



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**CORRELACIÓN CRUZADA DE RUIDO SÍSMICO PARA LA OBTENCIÓN DE
PERFILES PROFUNDOS DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE EN LA CUENCA
DE SANTIAGO**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN INGENIERÍA SÍSMICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MIGUEL ANTONIO SÁEZ ARIAS

PROFESOR GUÍA:

CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SERGIO RUIZ TAPIA

FELIPE LEYTON FLOREZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICYT

SANTIAGO DE CHILE

MARZO 2016

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
GRADO DE MAGISTER EN INGENIERÍA
SÍSMICA Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: Miguel Antonio Sáez Arias.
FECHA: 28/03/2016
PROFESOR GUÍA: César Pastén Puchi.**

**CORRELACIÓN CRUZADA DE RUIDO SÍSMICO PARA LA OBTENCIÓN DE
PERFILES PROFUNDOS DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE EN LA CUENCA
DE SANTIAGO**

Esta tesis desarrolla métodos temporales y espectrales de cálculo de correlaciones cruzadas de ruido sísmico para obtener perfiles profundos de velocidad de onda de corte en distintos sectores de la cuenca de Santiago. Los métodos se aplicaron a la componente vertical de registros de 29 estaciones banda ancha y 17 acelerógrafos desplegados sobre distintos depósitos de suelo de la cuenca entre los años 2013 y 2014. El método temporal permite calcular velocidades de grupo identificando el tiempo de desfase donde se alcanza la máxima amplitud de la correlación cruzada, mientras que la metodología espectral calcula velocidades de fase relacionando los cruces por cero de la parte real del espectro de correlación con los ceros de la función de Bessel. Los métodos desarrollados permiten obtener curvas de dispersión entre 0.1 y 5.5 Hz para suelos rígidos ubicados principalmente en la zona sur, centro y este de la Cuenca. Por otro lado, los registros en las zonas norte y oeste, caracterizadas por depósitos de suelo fino y ceniza volcánica, no mostraron correlación. Las velocidades de fase calculadas varían entre 3.8 y 1 km/s mientras que las velocidades de grupo se encuentran entre 2.5 y 0.6 km/s. Considerando las curvas de dispersión obtenidas, la cobertura instrumental y las características geológicas superficiales, se dividió a la cuenca en los distritos Centro, Este y Sur. En cada uno de los distritos se calculó una curva de velocidad de fase promedio para luego invertirla utilizando simulaciones Monte Carlo. Los perfiles de velocidad de onda de corte invertidos muestran una transición suave entre los sedimentos y la roca basal y un rápido incremento de la velocidad en profundidad. Los perfiles de velocidad muestran que la zona Sur de la Cuenca es más rígida que la zona Centro y Este, las cuales comparten curvas de dispersión similares.

*Vivir no es solo existir,
sino existir y crear,
saber gozar y sufrir
y no dormir sin soñar.*

Descansar, es empezar a morir.

[A mi hija Agustina]

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a toda mi familia por el apoyo y amor brindado en estos 26 años de vida.

Agradezco a mis padres por la familia que me han dado, los valores y todas las enseñanzas que han hecho de mí una mejor persona. A mi madre por el amor infinito y preocupación que ha mostrado hacia sus hijos, espero que la vida me dé la oportunidad de retribuirte todo lo que has hecho por nosotros. A mi hermana por ser mi compañera y amiga, quien siempre estuvo a mi lado en los momentos difíciles.

A mi polola Camila que ha sido parte fundamental de mi vida en los últimos siete años, por todos los besos, abrazos, cariños y momentos felices que he pasado con ella. Te amo.

Quiero agradecer a mis amigos del Instituto Nacional: Negro, Sordo, Marro, Burdo, Pancho Martínez, y Kirby quienes estuvieron en los momentos buenos y por sobre todo en los malos. A los amigos de la universidad y con los cuales compartí largas horas de estudio y conversación: Cartes, Salomón, Pinto, Emilio, Abuelo, Edy, Idini, Pastor, Seguel, Nilo, Pablo y tantos otros que forman parte del departamento de Ingeniería Civil.

Quiero agradecer al profesor César Pastén por sus consejos, enseñanzas y la disposición mostrada en todo momento para guiar de excelente manera este trabajo. A los profesores Felipe Leyton y Sergio Ruiz quienes siempre tuvieron la disposición de responder dudas, enviar material y forman parte fundamental de este trabajo. A Piero Poli y Germán Prieto por el gran aporte realizado en esta investigación.

Agradezco al Centro Sismológico Nacional, por todos los datos utilizados en esta investigación.

A la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por financiar este trabajo mediante CONICYT-PCHA/Magíster Nacional/2014 – 22141523.

Mención especial a todos los profesores que han pasado por mi vida, tanto en el Instituto Nacional como en la Universidad. A los funcionarios de ambos establecimientos y en general a todas aquellas personas que de alguna u otra forma han dejado algo en mí.

Por último, quiero agradecer a mi hija Agustina a quien dedico este trabajo y amo.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivo General	2
1.2.	Objetivos Específicos.....	3
1.3.	Estructura de la Tesis	3
2.	La Cuenca de Santiago.....	4
2.1.	Características Geomorfológicas	4
2.2.	Suelos de la Cuenca de Santiago	5
2.2.1.	Gravas	5
2.2.2.	Conos de Deyección	6
2.2.3.	Depósitos de Cenizas Volcánicas	6
2.2.4.	Finos del Norte de Santiago.....	6
3.	Estaciones Sismológicas	7
3.1.	Estaciones de Banda Ancha	7
3.2.	Acelerógrafos.....	12
4.	Fundamentos Teóricos	14
4.1.	Ondas Sísmicas	14
4.2.	Velocidades de fase y grupo	15
4.3.	Transformada de Stockwell	18
4.4.	Correlación Cruzada	20

4.5.	Correlación de Ruido Ambiental y Función de Green.....	23
4.5.1.	Enfoque Temporal	23
4.5.2.	Enfoque Espectral	26
4.6.	Inversión de Curvas de Dispersión	28
5.	Cálculo de correlaciones cruzadas: Metodología Temporal.....	32
5.1.	Etapa 1: Acondicionamiento de Señales.....	32
5.2.	Etapa 2: Cálculo de Correlación Cruzada y Almacenamiento.....	37
5.3.	Etapa 3: Filtro, Criterio RSR y Apilamiento	38
5.4.	Etapa 4: Medición de Velocidad de Grupo.....	44
5.5.	Validación de la Metodología Temporal usando la Transformada S	45
5.5.1.	Cálculo de Correlaciones cruzadas y Apilamiento	45
5.5.2.	Medición de Velocidad de Grupo	46
6.	Cálculo de Correlaciones Cruzadas: Metodología Espectral.....	49
6.1.	Etapa 1: Acondicionamiento de Señales.....	49
6.2.	Etapa 2: Cálculo de espectro de correlación, Apilamiento y Detección de Cruces por Cero	49
6.3.	Etapa 3: Medición de Velocidad de Fase.....	52
7.	Resultados.....	54
7.1.	Resultados Obtenidos Mediante Metodología Temporal	54
7.1.1.	FCR Calculadas a Bajas Frecuencias.....	55
7.1.2.	FCR Calculadas a Alta Frecuencias.....	57

7.2.	Comparación entre metodología temporal y Transformada de Stockwell.....	60
7.3.	Resultados Obtenidos Mediante la Metodología Espectral	65
7.3.1.	Espectros correlacionados y cruces por cero	65
7.4.	Comparación de Metodología Temporal y Espectral	68
7.5.	Inversiones de Velocidad de Fase y Grupo.....	71
7.6.	Sectorización de la Cuenca de Santiago	73
7.6.1.	Distrito Central.....	75
7.6.2.	Distrito Este	78
7.6.3.	Distrito Sur.....	81
8.	Análisis de Resultados	84
8.1.	Función de Correlación de Ruido Sísmico (FCR).....	84
8.2.	Metodologías Temporal y Espectral	85
8.3.	Resultados en los Distritos.....	86
9.	Conclusiones y Recomendaciones.....	88
9.1.	Conclusiones.....	88
9.2.	Recomendaciones	90
9.2.1.	Recomendaciones sobre el Método Temporal.....	90
9.2.2.	Recomendaciones sobre el Método Espectral.....	90
9.2.3.	Recomendaciones Generales	91
	Bibliografía	92

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Información de las estaciones banda ancha desplegadas en la cuenca de Santiago 9

Tabla 3.2. Información sobre los acelerógrafos de la ONEMI desplegados en la cuenca..... 12

Índice de Figuras

Figura 2.1. Geología superficial de la cuenca de Santiago propuesta por (Leyton et al., 2010).	5
Figura 3.1. Estaciones banda ancha desplegadas en la Cuenca de Santiago. Figura modificada de (Pastén et al., 2016).....	8
Figura 3.2. Distribución de distancias entre estaciones	11
Figura 3.3. Distribución de pares de estaciones con distancias entre estaciones menores a 10 km y al menos 1 día de registro común. La geología superficial en colores se explica en la Figura 3.1.	11
Figura 4.1. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo (a) ondas P y (b) ondas S. Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love.....	14
Figura 4.2. Velocidades de grupo u y fase c de una onda sinusoidal definida a partir de la suma de dos ondas armónicas con la misma amplitud y distinta velocidad de fase	17
Figura 4.3. Velocidad de fase para distintas longitudes de onda. (a) Semi-espacio homogéneo. (b) Medio estratificado. Adaptado de (Strobbia, 2003).....	17
Figura 4.4. Ancho de ventana Gaussiana según frecuencia utilizada por la Transformada de Stockwell.....	19
Figura 4.5. Esquema de frentes de ondas aleatorio en la superficie representado por flechas negras y su registro en dos receptores.....	23
Figura 4.6. Distribución de fuentes de ruido y su efecto sobre la FCR. (a) Distribución homogénea de fuentes de ruido, (b) y (c) distribución heterogénea de fuentes de ruido. Modificada de Stehly et al. (2006).....	25
Figura 4.7. Función de Bessel de primera especie y orden cero (en azul) y sus primeros 11 cruces por cero (rojo).	28
Figura 4.8. Problema directo (a) y problema inverso (b). Modificada de (Strobbia, 2003)	29

Figura 4.9. Celdas de Voronoi para un espacio de dos parámetros. (a) Iteración inicial, en gris se muestra la celda con el mejor ajuste. (b) La celda seleccionada en (a) es subdividida seleccionando dentro de ella la celda con menor ajuste. Modificada de (Wathelet, 2005).....	30
Figura 5.1. Tipos de blanqueamientos. (a) Espectro crudo. (b) Espectro con blanqueamiento absoluto. (c) Espectro blanqueado con una media móvil.	33
Figura 5.2. Ejemplos de normalización temporal. (a) señal cruda. (b) One Bit. (c) Media Móvil Absoluta.....	34
Figura 5.3. Cantidad de días comunes que han sido medidos por pares de estaciones.	35
Figura 5.4. Distribución de pares de estaciones con más de 30 días en común (línea azul) sobre la Cuenca de Santiago. Los rayos incompletos que siguen la dirección Este corresponden a rayos asociados a la estación DG36.	35
Figura 5.5. Respuesta en magnitud de un filtro Butterworth de orden 4 con frecuencia esquina de 0.01 Hz.....	36
Figura 5.6. Señal registrada por la estación DG24 el día 26 de enero del 2013. (a) Señal cruda. (b) Señal corregida mediante un filtro pasa alto tipo Butterworth de orden cuatro y frecuencia esquina de 0.01 Hz.....	37
Figura 5.7. Correlación cruzada entre -45 y 45 s.....	38
Figura 5.8. Respuesta en magnitud de los filtros Butterworth de cuarto orden utilizados en la metodología temporal. En rojo se muestran filtros de frecuencia central menor a 1 Hz y en azul filtros de frecuencia central mayor a 1 Hz.	39
Figura 5.9. Cálculo de correlación cruzada. (a) El filtro se aplica a los registros para luego calcular la correlación cruzada. (b) El filtro se aplica a la correlación cruzada de los registros.....	39
Figura 5.10. Cálculo de la razón señal ruido (RSR). Ventana de señal definida alrededor del máximo de la correlación cruzada, ventana del ruido definida en la cola de la señal y entre un desfase de tiempo igual a cero y el inicio de la ventana de la señal.	40
Figura 5.11. Largo de ventana de señal según frecuencia central f_c	41

Figura 5.12. Correlaciones cruzadas crudas entre las estaciones DG24 y DG19 para frecuencias centrales entre 1.59 y 4 Hz. Los círculos negros muestran los máximos positivos y negativos de cada FCR sin criterio, en rojo se muestra la ventana de la señal.....	42
Figura 5.13. Correlaciones cruzadas luego de aplicar criterio RSR.....	42
Figura 5.14. Ventanas ordenadas según RSR y frecuencia en estudio.....	43
Figura 5.15. Efecto del apilamiento sobre la FCR final apilando: (a) 1 ventana de 1440 [min] (b) 2 ventanas de 720 [min] (c) 8 ventanas de 180 [min] (d) 24 ventanas de 60 [min] y (e) 144 de 10 [min].....	44
Figura 5.16. Curva de dispersión en velocidad de grupo para las estaciones DG24 y DG19.....	45
Figura 5.17. Transformada de Stockwell normalizada de la FCR promedio para las estaciones DG24 y DG29.....	46
Figura 5.18. Mapa de velocidad-frecuencia a partir de la Transformada de Stockwell de la FCR para las estaciones DG24 y DG19. (a) Desfase negativo de la FCR. (b) Desfase positivo de la FCR. (c) FCR promedio de FCR con desfase negativo y positivo. En negro se muestra las máximas amplitudes para cada frecuencia.....	47
Figura 5.19. Comparación de velocidades de grupo medidas a partir de la TS con desfase positivo, negativo y promedio y la metodología temporal propuesta en este trabajo.....	47
Figura 6.1. Efecto del blanqueamiento en el espectro de correlación. (a) Espectro de correlación calculado con blanqueamiento de señales. (b) Espectro de correlación calculado sin blanqueamiento de señales. (c) Diferencia entre (a) y (b).	50
Figura 6.2. Parte real de los espectros de correlación para las estaciones DG24 y DG19. (a) Espectro de correlación de los 45 días disponibles. (b) Espectro de correlación promedio normalizado....	50
Figura 6.3. Efecto de la cantidad de ventanas apiladas sobre el espectro de correlación. (a) 180 ventanas de 360 [min], (b) 360 ventanas de 180 [min], (c) 1080 ventanas de 60 [min] y (d) 6480 ventanas de 10 [min].....	51

Figura 6.4. Detección de cruces por cero a partir de espectros de correlación (a) no suavizado y (b) suavizado.....	52
Figura 6.5. Familia de curvas de velocidad de fase obtenidas con el método espectral. La línea continua muestra la curva de dispersión escogida.....	53
Figura 7.1. FCR calculadas a diferentes frecuencias, en rojo se muestra el valor máximo de cada FCR. (a) FCR entre estaciones DG03 y DG24 calculadas para frecuencias centrales entre 0.5-1 Hz. (b) FCR entre estaciones DG24 y DG29 calculadas para frecuencias centrales entre 0.71 y 3.17 Hz. (c) FCR entre estaciones DG24-DG19 calculadas para frecuencias centrales entre 1.59 y 4 Hz.	54
Figura 7.2. Ejemplo de correlaciones asimétricas para bajas frecuencias y sus respectivas velocidades de grupo. (a) y (b) Estaciones DG33-DG29, (c) y (d) estaciones DG30-DG35, (e) y (f) estaciones DG03-DG36.....	55
Figura 7.3. Asimetría observada en las FCR para frecuencias menores 1 Hz. (a) Distribución de RSR según azimut, en rojo se muestran los RSR para desfases positivos y en azul para desfases negativos. (b) FCRs para $f_c = 0.35$ Hz ordenadas según distancia entre estaciones y con azimut entre los 45° y 135° , FCR en negro corresponden a acelerógrafos y azul instrumentos banda ancha.	56
Figura 7.4. Ejemplo de correlaciones simétricas y sus respectivas velocidades de grupo. (a) y (b) Estaciones DG24-DG19, (c) y (d) estaciones DG28-DG8 y (e) y (f) estaciones DG13-DG26. ...	58
Figura 7.5. Ejemplo de correlaciones asimétricas en alta frecuencia y sus respectivas velocidades de grupo. (a) y (b) Estaciones DG06-DG38, (c) y (d) estaciones DG13-DG40 y (e) y (f) estaciones DG26-DG40.....	59
Figura 7.6. Ejemplos de pares de estaciones sin correlación. (a) Estaciones DG21-DG27, (b) estaciones DG12-DG05, (c) estaciones DG16-DG26.	59
Figura 7.7. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.2. (a) DG33-DG29, (b) DG30-DG35 y (c) DG03-DG36.	60

Figura 7.8. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.4. (a) DG24-DG19, (b) DG28-DG08 y (c) DG13-DG26.	61
Figura 7.9. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.5. (a) DG06-DG38, (b) DG13-DG40 y (c) DG26-DG40.	61
Figura 7.10. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.6. (a) DG21-DG27, (b) DG12-DG05 y (c) DG16-DG26.	62
Figura 7.11. Medición de velocidad de grupo para longitudes de onda menores a tres veces la distancia entre estaciones para las estaciones DG24-DG19. (a) Velocidad de grupo calculada mediante la TS. (b) Variación de la razón distancia entre estación y longitud de onda. (c) Comparación de velocidad de fase calculada a partir de la velocidad de grupo y la Ecuación 4.6 y la obtenida con la metodología espectral.	63
Figura 7.12. Medición de velocidad de grupo para longitudes de onda menores a tres veces la distancia entre estaciones para las estaciones DG06-DG38. (a) Velocidad de grupo calculada mediante la TS. (b) Variación de la razón distancia entre estación y longitud de onda. (c) Comparación de velocidad de fase calculada a partir de la velocidad de grupo y la Ecuación 4.6 y la obtenida con la metodología espectral.	63
Figura 7.13. Medición de velocidad de grupo para longitudes de onda menores a tres veces la distancia entre estaciones para las estaciones DG01-DG31. (a) Velocidad de grupo calculada mediante la TS. (b) Variación de la razón distancia entre estación y longitud de onda. (c) Comparación de velocidad de fase calculada a partir de la velocidad de grupo y la Ecuación 4.6 y la obtenida con la metodología espectral.	64
Figura 7.14. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado, (b) cruces por ceros y (c) velocidad de fase para correlaciones temporales asimétricas que se muestran en la Figura 7.2 entre las estaciones DG33-DG29, DG30-35 y DG03-DG36.	65

Figura 7.15. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado, (b) cruces por ceros y (c) velocidad de fase para correlaciones temporales simétricas que se muestran en la Figura 7.4 entre estaciones DG24-DG19, DG28-08 y DG13-DG26.....	66
Figura 7.16. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado, (b) cruces por ceros y (c) velocidad de fase para correlaciones temporales simétricas que se muestran en la Figura 7.5 entre estaciones DG06-DG38, DG13-40 y DG26-DG40.....	66
Figura 7.17. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado y (b) cruces por ceros en estaciones sin correlación temporal que se muestran en Figura 7.6 entre las estaciones DG21-DG27, DG12-05 y DG16-DG26.....	67
Figura 7.18. Comparación de velocidades de grupo obtenidas a partir de la velocidad de fase y la Transformada S para las estaciones DG24-DG29.	68
Figura 7.19. Comparación entre velocidad de fase obtenida a partir de la velocidad de grupo y la velocidad de fase calculada con la metodología espectral. Pares de estaciones : (a) DG28-DG31, (b) DG01-DG08, (c) DG11-DG29, (d) DG11-DG10, (e) DG13-DG26, (f) DG06-DG38, (g) DG30-DG08 y (h) DG26-DG35.	69
Figura 7.20. Comparación entre velocidad de fase obtenida a partir de la velocidad de grupo y la velocidad de fase calculada con la metodología espectral. Pares de estaciones : (a) DG13-DG35, (b) DG05-DG06, (c) DG03-DG24, (d) DG24-DG29, (e) DG01-DG31, (f) DG24-DG11, (g) DG28-DG08 y (h) DG13-DG40.	70
Figura 7.21. Perfiles de velocidad de onda de corte invertidos, curvas de dispersión teórica y <i>misfits</i> para las estaciones DG01-DG31. Inversión calculada a partir (a), (b) y (c) Velocidad de fase. (d), (e) y (f) Velocidad de grupo. (g), (h), (i) y (j) Velocidad de fase y grupo.....	71
Figura 7.22. Perfiles de velocidad de onda de corte invertidos, curvas de dispersión teórica y misfit para las estaciones DG06-DG38. Inversión calculada a partir (a), (b) y (c) Velocidad de fase. (d), (e) y (f) Velocidad de grupo. (g), (h), (i) y (j) Velocidad de fase y grupo.....	72

Figura 7.23. Perfiles de velocidad de onda de corte invertidos, curvas de dispersión teórica y misfit para las estaciones DG24-DG19. Inversión calculada a partir (a), (b) y (c) Velocidad de fase. (d), (e) y (f) Velocidad de grupo. (g), (h), (i) y (j) Velocidad de fase y grupo.....	72
Figura 7.24. Distribución de tipo de correlaciones sobre la cuenca y sectorización de la misma. Los cuadrados en negro indican los distritos donde la velocidad de grupo y fase fueron calculadas. Modificado de Pasten et al. (2016).....	73
Figura 7.25. Velocidad de grupo de las estaciones que componen los distritos Este, Centro y Sur.	74
Figura 7.26. Velocidad de grupo de las estaciones que componen los distritos Este, Centro y Sur.	74
Figura 7.27. Curvas de velocidades de grupo para los pares de estaciones que componen el distrito Central.....	76
Figura 7.28. Curvas de velocidades de fase para los pares de estaciones que componen el distrito Central.....	76
Figura 7.29. Curvas de velocidades de fase utilizando la información en alta frecuencia proporcionada por la velocidad de grupo, distrito Centro.	77
Figura 7.30. (a) Perfiles de velocidad de onda de corte, (b) curvas de dispersión teórica y (c) misfit obtenidos a partir de la inversión de la curva promedio mostrada en Figura 7.29 para el distrito Centro.....	77
Figura 7.31. Curvas de velocidades de grupo para los pares de estaciones que componen el distrito Este.....	79
Figura 7.32. Curvas de velocidades de fase para los pares de estaciones que componen el distrito Este.....	79
Figura 7.33. Curvas de velocidades de fase utilizando la información en alta frecuencia proporcionada por la velocidad de grupo, distrito Este.	80

Figura 7.34. (a) Perfiles de velocidad de onda de corte, (b) curvas de dispersión teórica y (c) misfit obtenidos a partir de la inversión de la curva promedio mostrada en Figura 7.32 para el distrito Este..... 80

Figura 7.35. Curvas de velocidades de grupo para los pares de estaciones que componen el distrito Sur..... 81

Figura 7.36. Curvas de velocidades de fase para los pares de estaciones que componen el distrito Sur..... 82

Figura 7.37. Curvas de velocidades de fase utilizando la información en alta frecuencia proporcionada por la velocidad de grupo, distrito Sur..... 82

Figura 7.38. (a) Perfiles de velocidad de onda de corte, (b) curvas de dispersión teórica y (c) misfit obtenidos a partir de la inversión de la curva promedio mostrada en Figura 7.37 para el distrito Sur.
..... 83

1. Introducción

La cuenca de Santiago concentra cerca del 40% de la población de Chile, además de ser la capital política y económica del país. La cuenca está localizada en una zona de subducción donde terremotos de gran magnitud ocurren frecuentemente. Durante los últimos dos terremotos, el de Valparaíso 1985 de Mw 8 y el del Maule 2010 de Mw 8.8, las intensidades MSK reportadas variaron entre VI y IX, y fueron asociadas principalmente a las características geológicas locales (Astroza et al., 2012).

La respuesta sísmica de la cuenca es fuertemente controlada por las características de sitio, tales como la rigidez del suelo y la profundidad del basamento rocoso (Faccioli, 1991). El efecto de sitio observado en la cuenca ha sido tema de estudio de diversos investigadores. Utilizando una red de acelerógrafos desplegados en roca y en distintos tipos de suelos Midorikawa et al. (1991) y Cruz et al. (1993) estimaron coeficientes de amplificación como una medida cuantitativa del efecto de sitio, mientras que Pasten (2007) y Bonnefoy-Claudet et al. (2009) caracterizan los depósitos de suelo utilizando el método de las razones espectrales H/V. Posteriormente, Pilz et al. (2010) desarrolla un modelo 3D de velocidad de onda de corte para la zona centro-norte, constituida principalmente por sitios con razones espectrales pronunciadas. En una mayor escala Toledo (2008) implementa un modelo de elementos espectrales para modelar la respuesta sísmica de la cuenca, sin obtener resultados concluyentes debido en gran parte a la simplicidad del modelo de velocidades utilizado, el cual es crítico para una evaluación detallada de la respuesta sísmica de la cuenca.

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes métodos geofísicos de carácter activo y pasivo para obtener curvas de dispersión. *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW) (Stokoe et al., 1989) y *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) (Park et al., 1998) son ejemplos de métodos activos, los cuales utilizan ondas generadas por una fuente activa. Por otro lado, los métodos pasivos, tales como, *Spatial Autocorrelation* (SPAC) (Aki, 1957) y *Refraction Microtremor* (REMI) (Louie, 2001) utilizan la información contenida en el ruido ambiental (Horike, 1985). Tanto los métodos pasivos como activos se basan en la dispersión de las ondas superficiales (Aki and Richards, 2002) y tienen por objetivo obtener el perfil de velocidades de onda de corte del medio estudiado (Wathelet et al., 2004). En general, estos métodos son capaces de obtener la información dispersiva de las ondas hasta 80 m de profundidad aproximadamente

debido a la distancia utilizadas en los arreglos de sensores y la energía necesaria para caracterizar hasta dicha profundidad (Jongmans and Demanet, 1993). Por lo anterior, es que depósitos sedimentarios profundos como la cuenca de Santiago, la cual tiene una profundidad promedio de 250 m, requieren la implementación de metodologías capaces de caracterizar hasta dicha profundidad.

Dada esta problemática, esta tesis propone implementar un método conocido como Correlación Cruzada de Ruido Sísmico (Shapiro and Campillo, 2004) para caracterizar la parte más profunda de la cuenca de Santiago y desarrollar un modelo de velocidad de onda de corte. La correlación cruzada de dos señales es una medida de la similitud que existe entre ellas (Bendat and Piersol, 2011). Se puede demostrar que la correlación cruzada de ruido sísmico medido en la superficie durante un largo periodo de tiempo es un buen estimador de la componente superficial de la función de Green (Roux et al., 2005). La información elástica del medio que existe entre el receptor y el emisor está directamente relacionada con la función de Green, es por ello que calculando la velocidad de fase o grupo de la correlación cruzada es posible caracterizar las propiedades dispersivas del medio. Este método se utiliza principalmente en el estudio de las características dispersivas de ondas a escala continental (100-1000 [km]) (Stehly et al., 2006; Poli et al., 2012) y en un rango de frecuencias menores a 0.1 [Hz]. Por lo tanto, esta tesis propone modificaciones a la metodología para obtener información de la propiedades dispersivas de los materiales en un rango de frecuencias de interés para la ingeniería civil (0.1–10 [Hz]) y a una escala de cuenca (Picozzi et al., 2009; Hannemann et al., 2014).

1.1. Objetivo General

Implementar una metodología capaz de obtener curvas de dispersión en velocidad de fase y grupo entre dos sensores mediante la correlación cruzada de ruido sísmico en un rango de frecuencia de 0.1-10 [Hz] y escala de cuenca (hasta 1 [km]). Además, obtener perfiles de velocidad de onda de corte a partir de un proceso de inversión de las curvas de dispersión.

1.2. Objetivos Específicos

1. Entender las ventajas y desventajas de la correlación cruzada de ruido sísmico para la caracterización sísmica de la cuenca de Santiago con el fin de establecer recomendaciones respecto a su correcta implementación.
2. Comparar distintas metodologías de correlación cruzada para la obtención de curva de dispersión en velocidad de fase y grupo con el fin de establecer aquella que permita investigar el rango de frecuencias y longitudes de onda relevantes para la escala de la cuenca de Santiago.
3. Establecer sectores de estudios con propiedades dispersivas similares que permitan posteriormente, obtener perfiles de velocidad de onda de corte representativos de cada sector.
4. Calcular perfiles de velocidad de onda de corte a partir de las curvas de dispersión, estableciendo expresiones para la variación de la velocidad en profundidad en los distintos sectores estudiados.

1.3. Estructura de la Tesis

Esta investigación se divide en 9 capítulos, además de la introducción. El Capítulo 2 describe las características geomorfológicas, y los tipos de suelos presentes en la cuenca de Santiago. El Capítulo 3 presenta los tipos, características y distribución sobre la cuenca de los instrumentos banda ancha y acelerógrafos utilizados en este estudio. En el Capítulo 4, se detallan los aspectos teóricos sobre la correlación cruzada de ruido sísmico y se explican conceptos tales como: características de las ondas sísmicas, propiedades dispersivas, velocidad de grupo, velocidad de fase, correlación cruzada, función de Green y la relación de esta última con las propiedades elásticas del medio y los principales conceptos asociados al proceso de inversión para la obtención de perfiles de velocidad de onda de corte. El Capítulo 5 detalla la metodología temporal utilizada para la extracción de velocidad de grupo a partir del análisis de la correlación cruzada en el espacio del tiempo y la validación del método a partir de la Transformada de Stockwell. El Capítulo 6 detalla la metodología espectral utilizada para la extracción de velocidad de fase a partir de un análisis espectral de la correlación cruzada. El Capítulo 7 presenta los resultados de las distintas metodologías propuestas en la investigación para la obtención de las curvas de dispersión y su

posterior inversión. El Capítulo 8 analiza y discute los resultados obtenidos mediante las metodologías espectral y temporal, además de analizar los perfiles obtenidos. Finalmente, el Capítulo 9 resume las principales conclusiones y recomendaciones de esta tesis.

2. La Cuenca de Santiago

2.1. Características Geomorfológicas

La cuenca de Santiago ($33^{\circ}00'S$ - $33^{\circ}55'S$ y $70^{\circ}30'W$ - $71^{\circ}0'W$) ubicada en la parte central de Chile es una depresión irregular, con una longitud norte sur de 90 km y un ancho este-oeste de 40 km. La cuenca forma parte de la Depresión Intermedia, dominio geomorfológico con orientación nortesur localizado entre la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa y limitada al norte por el cordón el Manzano y al sur por los cerros de Angostura de Paine (Yañez et al., 2015).

El basamento de la cuenca correspondería a rocas volcánicas (Charrier et al., 2002), el cual ha sido rellenado principalmente por depósitos aluviales y fluviales provenientes de los ríos Mapocho y Maipo. En menor cantidad se encuentran gravas angulares a sub-angulares en medio de una matriz fina correspondiente a depósitos coluviales en los bordes de la cuenca, mientras que sedimento lacustre fino es localizado en la parte noroeste y suroeste de la cuenca. A su vez, depósitos piroclásticos rellenan parte de la zona centro-oeste de la cuenca. La Figura 2.1 muestra la geología superficial propuesta por Leyton et al. (2010).

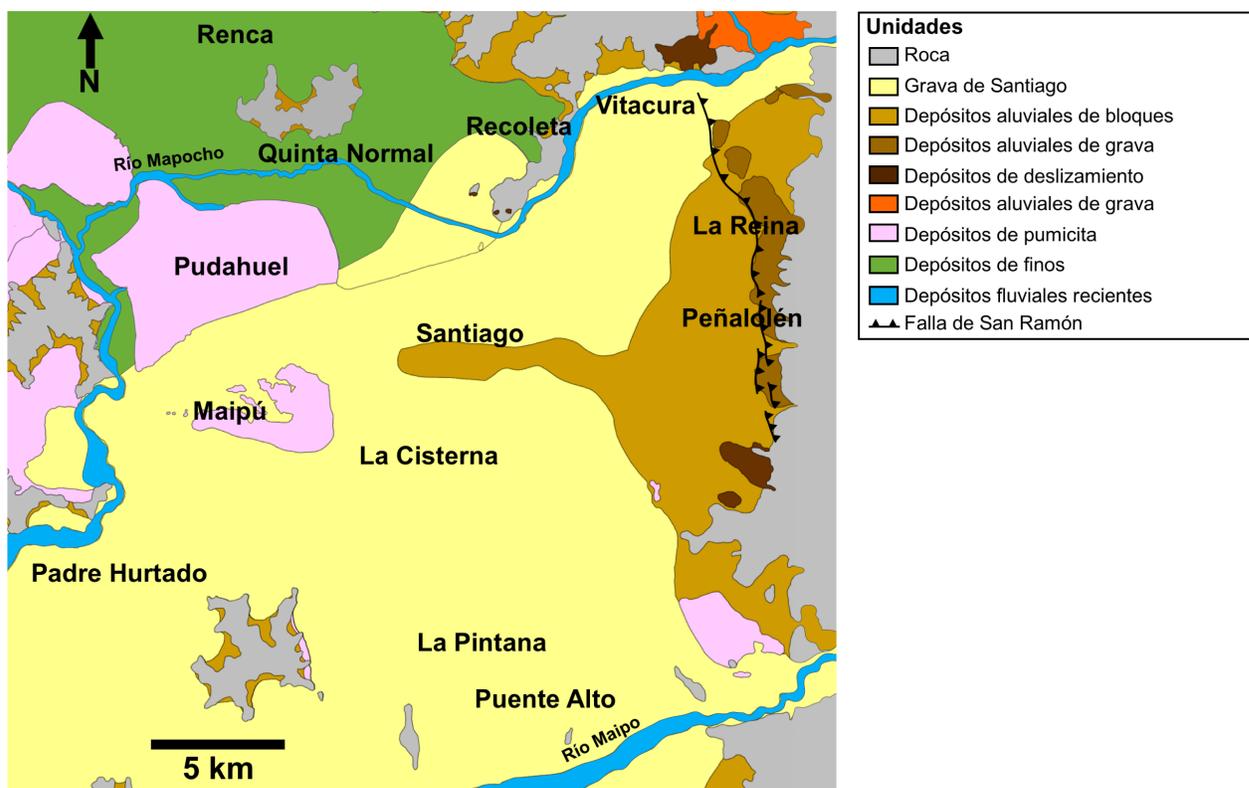


Figura 2.1. Geología superficial de la cuenca de Santiago propuesta por Leyton et al. (2010).

Estudios gravimétricos han detectado una profundidad promedio de 300 metros, y tres grandes depocentros con profundidades mayores a los 500 metros ubicados en Pudahuel, Lampa y Peñalolén (Yañez et al., 2015).

2.2. Suelos de la Cuenca de Santiago

La cuenca de Santiago presenta cuatro principales tipos de suelos (Figura 2.1) con propiedades que inciden en el comportamiento sísmico. A continuación se presentan los tipos de suelos junto con sus características.

2.2.1. Gravas

Las gravas de Santiago son depósitos aluviales sedimentarios originados por los aportes de los ríos Maipo y Mapocho. Son los sedimentos de mayor extensión sobre la cuenca y abarcan principalmente la zona centro y suroeste de la misma. Estos depósitos se caracterizan por tener partículas gruesas de hasta 0.3 m de diámetro, porcentaje de finos de baja plasticidad cercano al 5% y compacidad de alta a muy alta. Estas propiedades sumadas a su gran rigidez y altas

velocidades de onda de corte (900 m/s) hacen de estos depósitos lugares idóneos para la construcción y asentamiento humano. Estos depósitos se caracterizan por tener razones espectrales H/V planas (Pasten, 2007).

2.2.2. Conos de Deyección

Depósitos formados por material desprendido de quebradas y arrastrados por flujos de agua. Se encuentran principalmente en los pies de quebradas alineadas en dirección este-oeste en forma de cono. Estos sedimentos están constituidos por partículas subangulares inmersas en una matriz de finos y arena. Debido a su mecanismo de depositación, es un sector bastante heterogéneo donde se han medido velocidades de onda de corte entre 400 y 800 m/s. Las razones espectrales de estos depósitos varían de marcadas a planas (Pasten, 2007).

2.2.3. Depósitos de Cenizas Volcánicas

Depósitos de origen volcánico, formados por ceniza volcánica, piedra pómez y fragmentos líticos. Se extiende sobre el sector poniente y norponiente de la cuenca formando en algunos sectores sedimentos con espesores mayores a 20 m. La velocidad de onda de corte de estos materiales varía entre 500 y 750 m/s y sus depósitos poseen razones espectrales H/V marcadas (Pasten, 2007).

2.2.4. Finos del Norte de Santiago

Depósitos que se extienden principalmente en la zona noroeste de la cuenca, alcanzando las localidades de Colina y Batuco. Estos sedimentos están constituidos por limos y arcillas de plasticidad media, con intercalaciones de lentes gravosos y arenosos. Se caracterizan por tener velocidades de onda de corte cercana a los 450 m/s y sus depósitos poseen razones espectrales H/V marcadas (Pasten, 2007). En estos depósitos se reportaron intensidades MSK entre VII y IX para el terremoto del Maule 2010 y Valparaíso 1985.

3. Estaciones Sismológicas

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron registros de ruido sísmico de estaciones banda ancha proporcionados por el Centro Sismológico Nacional (CSN) y acelerógrafos desplegados en la cuenca por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI). Las características de los instrumentos utilizados se describen a continuación.

3.1. Estaciones de Banda Ancha

Las estaciones banda ancha utilizadas están compuestas por un digitalizador Kinometrics Quanterra Q330, una unidad registradora de datos Kinometrics Marmot, un sismómetro de banda ancha Nanometrics Trillium Compacto de 120s y una antena GPS. Las estaciones miden en tiempo continuo en tres componentes orientadas en las direcciones norte-sur, este-oeste y vertical, a una tasa de 100 muestra por segundo.

El arreglo de estaciones sismológicas comprende un total de 31 estaciones distribuidas en la cuenca sobre distintos tipos de suelo. Dicho arreglo comenzó a medir en Julio de 2013 terminando su periodo de mediciones en su mayoría en abril del 2014, almacenando nueve meses de medición en continuo exceptuando algunas estaciones que hasta la fecha continúan midiendo (DG38).

Los registros fueron originalmente almacenados en formato miniSEED. Con el fin de reducir los tiempos de lectura con el software Matlab, todos los archivos se transformaron a formato SAC (el procesamiento es 100 veces más rápido).

La Tabla 3.1 muestra la comuna, las coordenadas UTM, la fecha de inicio de registro, la fecha de término de registro y la cantidad total de días registrados por cada una de las estaciones banda ancha utilizadas en este trabajo. La distribución de las estaciones banda ancha sobre la cuenca junto con su razón espectral H/V se muestran en la Figura 3.1. Los detalles acerca del cálculo y clasificación de las razones espectrales se encuentran en Pastén et al. (2016).

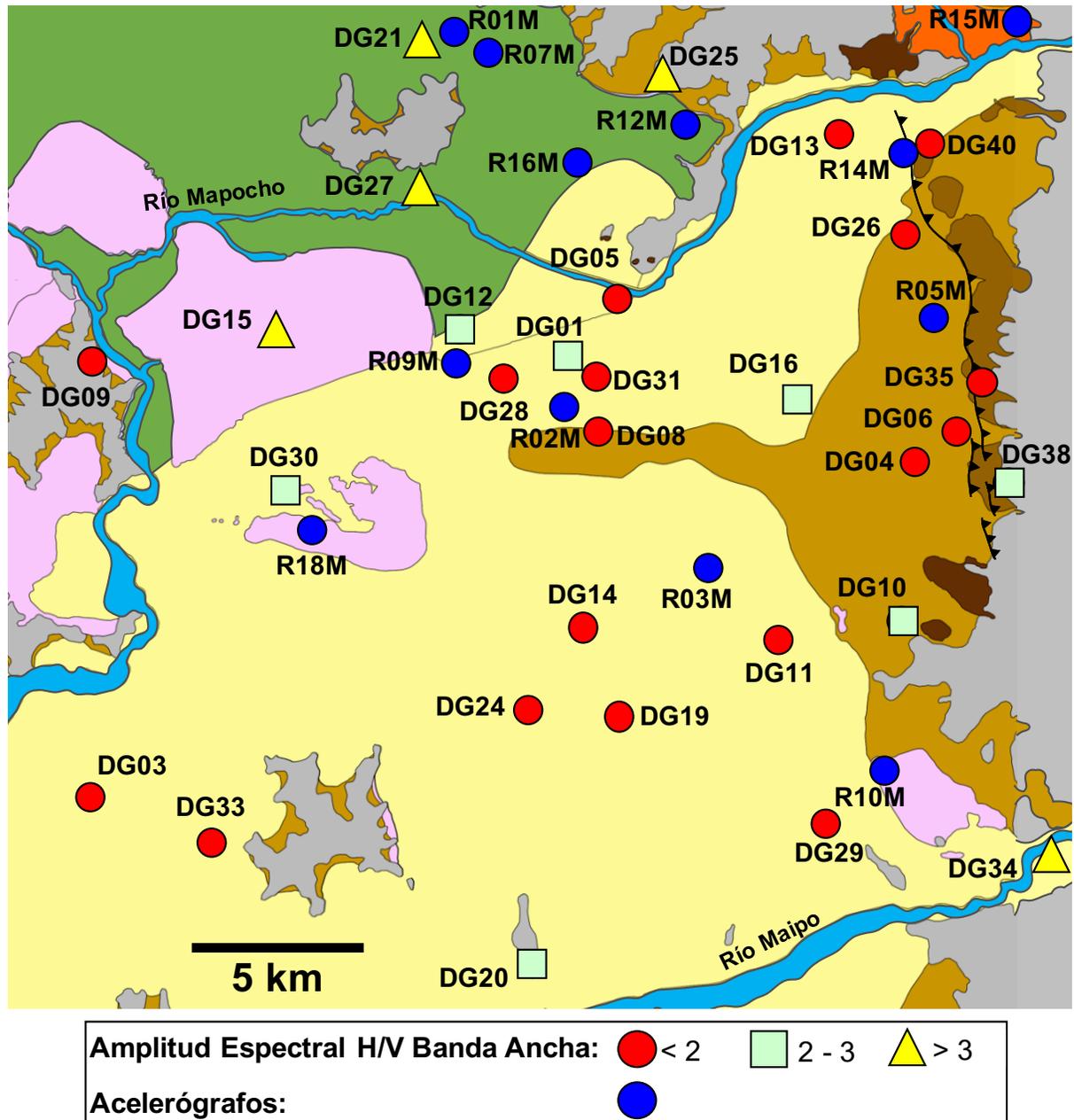


Figura 3.1. Estaciones banda ancha desplegadas en la Cuenca de Santiago. Figura modificada de Pastén et al. (2016).

Se observa de la Figura 3.1 que las estaciones banda ancha se encuentran distribuidas sobre los distintos depósitos de suelo presentes en la cuenca, siendo la grava de Santiago el depósito con la mayor cantidad de estaciones. A su vez, existe poca cobertura en los depósitos de ceniza volcánica y finos del norte. Si bien la red banda ancha presenta una buena distribución geográfica, la distancia entre pares de estaciones es una fuerte limitante en los análisis realizados en esta investigación. La menor distancia entre estaciones corresponde a 1 km y pertenece al par DG01 y DG31 ubicados en

la zona centro de la cuenca, mientras que las estaciones DG09 y DG36 son las más alejadas con una distancia entre estaciones de 48 km.

Tabla 3.1. Información de las estaciones banda ancha desplegadas en la cuenca de Santiago

Estación	Comuna	Latitud UTM	Longitud UTM	Fecha primer registro	Fecha último registro	Días Registrados
DG01	Santiago	345366	6296781	08-06-2013	19-06-2014	371
DG03	Padre Hurtado	330386	6282479	07-08-2013	02-04-2014	239
DG04 ^a	Peñalolén	356842	6293617	28-09-2013	10-10-2013	13
DG05	Santiago	347219	6298624	30-10-2013	30-12-2013	60
DG06	Peñalolén	358113	6294593	03-07-2013	19-06-2014	201
DG08	San Miguel	346565	6294457	11-10-2013	31-12-2013	71
DG09	Pudahuel	330455	6296305	08-10-2013	23-03-2014	122
DG10	La Florida	356395	6288600	14-08-2013	18-01-2014	50
DG11	La Florida	352387	6287947	26-09-2013	01-04-2014	181
DG12	Estación Central	342119	6297639	27-09-2013	23-03-2014	96
DG13	Vitacura	354245	6303995	26-09-2013	27-11-2014	226
DG14 ^a	La Cisterna	346206	6288144	11-09-2013	07-12-2013	9
DG15	Pudahuel	336175	6297324	01-10-2013	24-03-2014	162
DG16	Ñuñoa	352982	6295521	04-10-2013	29-01-2014	102
DG18 ^b	Calera de Tango	330395	6275190	05-10-2013	18-01-2014	107
DG19	La Pintana	347368	6285398	25-10-2013	02-04-2014	162
DG20	San Bernardo	344684	6277372	04-10-2013	02-04-2014	181
DG21	Quilicura	340766	6306692	06-10-2013	24-02-2014	90
DG24	El Bosque	344419	6285545	04-10-2014	08-02-2014	74
DG25	Huechuraba	348512	6305725	28-10-2013	20-03-2014	146

Estación	Comuna	Latitud UTM	Longitud UTM	Fecha primer registro	Fecha último registro	Días Registrados
DG26	Las Condes	356294	6300837	03-10-2013	29-03-2014	177
DG27	Quinta Normal	340775	6301915	25-10-2013	06-03-2014	134
DG28	Estacion Central	343634	6296054	24-10-2013	02-04-2014	69
DG29	Puente Alto	354109	6282019	25-10-2013	02-04-2014	65
DG30	Maipú	336615	6292476	25-10-2013	03-04-2014	162
DG31	Santiago	346472	6296156	24-10-2013	03-04-2014	162
DG33	Calera de Tango	334375	6281114	14-12-2013	24-03-2014	101
DG34	Pirque	361221	6281111	15-11-2013	23-03-2014	80
DG35	Peñalolén	358865	6296113	27-10-2013	02-04-2014	143
DG36 ^c	San José de Maipo	374642	6277605	23-11-2013	03-04-2014	132
DG38	Peñalolén	359710	6292962	11-07-2013	22-04-2014	261
DG40	Las Condes	357073	6303737	01-01-2014	19-06-2014	156

Nota: (a) Estaciones no utilizadas en el cálculo de correlaciones cruzadas debido a la cantidad de días registrados. (B) Estaciones cuyas trazas están defectuosas. (c) Estación no mostrada en la Figura 3.1.

La Figura 3.2 muestra la distribución de distancia entre pares de estaciones banda ancha desplegados sobre la cuenca. De la Figura 3.2 se observa que los pares distanciados a más de 10 km representan el 77% del total. Para esta investigación es de interés aquellos pares que tienen una distancia entre estaciones menor a 10 km, dichos pares representan el 23% del total. Además de conocer la cantidad de pares de estaciones con distancias menores a 10 km, es importante establecer la distribución geográfica de dichos pares sobre la cuenca. Esta información se muestra en la Figura 3.3.

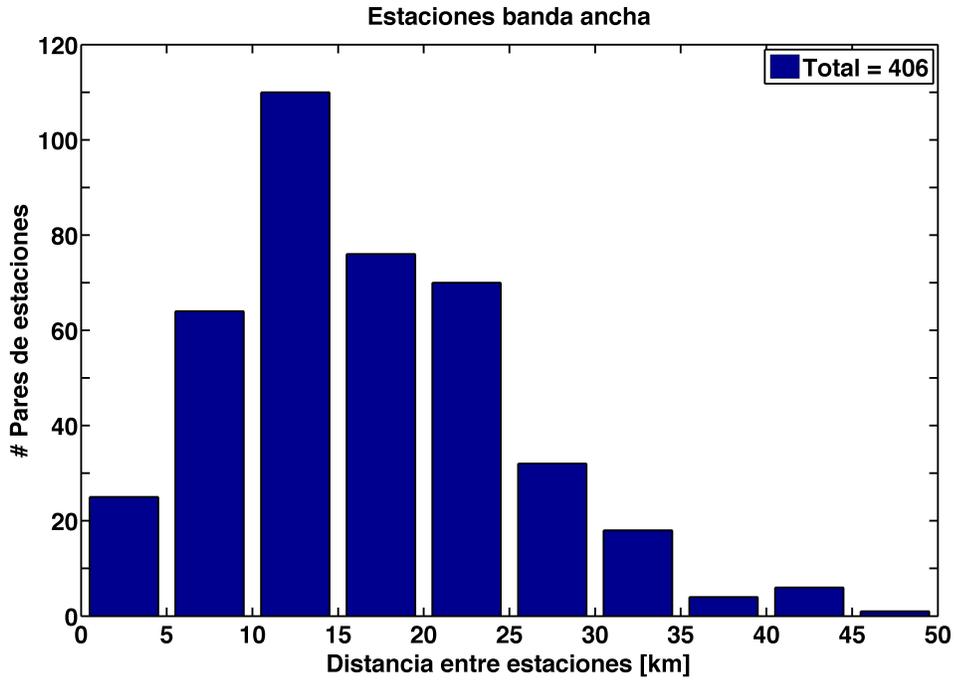


Figura 3.2. Distribución de distancias entre estaciones

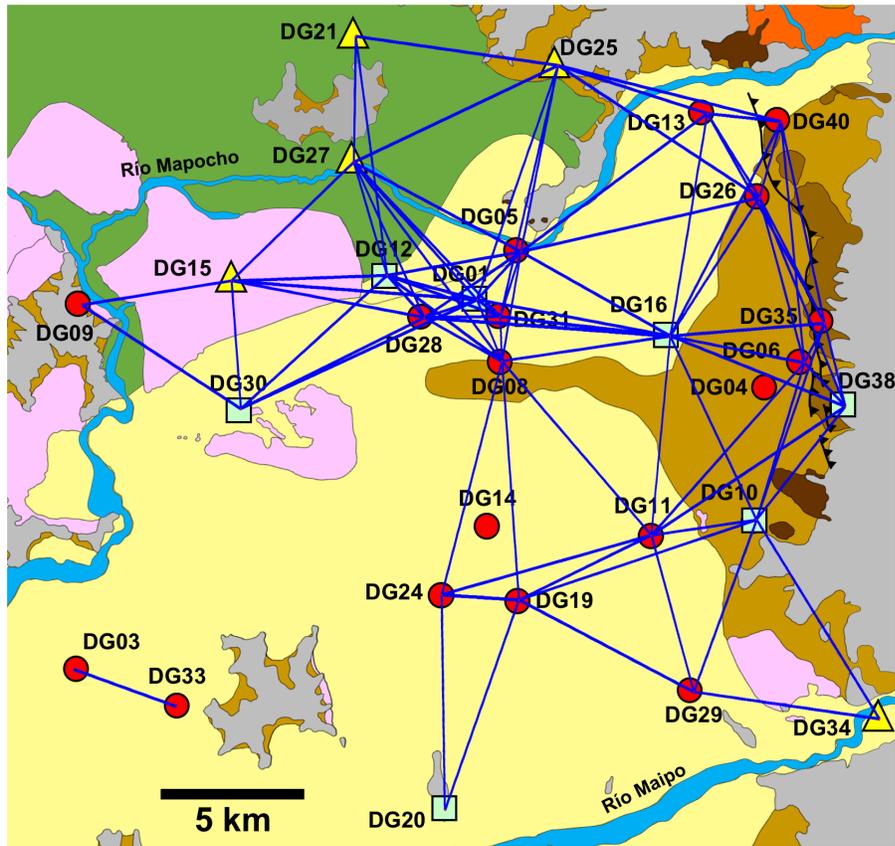


Figura 3.3. Distribución de pares de estaciones con distancias entre estaciones menores a 10 km y al menos 1 día de registro común. La geología superficial en colores se explica en la Figura 3.1.

La Figura 3.3 muestra que las estaciones separadas a menos de 10 [km] tienen una mala cobertura en la zona noroeste de la cuenca, mientras que la zona con mayor cobertura es la zona central. En cuanto a los depósitos de suelo, se observa que los depósitos rígidos tales como la grava de Santiago, depósitos aluviales y depósito de deslizamiento presentan la mayor cobertura de rayos, mientras que la cobertura en los depósitos de ceniza volcánica y finos del norte es escasa.

3.2. Acelerógrafos

La Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI) desplegó sobre la cuenca de Santiago una red de 17 acelerógrafos Kinematics Basalt los cuales están compuestos por acelerómetros triaxiales EpiSensor Force Balance, un digitalizador de 24 Bits, una unidad registrado de 4 a 64 GB y una antena GPS. La frecuencia de muestreo de los instrumentos es de 200 muestras por segundo y registraron en forma continua las componentes norte-sur, este-oeste y vertical. La Tabla 3.2 muestra la comuna, latitud, longitud, fecha del primer registro, fecha del último registro y días registrados de cada uno de los acelerógrafos utilizados en este trabajo. La ubicación de las estaciones en el área de estudio se muestra en la Figura 3.1. Si bien la red comenzó sus mediciones en el año 2012, los registros utilizados en este estudio pertenecen a los años 2013 y 2014.

Tabla 3.2. Información sobre los acelerógrafos de la ONEMI desplegados en la cuenca.

Estación	Comuna	Latitud UTM	Longitud UTM	Fecha inicio registro	Fecha termino registro	Días Registrados
R01M	Quilicura	341691	6307287	14/03/2012	24/09/2013	24
R02M	Santiago	345774	6295065	01/12/2013	29/03/2014	89
R03M	La Florida	350329	6289921	01/12/2013	07/04/2014	89
R05M	La Reina	357204	6298283	08/11/2013	11/12/2013	32
R07M	Conchalí	342797	6306726	27/04/2012	18/01/2014	70
R08M ¹	Curacaví	302862	6302195	10/11/2013	14/12/2013	33
R09M	Santiago	341962	6296578	25/12/2011	15/12/2013	34
R10M	Puente Alto	356013	6283492	04/01/2012	13/12/2013	31

Estación	Comuna	Latitud UTM	Longitud UTM	Fecha inicio registro	Fecha termino registro	Días Registrados
R12M	Huechuraba	349177	6304447	14/11/2013	11/02/2014	89
R13M ¹	Lampa	335331	6323428	25/11/2013	03/01/2014	38
R14M	Las Condes	356196	6303617	25/11/2013	03/01/2014	60
R15M	Lo Barnechea	359658	6308020	03/01/2012	08/01/2014	42
R16M	Independencia	345755	6303133	27/04/2012	20/02/2014	85
R17M ¹	Colina	343068	6324666	14/03/2012	02/01/2014	36
R18M	Maipú	337571	6290977	17/05/2012	30/01/2014	61
R19M ¹	Melipilla	294505	6269065	11/02/2014	19/03/2014	96
R20M ¹	Talagante	321126	6273303	13/12/2013	04/03/2014	80

Nota: (1) Estaciones no mostradas en la Figura 3.1.

4. Fundamentos Teóricos

4.1. Ondas Sísmicas

Cuando un terremoto ocurre, ondas de cuerpo y ondas superficiales son generadas (Aki and Richards, 2002). Las ondas de cuerpo compresionales (ondas P) y de corte (ondas S) viajan a través del interior de la tierra (Udías, 2000). Las ondas P, conocidas como ondas primarias, comprimen y dilatan el medio por el cual viajan en la dirección de su propagación (Figura 4.1a). En cambio, las ondas S, o secundarias, se propagan con movimientos en un plano perpendicular a la dirección de su propagación (Figura 4.1b).

Las ondas superficiales de tipo Rayleigh y Love surgen de la interacción entre las ondas de cuerpo, la superficie de la tierra y una capa superficial (Kramer, 1996). Las ondas Rayleigh se generan por la interacción de las ondas P y SV (ondas S vertical) y generan un movimiento de partícula horizontal y vertical que está contenido en el plano de propagación de la onda como un movimiento elíptico (Figura 4.1c). Por otra parte, las ondas Love son el resultado de la interacción de las ondas SH con la superficie, lo que implica que el movimiento de partícula es puramente de corte y perpendicular al plano de propagación de la onda (Figura 4.1d).

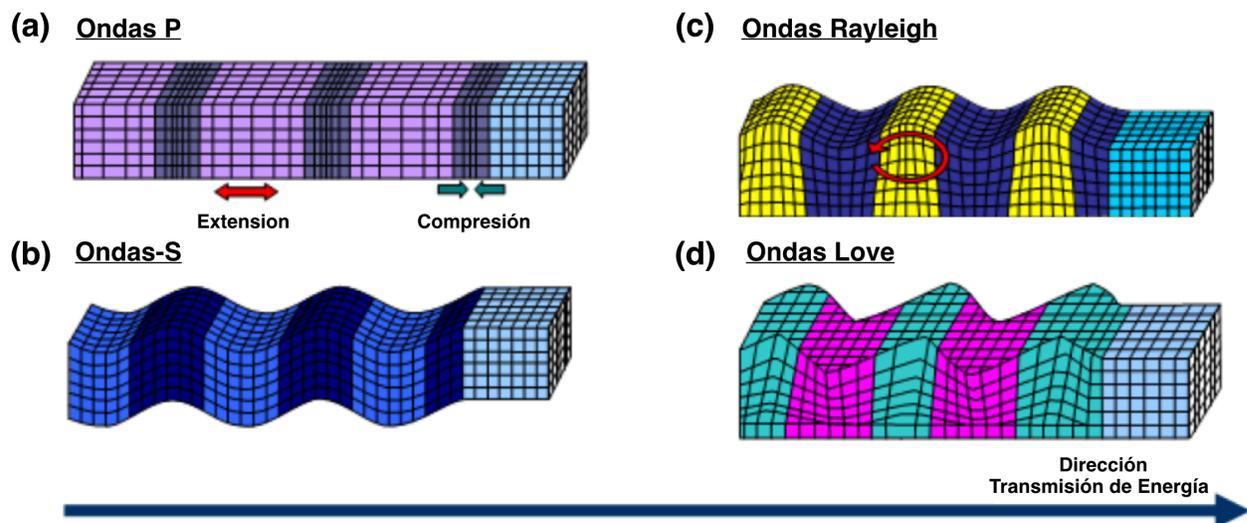


Figura 4.1. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo (a) ondas P y (b) ondas S. Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love.

4.2. Velocidades de fase y grupo

Los registros sísmicos son una muestra en el tiempo de un frente de ondas medido en un instrumento ubicado en una posición fija. Es de interés usar esta información para estudiar la fuente que genera el frente de ondas y las propiedades elásticas del medio por el cual se propaga dicho frente. Una de las formas de estudiar estas características es a través de la velocidad de fase o grupo de las ondas a distintas frecuencias.

Con el objetivo de introducir los conceptos de velocidad de grupo y fase, consideremos una onda armónica viajando en la dirección “x” con amplitud A_0 , número de onda k y frecuencia angular w (Udías, 2000). La ecuación de la onda armónica es:

$$s(x, t) = A_0 \sin(kx - wt) \quad (4.1)$$

Donde $w=2\pi/T$, $k=2\pi/\lambda$, $T=1/f=2\pi/w$, siendo f , T y λ la frecuencia, periodo y longitud de onda, respectivamente.

Si se considera la superposición de dos ondas armónicas, como la de la Ecuación 4.1, de igual amplitud A_0 , que se propagan a lo largo del eje x , con velocidades $c_1 = w_1/k_1$ y $c_2 = w_2/k_2$ y se suman, se tiene:

$$S(x, t) = s_1(x, t) + s_2(x, t) = 2A_0 \cos(k_p - w_p t) \sin(k_m x - w_m t) \quad (4.2)$$

Donde $k_m = (k_1 + k_2)/2$, $w_m = (w_1 + w_2)/2$, $k_p = (k_1 - k_2)/2$ y $w_p = (w_1 - w_2)/2$. La Ecuación 4.2 muestra que la superposición de dos ondas armónicas es otra onda armónica de amplitud modulada $2A_0 \cos(k_p - w_p t)$ y velocidad $c_m = \frac{w_m}{k_m}$, llamada velocidad de fase.

La velocidad de fase es la velocidad a la cual la forma de la función se mueve, es decir, la velocidad a la cual alguna fase fija del ciclo se desplaza (Udías, 2000) (Figura 4.2). En general, la velocidad de fase c de una onda de frecuencia w y número de onda k se expresa como:

$$c = \frac{w}{k} \quad (4.3)$$

Por otro lado, la velocidad a la cual la onda propaga la energía se denomina velocidad de grupo y corresponde a la velocidad con la cual la envolvente de la onda se desplaza (Figura 4.2). Matemáticamente, la velocidad de grupo se define como:

$$u = \frac{dw}{dk} \quad (4.4)$$

Si se deriva la Ecuación 4.3 con respecto a la frecuencia angular y se reemplaza la Ecuación 4.4, se obtiene:

$$u = \frac{c}{1 - \frac{w}{c} \frac{dc}{dw}} \quad (4.5)$$

La Ecuación 4.5 indica que se puede obtener la velocidad de grupo a partir de la velocidad de fase, pero el proceso inverso no se puede realizar ya que al integrar la velocidad de grupo aparece una constante desconocida. Dicha problemática puede ser resuelta si se conoce la velocidad de fase en alguna frecuencia específica.

Si la información disponible es la velocidad de grupo y se conoce la velocidad de fase en alguna frecuencia w_n , es posible obtener la velocidad de fase mediante:

$$c(w) = \frac{w}{\int_{w_n}^w \frac{1}{u(w)} + w_n \frac{1}{c(w_n)}} \quad (4.6)$$

Debido a que en esta tesis se trabaja con señales discretas en el tiempo, la obtención de las velocidades de fase y grupo también son de carácter discreto. Para utilizar las Ecuaciones 4.5 y 4.6 es necesario tener curvas de velocidad de fase y grupo suaves y bien discretizadas para evitar cambios de pendientes bruscos en el caso que se derive, o áreas muy extensas en el caso que se integre.

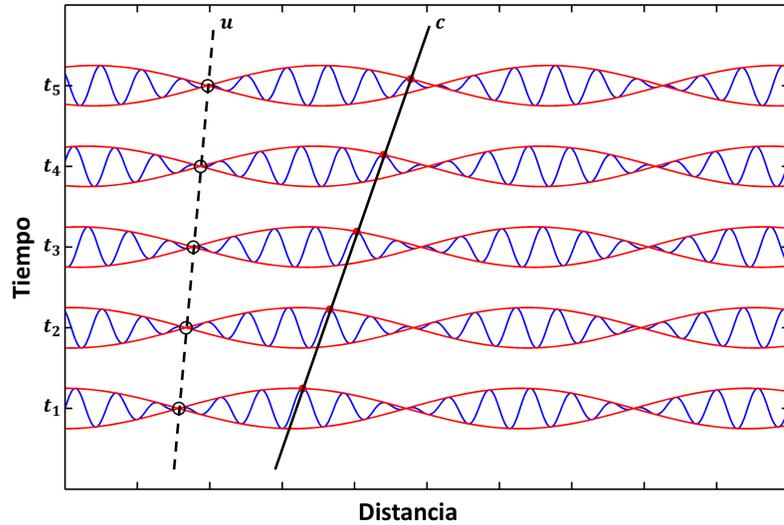


Figura 4.2. Velocidades de grupo u y fase c de una onda sinusoidal definida a partir de la suma de dos ondas armónicas con la misma amplitud y distinta velocidad de fase

Las Ecuaciones 4.3 y 4.4 muestran que la velocidad de fase y de grupo de un frente de ondas depende de la frecuencia. Esta propiedad se conoce como dispersividad (Tokimatsu and Kōgakkai, 1995). El fenómeno de dispersión ocurre en medios estratificados, donde las ondas Rayleigh se propagan por el suelo hasta una profundidad dependiente de su longitud de onda. Para longitudes de onda pequeña, la velocidad de fase depende de las características superficiales del medio, mientras que para longitudes mayores, la velocidad medida depende de las propiedades de los estratos más profundos (Strobbia, 2003). La Figura 4.3 muestra la variación de la velocidad de fase en función de la frecuencia, lo que se conoce como curva de dispersión.

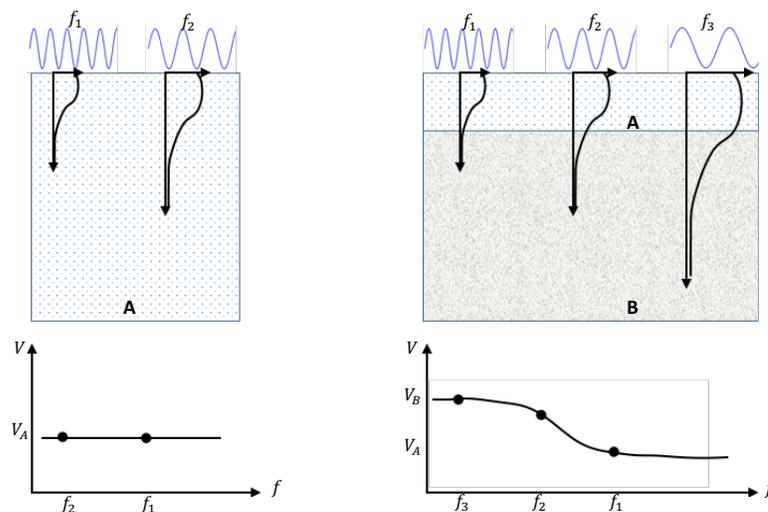


Figura 4.3. Velocidad de fase para distintas longitudes de onda. (a) Semi-espacio homogéneo. (b) Medio estratificado. Adaptado de Strobbia (2003).

4.3. Transformada de Stockwell

Las señales en el dominio del tiempo generalmente ofrecen poca información útil respecto al fenómeno estudiado. Por ello, es habitual transformar una señal temporal al dominio de las frecuencias. La transformada de Fourier es ampliamente utilizada para representar el contenido de frecuencia de una señal. Si se considera una señal continua $x(t)$, su transformada de Fourier se define como (Bracewell and Kahn, 1966):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.7)$$

Por otro lado, la transformada de Fourier de una señal discreta $h(kT)$ con un tiempo de muestreo T y N muestras se define como (Bracewell and Kahn, 1966):

$$H\left(\frac{n}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (4.8)$$

Donde k y $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

Las Ecuaciones 4.7 y 4.8 permiten determinar el contenido de frecuencia de una señal pero no su evolución temporal. Para evitar esta limitación, existen análisis tiempo frecuencia que determinan como varía el contenido de frecuencia de la señal en el tiempo.

El análisis tiempo frecuencia más utilizado es la Transformada Corta de Fourier (TCF). La TCF divide la señal temporal en intervalos (ventanas) a los cuales les calcula la transformada de Fourier. Si $x(kT)$ es una señal discreta en el tiempo, con un tiempo de muestreo T y N muestras, su TCF se define como (Allen, 1977):

$$X\left(jT, \frac{n}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(kT)w((j-k)T)e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (4.9)$$

Donde k y $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

El largo de la ventana w en la Ecuación 4.9 es fijo, lo cual limita la aplicación de la TCF. Si la ventana w elegida es estrecha en el espacio del tiempo para mejorar la resolución temporal, su

resolución en frecuencia se limita por la escasa cantidad de puntos que se utiliza para discretizar el dominio de las frecuencias entre cero y la frecuencia de Nyquist. Para evitar el problema de ventanas con ancho fijo, (Stockwell et al., 1996) propone utilizar ventanas de anchos dependientes de la frecuencia. La Transformada de Stockwell (TS) de una función continua $h(t)$ se define como (Stockwell et al., 1996):

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(t - \tau, f) e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.10)$$

Donde w es una ventana con promedio 1. La ventana más utilizada es una Gaussiana, definida por:

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} \quad (4.11)$$

En las Ecuaciones 4.10 y 4.11, f es la frecuencia, t es el tiempo y τ el tiempo de desfase al centro de la ventana. La ventana Gaussiana utilizada es sensible a la frecuencia analizada, generando ventanas estrechas para altas frecuencias y ventanas más anchas para bajas frecuencias. Ajustar la ventana en función de la frecuencia analizada es lo que hace a la transformada de Stockwell más atractiva en comparación a otros métodos tiempo frecuencia, tales como, la TCF o la Transformada de Wavelet (Tary et al., 2014). La Figura 4.4 muestra el ancho de las ventanas generadas según frecuencia.

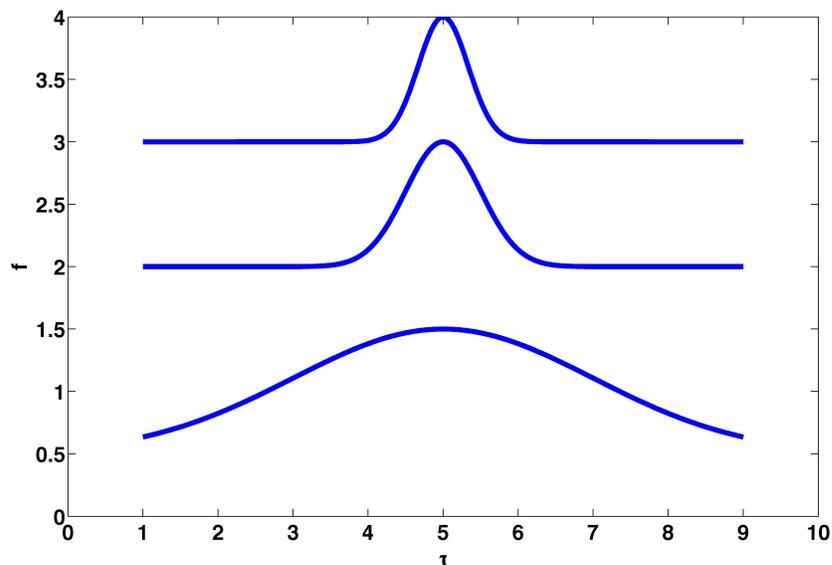


Figura 4.4. Ancho de ventana Gaussiana según frecuencia utilizada por la Transformada de Stockwell

La Ecuación 4.10 puede ser escrita en términos del espectro de Fourier $H(f)$ de la función $h(t)$ (Stockwell et al., 1996):

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad (4.12)$$

La Ecuación 4.12 se utiliza para calcular la TS de manera óptima, debido a la rapidez en el cálculo de la transformada de Fourier. De la Ecuación 4.12, se define la transformada de Stockwell para una señal discreta $h(kT)$ y $n \neq 0$ como (Stockwell et al., 1996) :

$$S\left(jT, \frac{n}{NT}\right) = \sum_{m=0}^{N-1} H\left(\frac{m+n}{NT}\right) e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{i2\pi m j}{N}} \quad n \neq 0 \quad (4.13)$$

Para $n = 0$:

$$S(jT, 0) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) \quad (4.14)$$

Donde j, k, m , y $n = 0, 1, \dots, N - 1$ y T corresponde al tiempo de muestreo de la señal h .

La Ecuación 4.14 muestra que la TS discreta es una matriz compleja, donde cada fila contiene las componentes en frecuencia de los diferentes tiempos muestreados mientras que las columnas representan el espectro local en un tiempo dado. En esta tesis cuando se mencione el término TS se hace referencia a su forma discreta, expresadas en las Ecuaciones 4.13 y 4.14.

4.4. Correlación Cruzada

La correlación cruzada de dos funciones cuantifica el grado de interdependencia o similitud que existe entre ellas (Bendat and Piersol, 2011). Teóricamente, la correlación cruzada entre dos funciones temporales y continuas $f(t)$ y $g(t)$ se define como

$$C_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)dt \quad (4.15)$$

Donde t es el tiempo y τ es el desfase temporal entre la función $f(t)$ y $g(t)$.

Por otro lado, si se consideran dos señales temporales discretas $x_1(t)$ y $x_2(t)$, tales como, registros de ruido sísmico en dos estaciones (Figura 4.5), la correlación cruzada discreta en el espacio del tiempo se define como

$$C_{12}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} x_1(t)x_2(t + \tau) \quad (4.16)$$

Donde N es la cantidad total de puntos registrados en x_1 y x_2 .

La Ecuación 4.15, también puede ser expresada en el dominio de las frecuencias mediante

$$\rho_{12}(w) = F(w) \cdot G^*(w) \quad (4.17)$$

Donde $F(w)$ es la transformada de Fourier de la función $f(t)$, $G^*(w)$ es el conjugado de la transformada de Fourier de la función $g(t)$. Es importante mencionar que otros autores utilizan la multiplicación del conjugado de F por la transformada de Fourier de G para calcular la correlación cruzada de dos señales, lo que resulta en una correlación cruzada invertida en el tiempo.

En diferentes disciplinas es común correlacionar una función consigo misma, proceso llamado autocorrelación. En el dominio del tiempo, la autocorrelación para un registro x_1 se expresa como

$$C_{11}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_1(n + \tau) \quad (4.18)$$

En el dominio de la frecuencia, la autocorrelación se expresa como

$$\rho_{11}(w) = F(w) \cdot F^*(w) \quad (4.19)$$

De la Ecuación 4.18, la autocorrelación con desfase cero ($\tau = 0$) es:

$$C_{11}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(t) \quad (4.20)$$

La Ecuación 4.20 muestra que la autocorrelación con desfase cero representa la energía de la señal x_1 analizada.

Las Ecuaciones 4.16 y 4.17 indican que la correlación cruzada depende de la amplitud de las señales correlacionadas, resultando en grandes valores para la correlación de señales con grandes amplitudes. Para establecer el grado de similitud entre dos funciones según su forma, se define el coeficiente de correlación cruzada en el dominio del tiempo como:

$$c_{12}(\tau) = \frac{C_{12}(\tau)}{[C_{11}(0)C_{22}(0)]^{\frac{1}{2}}} \quad (4.21)$$

En el dominio de las frecuencias, el coeficiente de correlación es definido como:

$$\phi_{12}(w) = \frac{\rho_{12}(w)}{[\rho_{11}(w)\rho_{22}(w)]^{\frac{1}{2}}} \quad (4.22)$$

A través de esta normalización, el valor del coeficiente de correlación c_{12} varía entre -1 y 1. Un valor de $c_{12}(\tau) = 1$ indica que ambas funciones son idénticas en forma pero no necesariamente en amplitud, mientras que un valor de $c_{12}(\tau) = -1$ indica una similitud en forma pero con signo contrario. Un valor de $c_{12}(\tau) = 0$ indica que no existe correlación entre las señales.

La ventaja de realizar la correlación cruzada en el espacio de la frecuencia (Ecuación 4.22) radica en un menor costo computacional, ya que esta es simplemente la multiplicación de dos vectores. En esta tesis, cuando se mencione correlación cruzada, se hace referencia al cálculo de los

coeficientes de correlación definidos por la Ecuación 4.21 para el caso temporal y la Ecuación 4.22 en el caso espectral.

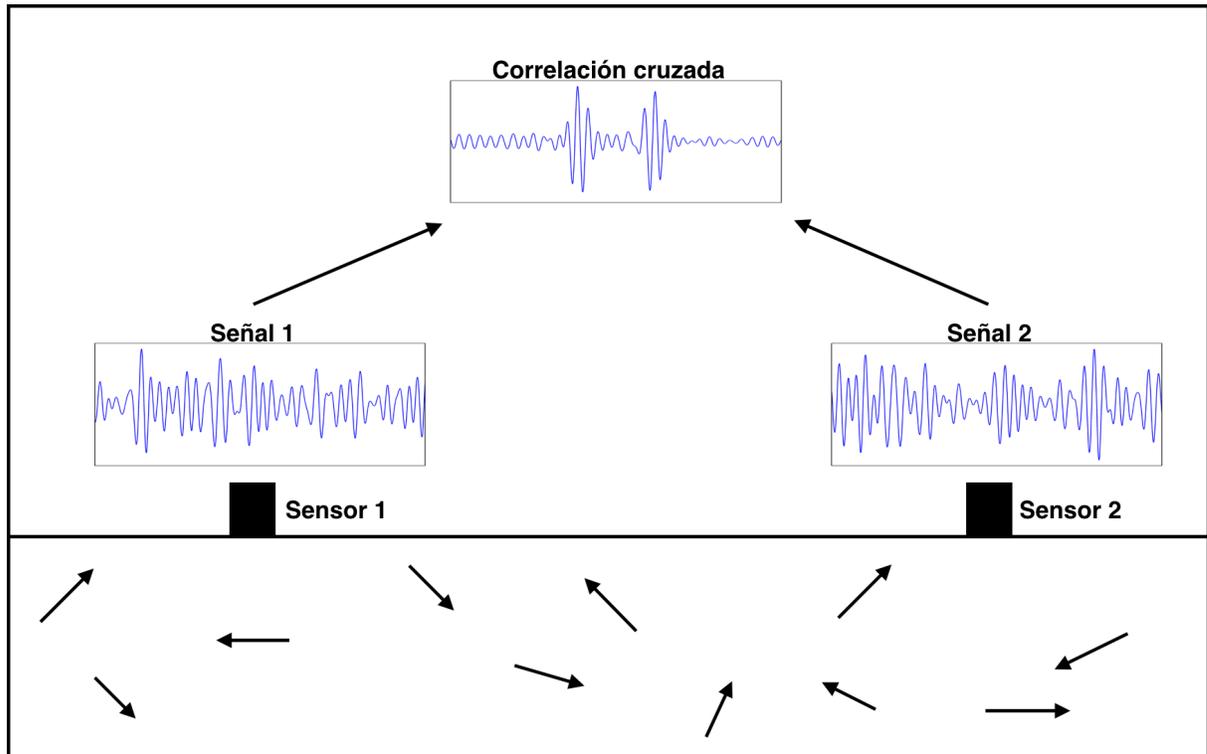


Figura 4.5. Esquema de frentes de ondas aleatorio en la superficie representado por flechas negras y su registro en dos receptores.

4.5. Correlación de Ruido Ambiental y Función de Green

4.5.1. Enfoque Temporal

Diversos investigadores han demostrado que la onda superficial de la función de Green (FG), o la función empírica de Green (FEG), puede ser estimada a partir de la correlación cruzada de registros continuos de ruido sísmico (FCR) en dos estaciones (Shapiro and Campillo, 2004; Poli et al., 2012; Boschi et al., 2012). El supuesto básico detrás de esto es asumir que la serie de tiempo generada por la correlación cruzada de ruido sísmico entre dos estaciones es proporcional a la señal observada en una de las estaciones dado un impulso generado en otra estación. Visto de otra manera la correlación cruzada es equivalente a la onda superficial de la función de Green entre estaciones.

Basados en este supuesto, la función de Green extraída a partir de la correlación cruzada puede ser sujeta a técnicas tales como el análisis Tiempo Frecuencia (FTAN) (Dziewonski et al., 1969) para lograr estimar la velocidad de grupo y fase con el fin de obtener las propiedades elásticas del medio entre las estaciones (Cho et al., 2007).

La función empírica de Green ha sido utilizada para estudiar la estructura de la tierra a diferentes profundidades utilizando ondas superficiales de distintos periodos. En general, las ondas superficiales de periodo corto son más sensibles a las estructuras superficiales de velocidades menores a las de estratos más profundos, que se pueden estudiar con ondas de periodos más largos. Generalmente, para estudios globales y regionales, FCR bajo 1 Hz son utilizadas para estudiar las propiedades dispersivas de la corteza y del manto superior (Shapiro et al., 2006; Yao et al., 2006; Poli et al., 2012); mientras que ondas superficiales con frecuencias mayores a 1 Hz son utilizadas para extraer información sobre estructuras superficiales (Brenquier et al., 2007; Picozzi et al., 2009; Hannemann et al., 2014).

A diferencia de la baja frecuencia (menores a 1 Hz), los estudios relacionados a escalas de cuencas sedimentarias son escasos. Esto se debe entre otras cosas a que:

1. Las estructuras superficiales típicamente exhiben un marcado contraste de velocidades (en cuencas el contraste entre roca y las formaciones sedimentarias), con fuertes atenuaciones, resultando en complicados fenómenos de propagación de ondas. Esto se refleja en correlaciones cruzadas de mala calidad.
2. Las fuentes de ruido ambiental a escala de cuenca están relacionadas con la actividad humana, las cuales son menos coherentes y requieren registros temporales más prolongados (Zhang and Gerstoft, 2014).

En esta investigación se utilizan sólo las componentes verticales de los registros sísmicos, que corresponden a la componente Rayleigh de la función de Green.

Para obtener la componente superficial de la función de Green es necesario entender matemáticamente su relación con la correlación cruzada de ruido sísmico. En ese sentido, investigadores tales como (Lobkis and Weaver, 2001; Weaver and Lobkis, 2004; Roux et al., 2004; Sabra, 2005) han demostrado que las FEGs estimadas a partir de la derivada de la FCR son

equivalentes a la FG, excepto por un término de amplitud que depende de la frecuencia. Para dos sensores A y B, la relación entre la FCR, FEG y FG viene dada por

$$\frac{d(FCR)}{dt} = -FEG_{AB}(t) + FEG_{AB}(-t) \approx -FG_{AB}(t) + FG_{AB}(t) \quad (4.23)$$

La expresión anterior indica que la FEG es solo una aproximación de la FG, por efectos de la anelasticidad, distribución y propiedades espectrales del ruido (Roux et al., 2005).

En el caso ideal, donde la distribución de fuentes de ruido es homogénea, la correlación cruzada es simétrica en amplitud y tiempo de llegada tanto en su parte causal como anticausal (Figura 4.6a). En la práctica, la parte causal y anticausal de la correlación cruzada difieren en amplitud (Stehly et al., 2006). Esta diferencia de amplitud se asocia a una distribución heterogénea de las fuentes de ruido alrededor de las estaciones correlacionadas. La Figura 4.6a muestra la correlación cruzada entre las estaciones “1” y “2” cuando la distribución de fuentes de ruido es homogénea. Esta condición genera correlaciones simétricas en amplitud y tiempo de desfase. Por otro lado, la Figura 4.6b y Figura 4.6c muestran la correlación entre dos pares de estaciones cuando la distribución de fuentes de ruido alrededor de ellas es heterogénea, generando correlaciones con una clara asimetría en amplitud y en ocasiones en tiempos de desfase. Es importante destacar que en la Figura 4.6 las correlaciones fueron calculadas multiplicando el conjugado de la transformada de Fourier del registro en la estación 1 por la transformada de Fourier del registro en la estación 2 (similar a Ecuación 4.17).

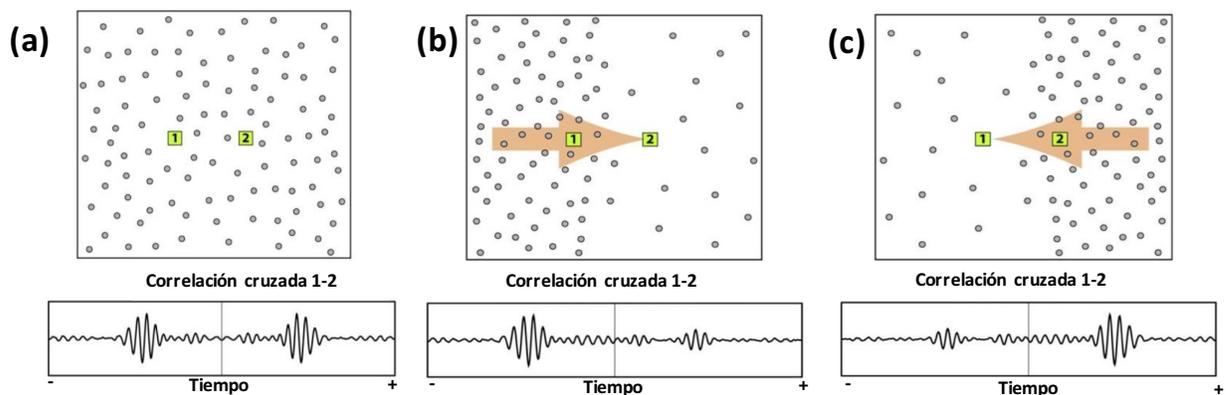


Figura 4.6. Distribución de fuentes de ruido y su efecto sobre la FCR. (a) Distribución homogénea de fuentes de ruido, (b) y (c) distribución heterogénea de fuentes de ruido. Modificada de Stehly et al. (2006)

A pesar de que algunas correlaciones presentan asimetría, esto no es impedimento para estimar las propiedades dispersivas del medio, ya que la información importante de la correlación cruzada en su análisis temporal está asociada al tiempo donde se alcanza la amplitud máxima. Las propiedades dispersivas del medio están directamente asociadas a la velocidad de grupo $V_g(f_c)$, la cual se calcula para una frecuencia central f_c conociendo el tiempo t_p donde la FCR alcanza su máxima amplitud y la distancia Δ entre estaciones:

$$V_g(f_c) = \frac{\Delta}{t_p} \quad (4.24)$$

Para utilizar la Ecuación 4.24 es necesario que se cumpla la aproximación de campo lejano, es decir, que la máxima longitud de onda λ sea un tercio de la distancia entre estaciones (Bensen et al., 2007; Yao et al., 2006) :

$$\Delta \geq 3\lambda \quad (4.25)$$

A pesar que la estimación de la función de Green a partir de la derivada de la correlación cruzada es ampliamente utilizada por investigadores debido a que, entre otras cosas, realza la alta frecuencia, en este trabajo se opta por trabajar con la FCR como estimador de la función de Green, ya que la diferencia entre derivar o no la FCR es mínima para el rango de frecuencias en estudio (Campillo and Paul, 2003; Shapiro and Campillo, 2004; Poli et al., 2012).

4.5.2. Enfoque Espectral

La restricción impuesta por la Ecuación 4.25 al método temporal es una fuerte limitación a los periodos máximos (frecuencias mínimas) donde se puede calcular la velocidad de grupo, afectando los análisis a grandes profundidades. Es por ello que algunos investigadores (Lin et al., 2009; Porritt et al., 2011; Mordret et al., 2013) han medido velocidades de grupo para estaciones separadas hasta dos longitudes de onda, mientras que Luo et al. (2015) muestra de manera experimental que las medidas de dispersión a partir del dominio del tiempo son consistente incluso para estaciones separadas a una longitud de onda.

Debido a la gran limitación impuesta por la Ecuación 4.25, Ekström et al. (2009) desarrolla una metodología basada en la investigación realizada por Aki (1957) para estimar la velocidad de fase entre dos estaciones utilizando la información espectral de la correlación cruzada. Esta metodología permite calcular velocidades de fase para longitudes de ondas iguales a la distancia entre estaciones.

Aki (1957) considera la correlación de ondas estocásticas que se propagan horizontalmente entre dos sensores y concluye que el promedio azimutal del espectro correlacionado $\bar{\rho}$ es la función de Bessel de primera especie y orden cero J_0 que depende de la distancia entre sensores r , la velocidad de fase c y la frecuencia w_0 :

$$\bar{\rho}(r, w_0) = J_0\left(\frac{w_0}{c(w_0)}r\right) \quad (4.26)$$

Aki (1957) además establece que la Ecuación 4.26 también es válida para un par de estaciones, desestimando la condición de promediar el espectro correlacionado en diferentes azimut. Basado en esta propiedad del espectro correlacionado, Ekström et al. (2009) y Ekström (2014) propone una metodología sencilla y automatizable para estimar la velocidad de fase entre sensores mediante el análisis de los cruces por ceros de la parte real del espectro correlacionado.

Ekström et al. (2009) propone utilizar la parte real del espectro de correlación (Ecuación 4.22) que se asemeja a la forma de la función de Bessel de primera especie y orden cero. La amplitud del espectro de correlación no se considera ya que no decrece con la frecuencia como lo hace J_0 . Lo anterior se debe a que la amplitud está controlada por el espectro del ruido ambiental. Ekström et al. (2009) propone seguir los cruces por cero de la parte real del espectro para estimar la velocidad de fase, los cuales son insensibles a las variaciones espectrales del ruido. La Figura 4.7 muestra como varía la amplitud de la función de Bessel de primera especie y orden cero junto con la ubicación sus primeros 11 cruces por cero.

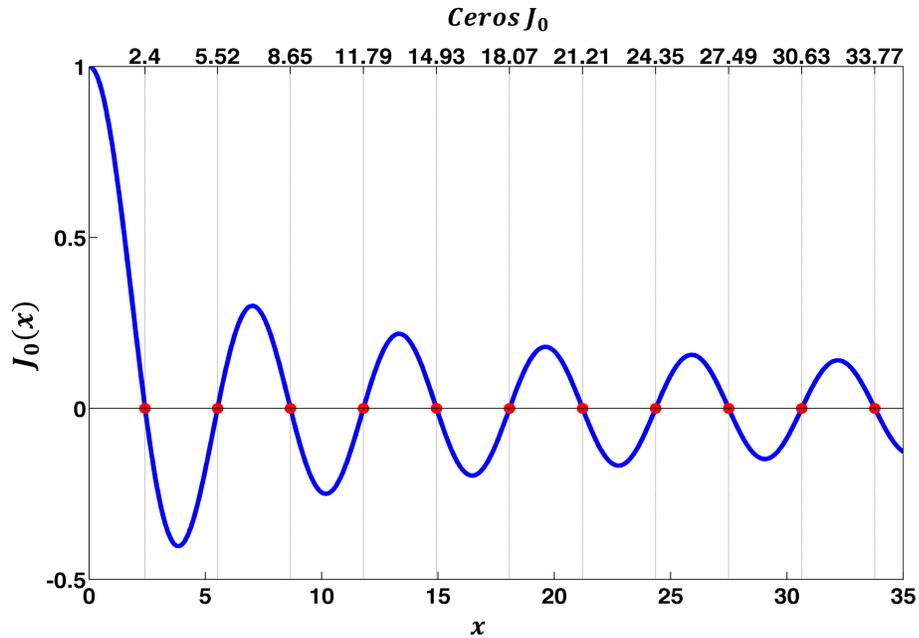


Figura 4.7. Función de Bessel de primera especie y orden cero (en azul) y sus primeros 11 cruces por cero (rojo).

La velocidad de fase $c(w_n)$ se calcula a partir de la distancia entre sensores Δ , la frecuencia w_n del n -ésimo cruce por cero del espectro correlacionado y el valor del $(n + m)$ -ésimo cero de la función de Bessel de primer orden z_{n+m} como:

$$c(w_n) = \frac{w_n \cdot \Delta}{z_{n+m}} \quad (4.27)$$

Dada la ambigüedad de establecer si el n -ésimo cruce por cero detectado en el espectro de correlación corresponde al n -ésimo cero de la función J_0 , se establece el valor m , el cual toma valores enteros positivos o negativos y representa la cantidad de cruces por cero que faltan o sobran, respectivamente. Por lo anterior, la Ecuación 4.27 genera una familia de curvas de velocidad de fase dependiendo del valor de m . La curva que tenga significado físico es la elegida como la curva de dispersión representativa entre los pares de estaciones analizados.

4.6. Inversión de Curvas de Dispersión

El proceso de inversión tiene por objetivo estimar los parámetros de un modelo de suelo estratificado a partir de la información observada. Los información utilizada está asociada a las características dispersivas del medio, extraída a partir de la curvas de velocidad de fase o grupo.

La inversión de un set de datos consiste en calcular curvas de dispersión de modelos propuestos (problema directo), y mediante algoritmos de búsqueda encontrar aquellos modelos que tengan el mejor ajuste con las curvas de dispersión medidas (problema inverso). El hecho de que no exista una solución única vuelven al proceso de inversión un problema complejo (Tarantola, 1987; Sambridge, 2001)

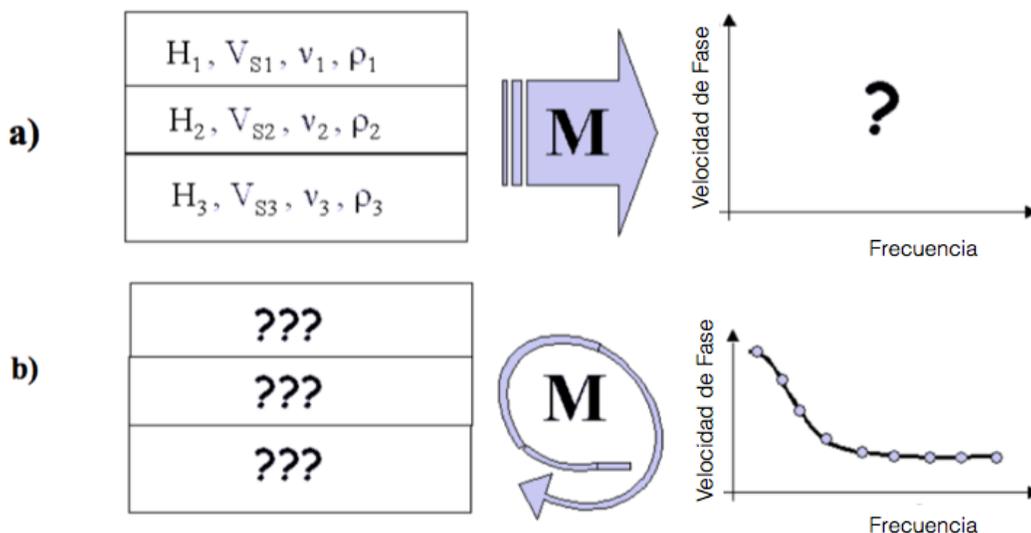


Figura 4.8. Problema directo (a) y problema inverso (b). Modificada de Strobbia (2003)

Para resolver el problema de inversión se utilizan métodos iterativos o métodos de búsqueda global. Los primeros utilizan un modelo inicial compuesto por un número finito de capas, a partir del cual se inicia un proceso iterativo en búsqueda de un modelo que se ajuste a la curva de dispersión. Por otro lado, los métodos de búsqueda global permiten una mayor exploración del espacio de los parámetros, ya que mediante este método es posible generar modelos uniformes o aleatoriamente distribuidos y elegir aquel que mejor se ajusta a los datos. La gran ventaja de los métodos de búsqueda globales es que no realizan supuestos lineales para resolver el problema identificando correctamente los mínimos locales de mínimos globales.

El método de búsqueda global más utilizado es el llamado algoritmo de vecindario (Sambridge, 1999). El método del vecindario inicialmente genera modelos de manera aleatoria, explorando todo el espacio de parámetros y dividiéndolo en pequeñas celdas, llamadas celdas de Voronoi. Posteriormente, se calcula el desajuste de cada celda respecto del modelo y aquella que tenga el menor ajuste se convierte en el nuevo espacio de búsqueda. El nuevo espacio de búsqueda es dividido en pequeñas celdas y el proceso se repite hasta encontrar el modelo que mejor se ajuste a los datos.

La Figura 4.9a muestra la división del espacio realizada en la iteración inicial, en gris se destaca aquella celda que presenta el mejor ajuste. La Figura 4.9b muestra la división realizada a la celda seleccionada y que representa el nuevo espacio de búsqueda.

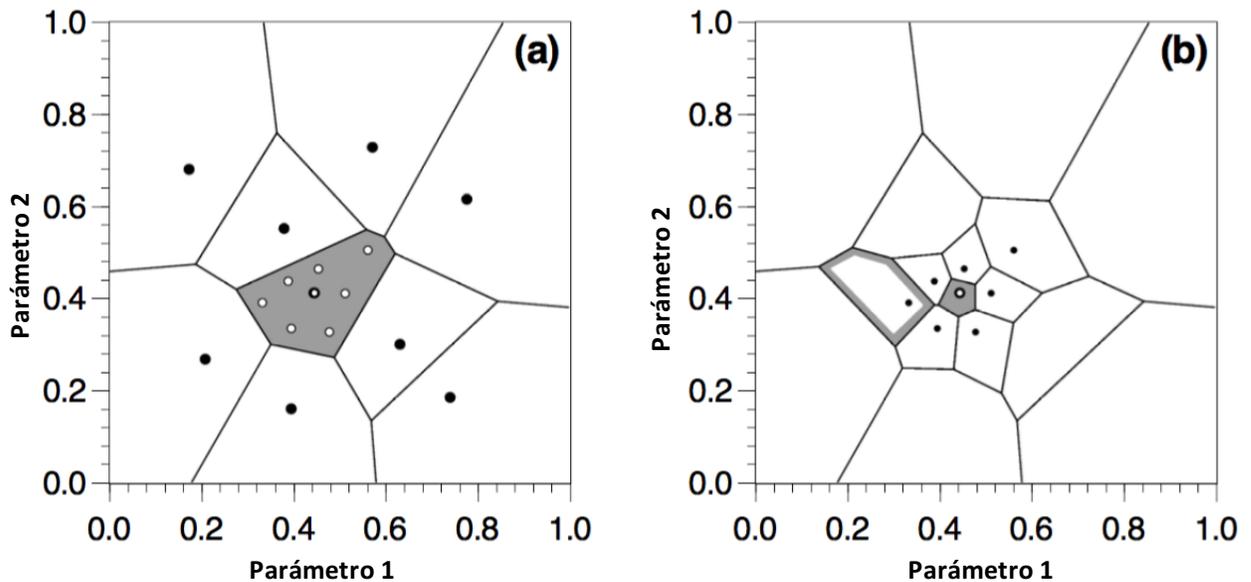


Figura 4.9. Celdas de Voronoi para un espacio de dos parámetros. (a) Iteración inicial, en gris se muestra la celda con el mejor ajuste. (b) La celda seleccionada en (a) es subdividida seleccionando dentro de ella la celda con menor ajuste.

Modificada de Wathelet (2005).

La principal ventaja de este algoritmo es que no requiere de un modelo inicial y explora muy bien el espacio factible de combinaciones de parámetros. El método del vecindario original (Sambridge, 1999) explora todo el espacio de variables, volviendo al método ineficiente cuando se posee una gran cantidad de variables. Para solucionar este problema, Wathelet (2008) modifica el método original, introduciendo condiciones sobre las variables exploradas restringiendo de esta manera los espacios de búsqueda.

Las inversiones realizadas son ejecutadas en el software Dinver el cual basa su algoritmo de inversión en el método del vecindario. Para generar los modelos se utilizan simulaciones Monte Carlo, generando más de 500.000 perfiles independientes y aleatoriamente distribuidos. Dada la cantidad de modelos generados, se asume que los misfits siguen una distribución chi-cuadrado, luego la relación entre el misfit de cualquier perfil y el menor misfit sigue una distribución de Fisher. Lo anterior permite que para un nivel de confianza del 10%, la relación de misfit sea

aproximadamente 1.5 cuando un modelo de dos capas es adoptado y la curva de dispersión es discretizada con 40 puntos (Socco and Boiero, 2008).

Cada una de las inversiones realizadas consideran una capa sedimentaria sobre un semi espacio. La velocidad de onda de corte dentro de la capa sedimentaria decae según una ley de potencia con 5 subcapas. Las velocidades de onda de corte de la capa sedimentaria pueden variar desde los 100 a 3000 m/s en superficie hasta los 200 a 5000 m/s en el fondo. Las velocidades de onda de corte en el semiespacio varían entre los 2000 a 7000 m/s. Las variables de densidad, Poisson y velocidad de onda de corte se dejan constante, debido a que el impacto de ellas en los modelos propuestos es mínimo (Wathelet, 2005).

5. Cálculo de correlaciones cruzadas: Metodología Temporal

El objetivo principal de este capítulo es presentar la metodología desarrollada para la obtención de velocidad de grupo a partir de la correlación cruzada de ruido sísmico en el dominio del tiempo. Para ello es necesario entender el efecto que tiene cada uno de los procesos involucrados en la obtención de la velocidad de grupo final. La metodología se divide en cuatro etapas:

Etapa 1: Acondicionamiento de señales

Etapa 2: Cálculo de correlación cruzada y almacenamiento

Etapa 3: Filtro, criterio de razón señal ruido (RSR) y apilamiento

Etapa 4: Cálculo de velocidad de grupo

A continuación se explica en detalle de cada una de estas etapas.

5.1. Etapa 1: Acondicionamiento de Señales

El objetivo de esta etapa es preparar cada uno de los registros que serán correlacionados y acentuar el ruido ambiental estacionario en el rango de frecuencias deseado, tratando de minimizar el efecto de irregularidades instrumentales y terremotos que tienden a ocultar esta información. Para esto, diversos autores proponen incluir procesos no lineales tales como blanqueamiento espectral y normalización en el tiempo (Bensen et al., 2007, Yao et al., 2011). El blanqueamiento se utiliza para generar espectros con similar contenido de energía en la banda de frecuencia en estudio y con ello evitar que frecuencias con mayor energía oculten la información de frecuencias con menor energía. Por ejemplo, en estudios a gran escala, se utiliza el blanqueamiento para minimizar el efecto de la señal originada a los 26 s de periodo por el microsismo del Golfo de Guinea (Shapiro et al., 2006).

Los procesos de blanqueamientos más utilizados son el blanqueamiento absoluto y el blanqueamiento mediante la media móvil. El blanqueamiento absoluto consiste en dividir cada punto del espectro por su valor absoluto. Por otro lado, el blanqueamiento mediante la media móvil consiste en dividir cada punto del espectro por el promedio de los valores absolutos de una ventana en torno al punto en cuestión. La Figura 5.1 muestra distintos tipos de blanqueamientos aplicados a una señal cuyo contenido de energía se encuentra principalmente bajo 1 Hz. Ambas formas de

blanquear el espectro generan correlaciones similares, pero el tiempo de ejecución del blanqueamiento absoluto es menor.

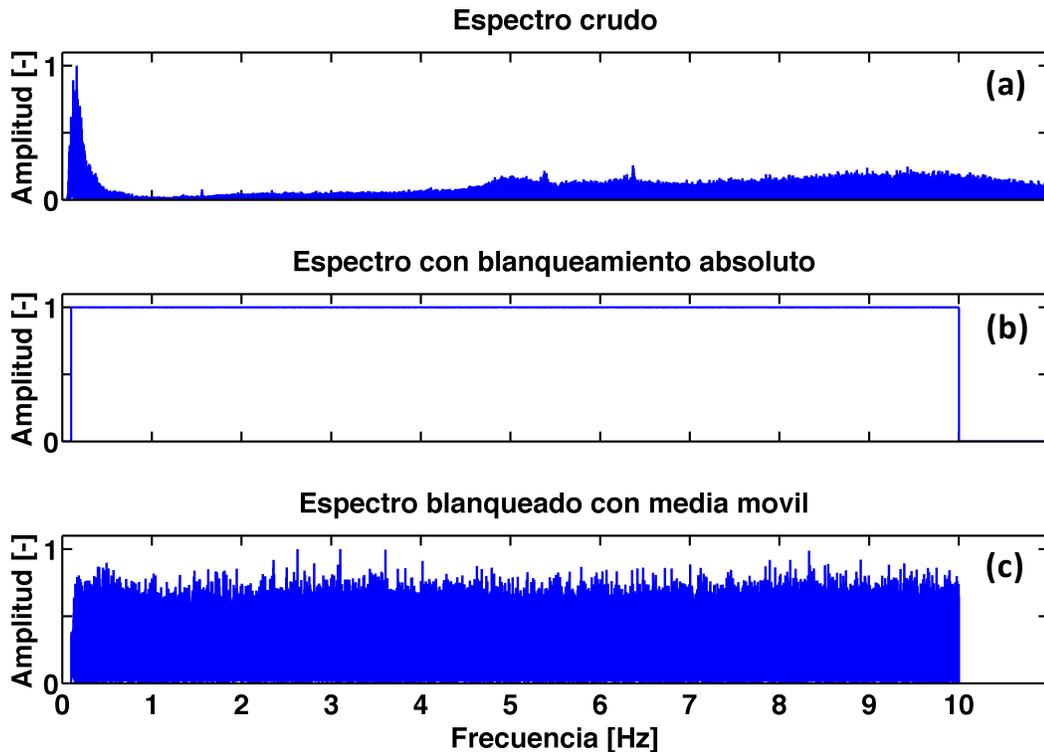


Figura 5.1. Tipos de blanqueamientos. (a) Espectro crudo. (b) Espectro con blanqueamiento absoluto. (c) Espectro blanqueado con una media móvil.

La normalización temporal tiene por objetivo reducir los efectos de terremotos, irregularidades instrumentales y ruido no estacionario en la correlación cruzada. Los procedimientos más utilizados para normalizar temporalmente las señales son el *one-bit* y la media móvil absoluta. La normalización mediante *one-bit* consiste en imponer a las amplitudes positivas de la señal el valor 1 y a las negativas el valor -1. Lo anterior genera efectos no lineales en la señal. La media móvil absoluta por otro lado, consiste en dividir cada punto de la señal por el promedio de los valores absolutos de una ventana en torno al punto en cuestión. El largo de la ventana depende de las frecuencias en estudio (Bensen et al., 2007). La Figura 5.2 muestra como una señal con registro de dos sismos que es normalizada temporalmente utilizando la normalización de media móvil absoluta y el *one-bit*. Normalizar la señal mediante la media móvil absoluta genera mejores resultados en comparación a los obtenidos mediante *one-bit* (Bensen et al., 2007), la desventaja es que su tiempo de ejecución es mayor.

En esta investigación, se opta por no utilizar ni blanqueamiento ni normalización temporal y eliminar el efecto transiente en la señal sólo mediante apilamiento (Ekström, 2014). Los pasos propuestos para la etapa de acondicionamiento de señales son:

- i. Establecer días comunes de medición en las estaciones
- ii. Aplicar filtro pasa alto tipo Butterworth de orden 4
- iii. Dividir cada señal en ventanas de 10 minutos.
- iv. Aplicar taper de 5% a cada ventana.

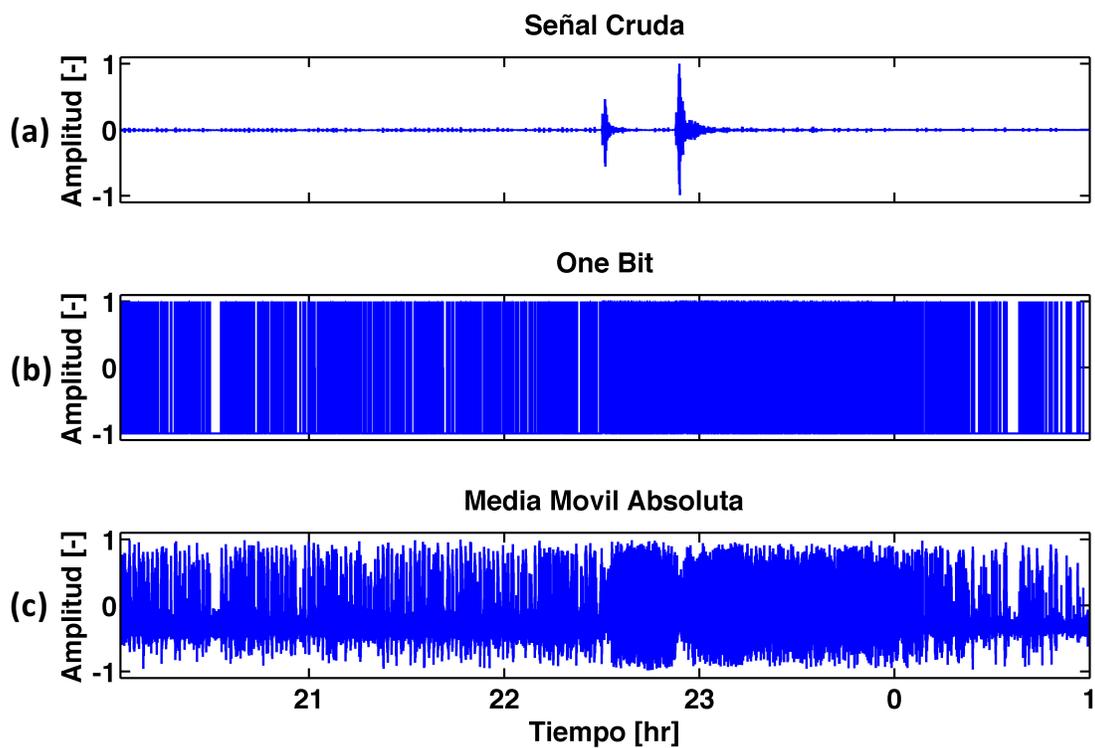


Figura 5.2. Ejemplos de normalización temporal. (a) señal cruda. (b) One Bit. (c) Media Móvil Absoluta.

Para el estudio es necesario establecer la cantidad de días que han sido medidos simultáneamente por al menos dos estaciones. La Figura 5.3 muestra la cantidad de pares de estaciones que han medido en simultáneo cierta cantidad de días.

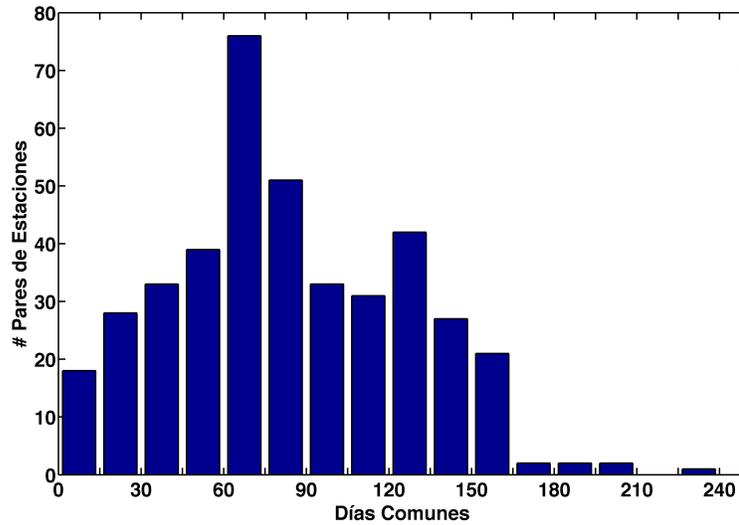


Figura 5.3. Cantidad de días comunes que han sido medidos por pares de estaciones.

De la Figura 5.3 se observa que el 89% de los pares de estaciones tienen más de 30 días medidos simultáneamente. Lo anterior permite establecer una base de datos robusta para los objetivos de esta investigación. El caso ideal es que todos los pares de estaciones tengan la misma cantidad de días medidos en simultáneo. Debido a que esta condición no se cumple con las estaciones banda ancha utilizadas, es necesario establecer la cobertura sobre la cuenca de aquellos pares de estaciones que tienen más de 30 días en común. La Figura 5.4 muestra la distribución de los pares de estaciones que tienen más de 30 días en común.

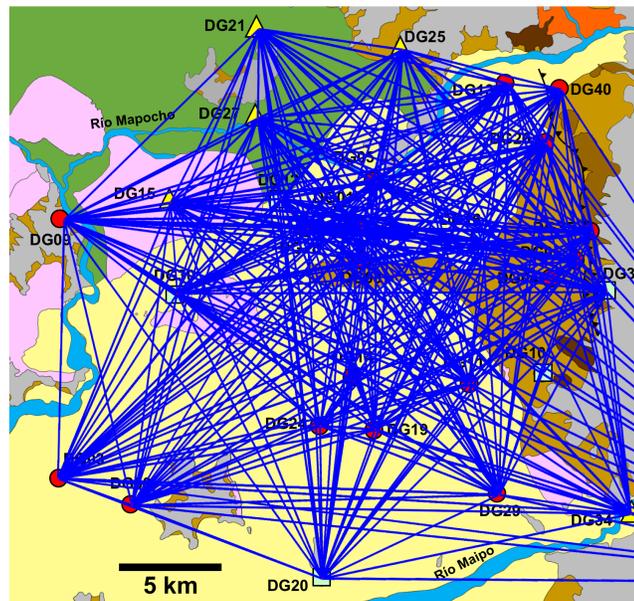


Figura 5.4. Distribución de pares de estaciones con más de 30 días en común (línea azul) sobre la Cuenca de Santiago. Los rayos incompletos que siguen la dirección Este corresponden a rayos asociados a la estación DG36.

De la Figura 5.4 se observa que la cobertura de los pares de estaciones con más de 30 días en común es muy buena, abarcando los distintos sectores y suelos de la cuenca. Los pares de estaciones con menos de 30 días en común se encuentran principalmente en la zona este de la cuenca y asociados a la estación DG10.

Luego de establecer los días comunes, los registros de cada estación son filtrados con un filtro pasa alto tipo Butterworth de orden 4 y frecuencia esquina de 0.01 Hz, el cual remueve el promedio y la tendencia de las señales. Este filtro se elige ya que presenta una respuesta plana en el rango de frecuencias de interés en esta investigación (0.1-5 Hz). La Figura 5.5 muestra la respuesta en magnitud de un filtro Butterworth de orden 4 con frecuencia esquina de 0.01 Hz.

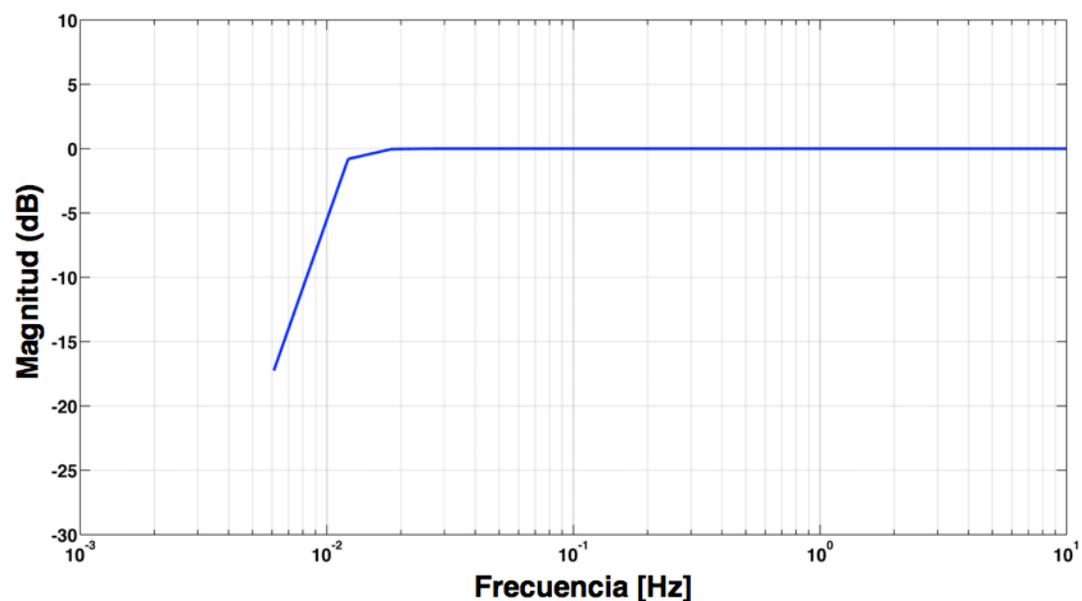


Figura 5.5. Respuesta en magnitud de un filtro Butterworth de orden 4 con frecuencia esquina de 0.01 Hz.

Posteriormente, estos registros filtrados son divididos en ventanas de 10 minutos y suavizados en sus extremos con un taper del 5% del largo de la ventana. La Figura 5.6a muestra la señal cruda registrada por la estación DG24 el día 26 de enero del 2013 mientras que la Figura 5.6b muestra la señal acondicionada.

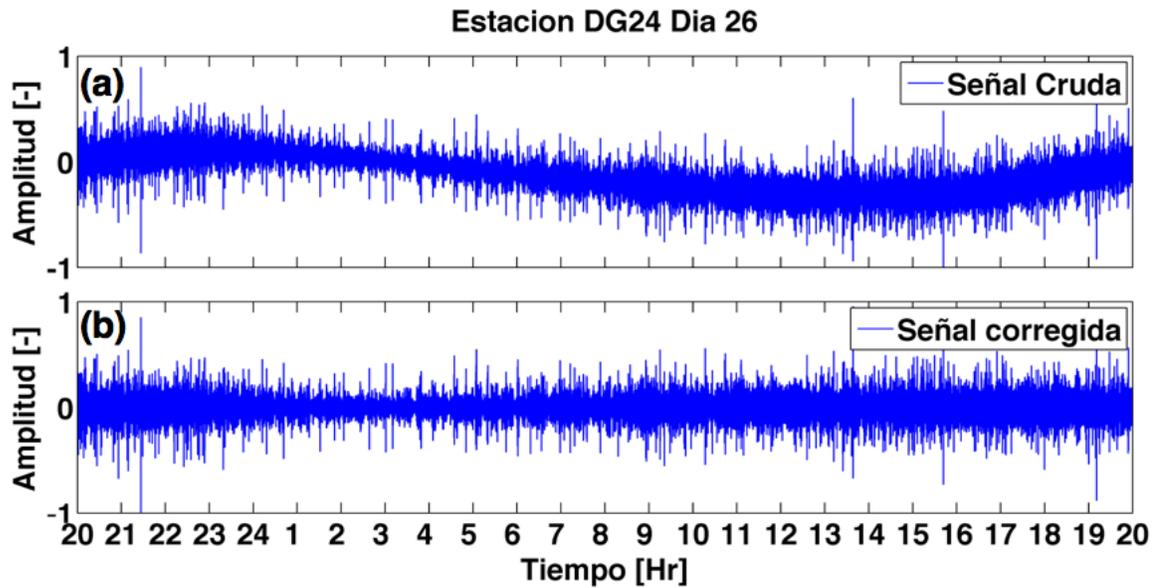


Figura 5.6. Señal registrada por la estación DG24 el día 26 de enero del 2013. (a) Señal cruda. (b) Señal corregida mediante un filtro pasa alto tipo Butterworth de orden cuatro y frecuencia esquina de 0.01 Hz

La selección del largo de la ventana depende de la distancia entre estaciones, el rango de frecuencias en estudios y la cantidad de datos disponibles. Generalmente, estudios a escala continental o regional utilizan ventanas temporales de un día (Lin et al., 2008) u horas (Poli et al., 2012), mientras que estudios a escala de cuenca asociados a alta frecuencia utilizan ventanas de minutos (Shirzad and Shomali, 2014a) y segundos (Picozzi et al., 2009). En este trabajo se utilizan ventanas de 10 minutos, que permiten un reducido tiempo de cálculo y una buena calidad de las FCR.

5.2. Etapa 2: Cálculo de Correlación Cruzada y Almacenamiento

En esta etapa, se calculan las correlaciones cruzadas en cada una de las ventanas disponibles y se almacena dicha información en una matriz. Para realizar la correlación cruzada se utiliza la versión espectral de la correlación cruzada (Ecuación 4.22), la cual tiene un menor costo computacional en comparación a la versión temporal (Ecuación 4.21). Luego de realizar la correlación en el espacio de las frecuencias, esta se lleva al dominio del tiempo mediante la inversa de la transformada de Fourier.

Posteriormente, la correlación cruzada de cada ventana se almacena en las filas de una matriz entre -45 a 45 [s]. Este intervalo de tiempo contiene la señal para el rango de distancias y frecuencias estudiado. Almacenar las correlaciones cruzadas en una matriz facilita el filtrado de éstas en distintos rangos de frecuencia, sin tener que repetir la metodología para cada uno de los rangos. La Figura 5.7 muestra la correlación cruzada entre -45 a 45 [s] de dos señales filtradas con un filtro Butterworth pasa alto de frecuencia esquina 0.01 Hz.

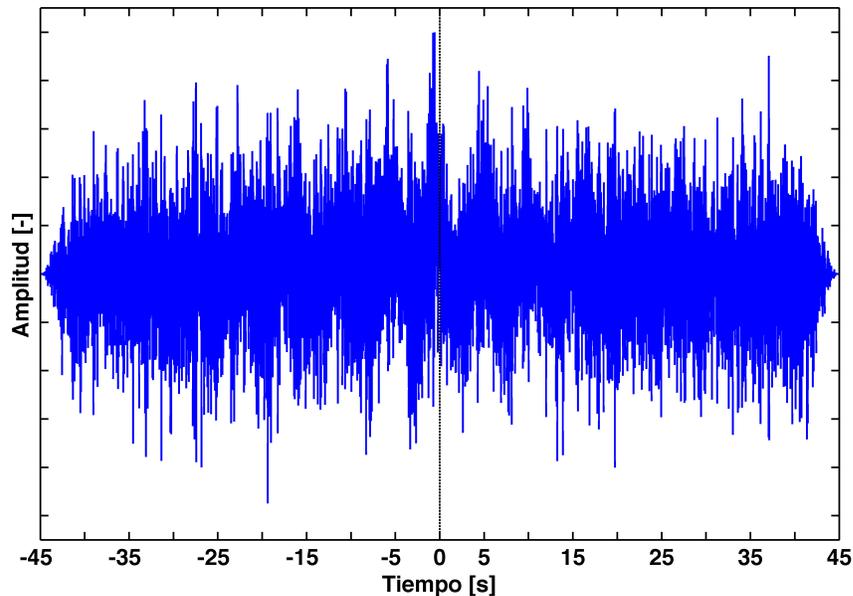


Figura 5.7. Correlación cruzada entre -45 y 45 s.

5.3. Etapa 3: Filtro, Criterio RSR y Apilamiento

En esta etapa, cada una de las correlaciones cruzadas almacenadas en la matriz se filtran con una serie de filtros tipo Butterworth de cuarto orden de distinta frecuencia central y ancho de banda. Un procesamiento similar se sigue en Hannemann et al. (2014). Se escogieron tres frecuencias centrales por octava ($f_c = 0.18, 0.25, 0.35, 0.5, 0.71, 1$ Hz) y un medio ancho de banda correspondiente al 15% de la frecuencia central para frecuencias menores a 1 Hz. A su vez, se utilizaron cuatro frecuencias centrales por octava ($f_c = 1.26, 1.59, 2.0, 2.52, 3.17, 4.0, 5.04, 6.35, 8$ Hz) y una mitad de ancho de banda del 12% de la frecuencia central, para frecuencias mayores a 1 Hz. La Figura 5.8 muestra la respuesta en magnitud y la distribución en escala logarítmica de los filtros utilizados. Distribuir los filtros de esta manera permite obtener una buena cantidad de puntos en la curva de dispersión, además de evitar que la mayor energía de baja frecuencia oculte la información a alta frecuencia.

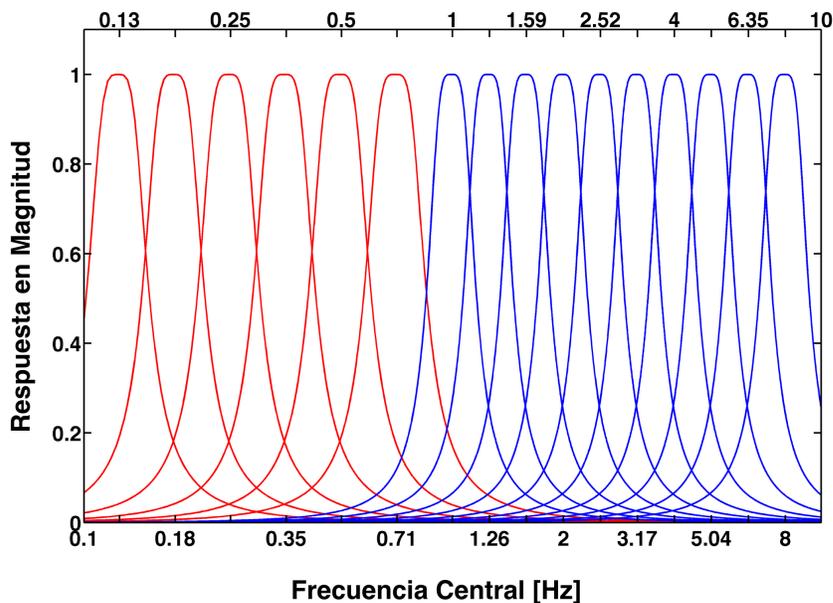


Figura 5.8. Respuesta en magnitud de los filtros Butterworth de cuarto orden utilizados en la metodología temporal. En rojo se muestran filtros de frecuencia central menor a 1 Hz y en azul filtros de frecuencia central mayor a 1 Hz.

Bensen et al. (2007) propone filtrar las señales y luego calcular la correlación cruzada. Sin embargo, en este trabajo se opta por filtrar luego de calcular la correlación cruzada, lo que ahorra tiempo computacional sin resultar en variaciones significativas. La Figura 5.9a muestra la FCR obtenida al correlacionar las señales después de filtrarlas, mientras que la Figura 5.9b muestra la FCR filtrada después de correlacionar las señales.

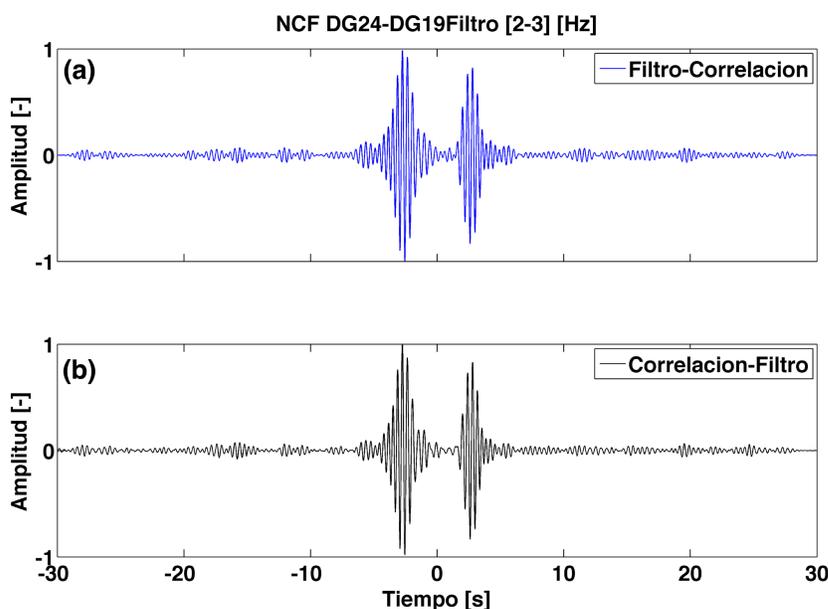


Figura 5.9. Cálculo de correlación cruzada. (a) El filtro se aplica a los registros para luego calcular la correlación cruzada. (b) El filtro se aplica a la correlación cruzada de los registros.

Después de aplicar la serie de filtros, cada correlación es normalizada por su máximo valor absoluto. Para evaluar la calidad de cada correlación se calcula la razón señal-ruido (RSR) de cada una de ellas. La RSR se define como la razón entre la máxima amplitud dentro de una ventana alrededor del tiempo de llegada del modo fundamental de la onda Rayleigh y la media cuadrática de la ventana del ruido definida al final de la correlación cruzada. Debido a los rangos de frecuencias y distancias estudiados en este trabajo se debe considerar el ruido presente entre un desfase de correlación igual a cero y el inicio de la ventana donde se mide la señal. El RSR que se utiliza en esta investigación se define como:

$$RSR = \frac{\max(vent_{señal})}{rms(vent_{ruido}) + rms(vent_{ini})} \quad (5.1)$$

La Figura 5.10 muestra las ventanas de la señal ($vent_{señal}$), del ruido de la cola ($vent_{ruido}$) y del ruido de inicio ($vent_{ini}$).

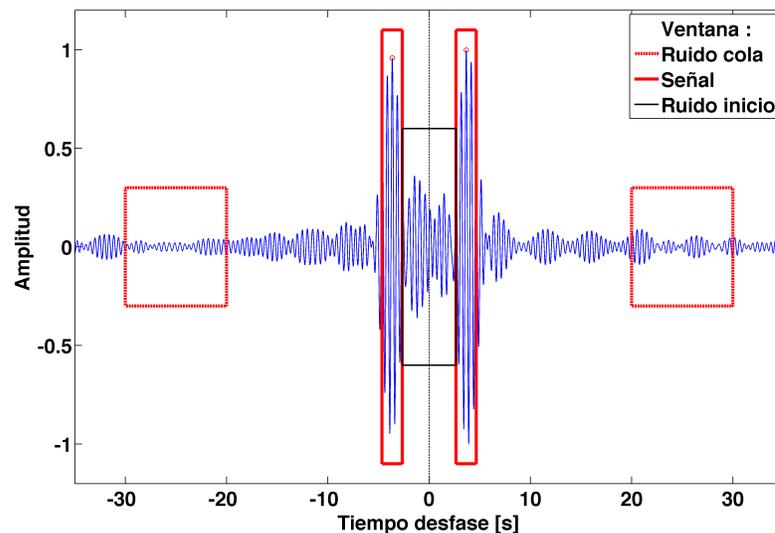


Figura 5.10. Cálculo de la razón señal ruido (RSR). Ventana de señal definida alrededor del máximo de la correlación cruzada, ventana del ruido definida en la cola de la señal y entre un desfase de tiempo igual a cero y el inicio de la ventana de la señal.

Se observa de la Figura 5.10 que la amplitud de la ventana del ruido de inicio es importante, incluso mayor que la amplitud presente en la ventana del ruido de cola.

Para definir la ventana de la señal, se debe conocer a priori el rango de tiempo donde se encuentra la máxima amplitud de la correlación, por lo que el problema es recursivo. Para encontrar la ventana de la señal se utiliza el siguiente procedimiento:

1. Apilar las correlaciones cruzadas para cada frecuencia central, generando la “FCR cruda”.
2. Establecer el tiempo de la máxima amplitud de cada “FCR cruda” para cada frecuencia central. Para ello, utilizar el tiempo de la máxima amplitud de la frecuencia central anterior (menor) y buscar alrededor de dicho punto utilizando una ventana de ancho 2 [s].
3. El centro de la ventana de la señal queda definida por el tiempo de la máxima amplitud de cada “FCR cruda” y un ancho de tiempo definido en Figura 5.11 según frecuencia central.
4. Las ventanas de ruido se definen por el promedio de la correlación cruzada entre los intervalos (-30, -20) [s] y (20,30) [s].

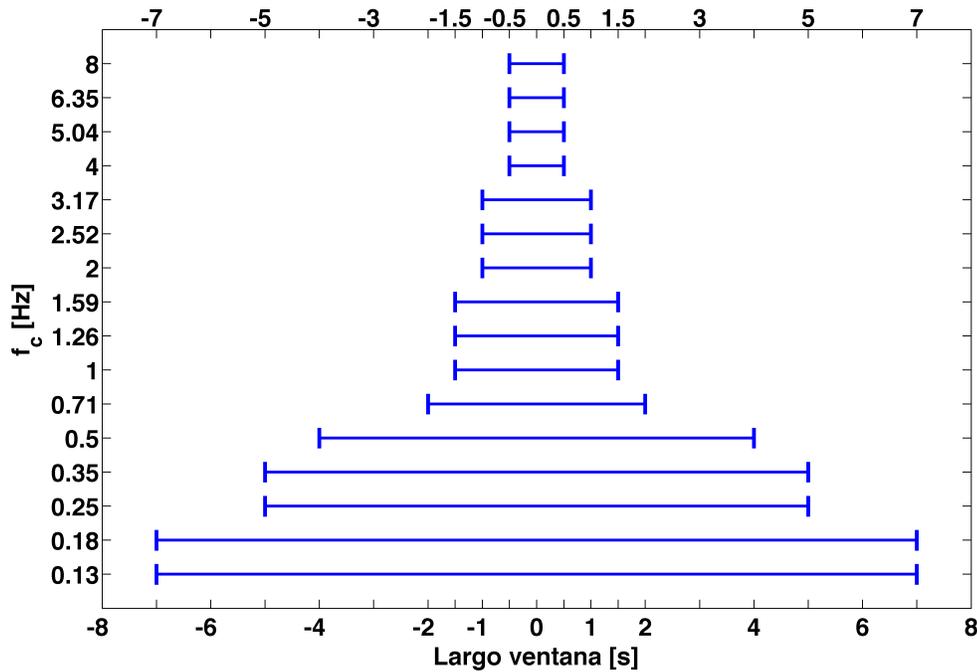


Figura 5.11. Largo de ventana de señal según frecuencia central f_c

Mientras mayor es la frecuencia central en análisis, menor es la razón señal ruido de la correlación cruzada. Para evitar confundir ruido como señal, el ancho de la ventana de señal es dependiente de la frecuencia central del filtro. De la Figura 5.11 se observa que el ancho de la ventana de señal decrece con el aumento de la frecuencia central para restringir la información medida como señal. Esta forma de establecer la ventana de la señal difiere de lo propuesto por otros investigadores, quienes establecen la posición de dicha ventana en base a modelos preliminares de velocidades de

la región en estudio (Olivier et al., 2015; Shirzad and Shomali, 2014a). Debido a que en la cuenca de Santiago no existe un modelo de velocidades apropiado, se opta por utilizar la metodología propuesta que no depende de información preliminar.

La Figura 5.12 muestra un ejemplo de las ventanas de señal y las amplitudes máximas identificadas para las FCR crudas del par de estaciones DG24 y DG19.

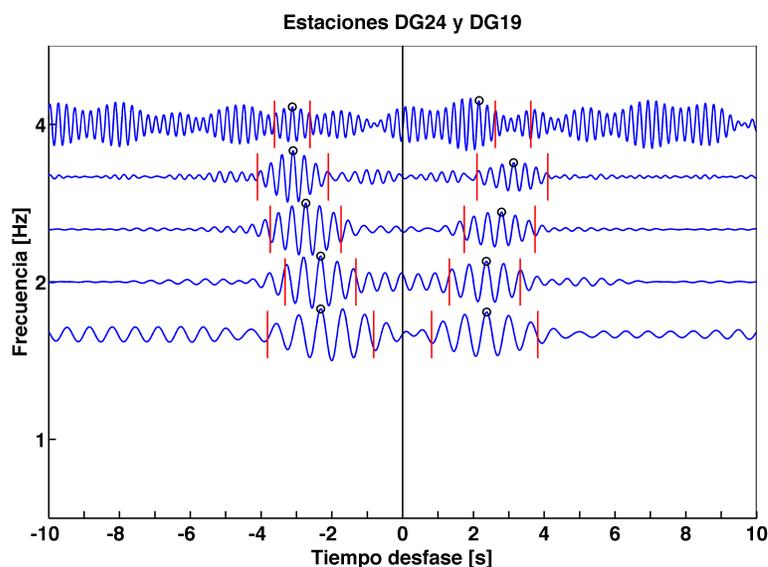


Figura 5.12. Correlaciones cruzadas crudas entre las estaciones DG24 y DG19 para frecuencias centrales entre 1.59 y 4 Hz. Los círculos negros muestran los máximos positivos y negativos de cada FCR sin criterio, en rojo se muestra la ventana de la señal.

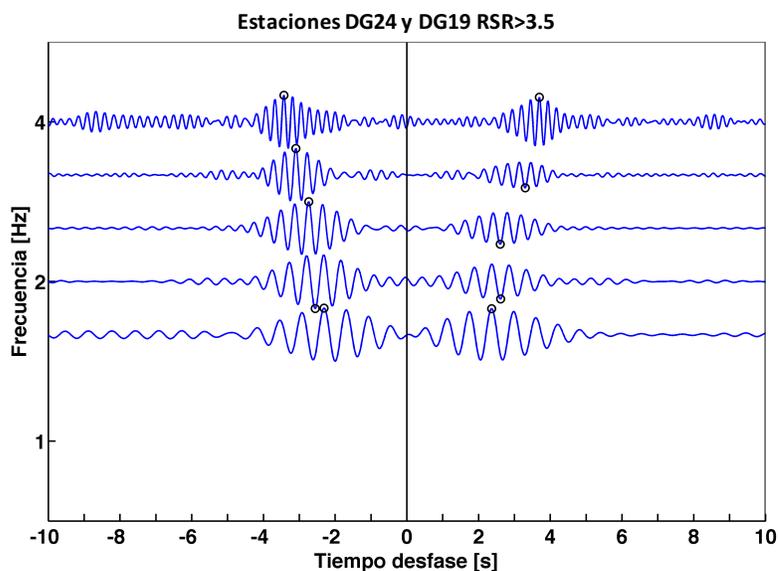


Figura 5.13. Correlaciones cruzadas luego de aplicar criterio RSR

De la Figura 5.12 se observa que en la baja frecuencia las FCRs poseen RSRs mayores que en alta frecuencia, y las amplitudes máximas para estas frecuencias son identificables con facilidad. Por otro lado, identificar el valor máximo de la correlación en altas frecuencias, por ejemplo, en $f_c=4$ Hz, es una tarea compleja sin tener la información de la correlación de frecuencia central menor $f_c=3.17$ Hz.

Luego de establecer la ventana del ruido y de la señal, se calcula la RSR para cada una de las ventanas disponibles, y aquellas que cumplan con $RSR>3.5$ son apiladas para generar la FCR final. La Figura 5.13 muestra el resultado de aplicar la restricción $RSR>3.5$ a las correlaciones crudas mostradas en la Figura 5.12.

El valor de 3.5 como condición mínima de RSR es elegido a partir de la cantidad de ventanas que cumplen con dicho criterio y la calidad de la FCR generada. La Figura 5.14 muestra el número de ventanas que tienen cierto RSR, ordenado de mayor a menor para la totalidad de ventanas disponibles entre las estación DG24 y DG19. La Figura 5.14 muestra que a medida que se aumenta la frecuencia central, una menor cantidad de ventanas cumplen con el criterio, siendo la frecuencia central de 4 Hz la más afectada con solo 144 ventanas sobre el criterio.

Establecer un RSR mínimo para cada ventana es similar al método “rms-stacking” propuesto originalmente por Picozzi et al. (2009) y modificado por Shirzad and Shomali (2014b). Ambos métodos tienen por objetivo mejorar la calidad de la FCR mediante el aumento de la media cuadrática de la ventana de la señal.

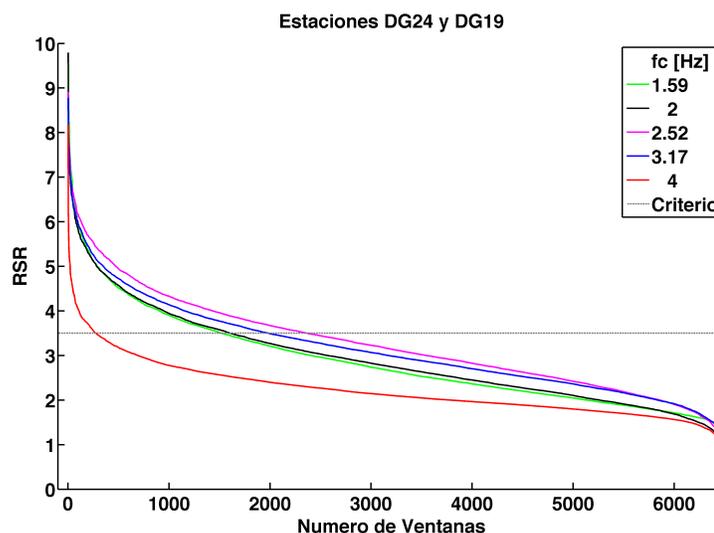


Figura 5.14. Ventanas ordenadas según RSR y frecuencia en estudio.

El apilamiento en la obtención de la FCR final es crucial, ya que permite eliminar la parte transiente de las correlaciones cruzadas mientras que las partes permanentes son sumadas coherentemente generando FCR's con mayores RSR.

La Figura 5.15 muestra una serie de correlaciones cruzadas calculadas a partir de un registro de un día (1440 minutos) que se divide en ventanas de distinto largo. El resultado indica que a medida que el tamaño de la ventana se reduce y el número de ventanas aumenta, el RSR aumenta. Una ventana de 10 minutos permite obtener un óptimo RSR y a su vez un gasto computacional moderado.

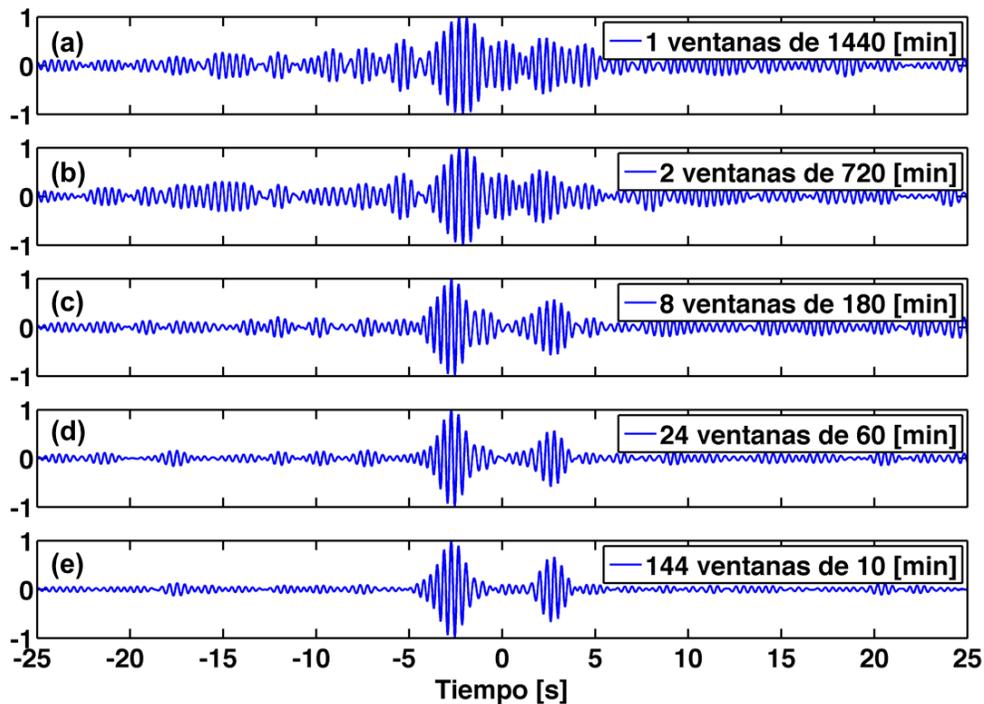


Figura 5.15. Efecto del apilamiento sobre la FCR final apilando: (a) 1 ventana de 1440 [min] (b) 2 ventanas de 720 [min] (c) 8 ventanas de 180 [min] (d) 24 ventanas de 60 [min] y (e) 144 de 10 [min]

5.4. Etapa 4: Medición de Velocidad de Grupo

La Figura 5.16 muestra la velocidad de grupo calculada a partir de la Ecuación 4.24, utilizando los máximos detectados en la Figura 5.13 para las estaciones DG24 y DG19. En la figura se observa que la velocidad de grupo calculada con la información de la FCR para desfases negativos es

levemente distinta a la aportada por la de desfases positivos. En este trabajo, la velocidad de grupo se considerará como el promedio de ambos desfases.

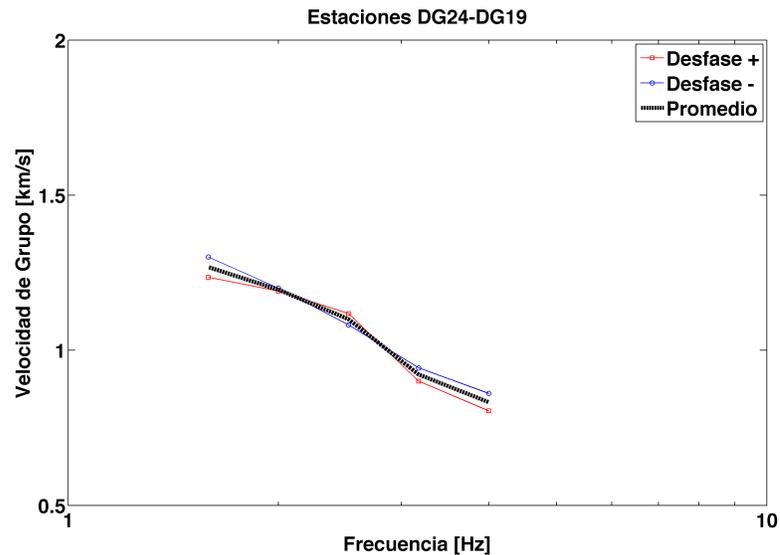


Figura 5.16. Curva de dispersión en velocidad de grupo para las estaciones DG24 y DG19.

5.5. Validación de la Metodología Temporal usando la Transformada S

La metodología temporal propuesta para el cálculo de las correlaciones cruzadas y la obtención de curvas de dispersión en velocidad de grupo se verifica con el uso de la Transformada de Stockwell (Sección 4.3). El proceso de cálculo contempla dos etapas adicionales al acondicionamiento de señales descrito en la Sección 5.1.

5.5.1. Cálculo de Correlaciones cruzadas y Apilamiento

En esta etapa, se calculan las correlaciones cruzadas en cada una de las ventanas disponibles para posteriormente apilarlas. Para realizar la correlación cruzada se utiliza la versión espectral de la misma (Ecuación 4.22), previo blanqueamiento de las señales. Luego de realizar la correlación en el espacio de las frecuencias, esta se lleva al dominio del tiempo mediante la inversa de la transformada de Fourier. El efecto del apilamiento sobre el análisis tiempo-Frecuencia es idéntico al observado en la metodología temporal y espectral.

5.5.2. Medición de Velocidad de Grupo

El análisis tiempo frecuencia de las correlaciones cruzadas se realiza calculando la Transformada de Stockwell (Ecuaciones 4.13 y 4.14) de la FCR promedio. Para el cálculo de la TS se consideran 120 [s] de la señal, correspondientes a 60 segundos de información con desfase positivo y 60 segundos de desfase negativo. El largo de la FCR utilizado para el calcula de la TS guarda relación con los tiempos de cálculo y los resultados obtenidos.

A partir del cálculo de la TS se obtiene una matriz que contiene información respecto a la fase y amplitud de la FCR para distintas frecuencias y tiempos de desfase. La velocidad de grupo para cada frecuencia está asociada a los tiempos de desfase donde se producen las mayores amplitudes. Por lo anterior, la transformada se normaliza en cada frecuencia por su máximo valor absoluto. La Figura 5.17 muestra la Transformada de Stockwell normalizada de la FCR promedio entre las estaciones DG24 y DG19.

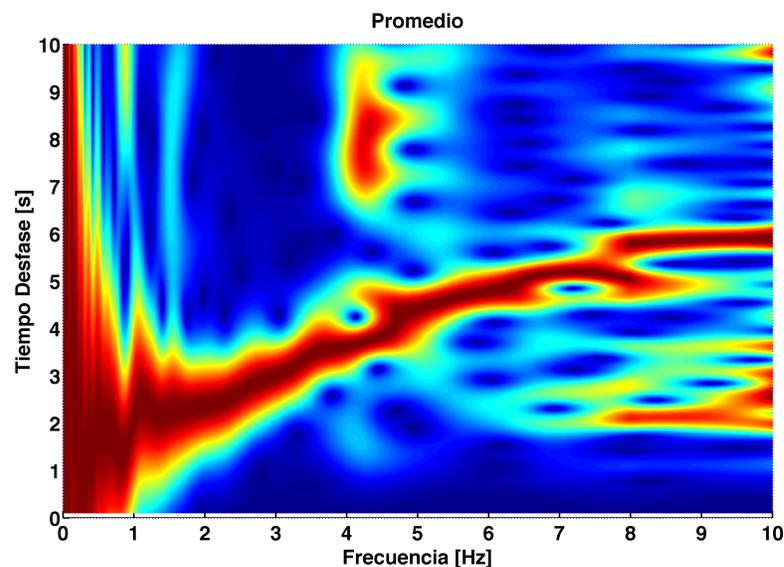


Figura 5.17. Transformada de Stockwell normalizada de la FCR promedio para las estaciones DG24 y DG29.

El mapa de velocidad-frecuencia se obtiene al dividir la distancia entre estaciones por los tiempos de desfase de la FCR. La velocidad de grupo se calcula a partir del tiempo donde se produce la mayor amplitud para cada frecuencia. La distribución heterogénea de fuentes de ruido alrededor de las estaciones correlacionadas causa que la TS calculada para desfases positivos sea diferente a la calculada para desfases negativos. La Figura 5.18 muestra la TS calculada para desfases positivos, negativos y el promedio de ambos desfases de la FCR entre las estaciones DG24 y DG19. Las

curvas negras en la figura corresponden a la velocidad de grupo detectada en forma automática según la máxima amplitud de la frecuencia de análisis. El primer punto de la curva negra cumple con la restricción de campo lejano impuesta por la Ecuación 4.25.

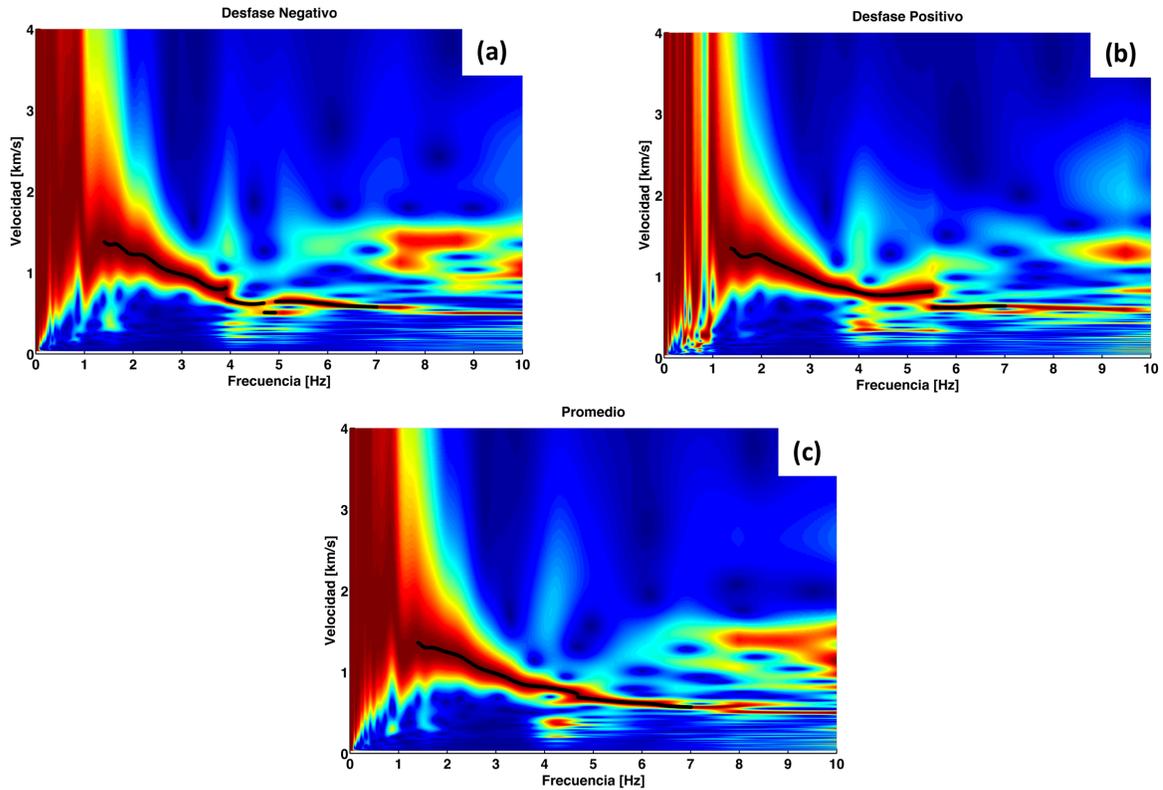


Figura 5.18. Mapa de velocidad-frecuencia a partir de la Transformada de Stockwell de la FCR para las estaciones DG24 y DG19. (a) Desfase negativo de la FCR. (b) Desfase positivo de la FCR. (c) FCR promedio de FCR con desfase negativo y positivo. En negro se muestra las máximas amplitudes para cada frecuencia.

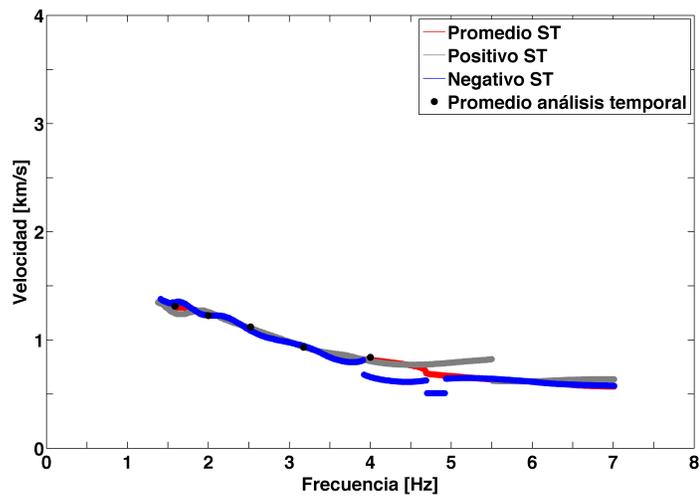


Figura 5.19. Comparación de velocidades de grupo medidas a partir de la TS con desfase positivo, negativo y promedio y la metodología temporal propuesta en este trabajo.

Se observa de la Figura 5.18 que las velocidades de grupo detectadas por el desfase positivo, negativo y promedio de la FCR difieren en forma y valores. La Figura 5.19 muestra las velocidades de grupo medidas con la TS para los desfases positivos, negativos y promedio junto con las velocidades de grupo calculadas en la Sección 5.4.1. En la figura se observa que las velocidades de grupo medidas por la parte positiva, negativa y promedio de la TS concuerdan con los valores encontrados por el análisis temporal entre los 1.4 y 4 Hz. Además, es interesante notar que la metodología temporal propuesta no resuelve velocidades sobre los 4 Hz, lo cual concuerda con el corrimiento que existe entre las curvas de desfase positivo y negativo de la TS. A pesar de que los valores de velocidad de grupo medidos por la TS y el análisis temporal propuesto en esta investigación son similares, la TS tiene ventajas considerables entre las que destacan:

1. Mediante un análisis visual de la TS se puede estimar de manera sencilla el rango de frecuencia donde es posible medir velocidad de grupo.
2. La forma de discretizar la frecuencia en la TS, permite obtener de manera óptima una mayor cantidad de puntos de la curva de velocidad de grupo en comparación a la metodología temporal propuesta.

6. Cálculo de Correlaciones Cruzadas: Metodología Espectral

El objetivo principal de la metodología espectral es obtener curvas de dispersión en velocidad de fase entre estaciones mediante el seguimiento de los cruces por cero de la parte real del espectro de correlación. Las etapas que se proponen para obtener las curvas de dispersión son las siguientes:

Etapas 1: Acondicionamiento de señales

Etapas 2: Cálculo de espectro de correlación, apilamiento y detección de cruces por cero.

Etapas 3: Cálculo de velocidad de fase

6.1. Etapa 1: Acondicionamiento de Señales

La Etapa 1 tiene por objetivo preparar las señales para que sus espectros sean correlacionados. Los pasos utilizados en esta etapa son idénticos a los descritos en la Etapa 1 de la metodología temporal (Capítulo 5).

6.2. Etapa 2: Cálculo de espectro de correlación, Apilamiento y Detección de Cruces por Cero

La Etapa 2 tiene por objetivo detectar los cruces por cero de la parte real del espectro de correlación. Para lograr lo anterior, se calcula el espectro de correlación entre las estaciones j e i para ventanas de 10 minutos, utilizando la Ecuación 4.22. Otras investigaciones recomiendan el blanqueamiento previo al cálculo del espectro de correlación (Tsai and Moschetti, 2010; Calkins et al., 2011; Boschi et al., 2012), pero en este trabajo se omite este proceso ya que involucra un mayor costo computacional que no se traduce en mejores resultados. La Figura 6.1 muestra el efecto que tiene el blanqueamiento sobre el espectro de correlación. Se observa de la Figura 6.1c que el blanqueamiento previo de las señales no tiene efecto sobre el espectro correlacionado promedio final. Es importante mencionar que los espectros de las Figura 6.1a y Figura 6.1b consideran el apilamiento de ventanas de 10 minutos disponibles en 45 días de medición.

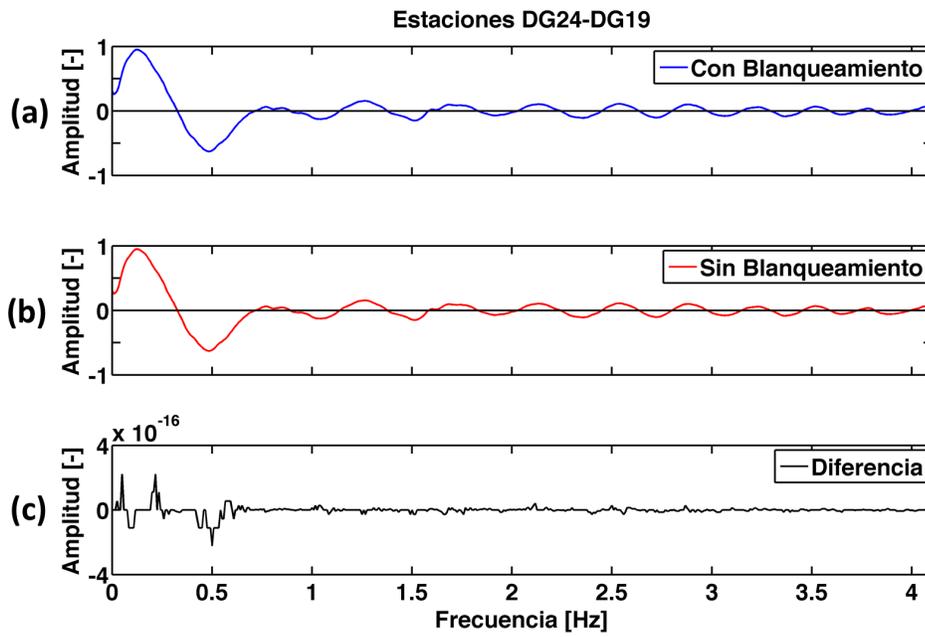


Figura 6.1. Efecto del blanqueamiento en el espectro de correlación. (a) Espectro de correlación calculado con blanqueamiento de señales. (b) Espectro de correlación calculado sin blanqueamiento de señales. (c) Diferencia entre (a) y (b).

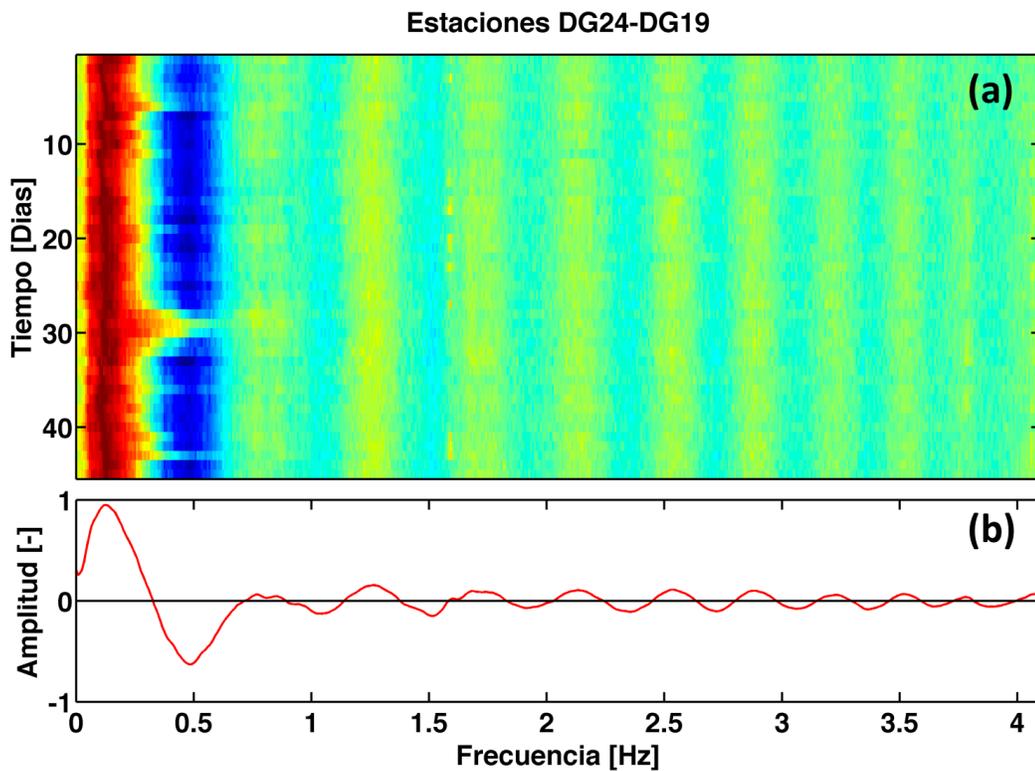


Figura 6.2. Parte real de los espectros de correlación para las estaciones DG24 y DG19. (a) Espectro de correlación de los 45 días disponibles. (b) Espectro de correlación promedio normalizado.

Luego de calcular los espectros de correlación para las ventanas de 10 minutos, se calcula la parte real de los mismos y se normaliza por su máximo valor absoluto, generando espectros de amplitud máxima unitaria. Los espectros normalizados son apilados diariamente y almacenados en una matriz. La matriz generada, permite inspeccionar visualmente la calidad de los espectros calculados, permitiendo detectar días ruidosos. La Figura 6.2a muestra una imagen de la matriz con la parte real del espectro de correlación entre las estaciones DG24 y DG19 para los 45 días disponibles, mientras que la Figura 6.2b muestra el promedio normalizado de la parte real de los espectros de correlación. La figura muestra que el día 30 es ruidoso en la baja frecuencia, por lo cual podría eliminarse para que no afecte en las siguientes etapas del procesamiento. Es importante observar la gran amplitud de las bajas frecuencias en comparación a la amplitud del espectro en la alta frecuencia. Con esto se confirma que la amplitud del espectro correlacionado no decae como lo hace la función de Bessel.

Al igual que en la metodología temporal, el apilamiento es el proceso de mayor importancia en la metodología espectral y depende exclusivamente de la cantidad de ventanas utilizadas. La Figura 6.3 muestra la parte real de espectros de correlación de 45 días de registros divididos en ventanas temporales de distinto largo. A medida que se disminuye el tamaño de la ventana y por ende se aumenta la cantidad de ventanas apiladas, los cruces por cero de la parte real del espectro se identifican más claramente. Es tal la importancia del apilamiento que evita el uso de operaciones no lineales tales como el blanqueamiento y la normalización temporal (Ekström, 2014).

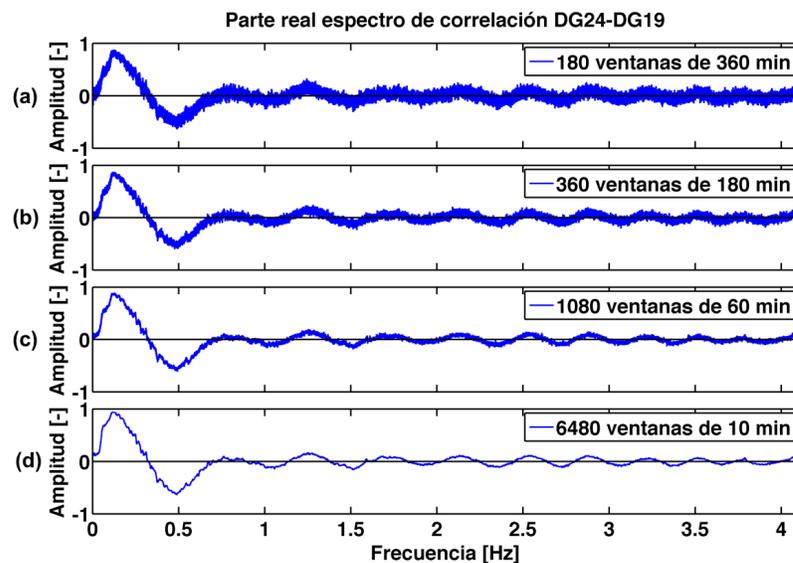


Figura 6.3. Efecto de la cantidad de ventanas apiladas sobre el espectro de correlación. (a) 180 ventanas de 360 [min], (b) 360 ventanas de 180 [min], (c) 1080 ventanas de 60 [min] y (d) 6480 ventanas de 10 [min].

Luego de apilar la parte real de todos los espectros de correlación disponibles, se procede a detectar los cruces por cero. Para ello, se recorre el espectro detectando los cambios de signo de la señal y mediante interpolación lineal se detecta la posición de los ceros. En algunas ocasiones la detección se dificulta debido a que la amplitud del espectro es ruidosa para estaciones con pocos días disponibles y debido a la baja amplitud del espectro correlacionado en altas frecuencias. Finalmente, es necesario suavizar el espectro utilizando una media móvil y eliminar aquellos ceros que estén espaciados a una distancia menor a 0.01 Hz (Figura 6.4).

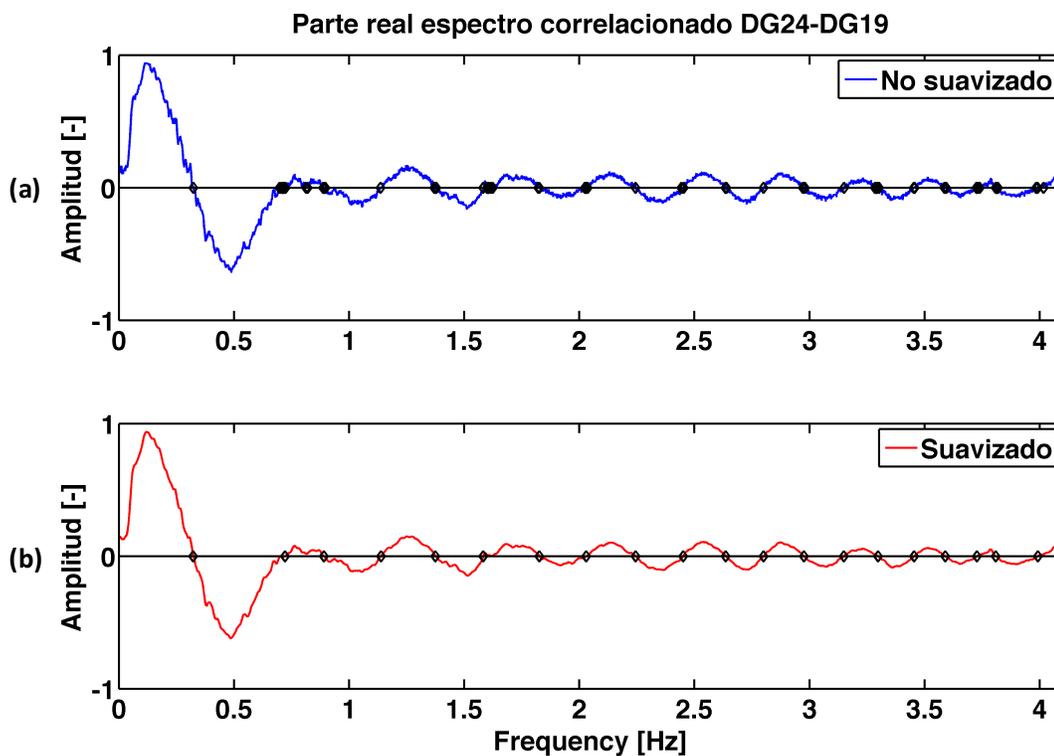


Figura 6.4. Detección de cruces por cero a partir de espectros de correlación (a) no suavizado y (b) suavizado.

6.3. Etapa 3: Medición de Velocidad de Fase

Para calcular la velocidad de fase se utiliza la Ecuación 4.27, la cual depende de la distancia entre estaciones Δ , la frecuencia donde se produce el n -ésimo cruce por cero w_n y el cero z_{n+m} correspondiente a la función de Bessel de primera especie y orden cero J_0 . Los primeros 11 ceros de la función de Bessel se muestran en la Figura 4.7 y los siguientes ceros se pueden calcular mediante la siguiente aproximación

$$x_n = \pi \left(n - \frac{1}{4} \right) \quad (6.1)$$

La Figura 6.5 muestra un ejemplo de la familia de curvas de dispersión en velocidad de fase obtenidas mediante el uso de la Ecuación 4.27 para distintos valores de m . La línea continua que se muestra en la figura se elige como la curva de dispersión basada en valores obtenidos por otros pares de estaciones y la información aportada por la curva de dispersión en velocidad de grupo.

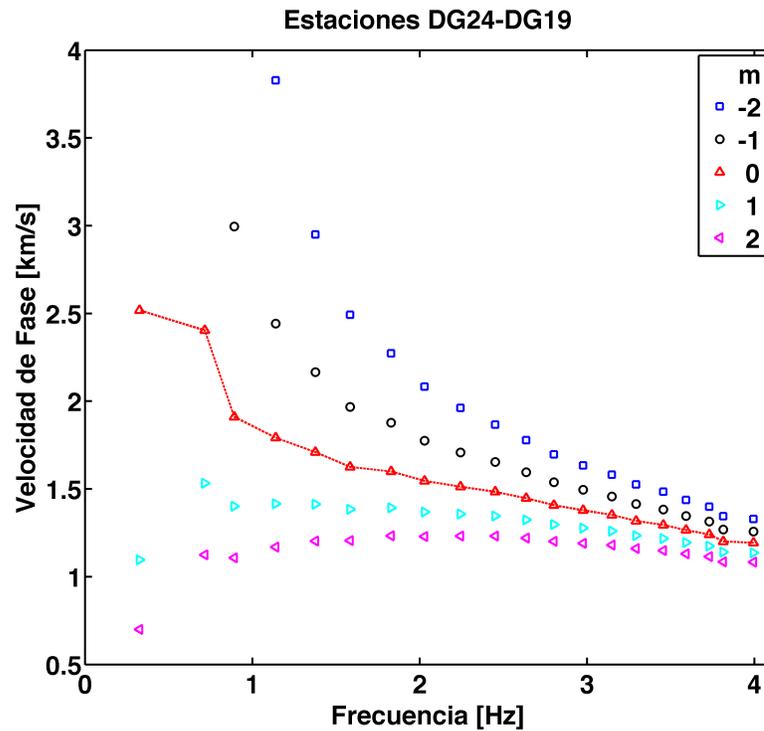


Figura 6.5. Familia de curvas de velocidad de fase obtenidas con el método espectral. La línea continua muestra la curva de dispersión escogida.

7. Resultados

En este capítulo se muestran y comparan los resultados obtenidos mediante la metodología temporal y espectral desarrolladas en los Capítulos 5 y 6.

7.1. Resultados Obtenidos Mediante Metodología Temporal

Las FCRs obtenidas mediante la metodología temporal muestran un comportamiento dependiente de la frecuencia. Para frecuencias menores a 1 Hz las correlaciones son asimétrica mientras que las FCR calculadas para frecuencias mayores a 1 Hz son generalmente simétricas. La Figura 7.1 muestra las FCRs obtenidas entre las estaciones DG03-DG24, DG24-DG29 y DG24-DG19 para frecuencias centrales entre los 0.5 y 4 Hz.

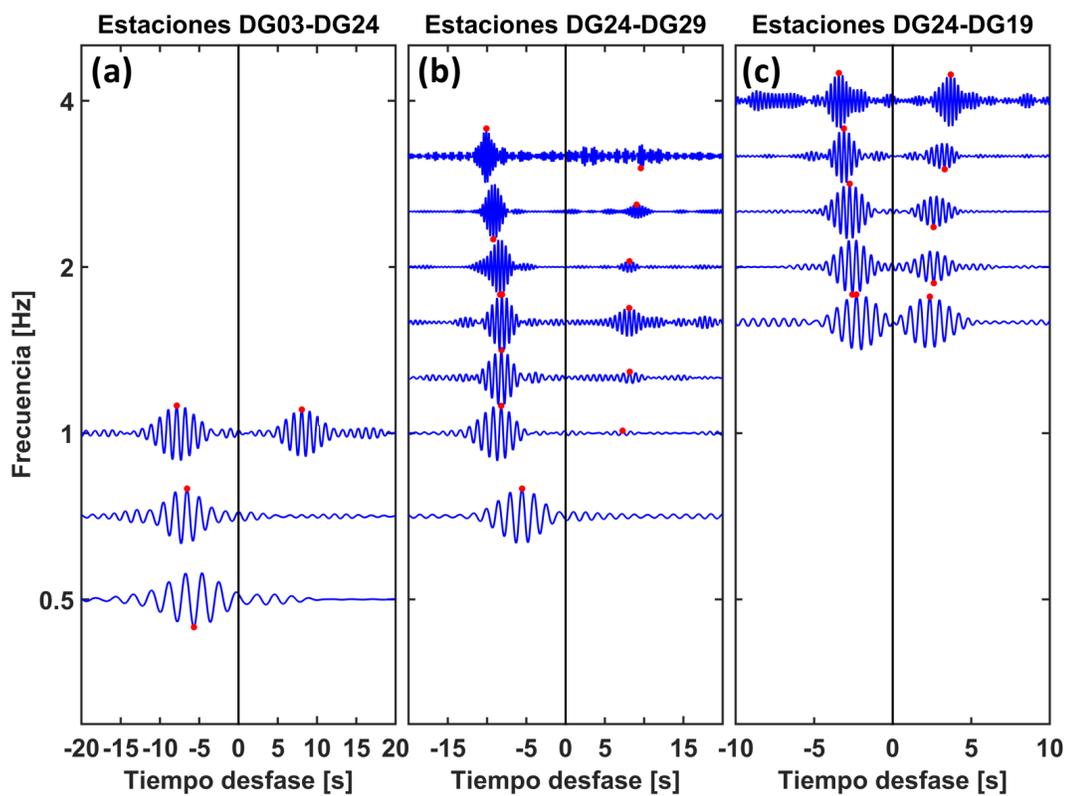


Figura 7.1. FCR calculadas a diferentes frecuencias, en rojo se muestra el valor máximo de cada FCR. (a) FCR entre estaciones DG03 y DG24 calculadas para frecuencias centrales entre 0.5-1 Hz. (b) FCR entre estaciones DG24 y DG29 calculadas para frecuencias centrales entre 0.71 y 3.17 Hz. (c) FCR entre estaciones DG24-DG19 calculadas para frecuencias centrales entre 1.59 y 4 Hz.

Las Figuras 7.1a y 7.1b muestran que las FCRs calculadas para frecuencias menores a 1 Hz son asimétricas en forma y amplitud, mostrando un valor máximo para desfases temporales negativos.

Por otro lado, las Figuras 7.1b y 7.1c muestran que FCR calculadas para frecuencias mayores a 1 son simétrica en forma pero no necesariamente en amplitud.

7.1.1. FCR Calculadas a Bajas Frecuencias

La Figura 7.2 muestra FCRs calculadas entre las estaciones DG33-DG29, DG30-DG35 y DG03-DG36 para frecuencias centrales menores a 1 Hz junto con la velocidad de grupo asociada. Las FCRs de la figura son asimétricas y las velocidades de grupo calculadas varían desde los 2.8 km/s para frecuencias centrales de 0.35 Hz hasta los 1.5 km/s a 1 Hz.

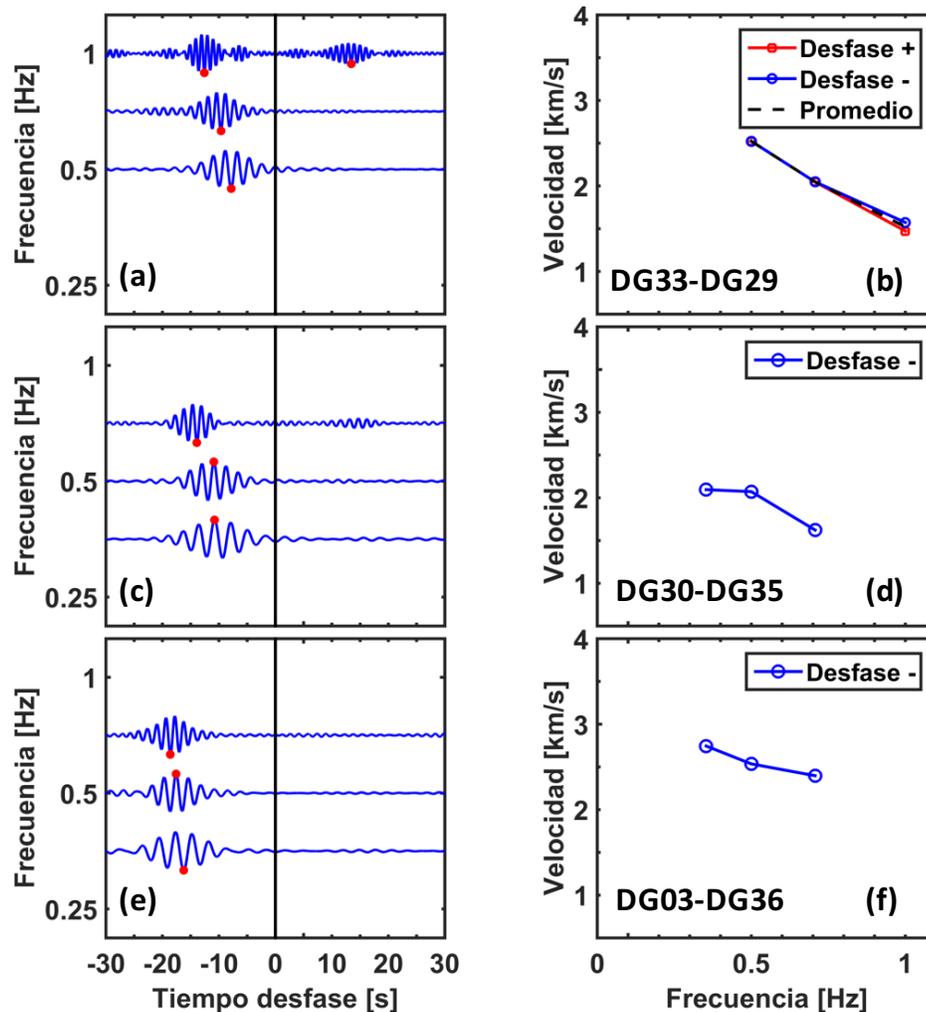


Figura 7.2. Ejemplo de correlaciones asimétricas para bajas frecuencias y sus respectivas velocidades de grupo. (a) y (b) Estaciones DG33-DG29, (c) y (d) estaciones DG30-DG35, (e) y (f) estaciones DG03-DG36.

En la sección 4.4, se mencionó que la asimetría en forma y amplitud observada en las correlaciones cruzadas se debe a una distribución heterogénea de las fuentes de ruido alrededor de las estaciones

correlacionadas. Para conocer la distribución de fuentes de ruido en la cuenca de Santiago, se estudia la variación azimuthal de la RSR. La Figura 7.3a muestra la distribución de RSR en función del azimuth para FCRs calculadas con una frecuencia central de 0.35 Hz y distancias entre estaciones en el rango de (12-70) km. La Figura 7.3b muestra las FCRs que tienen RSRs mayores a 3.5 y azimuths entre 45° y 135°. Las estaciones utilizadas en la Figura 7.3a y 7.3b corresponden a los sismógrafos de banda ancha y acelerógrafos de las Tablas 3.1 y 3.2, respectivamente. La Figura 7.3a muestra que las mayores RSRs se registran en los pares de estaciones con azimuth entre 45° y 135°. En dicha dirección se encuentran las fuentes de ruido que dominan las FCRs para frecuencias centrales menores a 1 Hz. La Figura 7.3b muestra que las FCRs calculadas en la dirección mencionada presentan una clara asimetría para desfases negativos y una velocidad de grupo de 2.75 km/s para una frecuencia central de 0.35 Hz, que concuerda con velocidades estimadas en roca continental (Udías, 2000).

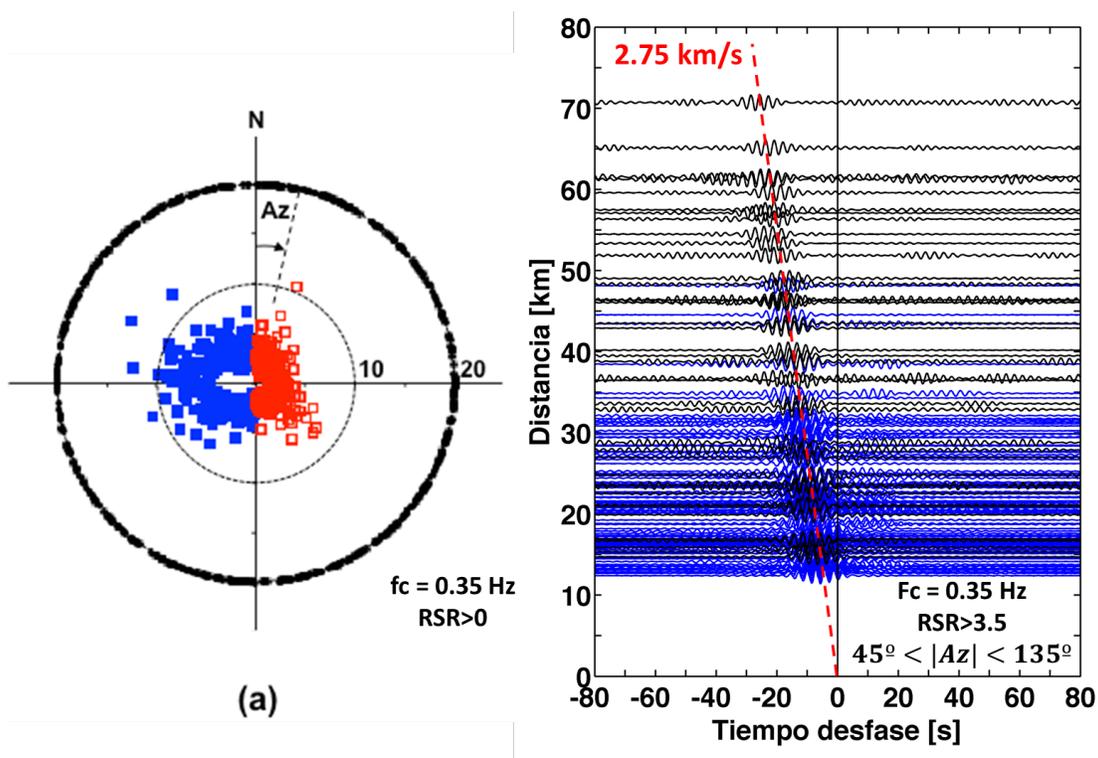


Figura 7.3. Asimetría observada en las FCR para frecuencias menores 1 Hz. (a) Distribución de RSR según azimuth, en rojo se muestran los RSR para desfases positivos y en azul para desfases negativos. (b) FCRs para $f_c = 0.35 \text{ Hz}$ ordenadas según distancia entre estaciones y con azimuth entre los 45° y 135°, FCR en negro corresponden a acelerógrafos y azul instrumentos banda ancha.

7.1.2. FCR Calculadas a Alta Frecuencias

Las FCRs calculadas para frecuencias centrales mayores o iguales a 1 Hz pueden ser divididas en tres tipos:

1. FCRs simétricas: Se observan dos peaks, uno para desfases positivos y otro para desfases negativos.
2. FCRs asimétricas: Se observa un solo peak, este puede ser para desfases positivos o negativos.
3. FCRs sin correlación: No se observa un peak con claridad.

Las Figuras 7.4, 7.5 y 7.6 muestran ejemplos de los distintos tipos de FCRs en la cuenca de Santiago. La Figura 7.4 muestra las FCRs y velocidades de grupo calculadas para los pares de estaciones DG24-DG19, DG28-DG08 y DG13-DG26 para frecuencias centrales entre los 1 y 4 Hz. Las Figuras 7.4a, c y e muestran que las estaciones analizadas presentan correlaciones del tipo simétrico en el rango de frecuencia estudiado. Lo anterior permite calcular velocidades de grupo que varían desde 1.2 hasta 0.7 km/s para frecuencias centrales de 1 y 4 Hz, respectivamente. Es importante observar que el rango de frecuencias alcanzado por los pares de estaciones mostrados en la Figura 7.4 es mucho mayor a los alcanzados en la Figura 7.2.

La Figura 7.5 muestra las FCRs y velocidades de grupo calculadas para los pares de estaciones DG06-DG38, DG13-DG40 y DG26-DG40 para un rango de frecuencia entre los 1.26 y 5.04 Hz. Las FCR's en las Figuras 7.5a, c y e son del tipo asimétrica para desfases negativos. Las velocidades de grupo calculada para estos pares de estaciones varía entre 1.1 y 0.7 km/s para frecuencias centrales de 1.26 y 5.02 Hz.

A partir de las velocidades mostradas en las Figuras 7.2, 7.4 y 7.5, es posible calcular las longitudes de onda asociadas ($\lambda = v/f$) a cada medición. Se observa que las longitudes de onda varían entre los 8 a 0.1 km para frecuencias centrales de 0.35 y 5.02 Hz respectivamente. Lo anterior muestra que las FCRs calculadas en la alta frecuencia permiten estudiar estratos más superficiales en comparación a la baja frecuencia.

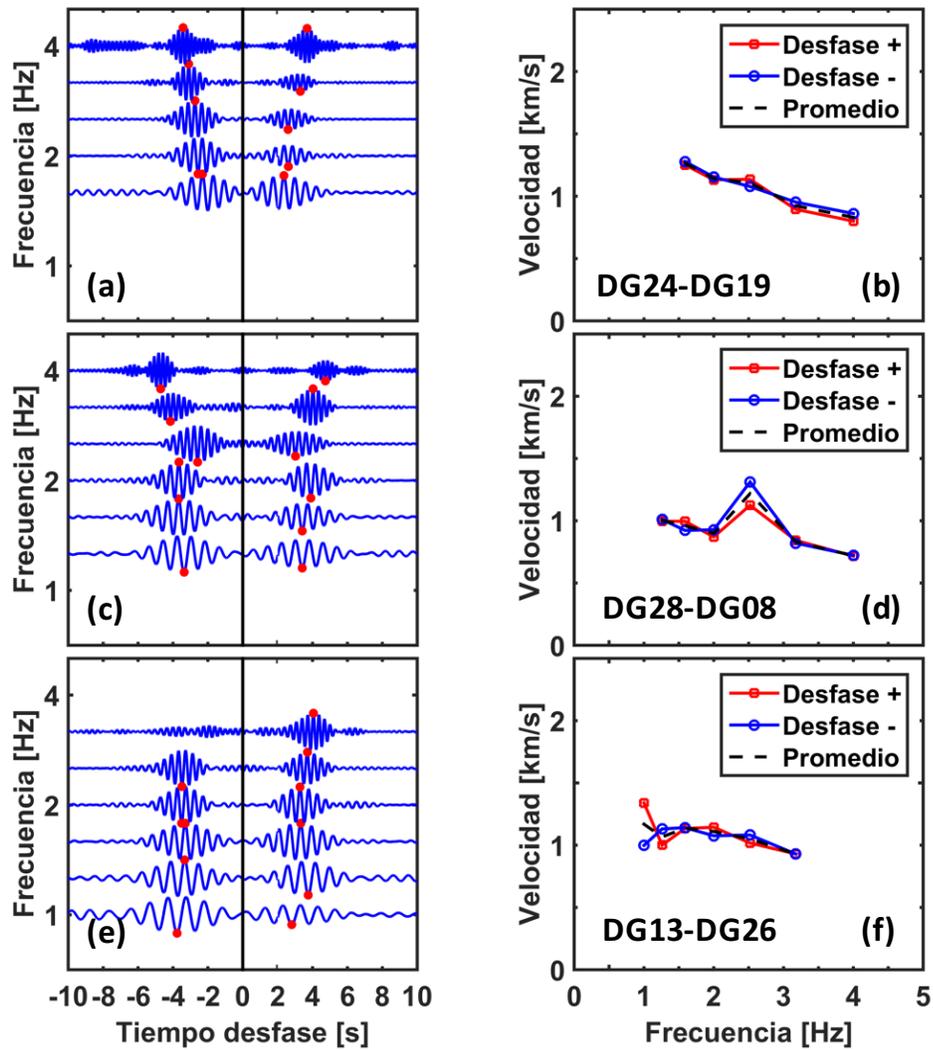


Figura 7.4. Ejemplo de correlaciones simétricas y sus respectivas velocidades de grupo. (a) y (b) Estaciones DG24-DG19, (c) y (d) estaciones DG28-DG08 y (e) y (f) estaciones DG13-DG26.

La Figura 7.6 muestra las FCRs calculadas para frecuencias centrales entre 1.26 y 2.56 Hz de los pares de estaciones DG21-DG27, DG12-DG05 y DG16-DG38. Los pares de estaciones analizados en la figura no presentan correlación en el rango de frecuencia analizado. La falta de correlación entre algunos pares de estaciones se discute en los siguientes capítulos.

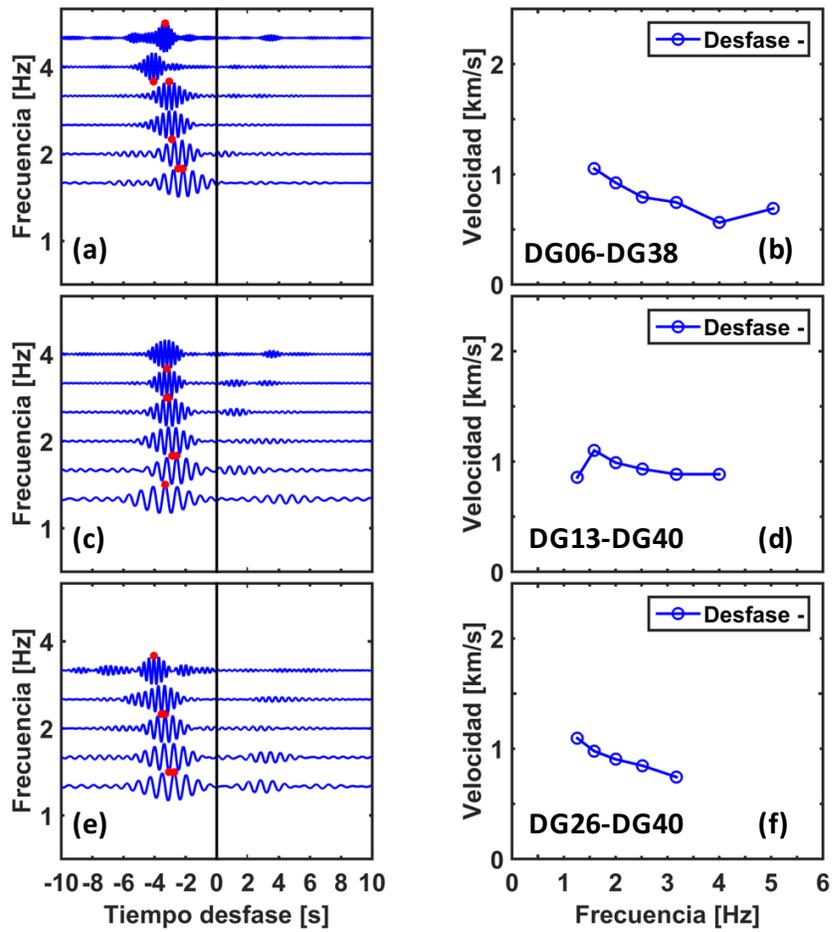


Figura 7.5. Ejemplo de correlaciones asimétricas en alta frecuencia y sus respectivas velocidades de grupo. (a) y (b) Estaciones DG06-DG38, (c) y (d) estaciones DG13-DG40 y (e) y (f) estaciones DG26-DG40.

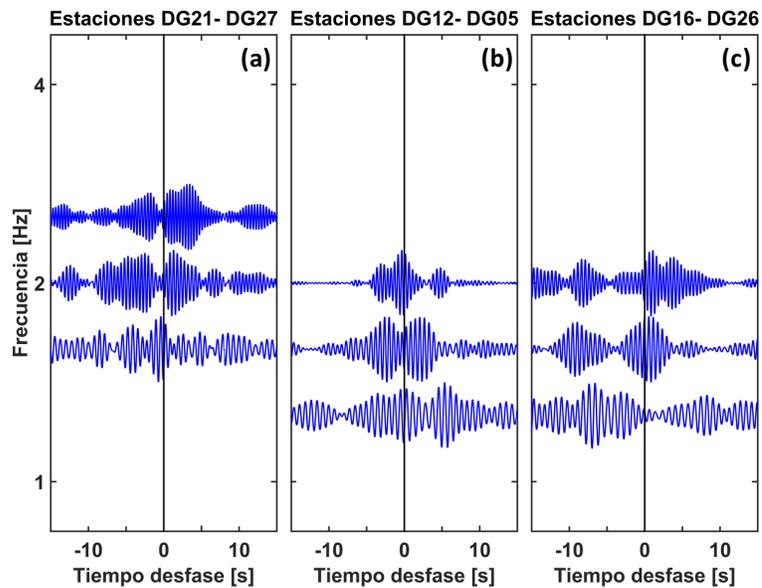


Figura 7.6. Ejemplos de pares de estaciones sin correlación. (a) Estaciones DG21-DG27, (b) estaciones DG12-DG05, (c) estaciones DG16-DG26.

7.2. Comparación entre metodología temporal y Transformada de Stockwell.

Las Figuras 7.7, 7.8, 7.9 y 7.10 muestran la comparación entre la velocidad de grupo obtenida mediante la metodología temporal y la TS. Las curvas azules mostradas en las figuras, corresponden a la velocidad de grupo detectada de manera automática, mientras que los cuadrados negros corresponden a las mediciones de velocidad de grupo realizadas con la metodología temporal.

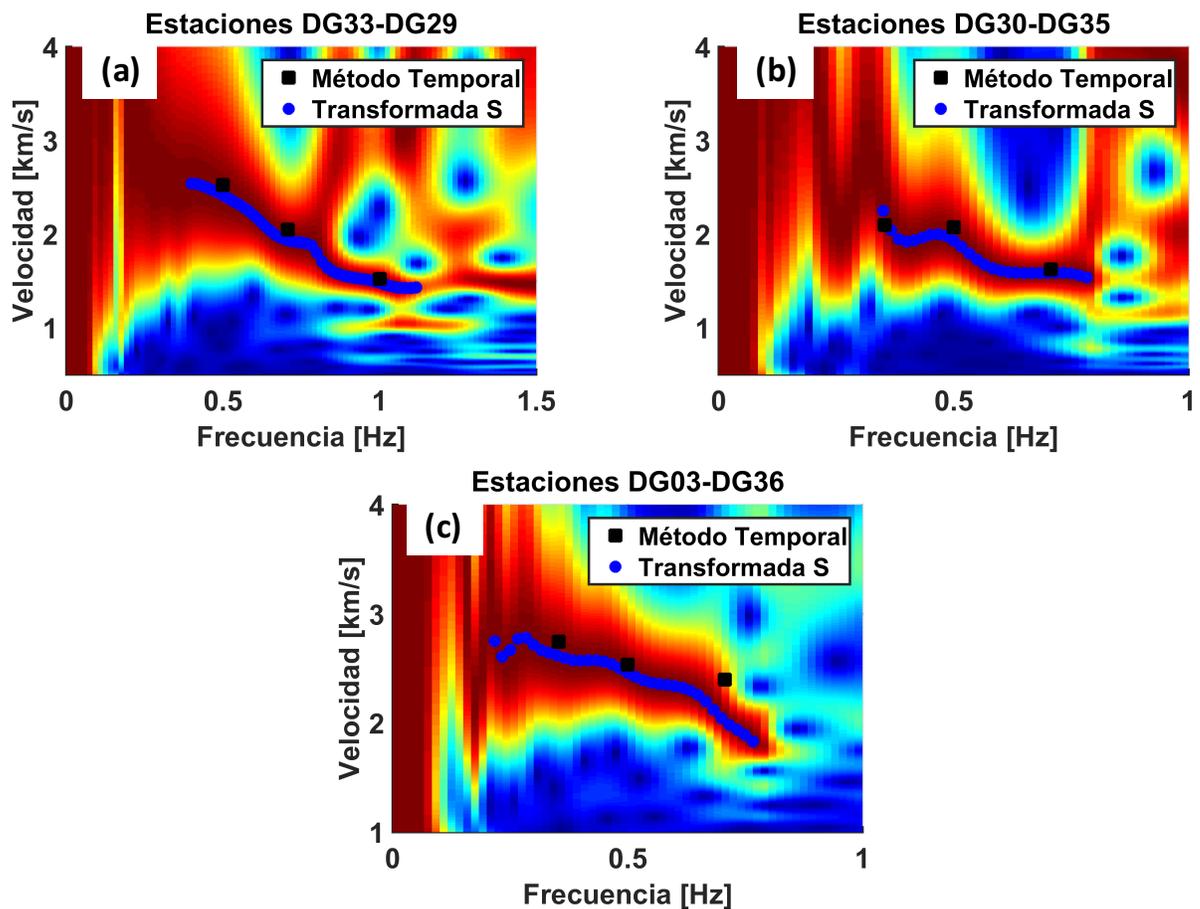


Figura 7.7. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.2. (a) DG33-DG29, (b) DG30-DG35 y (c) DG03-DG36.

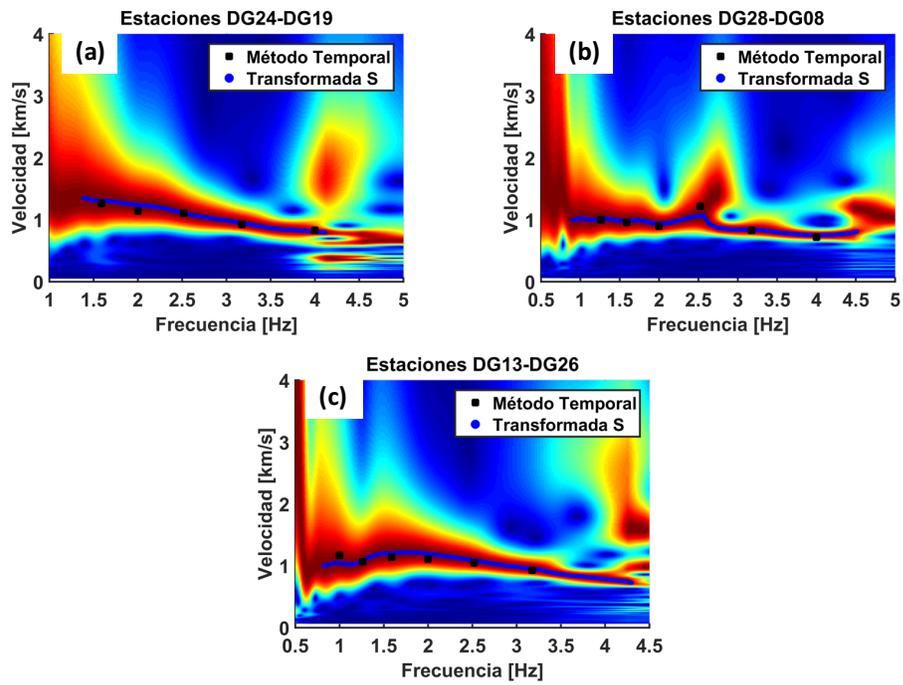


Figura 7.8. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.4. (a) DG24-DG19, (b) DG28-DG08 y (c) DG13-DG26.

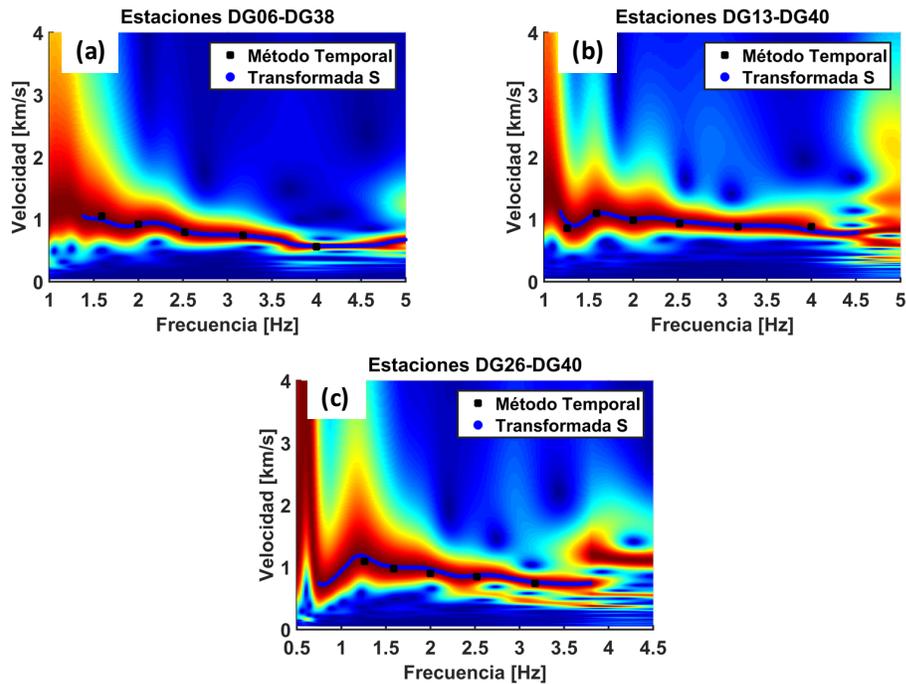


Figura 7.9. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.5. (a) DG06-DG38, (b) DG13-DG40 y (c) DG26-DG40.

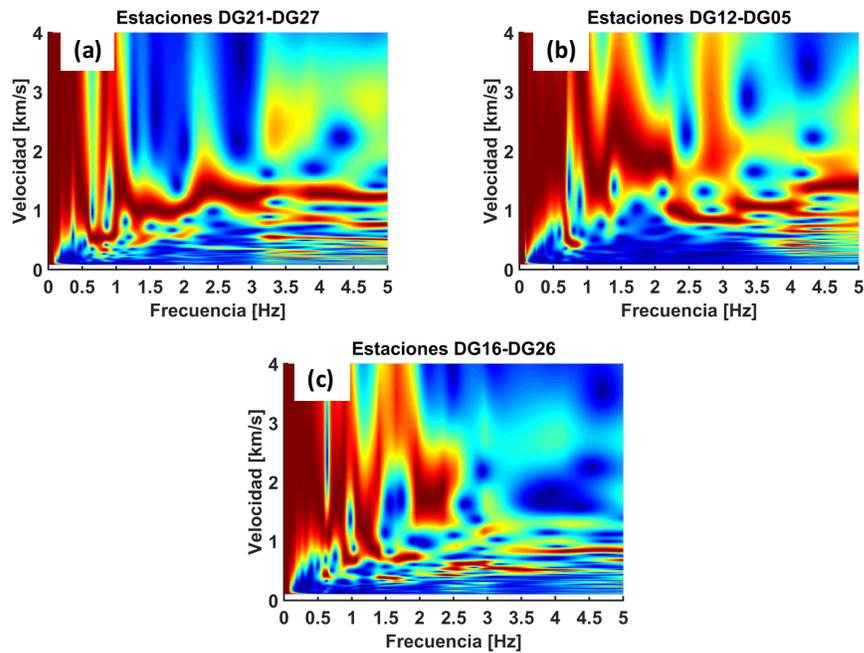


Figura 7.10. Comparación entre la velocidad de grupo obtenida con la TS y la metodología temporal, a los pares de estaciones de la Figura 7.6. (a) DG21-DG27, (b) DG12-DG05 y (c) DG16-DG26.

Los ejemplos de las Figuras 7.7 a 7.10 muestran que la TS permite obtener resultados similares a los calculados con la metodología temporal propuesta, pero con mejor discretización en frecuencia. Las curvas en velocidad de grupo calculadas con la TS cumplen con la restricción de que la máxima longitud de onda es igual a un tercio de la distancia entre estaciones (Ecuación 4.25). Sin embargo, las Figuras 7.7 a 7.9 muestran que la velocidad de grupo puede ser medida incluso a frecuencias menores. A continuación se presentan tres ejemplos de mediciones de velocidad de grupo para largas longitudes de onda que no cumplen con la restricción impuesta por la Ecuación 4.25. Para validar dichas mediciones, se compara la velocidad de fase obtenida a partir de la velocidad de grupo y la Ecuación 4.6 con la calculada mediante la metodología espectral.

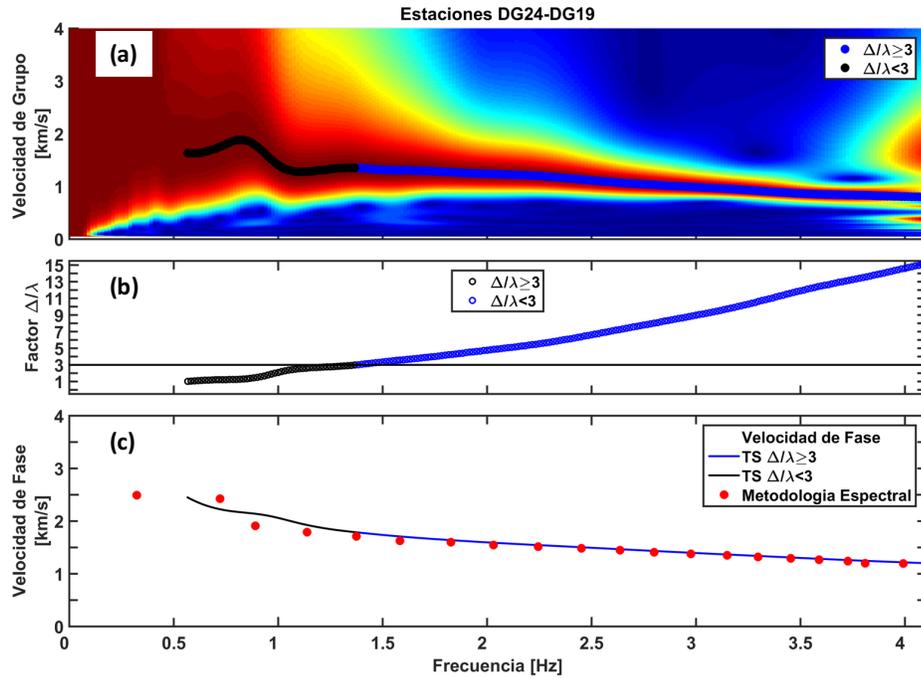


Figura 7.11. Medición de velocidad de grupo para longitudes de onda menores a tres veces la distancia entre estaciones para las estaciones DG24-DG19. (a) Velocidad de grupo calculada mediante la TS. (b) Variación de la razón distancia entre estación y longitud de onda. (c) Comparación de velocidad de fase calculada a partir de la velocidad de grupo y la Ecuación 4.6 y la obtenida con la metodología espectral.

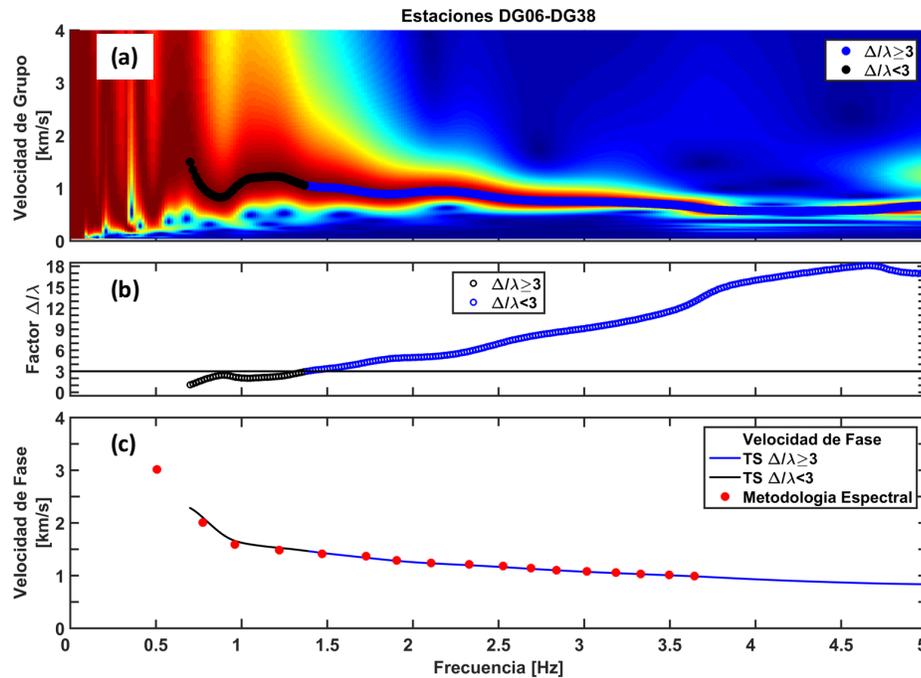


Figura 7.12. Medición de velocidad de grupo para longitudes de onda menores a tres veces la distancia entre estaciones para las estaciones DG06-DG38. (a) Velocidad de grupo calculada mediante la TS. (b) Variación de la razón distancia entre estación y longitud de onda. (c) Comparación de velocidad de fase calculada a partir de la velocidad de grupo y la Ecuación 4.6 y la obtenida con la metodología espectral.

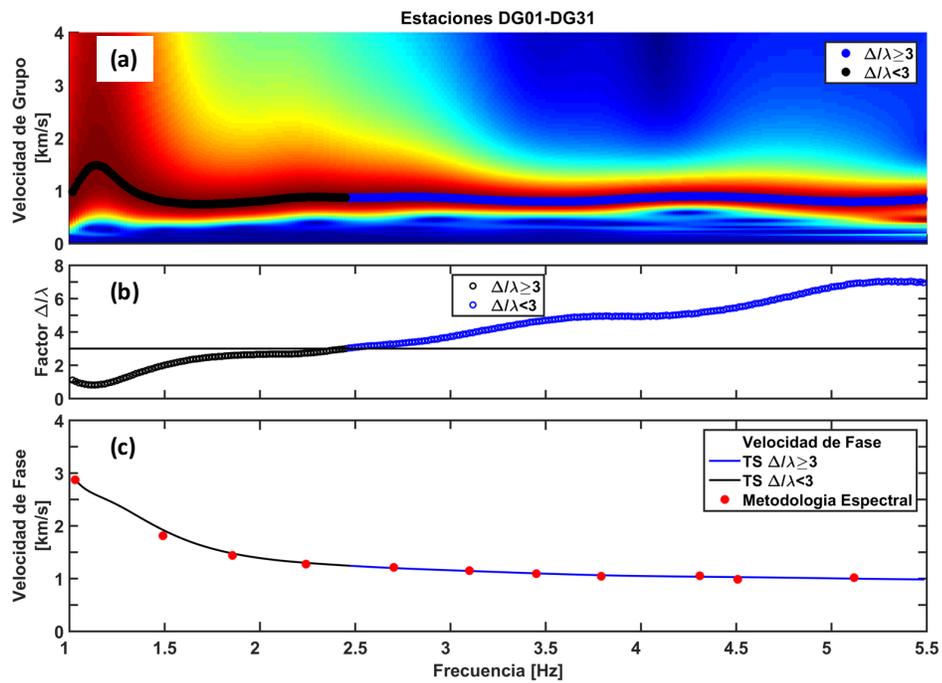


Figura 7.13. Medición de velocidad de grupo para longitudes de onda menores a tres veces la distancia entre estaciones para las estaciones DG01-DG31. (a) Velocidad de grupo calculada mediante la TS. (b) Variación de la razón distancia entre estación y longitud de onda. (c) Comparación de velocidad de fase calculada a partir de la velocidad de grupo y la Ecuación 4.6 y la obtenida con la metodología espectral.

7.3. Resultados Obtenidos Mediante la Metodología Espectral

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante la metodología espectral y se analizan los pares de estaciones que se muestran en las Figuras 7.2 a 7.5 con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con la metodología temporal.

7.3.1. Espectros correlacionados y cruces por cero

Las Figuras 7.14 a 7.16 muestran las variaciones diarias de la parte real del espectro correlacionado, el promedio de la parte real del espectro correlacionado junto con sus cruces por cero y la familia de curvas en velocidad de fase calculadas para los pares de estaciones que se muestran en las Figuras 7.2 a 7.5.

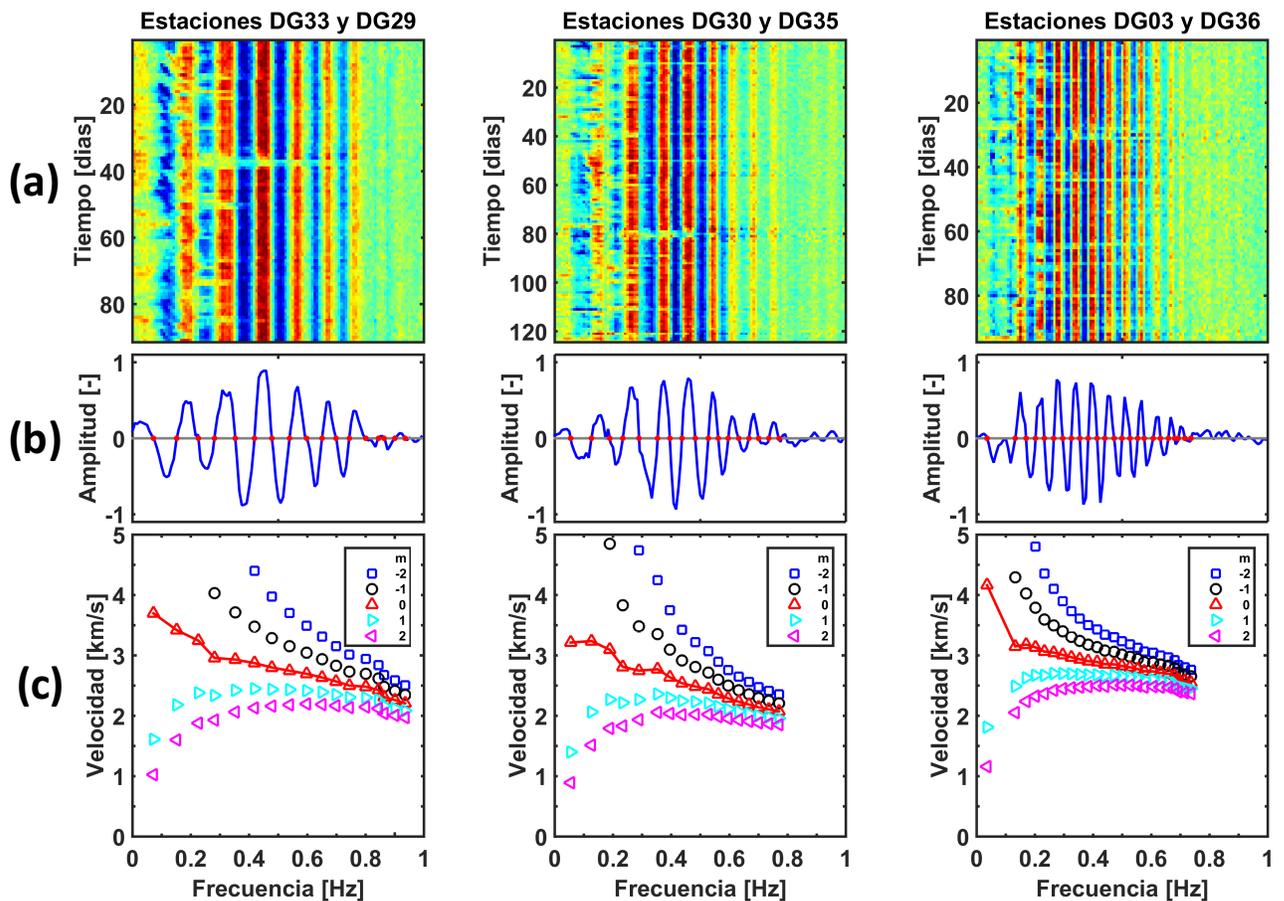


Figura 7.14. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado, (b) cruces por ceros y (c) velocidad de fase para correlaciones temporales asimétricas que se muestran en la Figura 7.2 entre las estaciones DG33-DG29, DG30-DG35 y DG03-DG36.

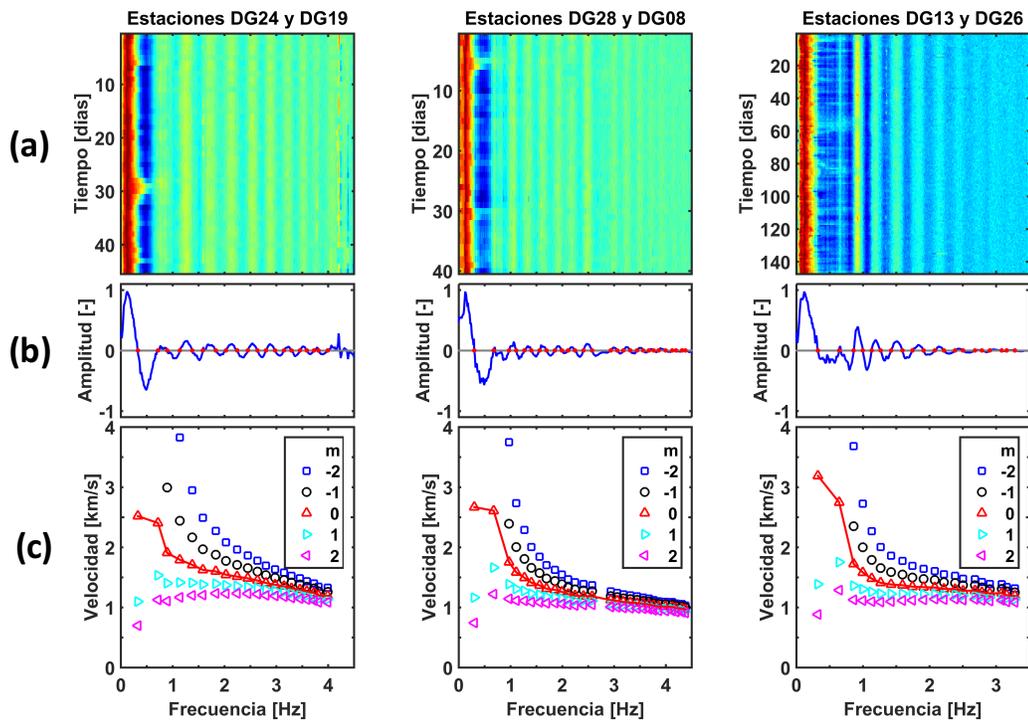


Figura 7.15. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado, (b) cruces por ceros y (c) velocidad de fase para correlaciones temporales simétricas que se muestran en la Figura 7.4 entre estaciones DG24-DG19, DG28-08 y DG13-DG26.

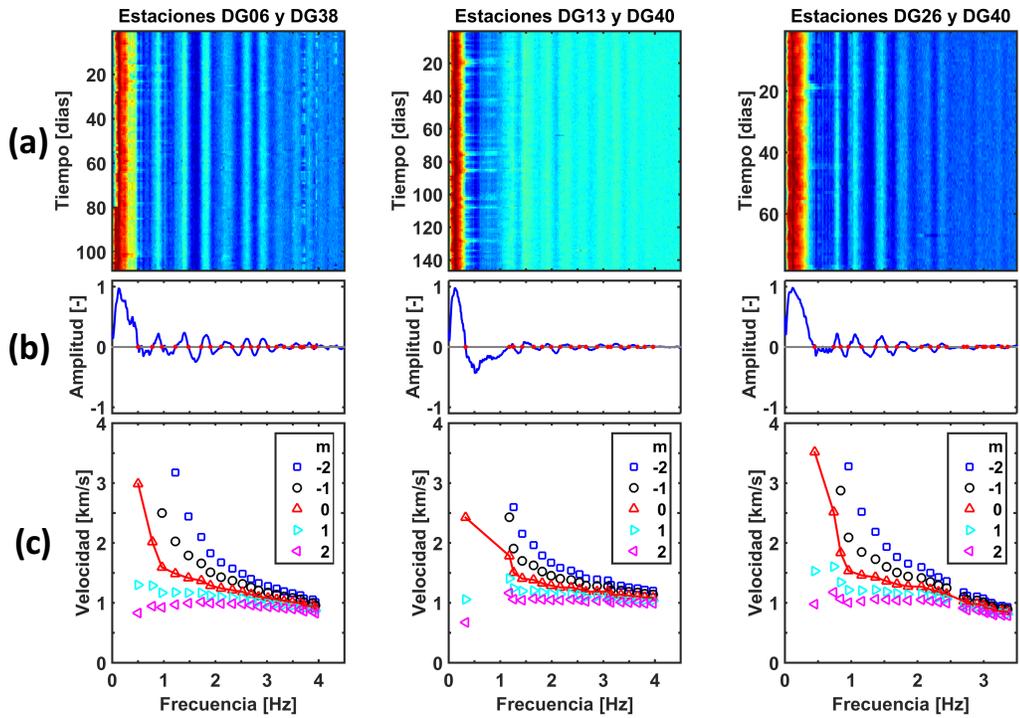


Figura 7.16. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado, (b) cruces por ceros y (c) velocidad de fase para correlaciones temporales simétricas que se muestran en la Figura 7.5 entre estaciones DG06-DG38, DG13-DG40 y DG26-DG40.

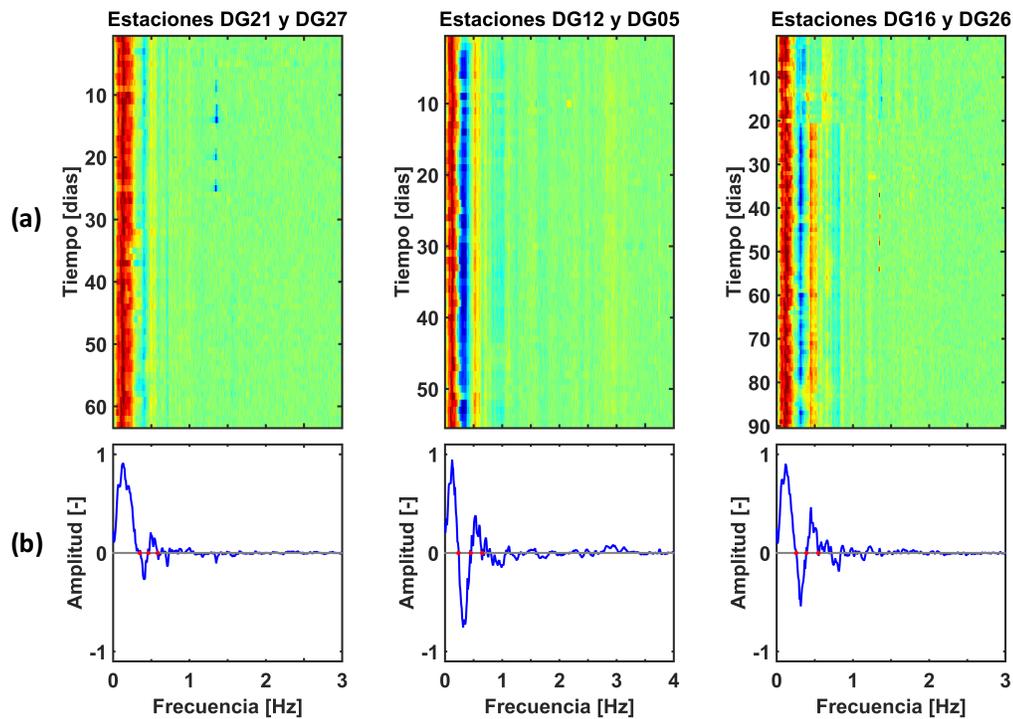


Figura 7.17. Resultados del método espectral. (a) Parte real del espectro correlacionado y (b) cruces por ceros en estaciones sin correlación temporal que se muestran en Figura 7.6 entre las estaciones DG21-DG27, DG12-05 y DG16-DG26.

Las Figuras 7.14 a 7.17 muestran que los pares de estaciones que poseen algún tipo de correlación temporal tienen espectros de correlación estables a lo largo de los días analizados, con claros cruces por cero de la parte real del espectro en un amplio rango de frecuencias. Por otro lado, los pares de estaciones sin correlación temporal muestran espectros de correlación estables entre los 0 y 0.6 Hz, donde es posible detectar los primeros 3 cruces por cero de manera clara. Para frecuencias mayores, los espectros correlacionados se vuelven difusos, siendo imposible seguir o estimar apropiadamente los cruces por cero del espectro promedio.

Las velocidades de fase calculadas mediante la metodología espectral varían entre 4.2 y 1 km/s para frecuencia entre 0.04 y 4 Hz, respectivamente. Es importante notar que la frecuencia mínima a la cual es posible calcular velocidad de fase mediante la metodología espectral es mucho menor a la frecuencia mínima a la cual se puede medir la velocidad de grupo mediante la metodología temporal. Por otro lado, la metodología temporal permite calcular velocidades de grupo a frecuencias mayores en comparación a las velocidades de fase calculadas mediante la metodología espectral.

7.4. Comparación de Metodología Temporal y Espectral

Los resultados obtenidos mediante las metodologías espectral y temporal son comparados mediante la Ecuación 4.5, que transforma la velocidad de fase a velocidad de grupo. Dado que dicha transformación implica derivar la velocidad de fase, es necesario que esta curva sea suavizada, ya que pequeñas variaciones en la velocidad de fase implican grandes variaciones en la velocidad de grupo. La Figura 7.18 muestra la comparación entre la velocidad de grupo obtenida a partir de la velocidad de fase utilizando la Ecuación 4.5 y la velocidad de grupo obtenida a partir de la Transformada S para el par de estaciones DG24-DG29.

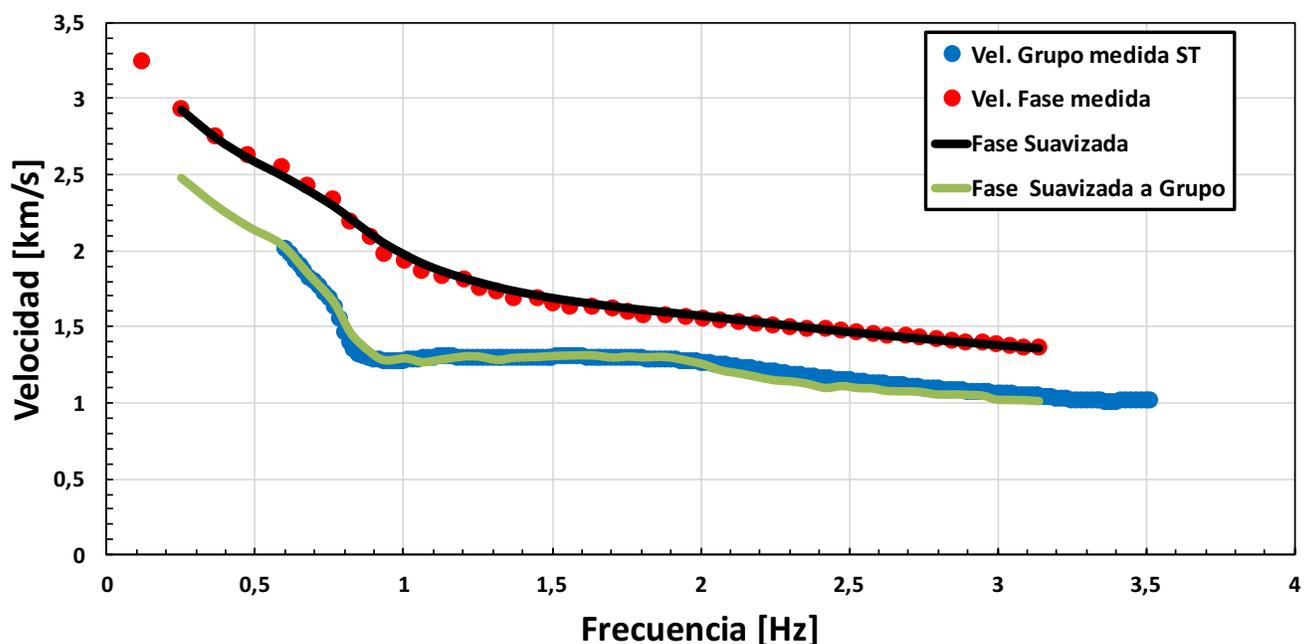


Figura 7.18. Comparación de velocidades de grupo obtenidas a partir de la velocidad de fase y la Transformada S para las estaciones DG24-DG29.

De la Figura 7.18 se observa un buen ajuste entre la velocidad de grupo estimada a partir de la velocidad de fase y la velocidad de grupo obtenida mediante la metodología temporal, resultado similar al reportado por Tsai and Moschetti (2010) y Luo et al. (2015). Es importante destacar que la velocidad de fase debe ser suavizada para obtener la velocidad de grupo, pero no existe una función que pueda suavizar de manera automática todas las curvas en velocidad de fase y que permita caracterizar adecuadamente las variaciones que tiene la velocidad de grupo. Debido a la buena discretización en frecuencia que permite realizar la transformada S, las medidas de velocidad de grupo para cierto rango de frecuencias son mayores que las medidas en velocidad de fase. Por

ende, obtener la velocidad de fase a partir de la velocidad de grupo es más sencillo y automatizable. Las Figuras 7.19 y 7.20 muestran la comparación entre velocidades de fase obtenidas a partir de la velocidad de grupo utilizando la Ecuación 4.6 y las velocidades de fase obtenidas mediante la metodología espectral.

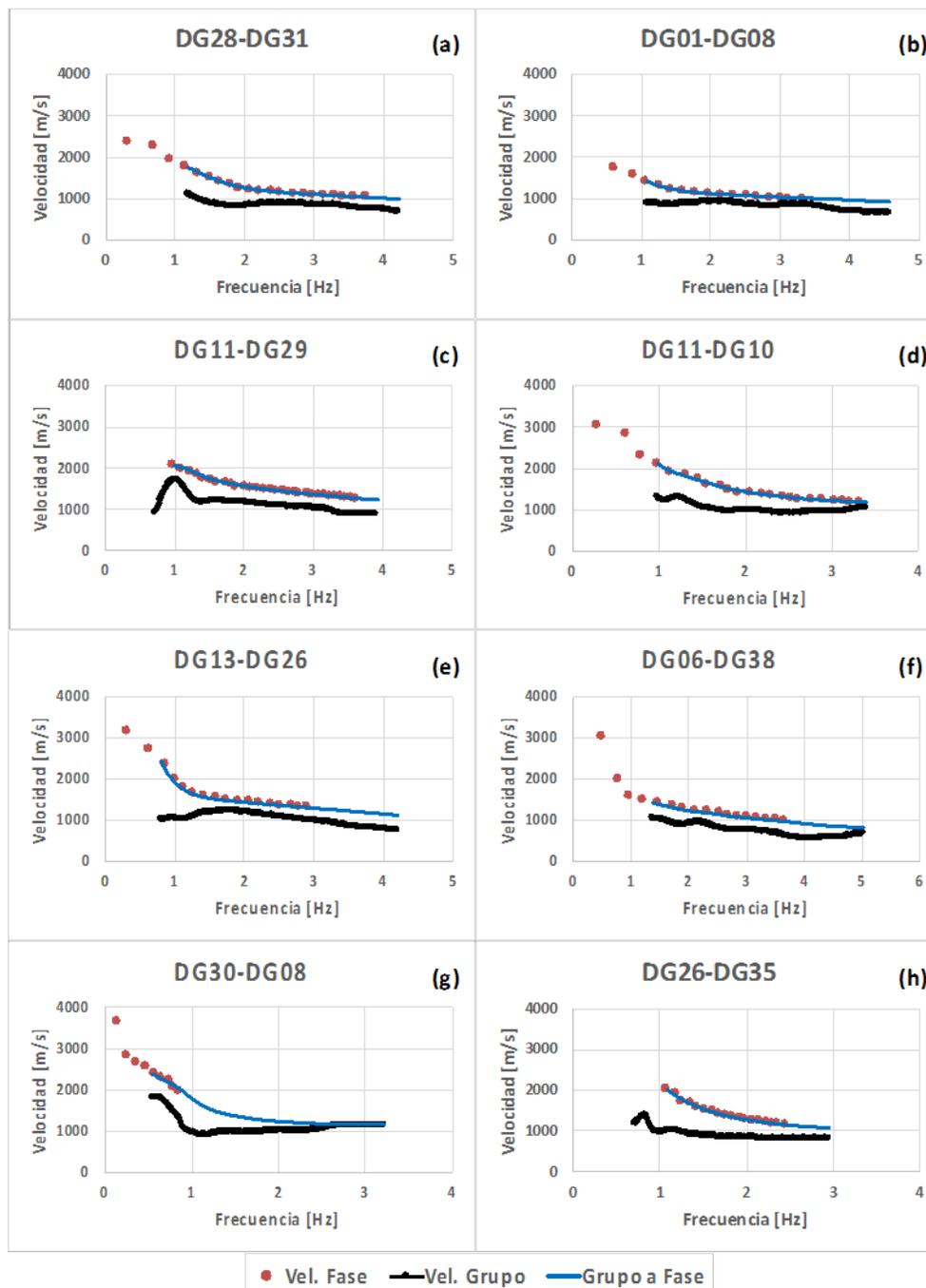


Figura 7.19. Comparación entre velocidad de fase obtenida a partir de la velocidad de grupo y la velocidad de fase calculada con la metodología espectral. Pares de estaciones : (a) DG28-DG31, (b) DG01-DG08, (c) DG11-DG29, (d) DG11-DG10, (e) DG13-DG26, (f) DG06-DG38, (g) DG30-DG08 y (h) DG26-DG35.

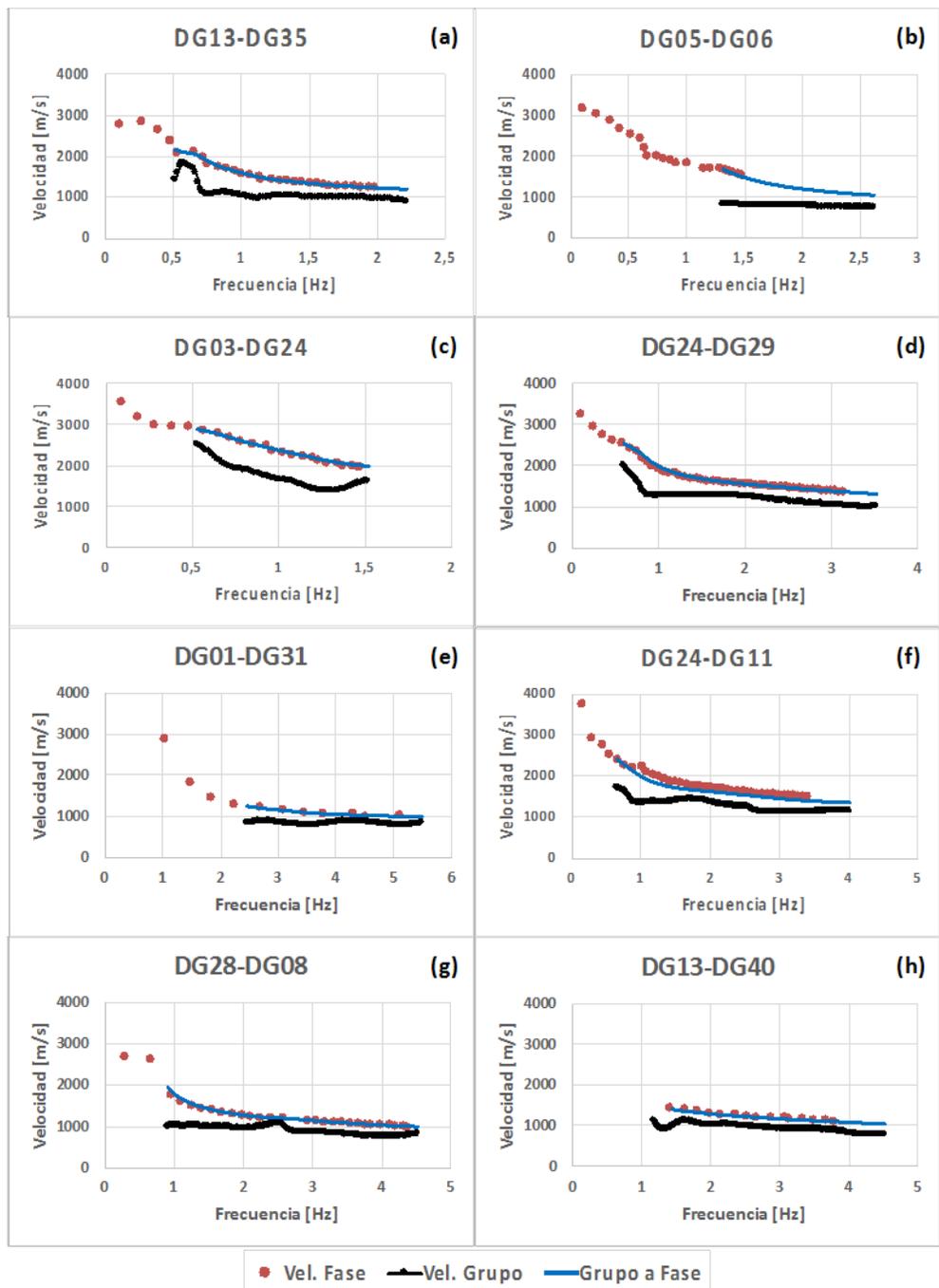


Figura 7.20. Comparación entre velocidad de fase obtenida a partir de la velocidad de grupo y la velocidad de fase calculada con la metodología espectral. Pares de estaciones : (a) DG13-DG35, (b) DG05-DG06, (c) DG03-DG24, (d) DG24-DG29, (e) DG01-DG31, (f) DG24-DG11, (g) DG28-DG08 y (h) DG13-DG40.

De las Figuras 7.19 y 7.20 se observa que el ajuste entre la velocidad de fase calculada y deducida es excelente. Además, es posible notar que la información aportada por la velocidad de grupo permite calcular velocidades de fase a frecuencias mayores en comparación a la metodología espectral.

7.5. Inversiones de Velocidad de Fase y Grupo

Las Figuras 7.21 a 7.23 muestran los perfiles de velocidad de onda de corte y curvas de dispersión teóricas calculadas a partir de la velocidad de fase, velocidad de grupo y a partir de ambas juntas, para los pares de estaciones DG01-DG31, DG06-DG38 y DG24-DG19. Las figuras muestran buen ajuste entre las curvas de dispersión teóricas y las medidas. Los misfit de las inversiones realizadas con velocidad de fase son siempre menores a los calculados a partir de la información en grupo. Las curvas de dispersión teóricas en velocidad de grupo no son capaces de seguir la forma de la velocidad de grupo calculada.

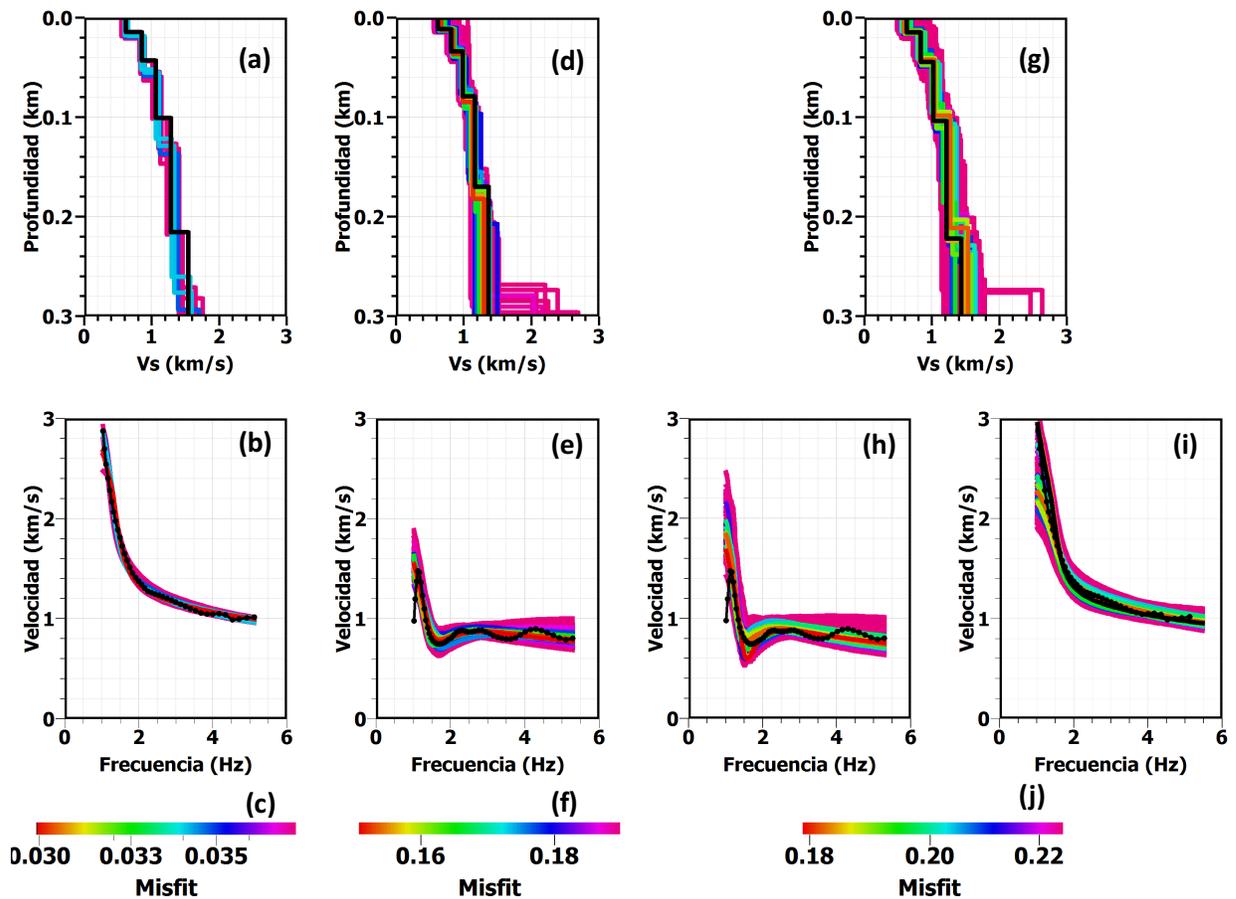


Figura 7.21. Perfiles de velocidad de onda de corte invertidos, curvas de dispersión teórica y *misfits* para las estaciones DG01-DG31. Inversión calculada a partir (a), (b) y (c) Velocidad de fase. (d), (e) y (f) Velocidad de grupo. (g), (h), (i) y (j) Velocidad de fase y grupo.

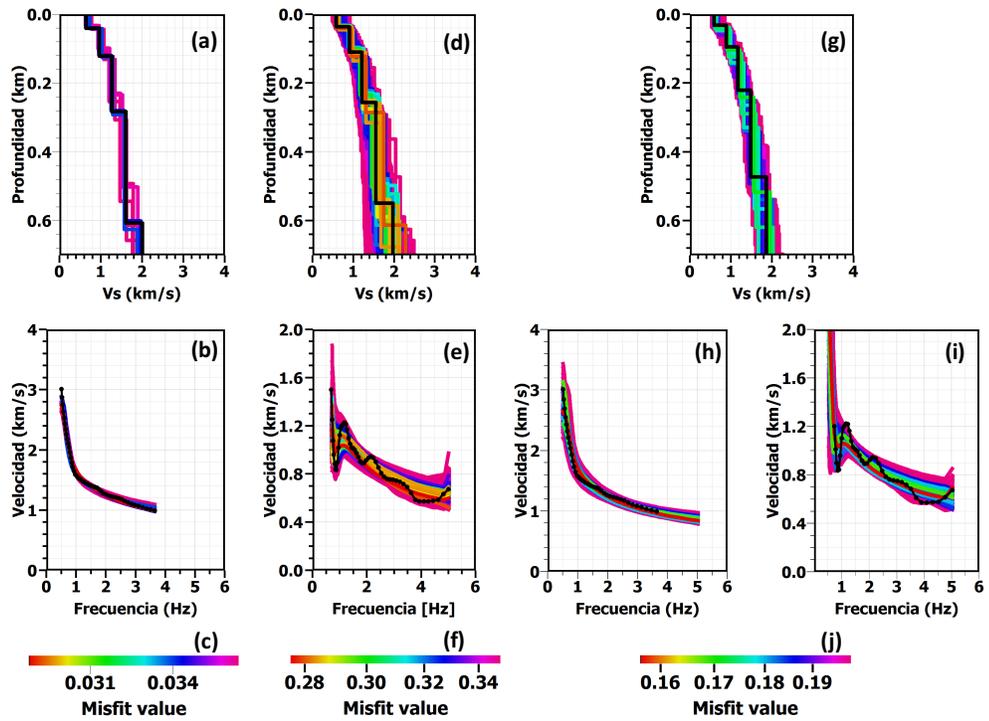


Figura 7.22. Perfiles de velocidad de onda de corte invertidos, curvas de dispersión teórica y misfit para las estaciones DG06-DG38. Inversión calculada a partir (a), (b) y (c) Velocidad de fase. (d), (e) y (f) Velocidad de grupo. (g), (h), (i) y (j) Velocidad de fase y grupo.

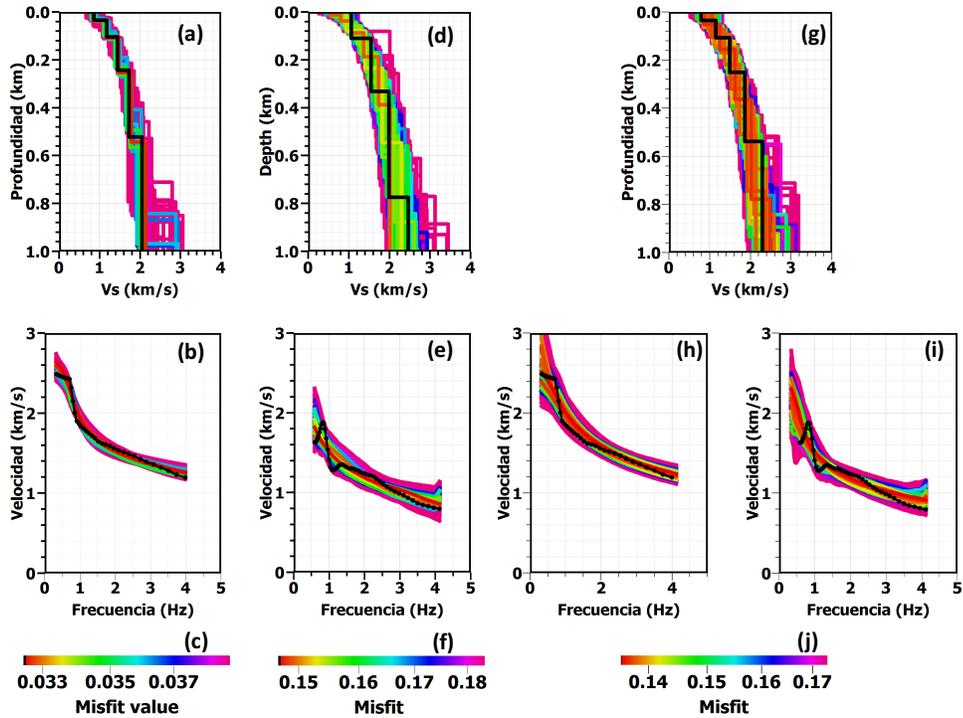


Figura 7.23. Perfiles de velocidad de onda de corte invertidos, curvas de dispersión teórica y misfit para las estaciones DG24-DG19. Inversión calculada a partir (a), (b) y (c) Velocidad de fase. (d), (e) y (f) Velocidad de grupo. (g), (h), (i) y (j) Velocidad de fase y grupo.

7.6. Sectorización de la Cuenca de Santiago

Dada la cobertura de estaciones, características geomorfológicas y curvas de dispersión obtenidas en fase y grupo, se divide la cuenca en los distritos Sur, Este y Centro. La Figura 7.24 muestra la distribución de los tipos de correlaciones cruzadas obtenidos en la alta frecuencia mediante la metodología temporal y los distritos mencionados anteriormente.

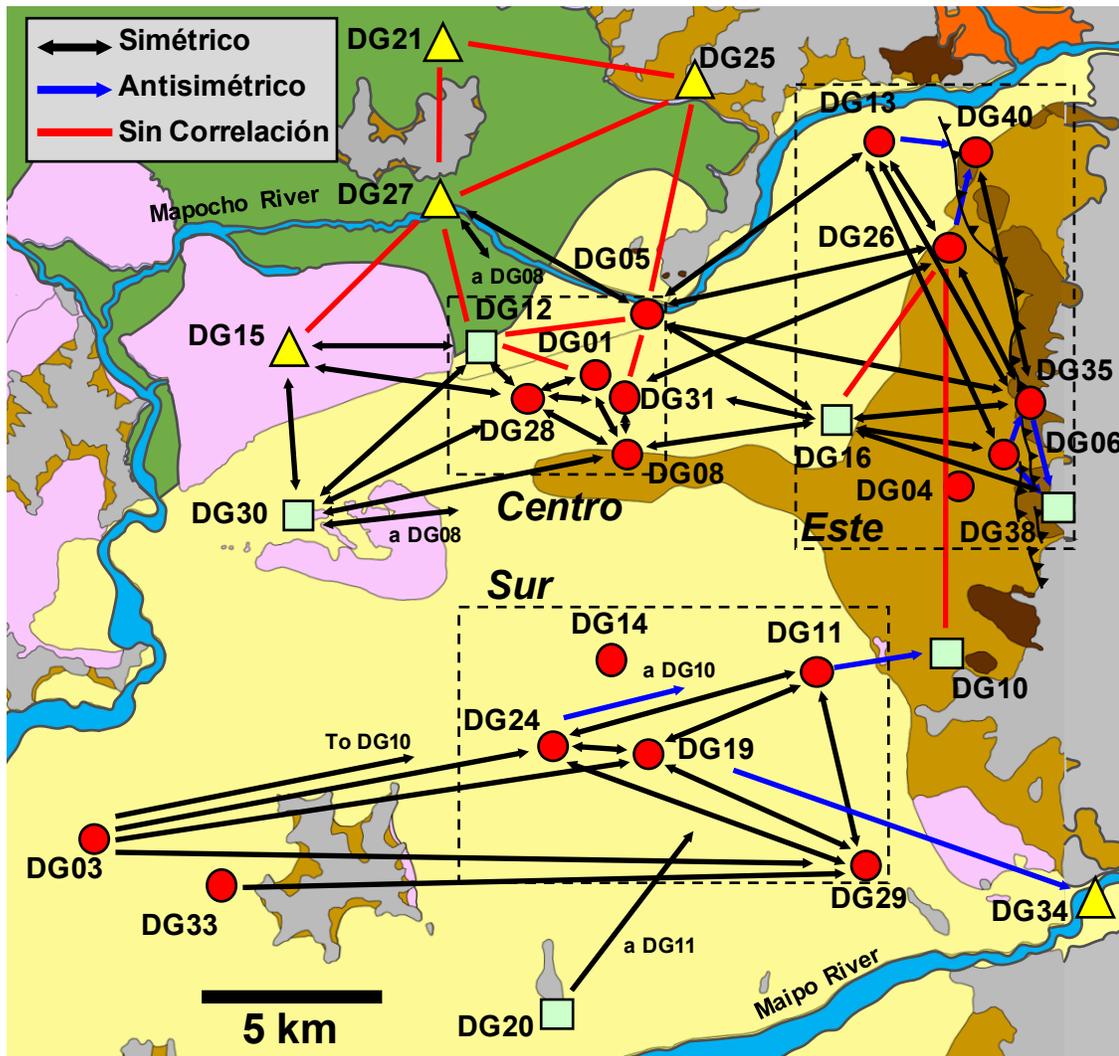


Figura 7.24. Distribución de tipo de correlaciones sobre la cuenca y sectorización de la misma. Los cuadrados en negro indican los distritos donde la velocidad de grupo y fase fueron calculadas. Modificado de Pasten et al. (2016)

En general, se observa de la Figura 7.24 que las estaciones ubicadas sobre grava tienen buena correlación, mientras que las ubicadas en suelo fino presentan una baja o nula correlación. Por otro lado, las correlaciones simétricas se encuentran distribuidas sobre toda la cuenca y en todas las

direcciones, mientras que las correlaciones asimétricas se observan en aquellos pares orientados E-W y cercanos a la parte oriental de la cuenca.

Las Figuras 7.25 y 7.26 muestran la velocidad de grupo y fase de todos los pares donde fue posible medir velocidad de grupo y/o fase. Los pares de estaciones utilizados para cada distrito son detallados en las secciones 7.6.1 a 7.6.3.

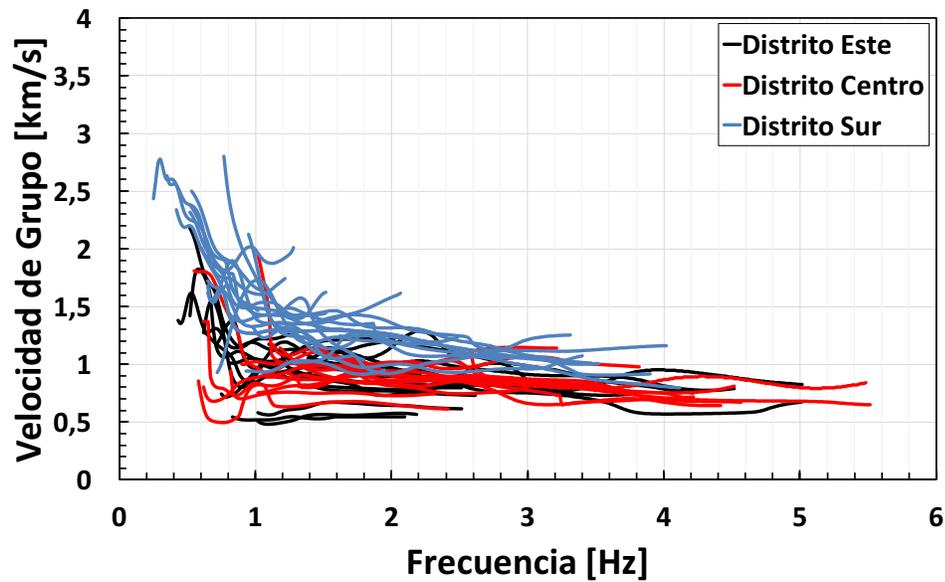


Figura 7.25. Velocidad de grupo de las estaciones que componen los distritos Este, Centro y Sur.

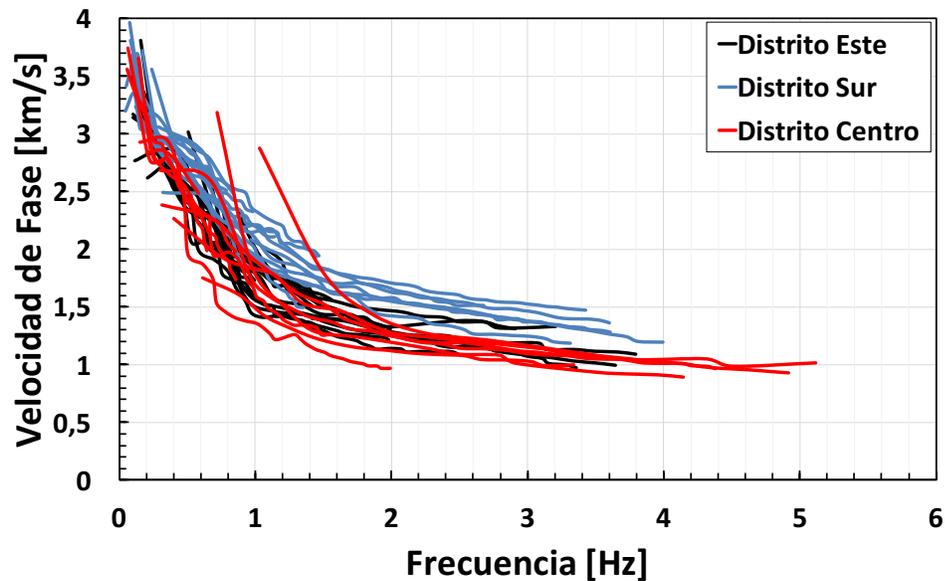


Figura 7.26. Velocidad de grupo de las estaciones que componen los distritos Este, Centro y Sur.

7.6.1. Distrito Central

El distrito Central se encuentra principalmente sobre la grava de Santiago, concentra gran parte de los edificios gubernamentales y comerciales de la ciudad además es una zona con una gran densidad de población. Las estaciones DG12, DG01, DG28, DG31, DG05 y DG08 ubicadas en las comunas de Santiago Centro y Estación Central, componen el distrito. Para el cálculo de las curvas de dispersión en baja frecuencia se utilizan los pares de estaciones DG15, DG30, DG27 y DG16. La Figura 7.27 muestra las curvas de velocidad de grupo calculadas a partir de la TS de los pares de estaciones que componen el distrito, mientras que la Figura 7.28 muestra las curvas en velocidad de fase calculadas a partir de la metodología espectral propuesta.

Las distancias entre estaciones en el distrito se encuentran entre 1.1 y 16 km. Las velocidades de grupo varían entre los 1.2 a 0.8 km/s para frecuencias de 0.6 a 5.5 Hz, respectivamente. La velocidades de fases alcanzan los 3.5 km/s a frecuencias cercanas a los 0.1 Hz, mientras que a los 5 Hz se estiman velocidades de 1000 m/s.

La Figura 7.29 muestra las curvas en velocidad de fase con la información en la alta frecuencia aportada por la velocidad de grupo y en negro se muestra la curva promedio del sector que será invertida posteriormente.

Debido a que las curvas de dispersión para los distintos pares de estaciones no comparten información en todo el rango de frecuencia analizado, es necesario resamplear cada una de ellas. Para obtener las curvas promedio que se muestran en las Figuras 7.29, 7.33 y 7.37 se utiliza un resampleo logarítmico entre los rangos 0.1-5.5, 0.1-5 y 0.1-4 Hz, respectivamente.

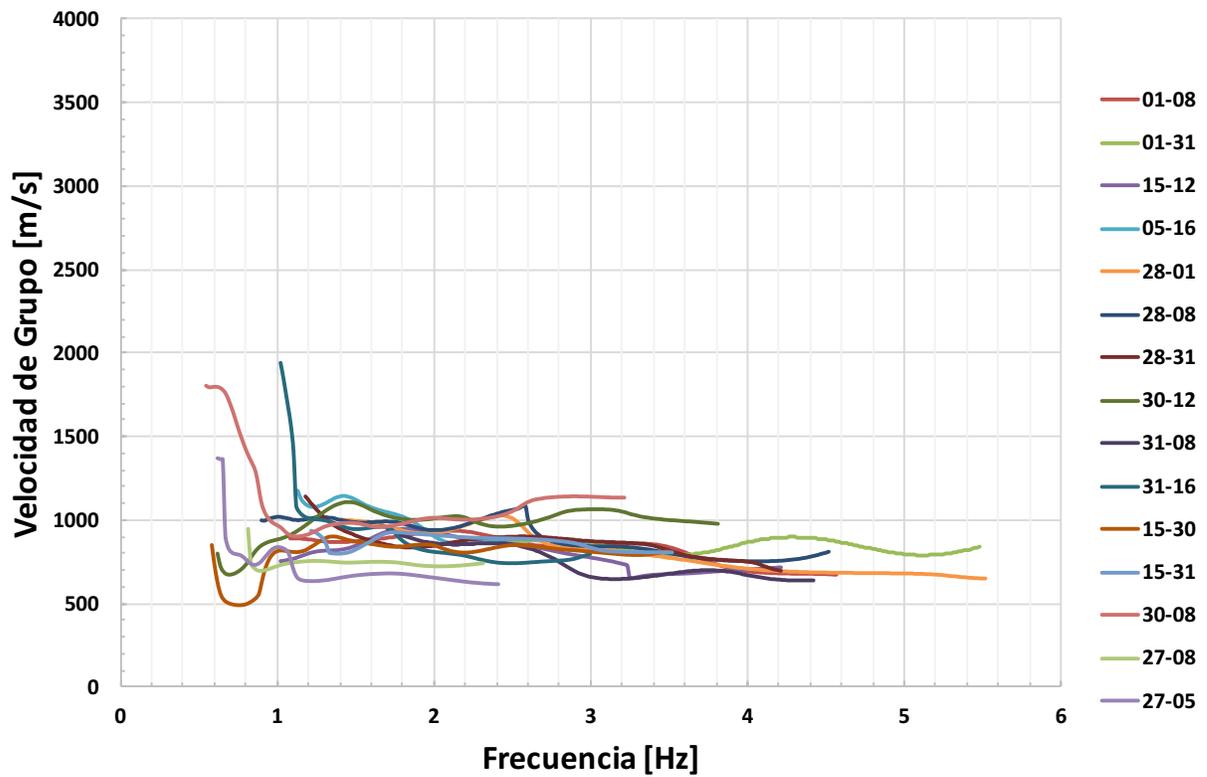


Figura 7.27. Curvas de velocidades de grupo para los pares de estaciones que componen el distrito Central.

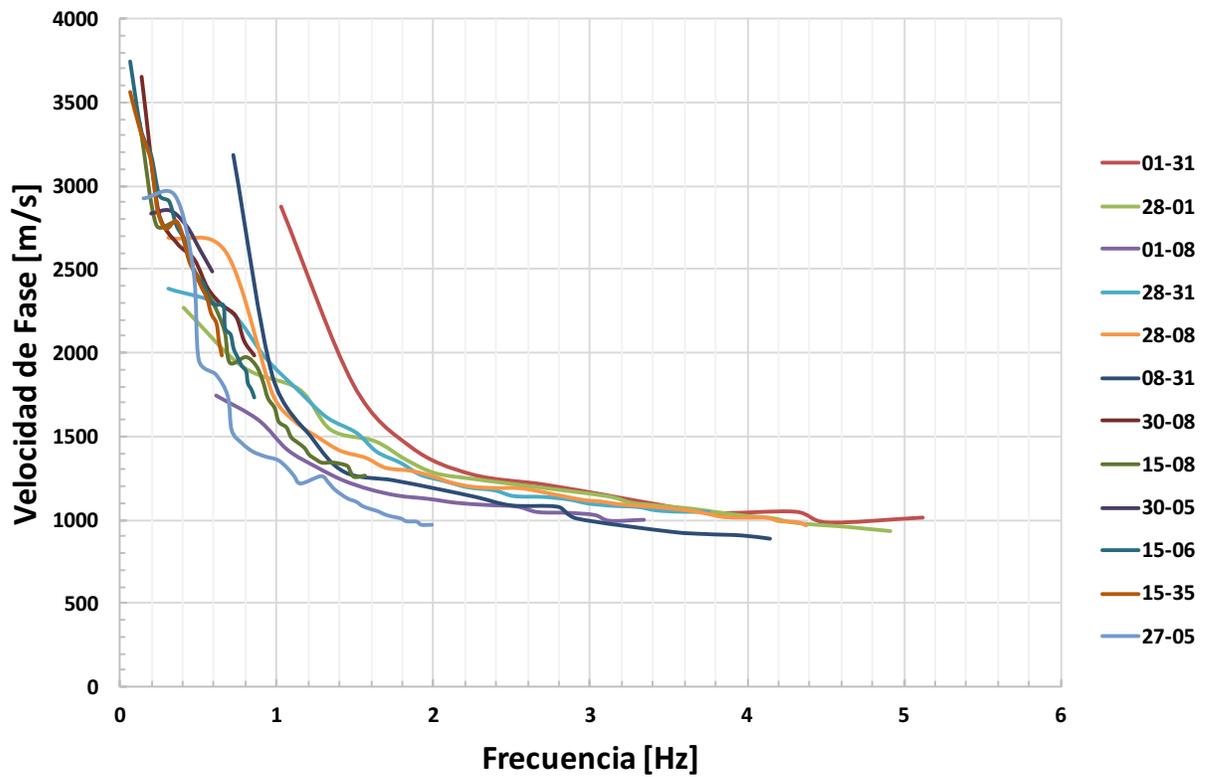


Figura 7.28. Curvas de velocidades de fase para los pares de estaciones que componen el distrito Central.

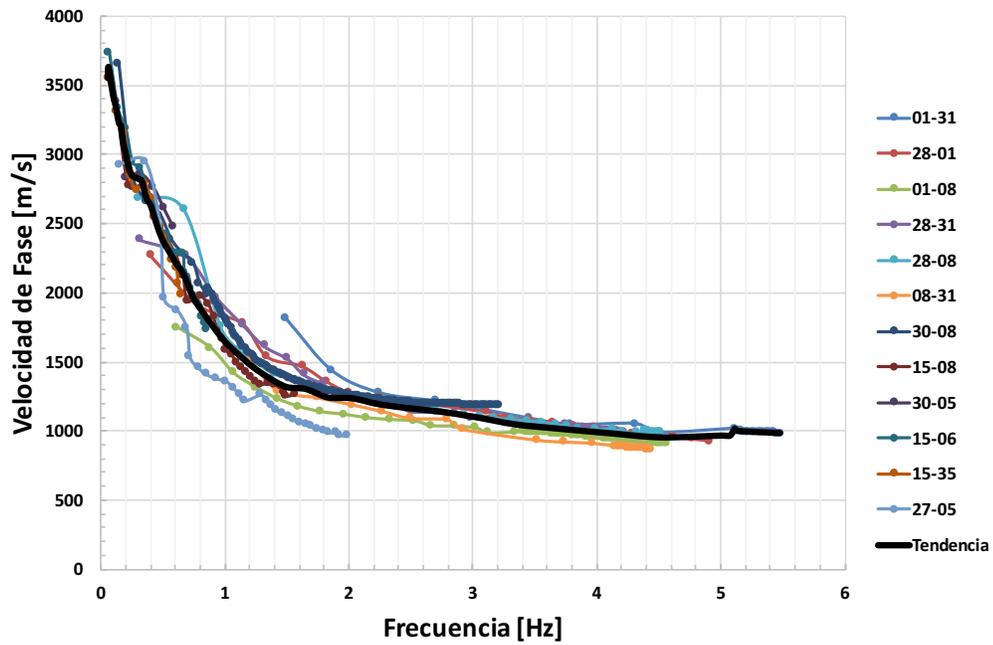


Figura 7.29. Curvas de velocidades de fase utilizando la información en alta frecuencia proporcionada por la velocidad de grupo, distrito Centro.

Utilizando la curva promedio de velocidad de fase para el distrito Centro de la Figura 9.29, se calculan los perfiles de velocidad de onda de corte, las curvas de dispersión teórica y los ajustes asociados, que se muestran en la Figura 7.30.

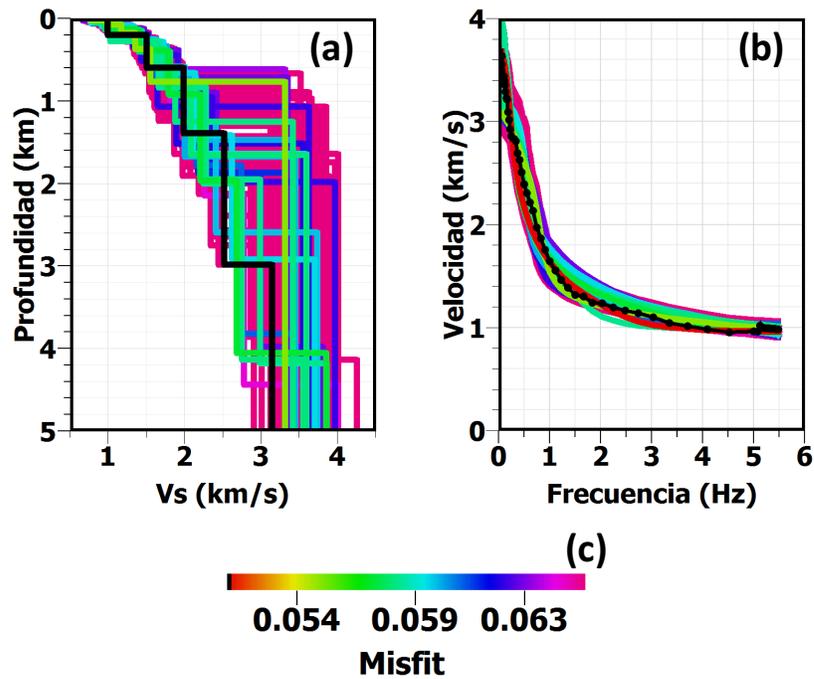


Figura 7.30. (a) Perfiles de velocidad de onda de corte, (b) curvas de dispersión teórica y (c) misfit obtenidos a partir de la inversión de la curva promedio mostrada en Figura 7.29 para el distrito Centro.

7.6.2. Distrito Este

El distrito Este se extiende sobre la grava de Santiago y depósitos aluviales. Sobre él se ubican importantes centros comerciales y extensas zonas residenciales. Las estaciones DG13, DG26, DG40, DG35, DG38, DG16, DG26 y DG06 se encuentran desplegadas en este distrito en las comunas de Vitacura, Las Condes, Ñuñoa y Peñalolén. Para caracterizar la parte profunda del sector se utilizan los pares DG05, DG28 y DG31 pertenecientes al distrito Central. Las distancias máximas y mínimas para los análisis realizados en el distrito son de 14 y 1.7 km, respectivamente. La Figura 7.31 muestra las curvas de velocidad de grupo calculadas a partir de la TS para los pares de estaciones que componen el distrito. Las velocidades de grupo varían desde 1.8 km/s a 0.5 Hz hasta 0.75 km/s a 5 Hz. Las curvas asociadas a la estación DG16 se encuentran fuera de tendencia, mostrando velocidades cercanas a los 0.5 km/s para frecuencias entre 1 y 2 Hz.

La Figura 7.32 muestra las curvas en velocidad de fase calculadas según la metodología espectral. Las velocidades de fase varían desde los 3.3 a 1 km/s para frecuencias de 0.1 Hz y 4 Hz, aproximadamente.

La Figura 7.33 muestra las curvas en velocidad de fase con la información en alta frecuencia aportada por la velocidad de grupo y en negro se muestra la curva promedio del sector que será invertida posteriormente.

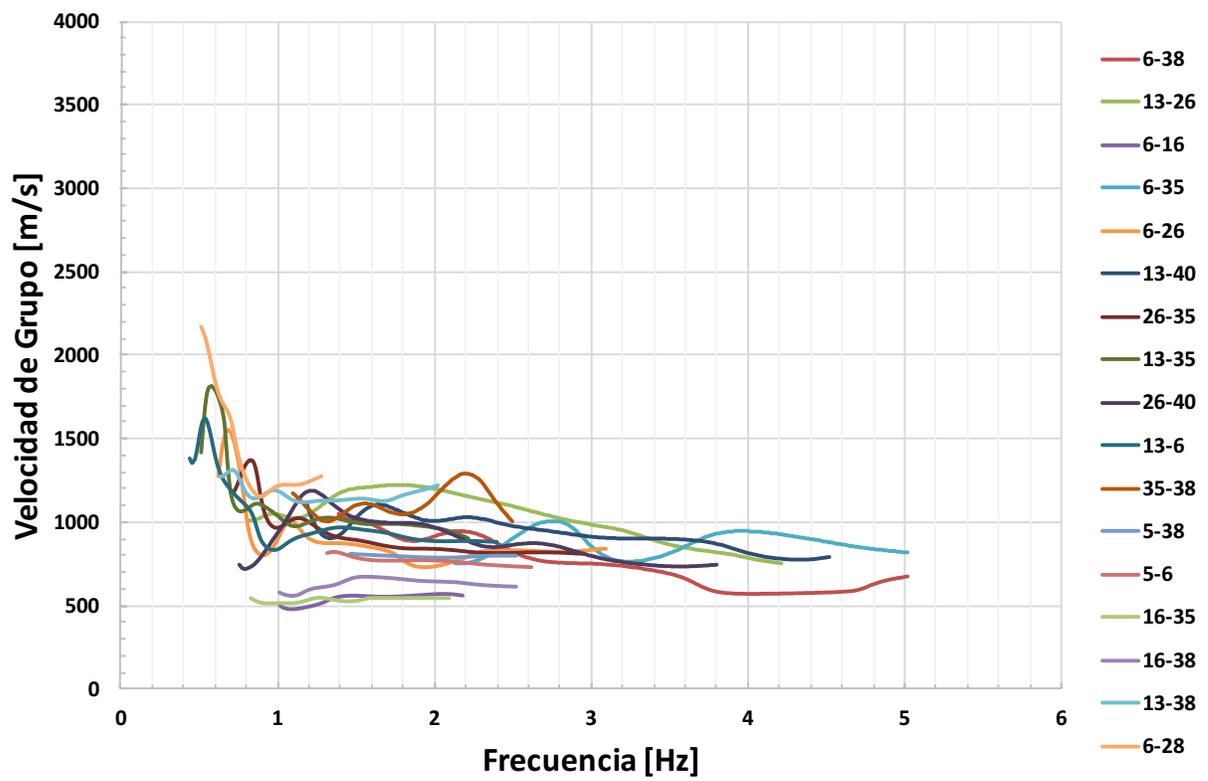


Figura 7.31. Curvas de velocidades de grupo para los pares de estaciones que componen el distrito Este.

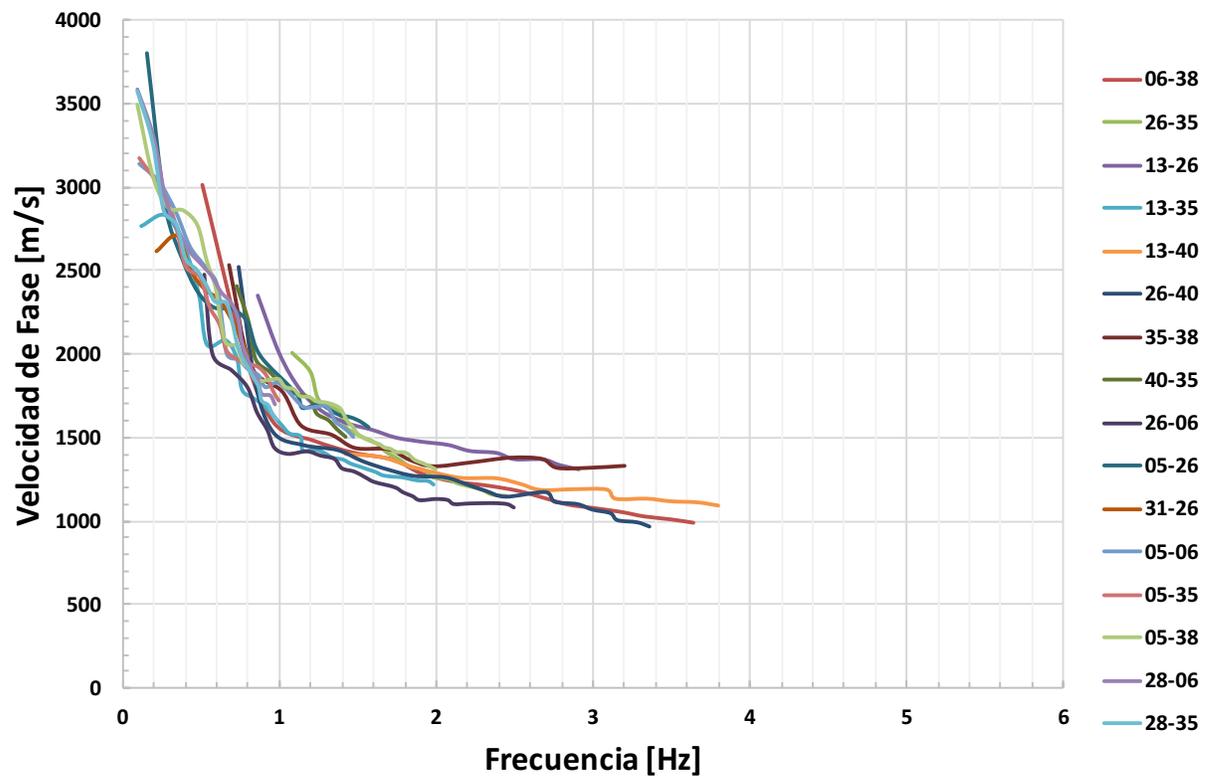


Figura 7.32. Curvas de velocidades de fase para los pares de estaciones que componen el distrito Este.

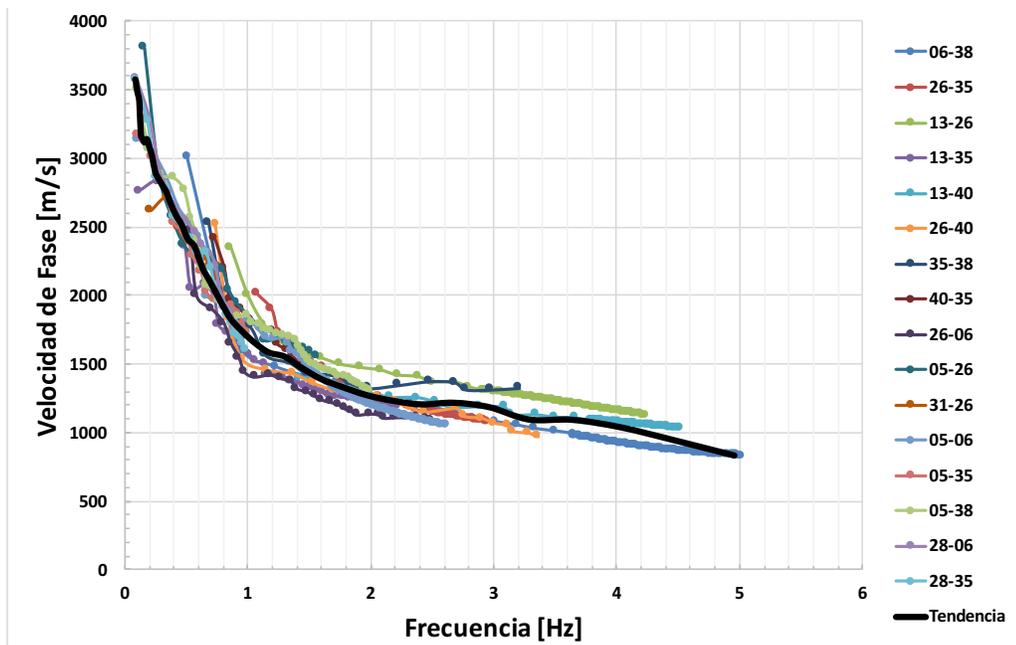


Figura 7.33. Curvas de velocidades de fase utilizando la información en alta frecuencia proporcionada por la velocidad de grupo, distrito Este.

Utilizando la curva promedio de velocidad de fase para el distrito Este, se calculan los perfiles de velocidad de onda de corte, las curvas de dispersión teórica y los ajustes asociados, que se muestran en la Figura 7.34.

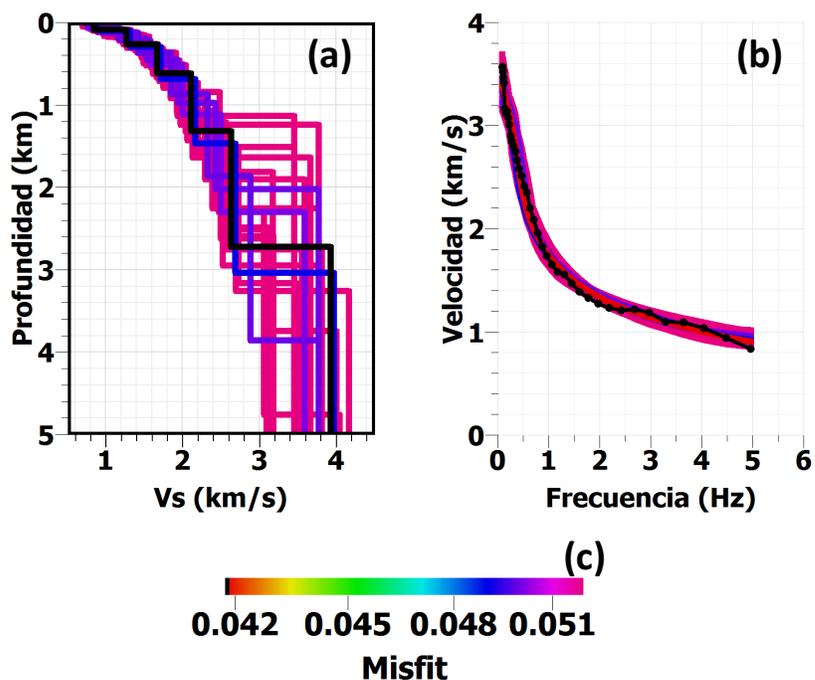


Figura 7.34. (a) Perfiles de velocidad de onda de corte, (b) curvas de dispersión teórica y (c) misfit obtenidos a partir de la inversión de la curva promedio mostrada en Figura 7.32 para el distrito Este.

7.6.3. Distrito Sur

El distrito Sur se extiende sobre la grava de Santiago. Las estaciones DG11, DG19, DG24 y DG29, ubicadas en las comunas de La Pintana, El Bosque, La Florida y Puente Alto, componen este distrito. Para realizar análisis en baja frecuencia, se utilizan los pares DG03, DG10, DG20, DG30 y DG34. Las distancias analizadas en el distrito varían entre 3 y 31 km. La Figura 7.35 muestra las curvas de velocidad de grupo de los pares de estaciones que componen el distrito, calculadas mediante la TS. Las velocidades de grupo varían desde los 2.8 a 0.9 km/s para frecuencias entre 0.2 y 4 Hz.

La Figura 7.35 muestra las velocidades de fase calculadas para el distrito mediante el análisis espectral. Éstas varían desde los 3.5 a 1.3 km/s para frecuencias de 0.1 y 4 Hz, respectivamente.

La Figura 7.36 muestra las curvas en velocidad de fase con la información en alta frecuencia aportada por la velocidad de grupo y en negro se muestra la curva promedio del sector que será invertida posteriormente.

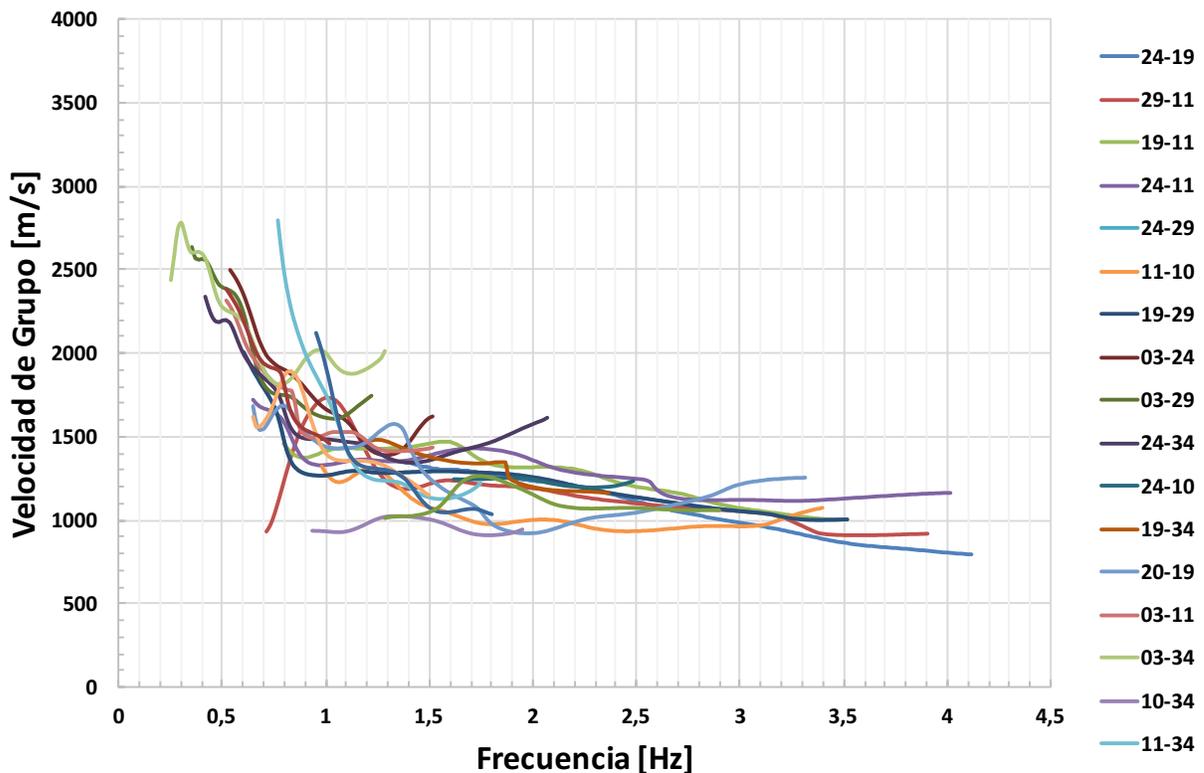


Figura 7.35. Curvas de velocidades de grupo para los pares de estaciones que componen el distrito Sur.

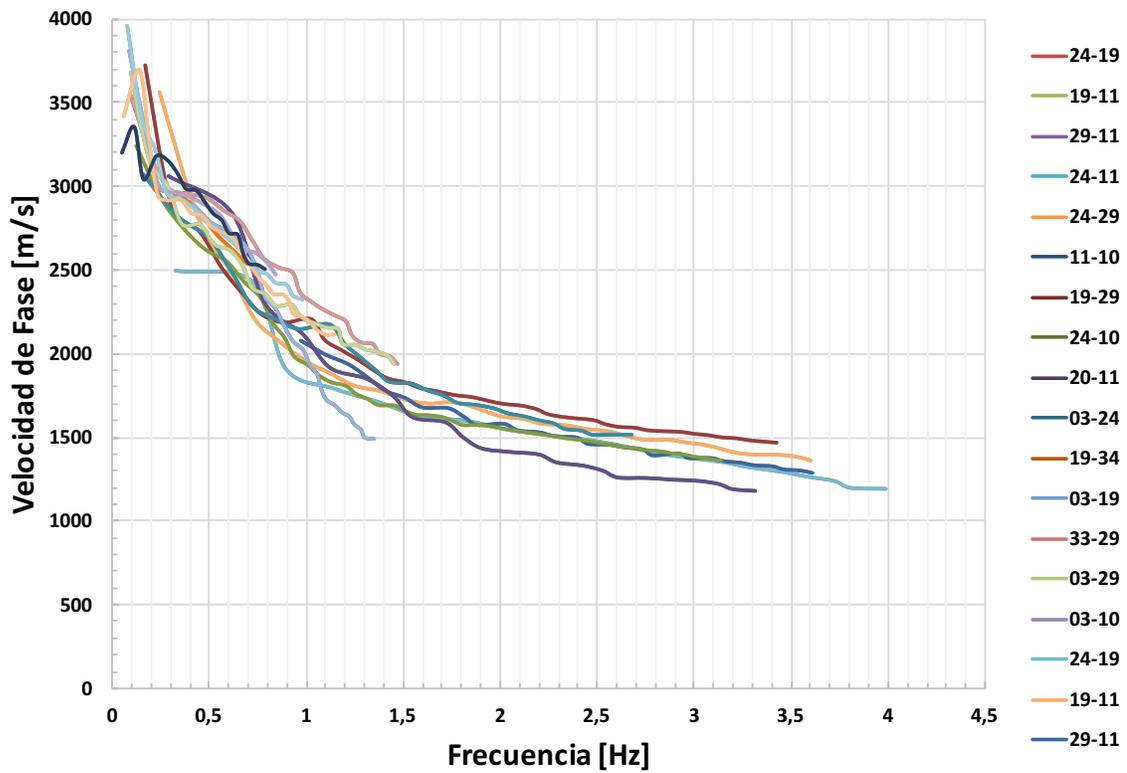


Figura 7.36. Curvas de velocidades de fase para los pares de estaciones que componen el distrito Sur.

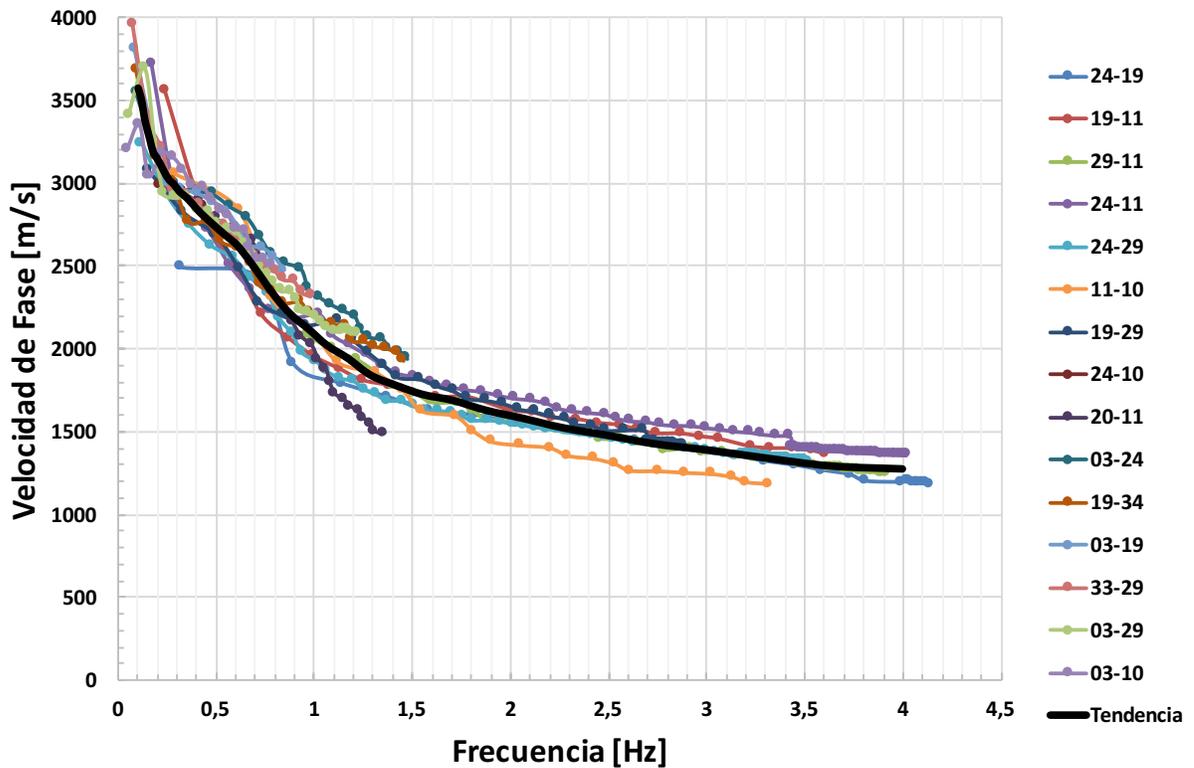


Figura 7.37. Curvas de velocidades de fase utilizando la información en alta frecuencia proporcionada por la velocidad de grupo, distrito Sur.

Utilizando la curva promedio de velocidad de fase para el distrito Sur de la Figura 7.37, se calculan los perfiles de velocidad de onda de corte, las curvas de dispersión teórica y los ajustes asociados, que se muestran en la Figura 7.38.

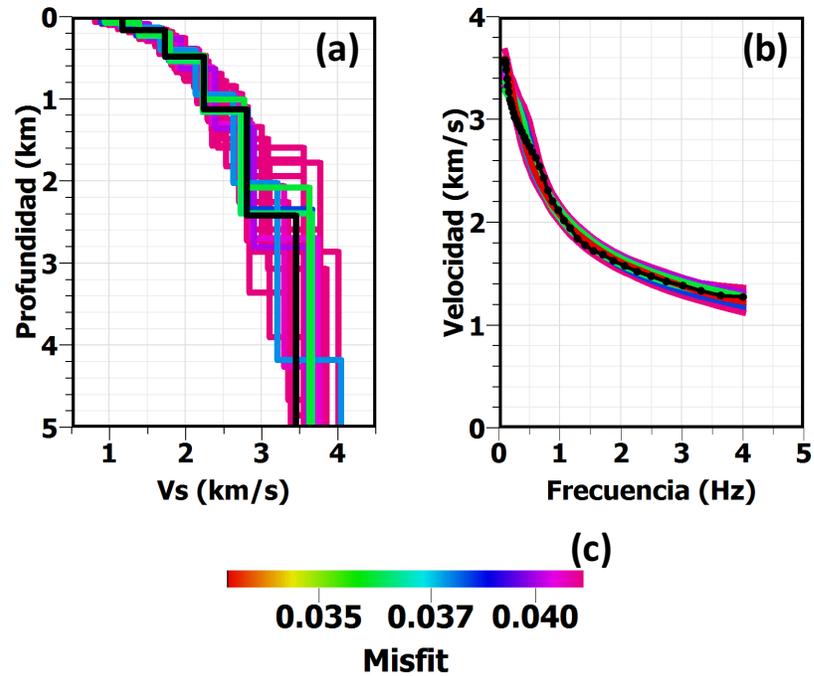


Figura 7.38. (a) Perfiles de velocidad de onda de corte, (b) curvas de dispersión teórica y (c) misfit obtenidos a partir de la inversión de la curva promedio mostrada en Figura 7.37 para el distrito Sur.

8. Análisis de Resultados

8.1. Función de Correlación de Ruido Sísmico (FCR)

Es posible observar tres grupos de correlaciones mediante la metodología temporal asociados a la simetría en amplitud y tiempo del peak de cada FCR: correlaciones simétricas, asimétricas y sin correlación.

Las FCR simétricas, en las cuales se puede identificar claramente una simetría en amplitud y tiempo de llegada, se encuentran distribuidas principalmente sobre la grava de Santiago en los distritos Sur y Centro y en menor medida en el distrito Este (Figura 7.24), el cual es una mezcla de depósitos de grava y aluviales.

Las correlaciones asimétricas en la alta frecuencia ($f_c > 1$ Hz), en las cuales el tiempo de desfase positivo o negativo presenta una amplitud considerablemente distinta, se encuentran localizadas en el distrito Este de la cuenca, en aquellos pares ubicados en el contacto cordillera-cuenca (Figura 7.24). Al correlacionar en sentido Oeste-Este la mayor amplitud se encuentra para el desfase negativo, lo que indica que las fuentes de ruido son mayores en el oeste. Lo anterior tiene sentido si se considera que las fuentes de ruido desde la Cordillera a la cuenca en este rango de frecuencias son escasas.

Por otro lado, las correlaciones asimétricas en la baja frecuencia ($f_c < 1$ Hz) se encuentran distribuidas por toda la cuenca, mostrando que las características locales del sitio no influyen en dicho rango de frecuencias. A partir de Figura 7.3 se puede observar que las correlaciones con mayor RSR son las de estaciones con un azimut entre los 45° - 135° orientadas en sentido Oeste-Este. Dicha asimetría puede ser asociada a la interacción océano-continente.

Tanto las correlaciones simétrica y asimétricas están asociadas a pares de estaciones que se encuentra sobre suelos que presentan razones espectrales H/V con amplitudes menores a 3 (Pastén et al. 2016).

Los pares de estaciones sin correlación se ubican principalmente en la zona noroeste de la cuenca, en sectores caracterizados por depósitos de pumicita y suelos finos. La zona centro presenta algunos pares sin correlación, en especial aquellas correlaciones con la estación DG12, la cual se encuentra en el límite de suelo gravoso y pumicita (Figura 7.24). Este tipo de correlación se observa

cuando alguna de las estaciones correlacionadas se encuentra sobre suelos con razones espectrales H/V con amplitudes mayores a 3 (Pastén et al. 2016).

8.2. Metodologías Temporal y Espectral

Las metodologías temporal y espectral permiten estimar curvas de dispersión entre pares de estaciones en velocidad de grupo y fase, respectivamente, que son consistentes entre sí.

La metodología temporal es menos eficiente en uso de recursos computacionales, ya que es necesario filtrar matrices de gran tamaño varias veces, lo que no necesariamente se traduce en mejores resultados. La búsqueda de información a distintas frecuencias centrales se debe realizar mediante prueba y error. Esta metodología permite distinguir distribuciones heterogéneas de fuente de ruido, ya que para dicha condición las FCR son asimétricas.

El análisis de las FCR mediante la Transformada S permite obtener de manera sencilla el rango de frecuencias donde es posible medir velocidad de grupo. Dado que la discretización en frecuencia es definida por el usuario, la cantidad de puntos de la curva de dispersión en velocidad de grupo puede ser tan discreta como se desee. Esta propiedad de la TS permite una mejor representación de las variaciones observadas en la velocidad de grupo.

La metodología espectral permite analizar de manera rápida y sencilla el rango de frecuencias donde es posible establecer medidas de velocidad de fase, a diferencia de la metodología temporal. Los cruces por ceros de la función de Bessel J_0 son detectados de manera sencilla en aquellos pares de estaciones que muestran correlaciones simétricas o asimétricas temporalmente, mientras que en los pares sin correlación temporal, sólo es posible observar cruces por cero en bajas frecuencias. Con la metodología espectral es posible obtener curvas de velocidad de fase con una mayor cantidad de puntos y a frecuencias menores en comparación a las curvas de velocidad de grupo obtenidas con la metodología temporal. La desventaja del método está en seleccionar la curva de velocidad de fase del medio a partir de la familia de curvas definidas por “m” (Ecuación 4.27) cuando no se cuenta con información adicional.

Bajo la condición impuesta por la Ecuación 4.25, la metodología espectral permite estimar velocidades de fase a frecuencias menores que las velocidades de grupos estimadas por la metodología temporal. Sin embargo, como se muestra en las Figuras 7.11, 7.12 y 7.13, esta

condición puede ser obviada si se analiza las FCR mediante la TS, siendo posible medir velocidades de grupo incluso para longitudes de onda similar a la distancia entre estaciones.

Respecto a la comparación de resultados obtenidos mediante la TS y la metodología espectral, se establece una similitud entre ambos resultados en un rango de frecuencias común. Además, es posible complementar la información de la velocidad de grupo en la baja frecuencia con las medidas en velocidad de fase y de la velocidad de fase en la alta frecuencia con las medidas en velocidad de grupo (Figuras 7.18, 7.19 y 7.20). Cabe mencionar que transformar velocidad de fase a velocidad de grupo no es sencillo, ya que pequeños cambios en la pendiente de la velocidad de fase genera cambios abruptos en la velocidad de grupo. Por otro lado, transformar velocidad de grupo a velocidad de fase es posible si se conoce esta última en alguna frecuencia en particular.

8.3. Resultados en los Distritos

Las curvas en velocidad de fase y grupo del distrito Sur se encuentran sobre las del distrito Este y Centro, indicando que dicho sector es más rígido, lo anterior resulta lógico al analizar la geología superficial del sector sur, la cual está compuesta en su totalidad por grava.

El distrito Central presenta velocidades de fase que varían desde 2.8 a 1 km/s a para frecuencias de 0.3 Hz y 5 Hz. En cuanto a la velocidad grupo, esta fluctúa entre 1.2 a 0.8 km/s para frecuencias de 0.6 y 5.5 Hz. Este distrito es el que presenta la mayor dispersión de velocidades de fase y grupo, lo que puede estar asociado a la geología superficial del distrito, donde se mezclan depósitos aluviales, fluviales y parte de pumicita. Los perfiles invertidos muestran un aumento de la velocidad de onda de corte en profundidad que varía desde 1 km/s a los 200 m hasta velocidades superiores a 3 km/s para profundidades mayores a 3 km. Se propone utilizar como modelo de velocidad de onda de corte la expresión $V_s(z) = 700 + 50\sqrt{z}$.

El distrito Este presenta velocidades de fase de 3.5 km/s para frecuencias de 0.1 Hz que decrecen hasta 1 km/s para frecuencias de 3.5 Hz. La dispersión respecto al promedio es menor a altas frecuencias, donde se observa un buen ajuste entre el promedio y los datos. El mal ajuste observado en la baja frecuencia puede estar asociado a los pares de estaciones utilizados para caracterizar dicho rango, los cuales pueden no representar apropiadamente al distrito. En cuanto a la velocidad de grupo, esta varía desde 1.8 km/s para frecuencias de 0.5 Hz hasta 0.75 km/s para frecuencias de 5 Hz. La inversión realizada muestra que la velocidad de onda de corte aumenta desde 700 m/s a

los 100 m de profundidad hasta velocidades mayores a 3 km/s a 3km de profundidad. Se propone utilizar como modelo de velocidad de onda de corte la expresión $V_s(z) = 700 + 50\sqrt{z}$.

El distrito Sur muestra velocidades de fase cercanas a 3.5 km/s para frecuencias de 0.1 Hz, las que decaen hasta 1.3 km/s a los 4 Hz. Este sector presenta el mejor ajuste entre su curva promedio y los datos, lo cual puede estar asociado a un sector de suelos más homogéneo. Las velocidades de grupo para el distrito varían desde 2.8 a 0.9 km/s para frecuencias entre 0.2 y 4 Hz. El perfil de velocidades de onda de corte invertido muestra velocidades de 1 km/s para profundidades cercanas a los 100 m, valor que concuerda con los reportados por (Humire et al., 2014). El aumento de la velocidad en profundidad es a una tasa mayor a la observada en los distritos Este y Centro, observándose velocidades superiores a 3 km/s a 2 km de profundidad. Se propone utilizar como modelo de velocidad de onda de corte la expresión $V_s(z) = 950 + 50\sqrt{z}$.

En los tres distritos analizados, las curvas en velocidad de fase teóricas calculadas a partir de los perfiles de velocidad de onda de corte muestran un buen ajuste con las curvas de dispersión medidas. Esto demuestra que los perfiles escogidos representan adecuadamente las características dispersivas de los tres sectores.

Dada la distancia entre estaciones, lo cual limita el contenido de frecuencia donde es posible realizar medidas de velocidad de fase y grupo, los tres perfiles de velocidad de onda de corte carecen de resolución superficial para profundidades menores a 100 m.

9. Conclusiones y Recomendaciones

9.1. Conclusiones

La correlación cruzada de ruido sísmico resulta un método útil para estimar las características dispersivas de algunos sectores de la cuenca de Santiago mediante la obtención de curvas de dispersión en velocidad de fase y grupo.

Las características locales del sitio influyen en las correlaciones y espectros calculados en la alta frecuencia, mientras que la baja frecuencia es insensible a dichas características. El método funciona cuando se correlacionan pares de estaciones ubicados en suelo rígido tales como grava. Si una de las estaciones correlacionadas se encuentra sobre suelo fino o de origen volcánico, la correlación entre los registros disminuye. Se observa que la falta de correlación entre dos pares está asociada principalmente a pares de estaciones con razones espectrales H/V con frecuencias predominantes marcadas.

Las principales conclusiones que se pueden establecer con respecto a la metodología temporal son:

- El apilamiento es el proceso más influyente. La razón señal-ruido RSR se incrementa considerablemente en función de la cantidad de ventanas apiladas y la forma donde se encuentran las amplitudes máximas con la TS se definen más claramente.
- Imponer un RSR mínimo al proceso de apilamiento resulta útil para establecer el peak de la correlación. Este proceso tiene mayor importancia en la alta frecuencia.
- La metodología temporal permite establecer direcciones preferenciales de ruido según la forma de la correlación cruzada. En el caso particular de la cuenca, se establecen dos fuentes de ruidos que dominan la correlación cruzada. Para frecuencias mayores a 1 Hz las correlaciones son simétricas, lo cual indica una distribución homogénea de fuentes de ruido asociadas a la actividad humana. Por otro lado, para frecuencias menores a 1 Hz, se obtienen correlaciones asimétricas para los pares de estaciones alineados en la dirección oeste-este, que puede estar asociada a la interacción océano-continente.
- Analizar la correlación temporal mediante la TS permite determinar visualmente el rango de frecuencias donde es posible medir velocidades de grupo. La discretización en frecuencia de la TS permite medir velocidades tan discretamente como se desee, además de asociar un error a dicha medición.

Las principales conclusiones que se pueden establecer con respecto a la metodología espectral son:

- El apilamiento es el proceso más influyente. Los cruces por cero de la parte real del espectro correlacionado se detectan con mayor claridad a medida que aumenta la cantidad de espectros apilados.
- La metodología espectral no permite estimar direcciones preferenciales de ruido, pero su ventaja sobre la metodología temporal se basa en la obtención de velocidades de fase para longitudes de ondas similares a la distancia entre estaciones.
- La principal desventaja de la metodología radica en la elección del valor “m” para estimar la curva de velocidad de fase que mejor representa el medio. Dicha tarea se vuelve más complicada cuando sólo se tiene correlación en altas frecuencias.
- A diferencia de la metodología temporal, es posible establecer visualmente y de antemano el rango de frecuencias donde es posible medir velocidades de fase.
- No existe una manera sencilla de realizar un control de calidad ya que los cruces por cero en las ventanas son difíciles de establecer.

Considerando la sectorización realizada en la cuenca se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- En el distrito Sur, el cual está compuesto principalmente por grava, se observan correlaciones simétricas con altos RSR, mientras que los espectros correlacionados muestran claros cruces por cero. Los perfiles de velocidad de onda de corte obtenidos muestran que este es un sector con una alta rigidez y de carácter homogéneo. Las velocidades de onda de corte varían desde los 1.2 hasta 3.6 km/s para profundidades entre los 0.2 y 5 km.
- En el distrito Este, el cual está compuesto por grava y depósitos aluviales, se observan correlaciones simétricas y asimétricas con un alto RSR. Las correlaciones asimétricas se observan en aquellos pares orientados en sentido oeste-este y que descansan en las faldas de la Cordillera. La inversión realizada en el distrito da cuenta de un sector heterogéneo con altas velocidades de onda de corte, las cuales varían desde los 0.6 hasta 4 km/s para profundidades entre los 0.1 y 5 km.
- En el distrito Centro, el cual está compuesto por depósitos aluviales, fluviales y parte de ceniza, se observan correlaciones simétricas y pares de estaciones sin correlación. Las correlaciones simétricas se obtienen en suelos gravosos, mientras que los pares sin correlación son aquellos

que están ubicados sobre la ceniza. La curva en velocidad de fase observada en el distrito da cuenta de un sector muy heterogéneo, con velocidades de onda de corte que varían desde 1 hasta 3.1 km/s para profundidades entre los 0.2 y 5 km.

- En los tres sectores estudiados se muestra una suave transición entre el depósito de suelos y la roca basal en términos de velocidad de onda de corte.

9.2. Recomendaciones

9.2.1. Recomendaciones sobre el Método Temporal

- Se recomienda utilizar modelos preliminares de velocidades de fase o grupo del medio que se desea caracterizar para establecer las ventanas de búsqueda en el control de calidad.
- Para el control de calidad mediante RSR, se recomienda establecer una RSR mínima según la curva generada por la Figura 5.14.
- Se recomienda realizar el apilamiento del mayor número de ventanas posibles. El tamaño de la ventana dependerá de la distancia entre las estaciones, la frecuencia de análisis y la cantidad de datos disponibles. Se recomienda elegir un largo de ventana que genere más de 1000 segmentos y que a su vez sea mayor a 10 veces el mínimo periodo que se desea analizar. En el caso que se disponga de registros cortos de vibraciones ambientales, se recomienda utilizar ventanas con traslape de información.

9.2.2. Recomendaciones sobre el Método Espectral

- Debido a la incerteza producida por la familia de curvas en velocidad de fase generada por la metodología espectral, se recomienda derivar las curvas de velocidad de fase y comparar con la información en velocidad de grupo obtenida mediante el análisis temporal para así establecer cuál es la curva que representa las características dispersivas del medio.
- Cuando la forma del espectro correlacionado antes del primer cruce por cero se asemeje a la función de Bessel J_0 , se recomienda analizar mediante SPAC dicho intervalo para obtener información a más baja frecuencia.

- Se recomienda utilizar la información proporcionada por la TS para conocer los tiempos de desfase donde la correlación cruzada tiene información y en dicho tiempos aplicar la metodología espectral, consiguiendo de esta manera amplitudes espectrales mayores.

9.2.3. Recomendaciones Generales

- Considerando la falta de resolución superficial con las distancias entre estaciones consideradas en esta tesis, es recomendable realizar campañas locales a distancias menores a 500 m con el fin de calcular correlaciones cruzadas a mayores frecuencias. Se ha observado que sismógrafos Tromino de 4.5 Hz son adecuados para este rango de distancias.
- Se recomienda utilizar los 17 acelerógrafos desplegados sobre la Cuenca para correlacionar con los sismógrafos de banda ancha y con ello densificar la cobertura de las correlaciones sobre la cuenca y así obtener curvas de velocidad de fase y grupo más robustas.
- Se recomienda instalar instrumentos cercanos a la Falla de San Ramón para estudiar la asimetría de las correlaciones cruzadas en la alta frecuencia observada en el distrito Este de la cuenca. Esta asimetría podría estar asociada a una distribución heterogénea del ruido o a la discontinuidad de velocidad de onda que impone la Falla.
- Se recomienda utilizar el método de correlaciones cruzadas en suelos gravosos, ya que sólo basta con 1 día de mediciones para obtener curvas de dispersión robustas.
- Se recomienda correlacionar las componentes longitudinales y transversales de los registros de vibraciones ambientales para estimar las velocidades de fase y grupo de las ondas Love y con ello estimar las propiedades dispersivas horizontales de la cuenca.
- Debido a la posibilidad de obtener curvas de dispersión en velocidad de fase y grupo de buena calidad, se recomienda realizar la tomografía de la Cuenca de Santiago con las metodologías propuestas en este trabajo y con ello tener mapas de velocidades que permitan entender el comportamiento sísmico de la Cuenca.

Bibliografía

- Aki, K. (1957) Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of Earthquake Engineering* 35:415-456.
- Aki, K. & Richards, P. G. (2002) *Quantitative seismology*.
- Allen, J. (1977) Short-term spectral analysis, and modification by discrete Fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing* 25(3):235-238.
- Astroza, M., Ruiz, S. & Astroza, R. (2012) Damage assessment and seismic intensity analysis of the 2010 (Mw 8.8) Maule earthquake. *Earthquake Spectra* 28(S1):S145-S164.
- Bendat, J. S. & Piersol, A. G. (2011) *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons.
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N. M. & Yang, Y. (2007) Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broadband surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International* 169(3):1239-1260.
- Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P. & Verdugo, R. (2009) Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical Journal International* 176(3):925-937.
- Boschi, L., Weemstra, C., Verbeke, J., Ekstrom, G., Zunino, A. & Giardini, D. (2012) On measuring surface wave phase velocity from station-station cross-correlation of ambient signal. *Geophysical Journal International* 192(1):346-358.
- Bracewell, R. & Kahn, P. B. (1966) The Fourier transform and its applications. *American Journal of Physics* 34(8):712-712.
- Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., Nercessian, A. & Ferrazzini, V. (2007) 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations. *Geophysical Research Letters* 34(2).
- Calkins, J. A., Abers, G. A., Ekström, G., Creager, K. C. & Rondenay, S. (2011) Shallow structure of the Cascadia subduction zone beneath western Washington from spectral ambient noise correlation. *Journal of Geophysical Research* 116(B7).
- Campillo, M. & Paul, A. (2003) Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science* 299(5606):547-549.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gans, P., Kay, S. M., Muñoz, N., Wyss, A. R. & Zurita, E. (2002) Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°–36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences* 15(1):117-139.

- Cho, K. H., Herrmann, R. B., Ammon, C. J. & Lee, K. (2007) Imaging the Upper Crust of the Korean Peninsula by Surface-Wave Tomography. *Bulletin of the Seismological Society of America* 97(1B):198-207.
- Cruz, E., Riddell, R. & Midorikawa, S. (1993) A study of site amplification effects on ground motions in Santiago, Chile. *Tectonophysics* 218(1):273-280.
- Dziewonski, A., Bloch, S. & Landisman, M. (1969) A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bulletin of the Seismological Society of America* 59(1):427-444.
- Ekström, G. (2014) Love and Rayleigh phase-velocity maps, 5–40 s, of the western and central USA from USArray data. *Earth and Planetary Science Letters* 402:42-49.
- Ekström, G., Abers, G. A. & Webb, S. C. (2009) Determination of surface-wave phase velocities across USArray from noise and Aki's spectral formulation. *Geophysical Research Letters* 36(18).
- Faccioli, E. (1991) Seismic amplification in the presence of geological and topographic irregularities. In *Proceedings of the second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Univ. of Missouri-Rolla.*, pp. 1779-1797.
- Hannemann, K., Papazachos, C., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., Anthymidis, M. & Lontsi, A. M. (2014) Three-dimensional shallow structure from high-frequency ambient noise tomography: New results for the Mygdonia basin-Euroseistest area, northern Greece. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(6):4979-4999.
- Horike, M. (1985) Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas. *Journal of Physics of the Earth* 33(2):59-96.
- Humire, F., Sáez, E., Leyton, F. & Yañez, G. (2014) Combining active and passive multi-channel analysis of surface waves to improve reliability of Vs30 estimation using standard equipment. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13(5):1303-1321.
- Jongmans, D. & Demanet, D. (1993) The importance of surface waves in vibration study and the use of Rayleigh waves for estimating the dynamic characteristics of soils. *Engineering Geology* 34(1):105-113.
- Kramer, S. L. (1996) *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Rebolledo, S., González, L., Ruiz, S., Foncea, C., Herrera, M. & Lavado, J. (2010) Zonificación Sísmica de la Cuenca de Santiago, Chile In *Proceedings of Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, X Jornadas*, pp. 22-27.
- Lin, F.-C., Moschetti, M. P. & Ritzwoller, M. H. (2008) Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps. *Geophysical Journal International* 173(1):281-298.

- Lin, F.-C., Ritzwoller, M. H. & Snieder, R. (2009) Eikonal tomography: surface wave tomography by phase front tracking across a regional broad-band seismic array. *Geophysical Journal International* 177(3):1091-1110.
- Lobkis, O. I. & Weaver, R. L. (2001) On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110(6):3011.
- Louie, J. N. (2001) Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America* 91(2):347-364.
- Luo, Y., Yang, Y., Xu, Y., Xu, H., Zhao, K. & Wang, K. (2015) On the limitations of interstation distances in ambient noise tomography. *Geophysical Journal International* 201(2):652-661.
- Midorikawa, S., Riddell, R. & Cruz, E. (1991) Strong - motion accelerograph array in Santiago, Chile, and preliminary evaluation of site effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 20(5):403-407.
- Mordret, A., Shapiro, N. M., Singh, S. S., Roux, P. & Barkved, O. I. (2013) Helmholtz tomography of ambient noise surface wave data to estimate Scholte wave phase velocity at Valhall Life of the Field. *Geophysics* 78(2):WA99-WA109.
- Olivier, G., Brenguier, F., Campillo, M., Lynch, R. & Roux, P. (2015) Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine. *Geophysics* 80(3):KS11-KS25.
- Park, C. B., Miller, R. D. & Xia, J. (1998) Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. In *SEG Expanded Abstracts.*, vol. 17, pp. 1377-1380.
- Pasten, C. (2007) Respuesta Sísmica de la Cuenca de Santiago. In *Departamento de Ingeniería Civil.* Universidad de Chile, Santiago, Chile, vol. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- Pastén, C., Sáez, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J. & Poli, P. (2016) Deep characterization of the Santiago Basin using HVSr and cross-correlation of ambient seismic noise. *Engineering Geology* 201:57-66.
- Picozzi, M., Parolai, S., Bindi, D. & Strollo, A. (2009) Characterization of shallow geology by high-frequency seismic noise tomography. *Geophysical Journal International* 176(1):164-174.
- Pilz, M., Parolai, S., Picozzi, M., Wang, R., Leyton, F., Campos, J. & Zschau, J. (2010) Shear wave velocity model of the Santiago de Chile basin derived from ambient noise measurements: a comparison of proxies for seismic site conditions and amplification. *Geophysical Journal International* 182(1):355-367.
- Poli, P., Pedersen, H. A. & Campillo, M. (2012) Emergence of body waves from cross-correlation of short period seismic noise. *Geophysical Journal International* 188(2):549-558.

- Porritt, R. W., Allen, R. M., Boyarko, D. C. & Brudzinski, M. R. (2011) Investigation of Cascadia segmentation with ambient noise tomography. *Earth and Planetary Science Letters* 309(1-2):67-76.
- Roux, P., Kuperman, W. A. & The, N. G. (2004) Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America* 116(4):1995.
- Roux, P., Sabra, K. G., Kuperman, W. A. & Roux, A. (2005) Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach. *The Journal of the Acoustical Society of America* 117(1):79.
- Sabra, K. G. (2005) Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters* 32(3).
- Sambridge, M. (1999) Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International* 138(2):479-494.
- Sambridge, M. (2001) Finding acceptable models in nonlinear inverse problems using a neighbourhood algorithm. *Inverse Problems* 17(3):387.
- Shapiro, N. M. & Campillo, M. (2004) Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters* 31(7).
- Shapiro, N. M., Ritzwoller, M. H. & Bensen, G. D. (2006) Source location of the 26 sec microseism from cross-correlations of ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters* 33(18).
- Shirzad, T. & Shomali, Z. H. (2014a) Extracting Seismic Body and Rayleigh Waves from the Ambient Seismic Noise Using the rms-Stacking Method. *Seismological Research Letters* 86(1):173-180.
- Shirzad, T. & Shomali, Z. H. (2014b) Shallow crustal radial anisotropy beneath the Tehran basin of Iran from seismic ambient noise tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 231:16-29.
- Socco, L. V. & Boiero, D. (2008) Improved Monte Carlo inversion of surface wave data. *Geophysical Prospecting* 56(3):357-371.
- Stehly, L., Campillo, M. & Shapiro, N. M. (2006) A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. *Journal of Geophysical Research* 111(B10).
- Stockwell, R. G., Mansinha, L. & Lowe, R. P. (1996) Localization of the complex spectrum: the S transform. *Signal Processing, IEEE Transactions on* 44(4):998-1001.
- Stokoe, K. H., Rix, G. J. & Nazarian, S. (1989) In situ seismic testing with surface waves. In *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12th, 1989, Rio de Janeiro, Brazil.*, vol. 1.
- Strobbia, C. (2003) Surface Wave Methods: Acquisition, processing and inversion.) Politecnico di Torino, vol. Ph.D.

- Tarantola, A. (1987) *Inverse Problem Theory. Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*) Elsevier Science.
- Tary, J. B., Herrera, R. H., Han, J. & Baan, M. (2014) Spectral estimation—What is new? What is next? *Reviews of Geophysics* 52(4):723-749.
- Tokimatsu, K. & Kōgakkai, J. (1995) *Geotechnical site characterization using surface waves*. publisher not identified.
- Toledo, A. (2008) Sobre los estados resonantes de la cuenca de Santiago. In *Departamento de Ingeniería Civil.*) Universidad de Chile, Santiago, Chile, vol. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Mención Geofísica. .
- Tsai, V. C. & Moschetti, M. P. (2010) An explicit relationship between time-domain noise correlation and spatial autocorrelation (SPAC) results. *Geophysical Journal International* 182(1):453-460.
- Udías, A. (2000) *Principles of Seismology*. Cambridge University Press.
- Wathelet, M. (2005) Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. *PhD Diss., Liège University* 161.
- Wathelet, M. (2008) An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters* 35(9).
- Wathelet, M., Jongmans, D. & Ohrnberger, M. (2004) Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near surface geophysics* 2(4):211-221.
- Weaver, R. L. & Lobkis, O. I. (2004) Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function (L). *The Journal of the Acoustical Society of America* 116(5):2731.
- Yañez, G., Muñoz, M., Flores-Aqueveque, V. & Bosch, A. (2015) Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazards. *Andean Geology* 42(2):147-172.
- Yao, H., Gouédard, P., Collins, J. A., Mcguire, J. J. & Van Der Hilst, R. D. (2011) Structure of young East Pacific Rise lithosphere from ambient noise correlation analysis of fundamental- and higher-mode Scholte-Rayleigh waves. *Comptes Rendus Geoscience* 343(8-9):571-583.
- Yao, H., Van Der Hilst, R. D. & De Hoop, M. V. (2006) Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis - I. Phase velocity maps. *Geophysical Journal International* 166(2):732-744.
- Zhang, J. & Gerstoft, P. (2014) Local-scale cross-correlation of seismic noise from the Calico fault experiment. *Earthquake Science* 27(3):311-318.