figura 5.3.

Figura 5.3: Dispersión de datos de las dimensiones  $x$  y  $y$ . Fuente: Los autores



Ahora genérese una matriz compuesta por los datos de las dimensiones  $x$  y  $y$  así:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{x} \ \mathbf{y}) \quad (5.13)$$

Donde  $\mathbf{x}$  y  $\mathbf{y}$  son vectores columna donde sus elementos son los datos de las dimensiones  $x$  y  $y$  respectivamente.

si se hace la descomposición en valores singulares de la matriz  $\mathbf{M}$  se tiene:

$$\mathbf{M} = \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}'_1 + \sigma_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{v}'_2; \quad (5.14)$$

Si se toma  $\sigma_1 \mathbf{v}_1$  se crea un vector que genera la línea de regresión que ejecuta la mejor aproximación de los datos originales. Este vector se representa por la línea roja en la Figura 5.3. Si se trazaran líneas perpendiculares desde los puntos hasta la línea de regresión y se tomara la intersección como una aproximación de los valores, se tendría una representación reducida de los datos originales.

La línea verde es perpendicular a la roja (no correlacionada) y es generada por  $\sigma_2 \mathbf{v}_2$ . La magnitud de este vector es proporcional a la varianza de los datos con respecto a a la línea trazada por el primer vector.

Este ejemplo permite ver como se puede transformar el conjunto de datos originales a otras variables no correlacionadas como lo son los vectores columna de  $\mathbf{V}$ . También se observa que se puede identificar las componentes sobre las cuales los datos exhiben la mayor variación y por lo tanto se puede reducir el número de dimensiones tomando como aproximación las primeras autoimágenes de la descomposición SVD.

# Capítulo 6

## Métodos para atenuar el *ground roll*

### 6.1. Filtrado F-K

En una sección sísmica, los efectos provenientes de la fuente sísmica se encuentran superpuestos a las reflexiones en tiempos comparables. Este tipo de filtrado es conocido como *filtrado de velocidad*, opera en el dominio (frecuencia-número de onda), en él se diferencian los distintos eventos y se alinean en rectas cuyas pendientes establecen las distintas velocidades, esto permite identificarlos y eliminarlos. El filtro se basa en la transformada de Fourier en dos dimensiones ecuación (6.1), para definir en el dominio “f-k”. La región de rechazo, en esta región se diseña un filtro partiendo de las aproximaciones de la velocidad de cada una de las ondas, con el fin de eliminar la presencia de componentes espectrales no deseadas y posteriormente aplicar la transformada inversa de Fourier en dos dimensiones ecuación (6.2), se obtienen los datos en dos dimensiones, sin presencia de ondas superficiales ni del aire. [33]

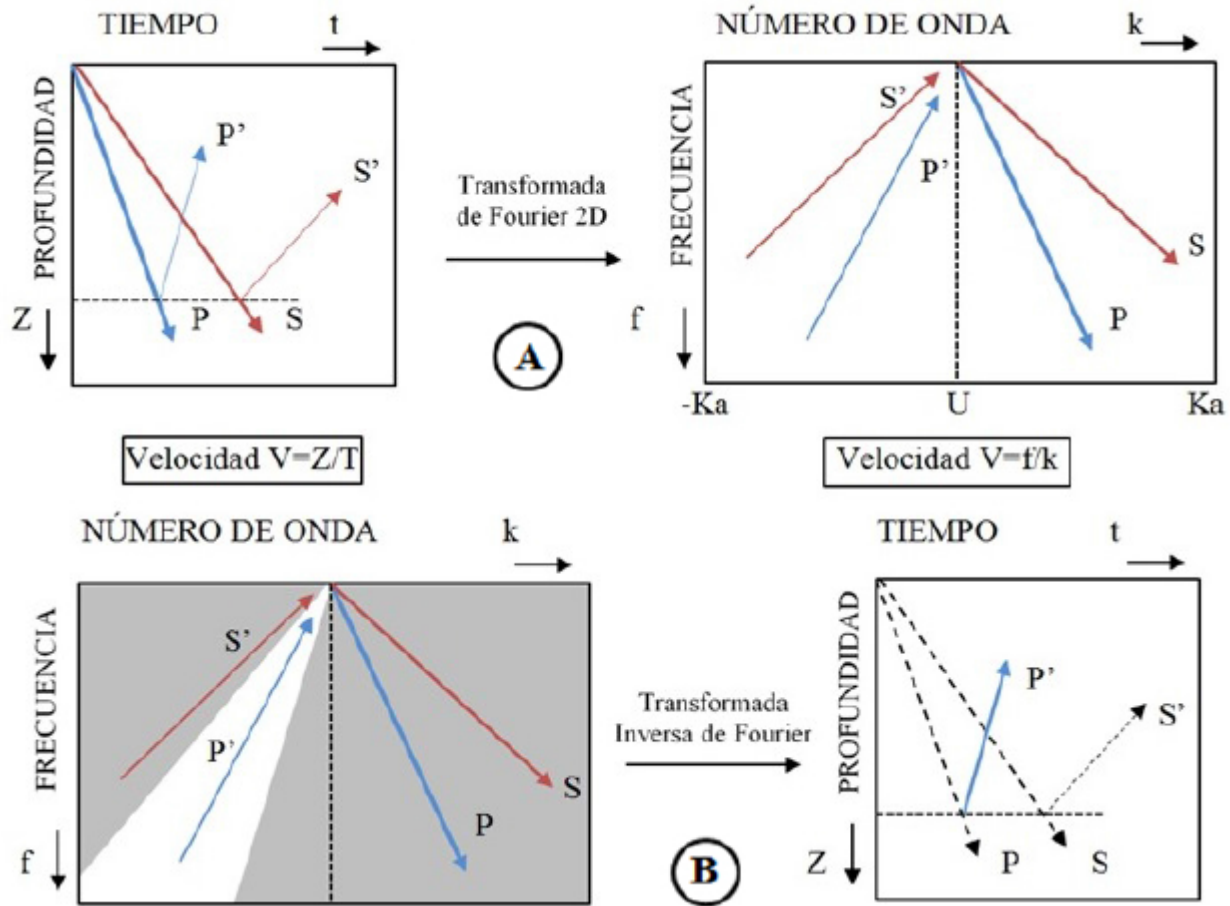
$$Ux(f, k) = \int_0^{t_0} \int_{z_0}^{z_1} ((U_x(z, t) * \exp(ft - kz))) dz dt \quad (6.1)$$

$$U^P(z, t) = \int_{-f_N}^{f_N} \int_{-k_N}^{k_N} ((U^P(f, k) * \exp(-2\pi j(ft - kz))) dk df \quad (6.2)$$

donde  $k_N = 0,5\Delta x$  es el número de onda de Nyquist,  $\Delta x$  es el espacio entre geófonos

donde  $f_N = 0,5\Delta t$  es la frecuencia de Nyquist,  $\Delta t$  es el intervalo de muestreo.

Figura 6.1: Transformación F-K, Fuente: [8]



La transformada de Fourier 2D y la transformada inversa permiten que las ondas sísmicas pasen del dominio tiempo a la frecuencia y viceversa. En la figura 6.1 se aprecia esta relación fundamental del comportamiento de la velocidad en estos dos dominios.

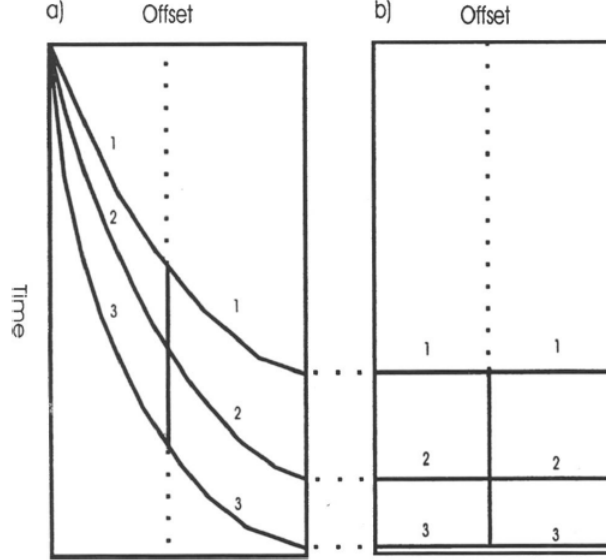
## 6.2. Transformada K-L

Cuando el *ground roll* y las reflexiones se sobrepone en frecuencia y aún teniendo una amplitud del *ground roll* mucho más fuerte que la de reflexiones, el filtrado  $f - k$  causa graves distorsiones en la señal. En busca de mejorar lo descrito anteriormente se diseñó un nuevo método llamado transformada karhunen-loève (K-L), el cual permite usar un nuevo dominio para extraer el *ground roll*. Este método logra menos distorsión en las reflexiones, el procesamiento se realiza 2D teniendo como base una sola componente (1C), [34].

La transformada completa K-L es mucho más lenta computacionalmente que la transformada *zero-lag* K-L, pero esta última solo es usada para extraer los eventos horizontales, para superar este problema se realiza un picado de trayectorias que describen el comportamiento del *ground roll*, seguidamente una linealización horizontal

(dominio mapeado), esto aprecia en la Figura 6.2.

Figura 6.2: Picado y dominio mapeado del *ground roll* [9].



Una vez se tiene los eventos del *ground roll* de forma horizontal, se construye la matriz de covarianza  $\Gamma$  a partir de dominio mapeado, descrito por la matriz  $X$  [9]:

$$\Gamma = XX^T \quad (6.3)$$

Donde los coeficientes de  $X_{ij}$  de la matriz de datos es la muestra  $j$  de la traza  $i$ . Como  $\Gamma$  es simétrica se puede descomponer de la siguiente forma:

$$\Gamma = R\Lambda R^T \quad (6.4)$$

Las columnas de  $R$  son los vectores propios de  $\Gamma$ , y  $\Lambda$  es la matriz diagonal de los valores propios, estos valores propios están organizados de manera decreciente.

La matriz *karhunen – love* de dimensiones  $m \times n$  definida como:

$$\Psi = R^T X \quad (6.5)$$

Si se forma la matriz  $\Psi$  con las filas superiores de  $m$ , es decir las principales componentes de los valores propios (mayores) y se pone en cero el resto, el *ground roll* estará representado por:

$$X' = R\Psi' \quad (6.6)$$

El *ground roll*  $X'$  se resta de los datos  $X$  y se procede a realizar la transformación inversa y posteriormente quitar la linealización horizontal. En la figura 6.3 y figura 6.4 se aprecia el dominio mapeado y los resultados obtenidos respectivamente.

La ventaja radica en que esta transformada se realiza en forma local es decir solo afecta la región establecida, y permite una baja distorsión de las reflexiones además de ser una análisis 2D.

Figura 6.3: Dominio mapeado datos originales, *ground roll* y la señal filtrada [9]

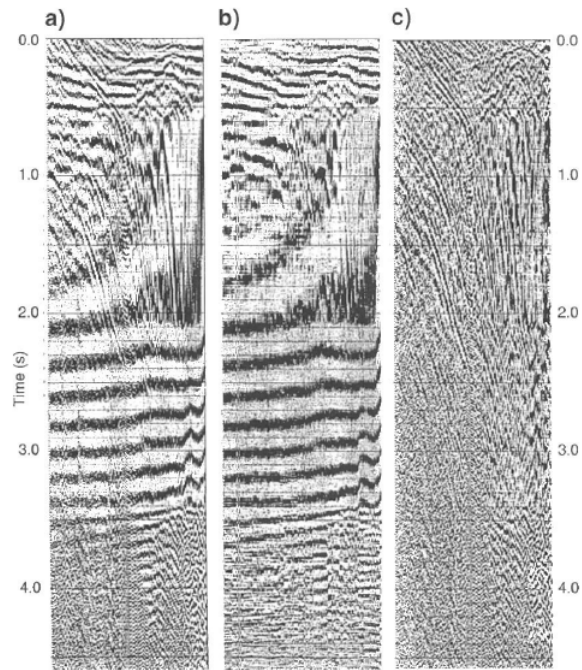
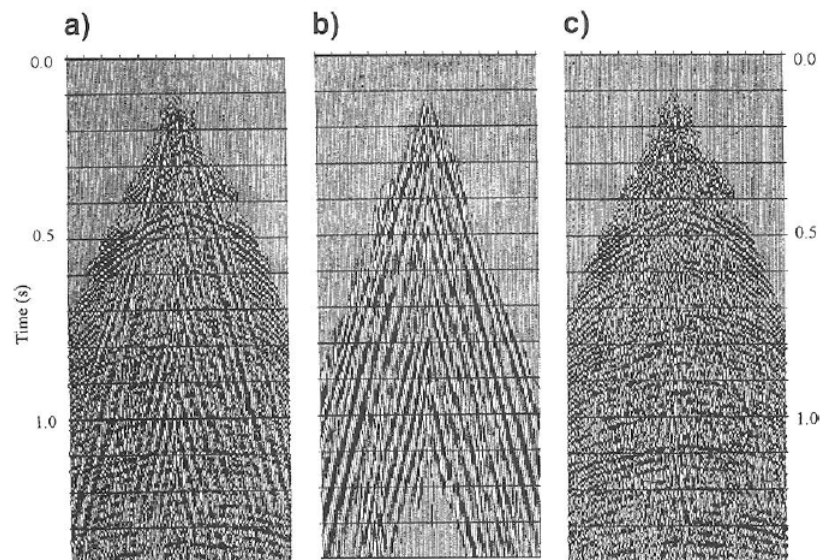


Figura 6.4: Resultados datos originales, *ground roll* y la señal filtrada [9]



### 6.3. Dominio de patrones para el filtrado del ruido *ground roll*

En este filtro se plantea un método que permita caracterizar las reflexiones y el ruido a partir del comportamiento de los espectros de potencia de cada uno de

ellos, tomando sismogramas sintéticos en una componente. Como primer paso se propone expresar la señal correspondiente a los datos originales como la suma de una componente de señal con una componente de ruido de la siguiente forma:

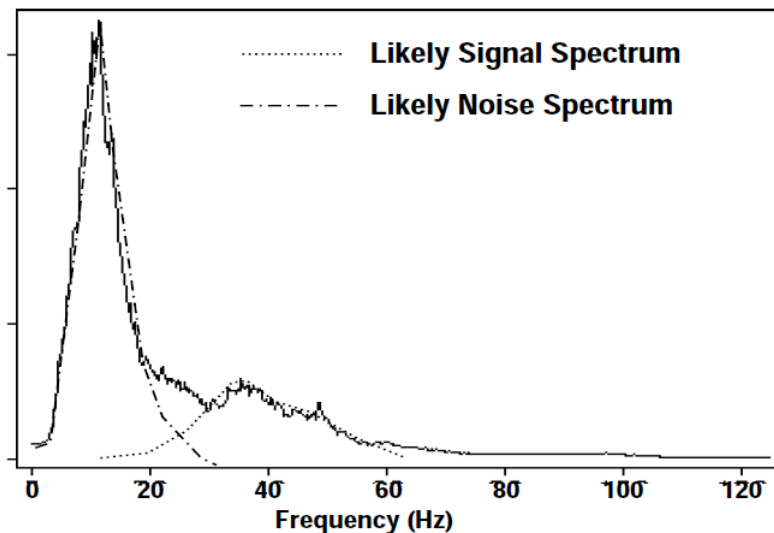
$$\mathbf{d} = \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (6.7)$$

Donde  $\mathbf{d}$  corresponde a la información de los datos originales,  $\mathbf{s}$  es la componente de señal de interés y  $\mathbf{n}$  es la componente del ruido que se desea atenuar. Luego se construyen operadores que ayuden a separar las componentes de señal y de ruido usando **Filtros de Predicción de Errores** (PEF's, por sus siglas en inglés), obteniéndose las siguientes expresiones [35]:

$$\begin{aligned} \mathbf{N}\mathbf{s} &\approx \mathbf{0} \\ \epsilon\mathbf{S}\mathbf{s} &\approx \mathbf{0} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Donde  $\epsilon$  es un multiplicador de Lagrange.  $\mathbf{N}$  y  $\mathbf{S}$  son operadores que atenúan los componentes de ruido y señal respectivamente. Estos operadores son el resultado de la convolución entre los datos del sismograma con PEF's. Por construcción, La respuesta en frecuencia de un PEF es de la forma de la inversa del espectro de potencia de los datos desde los cuales se hace la estimación [10]. De tal forma que para el caso específico de atenuar *ground roll*, es necesario establecer un modelo de la respuesta en frecuencia de lo que corresponde a *ground roll* y lo que corresponde a señal deseada. En la Figura 6.5 se muestra el modelo hecho en [10], tomando que la energía del *ground roll* se concentra en frecuencias menores a los 15 [Hz].

Figura 6.5: Línea continua - espectro promedio en amplitud. Línea punteada – interpretación del espectro de la señal. La línea de puntos – interpretación del espectro del ruido. Fuente [10]



Según [36] el operador de señal  $\mathbf{S}$  se puede escribir en términos del operador  $\mathbf{D}$  (obtenido por el PEF asociado a los datos  $\mathbf{d}$ ) y el operador  $\mathbf{N}$  (obtenido del PEF

del modelo del ruido) así:

$$\mathbf{S} = \mathbf{DN}^{-1} \quad (6.9)$$

Sustituyendo las ecuaciones 6.7 y (6.9) en (6.8), se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \mathbf{Ns} &\approx \mathbf{Nd} \\ \epsilon \mathbf{DN}^{-1} \mathbf{s} &\approx \mathbf{0} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Finalmente, la señal estimada se obtiene minimizando la función objetivo en con respecto a  $\mathbf{s}$ .

## 6.4. Transformada S

Este filtro es una técnica de representación espectral en tiempo-frecuencia con características de la transformada continua Wavelet y la transformada localizada de Fourier, es decir incorpora características de dos dominios, el dominio de la frecuencia (Fourier) y el dominio del tiempo. La razón es que los métodos basados en el dominio de la frecuencia tienen dificultades a tratar con eventos que poseen la misma frecuencia pero ocurren a tiempos desfasados, de allí la robustez de esta transformada, [16]. Hay dos maneras de deducir la transformada S: A partir de la transformada localizada de Fourier (ecuación 1) o a partir de la transformada continua wavelet y además existe una relación entre estas dos transformadas. La transformada localizada de Fourier (STFT por sus siglas en inglés, short-time Fourier transform) es tal vez la representación en el dominio tiempo-frecuencia más común. La definición de la STFT de una señal  $x(t)$  es:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} (x(t)w(t - \tau))e^{-j2\pi ft} dt \quad (6.11)$$

Por otra parte, el espectro estándar  $X(f)$  de una serie de tiempo  $x(t)$  está dado por la transformada de Fourier:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (6.12)$$

y su transformada inversa dada por:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(f)e^{j2\pi ft} df \quad (6.13)$$

La transformada S está dada por:

$$STFT(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-(t-\tau)^2 f^2/2} e^{-2\pi ft} dt \quad (6.14)$$

La transformada S es un buen método para atacar el ruido coherente *ground roll* mediante análisis de polarización, ya que la función ventana puede ser escalonada

inversamente con la frecuencia para acomodarse a las propiedades de los datos, con ventanas cortas resolución temporal y con ventanas largas resolución frecuencial. Por otro lado este filtro es adaptativo ya que correlaciona las tres componentes, calcula los elementos elípticos y ajusta sus parámetros de acuerdo a la dinámica de propagación de las ondas Rayleigh [15]. Vale la pena aclarar que la transformada S es una generalización de la transformada de Fourier para señales no estacionarias como las señales sísmicas. [9]

## 6.5. Filtro Basado En La Descomposición En Valores Singulares

Este filtro es el propuesto por [12] con las modificaciones hechas por [11]. La atenuación del *ground roll* con este filtro se basa en tres tareas principales. Una primera tarea de filtrado en frecuencia, seguido de la identificación y por último un filtrado adaptativo.

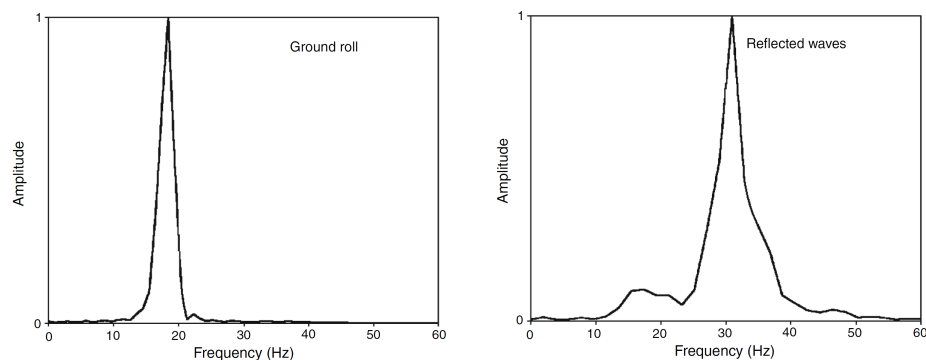
### 6.5.1. Filtrado de frecuencia

Antes de realizar un análisis de polarización en las trazas sísmicas multicomponente, es importante resaltar que en la práctica las ondas internas también presentan componentes de polarización elíptica [12]. Por tal motivo es necesario realizar un filtrado en frecuencia de tal forma que la mayor parte de la energía de las señales correspondan al *ground roll* y no a las reflexiones.

Dado que el *ground roll* se presenta en frecuencias menores a los 25 [Hz] y que las reflexiones están mayormente en frecuencias cercanas a los 30 [Hz], (ver Figuraa 6.6a y 6.6b), se propone realizar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte en 25 [Hz]. El filtrado de frecuencia se realizó con un filtro *yulewalker*, ya que presenta fase lineal, permitiendo que la señal filtrada pueda estar en fase con la señal original, ya que es importante para las otras etapas de la implementación.

Figura 6.6: Espectros del *ground roll* y de las reflexiones

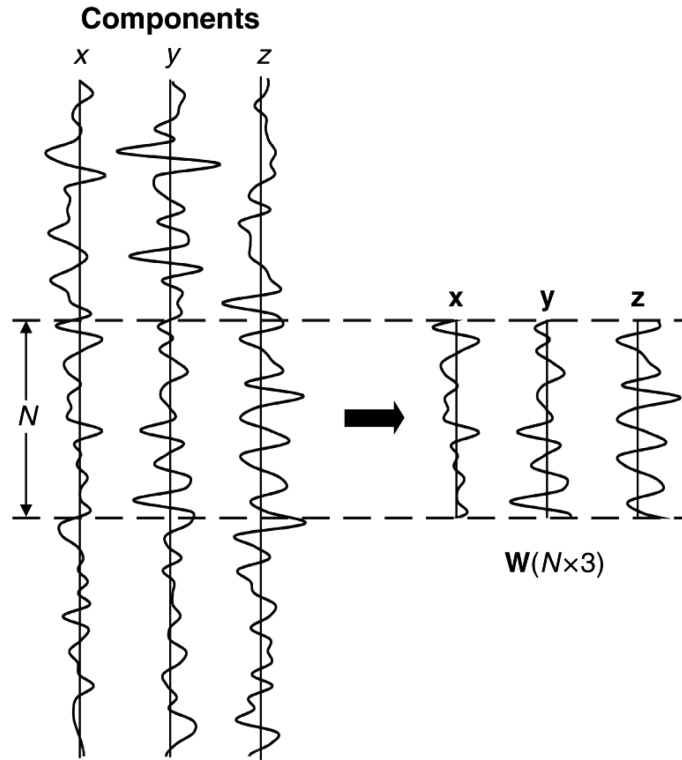
(a) Espectro correspondiente al *ground roll* Fuente: [11] (b) Espectro para las ondas reflejadas Fuente: [11]



### 6.5.2. Identificación

La identificación del *ground roll* se realiza teniendo en cuenta algunas de las características que este presenta. Como se vió en el capítulo 4, una de las principales características de las ondas Rayleigh es la polarización elíptica que presenta el movimiento de las partículas asociadas a estas ondas. Dado que en la sismica multi-componente se obtienen registros en tres componentes, es posible hacer un análisis de polarización con estos registros. En [21] se presenta un análisis de polarización basado en la descomposición en valores singulares tomando la información de las tres trazas, componentes asociadas a un mismo geófono en una ventana de tiempo deslizante  $\mathbf{W}$ , ver Figura 6.7.

Figura 6.7: Ventana de tiempo deslizante para descomposición SVD. Fuente: [11]



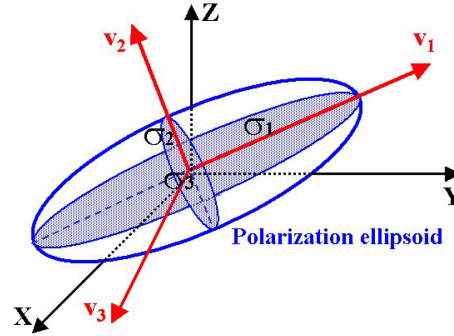
Al realizar la descomposición SVD de la matriz  $\mathbf{W}$  se tiene:

$$\mathbf{W} = \sum_{i=1}^3 \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T = \sum_{i=1}^3 \mathbf{E}_i \quad (6.15)$$

Donde  $\mathbf{E}_i$  son las autoimágenes de la ventana de datos que se está analizando.

Teniendo en cuenta que los valores singulares permiten obtener información de la energía de los datos en la dirección de los vectores propios de la matriz de energía cruzada, se obtiene la elipsoide de la Figura 6.8. En [12] se introducen un parámetro que es sensible al *ground roll* y está basado en los valores singulares de la señal multicomponente 3C. Dicho parámetro se define en la ecuación ( 6.16)

Figura 6.8: Elipsoide formada por los valores y vectores propios de la matriz de correlación. Fuente [12]



El parámetro definido es:

$$e = (\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_2 - \sigma_3) \quad (6.16)$$

Donde  $e$  representa el área de la mayor sección de la elipsoide de polarización ajustados por el semi-eje menor  $\sigma_3$ . La principal característica de este parámetro es que permite medir la elipticidad de la señal multicomponente sin usar la división de los ejes, pues se pierde la información acerca de la amplitud de la señal, sino que usa la multiplicación de los ejes principales, lo cual permite tener en cuenta las altas amplitudes que presenta el *ground roll*

En [11] hacen algunas modificaciones al parámetro, de tal forma que sea menos sensible al ruido aleatorio y más sensible a las bajas frecuencias, ver ecuación(6.17).

$$e_{mod} = \frac{\sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_3^2)(\sigma_2^2 - \sigma_3^2)}}{\bar{w}} \quad (6.17)$$

Donde:

$$\bar{w} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |w| |S(w)|^2 dw}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(w)|^2} \quad (6.18)$$

es conocido como centroide del espectro o frecuencia promedio. En centroide del espectro se calcula en la componente vertical pues es la que presenta mejor relación señal a ruido, [11]. En la Figura 6.9 se presenta una traza de un sismograma sintético y el valor del parámetro  $e$  asociado a cada muestra de la señal.

Luego de cuantificada la energía del *ground roll* en cada una de las ventanas deslizantes de todas las trazas, se debe determinar un valor que sirva de referencia para determinar la presencia del *ground roll*. En [12] se propone ordenar los valores en orden ascendente y tomar como referencia el valor donde halla un cambio abrupto en la amplitud de los datos, ver Figura 6.10.

El parámetro  $e_g$  corresponde al valor de referencia para determinar la presencia del *ground roll*.

En [11] se propone que el parámetro se represente en escala logarítmica y que se debe realizar un código de color de los diferentes valores de  $e$  para las ventanas de

Figura 6.9: Parámetro  $e$  correspondiente a una traza de un sismograma sintético.  
Fuente: Los autores

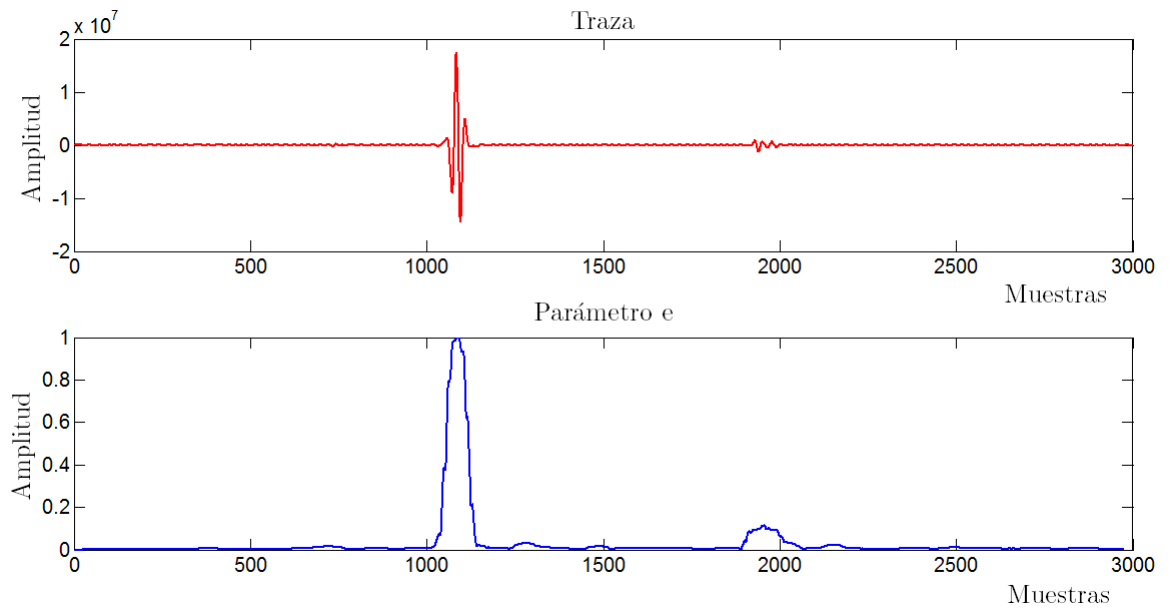
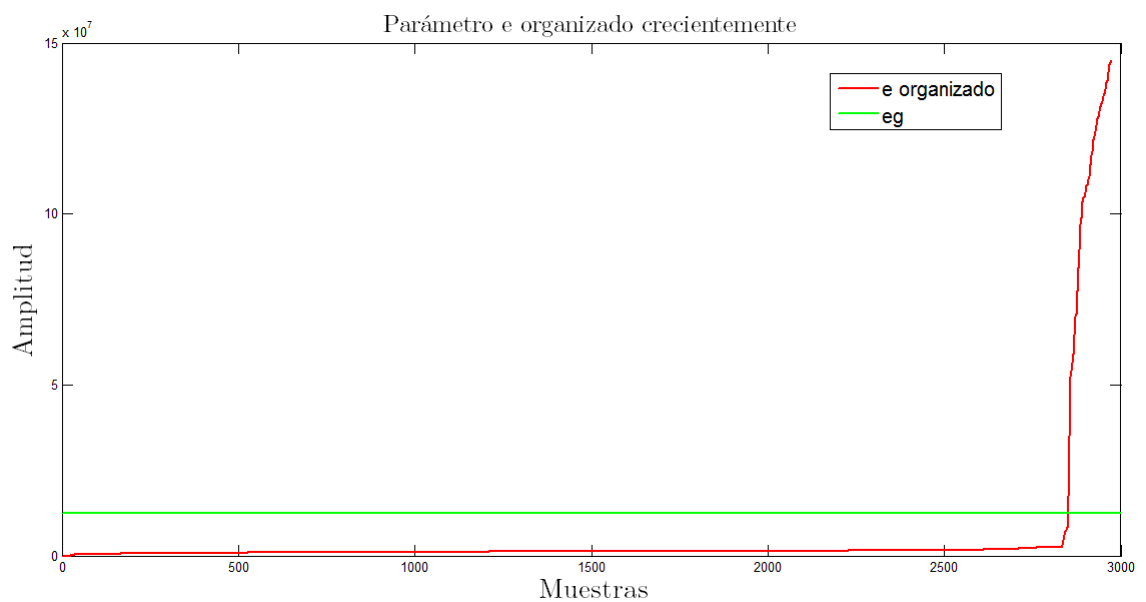


Figura 6.10: Determinación del valor  $e_g$ . Fuente: Los autores



tiempo en todas las trazas y contrastarlo con el registro sísmico, de tal forma que se pueda realizar un análisis sobre cómo se comporta el parámetro asociado a los diferentes tipos de ondas presentes en el sismograma y determinar el mejor valor de  $e_g$  que permite distinguir entre las ondas reflejadas y el *ground roll* .

### 6.5.3. Filtrado Adaptativo

En esta etapa se realiza el proceso final del desarrollo del filtro, el cual consiste en remover la energía asociada al *ground roll* en las zonas donde esté presente. El filtro adaptativo propuesto por [12] es como se muestra en la ecuación (6.19).

$$\mathbf{F} = (1 - g)\mathbf{W} + g(\mathbf{W} - \tilde{\mathbf{E}}_1 - \tilde{\mathbf{E}}_2) \quad (6.19)$$

Donde  $\mathbf{F}$  son los datos después de aplicado el filtrado adaptativo,  $g$  es una variable booleana que toma el valor  $g = 1$  cuando  $e > e_g$  y  $g = 0$  para otros valores.  $\mathbf{W}$  es la ventana de tiempo que se está analizando,  $\tilde{\mathbf{E}}_1$  y  $\tilde{\mathbf{E}}_2$  son las dos primeras autoimágenes de los datos luego de haber sido aplicado un filtro pasa bajas, dado que el *ground roll* presenta frecuencias menores a los 25 [Hz] [11].

El funcionamiento del filtro presentado es tal que cuando  $g = 0$  se determina la no presencia del *ground roll* y los datos filtrados son los mismos datos originales. Pero cuando  $g = 1$  se decreta la presencia del *ground roll* y son restadas las dos primeras autoimágenes de los datos filtrado pasa bajas a los datos originales. En [12] se recomienda añadir al filtro la tercera autoimagen  $\mathbf{E}_3$  al filtro cuando exista presencia de otras ondas superficiales que no presenten polarización elíptica, quedando el filtro representado por la ecuación (6.20).

$$\mathbf{F} = (1 - g)\mathbf{W} + g(\mathbf{W} - \tilde{\mathbf{E}}_1 - \tilde{\mathbf{E}}_2 - \tilde{\mathbf{E}}_3) \quad (6.20)$$

## 6.6. Contraste entre métodos para atenuar *ground roll*

La Tabla 6.1 presenta algunas de las características principales de los métodos mencionados en este capítulo.

Tabla 6.1: Tabla comparativa entre métodos para atenuar *ground roll*

Método	Ventaja o característica	Desventaja
Filtro f-k	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Es un método que opera en datos sísmicos de una sola componente. Se caracteriza porque permite transformar los datos a un dominio frecuencia-número de onda en donde se puede hacer una mejor discriminación de los eventos registrados en el sismograma. Teniendo en cuenta las características de frecuencia y velocidad del <i>ground roll</i>, este método permite atenuar los componentes de velocidad y frecuencia correspondiente a las ondas Rayleigh.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dado que las reflexiones tienen un rango amplio de velocidades entre ellas las que posee el <i>ground roll</i>, al momento de atenuar este último se degradan las componentes de las reflexiones.</li> <li>▪ Se hace necesario tener un gran número de trazas para poder tener un rango amplio de velocidad y frecuencia en el dominio <math>f - k</math>.</li> </ul>

Método	Ventaja o característica	Desventaja
Transformada K-L	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ En este filtro se realiza previamente un picado donde se indican la trayectorias que describen el <i>ground roll</i> sobre el sismograma.</li> <li>■ Los datos filtrados se reconstruyen con los datos de menor energía, dado que el <i>ground roll</i> se concentra en las componentes de mayor energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ No hay un parámetro para definir el número de componentes principales que se debe usar para reconstruir la señal filtrada.</li> <li>■ Solo se tiene en cuenta la característica de velocidad del <i>ground roll</i> y se dejan de lado las características de frecuencia y polarización dado que el método se aplica a datos en una componente.</li> </ul>
Dominio de patrones	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Es un método que se aplica a datos de una sola componente, basándose en modelos de la respuesta en frecuencia de las reflexiones y el <i>ground roll</i>, para generar operadores que permitan discriminarlos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Solo tiene en cuenta la característica en frecuencia del <i>ground roll</i>, dejando de lado las características de velocidad y polarización</li> </ul>

Método	Ventaja o característica	Desventaja
Transformada S	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ La transformada S permite localizar el <i>ground roll</i>, tomando los componentes de frecuencia asociado a diferentes tiempos.</li> <li>■ Se hace un análisis de polarización tomando las tres componentes de tal manera que se atenúan las componentes elípticas y se resaltan los componentes lineales.</li> <li>■ Limitada para señales no estacionarias. La transformada S inversa en la señal reconstruida, queda con energía indeseada en diferentes intervalos de tiempo</li> </ul>	
SVD	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Se tiene en cuenta la elipticidad del <i>ground roll</i>, el cual se mide por medio de un parámetro diseñado a partir de los valores singulares de la matriz de datos.</li> <li>■ Se aplica un filtrado adaptativo en las zonas donde el <i>ground roll</i> ha sido localizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ No se tiene en cuenta la velocidad del <i>ground roll</i> para su identificación, lo cual puede generar que algunas de las ondas (ondas directas) que presenten algún componente de polarización elíptica y alta amplitud podrían ser detectadas como <i>ground roll</i> generando así falsos positivos.</li> </ul>

# Capítulo 7

## Resultados

Se utilizó el filtro basado en la descomposición en valores singulares descrito en el capítulo anterior para atenuar el *ground roll* presente en datos sísmicos multicomponente sintéticos y reales.

### 7.1. Datos Sintéticos

Los sismogramas sintéticos fueron adquiridos por medio de la función **surefl-psvsh** de la herramienta *seismic unix*. Esta función permite obtener los registros sísmicos en la componente vertical y radial. Dado que sólo se pudo obtener los datos sintéticos en dos componentes y que el filtro desarrollado se basa en tres componentes, fue necesario hacer una extrapolación a este tipo de datos.

Cabe resaltar que el *ground roll* está presente principalmente en las componentes vertical y radial. Razón por la cual se puede tener información suficiente para identificar el *ground roll* presente en los registros sintéticos adquiridos en *Seismic Unix*. Para dicha identificación se hizo una variación en el parámetro  $e$  que mide la elipticidad de las ventanas de tiempo deslizantes en las trazas sísmicas, de tal forma que sólo usara dos valores singulares. Siguiendo la idea presentada en el capítulo anterior se propuso el siguiente parámetro que se aplicara a los datos en dos componentes.

$$e = \sigma_1 - \sigma_2 \tag{7.1}$$

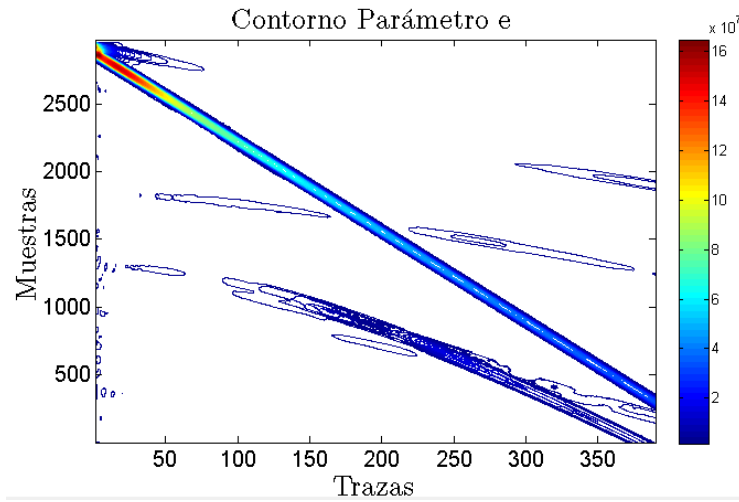
Este parámetro permitirá medir la elipticidad de las ondas tomando la resta entre los ejes que componen la elipse.

De las Figuras 7.6 y 7.7 se observan los resultados obtenidos del filtrado de los datos sintéticos en las componentes vertical y radial aplicando el filtro basado en la SVD.

Los resultados muestran que el filtro efectivamente logró identificar y atenuar el *ground roll* presente en los registros, pues los sismogramas correspondientes a la resta entre las componentes originales y las componentes filtradas dejan ver la onda asociada al *ground roll* que fue removida de los datos originales.

Para observar cómo se comportó el parámetro  $e$  utilizado para la identificación, se realizó un contorno de los valores calculados de las ventanas de tiempo deslizantes en todas las trazas, obteniéndose la gráfica presentada en la Figura 7.1

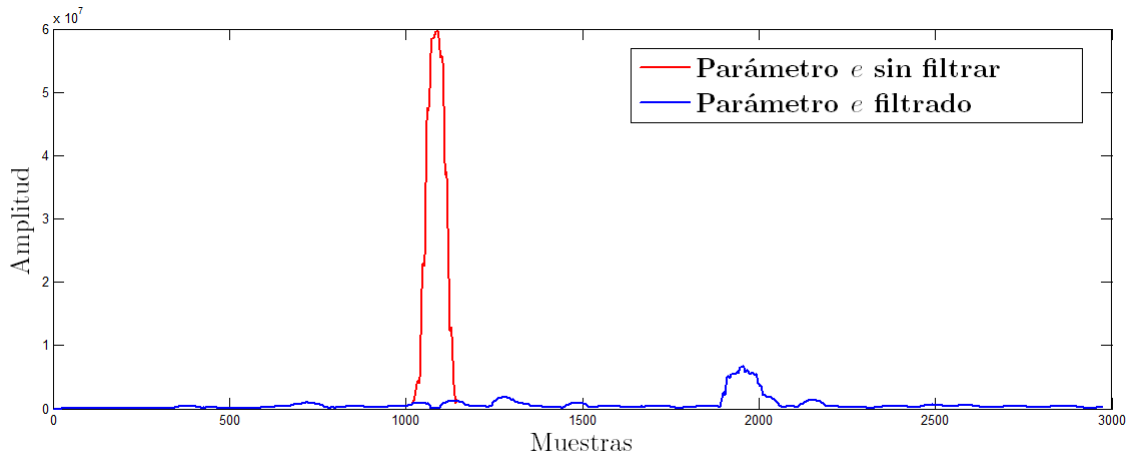
Figura 7.1: Contorno correspondiente al parámetro  $e$ . Fuente: Los autores



La imagen del contorno deja ver que el parámetro efectivamente resultó ser de mayor amplitud en las zonas donde el *ground roll* está presente. Lo cual permitió la adecuada identificación del *ground roll* presente en los registros sintéticos.

En la gráfica de la Figura 7.2 se muestra el parámetro de la traza 150 antes y después del filtrado. Se puede observar que la amplitud del parámetro en las muestras asociadas al *ground roll* fueron atenuadas.

Figura 7.2: Parámetros asociados a la traza 150 de la componente vertical antes y después del filtrado. Fuente: Los autores



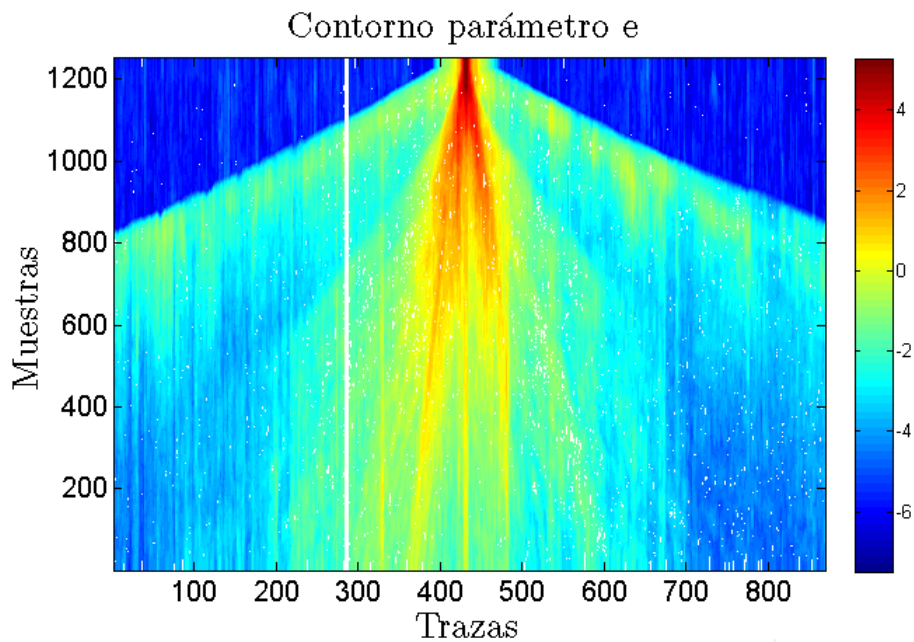
## 7.2. Datos Reales

La implementación en los datos reales se hizo teniendo en cuenta las tres componentes en el registro, los cuales corresponden a una adquisición sísmica realizada en la región de Tenerife. Dado que los datos reales presentan altos niveles de energía asociados a ondas superficiales que no presentan polarización elíptica, como es el caso de las ondas Love, se ha incluido la tercera autoimagen en el filtrado adaptativo, tal como se presenta en (6.20).

De la Figura 7.8 a la 7.15 se muestran los resultados obtenidos en cada una de las componentes del registro real.

Al igual que con los datos sintéticos, se realizó un contorno del parámetro calculado en las ventanas deslizantes en todas las trazas del sismograma, con el fin de determinar la relación entre  $e$  y las ondas presentes en el registro sísmico. El análisis del parámetro se hizo en escala logarítmica, dado que este cubre una amplia gama de valores, ver Figura 7.3.

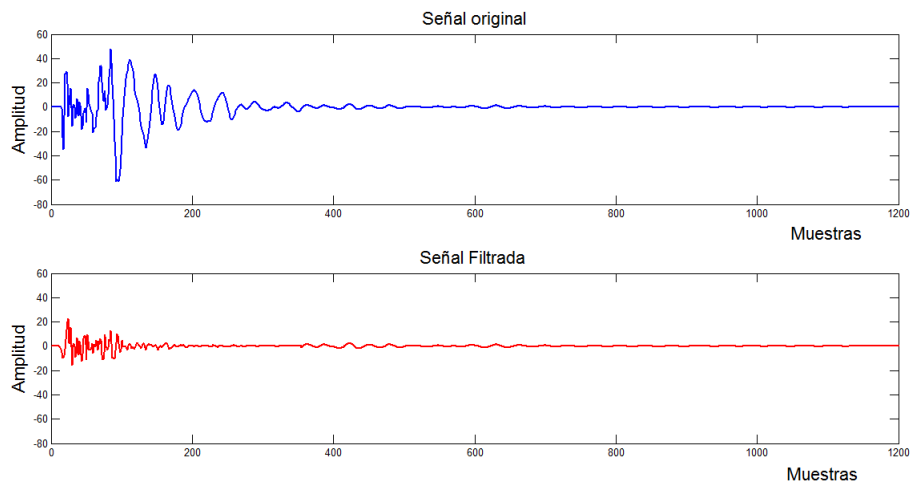
Figura 7.3: Contorno correspondiente al parámetro  $e$ . Fuente: Los autores



Nuevamente se observa que el parámetro presenta valores mayores en las zonas donde el *ground roll* está presente. Aunque también se pueden ver valores significativos en las zonas correspondientes a las ondas directas. Esto se debe a que aunque no presenten polarización elíptica, son ondas de gran amplitud y dado que el parámetro también es sensible a las amplitudes alcanza a obtener valores considerables asociados a estas ondas.

Para observar que sucede en una traza del sismograma, se tomó la traza 425 de la componente vertical, ya que es una de las trazas que presenta gran contenido de *ground roll*. En la Figura 7.4 se presenta la traza antes y después del filtrado, donde se logra ver que las oscilaciones de gran amplitud y baja frecuencia han sido atenuadas.

Figura 7.4: Señal de la traza 425 antes (azul) y después (rojo) del filtrado. Fuente: Los autores



En la Figuras 7.5, se presenta la transformada S de la traza 425 antes y después del filtrado. En el capítulo 5 se mostró que la transformada S permite obtener una visualización tiempo-frecuencia de la señal, y de esta manera observar componentes de frecuencia en cada momento. Tomando esta idea se puede ver que luego de filtrada la señal los componentes de frecuencia asociados a las reflexiones, los cuales son cercanos a los 30 Hz, se hacen más notorios con respecto a los de la señal sin filtrar, mostrando como el filtrado permitió que se resaltara la información correspondientes a las ondas reflejadas.

Figura 7.5: Transformada S de la traza 425 original (arriba) y filtrada (abajo). Fuente: Los autores

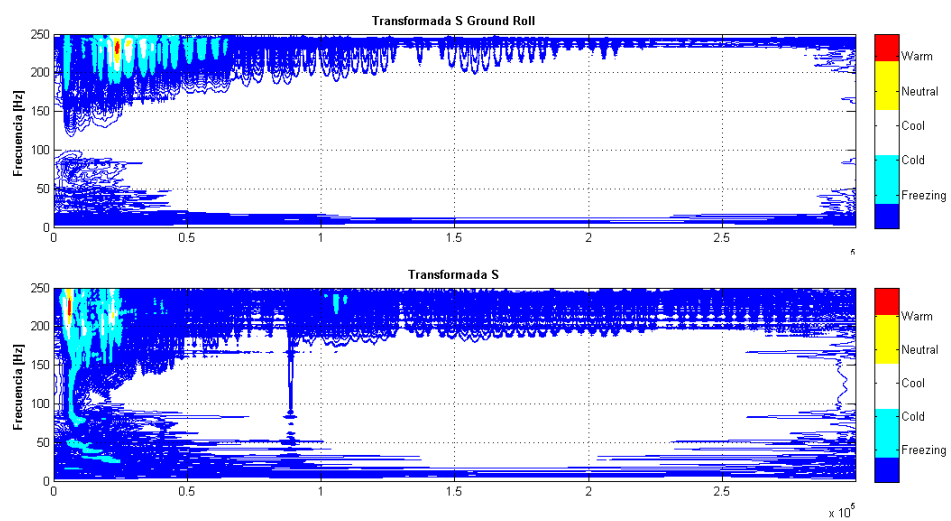


Figura 7.6: Resultados en la componente vertical, Fuente: Los autores

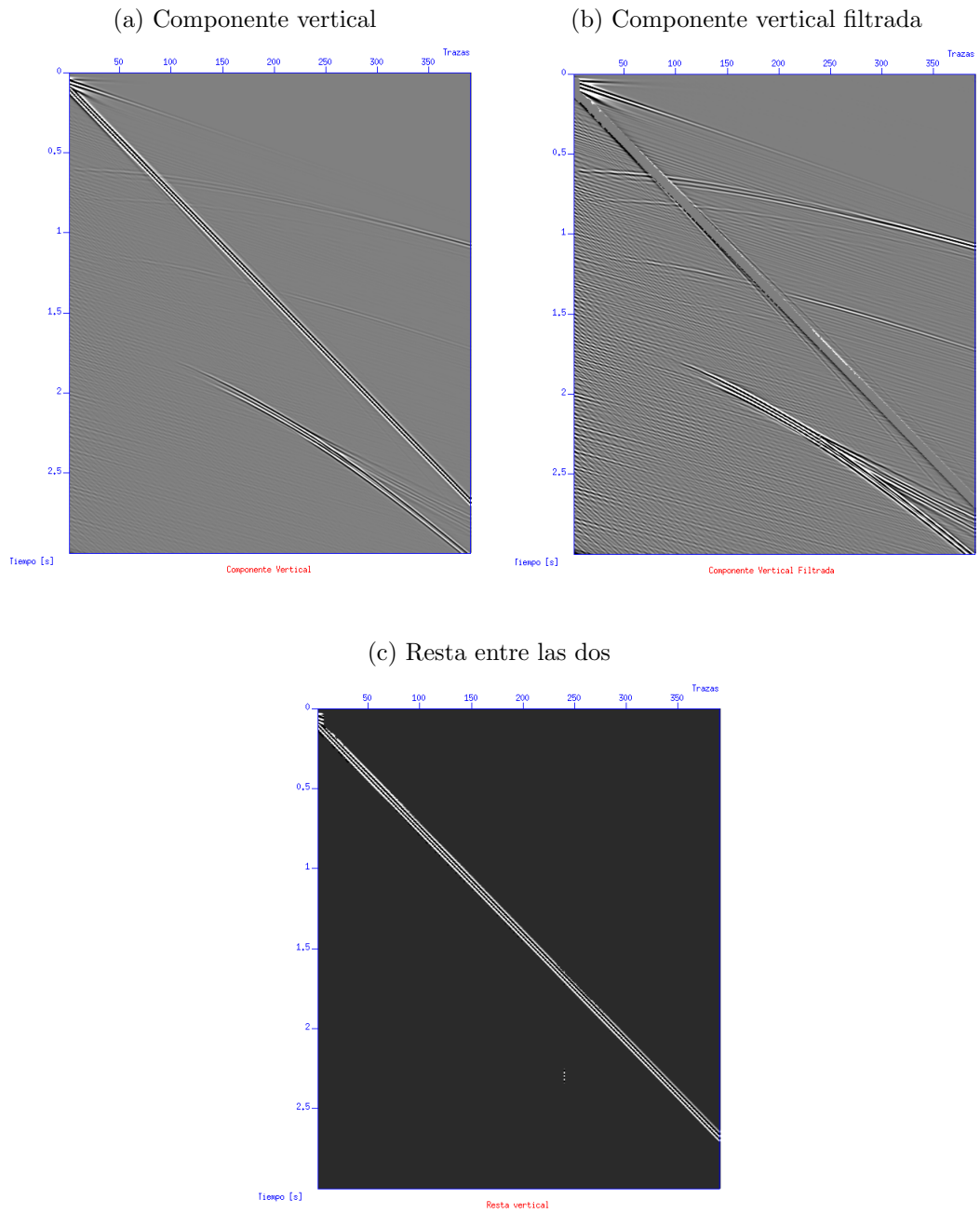


Figura 7.7: Resultados en la componente radial, Fuente: Los autores

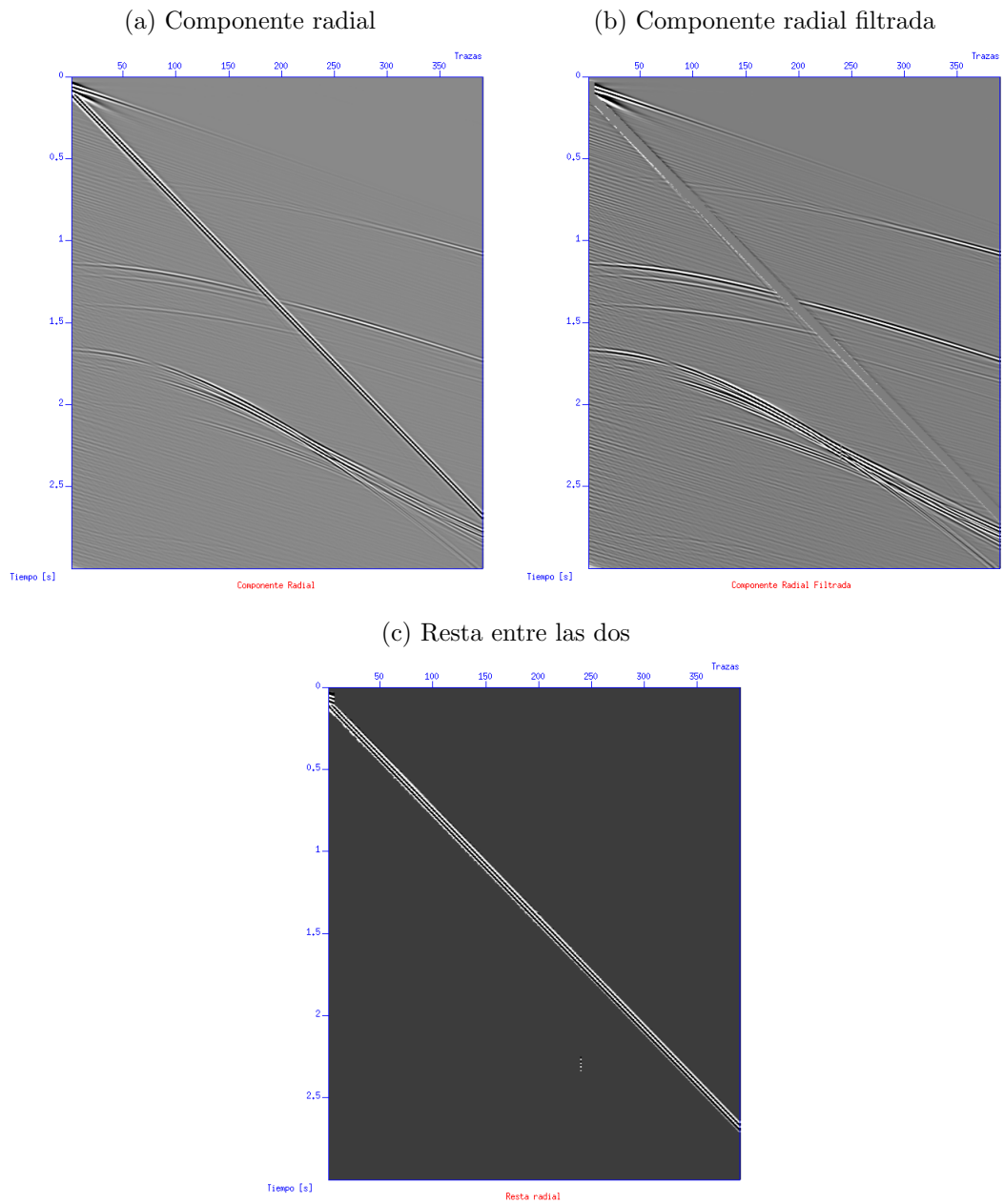


Figura 7.8: Componente vertical. Fuente: Los autores

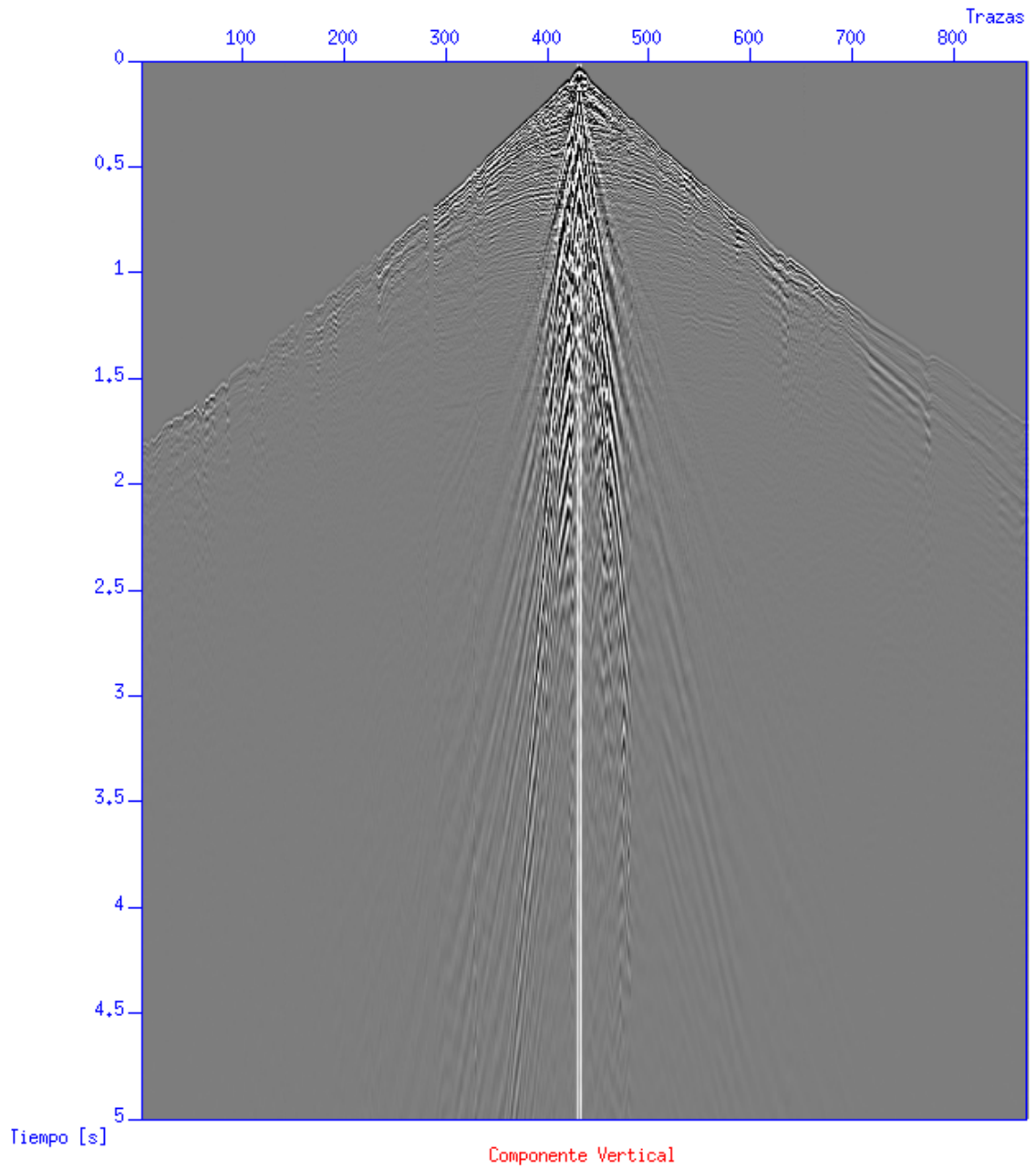


Figura 7.9: Componente vertical filtrada. Fuente: Los autores

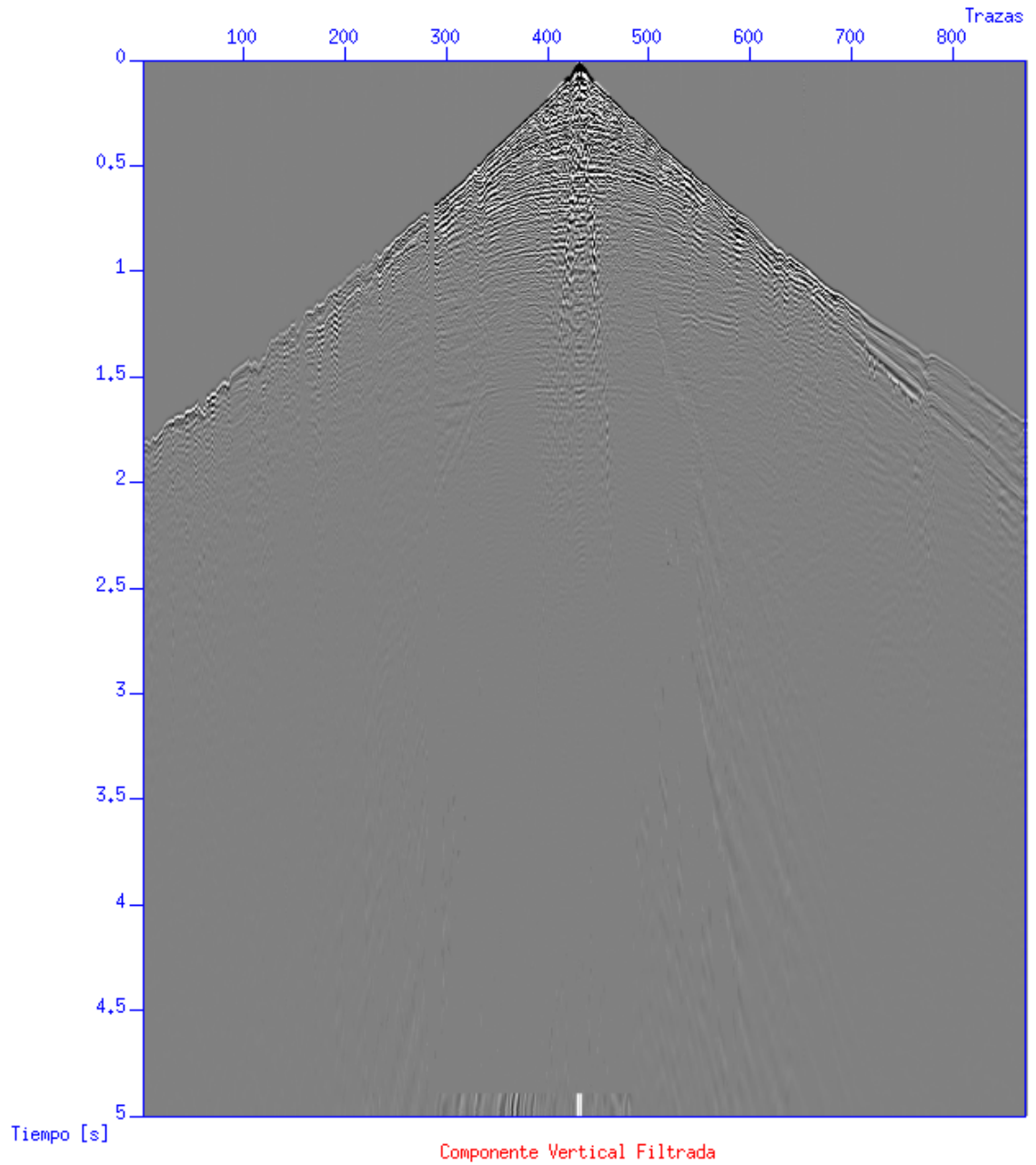


Figura 7.10: Resta entre sin filtrar y filtrado en la componente vertical. Fuente: Los autores

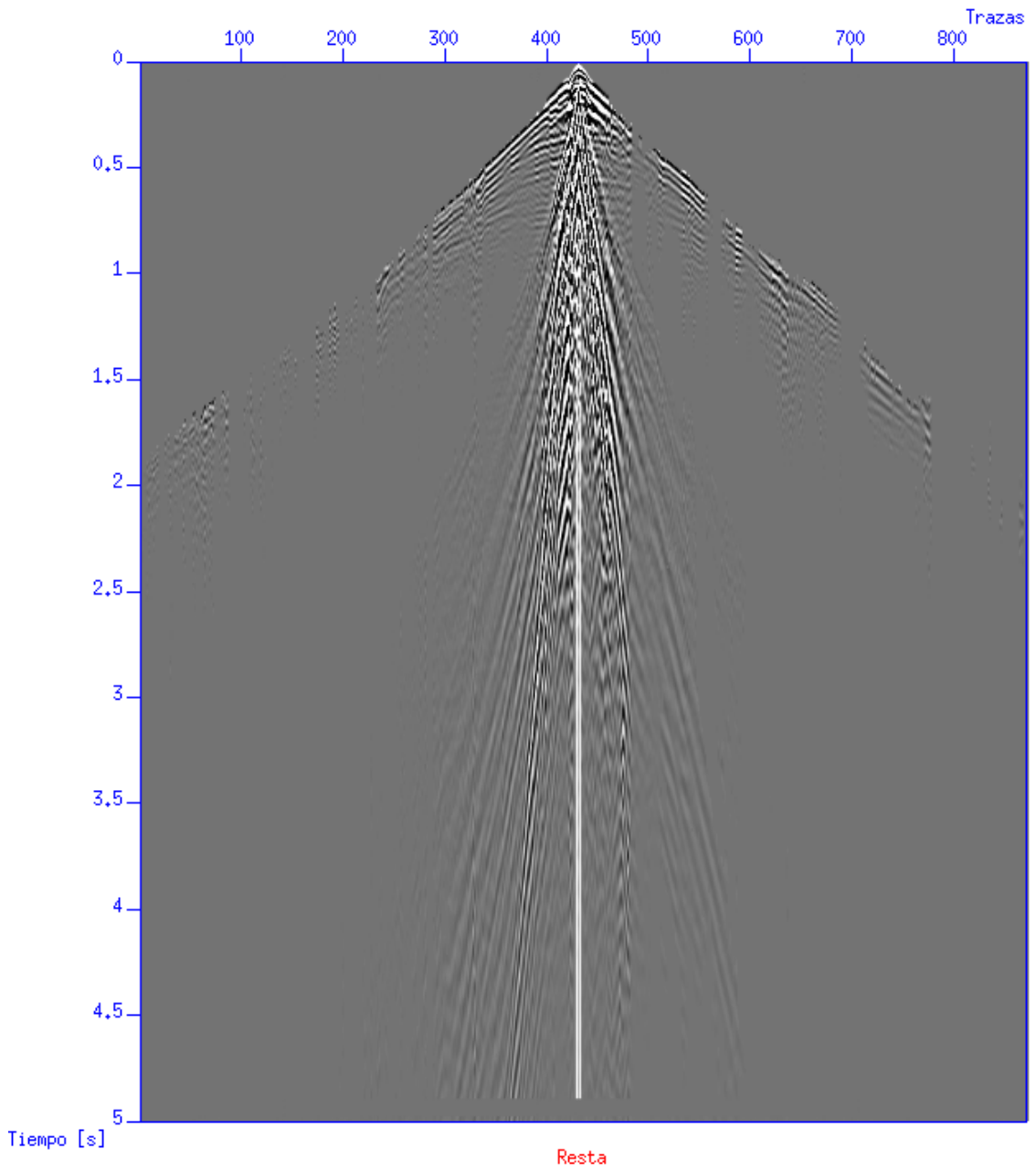


Figura 7.11: Componente radial. Fuente: Los autores

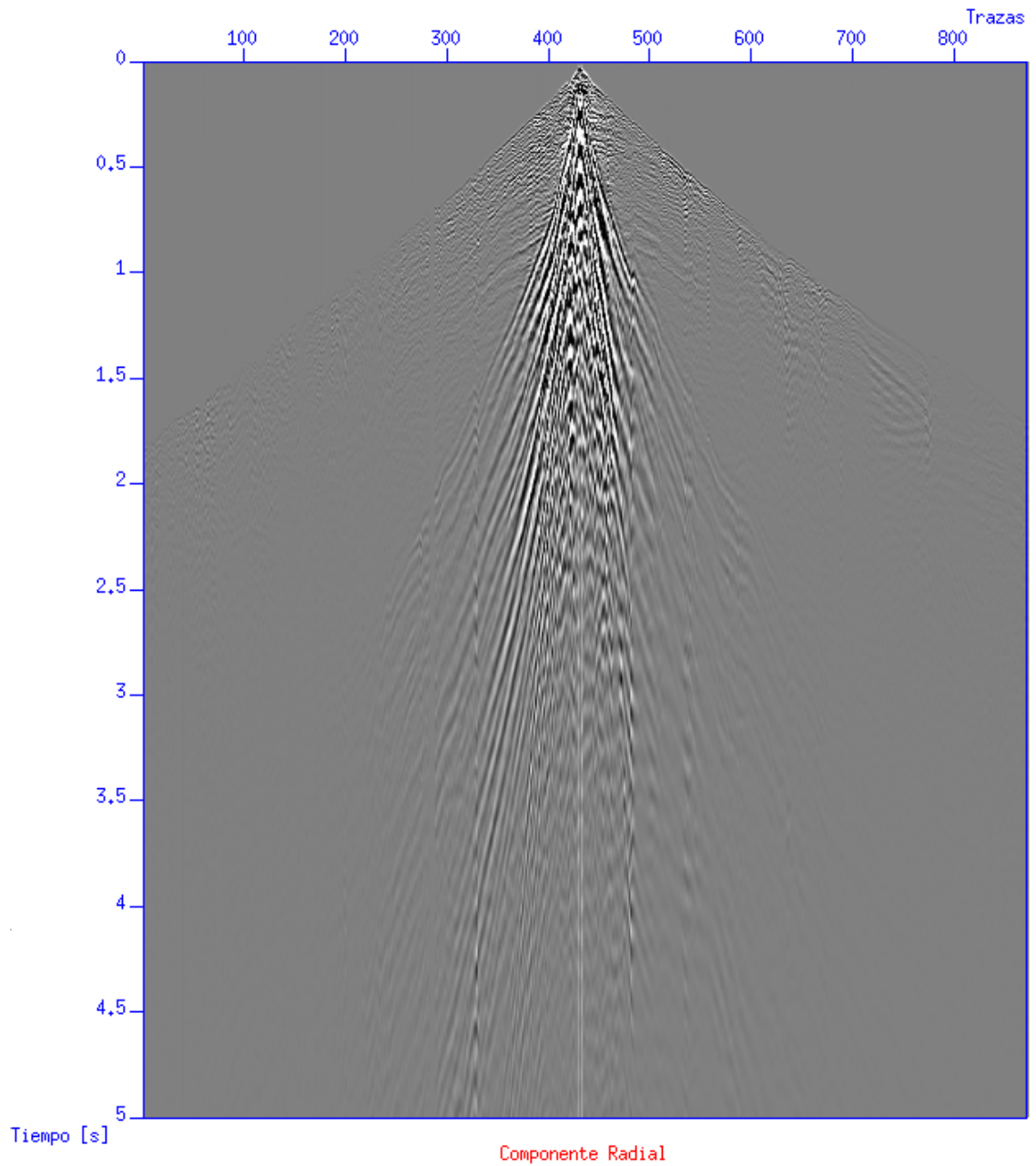


Figura 7.12: Componente radial filtrada. Fuente: Los autores

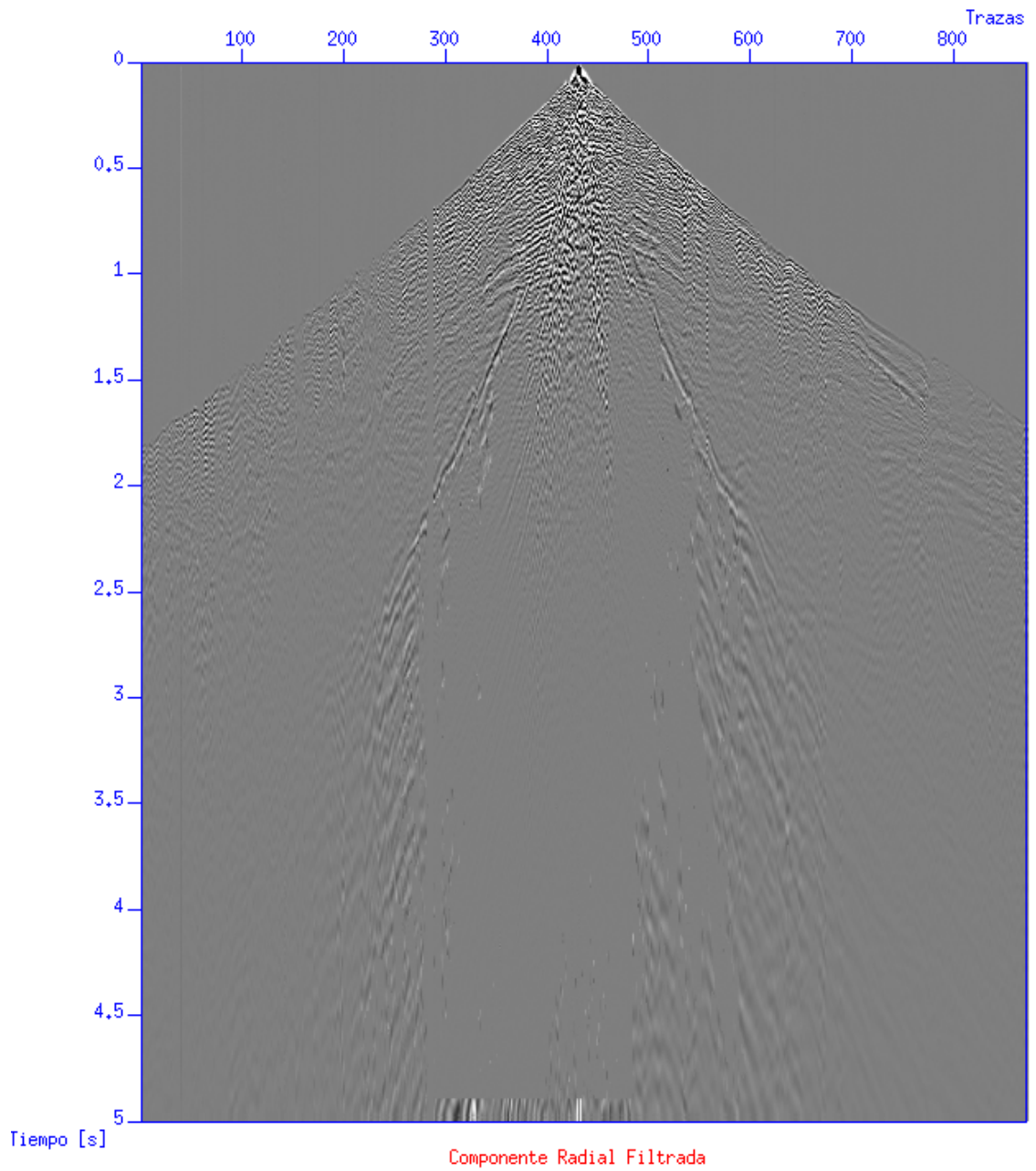


Figura 7.13: Resta entre sin filtrar y filtrado en la componente radial. Fuente: Los autores

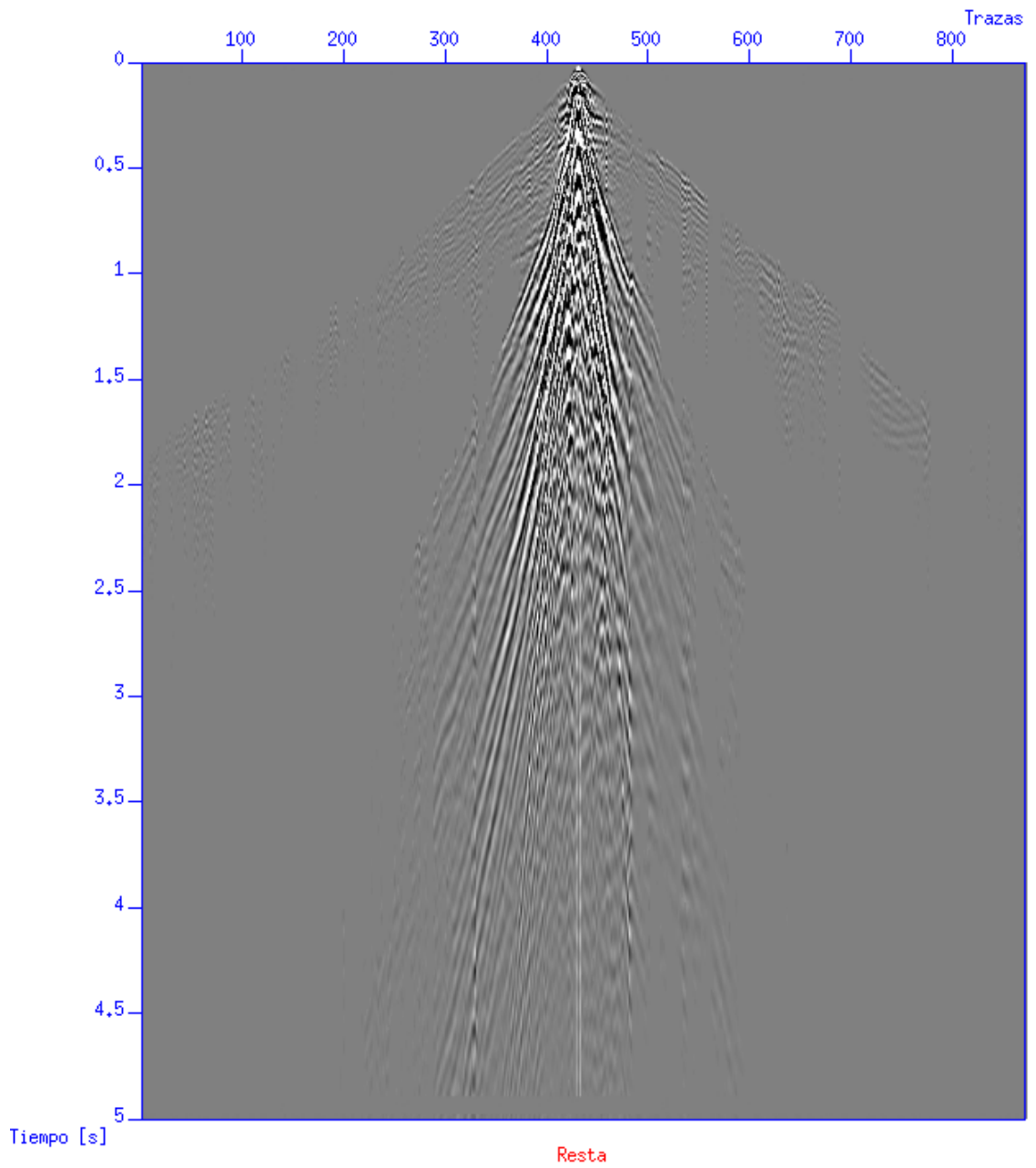


Figura 7.14: Componente transversal. Fuente: Los autores

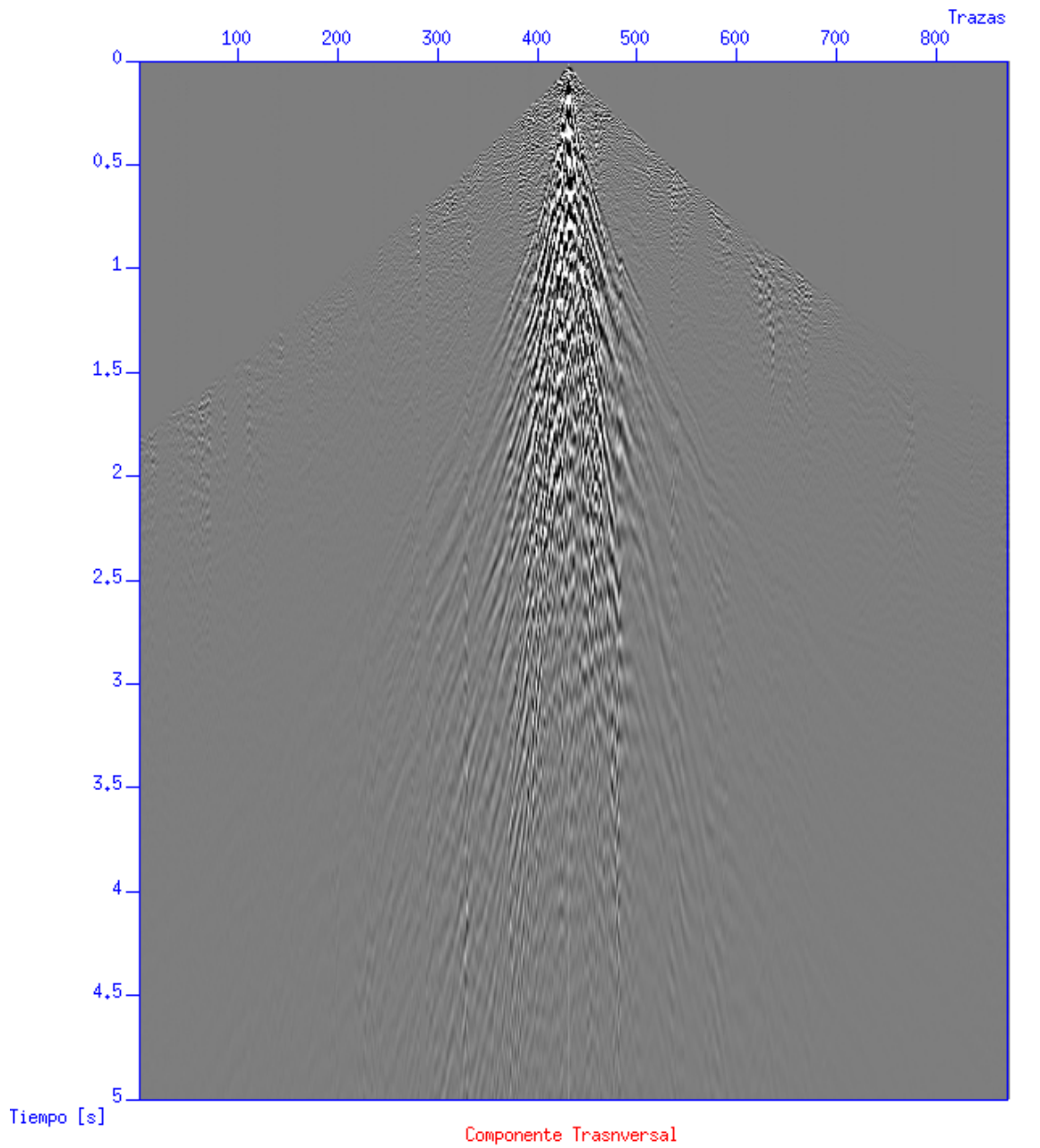


Figura 7.15: Componente transversal filtrada. Fuente: Los autores

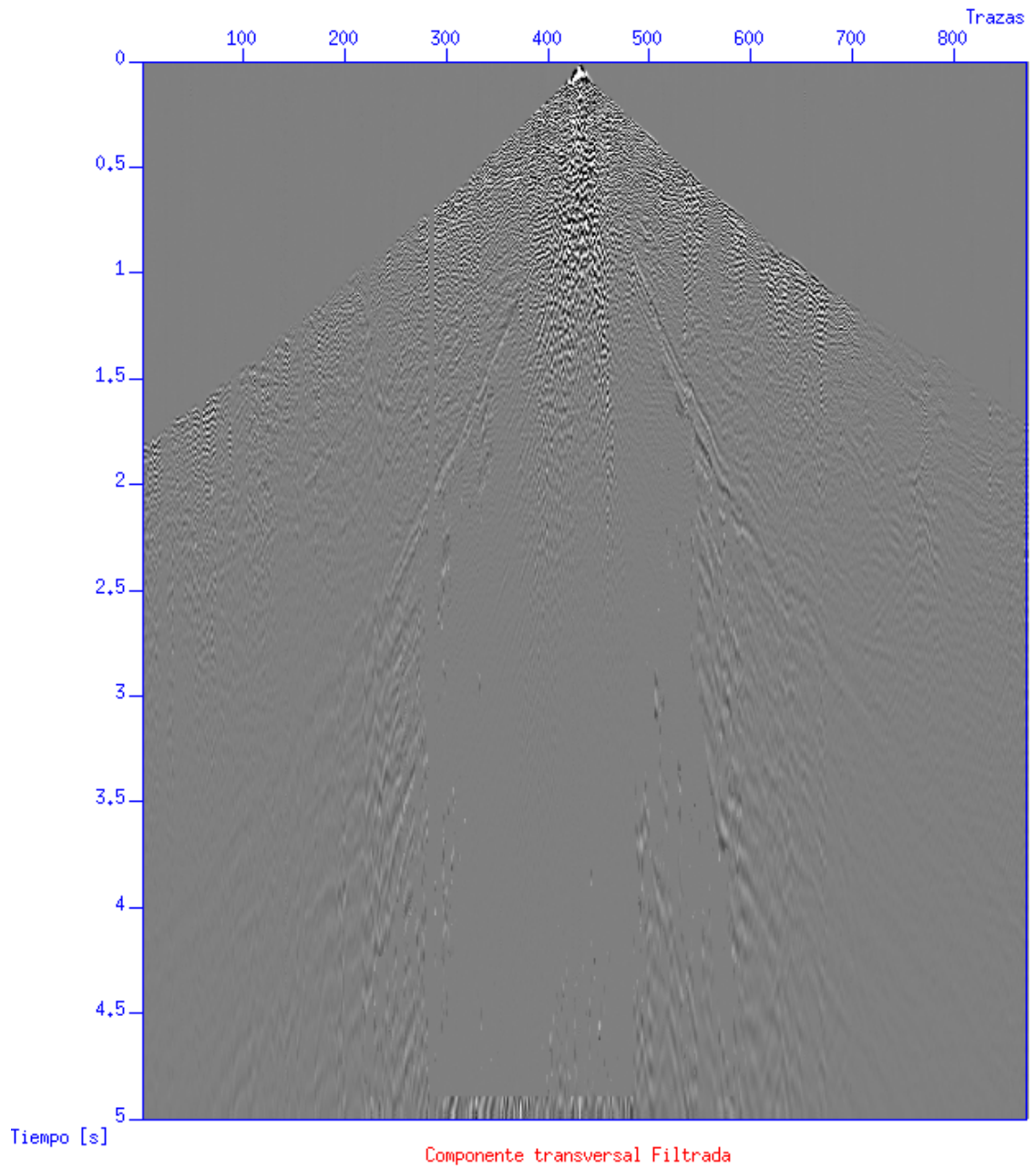
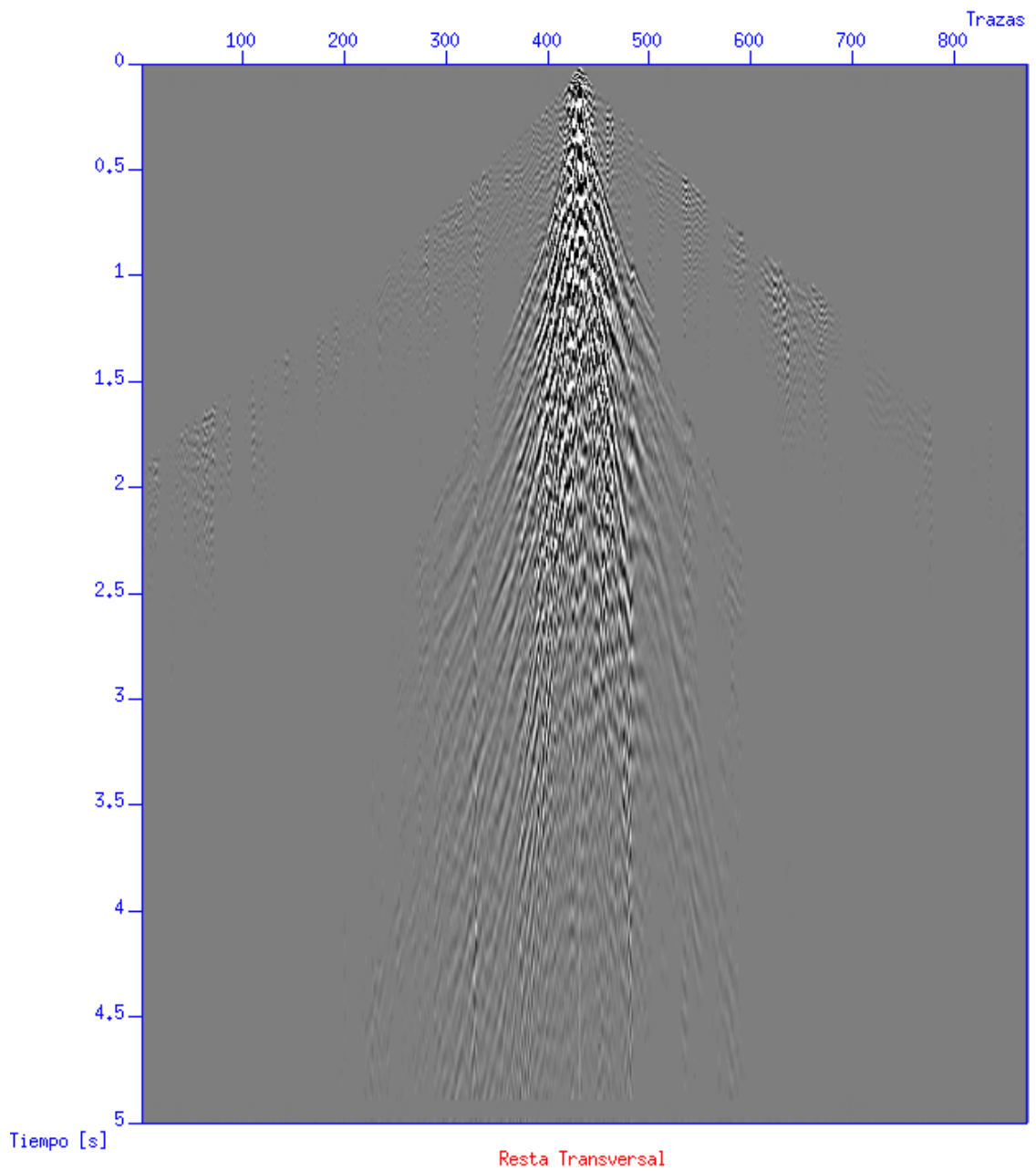


Figura 7.16: Resta entre sin filtrar y filtrado en la componente transversal. Fuente: Los autores



# Capítulo 8

## Conclusiones

- Debido a la gran coherencia que el *ground roll* presenta con las demás ondas registradas en el sismograma, se ha visto que la identificación del mismo es vital para su atenuación. En ese sentido los filtros de polarización han mostrado gran desempeño, pues tienen en cuenta el movimiento de las partículas para caracterizar cada una de las ondas que son capturadas por los geófonos en tres direcciones. Esto lleva a la conclusión de que es importante hacer exploraciones sísmicas con adquisición multicomponente pues se garantiza la obtención de la información en tres componentes ortogonales del movimiento de la partícula permitiendo hacer análisis de polarización necesarios para la implementación de filtros adaptativos que permitan la atenuación del *ground roll*.
- La descomposición en valores singulares mostró ser un método acertado en el análisis de polarización de las señales sísmicas multicomponente, dado que permite el estudio de las direcciones en las cuales se concentra la mayor energía de los datos, brindando la oportunidad de determinar parámetros que ayuden a estimar el *ground roll* presente en zonas localizadas del sismograma, lo cual es fundamental en el rendimiento de filtros adaptativos.
- El parámetro  $e$  fue provechoso a la hora de identificar las zonas en las cuales el *ground roll* estaba presente. En los contornos del parámetro realizados para los datos sintético y reales se mostró que el parámetro logró cuantificar la presencia del *ground roll* asegurando la calidad de la etapa de identificación durante el desarrollo del filtro de polarización implementado. Aunque en el contorno para datos reales, tal como lo presenta la Figura 7.3, se observó que el parámetro presentó valores considerables en las zonas correspondientes a las ondas directas. Por esta razón se propone como trabajo futuro incluir en la etapa de identificación la característica de la velocidad de las ondas Rayleigh de tal manera que se logre hacer una mejor identificación que discrimine las ondas directas.
- Los sismogramas reales contienen información de las reflexiones de las ondas que brindan información sobre la estructura interna del subsuelo, estas reflexiones se degradan en la interacción tanto del ruido coherente como del ruido inherente, además, en los sismogramas reales no se tiene control de las variables que interactúan en la adquisición, generándose la necesidad de obtener datos

sinéticos para comprender los eventos que se registran en los sismogramas, de tal forma que se pueda analizar los comportamientos específicos sin presencia de otros fenómenos. En el caso específico de hacer análisis de polarización, es necesario que estos datos sintéticos sean multicomponente, de esta forma poder ajustar algoritmos que en su diseño usen parámetros que caracterizan el comportamiento de las ondas sísmicas.

# Bibliografía

- [1] William Lowrie. *Fundamentals of Geophysical*. Cambridge University Press, 2007.
- [2] M. Brooks, P. Kearey, and I. Hill. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science, 3rd edition, 2002.
- [3] G.G. Drijkoningen and TU-Delft. Faculty of Applied Earth Sciences. *Seismic Data Acquisition*. Delft University of Technology, 1996.
- [4] Mamdouh R. Gadallah and Ray L. Fisher. *Applied Seismology*. PennWell Corporation, 2005.
- [5] W. Mousa and A. Al-Shuhail. *Processing of Seismic Reflection Data Using MATLAB*. Morgan and Claypool Publishers, 2011.
- [6] Bradford Hager. Essentials of geophysics. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [7] Jan-Bin Jia. Problem solving techniques for applied computer science. Technical report, Iowa State University, 2012.
- [8] B. A. Hardage. *Vertical Seismic Profiling*. Handbook of Geophysical Exploration. Seismic Exploration. 2000.
- [9] Raúl Montagne and Giovanni L. Vasconcelos. Optimized suppression of coherent noise from seismic data using the karhunen-loève transform. *Phys. Rev. E*, 74:016213, Jul 2006.
- [10] Morgan Brown and Robert. Clapp. (t,x) domain, pattern-based ground roll removal. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pages 2103–2106, 2000.
- [11] O. Tiapkina, M. Lando, Y. Tyapkin, and B. Link. Single-station svd-based polarization filtering of ground roll. *Geophysics*, 77(2):v41–v59, 2012.
- [12] S. Jin and S. Ronen. Ground roll detection and attenuation by 3c polarization analysis. In *67th EAGE Conference & Exhibition*, 2005.
- [13] T. Ulrych, M. Sacchi, and J. Graul. Signal and noise separation: Art and science. *Geophysics*, 64:1648–1656, 1999.

- [14] Öz. Yilmaz. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, volume 2. Society Exploration Geophysicists, 2001.
- [15] R. A. Vera. Implementación de una herramienta software que atenúe el ruido coherente ground roll presente en datos sísmicos multicomponentes. Trabajo de grado, Ingeniería electrónica, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [16] R. G. Stockwell. *S-transform analysis of gravity wave activity from a small scale network of airglow imagers*. PhD thesis, The University of Western Ontario, Ontario, 1999.
- [17] Edgar Castilla Bohórquez. Utilización de un filtro vectorial SVD para la atenuación de ruido ground roll en una zona de Colombia. Master's thesis, Universidad Eafit, 2010.
- [18] P. Embree, J. P. Burg, and M. M. Backus. Wide-band velocity filtering- the pie-slice process. *Geophysics*, 53:1874–1965, 1963.
- [19] E. A. Filnn. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle. In *Proceedings of the IEE*, number 53, pages 1874–1876, 10.1109/PROC.1965.4462, 1965.
- [20] J. I. Bobbit. Three-componet rayleigh wave filter. *Society of Exploration Geophysicists*, 54:772–775, 1984.
- [21] Jackson G. M., Mason I. M., and Greenhalgh S. A. Principal component transforms of triaxial recordings by singular value decomposition. *Geophysics*, 56:528–533, 1991.
- [22] G. De Franco, R. y Musacchio. Polarization filter with singular value decomposition. *Geophysics*, 66:932–938, 2001.
- [23] Peter Shearer. *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press, second edition, 2009.
- [24] J. Milsom. *Field Geophysics*. Geological Field Guide. Wiley, third edition, 2007.
- [25] Matt Miller. Sismología aplicada. Technical report, Universidad de Concepción, 2013.
- [26] Qiansheng Cheng, Rong Chen, and Ta-Hsin Li. Simultaneous wavelet estimation and deconvolution of reflection seismic signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (2):377 – 384, 1996.
- [27] Rongfeng Zhang and Tadeusz J. Ulrych. Physical wavelet frame denoising. *Geophysics*, 68:225–231, 2003.
- [28] J. E. Womack and J.R. Cruz. Seismic data filtering using a gabor representation. *IEEE Tran. on Geosciences and Remote Sensing*, 32 (2):467–472, 1994.

- [29] Oldrich Novotny. Seismic surface wave. Lecture notes for post-graduate studies, Centro De Pesquisa Em Geofisica em Geologia, Universidad Federal Da Bahía, 1999.
- [30] A.P. French. *Vibration and Waves*. W W Norton & Company Incorporated, 1971.
- [31] G. Strang. *Linear Algebra and its Applications*. Thomson, Brooks/Cole, 2006.
- [32] Gilbert Strang. *Introduction to Linear Algebra*. Wellesley-Cambridge Press, 2003.
- [33] N. F. Hernández and Fernández. Un filtro selectivo de velocidad variable para la exploración sísmica de reflexión. *Geofísica Internacional*, 30 (2):71–85, 1991.
- [34] Xuewei Liu. Ground roll supression using the karhunen-loeve transform. *Geophysics*, 62 (2):564–566, 1999.
- [35] Abma. R. *Least-squares separation of signal and noise with multidimensional filters*. PhD thesis, Stanford University, 1995.
- [36] S. Spitz. Pattern recognition, spatial predictability, and subtraction of multiple events. *The Leading Edge*, 18 (1):55–58, 1999.