



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS
BASADOS EN ONDAS SUPERFICIALES
PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA
DE SUELOS. APLICACIÓN A LA
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL
NORTE Y PONIENTE DE SANTIAGO**

FRANCISCO ALEJANDRO HUMIRE GUARACHI

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería.

Profesor Supervisor:

ESTEBAN PATRICIO SÁEZ ROBERT

Santiago de Chile, Julio, 2013

© MMXIII, FRANCISCO ALEJANDRO HUMIRE GUARACHI



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS
BASADOS EN ONDAS SUPERFICIALES
PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA
DE SUELOS. APLICACIÓN A LA
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL
NORTE Y PONIENTE DE SANTIAGO**

FRANCISCO ALEJANDRO HUMIRE GUARACHI

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

ESTEBAN PATRICIO SÁEZ ROBERT

GONZALO ALEJANDRO YAÑEZ CARRIZO

FELIPE ORLANDO LEYTON FLÓREZ

HUGH RUDNICK VAN DE WYNGARD

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería.

Santiago de Chile, Julio, 2013

© MMXIII, FRANCISCO ALEJANDRO HUMIRE GUARACHI

A mi hermano Álvaro

(Q.E.P.D)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a TRV Geofísica por el financiamiento de esta investigación, por su aporte en el trabajo de campo y por facilitarnos la fuente sísmica. En forma particular agradecer a Tony Rojas Vicencio por la confianza depositada en esta investigación, y a Gerard, Cristian y Enrique por todo el apoyo en el trabajo de campo.

A DICTUC S.A. por facilitar los equipos que permitieron llevar a cabo esta investigación.

Agradecer de manera especial al profesor Esteban Sáez por su constante apoyo, consejos y disposición en esta investigación. Lo admiro por ser un gran profesor y una gran persona. A los profesores Felipe Leyton y Gonzalo Yañez por el apoyo y los consejos entregados. A todos los estudiantes que participaron en el trabajo de campo realizado en las distintas etapas de esta investigación.

A mi familia por todo el apoyo entregado a lo largo de estos años. A mi madre Lucía por todo su esfuerzo y amor incondicional que hicieron posible cumplir la meta. A la Juanita por apoyarme desde los dos años, gracias por su cariño y su esfuerzo. A mis hermanos por toda la preocupación y porque están en mi corazón todos los días.

Al departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica por mi formación como ingeniero. A mis compañeros con quienes compartimos gratos momentos en las salitas de magister y en los congresos: Gigi, Nico, Daniel, Felipe, Javier, Minor, Crispi, Alix, Toro, Chubi. A Guillermo Poblete y Jenifer Flores quienes me ayudaron en muchas de mis labores, siempre con una gran disposición y cordialidad.

A Cori porque cada día que hemos estado juntos han sido maravillosos y por estar siempre a mi lado. A mis amigos en estos siete años de universidad: Rorro, Diego, Cavichi, Raúl, Ale, Juan, Andrés, Dani, Mediano, Tomás, Hernán, Sergio y muchos otros a quienes no alcanzo a nombrar pero que han sido una parte fundamental de esta etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	3
2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Propagación de Ondas Sísmicas en Medios Elásticos	4
2.1.1. Propagación de ondas en un medio elástico e isotrópico	6
2.1.2. Ondas Planas Monocromáticas	7
2.2. Ondas Superficiales	9
2.2.1. Ondas de Rayleigh en semi-espacio homogéneo	9
2.2.2. Propagación de ondas de Rayleigh en un medio estratificado	12
2.3. Métodos Geofísicos para la Caracterización Geotécnica de Suelos	15
2.3.1. Métodos directos para medir Velocidades de ondas de corte	16
2.3.2. Métodos basados en el análisis de la dispersión de Ondas Superficiales	22
2.4. Enfoques para la determinación de las propiedades dispersivas	26
2.4.1. Análisis Espectral de Ondas Superficiales	28
2.4.2. Análisis frecuencia-número de onda (f-k)	29
2.4.3. Análisis MASW	38

2.4.4. Método de autocorrelación espacial (SPAC)	44
2.5. Inversión	50
2.5.1. Enfoques para la Inversión.....	51
2.5.2. Algoritmo del Vecindario	53
2.6. Método de la Razón Espectral H/V	56
2.7. Resumen	59
3. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MULTI-CANAL CON EL MÉTODO F-K.....	60
3.1. Adquisición de datos y herramientas para el análisis	60
3.2. Ensayos Activos.....	63
3.2.1. Combinación de señales (<i>stacking</i>).....	64
3.2.2. Configuraciones de arreglos y distancias de disparo	66
3.2.3. Efecto del tipo de fuente	69
3.3. Ensayos Pasivos.....	77
3.3.1. Configuraciones de arreglos	77
3.3.2. Tiempo de Registro y Filtro de señales.....	85
3.4. Aplicación a suelos típicos de la región Metropolitana.....	87
3.4.1. Caso 1: Suelos Rígidos	87
3.4.2. Caso 2: Cenizas Volcánicas	96
3.4.3. Caso 3: Suelos Finos.....	103
3.5. Resumen	111
4. COMBINACIÓN DE TÉCNICAS.....	112
4.1. Evaluación de curvas de dispersión con SPAC	113
4.1.1. Método SPAC aplicado a arreglos circulares	115
4.1.2. Método SPAC aplicado a arreglos lineales.....	119

4.2. Evaluación del perfil de V_s a través de la combinación de técnicas	121
4.2.1. Combinación de curvas de dispersión.....	122
4.2.2. Evaluación del perfil de V_s utilizando distintas combinaciones de curvas de dispersión	125
4.2.3. Metodología propuesta para la estimación del perfil de velocidades de ondas de corte y la caracterización sísmica mediante $V_{s,30}$	129
4.3. Desempeño de las combinaciones de datos para distintas condiciones de tráfico	133
4.4. Resumen	136
5. APLICACIÓN A LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL NORTE Y PONIENTE DE SANTIAGO	137
5.1. Microzonificación sísmica del norte de Santiago	138
5.2. Microzonificación sísmica del poniente de Santiago	145
5.3. Resumen	151
6. CONCLUSIONES.....	152
6.1. Trabajo a futuro	154
Referencias.....	156
A N E X O S.....	165
Anexo A. Procesamiento de señales activas	166
Anexo B. Lugares seleccionados para ejecución de ensayos	174
Anexo C. Resultados Down-hole	180
Anexo D. Resultados de la combinación de técnicas	182

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Características de los arreglos usados en ensayos activos con golpes de martillo de 18 lb en un ambiente urbano.....	67
Tabla 3.2: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con caída libre de 100 kg en suelos rígidos	74
Tabla 3.3: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con golpes de martillo de 18 libras en suelos rígidos.....	74
Tabla 3.4: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con caída libre de 100 kg en suelos blandos	76
Tabla 3.5: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con golpes de martillo de 18 libras en suelos blandos.....	76
Tabla 3.6: Configuraciones bidimensionales de geófonos para los ensayos pasivos.....	78
Tabla 3.7: Estratigrafía del suelo del Campus San Joaquín de la Universidad Católica (Ampuero y Van Sint Jan, 2004).....	88
Tabla 3.8: Resumen de la estratigrafía determinada en base al sondaje en Pudahuel (Seremi Metropolitana MINVU, 2012a).....	97
Tabla 3.9: Resumen de la estratigrafía determinada en base al sondaje en Lampa (Seremi Metropolitana MINVU, 2012b).....	104
Tabla 4.1: Clasificación sísmica acorde al $V_{S,30}$ (NCh 433, mod DS 61).....	130
Tabla 4.2: $V_{S,30}$ obtenidos para el caso 1.....	131
Tabla 4.3: $V_{S,30}$ obtenidos para el caso 2.....	131
Tabla 4.4: $V_{S,30}$ obtenidos para el caso 3.....	132
Tabla 4.5: Desempeño de las distintas combinaciones de técnicas y evaluadas para distintas condiciones de tráfico.....	134
Tabla 5.1: Resultados microzonificación sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b).....	139
Tabla 5.2: $V_{S,30}$ de los perfiles de V_s promedio en las zonas 1N, 3N y 5N	143

Tabla 5.3: Resultados microzonificación sector poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012a)	146
Tabla 5.4: $V_{S,30}$ de los perfiles de V_s promedio en las zonas 2P, 3P y 5P	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de ondas sísmicas (Adaptado de Sauter, 1989)	5
Figura 2.2: Desplazamientos asociados a la ondas de compresión y corte (Adaptado de Wolf, 1985).....	8
Figura 2.3: Semi-espacio elástico y homogéneo	9
Figura 2.4: Desplazamiento horizontal y vertical en ondas de Rayleigh para distintos valores del módulo de Poisson (ν).....	11
Figura 2.5: Semi-espacio elástico y estratificado horizontalmente.....	12
Figura 2.6: Curvas de dispersión en sus distintos modos obtenidas para un modelo de cuatro capas, y desplazamientos verticales (u_v) y horizontales (u_h) obtenidos para los primeros cuatro modos de vibración a 15 Hz (Modificado de Xia, 2003)	15
Figura 2.7: Esquema de los ensayos <i>down-hole</i> y <i>up-hole</i> (Semblat y Pecker, 2009).....	17
Figura 2.8: Señales registradas en un ensayo <i>down-hole</i>	18
Figura 2.9: Esquema del ensayo <i>cross-hole</i>	19
Figura 2.10: Señales registradas en un ensayo <i>cross-hole</i> en las direcciones vertical y horizontal (Semblat y Pecker, 2009).....	20
Figura 2.11: Ocurrencia de refracción en un ensayo <i>cross-hole</i> (Semblat y Pecker, 2009)	20
Figura 2.12: Esquema del ensayo de refracción sísmica.....	21
Figura 2.13: Gráfico de los tiempos de la primera llegada para cada distancia (Semblat y Pecker, 2009)	22
Figura 2.14: Velocidad de fase para distintas longitudes de ondas en un semi-espacio homogéneo (izquierda) y en un medio estratificado (derecha) (Strobbia, 2003)	23
Figura 2.15: Frentes de ondas generados por una fuente activa.....	24
Figura 2.16: Configuraciones típicas del método SASW (Foti, 2000)	28
Figura 2.17: Arreglo de geófonos atravesado por un frente plano de ondas: (a) plano vertical, (b) plano horizontal.....	30
Figura 2.18: Ejemplo del análisis f-k sobre una ventana de tiempo y una frecuencia de 15 Hz (izquierda) para el cálculo de la curva de dispersión (derecha).....	32

Figura 2.19: Distribución normal ajustada a los resultados obtenidos para distintas ventanas de tiempo.....	33
Figura 2.20: Resultados del análisis f-k: (a) Espectro f-k, (Foti, 2000) (b) Curva de dispersión.....	35
Figura 2.21: Función de respuesta de un arreglo lineal (Johnson y Dudgeon, 1993)	36
Figura 2.22: Función de respuesta para un arreglo bidimensional.....	36
Figura 2.23: Propagación de un frente de ondas plano entre dos receptores (R1 y R2) que forman parte de un arreglo lineal cuyo espaciamiento es constante e igual a d	40
Figura 2.24: Formas en que se pueden propagar los frentes de ondas generados por el tráfico vehicular de una carretera paralela al arreglo de geófonos (Park y Miller, 2008)	42
Figura 2.25: Ubicación de la fuente para frente de ondas cilíndricos (Park y Miller, 2008)	43
Figura 2.26: Curvas de dispersión obtenidas con arreglos lineales y los distintos enfoques de como considerar los frentes de propagación de ondas (IP, OP, OC) comparada con la obtenida usando un arreglo 2D (Park y Miller, 2008)	43
Figura 2.27: Esquema en planta del análisis SPAC	45
Figura 2.28: Curvas de autocorrelación para distintos valores de r calculados para el modelo de Foti (2000).....	48
Figura 2.29: (a) Arreglo circular imperfecto en coordenadas cartesianas. (b) Gráfico de cada par de receptor en función de la distancia entre ellos (ξ) y el ángulo que se forma con la horizontal (ϕ). (Bettig et al., 2001).	49
Figura 2.30: Esquema del problema inverso (Modificado de Wathelet, 2005)	50
Figura 2.31: Métodos utilizados para la inversión en geofísica y comparación de su grado de exploración (Sambridge y Mosegaard, 2002)	52
Figura 2.32: Procedimiento de inversión según el algoritmo del vecindario (Sambridge, 1999)	54
Figura 2.33: Implementación para incluir condiciones complejas en el proceso de inversión (Wathelet, 2008)	54

Figura 2.34: Incorporación de escalas variables en los ejes de parámetros o <i>dynamic parameter scaling</i> (Wathelet, 2008)	55
Figura 2.35: Taxonomía de las curvas obtenidas con el método de la razón espectral H/V en suelos típicos de Santiago (Bonney-Claudet, 2008)	58
Figura 3.1: (a) Equipo de adquisición de datos (GEODE). (b) Gráfico de respuesta de los geófonos (Doyle, 1995)	61
Figura 3.2: Fuentes utilizadas en ensayos activos: (a) caída de peso de 100 kg a tres metros de altura, y (b) golpes con martillo de 18 libras	64
Figura 3.3: Resultados individuales con la fuente a (a) 5 m, (b) 10 m, (c) 15 m, resultados con <i>stacking</i> en tiempo de 5 trazas obtenidas con la fuente a (d) 5 m, (e) 10 m, (f) 15 m, y (g) resultados del <i>stacking</i> en frecuencia de (d), (e) y (f)	65
Figura 3.4: Diagramas de dispersión obtenidos con arreglos de distintas dimensiones en ensayos con golpes de martillo de 18 lb en un ambiente urbano.....	67
Figura 3.5: Diagramas de dispersión obtenidos con arreglos de distintas dimensiones en ensayos con golpes de martillo de 18 lb en un ambiente rural	69
Figura 3.6: Espectros de amplitud obtenidos en un suelo rígido.	70
Figura 3.7: Espectros de amplitud obtenidos en un suelo blando.	72
Figura 3.8: Zonas de baja y alta resolución en un gráfico de energía resultante del análisis Roadside MASW para un ensayo pasivo con arreglo lineal.....	78
Figura 3.9: Zonas de baja y alta resolución en un gráfico de energía resultante del análisis f-k para un ensayo pasivo con arreglo bidimensional.....	79
Figura 3.10: (a) respuesta del arreglo para distintos ángulos de propagación del frente de ondas, (b) límites teóricos para los arreglos bidimensionales, (c) respuesta teórica del arreglo R9_12 en el plano k_x, k_y	81
Figura 3.11: Curvas de dispersión obtenidas con arreglos lineales usando (a) 12 y (b) 24 geófonos espaciados cada 5 metros en un suelo blando	82
Figura 3.12: Curvas de dispersión obtenidas con arreglos lineales usando (a) 12 y (b) 24 geófonos espaciados cada 5 metros en un suelo rígido	83

Figura 3.13: Curvas de dispersión obtenidas en ensayos pasivos con arreglos (a) R9_12, (b) R9_24, (c) R19_12 y (d) R19_24	85
Figura 3.14: Registro de vibraciones ambientales analizado con ventanas de tiempo de 1 segundo para frecuencias de 10 Hz.....	86
Figura 3.15: Curvas de dispersión para ensayos activos en el caso 1.	89
Figura 3.16: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando la caída libre del peso de 100 kg.	90
Figura 3.17: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando golpes de martillo.....	91
Figura 3.18: Curva de dispersión para arreglo lineal en caso 1	92
Figura 3.19: Curva de dispersión para arreglos bidimensionales en el caso 1	92
Figura 3.20: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando arreglos lineales pasivos	93
Figura 3.21: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando el arreglo R9_24	94
Figura 3.22: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando el arreglo R19_24	94
Figura 3.23: Comparación de los perfiles de Vs obtenidos para el caso 3 y los obtenidos por Riddell et al. (1992).....	95
Figura 3.24: Resultados para el caso 2 con ensayos activos	98
Figura 3.25: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando la caída libre del peso de 100 kg.	99
Figura 3.26: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando golpes de martillo.....	99
Figura 3.27: Curvas de dispersión obtenidas para el caso 2 con ensayos pasivos: (a) Arreglo lineal y método Roadside MASW, (b) Arreglo R9_12 y método f-k	100
Figura 3.28: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando arreglos lineales	101

Figura 3.29: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando el arreglo R9_12	101
Figura 3.30: Comparación de los perfiles de Vs obtenidos para el caso 2 y los resultados del ensayo <i>down-hole</i>	103
Figura 3.31: Resultados para el caso 3 con ensayos activos	106
Figura 3.32: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando el mejor golpe de martillo	106
Figura 3.33: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando la caída libre del peso de 100 kg.	107
Figura 3.34: Curvas de dispersión obtenidas para el caso 3 con ensayos pasivos	108
Figura 3.35: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando arreglos lineales	108
Figura 3.36: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando el arreglo R9_12	109
Figura 3.37: Comparación de los perfiles de Vs obtenidos para el caso 3 y los resultados del ensayo <i>down-hole</i>	110
Figura 4.1: Curvas de autocorrelación obtenidas mediante el método SPAC	114
Figura 4.2: Velocidades de fase asociadas a coeficientes de autocorrelación para distintas frecuencias y curva de dispersión seleccionada.....	115
Figura 4.3: Resultados SPAC para caso 1 con los arreglos (a) R9_24, (b) R9_12, (c) R19_24 y (d) R19_12	116
Figura 4.4: Curva de dispersión obtenida con SPAC para el caso 1 y enlace con las dadas por ensayos activos, pasivos lineales y pasivos para arreglo R19_24	117
Figura 4.5: Curva de dispersión obtenida con SPAC para el caso 2 y enlace con las dadas por ensayos activos, pasivos lineales y pasivos para arreglo R9_12	118
Figura 4.6: Curva de dispersión obtenida con SPAC para el caso 3 y enlace con las dadas por ensayos activos, pasivos lineales y pasivos para arreglo R9_12	118
Figura 4.7: Resultados obtenidos con SPAC aplicado al arreglo lineal para el caso 1 y superposición de la curva de dispersión obtenida con Roadside MASW.....	120

Figura 4.8: Resultados obtenidos con SPAC aplicado al arreglo lineal para el caso 2 y superposición de la curva de dispersión obtenida con Roadside MASW	120
Figura 4.9: Resultados obtenidos con SPAC aplicado al arreglo lineal para el caso 3 y superposición de la curva de dispersión obtenida con Roadside MASW	121
Figura 4.10: Curvas de dispersión y resultados SPAC sobre arreglos circulares en: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3	122
Figura 4.11: Curvas de dispersión y resultados SPAC sobre arreglos lineales en: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3	123
Figura 4.12: Perfiles de velocidades de ondas de corte para las distintas combinaciones de datos: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3	127
Figura 4.13: Comparación de los perfiles de velocidades de ondas de corte para las distintas combinaciones de datos: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3	129
Figura 4.14: Casos observados en la Tabla 3 que presentan las diferencias más severas entre LP y LPA con LCPA: Casos E07, E19 y E20	135
Figura 5.1: Mapa de microzonificación sísmica del norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b).....	138
Figura 5.2: Mediciones del perfil de velocidades de ondas de corte en el sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b).....	140
Figura 5.3: Mediciones del periodo fundamental en el sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b).....	141
Figura 5.4: $V_{S,30}$ (m/s) obtenidos para las zonas 1N, 3N y 5N	142
Figura 5.5: T_0 obtenidos para las zonas 1N, 3N y 5N.....	142
Figura 5.6: Perfiles de V_s promedio para zonas 1N, 3N y 5N (línea roja) construidos en base a los perfiles obtenidos para esta zona (líneas grises)	144
Figura 5.7: Zonificación del poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012a)	145
Figura 5.8: Mediciones del perfil de velocidades de ondas de corte en el sector poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012a)	147

Figura 5.9: Mediciones del periodo fundamental en el sector poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b).....	148
Figura 5.10: $V_{s,30}$ (m/s) obtenidos para las zonas 2P, 3P y 5P	149
Figura 5.11: T_0 obtenidos para las zonas 2P, 3P y 5P.....	149
Figura 5.12: Perfiles de V_s promedio para zonas 2P, 3P y 5P (línea roja) construidos en base a los perfiles obtenidos para esta zona (líneas grises)	150
Figura A.1: Esquema que resume el proceso de <i>stacking</i> (Towhata, 2008)	167
Figura A.2: Efecto del <i>stacking</i> en tiempo.....	168
Figura A.3: Efecto del <i>stacking</i> en frecuencia	169
Figura A.4: Esquema del proceso de <i>stacking</i> espacial para señales con distintas distancias fuente-receptor	170
Figura A.5: Efecto del enfoque usado para incorporar la atenuación sobre el espectro de energía.....	171
Figura A.6: Registro de un ensayo activo con selección de ventanas de tiempo y distancia fuente-receptor específicas para el análisis.....	172
Figura A.7: Efecto de incorporar receptores lejanos a la fuente que no registran el golpe con claridad.....	173
Figura B.1: Ubicación del sitio estudiado para el caso 1	174
Figura B.2: Arreglos de geófonos utilizados en el sitio de estudio para el caso 1	175
Figura B.3: Ubicación del sitio estudiado para el caso 2	176
Figura B.4: Arreglos de geófonos utilizados en el sitio de estudio para el caso 2	177
Figura B.5: Ubicación del sitio estudiado para el caso 3	178
Figura B.6: Arreglos de geófonos utilizados en el sitio de estudio para el caso 3	179
Figura C.1: Resultados de ensayo down-hole para caso 2 (Cenizas Volcánicas).....	180
Figura C.2: Resultados de ensayo down-hole para caso 2 (Suelos Finos).....	181
Figura D.1: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con AH.....	182
Figura D.2: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LP	183
Figura D.3: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LPA	183
Figura D.4: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LCPA	184

Figura D.5: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LPA2	185
Figura D.6: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con AH.....	186
Figura D.7: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LP	186
Figura D.8: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LPA	187
Figura D.9: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LCPA	188
Figura D.10: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LPA2	189
Figura D.11: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con AH.....	190
Figura D.12: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LP	190
Figura D.13: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LPA	191
Figura D.14: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LCPA	192
Figura D.15: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LPA2	193

RESUMEN

Existen métodos geofísicos no invasivos que permiten inferir las propiedades dinámicas de un sitio. Los métodos sísmicos basados en ondas superficiales son comúnmente usados para determinar las propiedades elásticas de los suelos, pero al ser métodos indirectos, existe un grado de incertidumbre importante que requiere ser estudiado.

El principal objetivo de esta investigación es estudiar la aplicación del análisis multi-canal de ondas superficiales en sus variantes activa y pasiva, para obtener el perfil de velocidades de ondas de corte en diferentes tipos de suelos. El análisis espectral frecuencia-número de onda ($f-k$) y el método de autocorrelación espacial (SPAC) son utilizados para evaluar las propiedades dispersivas de cada sitio, mientras que el algoritmo del vecindario es usado para resolver el problema inverso asociado y así obtener el perfil de velocidades de ondas de corte.

Esta investigación tiene tres focos: estudiar el uso de diferentes fuentes en ensayos activos, estudiar las propiedades geométricas de los arreglos de geófonos en mediciones pasivas, y la combinación de los resultados obtenidos con ambas técnicas. Los resultados definirán recomendaciones para la aplicación de este método para diferentes clases sísmicas de suelos. Finalmente, se busca aplicar la metodología desarrollada en esta investigación a un estudio de microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago.

Keywords: dispersión de ondas superficiales, métodos geofísicos sísmicos, análisis multi-canal de ondas superficiales, clasificación sísmica de suelos, microzonificación sísmica

ABSTRACT

There are non-invasive geophysical methods to determine the dynamic properties of a site. Active and passive surface wave methods are commonly used for this purpose, but being indirect methods there is a degree of uncertainty that needs to be studied.

The main objective of this research is to study the application of active and passive multichannel analysis of surface waves and to obtain the shear wave velocity profile of different types of soils. The frequency wavenumber (f-k) spectrum analysis and the spatial autocorrelation method (SPAC) are used to evaluate the dispersive characteristics of each site, and the neighborhood algorithm is used to solve the inverse problem and to obtain the shear wave velocity profile.

This research has three targets: to test the use of different sources in active measurements, to study the geometrical properties of geophone array in passive measurements, and to combine the results obtained with both techniques. The results will define recommendations of this method for different seismic soil classes. Finally, the methodology developed is applied to a seismic microzoning study in Northern and Western Santiago.

Keywords: dispersion of surface waves, geophysical seismic methods, multi-channel analysis of surface waves, seismic soil classification, seismic microzoning

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones locales del suelo pueden variar entre sitios cercanos, modificando, y en muchos casos amplificando, el movimiento percibido en superficie. Esta modificación de la señal producto de las condiciones geológicas y topográficas de un sitio en particular, se conoce como efecto de sitio (Seed et al., 1976, Aki, 1988). Por ello, al momento de diseñar una edificación u obra civil, es necesario estudiar el comportamiento dinámico del sitio en el que se emplazará la obra. Dentro las propiedades que caracterizan el comportamiento dinámico de un sitio, se encuentra el perfil de velocidades de propagación ondas de corte, el cual es considerado como un parámetro fundamental para la evaluación de los efectos de sitio (Tokimatsu, 1997).

Recientemente, se observó en Chile varios ejemplos de amplificación de ondas sísmicas producto de las condiciones locales durante el terremoto del 27 de febrero de 2010. Sus consecuencias, tanto en número de víctimas, como en daños materiales, hicieron surgir la necesidad de elevar los estándares y los aspectos a considerar al momento de diseñar sísmicamente una edificación o una obra civil. Uno de los aspectos más cuestionados fue la clasificación sísmica de suelos estipulada hasta ese entonces por la norma Nch433 of 1996 mod 2009 (Pinilla, 2012).

Debido a ello, el 13 de diciembre de 2011 se aprueba en su remplazo el Decreto Supremo 61 que, entre otras modificaciones, establece que para toda edificación de 5 o más pisos sobre el terreno natural, edificios categoría III o IV y conjuntos de viviendas de más de 8000 m², se deba realizar un estudio que permita inferir el perfil de velocidades de ondas de corte. Entre los estudios aceptados por el nuevo decreto se encuentran los ensayos *cross-hole*, *down-hole*, sonda de suspensión o aquellos basados en ondas superficiales, como el análisis espectral de ondas superficiales, el análisis multi-canal de ondas superficiales y la refracción de microtemblores.

La gran ventaja de ensayos como el *cross-hole*, *down-hole* o sonda de suspensión, es que permiten medir directamente las velocidades de propagación de ondas de corte en el suelo. Sin embargo, tienen la gran desventaja de requerir perforaciones en terreno, lo cual

puede resultar muy costoso e impracticable para muchos casos reales. Fuera de estas limitaciones prácticas, los métodos basados en sondajes son mediciones muy locales y puntuales que pueden no representar correctamente el comportamiento global de un sitio, especialmente cuando la perforación atraviesa irregularidades puntuales del terreno (lentes).

A diferencia de ellos, los métodos basados en el análisis de ondas superficiales, no requieren realizar perforaciones en terreno y permiten calcular la velocidad de propagación de ondas de corte a distintas profundidades a través del análisis de sus propiedades dispersivas.

Entre las principales ventajas de la utilización de estos métodos se encuentran:

- No requieren realizar perforaciones en el sitio.
- Son más económicos tanto en dinero como en tiempo.
- Capacidad para detectar estratos de suelos más débiles bajo otros más rígidos.
- Muestreo más general de un sitio.

Sin embargo, al tratarse de un método indirecto, hay un mayor grado de incertidumbre, lo que hace necesario estudiar cuidadosamente su aplicación. En la literatura se ha estudiado ampliamente el análisis espectral de ondas superficiales (SASW, Nazarian y Desai, 1993, Stokoe et al., 1994), el cual se basa en el registro de señales artificiales utilizando dos receptores. Esto implica la ejecución de múltiples ensayos con distintos espaciamientos de los receptores, lo que en muchas ocasiones es ineficiente en términos de tiempo. Por el contrario, el análisis multi-canal permite el registro simultáneo de señales artificiales o vibraciones ambientales utilizando varios receptores. Sin embargo, a diferencia del método SASW, la aplicación del análisis multi-canal no ha sido tan estudiada.

1.1. Objetivos

El objetivo de esta investigación es estudiar la aplicación del análisis multi-canal de ondas superficiales en sus variantes activa y pasiva, para la caracterización dinámica de suelos. Los resultados de esta investigación permitieron definir recomendaciones sobre la aplicación de este método para distintas clases sísmicas de suelos.

Los objetivos específicos dentro de esta investigación son:

- Estudiar el efecto de la fuente en los ensayos activos y de la cantidad de energía suministrada al suelo. Se busca establecer relaciones entre el tipo de suelo y la forma de aplicar la carga mecánica, así como comparar resultados para distintos niveles de energía y establecer requerimientos mínimos.
- Estudiar el efecto de las características geométricas de las configuraciones lineales y bidimensionales de receptores para el registro de vibraciones ambientales. Se busca establecer relaciones entre la geometría de estas configuraciones y la calidad del muestreo, al aplicarlos en distintas clases sísmicas de suelos.
- Explorar las capacidades del análisis frecuencia-número de onda (f-k) y el método de autocorrelación espacial (SPAC) para la determinación de las propiedades dispersivas de los suelos.
- Estudiar la combinación de resultados entregados por la combinación de técnicas activas y pasivas, tanto a nivel de adquisición de datos como de técnicas de análisis.
- Establecer recomendaciones sobre la aplicación del análisis multi-canal de ondas superficiales para distintas clases sísmicas de suelos.
- Validar los resultados obtenidos mediante su comparación con ensayos *down-hole* y sondajes.
- Aplicar la metodología desarrollada a un estudio de microzonificación sísmica en los sectores norte y poniente de Santiago.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Propagación de Ondas Sísmicas en Medios Elásticos

Las ondas sísmicas se propagan a través de medios elásticos y son generadas por perturbaciones como la fractura de la corteza terrestre, impactos o explosiones, etc. Dentro de las ondas sísmicas, se encuentran las ondas de cuerpo, las cuales se pueden clasificar en dos tipos (Sauter, 1989):

- Ondas primarias, de volumen, de compresión u ondas P. Ondas que generan un movimiento de partículas en la dirección de propagación, comprimiendo y dilatando el medio por el cual se propagan, tal como se indica en la Figura 2.1a.
- Ondas secundarias, de corte u ondas S. Ondas que generan un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación (Figura 2.1b), desarrollando esfuerzos de corte en el medio por el que se propagan. El movimiento se puede descomponer en un movimiento sobre un plano vertical y otro sobre un plano horizontal, cuyas componentes se conocen como SV y SH respectivamente (Semblat y Pecker, 2009).

Por otro lado, las ondas superficiales se propagan en la superficie de la Tierra, las cuales tienen una velocidad de propagación menor que las ondas de cuerpo. Pueden ser generadas por fuentes naturales (sismos, oleaje, viento, etc.) o artificiales (actividad humana), las cuales pueden estar ubicadas tanto al interior como al exterior de la Tierra. Existen dos tipos fundamentales de ondas superficiales:

- Ondas de Love u ondas L. Ondas que hacen vibrar el suelo horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación (Sauter, 1989), tal como se observa en la Figura 2.1c. Estas ondas se producen cuando la capa superficial es más blanda que la capa inferior, y se originan a partir de la reflexión de una onda SH con la superficie libre para luego sufrir múltiples reflexiones entre la capa inferior y la superficie libre (Foti, 2000).

- Ondas de Rayleigh u ondas R. Tal como se indica en la Figura 2.1d, son ondas que producen una trayectoria de partícula elíptica con una componente retrógrada de movimiento en el plano de propagación, y se producen siempre que se induzca movimiento sobre la superficie libre en la dirección vertical.

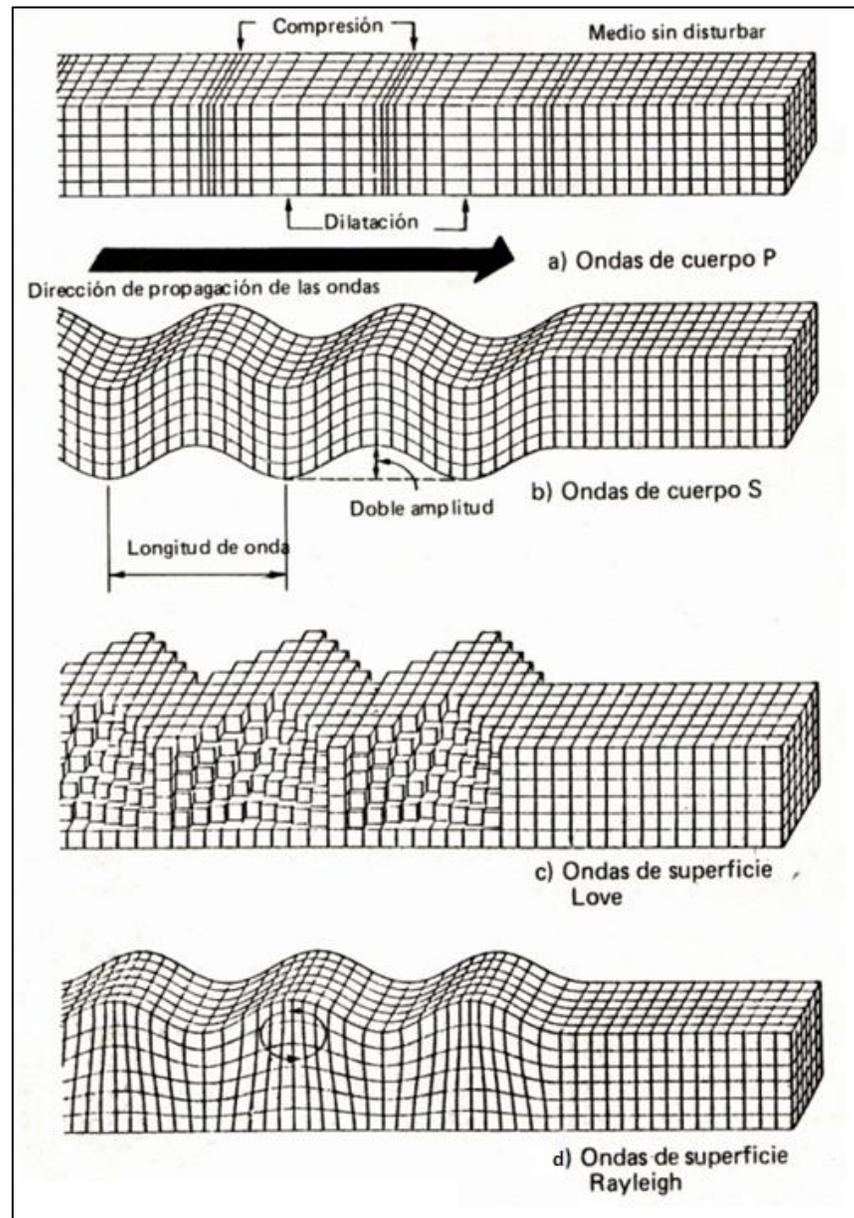


Figura 2.1: Tipos de ondas sísmicas (Adaptado de Sauter, 1989)

2.1.1. Propagación de ondas en un medio elástico e isótropo

La ecuación de cantidad de movimiento o perturbación dinámica en torno al equilibrio estático corresponde a:

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{\sigma}} = \rho \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Donde $\underline{\underline{\sigma}}$ corresponde al tensor de esfuerzos, ρ a la densidad del material, \underline{u} al vector de desplazamientos y $\underline{\nabla} \cdot$ al operador divergencia. Al considerar comportamiento lineal, elástico e isótropo, y utilizando los parámetros de Lamé λ y μ , la relación esfuerzo-deformación se puede expresar como:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \lambda \operatorname{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}) + 2\mu \underline{\underline{\varepsilon}} \quad (2.2)$$

Donde $\underline{\underline{\varepsilon}}$ corresponde al tensor de deformaciones, el cual se puede expresar en función del vector de desplazamientos, asumiendo pequeñas deformaciones:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \frac{1}{2} (\underline{\underline{\nabla}} \underline{u}^t + \underline{\underline{\nabla}} \underline{u}) \quad (2.3)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.2) y (2.3) en (2.1), se obtiene:

$$(\lambda + \mu) \underline{\underline{\nabla}} (\underline{\underline{\nabla}} \cdot \underline{u}) + \mu \Delta \underline{u} - \rho \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

Que corresponde a la ecuación de la elastodinámica. Es posible resolver la ecuación (2.4) utilizando la descomposición de Helmholtz en \underline{u} , al expresarlo como la suma del gradiente de un potencial escalar ϕ y el rotacional de un potencial vectorial $\underline{\psi}$. Además, se debe imponer como condición, que $\underline{\psi}$ no introduzca cambio de volumen.

$$\underline{u} = \underline{\underline{\nabla}} \phi + \underline{\underline{\nabla}} \wedge \underline{\psi} \quad (2.5)$$

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{\psi} = 0 \quad (2.6)$$

La introducción de la ecuación (2.5) en (2.4), permite desacoplarla en dos ecuaciones diferenciales parciales para los potenciales ϕ y $\underline{\psi}$.

$$\Delta\phi = \frac{1}{V_P^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$\Delta\underline{\psi} = \frac{1}{V_S^2} \frac{\partial^2 \underline{\psi}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Donde se definen la velocidad de propagación de ondas de compresión V_P y la velocidad de propagación de ondas de corte V_S :

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.9)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.10)$$

2.1.2. Ondas Planas Monocromáticas

Para el caso particular de ondas planas monocromáticas, la solución de las ecuaciones (2.7) y (2.8) se puede expresar en términos de los potenciales ϕ y $\underline{\psi}$ y la frecuencia ω de la onda.

$$\phi = A e^{\frac{i\omega}{V_P}(V_P t - \underline{l} \cdot \underline{x})} \quad (2.11)$$

$$\underline{\psi} = \underline{B} e^{\frac{i\omega}{V_S}(V_S t - \underline{l} \cdot \underline{x})} \quad (2.12)$$

Donde \underline{x} es la posición en el espacio de un punto material y \underline{l} es el vector director que define la dirección de propagación del frente de onda. En el caso de las ondas de compresión, el desplazamiento ocurre en la misma dirección de propagación, mientras que en las ondas de corte, el desplazamiento ocurre en una dirección perpendicular a la de propagación ($\underline{B} \wedge \underline{l}$), tal como se indica en la Figura 2.2.

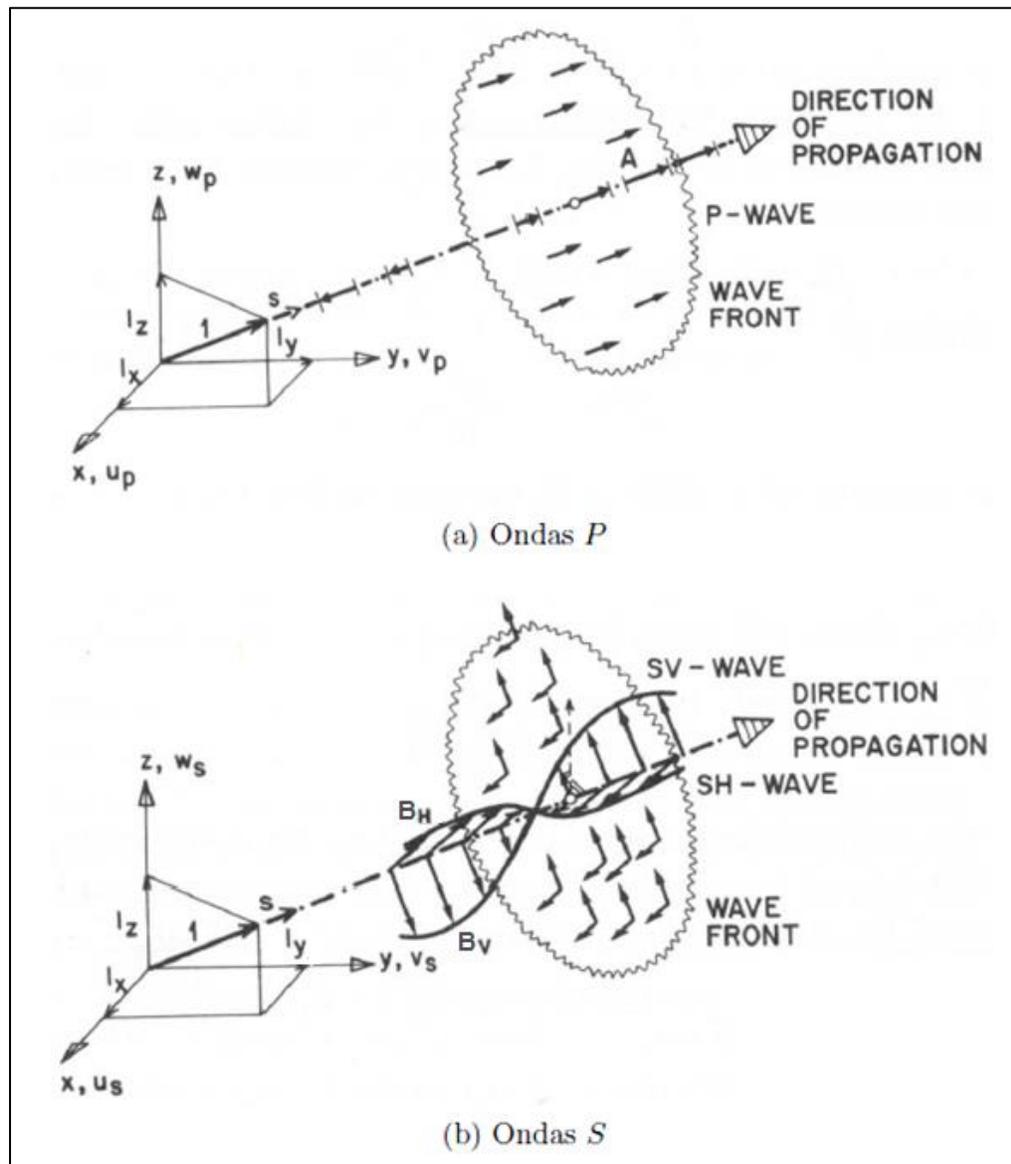


Figura 2.2: Desplazamientos asociados a las ondas de compresión y corte (Adaptado de Wolf, 1985)

2.2. Ondas Superficiales

2.2.1. Ondas de Rayleigh en semi-espacio homogéneo

En el caso de las ondas superficiales de Rayleigh o Love, una de las componentes del vector director \underline{l} es imaginaria. En el caso de las ondas de Rayleigh que se propagan en un semi-espacio homogéneo (Figura 2.3), se puede considerar una onda plana y monocromática que se propague únicamente en el plano x-z, y donde la componente l_z sea imaginaria, mientras que l_x sea igual a 1. Por ello, la solución descrita en (2.11) y (2.12) se puede expresar como:

$$\phi = A e^{az} e^{\left[\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)\right]} \quad (2.13)$$

$$\underline{\psi} = \underline{B} e^{bz} e^{\left[\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)\right]} \quad (2.14)$$

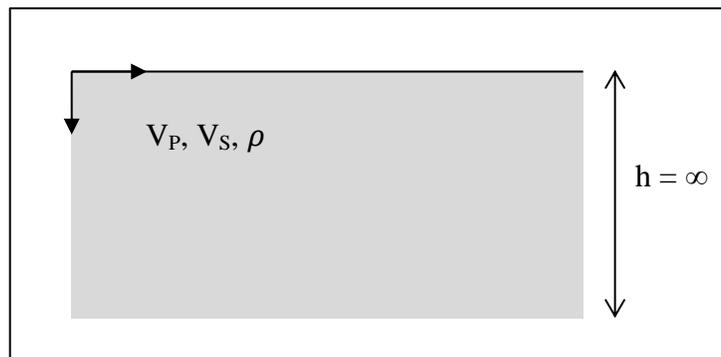


Figura 2.3: Semi-espacio elástico y homogéneo

Donde V_R corresponde a la velocidad de propagación de ondas superficiales de Rayleigh, mientras a y b son dos constantes que se definen como:

$$a^2 = \frac{\omega^2}{V_R^2} - \frac{\omega^2}{V_P^2} \quad (2.15)$$

$$b^2 = \frac{\omega^2}{V_R^2} - \frac{\omega^2}{V_S^2} \quad (2.16)$$

Por otro lado, en términos de desplazamientos, esta solución se puede expresar, a partir de la expresión (2.5), como:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi_y}{\partial z} = \left(\frac{i\omega}{V_R} A e^{az} - b B_y e^{bz} \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \\ u_y &= \frac{\partial \psi_x}{\partial z} - \frac{\partial \psi_z}{\partial x} = \left(b B_x - \frac{i\omega}{V_R} B_z \right) e^{bz + \frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \\ u_z &= \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi_y}{\partial x} = \left(a A e^{az} - \frac{i\omega}{V_R} B_y e^{bz} \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

La condición de borde libre, impone que los esfuerzos en la superficie sean nulos. Ya que τ_{yz} es nulo, y que el desplazamiento u_y es siempre cero, esta condición define las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{zz}|_{z=0} = \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} = A \left[(\lambda + 2\mu) a^2 - \frac{\omega^2}{V_R^2} \lambda \right] + 2i\mu \frac{\omega}{V_R} b B_2 = 0 \quad (2.18)$$

$$\tau_{xz}|_{z=0} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = 2iAa \frac{\omega}{V_R} - \left(b^2 + \frac{\omega^2}{V_R^2} \right) B_2 = 0 \quad (2.19)$$

La solución de las ecuaciones (2.18) y (2.19), se puede expresar en términos de las distintas variables elásticas que participan en estas ecuaciones. Achenbach (1973) propone la siguiente expresión:

$$\left[2 - \left(\frac{V_R}{V_S} \right)^2 \right]^2 - 4 \left[1 - \left(\frac{V_R}{V_P} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{V_R}{V_S} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (2.20)$$

En la expresión (2.20) no participa la frecuencia, por ello se puede concluir que V_R no tiene características dispersivas en un semi-espacio homogéneo elástico (Santamarina, 2001).

Aplicando las ecuaciones (2.18) y (2.19) en (2.17) se puede obtener la solución en términos de desplazamientos:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{i\omega}{V_R} A \left(e^{az} - \frac{2ab}{b^2 + \omega^2/V_R^2} e^{bz} \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \\ u_z &= aA \left(e^{az} - \frac{2\omega^2/V_R^2}{b^2 + \omega^2/V_R^2} e^{bz} \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

La razón entre desplazamientos horizontales y verticales originados por las ondas de Rayleigh en un semi-espacio elástico también es independiente de la frecuencia, y su valor va decayendo a medida que aumenta la profundidad, y prácticamente desaparece cuando se alcanza profundidades mayores a una longitud de onda, tal como se observa en la Figura 2.4.

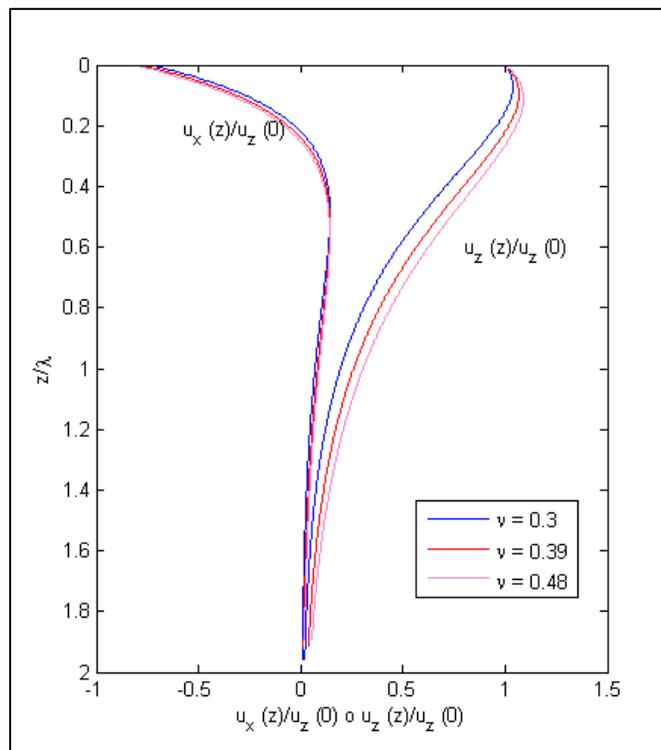


Figura 2.4: Desplazamiento horizontal y vertical en ondas de Rayleigh para distintos valores del módulo de Poisson (ν)

El término imaginario que aparece en el desplazamiento horizontal en la ecuación (2.21) implica que hay un desfase de 90° siempre entre el desplazamiento vertical y horizontal, por ello, las ondas superficiales de Rayleigh siguen una trayectoria elíptica retrógrada.

2.2.2. Propagación de ondas de Rayleigh en un medio estratificado

Manteniendo la misma cinemática para los desplazamientos y seleccionando la misma referencia, la propagación de una onda de Rayleigh en un semi-espacio elástico y estratificado, como el indicado en la Figura 2.5, se puede expresar como:

$$u_x = r_1(V_R, z, \omega)e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)}$$

$$u_y = 0$$

$$(2.22)$$

$$u_z = r_2(V_R, z, \omega)e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)}$$

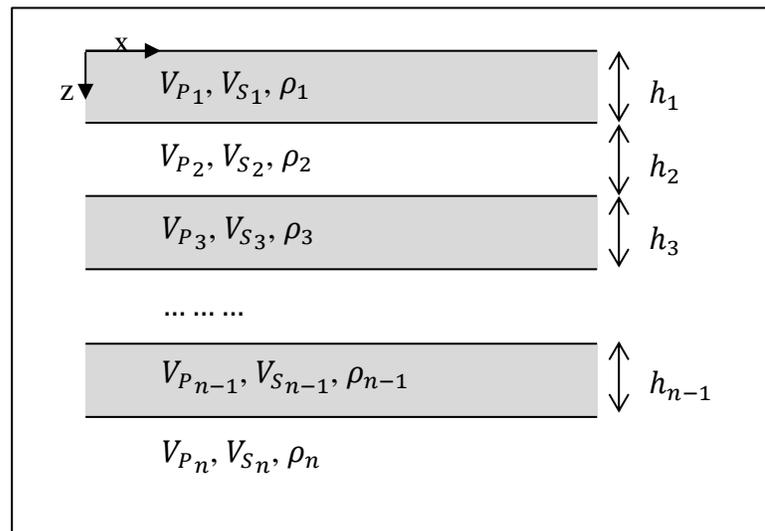


Figura 2.5: Semi-espacio elástico y estratificado horizontalmente

Donde r_1 y r_2 son números complejos que corresponden a las amplitudes de los desplazamientos y que incluyen el desfase entre ambas componentes (Wathelet, 2005). Por otro lado, las tensiones no nulas asociadas a estos desplazamientos corresponden a:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= i \left(\lambda \frac{\partial r_2}{\partial z} + \frac{\omega}{V_R} (\lambda + 2\mu) r_1 \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \\
 \sigma_{xx} &= i \left(\lambda \frac{\partial r_2}{\partial z} + \lambda \frac{\omega}{V_R} r_1 \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \\
 \sigma_{zz} &= i \left((\lambda + 2\mu) \frac{\partial r_2}{\partial z} + \lambda \frac{\omega}{V_R} r_1 \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)} \\
 \tau_{zx} &= \mu(z) \left(\frac{\partial r_1}{\partial z} + \frac{\omega}{V_R} r_2 \right) e^{\frac{i\omega}{V_R}(x-V_R t)}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Además, si se definen:

$$\begin{aligned}
 r_3 &= \left((\lambda + 2\mu) \frac{\partial r_2}{\partial z} + \lambda \frac{\omega}{V_R} r_1 \right) \\
 r_4 &= \mu(z) \left(\frac{\partial r_1}{\partial z} + \frac{\omega}{V_R} r_2 \right)
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Considerando el vector $[r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4]^T$, se puede plantear el siguiente sistema diferencial equivalente:

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -ik & 0 & \frac{1}{\mu(z)} \\ \frac{-i\lambda(z)}{\lambda(z) + 2\mu(z)} & 0 & \frac{1}{\lambda(z) + 2\mu(z)} & 0 \\ 0 & -\omega^2 \rho & 0 & -ik \\ \frac{4k^2 \mu(z)(\lambda(z) + \mu(z))}{\lambda(z) + 2\mu(z)} & 0 & \frac{-i\lambda(z)k}{\lambda(z) + \mu(z)} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} = 0 \tag{2.25}$$

Donde k corresponde al número de onda del frente de ondas superficiales. Las condiciones de borde son que las amplitudes deben ser nulas para grandes profundidades (2.26), y que las tensiones deben ser nulas en la superficie libre (2.27).

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} r_1 = 0 \qquad \lim_{z \rightarrow -\infty} r_2 = 0 \qquad (2.26)$$

$$r_3(z = 0) = 0 \qquad r_4(z = 0) = 0 \qquad (2.27)$$

Existen diferentes técnicas que permiten la resolución de éste sistema, entre las que se encuentran métodos basados en integración numérica, diferencias finitas, elementos finitos, elementos de borde o elementos espectrales (Socco y Strobbia, 2004). El método más utilizado es el método de la matriz de propagación (Gilbert y Backus, 1966). El método de la matriz de transferencia (Thompson, 1950; Haskell, 1953) es un caso especial del método de la matriz de propagación, aplicado a un semi-espacio estratificado con capas horizontales y homogéneas, que corresponde al caso de la implementación usada en esta investigación. Existen otras soluciones como el método de coeficientes de reflexión y transmisión (Kennet, 1974) o el método de matriz de rigidez dinámica (Kausel y Roesset, 1981).

Para una frecuencia dada, la ecuación (2.25) tiene múltiples soluciones no triviales para distintos valores del número de onda k , los cuales corresponden a los valores propios del sistema planteado. Entonces el problema puede ser resuelto en su forma implícita (Socco y Strobbia, 2004):

$$F_R(\lambda(z), \mu(z), \rho(z), k, \omega) = 0 \qquad (2.28)$$

Cada una de estas múltiples soluciones está asociada a los distintos modos de vibración de Rayleigh del suelo (Figura 2.6b). A su vez, los valores de k para los cuales existe solución no trivial, evaluados para un rango de frecuencias dado, definen las curvas de dispersión en sus distintos modos de vibración (Figura 2.6a), lo que muestra la dependencia de la velocidad de propagación de ondas superficiales de Rayleigh (velocidad de fase) con la frecuencia.

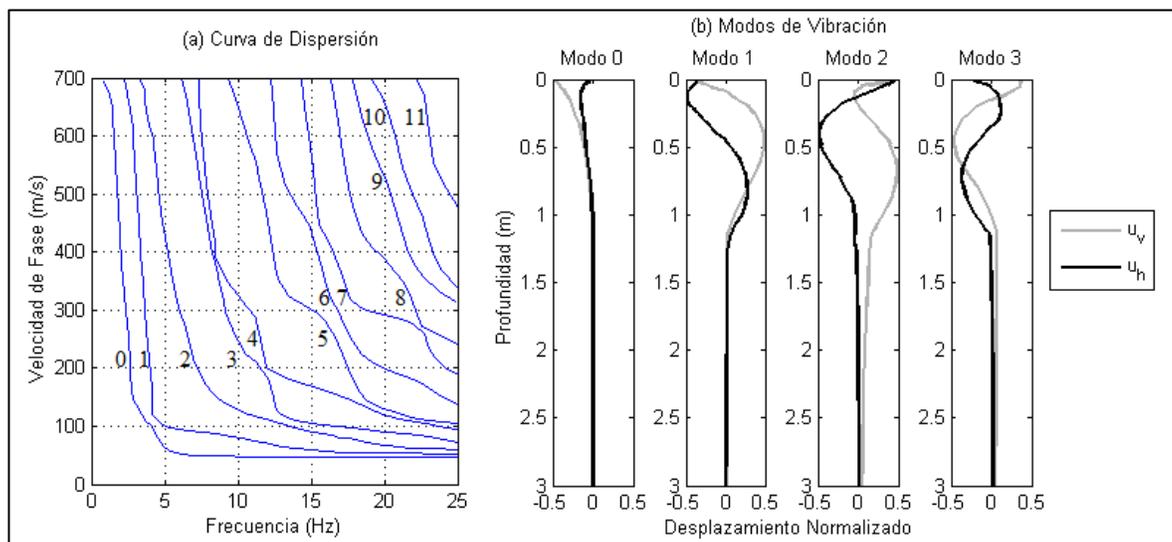


Figura 2.6: Curvas de dispersión en sus distintos modos obtenidas para un modelo de cuatro capas ($h_1 = 5$ m, $V_{s,1} = 50$ m/s, $h_2 = 10$ m, $V_{s,2} = 200$ m/s, $h_3 = 20$ m, $V_{s,3} = 500$ m/s, $h_4 = \infty$, $V_{s,4} = 800$ m/s), y desplazamientos verticales (u_v) y horizontales (u_h) obtenidos para los primeros cuatro modos de vibración a 15 Hz (Adaptado de Lai, 2005)

Los métodos geofísicos explorados en este trabajo, exploran esta característica de dispersión para caracterizar un sitio, ya que las formas de estas curvas definen unívocamente una estratigrafía horizontal.

2.3. Métodos Geofísicos para la Caracterización Geotécnica de Suelos

Las propiedades elásticas de los materiales que componen el subsuelo y sus efectos en la propagación de ondas sísmicas son fundamentales para la caracterización geotécnica de un sitio (Xia et al., 1999). Dentro de estas propiedades, uno de los parámetros clave es el perfil de velocidades de ondas de corte, dado que permite la evaluación primaria de la respuesta dinámica de un sitio (Tokimatsu, 1997).

Dado que el interés está en obtener las propiedades para bajas deformaciones (rango elástico), los métodos sísmicos basados en la propagación de ondas sísmicas son apropiados para la caracterización dinámica de suelos (Foti, 2000).

Existen métodos que permiten determinar estas propiedades directamente, los cuales pueden ser de carácter invasivo o no-invasivo. Los primeros requieren de una o varias perforaciones (métodos *in-hole*) en el sitio estudiado, los cuales, en muchas ocasiones, no se pueden llevar a cabo, debido a problemas de costo o espacio. Otros métodos, como la refracción sísmica, se realizan en la superficie, pero requieren establecer muchos supuestos, que pueden alejarse de la realidad, y no permiten explorar intercalaciones de suelos blandos bajo suelos rígidos.

Por otro lado, se encuentran los métodos basados en el registro de ondas superficiales, los cuales agregan un grado de incertidumbre al no determinar directamente las propiedades elásticas buscadas, pero permiten explorar el suelo a grandes profundidades, siendo más eficientes en costo y tiempo.

2.3.1. Métodos directos para medir Velocidades de ondas de corte

2.3.1.1. Métodos *in-hole*

Los métodos *in-hole* requieren de una perforación para la ubicación de fuentes y/o receptores de las ondas sísmicas, y son utilizados para la determinación de perfiles de velocidades de ondas de corte o compresión, dependiendo de las ondas generadas por la fuente. Para evitar el derrumbe del terreno, la perforación debe ser frecuentemente entubada, donde el espacio entre el tubo y el suelo que lo rodea debe ser rellenado con una inyección de lechada de densidad similar a la del suelo (ASTM D4428), con el objeto de lograr un buen acople entre ambas superficies (Semblat y Pecker, 2009) y poder aplicar ondas de corte en el caso de los ensayos *cross-hole* (Miller et al., 2008). Además, se deben medir eventuales inclinaciones de la perforación, con el objeto de medir las distancias

reales entre fuente-receptor o receptor-receptor (Miller et al., 2008). Estas operaciones suelen ser costosas tanto en tiempo como en dinero.

2.3.1.1.1. Down Hole

Para este ensayo, la fuente se coloca en la superficie, mientras que el(los) receptor(es) en la pared de la perforación. El ensayo se puede realizar con un sólo receptor que va descendiendo para obtener la velocidad de corte a distintas profundidades, o con un arreglo de receptores distribuidos a lo largo de la perforación que graban la señal emitida por la fuente de manera simultánea (Semblat y Pecker, 2009). Esta última variante es más precisa, debido a que las señales registradas en los receptores son originadas por la misma fuente.

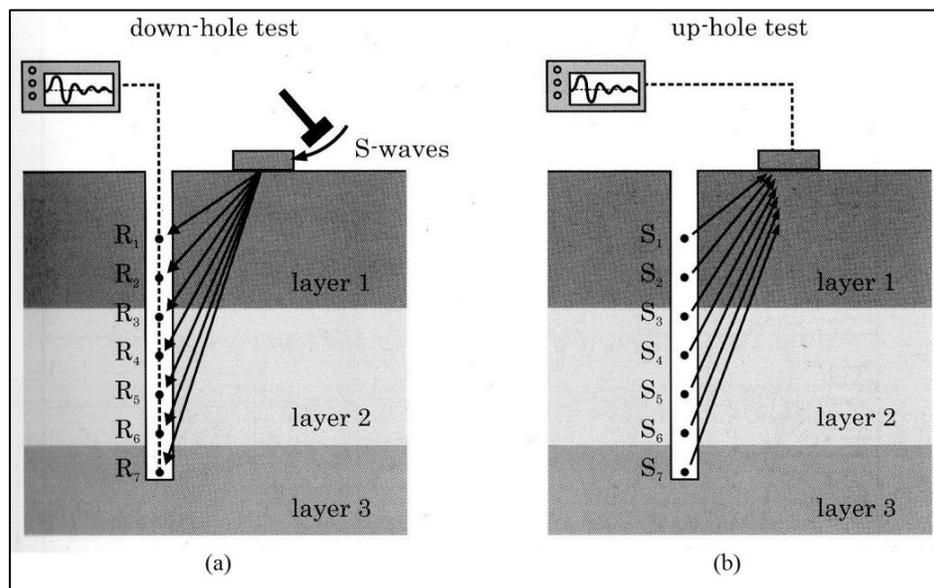


Figura 2.7: Esquema de los ensayos *down-hole* y *up-hole* (Semblat y Pecker, 2009)

Para generar ondas de corte, se debe golpear horizontalmente una placa rígida y fija en la superficie, tal como se observa en la Figura 2.7a. De acuerdo a lo planteado en la norma ASTM7400-08, el golpe debe poder ser aplicado en sentidos opuestos, en lo posible con la misma energía, de tal forma, que se pueda reconocer el instante en que llega la onda de corte mediante la polarización o desfase de las señales registradas. Además, la norma recomienda ubicar la placa a 1 a 3 metros desde la perforación, con el objeto de que las ondas se propaguen principalmente en la dirección vertical. Dado que la principal componente de propagación de las ondas es vertical, el perfil de velocidades de ondas de corte se puede determinar directamente de las señales registradas, tal como se observa en la Figura 2.8.

Existe un método alternativo llamado *up-hole* en el cual se golpea en la perforación a distintas profundidades y se registra la señal con un sólo receptor ubicado en superficie, tal como se observa en la Figura 2.7b.

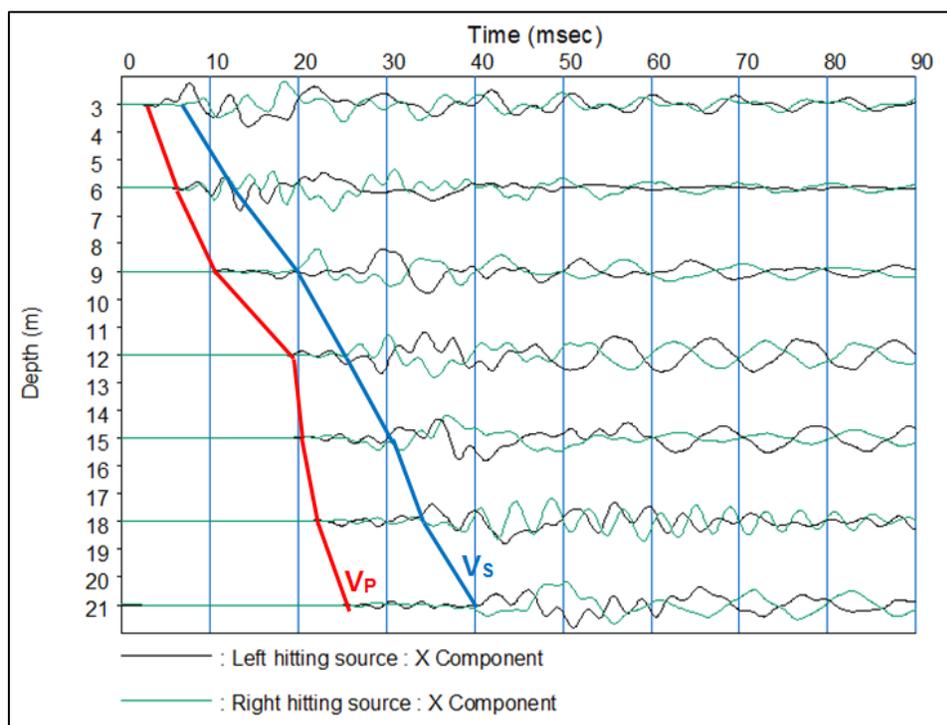


Figura 2.8: Señales registradas en un ensayo *down-hole*

2.3.1.1.2. Cross-Hole

Este ensayo requiere de dos perforaciones, o bien, más de dos perforaciones alineadas. En una de ellas se ubica la fuente, y en las restantes los receptores, tal como se indica en la Figura 2.9. De acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D4428, la primera medición se debe hacer a una profundidad que no supere los 1.5 metros, luego la fuente se debe descender para realizar mediciones a intervalos no mayores a 1,5 metros, hasta la profundidad para la que se desea explorar.

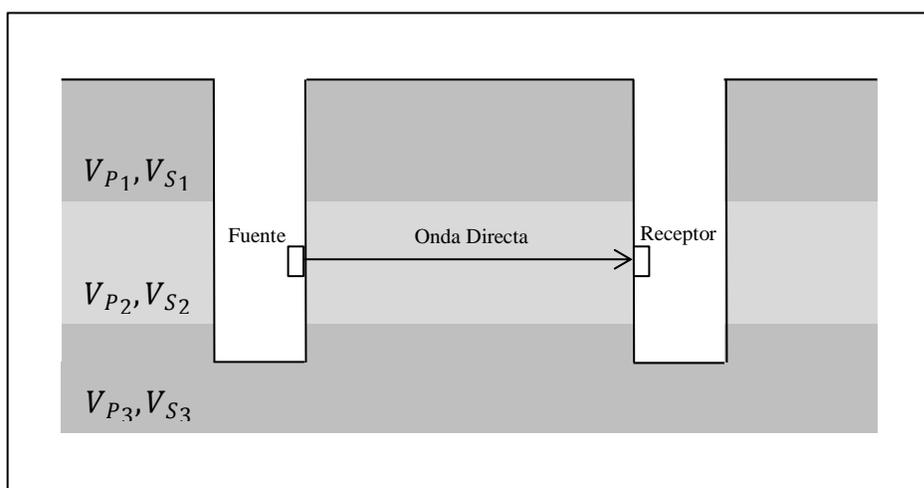


Figura 2.9: Esquema del ensayo *cross-hole*

Al igual que en el ensayo *down-hole*, se deben realizar golpes en sentidos opuestos, para diferenciar las ondas de corte de las ondas de compresión. Por ello, se golpea una pieza rígida y fija en la pared de la perforación hacia abajo y hacia arriba, para observar la polarización o desfase de las señales registradas, en lo posible con la misma energía.

Para este ensayo se utilizan receptores triaxiales que permitan registrar las componentes horizontales y verticales del desplazamiento. Debido a que el golpe es aplicado en la dirección vertical, la componente horizontal del desplazamiento registrado permitirá determinar las velocidades de ondas de compresión, mientras que la componente vertical, las velocidades de ondas de corte, tal como se observa en la Figura 2.10.

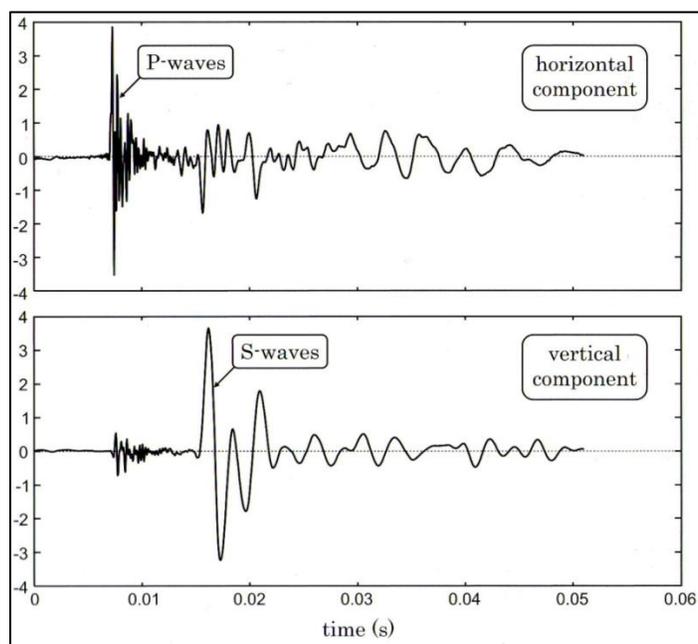


Figura 2.10: Señales registradas en un ensayo *cross-hole* en las direcciones vertical y horizontal (Semblat y Pecker, 2009)

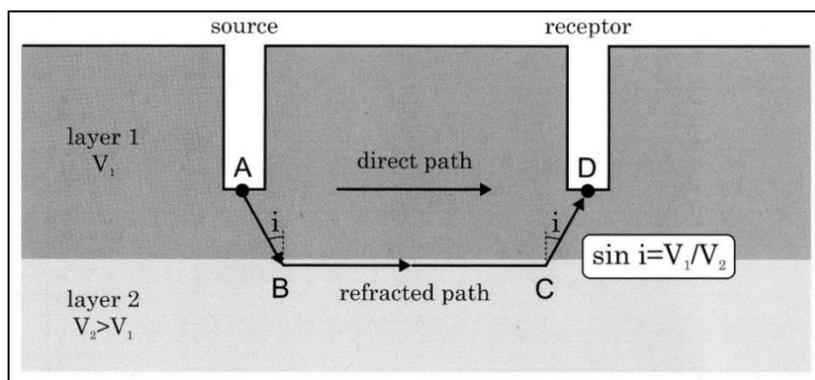


Figura 2.11: Ocurrencia de refracción en un ensayo *cross-hole* (Semblat y Pecker, 2009)

En general, se recomienda la realización de ensayos *cross-hole* con más de un pozo alineados de receptores (norma ASTM D4428), debido a que permite determinar el tiempo inicial a partir de las señales registradas, además de detectar la ocurrencia de refracción en caso de presencia de capas de suelo más rígidas cercanas a la fuente. Esto es muy

importante, debido a que existe la posibilidad de que sea la onda refractada la que llegue antes al receptor en lugar de la onda directa, tal como se indica en la Figura 2.11.

El ensayo *cross-hole*, es el método más preciso, debido a que permite determinar las características mecánicas del suelo directamente en un plano horizontal, y no a lo largo de un pozo (Semblat y Pecker, 2009). Sin embargo, para generar ondas de corte se requieren mecanismos costosos y en muchos casos de gran complejidad, lo que sumado al costo de los pozos, hace necesario evaluar cuidadosamente el uso de este ensayo.

2.3.1.2. Refracción Sísmica

En este ensayo se calculan los tiempos de propagación de ondas de volumen o de corte generadas en superficie a distintos receptores alineados con la fuente. En el caso de un ensayo de refracción para ondas de corte, éstas se generan golpeando una placa rígida y fija en la superficie, en sentidos opuestos, para que se pueda observar la polarización de las ondas, y así reconocer el tiempo de llegada a cada receptor.

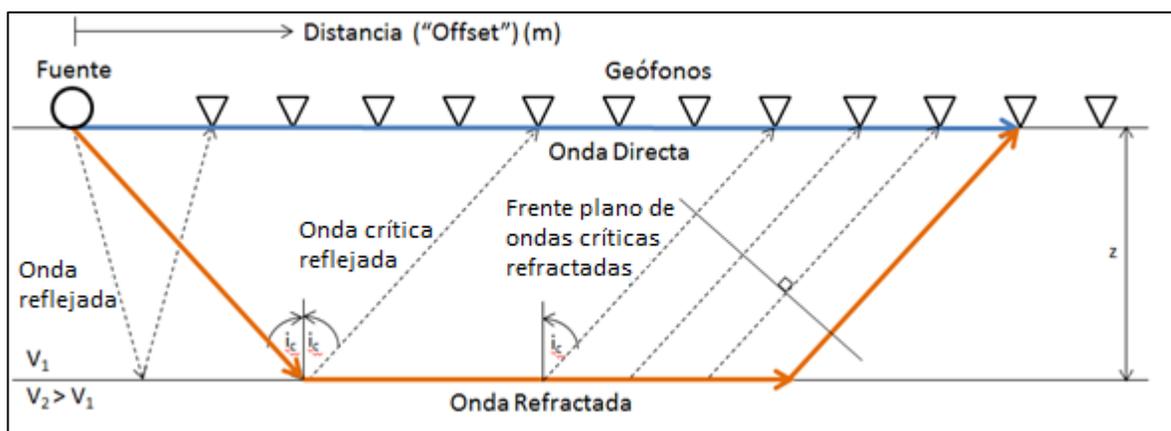


Figura 2.12: Esquema del ensayo de refracción sísmica

En los receptores más cercanos a la fuente, la primera llegada corresponde a la onda directa, mientras que para receptores más lejanos, la onda refractada podría llegar antes, siempre y cuando $V_2 > V_1$ (Figura 2.12). De esta forma se puede construir un gráfico de tiempo para la primera llegada para cada distancia a la que se ubican los receptores, donde las pendientes observadas estarán dadas por las velocidades de cada capa, mientras que el tiempo en que se producen los cambios de pendiente, determinan los espesores de cada una de ellas (Figura 2.13). Este procedimiento, permite obtener modelos con estratos de suelos planos. Para incluir la inclinación de las capas de suelos como incógnitas del modelo, se debe generar ondas sísmicas a ambos lados del arreglo lineal de receptores. Situaciones más generales, incluyendo los desniveles de la superficie, pueden ser obtenidos mediante una inversión de tipo tomográfica.

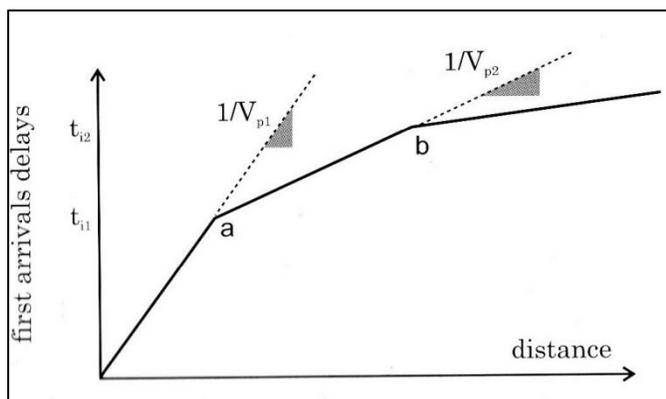


Figura 2.13: Gráfico de los tiempos de la primera llegada para cada distancia (Semblat y Pecker, 2009)

2.3.2. Métodos basados en el análisis de la dispersión de Ondas Superficiales

En un semi-espacio homogéneo la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas de Rayleigh será la misma siempre, mientras que en un medio estratificado la velocidad de fase es dependiente de la frecuencia o longitud de onda (Figura 2.14). Esta propiedad se conoce como dispersión, mientras que el gráfico que muestra la variación de

la velocidad de fase con la frecuencia para los distintos modos de propagación, se conoce como curva de dispersión (Tokimatsu, 1997).

Los métodos geofísicos basados en el análisis de ondas superficiales, recurren a esta característica dispersiva para caracterizar los suelos (Tokimatsu, 1997), ya que ésta dependerá de su estratigrafía, y en particular, del perfil de velocidades de ondas de corte. Dado que las ondas de Rayleigh movilizan al suelo hasta una profundidad dependiente de su longitud de onda (Figura 2.14), cuando la longitud de onda es pequeña, la velocidad de fase dependerá de las propiedades de la(s) capa(s) superficial(es), mientras que si la longitud de onda es mayor, la velocidad dependerá en mayor medida de estratos más profundos (Strobbia, 2003).

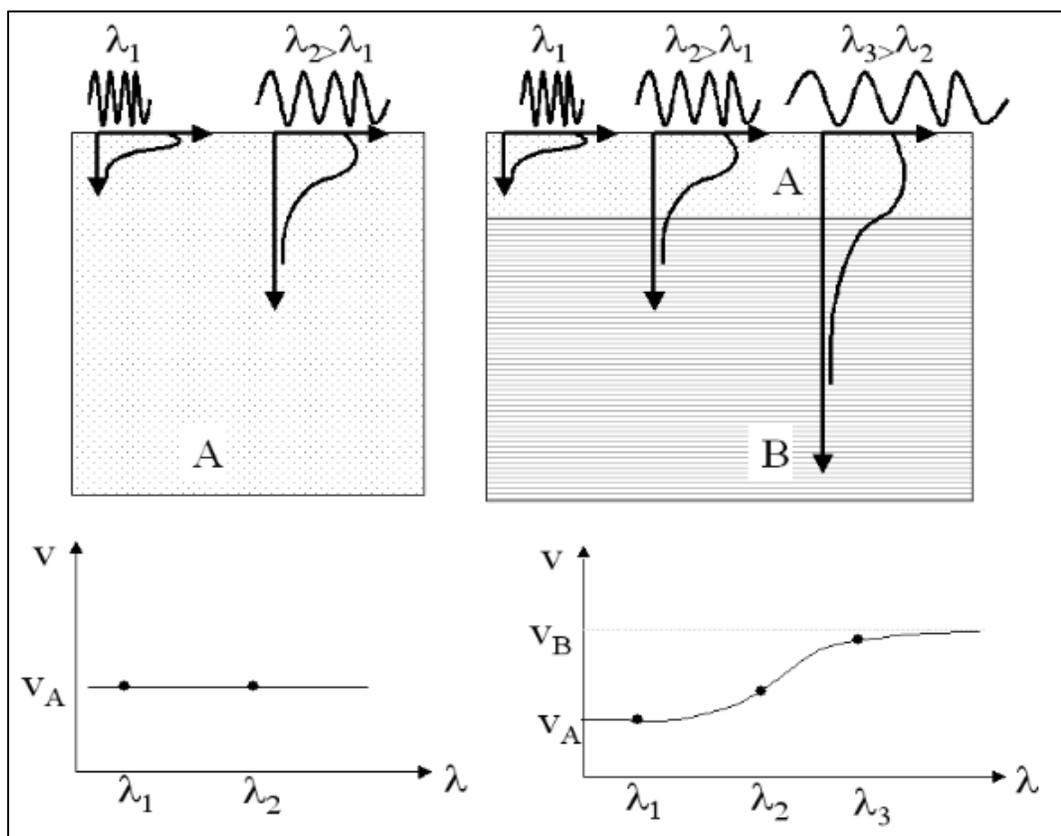


Figura 2.14: Velocidad de fase para distintas longitudes de ondas (λ_i) en un semi-espacio homogéneo (izquierda) y en un medio estratificado (derecha) (Strobbia, 2003)

De acuerdo a lo planteado por diversos autores, como Tokimatsu (1997) y Foti (2000), el procedimiento para la caracterización geotécnica, basado en el análisis de la dispersión de ondas superficiales se puede resumir en:

- (a) Observación y registro de ondas superficiales.
- (b) Determinación de sus características dispersivas.
- (c) Estimación del perfil de ondas de corte, basado en un proceso de inversión de las características dispersivas del sitio.

Las principales ventajas de estos métodos son: su bajo costo, su carácter no invasivo, y la posibilidad de detectar capas de suelos más blandos bajo capas más rígidas.

2.3.2.1. Métodos Activos

En los métodos activos, las ondas superficiales registradas son provocadas por una fuente dinámica que genera una perturbación en superficie y registradas por geófonos alineados con la fuente. Esta perturbación puede ser generada con un mazo o martillo, dejando caer un peso al terreno o utilizando mecanismos más sofisticados que permitan un mayor control sobre las perturbaciones generadas, y por ende, sobre el rango de frecuencias y amplitud de las ondas (e.g. Stokoe et al., 2004).

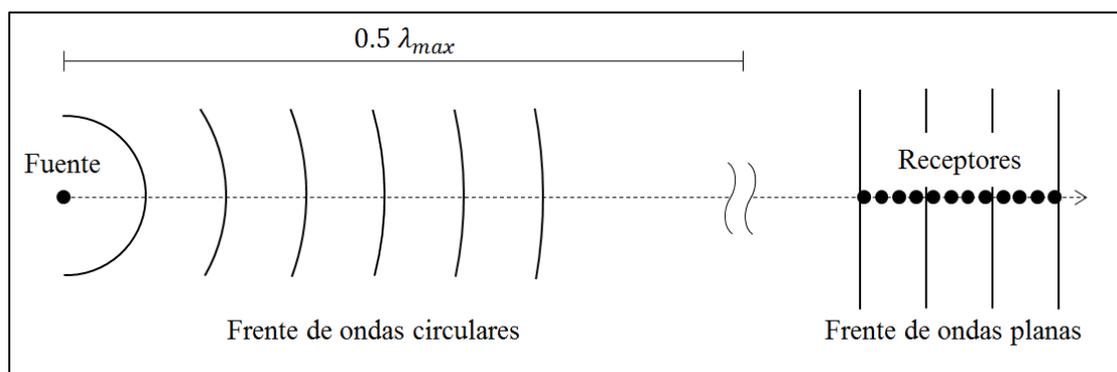


Figura 2.15: Frentes de ondas generados por una fuente activa

Estos métodos se basan en la propagación de frentes de ondas planos, sin embargo, en las cercanías de la fuente este supuesto no se cumple. Park et al. (1999) plantea que los frentes de ondas pueden considerarse planos, sólo cuando ya se hayan propagado una cierta distancia (x_1) y que debe ser más grande que la mitad de la máxima longitud de onda que se desea registrar (λ_{max}) tal como se ilustra en la Figura 2.15.

$$x_1 \geq 0.5 \lambda_{max} \quad (2.29)$$

Las componentes de alta frecuencia de las ondas superficiales se atenúan rápidamente con la distancia recorrida desde la fuente (Bullen, 1963). Por ello, si la fuente está muy alejada de los receptores, es probable que se produzca una interferencia entre ondas de Rayleigh atenuadas de baja velocidad, y ondas de cuerpo de alta velocidad (Park et al., 1999). Esto limita la máxima frecuencia que se puede medir, y con ello impone una longitud de onda mínima (λ_{min}), que restringe el espesor de la capa de suelo superior (H_1) del modelo que se busca generar (Stokoe et al., 1994).

$$H_1 \geq 0.5 \lambda_{min} \quad (2.30)$$

Además, debido a la atenuación, es necesario normalizar las señales registradas en los receptores para reducir el efecto de procesar grandes amplitudes en las cercanías de la fuente (Wathelet, 2013). Suponiendo que el espacio es perfectamente homogéneo, la atenuación geométrica se puede representar dividiendo por la raíz cuadrada de la distancia desde la fuente a cada receptor (Foti, 2001). De acuerdo a autores como Park et al. (1999), para incorporar el efecto de la atenuación y la divergencia esférica en medios estratificados, las señales deben ser normalizadas en función de la máxima amplitud registrada en cada receptor.

2.3.2.2. Métodos Pasivos

Los métodos pasivos se basan en la medición de vibraciones ambientales. Las vibraciones con una frecuencia superior a 1 Hz tienen su origen en la actividad humana

(tráfico, maquinaria, etc.) y se conocen como microtemblores (Bonney-Claudet et al., 2008). Por otro lado, las vibraciones de menor frecuencia, están asociadas a una fuente natural, como el oleaje, ciclones o corrientes de viento (Asten y Hendrige, 1984) y son conocidas como microsismos. El supuesto fundamental de los métodos pasivos es considerar las vibraciones ambientales como una superposición de ondas superficiales que se propagan con una distribución aleatoria uniformemente distribuida en todas las direcciones (Tokimatsu, 1997).

En general, para registrar las vibraciones ambientales se utilizan arreglos bidimensionales de geófonos, ya que no se conoce a priori la dirección de propagación predominante de los distintos frentes de ondas (Asten y Hendrige, 1984). Sin embargo, diversos autores (Chávez García et al., 2006; Park y Miller, 2008), han propuesto métodos que permiten analizar ensayos pasivos con arreglos lineales de geófonos, los cuales entregan resultados satisfactorios para la gran mayoría de los casos.

Ya que no debiera existir una dirección predominante para la propagación de los frentes de onda, el arreglo debe ser idéntico para todos los ángulos de incidencia del frente de ondas (Asten y Henstridge, 1984). Esto hace que los arreglos circulares sean, probablemente, los más apropiados para este método (Wathelet, 2005).

En general, gracias al tipo de fuente, los métodos pasivos permiten obtener información para rangos de frecuencias menores que los ensayos activos. Esto permite caracterizar el suelo para profundidades mucho mayores (Tokimatsu, 1997, Socco y Strobba, 2004). De esta forma, ambos métodos se complementan muy bien, ya que amplían el rango de frecuencias para el que se obtiene información (Wathelet, 2005).

2.4. Enfoques para la determinación de las propiedades dispersivas

Existen distintos enfoques para la determinación de características dispersivas de un sitio, en función del tipo de fuente (activa o pasiva) y el número de receptores utilizados. Los métodos conocidos como Steady State Rayleigh Wave (Jones, 1958) y

Análisis Espectral de Ondas Superficiales o SASW (Nazarian y Stokoe, 1984), permiten el análisis de ensayos realizados con una fuente activa alineada con dos receptores.

La ejecución de ensayos con múltiples receptores permite reducir el número de golpes y mediciones que se deben realizar en los ensayos activos, optimizando los tiempos de trabajo. Además, permiten diferenciar las ondas de Rayleigh de otros tipos de ondas sísmicas que viajan en superficie (Park et al., 1998). Estos métodos permiten un análisis simultáneo de los registros en distintos receptores, a través de la transformación de los datos del dominio del tiempo y el espacio, a un dominio diferente que permita reconocer *peaks*, y por ende, las características dispersivas del sitio estudiado sean reconocibles con facilidad (Foti, 2001). Entre los enfoques más utilizados para este propósito se encuentran: el análisis frecuencia-número de onda o f-k (Lacoss et al. 1969, Kværna y Ringdahl 1986), el análisis en el dominio de la frecuencia y lentitud o p-f (McMechan y Yedlin, 1981), y la transformada propuesta por Park et al. (1998), conocida comúnmente como MASW.

A través del uso de arreglos bidimensionales de geófonos, es posible utilizar las vibraciones ambientales para la determinación de las características dispersivas de un sitio. Los análisis f-k y MASW también pueden ser utilizados para el análisis de ensayos pasivos. A ellos se deben sumar otros métodos como: el método de autocorrelación espacial (Aki, 1957) y el análisis f-k de alta resolución (Capon, 1969).

Por último, investigaciones en las últimas décadas han demostrado que es posible la realización de ensayos con fuente pasiva utilizando arreglos de geófonos lineales. La gran ventaja es que su implementación en terreno es más sencilla, además de ser muy práctico, especialmente en zonas urbanas. Dentro de estos métodos, se encuentran la refracción de microtemblores o ReMi (Louie, 2001) y una variante del método MASW, conocida como Roadside MASW (Park y Miller, 2008). Además, de acuerdo a las investigaciones de Chávez-García et al. (2005, 2006) es posible utilizar el método SPAC sobre arreglos lineales.

A continuación, se describen en mayor detalle los métodos utilizados en esta investigación.

2.4.1. Análisis Espectral de Ondas Superficiales

El Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW) es realizado utilizando dos receptores alineados con una fuente activa. Generalmente la distancia entre la fuente y el primer receptor, es igual a la distancia entre ambos receptores (Sanchez-Saliner, 1987). Al ejecutar el ensayo para una sola posición de los receptores y fuente, se puede calcular la curva de dispersión para un rango acotado de frecuencias, por ello, se debe modificar la posición de los receptores y/o la fuente a lo largo del ensayo, para obtener la curva de dispersión para distintos rangos de frecuencias. En la Figura 2.16 se indican configuraciones típicas para el método SASW, y la variación de las posiciones de los receptores y/o fuente a lo largo del ensayo.

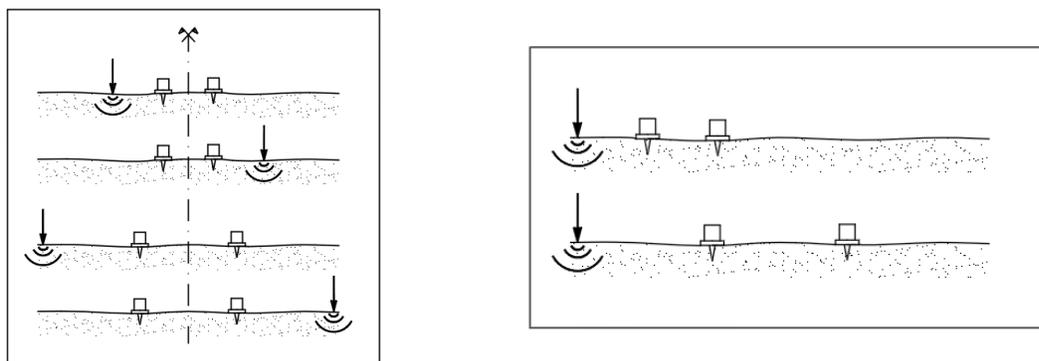


Figura 2.16: Configuraciones típicas del método SASW (Foti, 2000)

La transformada de Fourier de las señales registradas en cada receptor $u(x, t)$, se pueden expresar como:

$$U(x, \omega) = |U(x, \omega)|e^{i(\phi(\omega)+k(\omega)x)} \quad (2.31)$$

A partir de ello, se calcula la densidad espectral cruzada, que corresponde a una estimación de la correlación en el espacio de la frecuencia entre dos puntos por los cuales pasa la misma onda (Nazarian y Desai, 1993; Ochoa, 2007), y se expresa como:

$$\begin{aligned}
 U_{12}(\omega) &= \overline{U(x_1, \omega)} U(x_2, \omega) \\
 U_{12}(\omega) &= |U(x_1, \omega)| |U(x_2, \omega)| e^{-i(\phi(\omega)+k(\omega)x_1)} e^{i(\phi(\omega)+k(\omega)x_2)} \\
 U_{12}(\omega) &= |U(x_1, \omega)| |U(x_2, \omega)| e^{ik(\omega)(x_2-x_1)}
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Donde x_1 y x_2 son las posiciones de cada uno de los receptores. Para cada frecuencia ω se calcula el desfase (*phase shift*):

$$\theta_{12}(\omega) = \arg(U_{12}(\omega)) = k(\omega)(x_2 - x_1) \tag{2.33}$$

Finalmente, la velocidad de fase $c(\omega)$ puede ser calculada, utilizando la expresión:

$$c(\omega) = \frac{\omega(x_2 - x_1)}{\theta_{12}(\omega)} \tag{2.34}$$

Si bien, el análisis es sencillo, existen algunas complejidades prácticas en la resolución de la ecuación (2.33) por la naturaleza periódica del problema. Aunque existen técnicas para prevenir errores, siempre existe algún nivel de arbitrariedad en la resolución.

2.4.2. Análisis frecuencia-número de onda (f-k)

El supuesto fundamental del análisis f-k es que el arreglo de receptores es atravesado por un frente de onda plano (Lacoss et al. 1969, Kværna y Ringdahl 1986) de frecuencia, velocidad y dirección de propagación conocidas. Una de las grandes ventajas de este método es que puede ser aplicado tanto a ensayos activos como a ensayos pasivos (Tokimatsu, 1997).

2.4.2.1. Enfoque del análisis f-k en ensayos pasivos

Las señales registradas en cada geófono están conformadas por la contribución del frente de onda plano que atraviesa el arreglo y por otras señales ambientales (“ruido” para

efectos del análisis). De esta forma, el movimiento vertical registrado en cada receptor en el tiempo producto del frente de onda se puede expresar como:

$$u_i(t) = v\left(t - \underline{r_i} \underline{s_{hor}}\right) + n_i(t) \quad (2.35)$$

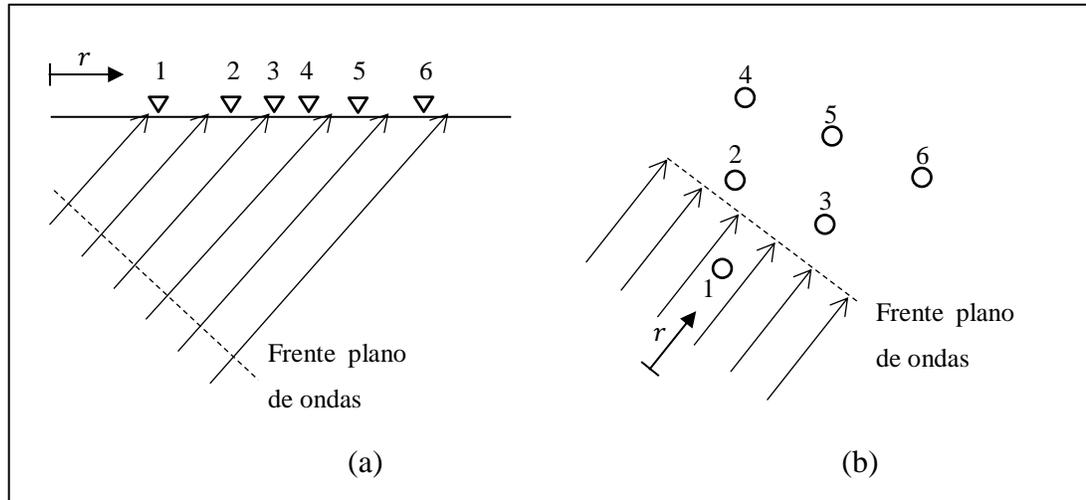


Figura 2.17: Arreglo de geófonos atravesado por un frente plano de ondas: (a) plano vertical, (b) plano horizontal

Donde v corresponde al movimiento vertical producto del frente de onda analizado, $\underline{r_i}$ la posición del receptor i , $\underline{s_{hor}}$ la lentitud¹ horizontal entre la fuente y el receptor y n_i el ruido o señales aleatorias que se registran debido a frentes de ondas diferentes. Las señales son retardadas de acuerdo a la geometría, para que los tiempos de llegada del frente de onda en cada receptor tengan una referencia común y así puedan ser combinadas. Las señales retardadas se pueden expresar como:

$$\tilde{u}_i(t) = u_i\left(t + \underline{r_i} \underline{s_{hor}}\right) = v(t) + n_i(t + \underline{r_i} \underline{s_{hor}}) \quad (2.36)$$

Por otro lado, la respuesta del arreglo o *beam* corresponde a la suma de las señales retardadas de los N receptores utilizados.

¹ Corresponde al recíproco de la velocidad de fase. Se utiliza este parámetro en lugar de la velocidad, ya que el problema estudiado pasa a ser lineal.

$$b(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{u}_i(t) = v(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(t + \underline{r}_i \underline{s}_{hor}) \quad (2.37)$$

Si las señales registradas efectivamente tienen el número de ondas supuesto a través de la lentitud horizontal, las contribuciones de cada receptor serán constructivas, y por ende, la respuesta del arreglo será de máxima energía (Shabani et al., 2008). La energía de la respuesta del arreglo se puede calcular como:

$$E(b) = \sum_{j=1}^N |b(j\Delta t)|^2 \quad (2.38)$$

Dado que resulta más eficiente trabajar en el dominio de la frecuencia, el movimiento vertical retardado en un tiempo t_0 se expresa en frecuencias como:

$$u(t - t_0) \leftrightarrow U(\omega)e^{i\omega t_0} \quad (2.39)$$

Donde $U(\omega)$ corresponde a la transformada de Fourier de $u(t)$. A partir de esta ecuación, se puede calcular la respuesta del arreglo en el dominio de la frecuencia $B(\omega)$ y su energía asociada $E(\omega)$, al ser atravesado por un frente plano de ondas de lentitud \underline{s}_o (o número de onda \underline{k}_o) y frecuencia ω .

$$B(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{U}_j(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U_j(\omega) e^{i\omega r_j(\underline{s} - \underline{s}_o)} \quad (2.40)$$

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} |B(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |U_j(\omega)|^2 \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\omega r_j(\underline{s} - \underline{s}_o)} \right|^2 d\underline{s}_o \omega \quad (2.41)$$

El segundo término de la ecuación (2.41) se conoce como la función de respuesta del arreglo $A(\underline{s} - \underline{s}_o, \omega)$ y depende únicamente de la disposición de geófonos y de la dirección de incidencia del frente de ondas. La función de respuesta del arreglo se puede expresar tanto en términos de lentitud como de número de onda:

$$A(\underline{s} - \underline{s}_o, \omega) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\omega r_j(\underline{s} - \underline{s}_o)} \quad (2.42)$$

$$A(\underline{k} - \underline{k}_o) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{ir_j(\underline{k} - \underline{k}_o)}$$

El análisis en el dominio f-k permite construir un espectro de energía asociado a las respuestas del arreglo estudiado (*b*), y reconocer en él valores *peaks* que definen la curva de dispersión del terreno estudiado para cada combinación de frecuencia ω y de lentitud s_o o velocidad de fase c (Foti, 2001).

En la Figura 2.18 se observa un ejemplo de la aplicación del método f-k en un ensayo pasivo para una frecuencia de 15 Hz, donde la zona de color rosado en el gráfico de la izquierda representa la zona de mayor concentración de energía para un intervalo de tiempo. Se calculan los números de onda que producen una mayor concentración de energía para distintos intervalos de tiempo, para así ir construyendo el diagrama de dispersión indicado en el gráfico de la derecha.

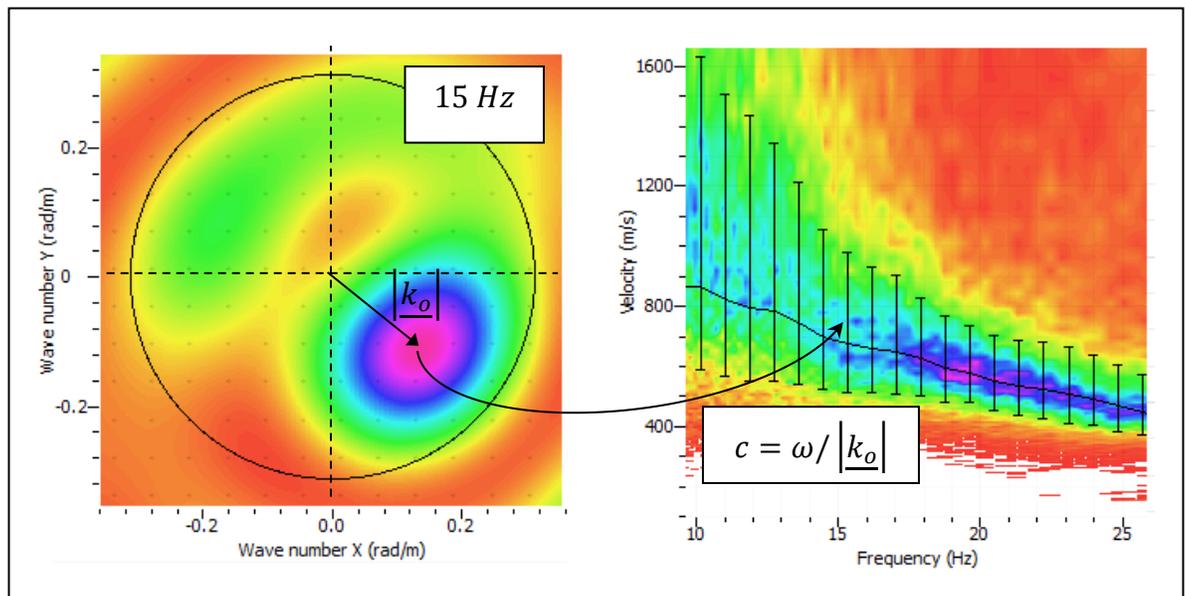


Figura 2.18: Ejemplo del análisis f-k sobre una ventana de tiempo y una frecuencia de 15 Hz (izquierda) para el cálculo de la curva de dispersión (derecha)

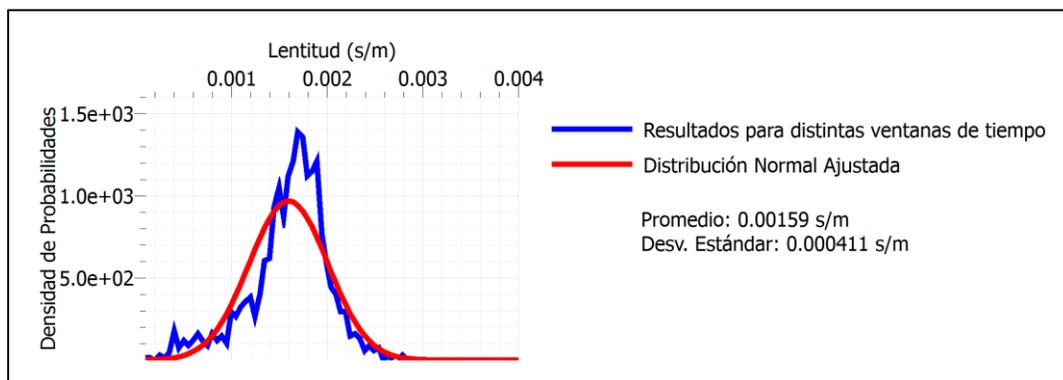


Figura 2.19: Distribución normal ajustada a los resultados obtenidos para distintas ventanas de tiempo

La curva de dispersión se calcula al ajustar una distribución normal a los resultados obtenidos para distintas ventanas de tiempo. En la Figura 2.19 se indica la distribución normal ajustada para el ejemplo anterior, donde el promedio y la desviación estándar de dicha distribución, corresponde a a la lentitud (o velocidad de fase) promedio y la desviación estándar de la curva de dispersión a los 15 Hz.

Al observar el espectro en el espacio f-k no sólo se observan un máximo absoluto, sino también máximos locales, que corresponden a otros modos de propagación de las ondas superficiales, los cuales también pueden ser utilizados para inferir las propiedades elásticas de los suelos (Foti, 2001).

2.4.2.2. Enfoque del análisis f-k en ensayos activos

En el caso de ensayos activos, se debe incorporar la atenuación sufrida por el frente de ondas. Para ello se debe utilizar una expresión más generalizada que incorpore este efecto. Para comenzar, se utiliza la definición para desplazamientos verticales en superficie causados por una fuente impulsiva planteadas por Aki y Richards (1980):

$$u(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m U_m(\omega, r) e^{i(\omega t - k_m(\omega)r)} d\omega \quad (2.43)$$

Donde m es el número de los distintos modos de vibración, $k_m(\omega)$ es la componente del número de onda correspondiente a la dirección analizada para un modo m en particular, r es la distancia entre fuente y receptor y $U_m(\omega, r)$ queda definido por:

$$U_m(\omega, r) = I(\omega) S_m(\omega) R_m(\omega) p(r) e^{-\alpha_m(\omega)r} \quad (2.44)$$

Donde $I(\omega)$ es la respuesta del instrumento, $S_m(\omega)$ es el espectro de la fuente, $R_m(\omega)$ es el efecto de la trayectoria, $p(r)$ es el factor de atenuación geométrica y $e^{-\alpha_m(\omega)r}$ es la atenuación del material, utilizando para ello un coeficiente de atenuación para el modo m igual a $\alpha_m(\omega)$. Se aplica la transformada *slant stack* que permite descomponer el campo incidente en ondas planas con una lentitud horizontal s_{hor} . Es un procedimiento análogo al retraso de las señales expresado en la ecuación (2.35) y que permite filtrar los frentes de ondas no planos generados por fuentes externas (vibraciones ambientales).

$$\sum_{n=1}^N u(x_n, \tau + s_{hor}x_n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m \sum_{n=1}^N U_m(\omega, x_n) e^{i(\omega s_{hor} - k_{x,m}(\omega))x_n} d\omega \quad (2.45)$$

Finalmente, al calcular la transformada de Fourier en τ y al expresar la lentitud horizontal en términos de número de ondas, se puede obtener la respuesta en el espectro f - k (Tselentis y Delis, 1998):

$$F(\omega, k) = \sum_m \left[\sum_{n=1}^N p_n U_m(\omega, r) e^{-\alpha_m(\omega)r} e^{i[k - k_{x,m}(\omega)]x_n} \right] \quad (2.46)$$

En esta ecuación, se ha incorporado además un peso p_n que permite eliminar la atenuación geométrica (Rix, 2005). Se han propuestos distintas expresiones para p_n , siendo las más utilizadas $p_n = \sqrt{r}$ (Foti, 2000) o la expresión de Park et al. (1999):

$$p_n = \frac{1}{\|U_m(\omega, r)\|} \quad (2.47)$$

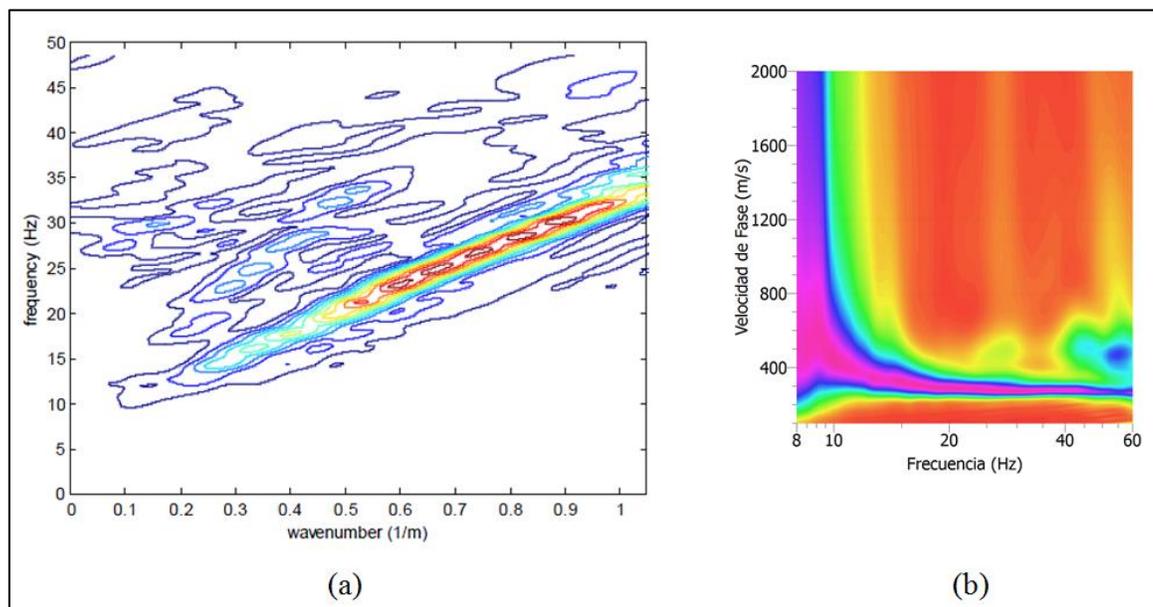


Figura 2.20: Resultados del análisis f-k: (a) Espectro f-k, (Foti, 2000) (b) Curva de dispersión

A partir de la expresión (2.46) es posible calcular la respuesta en el espectro f-k para distintas combinaciones de frecuencia y número de onda, tal como se indica en la Figura 2.20a (Foti, 2000). Sin embargo, por efectos prácticos es más simple trabajar en el espacio de la velocidad de fase y la frecuencia, tal como se indica en la Figura 2.20b. En este plano es posible identificar con claridad las zonas de mayor energía, y con ello, identificar la curva de dispersión.

2.4.2.3. Muestreo en tiempo y en espacio

En la Figura 2.21 (Johnson y Dudgeon, 1993) se observa la función de respuesta del arreglo (ecuación 2.42) obtenida para un arreglo lineal compuesto por M receptores espaciados a una distancia d , y un frente de ondas propagándose en la misma dirección que la orientación del arreglo. La función está compuesta por un lóbulo central, rodeada de

l6bulos de amplitudes m1s peque1as. Se observa que dicha funci3n tiene una periodicidad de los l6bulos igual a $2\pi/d$ y que el ancho del l6bulos central es igual a $4\pi/Md$.

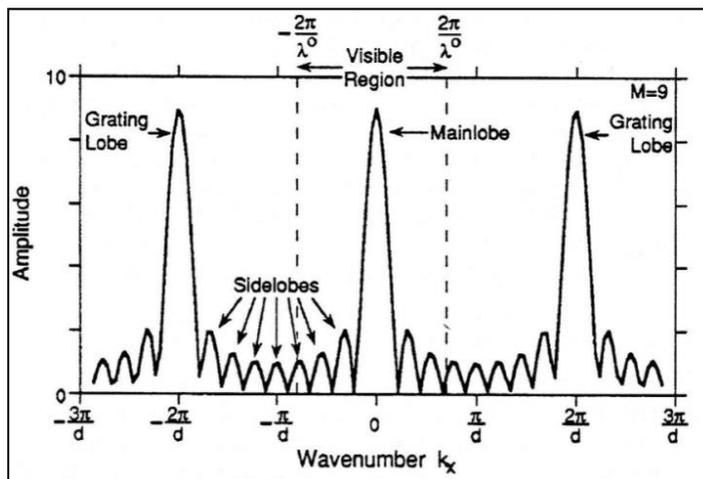


Figura 2.21: Funci3n de respuesta de un arreglo lineal (Johnson y Dudgeon, 1993)

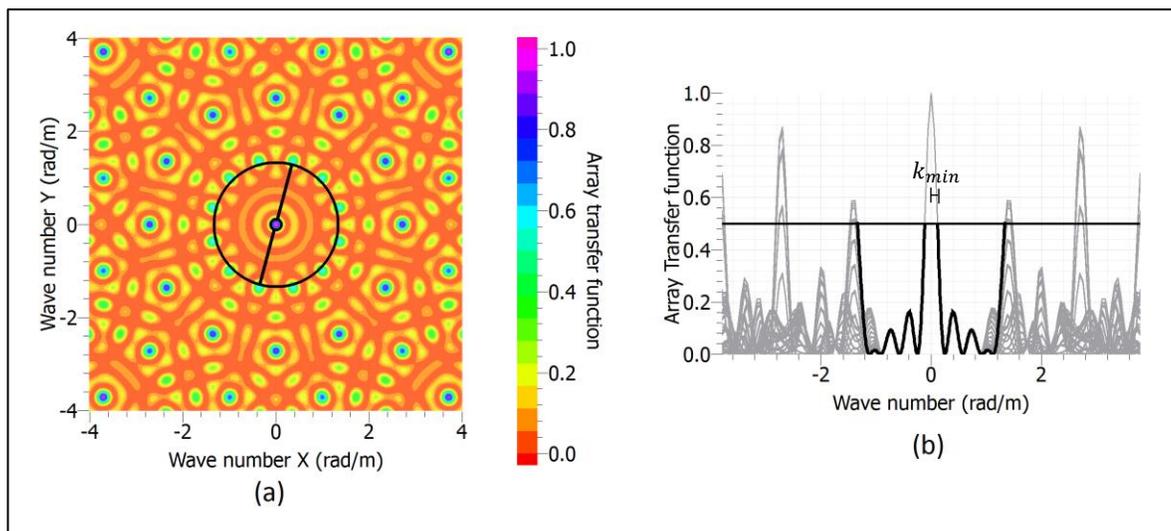


Figura 2.22: Funci3n de respuesta para un arreglo bidimensional

El ancho del lóbulo central determina la capacidad del arreglo de diferenciar dos frentes de ondas con número de onda cercano (resolución). En el diagrama de dispersión, esto se refleja en una zona donde no es posible distinguir con claridad regiones de mayor energía. Al aumentar el espaciamiento máximo entre receptores (y por ende, disminuir el ancho del lóbulo central) es posible aumentar la resolución para números de ondas más bajos (Johnson y Dudgeon, 1993). Por otro lado, la periodicidad con que se observan los lóbulos de gran amplitud es dependiente únicamente del espaciamiento mínimo entre geófonos. La presencia de dos o más *peaks* locales en la función de respuesta del arreglo corresponde al fenómeno conocido como *aliasing*, donde al existir dos o más zonas con una mayor energía, no es posible identificar con claridad, cual es el vinculado realmente a la curva de dispersión.

Este análisis es análogo para un arreglo bidimensional, salvo por el número de onda que corresponde a un vector (k_x, k_y) . En la Figura 2.22a se grafica la función de respuesta para un arreglo circular. En ella se observa un valor *peak* en el origen rodeada de varios *peaks* locales para distintas combinaciones de k_x y k_y . En la Figura 2.22b se indica las funciones de respuesta para distintos azimut (dirección de incidencia del frente de ondas), superpuestas y evaluadas para el módulo del vector número de onda. Al igual que para el caso lineal, el ancho del *peak* central observado en esta figura, indica la capacidad del arreglo de diferenciar dos frentes de ondas con número de onda cercana (resolución), mientras que la suma de *peaks* locales de mayor amplitud corresponde al fenómeno conocido como *aliasing*.

Para llevar a cabo el análisis f-k es necesario realizar un análisis discreto (tanto en tiempo como en espacio) de un proceso continuo. La discretización temporal y espacial utilizada tiene como consecuencia, problemas de *aliasing* para periodos (T) y longitudes de onda (λ) bajo un cierto umbral. El teorema del muestreo (Johnson y Dudgeon, 1993) plantea que deben existir al menos, tres muestras por periodo y longitud de onda, por lo tanto:

$$\Delta t < T_{min}/2 \quad (2.48)$$

$$\Delta x < \lambda_{min}/2 \quad (2.49)$$

Donde Δt es el intervalo de sampleo y Δx es la distancia mínima entre geófonos. En términos de resolución también hay consecuencias producto de la discretización, ya que el ancho del lóbulo central de la función de respuesta del arreglo, depende del espaciamiento máximo entre geófonos. Diversos autores (Asten y Henstridge, 1984; Wathelet, 2005) establecen que el mínimo valor de k corresponde al número de onda para el cual el *peak* central llega a 0.5 veces su máxima amplitud (Figura 2.22b).

2.4.3. Análisis MASW

El método propuesto por Park et al. (1999), conocido popularmente como *Multichannel Analysis of Surface Waves* o MASW, fue originalmente propuesto para el análisis de ensayos activos. Posteriormente se extendió el método para ser aplicado en ensayos pasivos utilizando arreglos bidimensionales (Park, 2008) y arreglos lineales utilizando como fuente el tráfico vehicular (Park y Miller, 2008). Se han realizado diversos estudios para mejorar y ampliar los resultados obtenidos con esta metodología: optimización en la adquisición de datos en terreno (Park et al., 2001), aplicación de filtros para la identificación de modos superiores en las trazas (Park, 2002), y metodologías para determinar modelos de V_S en 2D (Park, 2005) y 3D (Park y Carnevale, 2008).

2.4.3.1. Cálculo de la curva de dispersión

La transformada propuesta por Park et al. (1998), en su versión original fue diseñada para la resolución de ensayos activos, y tiene varias similitudes al análisis f-k. De acuerdo a esta formulación, a las señales registradas en cada receptor $u(x, t)$, se aplica la transformada de Fourier para calcular $U(x, \omega)$:

$$U(x, \omega) = \int u(x, t) e^{i\omega t} dt \quad (2.50)$$

Donde $U(x, \omega)$ puede ser expresado como el producto entre su espectro de fase $P(x, \omega)$ y de amplitud $A(x, \omega)$. El primero posee toda la información sobre las propiedades dispersivas del sitio estudiado, mientras el segundo está relacionado con la atenuación sufrida por cada señal. Por lo tanto, $P(x, \omega)$ puede expresarse en términos del número de onda $k_m(\omega)$ para el modo m , tal como se observa en la ecuación (2.51).

$$U(x, \omega) = P(x, \omega)A(x, \omega) = e^{-ik_m(\omega)x}A(x, \omega) \quad (2.51)$$

Park (1998) propone cuantificar la respuesta del arreglo para distintas combinaciones de frecuencia y número de onda con la siguiente expresión:

$$V(\omega, k) = \int e^{ikx} \frac{U(x, \omega)}{|U(x, \omega)|} dx = \int e^{-i(k_m(\omega)-k)x} \frac{A(x, \omega)}{|A(x, \omega)|} dx \quad (2.52)$$

Este procedimiento es equivalente al *slant stack* descrito para el método f-k. Además al normalizar las señales por $|U(x, \omega)|$ se incorpora la atenuación geométrica. Para una frecuencia dada, existirán máximos cuando $k_m(\omega) = k$ para los distintos modos de propagación, lo que permitirá la identificación de la curva de dispersión.

2.4.3.2. Roadside MASW

El uso de arreglos lineales para la ejecución de ensayos pasivos surge a partir de la complejidad de la implementación de arreglos bidimensionales en zonas urbanas (Louie, 2001; Park y Miller, 2008). Louie (2001) plantea el uso de vibraciones generadas por el tráfico vehicular a través del método conocido como refracción de microtemblores o ReMi. Park y Miller (2008) hacen notar una seria deficiencia del método ReMi, al no considerar que los frentes de ondas puedan propagarse en direcciones distintas a la orientación del arreglo. En la Figura 2.23a se indica la hipótesis respecto la dirección de propagación de los frentes de ondas bajo el cual el método ReMi funciona. Sin embargo, cuando los frentes de onda se propagan con una dirección distinta (Figura 2.23b), el método interpreta que la distancia recorrida por el frente de ondas, es igual a la separación entre los receptores (d), siendo que la distancia efectiva es distinta (d^*), lo que provoca que la velocidad inferida sea mayor a la real.

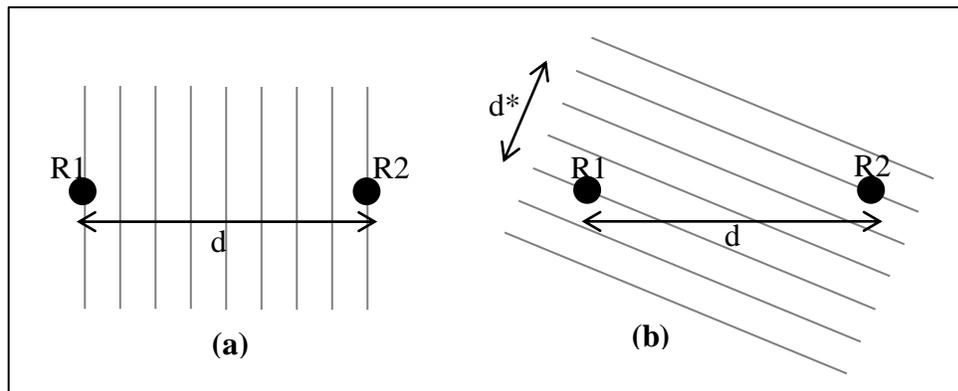


Figura 2.23: Propagación de un frente de ondas plano entre dos receptores (R1 y R2) que forman parte de un arreglo lineal cuyo espaciamiento es constante e igual a d : (a) Hipótesis respecto a la dirección de propagación bajo la cual funciona el método ReMi, y (b) Error cometido al no considerar direcciones de propagación distintas a la orientación

Park y Miller (2008) proponen un enfoque para la determinación de curvas de dispersión con arreglos lineales ubicados al costado de carreteras o calles de alto tráfico, suponiendo que el frente de onda puede venir desde todos los sentidos. En la Figura 2.24 se indican tres formas distintas, de cómo se pueden propagar las ondas, cuando el arreglo lineal de receptores es paralelo a la calle.

El primer enfoque (Figura 2.24a), que plantea que la fuente se encuentra alineada con el arreglo de receptores, corresponde al utilizado por Louie (2001) en el método ReMi. En ella se calcula la energía asociada a la respuesta del arreglo $E_{IP}(\omega, c)$ para una frecuencia, y velocidad de fase en particular. Para ello, se aplica un cambio de fase $\phi_j = \omega x_j / c$ a la transformada de Fourier $U_j(\omega)$ de la señal registrada $u_j(t)$ en cada uno de los N receptores, los cuales se encuentran ubicados a una distancia x_j de la fuente. La respuesta del arreglo corresponde al valor absoluto de la suma de todas las señales con su cambio de fase respectivo. Ya que el frente de ondas puede provenir, tanto de la izquierda, como de la derecha, $E_{IP}(\omega, c)$ se calcula como la suma de estos dos posibles frentes de ondas:

$$E_{IP}(\omega, c) = \left| \sum_{j=1}^N e^{i\phi_j} U_j(\omega) \right| + \left| \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} U_j(\omega) \right| \quad (2.53)$$

Para el segundo enfoque (Figura 2.24b), se consideran frentes de ondas planos que se propagan en distintas direcciones. Para el cálculo de la energía asociada a la respuesta del arreglo, ahora se debe incorporar un ángulo de propagación θ , que afectará directamente al cambio de fase aplicado, que pasará a ser dependiente de este ángulo ($\phi_{\theta,j}$), tal como se indica en la ecuación (2.54). Finalmente, la energía corresponderá la suma de la respuesta en los N geófonos y para los N_θ ángulos de propagación considerados ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$).

$$\phi_{k,j} = -\frac{\omega x_j \cos \theta_k}{c} \quad (2.54)$$

$$E_{OP}(\omega, c) = \sum_{k=1}^{N_\theta} \left| \sum_{j=1}^N e^{i\phi_{k,j}} R(\omega) \right| \quad (2.55)$$

Por último, para considerar frentes de ondas cilíndricos, es decir, de fuentes cercanas (Figura 2.24c), se debe suponer la ubicación de la fuente. Para ello, y tal como se indica en la Figura 2.25, se agregan dos variables adicionales (x_0 e y_0) que corresponden a la ubicación de la fuente en un sistema cartesiano. Esto implica que el cambio de fase $\phi_{k,j}$ pasa a ser dependiente de la ubicación del receptor en lugar del ángulo de incidencia. Finalmente, ocupando la misma expresión (2.54) es posible calcular la energía asociada a la respuesta del arreglo, al sumar la respuesta en los N geófonos y para distintas ubicaciones de la fuente (x_k, y_k).

$$\phi_{k,j} = -\frac{\omega}{c} \sqrt{(x_k - x_j)^2 + y_k^2} \quad (2.56)$$

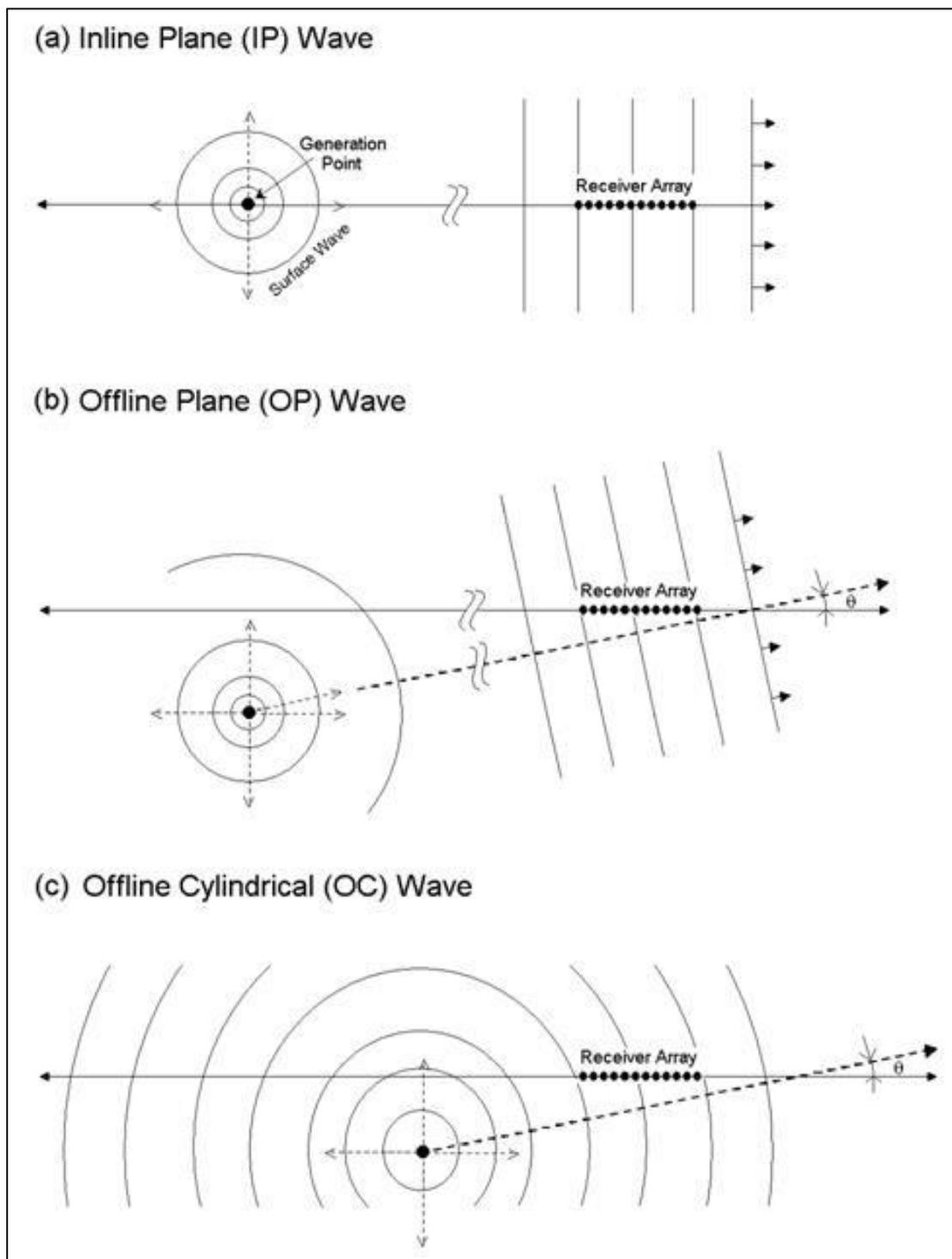


Figura 2.24: Formas en que se pueden propagar los frentes de ondas generados por el tráfico vehicular de una carretera paralela al arreglo de geófonos (Park y Miller, 2008)

Park y Miller (2008) comparan la efectividad de estos tres enfoques con al de un ensayos pasivo con un arreglo bidimensional. Tal como se indica en la Figura 2.26 (Park y Miller, 2008), las curvas de dispersión obtenidas confirman que al asumir que la fuente se encuentra alineada con el arreglo de receptores, se obtienen velocidades mayores que con las otras metodologías para todo el rango de frecuencias mostrado. Por otro lado, al considerar que el frente de ondas es plano o cilíndrico y no se está alineado con el arreglo, se obtiene un resultado consistente con el obtenido usando arreglos bidimensionales. Sin embargo, para las frecuencias más bajas se observa una tendencia de sobreestimar las velocidades de fase, estableciendo diferencias del orden del 10% entre ambas metodologías para este caso (Park y Miller, 2008).

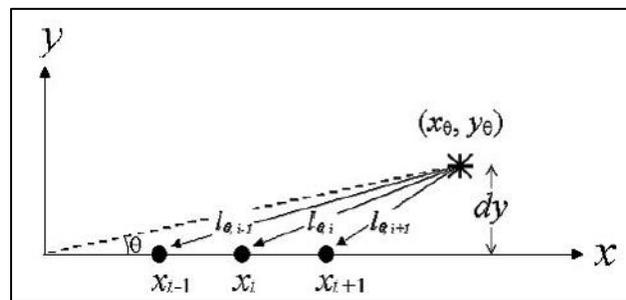


Figura 2.25: Ubicación de la fuente para frente de ondas cilíndricos (Park y Miller, 2008)

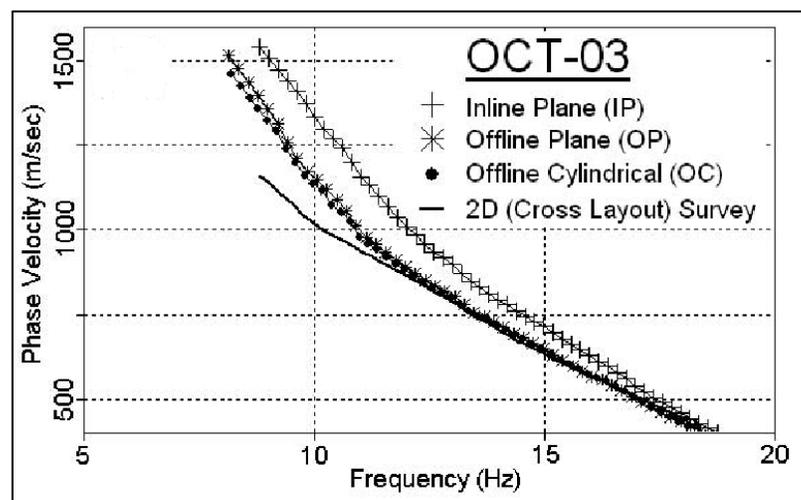


Figura 2.26: Curvas de dispersión obtenidas con arreglos lineales y los distintos enfoques de como considerar los frentes de propagación de ondas (IP, OP, OC) comparada con la obtenida usando un arreglo 2D (Park y Miller, 2008)

2.4.4. Método de autocorrelación espacial (SPAC)

El método de autocorrelación espacial (SPAC) propuesto por Aki (1957) está basado en el supuesto de que el campo de ondas que componen las vibraciones ambientales es un proceso estocástico, que es estacionario tanto en tiempo como en espacio, y están compuestas en su mayoría por ondas superficiales, donde uno de sus modos de vibración es dominante (generalmente el modo fundamental). Una de las principales ventajas de SPAC, es que requiere un número menor de receptores y arreglos de menor tamaño para lograr resultados similares a los obtenidos con el método f-k (Okada, 2003).

2.4.4.1. Enfoque original del método SPAC

Utilizando las coordenadas polares, el movimiento vertical producto de la propagación de ondas de Raleigh, puede ser descrito a través de la representación espectral de un proceso estocástico para un tiempo t y una posición en el espacio (ξ, φ) (Okada, 2003):

$$w(t, \xi, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} e^{i\omega t + i\xi k \cos(\varphi - \theta)} d\zeta(\omega, \theta) \quad (2.57)$$

Donde ω es la frecuencia, k es el número de onda (dependiente de la frecuencia), θ el ángulo de propagación del frente de ondas y $\zeta(\omega, \theta)$ es un valor complejo asociado a un proceso estocástico que satisface las siguientes condiciones (Okada, 2003):

- i. $E[d\zeta(\omega, \theta)] = 0^2$.
- ii. Si $w(t, \xi, \varphi)$ es continuo y diferenciable en tiempo y espacio:

$E[|d\zeta(\omega, \theta)|^2] = h(\omega, \theta)d\omega d\theta$, donde $h(\omega, \theta)$ se conoce como la función de densidad espectral.

² E: Esperanza

- iii. Para dos frecuencias, números de ondas y ángulos de propagación del frente de ondas distintos: $E[d\zeta^*(\omega, \theta)d\zeta(\omega', \theta')] = 0$, donde $*$ denota la conjugada compleja.

Entonces, se puede definir la función de autocorrelación espacial $\phi(r, \psi)$ entre dos puntos ubicados a una distancia r y un ángulo con la horizontal igual a ψ , para un tiempo de registro T .

$$\phi(r, \psi) = E[w^*(t, 0, 0) w(t, r, \psi)] = \frac{1}{T} \int_0^T w^*(t, 0, 0) w(t, r, \psi) dt \quad (2.58)$$

$$\phi(r, \psi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} e^{irk(\omega) \cos(\psi-\theta)} E[|d\zeta(\omega, \theta)|^2] \quad (2.59)$$

Para esta definición es importante indicar que uno de los dos puntos fue ubicado en el origen del sistema de referencia, tal como se observa en la Figura 2.27. Utilizando la condición ii) es posible expresar la ecuación (2.59), como:

$$\phi(r, \psi) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{2\pi} e^{irk(\omega) \cos(\psi-\theta)} h(\omega, \theta) d\theta \right] d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega, r, \psi) d\omega \quad (2.60)$$

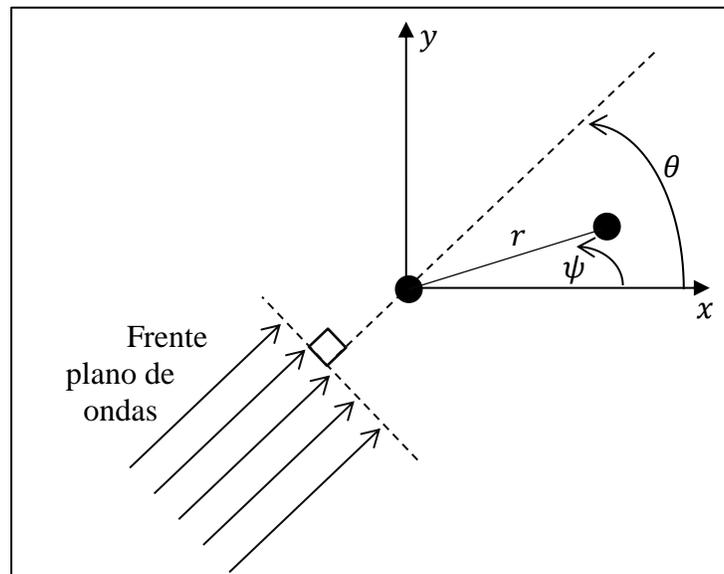


Figura 2.27: Esquema en planta del análisis SPAC

Donde se define $g(\omega, r, \psi)$ como la función de covariancia espacial para vibraciones ambientales (Okada, 2003):

$$g(\omega, r, \psi) = \int_0^{2\pi} e^{irk(\omega) \cos(\psi-\theta)} h(\omega, \theta) d\theta \quad (2.61)$$

Se puede calcular el promedio azimutal de la covariancia espacial $g(\omega, r, \psi)$ al integrarlo en todas las direcciones:

$$\bar{g}(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(\omega, r, \theta) d\psi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{irk(\omega) \cos(\psi-\theta)} h(\omega, \theta) d\theta d\psi \quad (2.62)$$

Donde uno de los elementos de esta ecuación puede reescribirse como:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{irk(\omega) \cos(\psi-\theta)} d\psi = J_0(rk(\omega)) \quad (2.63)$$

Donde J_0 es la función de Bessel de primera especie y orden cero. Entonces la ecuación (2.64) queda finalmente como:

$$\bar{g}(\omega, r) = \int_0^{2\pi} J_0(rk(\omega)) h(\omega, \theta) d\theta = J_0(rk) h_0(\omega) \quad (2.64)$$

Donde $h_0(\omega)$ corresponde a la densidad espectral de las vibraciones ambientales para una frecuencia ω , la cual se obtiene al integrar la función densidad espectral para todas las direcciones.

$$h_0(\omega) = \int_0^{2\pi} h(\omega, \theta) d\theta \quad (2.65)$$

Luego, se calcula el promedio azimutal de la función de autocorrelación espacial $\bar{\phi}(r)$, el cual entrega la información respecto de todas las vibraciones ambientales propagándose bajo la influencia de la estructura del suelo debajo del arreglo de receptores:

$$\bar{\phi}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \phi(r, \psi) d\theta = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{g}(\omega, r) d\omega \quad (2.66)$$

$$\bar{\phi}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} J_0(rk) h_0(\omega) d\omega \quad (2.67)$$

Aki (1957) propone resolver la función de autocorrelación espacial para una frecuencia ω_0 en particular. Para ello se define la función $P(\omega_0)$ que cumple la siguiente condición:

$$h_0(\omega) = P(\omega_0)\delta(\omega - \omega_0), \quad \omega > 0 \quad (2.68)$$

Donde δ es la función delta de Dirac, con lo cual se puede definir la función de autocorrelación espacial para una frecuencia ω_0 como:

$$\bar{\phi}(r, \omega_0) = J_0(rk)P(\omega_0) \quad (2.69)$$

A partir de ello, se define el coeficiente de autocorrelación $\rho(r, \omega_0)$ como:

$$\rho(r, \omega_0) = \frac{\overline{\phi(r, \omega_0)}}{\overline{\phi(0, \omega_0)}} = J_0(rk) \quad (2.70)$$

Tal como se observa en la ecuación (2.70), el coeficiente de autocorrelación tiene asociada las propiedades dispersivas de la estructura del suelo debajo del arreglo de receptores, a través de la función de Bessel de primera especie y orden cero.

$$\rho(r, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega}{c(\omega)}r\right) \quad (2.71)$$

A partir de la curva de dispersión y con un valor fijo de r es posible calcular el coeficiente de autocorrelación para todas las frecuencias, cuya gráfica se conoce como curva de autocorrelación. A modo de ejemplo, en la Figura 2.28, se indican las curvas de autocorrelación calculadas para distintos valores de r para el modelo estudiado por Foti (2000), para el cual calculó numéricamente la curva de dispersión de un suelo compuesto por dos capas sobre un semi-espacio tal como se presenta en la Figura 2.28.

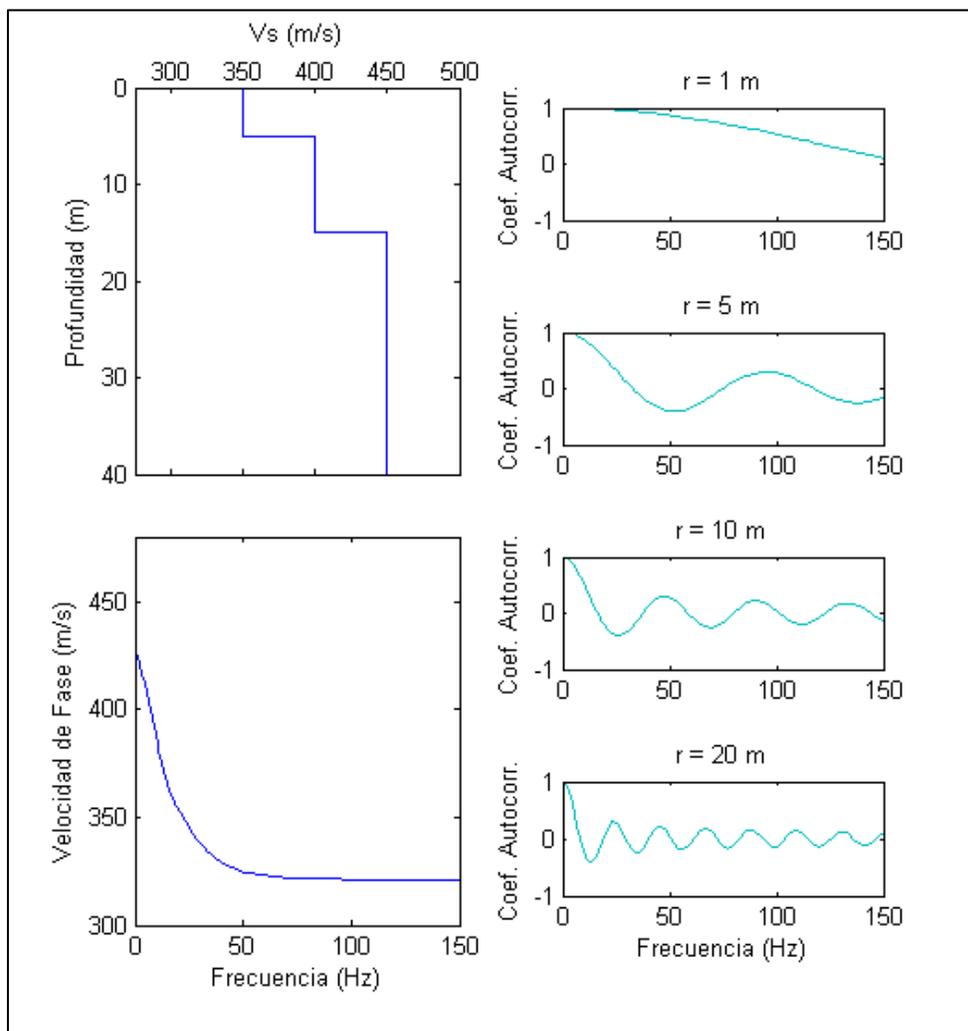


Figura 2.28: Curvas de autocorrelación para distintos valores de r calculados para el modelo de Foti (2000)

2.4.4.2. Método de autocorrelación modificado

Bettig et al. (2001) introduce una mejora en el método SPAC que busca corregir la imperfección en la ubicación de receptores al intentar utilizar arreglos de gran tamaño, y por lo tanto, donde la distancia ξ entre distintos pares de receptores no es exactamente la misma (Figura 2.29a). Bettig et al. (2001) propone la ecuación (2.72) que permite calcular el promedio radial y azimutal del coeficiente de autocorrelación en un anillo en el espacio

(ξ, φ) , donde R_1 y R_2 son los radios interno y externo de este, y J_1 es la función de Bessel de orden 1 (Figura 2.29b).

$$\begin{aligned} \rho(r_1, r_2, \omega_0) &= \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \xi J_0\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} \xi\right) d\xi \\ &= \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{c(\omega_0)}{\omega_0} \left[\xi J_1\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} \xi\right) \right]_{r_1}^{r_2} \end{aligned} \quad (2.72)$$

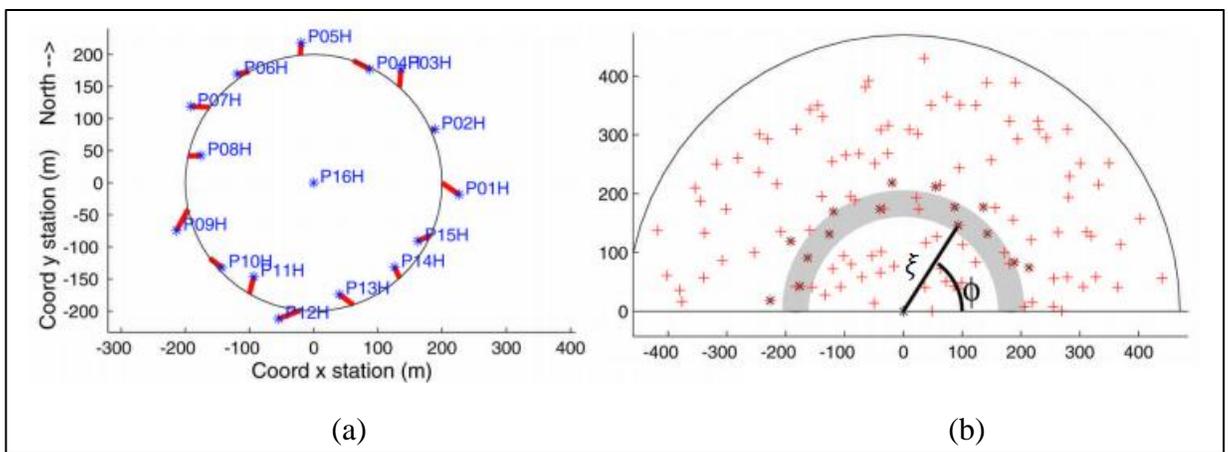


Figura 2.29: (a) Arreglo circular imperfecto en coordenadas cartesianas. (b) Gráfico de cada par de receptor en función de la distancia entre ellos (ξ) y el ángulo que se forma con la horizontal (φ). En gris se observa el anillo y los pares de receptores que encierra (Bettig et al., 2001).

2.4.4.3. SPAC aplicado a arreglos lineales

Chávez-García et al. (2005) proponen la idea de reemplazar el promedio azimutal (ecuaciones 2.66) por mediciones en largos intervalos de tiempo, siempre que el campo de ondas sea estacionario en el tiempo y que no exista una dirección de propagación predominante. A partir de este supuesto, no es necesaria la utilización de arreglos bidimensionales como propuso originalmente Aki (1957), y se abre la posibilidad a la utilización de arreglos lineales.

Utilizando registros de 30 minutos y con receptores alineados y espaciados a 5, 10, 20 y 40 metros, Chávez-García et al. (2006) pudo determinar con éxito el perfil de velocidades de ondas de corte de un sitio, el cual coincide con los resultados obtenidos con otras metodologías.

2.5. Inversión

El objetivo del proceso de inversión es generar un modelo de estratos horizontales de suelo con propiedades elásticas compatibles con las observaciones de terreno y reflejadas a través de las curvas de dispersión o autocorrelación. De acuerdo a lo planteado por diversos autores (Nolet, 1981; Gabriels et al., 1987), estas curvas dependen principalmente de la velocidad de ondas de corte, y son prácticamente insensibles a variaciones de la densidad y velocidades de ondas de compresión con la profundidad. La inversión no es un proceso trivial, ya que existen muchos modelos de suelo que se ajustan a las observaciones de terreno observado (Foti, 2000; Sambridge, 2001).

La idea general de la inversión (Figura 2.30), es calcular las curvas de dispersión o autocorrelación asociadas a modelos de estratos horizontales de suelo (problema directo), y utilizando algún algoritmo de búsqueda, encontrar el modelo que tenga el mayor ajuste con las observaciones de terreno (problema inverso).

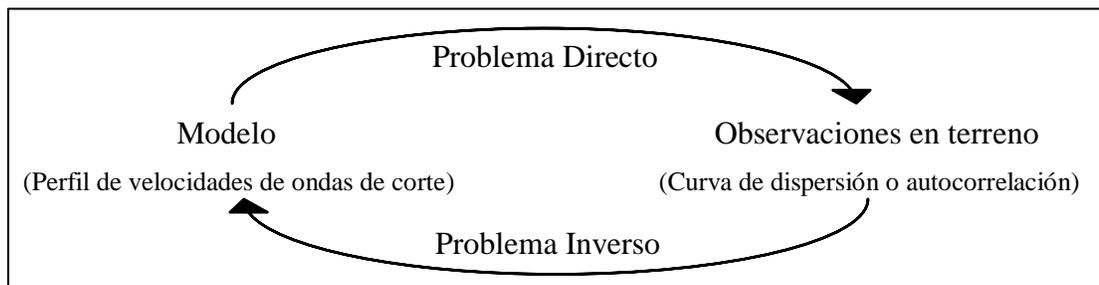


Figura 2.30: Esquema del problema inverso (Modificado de Wathelet, 2005)

El modelo creado será confiable hasta una profundidad máxima, que dependerá de la máxima longitud de onda para la que se disponga información en términos de curvas de dispersión o autocorrelación. De acuerdo a los estudios de Rix y Leipski (1991), la profundidad máxima es aproximadamente la mitad de la máxima longitud de onda medida.

2.5.1. Enfoques para la Inversión

Existen dos grandes enfoques para enfrentar el problema inverso: los métodos iterativos o de búsqueda local y los métodos de búsqueda global.

Los métodos iterativos se basan en la linealización del problema de inversión (Nolet, 1981), y utilizan un modelo tentativo inicial compuesto por un número finito de capas de suelo, el que puede ser determinado en base a información conocida previamente del sitio estudiado (Foti, 2000). A partir del modelo inicial, se inicia un proceso iterativo que busca encontrar un modelo que se ajuste a las observaciones de terreno. Entre los métodos iterativos comúnmente utilizados se encuentran el algoritmo de Newton-Raphson, el criterio de los mínimos cuadrados o los métodos basados en gradientes (Wathelet, 2005).

Cuando el problema directo es no-lineal, la función de ajuste³ tendrá múltiples mínimos locales (Snieder, 1998). Esto implica que los métodos iterativos puedan identificar un mínimo local como un mínimo global, lo que dependerá del modelo inicial seleccionado. La no-unicidad es un fenómeno común en problemas inversos, y se puede enfrentar seleccionando un buen modelo inicial (lo que no siempre es sencillo), por ello estos métodos no son apropiados cuando la no-linealidad es severa (Sambridge, 2001; Wathelet, 2005).

Por otro lado, existen los métodos de búsqueda global que permiten una mayor exploración del espacio de los parámetros del modelo que se ajusta. En primer lugar, se encuentran los métodos de búsqueda uniforme, que generan modelos uniformemente

³ Función que mide la correspondencia entre los modelos generados y las observaciones de terreno en términos de curvas de dispersión o autocorrelación, para el rango de frecuencias de los datos empíricos.

distribuidos en todo el espacio de los parámetros. Por otro lado, se encuentran aquellos que introducen aleatoriedad en la generación de muestras en el espacio de los parámetros y se conocen como métodos Monte-Carlo o pseudo-aleatorios (Sambridge y Mosegaard, 2002).

A diferencia de los métodos iterativos, los métodos de búsqueda global no recurren a supuestos de linealidad al resolver el problema, lo que les permite diferenciar mínimos locales del mínimo global en problemas con no-linealidad severa, y siempre convergen a una solución, pudiendo tener un mayor costo computacional en función de la irregularidad y tamaño del problema (Sambridge y Mosegaard, 2002).

Dentro de los métodos de búsqueda global se encuentran aquellos que permiten una búsqueda aleatoria orientada. Estos métodos permiten un mayor control en la exploración de los parámetros del modelo, así como la identificación de zonas donde haya una mayor probabilidad de encontrar modelos que se ajusten a las observaciones de terreno. Dentro de los métodos más utilizados se encuentran: el método de Reconocimiento Simulado (*Simulated Annealing*), Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*) y el Algoritmo del Vecindario (*Neighbourhood Algorithm*).

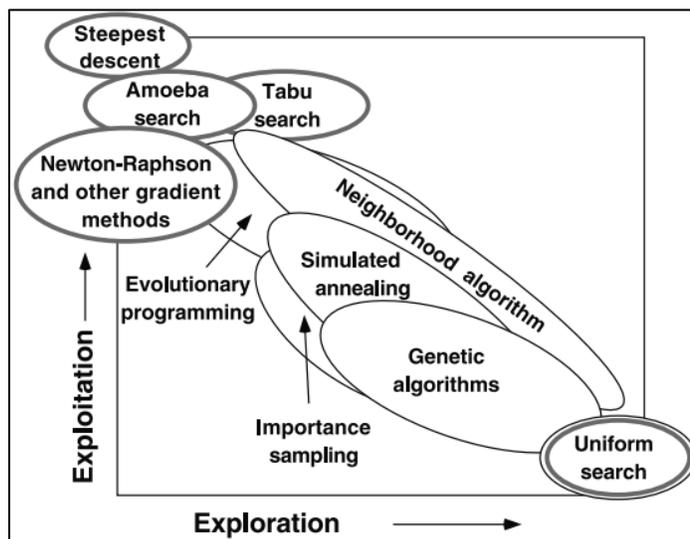


Figura 2.31: Métodos utilizados para la inversión en geofísica y comparación de su grado de exploración (Sambridge y Mosegaard, 2002)

Si bien, en principio no hay métodos mejores que otros, la diferencia entre ellos radica en la exploración que realizan del espacio de los parámetros y las decisiones que toman para determinar sobre qué regiones del espacio se deben realizar una mayor exploración, tal como se observa en la Figura 2.31. Una exploración de un mayor número de combinaciones involucra necesariamente un mayor uso de recursos computacionales, por lo que se consideran más ineficientes.

Finalmente, la elección entre un método iterativo o uno de búsqueda global, dependerá de la severidad de la no-linealidad del problema analizado, así como del número de incógnitas y los recursos computacionales disponibles. Los métodos de búsqueda global parecen ser más eficaces, debido al tratamiento que le otorgan a problemas con no-linealidad severa y porque son más estables en la convergencia a un modelo que satisfaga el problema. Sin embargo, se debe considerar que con un número alto de incógnitas, el proceso de inversión puede ser muy lento si los recursos computacionales son escasos.

2.5.2. Algoritmo del Vecindario

Sambridge (1999) plantea un método basado en la división del espacio de los parámetros en celdas de Voronoi⁴, llamado Algoritmo del Vecindario (*Neighborhood Algorithm*). Sus principales ventajas respecto a otras estrategias de inversión son que no requiere de un modelo inicial y explora muy bien el espacio factible de combinaciones de parámetros.

En la primera etapa del algoritmo, se generan modelos iniciales en forma aleatoria que exploran homogéneamente el espacio de los parámetros y lo subdividen en celdas de Voronoi (Figura 2.32a). Para cada modelo generado, se evalúa su desajuste con las observaciones de terreno, con el objeto de seleccionar la celda que contenga el mejor ajuste. Al interior de ella, se generan nuevos modelos aleatorios, para volver a evaluar el desajuste y repetir la subdivisión del espacio en celdas (Figura 2.32b). Este proceso se

⁴ Para un conjunto finito de modelos (m_1, m_2, \dots, m_N), la celda de Voronoi de m_i encierra los puntos del espacio que están más cerca de m_i que del resto de los modelos

puede repetir hasta alcanzar un modelo que tenga curvas de dispersión o autocorrelación teóricas tan cercanas, dentro de lo posible, a las obtenidas en terreno (desajuste mínimo). En términos prácticos, se limita el número de iteraciones, o nuevas subdivisiones del espacio.

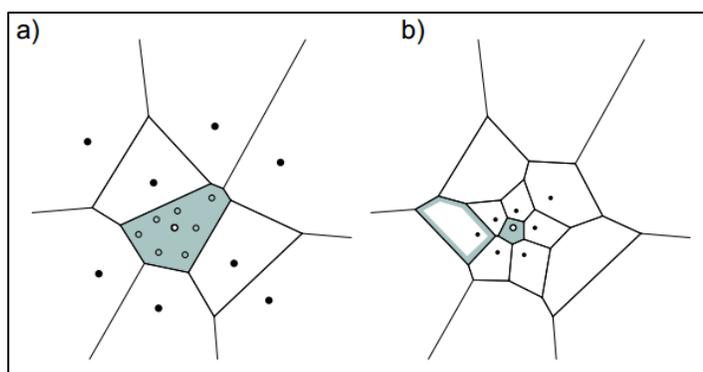


Figura 2.32: Procedimiento de inversión según el algoritmo del vecindario (Sambridge, 1999)

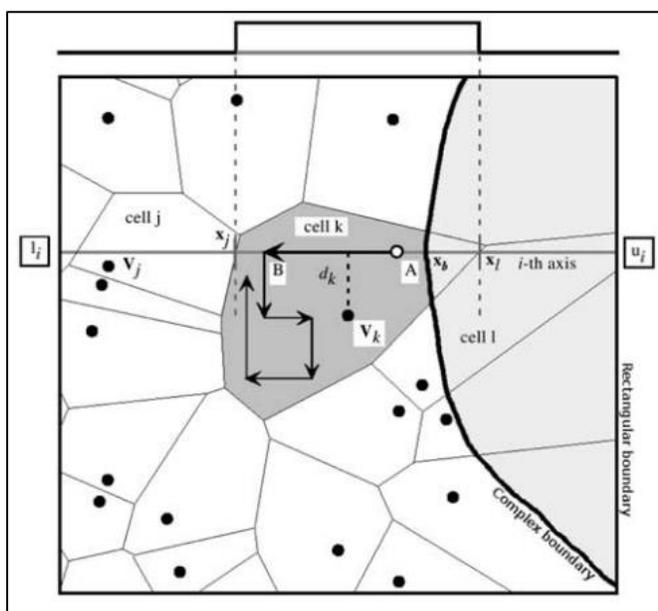


Figura 2.33: Implementación para incluir condiciones complejas en el proceso de inversión (Wathelet, 2008)

Wathelet (2008) propone una modificación al algoritmo del vecindario original que permite introducir condiciones entre los parámetros del modelo. Las condiciones más comunes (Wathelet, 2008, 2012) son:

- Establecer relaciones entre los V_S y V_P de cada capa, de modo que sean compatibles con el módulo de Poisson establecido.
- Si bien, una de las ventajas de los métodos basados en ondas superficiales, es la posibilidad de detectar capas blandas debajo de otras más rígidas, es común imponer como condición que las velocidades (V_S o V_P) sean monótonamente crecientes con la profundidad.
- Al establecer que el espesor de las capas sea variable, se debe imponer la condición que la profundidad de cada capa sea mayor que la inmediatamente superior.

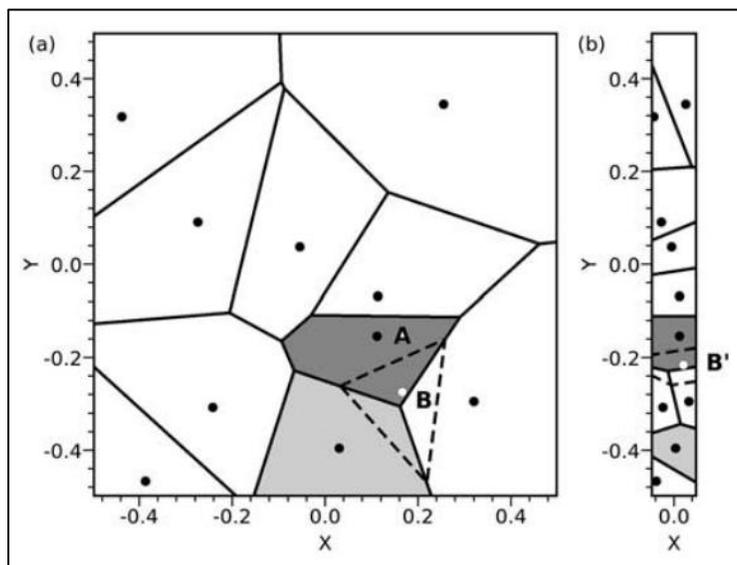


Figura 2.34: Incorporación de escalas variables en los ejes de parámetros o *dynamic parameter scaling* (Wathelet, 2008)

Para la generación de un modelo dentro de una celda de Voronoi, y tal como se observa en la Figura 2.33, Sambridge (1999) propone explorar a través de rectas paralelas alguno de los ejes y que crucen el espacio de los parámetros (entre l_i y u_i de acuerdo a la

Figura 2.33), y exploren modelos entre los límites de la celda (x_j y x_l en la Figura 2.33), repitiendo este procedimiento para distintas rectas. Sin embargo, para incluir condiciones complejas como la observada en la Figura 2.33 como una línea negra y gruesa, Wathelet (2008) propone que al explorar en cada recta, se cree un modelo aleatorio A (que se considera correcto a priori) y se generen pequeñas perturbaciones a partir de este modelo a lo largo del eje $l_i u_i$, hasta que se encuentre un modelo B que satisfaga todas las condiciones impuestas.

Wathelet (2008) plantea una segunda implementación para que la exploración sea más eficiente, la cual consiste en variar la escala de alguno(s) de los ejes de parámetros (*dynamic parameter scaling*). Por ejemplo, en la Figura 2.34a se observa el espacio para dos parámetros con la misma escala para ambos, mientras que en la Figura 2.34b se observa el mismo espacio, pero donde la escala del eje X ha sido reducida por un factor de 10. Al compararlos se observa que las celdas de Voronoi han cambiado, reduciendo su tamaño en el eje Y, y a la vez abarcando un mayor rango en el eje X. En otras palabras, la exploración en el eje Y ha aumentado, mientras en el eje X ha disminuido. De acuerdo a lo planteado por Wathelet (2008), esta metodología permite resolver el problema de inversión centrándose en aquellos parámetros que no se encuentran bien resueltos, y dejando de lado, aquellos que ya se encuentran resueltos.

2.6. Método de la Razón Espectral H/V

Este método, propuesto por Nogoshi e Igarachi (1970) y ampliamente estudiado por Nakamura (1989), consiste en estimar la razón entre el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontal y vertical de las vibraciones ambientales (razón espectral H/V). Estas vibraciones en su conjunto hacen vibrar preponderantemente al depósito de suelos a su frecuencia fundamental (Pastén, 2007), la cual puede ser identificada como el valor *peak* de la razón espectral H/V. Por ello, se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en estudios de microzonificación sísmica y efectos de sitio, como los realizados en la cuenca de Santiago por Pasten (2007) y Leyton et al. (2010).

De acuerdo a la hipótesis de Nakamura (1989), los microtemblores corresponden en su mayoría a ondas de Rayleigh, y la amplificación por efectos de sitio se debe a la existencia de una capa de suelo sobre un semi-espacio de mayor rigidez (Lermo y Chávez-García, 1993). Por ello, al suponer que la componente vertical del movimiento no sufre amplificación producto de los depósitos de suelos, es posible estimar el efecto de las ondas de Rayleigh en la componente vertical a través de la razón:

$$A_R = \frac{V_S}{V_B} \quad (2.73)$$

Donde V_S y V_B son los espectros de amplitud de las componentes verticales del movimiento en la superficie y el basamento rocoso, respectivamente. Por otro lado, Nakamura (1989) define una estimación del efecto de sitio (A_E) a través de la razón entre las componentes horizontales del movimiento en superficie (H_S) y la roca (H_B).

$$A_E = \frac{H_S}{H_B} \quad (2.74)$$

Al suponer que las componentes horizontal y vertical del movimiento son alteradas por ondas de Rayleigh en la misma medida, se propone una función de efecto de sitio modificada (A_M) que compense la alteración sufrida producto de las ondas superficiales:

$$A_M = \frac{A_E}{A_F} = \frac{\frac{H_S}{V_S}}{\frac{H_B}{V_B}} \quad (2.75)$$

Ya que en principio, las vibraciones ambientales en un afloramiento rocoso no presentan una dirección predominante (Nakamura, 1989), la amplitud de las componentes horizontal y vertical del movimiento a nivel de la roca deberían ser similares. Por ello, la estimación del efecto de sitio se estima finalmente como:

$$A_E = \frac{H_S}{V_S} \quad (2.76)$$

De acuerdo a las investigaciones de diversos autores (Lermo y Chavez-García, 1993; Tokimatsu, 1997; Konno y Ohmachi, 1998; Bonnefoy-Claudet et al., 2008) se ha comprobado la correlación entre la frecuencia fundamental de un sitio y el *peak* de la razón espectral H/V. Si se cuenta con alguna información estratigráfica del terreno, esta razón

también puede ser utilizada para estimar la profundidad de la roca (H). Para ello se utiliza el promedio armónico de la velocidad de propagación de ondas de corte desde la superficie a la interfaz entre suelo y roca (\bar{V}_S) tal como se indica en la ecuación 2.77. Por otro lado, la amplitud de la razón H/V se relaciona al contraste de impedancia entre los materiales presentes en el terreno, pero sigue siendo un aspecto no completamente comprendido del método (Pilz et al., 2010). Dependiendo de la amplitud de la razón H/V, podrá identificarse con menor o mayor claridad el periodo (o frecuencia) fundamental del terreno, tal como se observa en la Figura 2.35. Una curva plana como la indicada en la Figura 2.35a, donde no es posible identificar el *peak* de la razón H/V con claridad, es típica de suelos rígidos como los depósitos de grava de Santiago (Leyton et al., 2010).

$$T_o = \frac{4H}{\bar{V}_S} \quad (2.77)$$

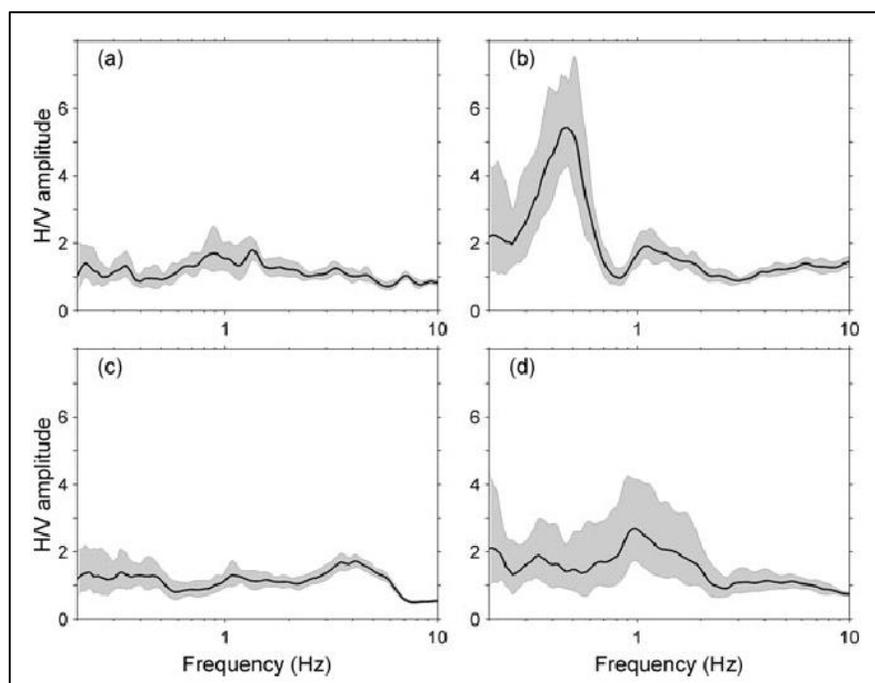


Figura 2.35: Taxonomía de las curvas obtenidas con el método de la razón espectral H/V en suelos típicos de Santiago: (a) curvas planas, (b) curvas con un *peak* claro, (c) y (d) curvas con *peaks* de baja amplitud (Bonney-Claudet et al., 2008)

2.7. Resumen

En este capítulo, se definieron las características dispersivas de las ondas superficiales de Rayleigh, las cuales, reflejadas a través de curvas de dispersión o autocorrelación, son utilizadas por los métodos geofísicos empleados en esta investigación para la caracterización sísmica de suelos.

Por otro lado, se revisaron distintos enfoques para la evaluación de las curvas de dispersión o autocorrelación. En esta investigación, los ensayos con fuente activa se analizaron con el método f-k, mientras que los ensayos con fuente pasiva fueron analizados con los métodos f-k, SPAC y Roadside MASW. Éste último es un método ampliamente usado en Chile, debido a su fácil implementación en zonas urbanas. Por otro lado, el método SPAC no es muy conocido en el país, a pesar de que resultados obtenidos en muchas investigaciones han demostrado su efectividad para acceder a propiedades dispersivas en bajas frecuencias (mayores profundidades).

Además, se describió el proceso de inversión, el cual busca encontrar un modelo de perfil de velocidades de ondas de corte, cuyas curvas de dispersión o autocorrelación asociadas se ajustan a las curvas observadas en terreno. En el marco de esta investigación se utilizó el Algoritmo del Vecindario, el cual permite una búsqueda global de modelos que se ajusten a los resultados empíricos, a diferencia de los métodos de inversión más usados en Chile, los cuales están basados en un búsqueda de carácter local.

Por último, se describió el método de la razón espectral H/V, el cual es una herramienta ampliamente utilizada en estudios de microzonificación sísmica, y será complementaria a los perfiles de velocidades de propagación de ondas de corte para los primeros 30 metros de profundidad presentados en el capítulo 5.

3. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MULTI-CANAL CON EL MÉTODO F-K

En este capítulo se estudia la aplicación del análisis multi-canal de ondas superficiales utilizando el enfoque f-k. Dado que el método f-k tradicional no permite el análisis de ensayos pasivos con arreglos lineales, se utilizó el método Roadside MASW para este propósito. Se estudió el tipo de fuente utilizada en ensayos activos, las características geométricas de los arreglos y la aplicación para distintas condiciones de tráfico y tipos de suelo. En general, se realizarán comparaciones de los resultados obtenidos en suelos rígidos y suelos blandos⁵, que son los casos extremos en la gran mayoría de las aplicaciones prácticas. Por último, se aplica esta metodología para caracterizar suelos típicos de la región Metropolitana, y se comparan los resultados con los obtenidos mediante otras metodologías.

3.1. Adquisición de datos y herramientas para el análisis

El equipo de adquisición de datos utilizado es un GEODE fabricado por la compañía norteamericana Geometrics (Figura 3.1a). Este equipo es ampliamente utilizado en Chile en estudios geofísicos de refracción sísmica, y más recientemente para la estimación del perfil de velocidades de ondas de corte. Para esta investigación se utilizaron dos modelos, el primero permite la conexión de 12 geófonos (perteneciente al área de ingeniería geotécnica de DICTUC S.A), y el segundo permite la conexión de hasta 24 geófonos (perteneciente a TRV Geofísica).

Se emplearon geófonos de 4.5 Hz de frecuencia natural. Tal como se indica en la Figura 3.1b, la respuesta de los geófonos es plana para un amplio rango de frecuencias, sin embargo, para frecuencias inferiores a la frecuencia natural del geófono, la respuesta decae

⁵ Se consideran como suelos rígidos aquellos compuestos predominantemente por gravas o arenas muy densas, y cuyo $V_{s,30}$ oscile entre 500 y 900 m/s. Por otro lado, se cataloga como suelos blandos a aquellos compuestos predominantemente por suelos finos (arcillas y/o limos) o arenas de baja compacidad, y cuyo $V_{s,30}$ oscile entre 180 y 350 m/s.

rápidamente. Por ello, los geófonos empleados en esta investigación limitan el rango de confiabilidad de las curvas de dispersión a valores mayores a 4.5 Hz. Si bien, existen geófonos de menor frecuencia natural, en general, corresponden a equipos más específicos, utilizados en investigaciones que buscan caracterizar un sitio a gran profundidad. Se privilegió el empleo de un equipo comercial “estándar” por sobre otros de mayor complejidad, ya que se desea generar metodologías que puedan ser ejecutadas utilizando los equipos de mayor uso en Chile.

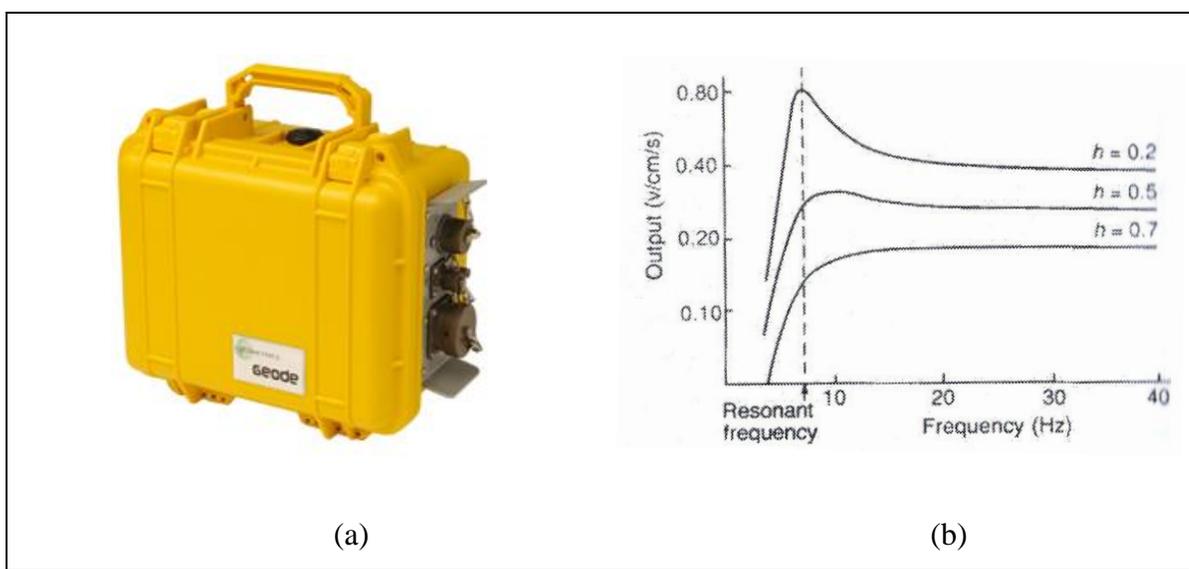


Figura 3.1: (a) Equipo de adquisición de datos (GEODE). (b) Gráfico de respuesta de los geófonos, donde h corresponde al amortiguamiento del geófono (Doyle, 1995). Valores de h para geófonos usados para el registro de ondas superficiales, oscilan entre 0.6 y 0.7 para que la respuesta por sobre la frecuencia natural, sea lo más plana posible (Foti, 2005)

El procedimiento en terreno es el siguiente:

- Ensayos activos: Se golpea a distintas distancias, y para cada una de ellas el golpe se debe repetir un cierto número de veces. Ya que no existe control sobre el ruido generado por fuentes ambientales que puedan afectar la señal registrada, ni tampoco hay control sobre el rango de frecuencias de las ondas generadas, la repetición de golpes para una misma distancia permite la posterior combinación,

con el objeto de reducir el efecto de las vibraciones ambientales con la técnica conocida como superposición de señales o *stacking* (Anexo A.1). El tiempo de registro debe ser lo suficientemente largo para registrar el paso de la onda originada por el golpe hasta el último geófono. Dependiendo del espacio disponible, se realizan ensayos activos en dos arreglos perpendiculares entre sí, con el objeto de estudiar las diferencias entre una dirección y otra, y así confirmar las características del sitio. En términos generales, el tiempo de registro de cada señal es de 2 s con intervalo de muestreo de 0.125 ms.

- Ensayos Pasivos: Se registran largos periodos de tiempo utilizando arreglos lineales (idealmente dos, perpendiculares entre sí) y un arreglo bidimensional. El protocolo para ensayos pasivos consiste básicamente en registrar 16 minutos de vibraciones ambientales (tanto en arreglos lineales como bidimensionales) con un intervalo de muestreo de 0.016 segundos. El tiempo de registro puede aumentar en zonas con bajo ruido ambiental (zonas rurales o aisladas).

Para el análisis de las señales registradas se utiliza el software GEOPSY desarrollado por Wathelet (2011). Este software permite el análisis de ensayos activos utilizando el análisis f-k considerando la dirección de propagación de ondas como conocida. Además, permite el análisis de vibraciones ambientales, utilizando los métodos f-k, f-k de alta resolución, SPAC y la razón espectral H/V. Además, permite la combinación de distintas señales para expresarlas como un promedio ya sea en tiempo o en frecuencia (*stacking*), así como el cálculo del espectro de Fourier de una señal. Estas herramientas, permiten el cálculo de las curvas de dispersión o de autocorrelación, las cuales están compuestas por un número finito de frecuencias (n_F), un valor promedio ($x_{r,i}$) y una desviación estándar asociada (σ_i) a cada frecuencia. La desviación estándar es calculada únicamente en los ensayos pasivos, a través de un análisis estadístico que realiza GEOPSY. El proceso de inversión se realiza mediante el algoritmo del vecindario modificado (Wathelet, 2008), el cual también se encuentra implementado en GEOPSY, y que permite calcular un modelo unidimensional de suelo, cuyas propiedades elásticas se ajusten a las características dispersivas de terreno. El ajuste entre las curvas obtenidas a

partir de la observaciones de terreno y las asociadas al modelo calculado se evalúa utilizando la ecuación 3.1, donde $x_{c,i}$ corresponde a los valores de las curvas de dispersión o autocorrelación del modelo calculado.

$$Misfit \text{ o } desajuste = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_F} \frac{(x_{r,i} - x_{c,i})^2}{\sigma_i n_F}} \quad (3.1)$$

Además, se utiliza el software SeisImager/SW suministrado por Geometrics, que tiene implementado el análisis “Roadside MASW” (Park y Miller, 2008) que permite el análisis de vibraciones ambientales utilizando arreglos lineales, como se describe en §2.4.3.2. Las curvas de dispersión obtenidas con este software son exportadas a un formato reconocible por GEOPSY, para realizar el proceso de inversión utilizando este mismo software.

3.2. Ensayos Activos

Son varios los aspectos que se estudiaron en relación a los ensayos activos. En primer lugar, existen distintas herramientas para el análisis de ensayos activos (Anexo A.1), los cuales permiten incrementar la calidad de los resultados. La técnica conocida como *stacking* es una de ellas, la cual permite reducir la contribución del ruido ambiental. Se estudió esta técnica con el objeto de establecer la manera más adecuada de emplearla. En segundo lugar, se estudiaron las dimensiones de los arreglos utilizados, en especial, los espaciamientos máximos y mínimos entre geófonos, y su influencia en la curva de dispersión determinada. Por último, y tal como se indicó en la sección §2.3.2.1, distintas fuentes pueden ser utilizadas en ensayos activos. En el marco de esta investigación se utilizaron dos fuentes: la caída libre de un peso de 100 kg desde tres metros de altura (Figura 3.2 a), y golpes con un martillo de 18 libras (Figura 3.2 b). La principal diferencia está en la energía aplicada al terreno, y por ende, la amplitud y el contenido de frecuencias de las señales generadas.

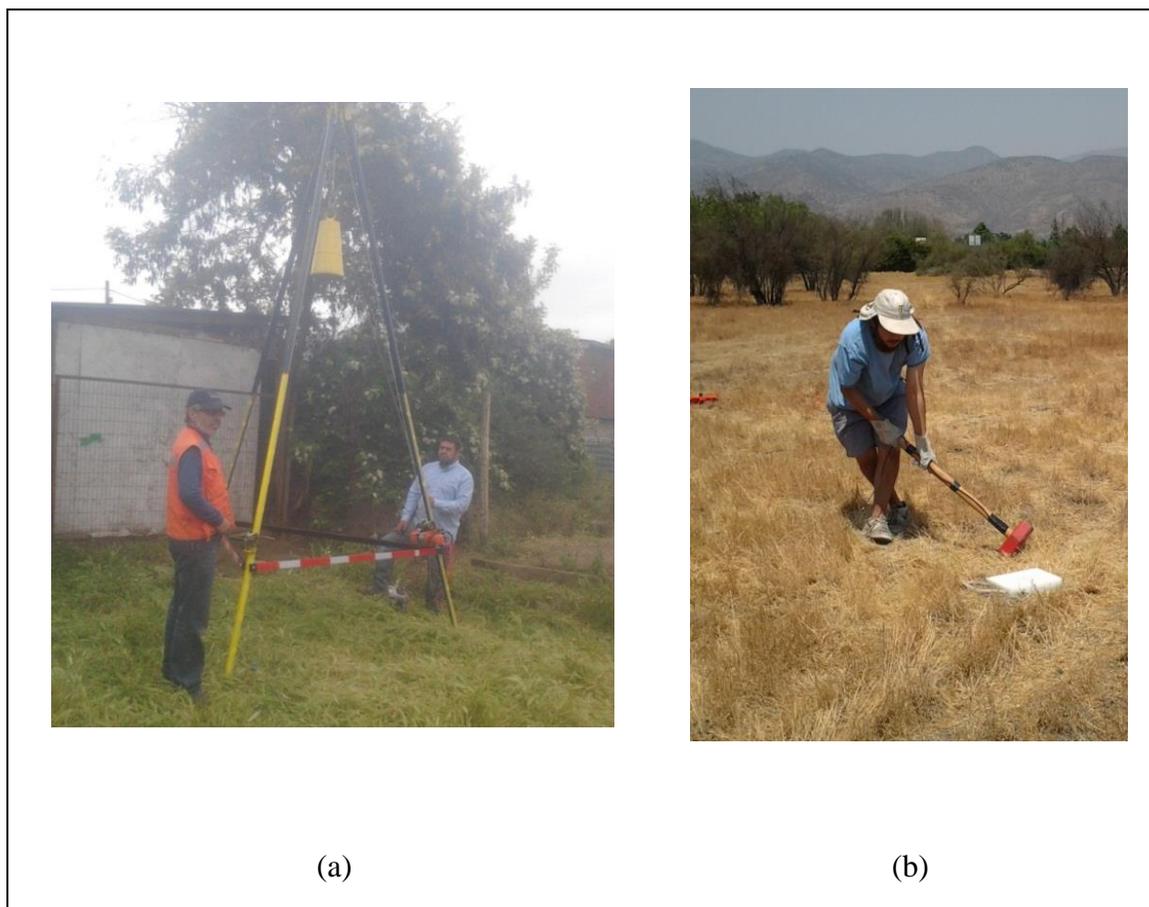


Figura 3.2: Fuentes utilizadas en ensayos activos: (a) caída de peso de 100 kg a tres metros de altura, y (b) golpes con martillo de 18 libras

3.2.1. Combinación de señales (*stacking*)

En un sitio cercano a una carretera de alto tráfico vehicular, se realizaron ensayos con 24 geófonos espaciados cada 5 metros, y se ejecutaron golpes con martillo, a 5, 10 y 15 metros de distancia desde el último geófono. En cada distancia de disparo se realizaron cinco golpes. Se seleccionó sólo una traza para cada una de las distancias de disparo, y mediante el análisis f-k, se obtuvo el diagrama de dispersión asociado a dicha traza (Figura 3.3 a, b y c). Para las tres distancias, es posible identificar la curva de dispersión sobre los 8 Hz.

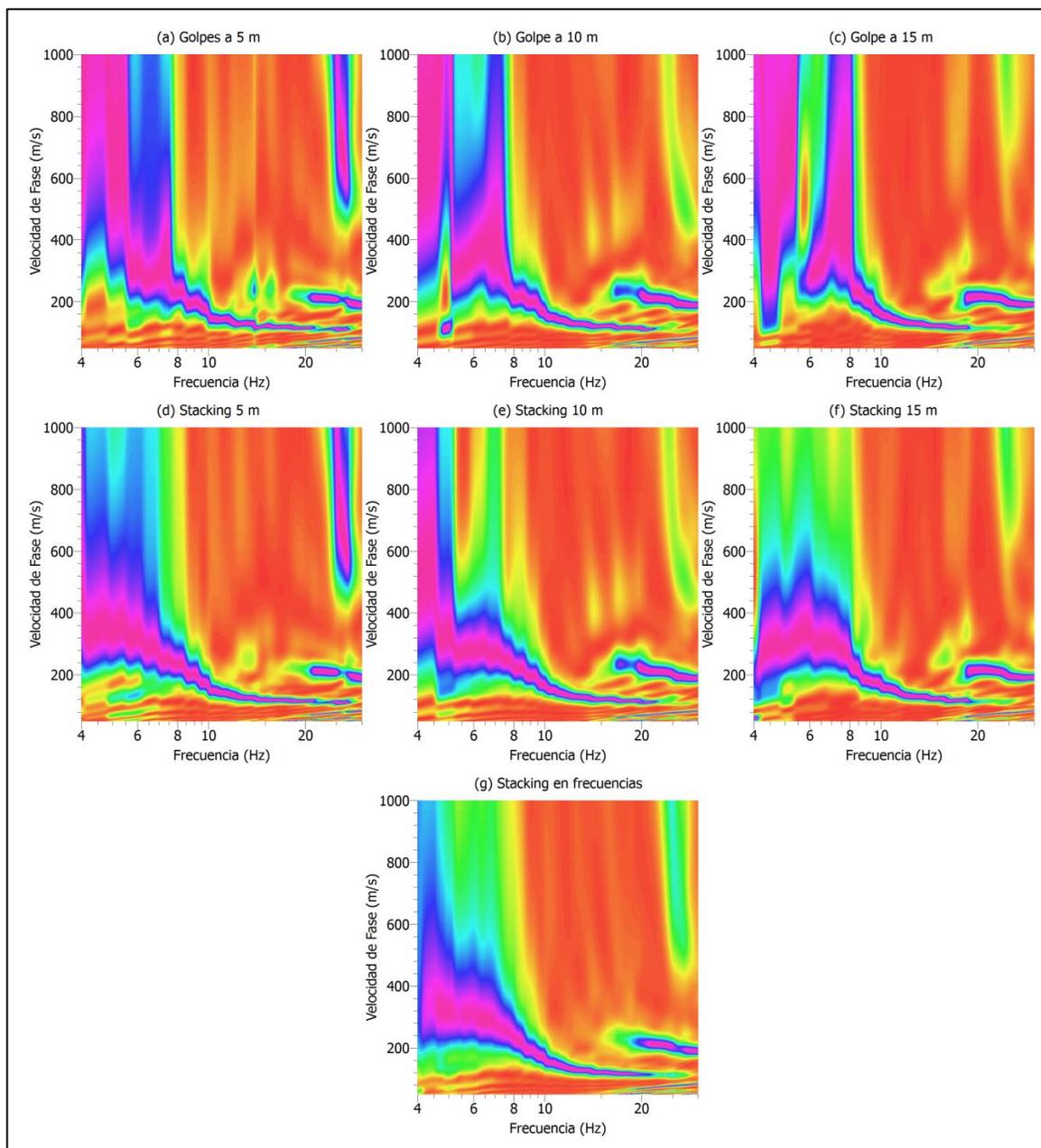


Figura 3.3: Resultados individuales con la fuente a (a) 5 m, (b) 10 m, (c) 15 m, resultados con *stacking* en tiempo de 5 trazas obtenidas con la fuente a (d) 5 m, (e) 10 m, (f) 15 m, y (g) resultados del *stacking* en frecuencia de (d), (e) y (f)

Tal como se indica en el Anexo A.1, existen dos enfoques para el *stacking*: combinar las señales en tiempo o en frecuencia. Para el *stacking* en tiempo, las señales deben ser originadas por la misma fuente y deben tener un tiempo inicial común. En

términos simples, el *stacking* en tiempo consiste en sumar las trazas de forma de eliminar el ruido de naturaleza aleatoria. Por ello, se suman las señales registradas para una misma distancia de disparo y se calcula el diagrama de dispersión asociado a cada distancia (Figura 3.3 d, e y f). En términos generales, se observa que la resolución de la curva de dispersión para frecuencias bajas mejora, y es posible identificar la curva hasta los 5 Hz para los golpes a 5 y 10 metros, y hasta los 6 Hz para el golpe a 15 metros.

Por último, se realiza el *stacking* en frecuencias de los diagramas de dispersión obtenidos con el *stacking* en tiempo para las tres distancias. Ya que el promedio se efectúa por frecuencias, no hay inconvenientes en combinar golpes a distintas distancias. En el diagrama de dispersión resultante (Figura 3.3 g) es posible identificar la curva de dispersión hasta los 4.5 Hz (frecuencia natural de los geófonos). De acuerdo a los resultados, se adopta este procedimiento como el protocolo para el *stacking* de las señales obtenidas con fuente activa.

3.2.2. Configuraciones de arreglos y distancias de disparo

Los arreglos lineales utilizados en ensayos activos quedan definidos por el número de geófonos utilizados (N) y el espaciamiento (Δx) entre ellos. Las dimensiones del arreglo definen las longitudes de onda máxima y mínima que se pueden explorar, tal como se indicó en la sección §2.3.2.1, lo que a su vez define, los rangos de la profundidad de exploración. Dado que el objetivo está en explorar los primeros 30 metros de profundidad, se evalúa el desempeño de arreglos de geófonos con distintas aperturas máximas (D_{max}), los cuales se indican en la Tabla 3.1 Los ensayos activos se efectuaron utilizando como fuente el martillo de 18 lb, y se llevaron a cabo en el mismo sitio estudiado en la sección anterior (§3.2.1). En todos ellos, la distancia entre la fuente y el geófono más cercano fue de 10 metros.

Tabla 3.1: Características de los arreglos usados en ensayos activos con golpes de martillo de 18 lb en un ambiente urbano

Arreglo	Δx (m)	N	D_{max} (m)
L12_3	3	12	33
L24_3	3	24	69
L12_5	5	12	55
L24_5	5	24	115

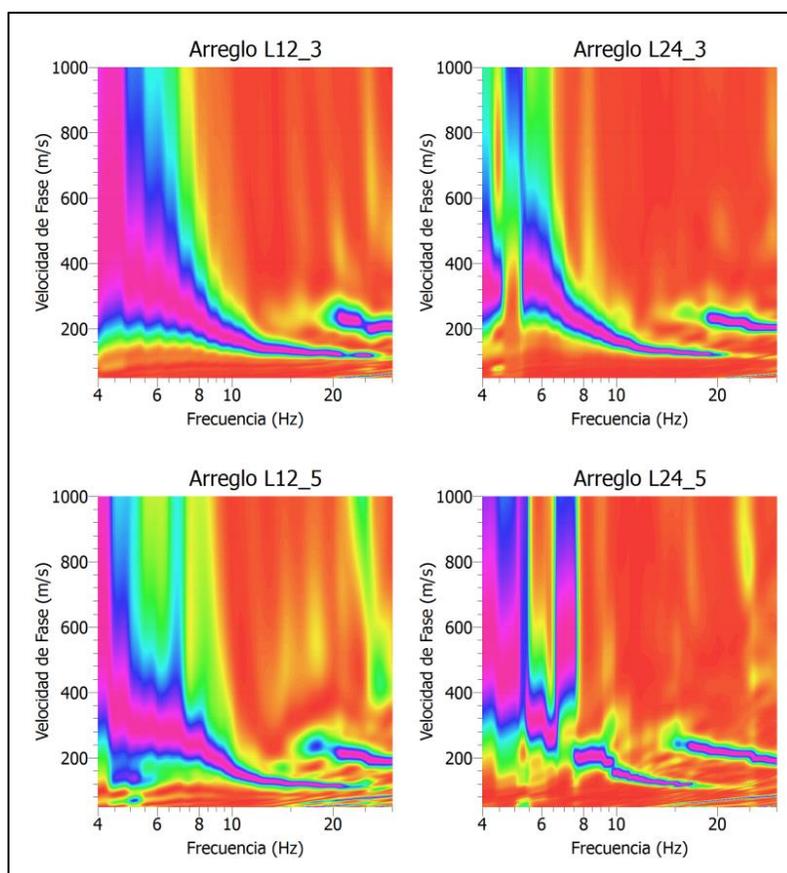


Figura 3.4: Diagramas de dispersión obtenidos con arreglos de distintas dimensiones en ensayos con golpes de martillo de 18 lb en un ambiente urbano

En la Figura 3.4 se muestran los diagramas de dispersión obtenidos con estos arreglos. Los arreglos L12_3, L24_3 y L12_5 muestran resultados satisfactorios hasta

aproximadamente 5, 5.5 y 4.5 Hz, respectivamente. Por otro lado, en el diagrama obtenido con el arreglo más largo (L24_5), es posible identificar la curva con claridad hasta los 7.5 Hz aproximadamente, observándose otras concentraciones de energía que pueden ser asociadas al modo fundamental de la curva de dispersión entre 5.5 y 6.5 Hz, sin embargo, con evidentes problemas de resolución. En general, se espera que los arreglos de mayor longitud sean los que alcancen frecuencias más bajas, sin embargo, en muchas ocasiones, en las señales registradas en los últimos geófonos la contribución por parte de vibraciones ambientales es superior a la de la fuente. Este es un problema recurrente en ensayos con fuentes de baja energía, llevados a cabo en zonas urbanas y/o con alto ruido ambiental (el sitio estudiado es cercano a una carretera).

Para este caso, la frecuencia máxima explorada en el modo fundamental de la curva de dispersión, está asociada a la profundidad mínima de exploración (longitud de onda más corta), por ello es importante comparar los resultados obtenidos con distintos espaciamientos entre geófonos. Con los arreglos L12_3 y L24_3 es posible identificar el modo fundamental de la curva de dispersión hasta frecuencias cercanas a los 30 Hz, mientras que con los arreglos L12_5 y L24_5, esta frecuencia se limita a los 24 Hz aproximadamente. Esta diferencia se debe al fenómeno conocido como *aliasing* espacial, descrito en la sección §2.4.2.3, el cual está ligado al espaciamiento mínimo entre geófonos. Para frecuencias altas es posible identificar un modo superior, sin embargo, la longitud de onda mínima alcanzada es similar a la alcanzada por el modo fundamental.

Se evaluó el desempeño de los arreglos L12_5 y L24_5 en un segundo sitio, ubicado en una zona rural de bajo ruido ambiental. Los diagramas de dispersión asociados a cada arreglo se indican en la Figura 3.5, y en ellos se observa que ambos entregan resultados satisfactorios hasta los 4.5 Hz. La principal diferencia entre ambos resultados, es que en el diagrama obtenido con el arreglo de mayor longitud (L24_5) se observa que la curva está un poco mejor definida por sobre los 6 Hz, pero son equivalentes desde un punto de vista práctico. Si bien, los arreglos de mayor longitud pueden mejorar la calidad de los resultados, esta mejora dependerá del ruido ambiental registrado. En general, en situaciones de ruido ambiental intenso, los arreglos de gran longitud no muestran ser muy eficientes, y requerirán del *stacking* de varios registros, o el uso de fuentes activas de gran

energía, para que se pueda diferenciar el golpe registrado en los geófonos más lejanos a la fuente. Por último, es muy importante tener en cuenta que el espaciamiento mínimo entre geófonos del arreglo utilizado, define la profundidad mínima de exploración.

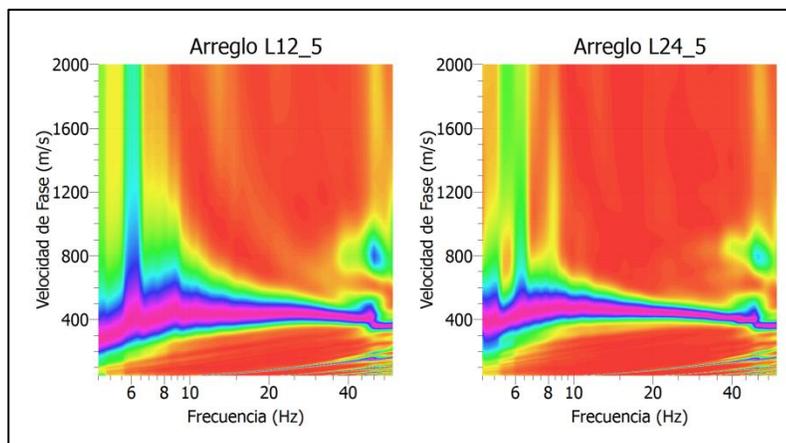


Figura 3.5: Diagramas de dispersión obtenidos con arreglos de distintas dimensiones en ensayos con golpes de martillo de 18 lb en un ambiente rural

3.2.3. Efecto del tipo de fuente

Para ilustrar el efecto del tipo de fuente y la energía aplicada al suelo, se estudian los resultados en dos tipos de suelos distintos utilizando arreglos lineales de 12 geófonos espaciados cada 5 metros. El primero corresponde a un suelo rígido típicamente constituidos por gravas, mientras el segundo, es un suelo más blando, constituido predominantemente por finos y/o arenas de baja compacidad. La comparación se basa en estas dos situaciones ya que constituyen, aproximadamente, los casos extremos en la mayor parte de las aplicaciones prácticas. Es importante mencionar que los sitios estudiados se ubican en zonas urbanas. Los espectros de amplitud y las curvas de dispersión obtenidas para el suelo rígido y el suelo fino estudiado, se indican en la Figura 3.6 y Figura 3.7, respectivamente.

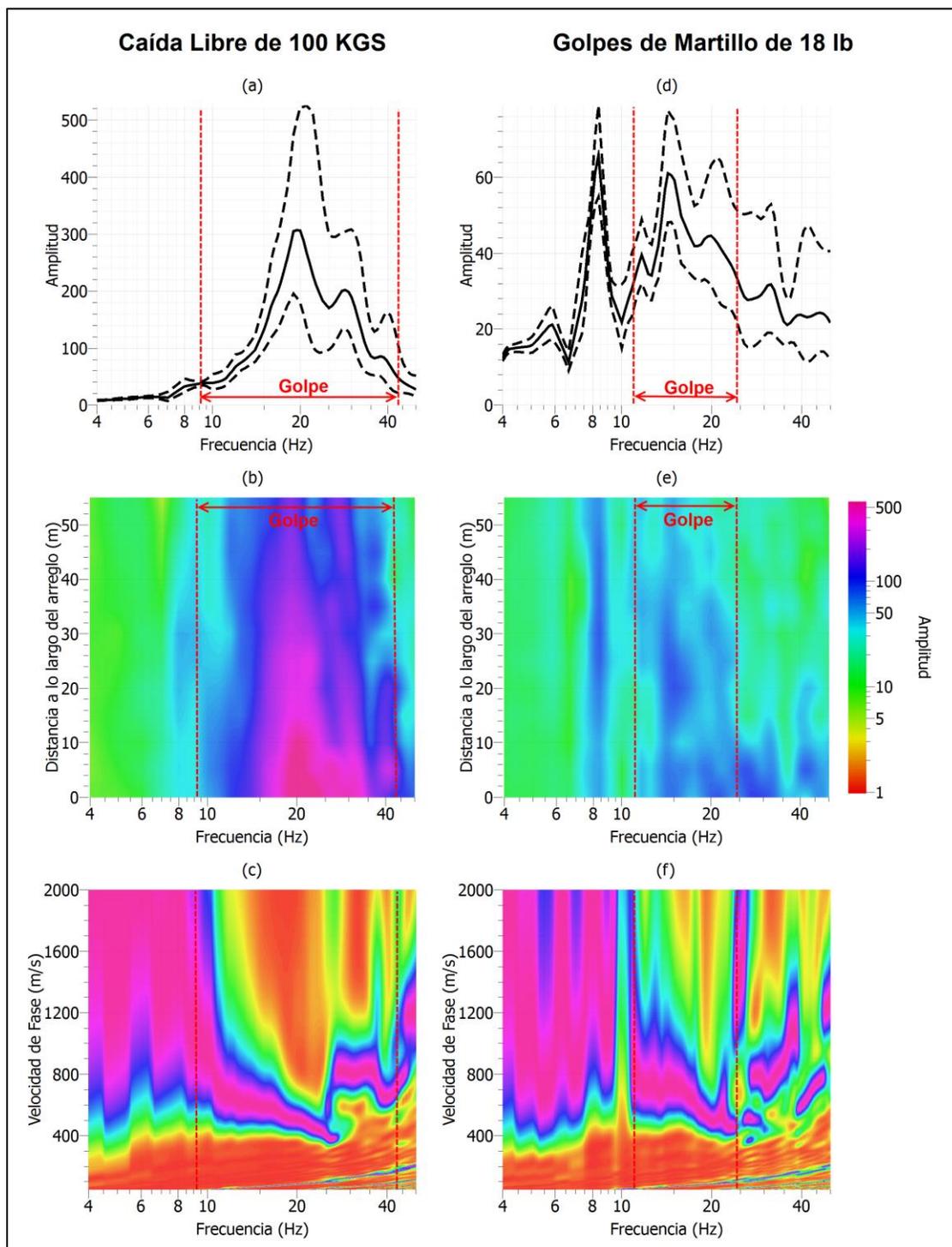


Figura 3.6: Espectros de amplitud obtenidos en un suelo rígido: (a) espectro promedio, (b) espectro para distintas distancias a la fuente, y (c) curva de dispersión asociada utilizando caída libre de 100 kg; (d) espectro promedio, (e) espectro para distintas distancias a la fuente, y (f) curva de dispersión asociada utilizando golpes de martillo. Entre líneas segmentadas, se indica el rango de frecuencias del frente de ondas generado por el golpe.

Los espectros de amplitud obtenidos para el suelo rígido, con la caída de los 100 kg (Figura 3.6a y c) y los golpes con martillo (Figura 3.7b y d), muestran grandes diferencias tanto en las amplitudes alcanzadas, como el rango de frecuencias de las señales registradas. En el espectro obtenido con la caída de los 100 kg, se observan amplitudes hasta siete veces superiores a las obtenidas con los golpes de martillo. Por otro lado, el modo fundamental de la curva de dispersión obtenida para la caída de 100 Kg (Figura 3.3e) está definida para frecuencias entre 9 y 26 Hz aproximadamente, mientras que en los resultados obtenidos en el ensayo con golpes de martillo (Figura 3.3f) es posible identificar la curva de dispersión con claridad para frecuencias entre 12 y 21 Hz aproximadamente.

El rango de frecuencias de la curva de dispersión obtenida con la caída de 100 kg, es el mismo para el cual es posible identificar una amplitud *peak* en el espectro de amplitudes. En ese mismo espectro, se observan *peaks* locales ubicados a mayores frecuencias, para las cuales no es posible identificar con claridad el modo fundamental, y se empiezan a observar concentraciones de energía asociadas a modos superiores. En el espectro obtenido con el martillo, se observan dos *peaks*: el primero (15 Hz) se puede asociar al tramo de frecuencias para el cual se identifica la curva de dispersión, mientras el segundo (8 Hz) tiene origen en una fuente pasiva externa, ya que su amplitud es constante para las distintas distancias a la fuente (Figura 3.6d). En el caso de fuentes activas, la amplitud decrece en función de la distancia de la fuente, por lo que dicho *peak* sólo puede ser asociado a fuentes pasivas. Esto último refleja que la presencia de señales ambientales con amplitudes similares a las generadas con el martillo distorsiona la forma del espectro de amplitudes, y por ende, impiden la identificación del modo fundamental para un mayor rango de frecuencias. Cabe notar, que ambos ensayos se realizaron en distintos instantes de tiempo, por ello, el segundo *peak* sólo es observable en el ensayo con golpes de martillo, el cual fue realizado en un momento de mayor tráfico vehicular.

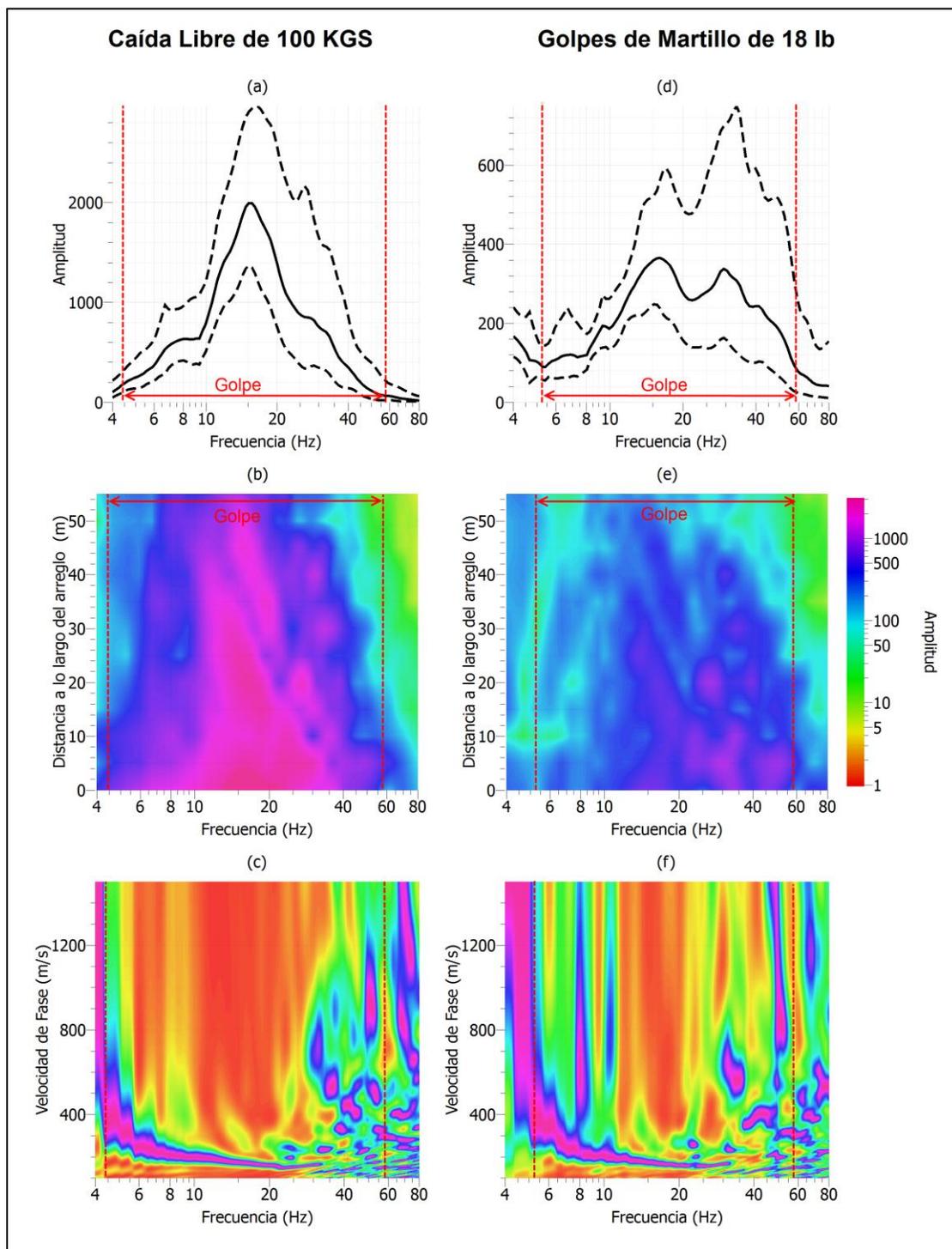


Figura 3.7: Espectros de amplitud obtenidos en un suelo blando: (a) espectro promedio, (b) espectro para distintas distancias a la fuente, y (c) curva de dispersión asociada utilizando caída libre de 100 kg; (d) espectro promedio, (e) espectro para distintas distancias a la fuente, y (f) curva de dispersión asociada utilizando golpes de martillo. Entre líneas segmentadas, se indica el rango de frecuencias del frente de ondas generado por el golpe.

En resumen, la caída de los 100 kg genera amplitudes muy superiores a las de vibraciones ambientales, lo que hace posible la identificación de la curva de dispersión para un rango de frecuencias más amplio. Mientras las amplitudes generadas por el golpe de martillo, sólo permiten identificar la curva de dispersión para un tramo de frecuencias muy acotado, siendo un problema muy grave en presencia de ruido ambiental, como es el caso en estudio.

Por otro lado, el espectro de amplitud obtenido con la caída de 100 kg para el suelo más blando (Figuras 3.7a y c), indica un contenido de frecuencias suficiente para definir la curva de dispersión por sobre los 25 Hz. Sin embargo, a partir de esa frecuencia, no es posible identificar concentraciones de energía y asociarlas a la curva de dispersión (Figura 3.7e), ya que la frecuencia máxima de la curva de dispersión está definida por el espaciamiento mínimo entre geófonos. Esto se repite para los resultados obtenidos con golpes de martillo (Figuras 3.7b, d y f), por tanto el análisis estará centrado en las frecuencias mínimas identificadas para cada curva de dispersión.

En el espectro obtenido con el martillo se observa que a bajo los 5 Hz la amplitud comienza a aumentar, lo que se explicaría debido a la influencia del ruido ambiental para ese tramo de frecuencias. En efecto, la curva de dispersión obtenida con golpes de martillo, sólo es identificable hasta esa frecuencia. Por otro lado, con la caída de 100 Kg la curva de dispersión es identificable hasta los 4.5 Hz aproximadamente. Bajo esta frecuencia, las amplitudes observadas en el espectro de la caída de los 100 kg, son similares a las obtenidas bajo los 5 Hz con golpes de martillo. Esto permite concluir, que si bien, las amplitudes generadas por el golpe de martillo son 4 a 5 veces inferiores que las obtenidas con la caída de 100 kg, la frecuencia mínima explorada en ambos casos es muy similar.

Para cuantificar la mejora obtenida con una fuente de mayor energía, se estudiaron los resultados obtenidos en tres ensayos con caída de 100 kg y diez con golpes de martillo, tanto en suelos rígidos, como en suelos más blandos. En la Tabla 3.2, se indican las frecuencias (f_{\min} y f_{\max}) y longitudes de onda (λ_{\min} y λ_{\max}) máxima y mínima alcanzadas al utilizar la caída libre de 100 kg sobre suelos rígidos. En la Tabla 3.3 se indican estos

mismos valores, pero utilizando golpes con martillo. La longitud de onda se puede considerar como un estimador de la profundidad explorada.

Tabla 3.2: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con caída libre de 100 kg en suelos rígidos

Caso	f_{\min} (Hz)	f_{\max} (Hz)	λ_{\min} (m)	λ_{\max} (m)
A01	6,00	25,00	24,49	130,05
A02	6,30	40,00	22,19	154,22
A03	5,80	31,65	15,32	170,26
Promedio	6,03	32,22	20,67	151,51

Tabla 3.3: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con golpes de martillo de 18 libras en suelos rígidos

Caso	f_{\min} (Hz)	f_{\max} (Hz)	λ_{\min} (m)	λ_{\max} (m)
B01	10,00	45,00	9,35	73,22
B02	11,80	35,00	12,12	72,79
B03	11,20	50,00	9,07	63,15
B04	14,85	33,00	8,20	38,81
B05	12,50	32,26	13,51	83,00
B06	15,50	35,00	9,64	40,54
B07	14,25	28,84	13,79	41,10
B08	14,00	27,00	9,66	46,25
B09	12,23	30,16	10,97	49,26
B10	13,22	20,00	25,43	52,19
Promedio	13,20	35,40	11,39	53,71

En general, se observa que al utilizar la caída libre de 100 kg, la frecuencia mínima obtenida disminuye considerablemente, ya que para los diez casos con golpes de martillo, ésta es superior a 10 Hz; mientras para los casos estudiados con caída libre de 100 Kg es siempre inferior a 6.5 Hz. A su vez, en los casos estudiados con caída libre de 100 Kg, se observa que la longitud de onda máxima supera los 130 metros, mientras que la longitud de onda obtenida con golpes de martillo es, en promedio, igual a 53 metros, a priori, insuficientes para una exploración de los primeros 30 metros de profundidad.

En los resultados obtenidos con golpe de martillo, se observan muchas diferencias en la máxima longitud de onda explorada, entre los distintos casos estudiados. La mayor longitud de onda explorada se observa en el caso B05, el cual se encuentra ubicado en una zona urbana, pero con bajo tráfico vehicular a sus alrededores. A su vez, la peor exploración se logra en el caso B04, el cual es cercano a una calle de alto tráfico vehicular, y muy cercano a los trabajos de excavación para una construcción, por lo que la baja exploración en términos de longitud de onda probablemente es atribuible al alto ruido en el lugar.

Del mismo modo que en suelos rígidos, las frecuencias y longitudes de onda máxima y mínima, observadas para distintos casos en suelos blandos se resumen en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5. En promedio, se observa que la frecuencia mínima de exploración usando como fuente los golpes con martillo, supera en 1.5 Hz a la frecuencia mínima explorada que se obtiene usando como fuente la caída de los 100 kg. Una vez más, la longitud de onda mínima queda controlada por el espaciamiento mínimo entre geófonos.

El caso C03 presenta un comportamiento distinto en términos de la longitud de onda máxima explorada, pues este valor es menor a la longitud de onda máxima promedio explorada utilizando golpes con martillo. Este caso corresponde a un sitio ubicado en la ciudad de Concepción, compuesto predominantemente por suelos finos, y cuyo diagrama de dispersión queda limitado por la frecuencia fundamental de los geófonos. Por lo tanto, es más una limitación de equipos que metodológica.

Tabla 3.4: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con caída libre de 100 kg en suelos blandos

Lugar	f_{\min} (Hz)	f_{\max} (Hz)	λ_{\min} (m)	λ_{\max} (m)
C01	4,50	23,75	5,49	71,34
C02	4,40	24,00	6,29	114,30
C03	4,00	30,00	6,57	54,27
Promedio	4,30	25,92	6,12	79,97

Tabla 3.5: Valores máximos y mínimos de curvas de dispersión obtenidas con golpes de martillo de 18 libras en suelos blandos

Caso	f_{\min} (Hz)	f_{\max} (Hz)	λ_{\min} (m)	λ_{\max} (m)
D01	6,12	30,00	8,81	58,18
D02	5,80	36,60	6,02	69,98
D03	5,30	28,53	8,66	73,78
D04	4,00	38,70	5,21	91,85
D05	7,39	40,00	3,88	24,88
D06	5,50	27,00	5,80	68,20
D07	5,50	25,00	6,80	49,50
D08	4,50	30,00	7,09	66,93
D09	6,00	30,00	5,20	40,59
D10	8,20	40,00	4,40	37,73
Promedio	5,83	32,58	6,19	58,16

En los casos estudiados con golpes de martillo, los casos D05 y D10 son los que entregan la peor exploración del terreno en términos de curva de dispersión. El primero se encuentra a menos de 200 metros de una autopista de alto tráfico vehicular (autopista Vespucio Norte, comuna de Huechuraba, región Metropolitana), mientras el segundo, se encuentra en pleno centro de la ciudad de Concepción. Ambos presentan un alto contenido

de ruido ambiental que impide una exploración satisfactoria en el tramo de las altas frecuencias. Por otro lado, el caso D04 es el que presenta la mejor exploración en profundidad, y se encuentra ubicado en una zona rural, con muy bajo ruido ambiental.

En resumen, en suelos más rígidos, las fuentes de mayor energía aumentan en mayor medida el rango de frecuencias para el cual se define la curva de dispersión, a diferencia de suelos más blandos, donde este aumento es menos relevante. En promedio, en suelos blandos se logra reducir la frecuencia mínima de 5.8 a 4.5 Hz, mientras en suelos rígidos la mejora es de 13.2 a 6 Hz. En término de longitud de onda, las diferencias también son importantes. Por otro lado, se ha puesto de manifiesto que el alto ruido ambiental es una limitante importante en ensayos activos con fuentes de baja energía como los golpes con martillo.

3.3. Ensayos Pasivos

3.3.1. Configuraciones de arreglos

Los resultados en los ensayos pasivos están fuertemente controlados por las dimensiones de los arreglos utilizados. En el marco de esta investigación, se utilizaron arreglos lineales compuestos por 12 y 24 geófonos espaciados cada 5 metros (indicados como L12 y L24 en la Tabla 3.1), y arreglos circulares con las dimensiones indicadas en la Tabla 3.6. Los arreglos lineales serán analizados utilizando el método Roadside MASW, mientras para los arreglos bidimensionales se utiliza el método f-k.

Al observar una curva de dispersión obtenida con un arreglo lineal (Figura 3.8) o con un arreglo bidimensional (Figura 3.9), se pueden diferenciar tres zonas (ver sección §2.4.2.3):

- Baja resolución: donde no se pueden identificar zonas de concentración energía.
- Buena resolución, donde la curva de dispersión se define con claridad.
- Zona de *aliasing*, donde se identifican varios *peaks* de energía.

Tabla 3.6: Configuraciones bidimensionales de geófonos para los ensayos pasivos

Arreglo	Descripción
R9_24	Círculo regular con 24 geófonos y 9.7 metros de radio.
R9_12	Círculo regular con 12 geófonos y 9.7 metros de radio.
R19_24	Círculo regular con 24 geófonos y 19.2 metros de radio.
R19_12	Círculo regular con 12 geófonos y 19.2 metros de radio.

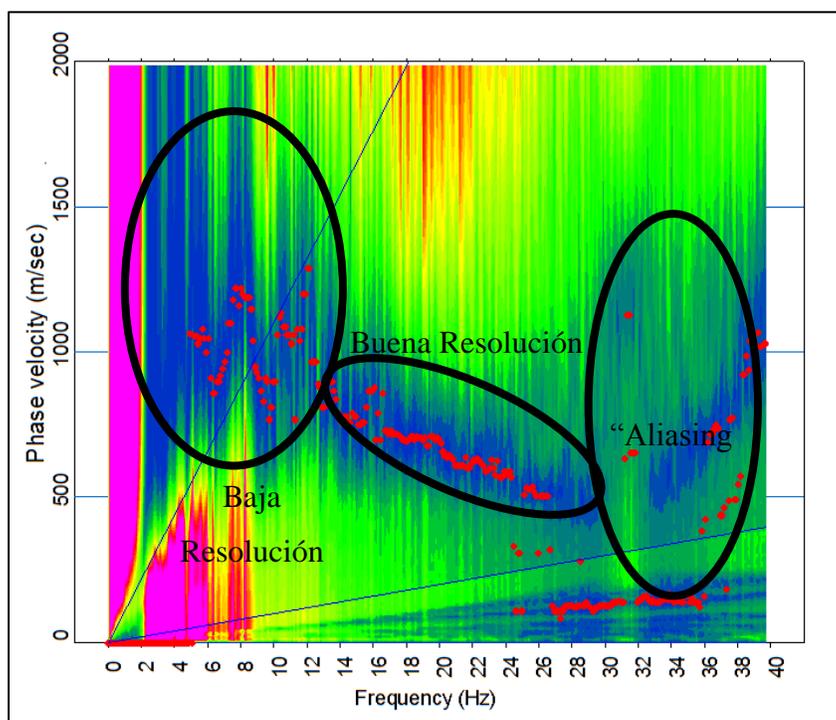


Figura 3.8: Zonas de baja y alta resolución en un gráfico de energía resultante del análisis Roadside MASW para un ensayo pasivo con arreglo lineal

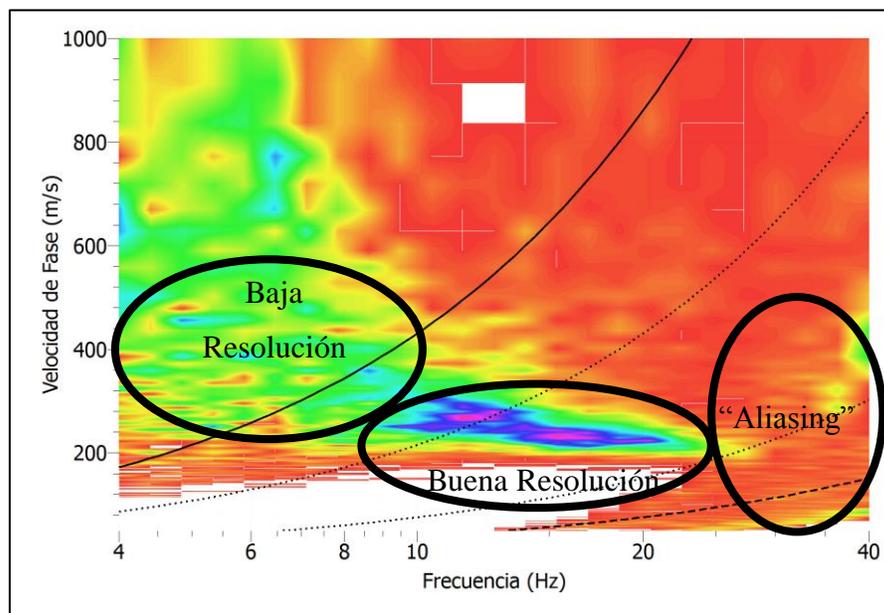


Figura 3.9: Zonas de baja y alta resolución en un gráfico de energía resultante del análisis f-k para un ensayo pasivo con arreglo bidimensional

Las zonas de baja resolución están asociadas al límite que impone el ancho del lóbulo central de la función de respuesta del arreglo, mientras que el *aliasing* está asociado al espaciamiento mínimo entre geófonos. Tanto para el método Roadside MASW, como en el método f-k existen límites teóricos que determinan el rango para el cual la información entregada puede ser confiable.

En la Figura 3.8 se observan dos líneas azules rectas, que definen los límites teóricos para los cuales la información entregada por arreglos lineales es confiable. Estos límites dependen del espaciamiento máximo (D_{max}) y mínimo (d_{min}) entre geófono, los que definen la longitud de onda máxima (λ_{max}) y mínima (λ_{min}) de exploración:

$$\begin{aligned} d_{min} &= \lambda_{min}/2 \\ D_{max} &= \lambda_{max}/2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

En la Figura 3.9 se observan líneas continuas y segmentadas, los cuales definen los límites teóricos entre los cuales la información obtenida por un arreglo bidimensional es

confiable. Estos límites fueron calculados a partir de la función de la respuesta del arreglo (Figura 3.10) y las recomendaciones de Wathelet (2005, 2012).

En la Figura 3.10a se muestra la superposición de la respuesta del arreglo para frentes de onda con distintos ángulos de propagación; mientras que en la Figura 3.10c se observa la respuesta del arreglo R9_12 para distintas combinaciones de k_x y k_y . Para evitar los problemas de baja resolución y *aliasing*, se definen límites para los números de onda (k_{min} y k_{max}) donde la información entregada por el método f-k aplicado a arreglo bidimensionales es válida (Figura 3.10b). Distintos autores (Asten y Henstridge, 1984; Wathelet, 2005), han fijado el valor de k_{max} para aquel número de onda en que al menos un *peak* local exceda en 0.5 veces la amplitud del *peak* central para alguno de los ángulos de propagación. Por otro lado, k_{min} lo fijan para aquel número de onda para el cual el *peak* central llega a 0.5 veces su máxima amplitud (Figura 3.10a).

De acuerdo a Wathelet (2012), para números de onda menores a k_{min} , la resolución de los resultados comienza a disminuir, y para valores bajo $k_{min}/2$ los resultados no son válidos en ningún caso. Además, Wathelet (2005) recomienda, que en el caso de que los *peaks* locales sean del mismo orden en términos de magnitud que el *peak* central, se utilice como límite hacia las máximas frecuencias $k_{max}/2$. Para arreglos de geometría regular (como los utilizados en esta investigación), k_{min} y k_{max} están fuertemente asociados a las mínimas y máximas aperturas de los arreglos (Wathelet, 2005), siendo mucho más impredecibles para geometrías más irregulares.

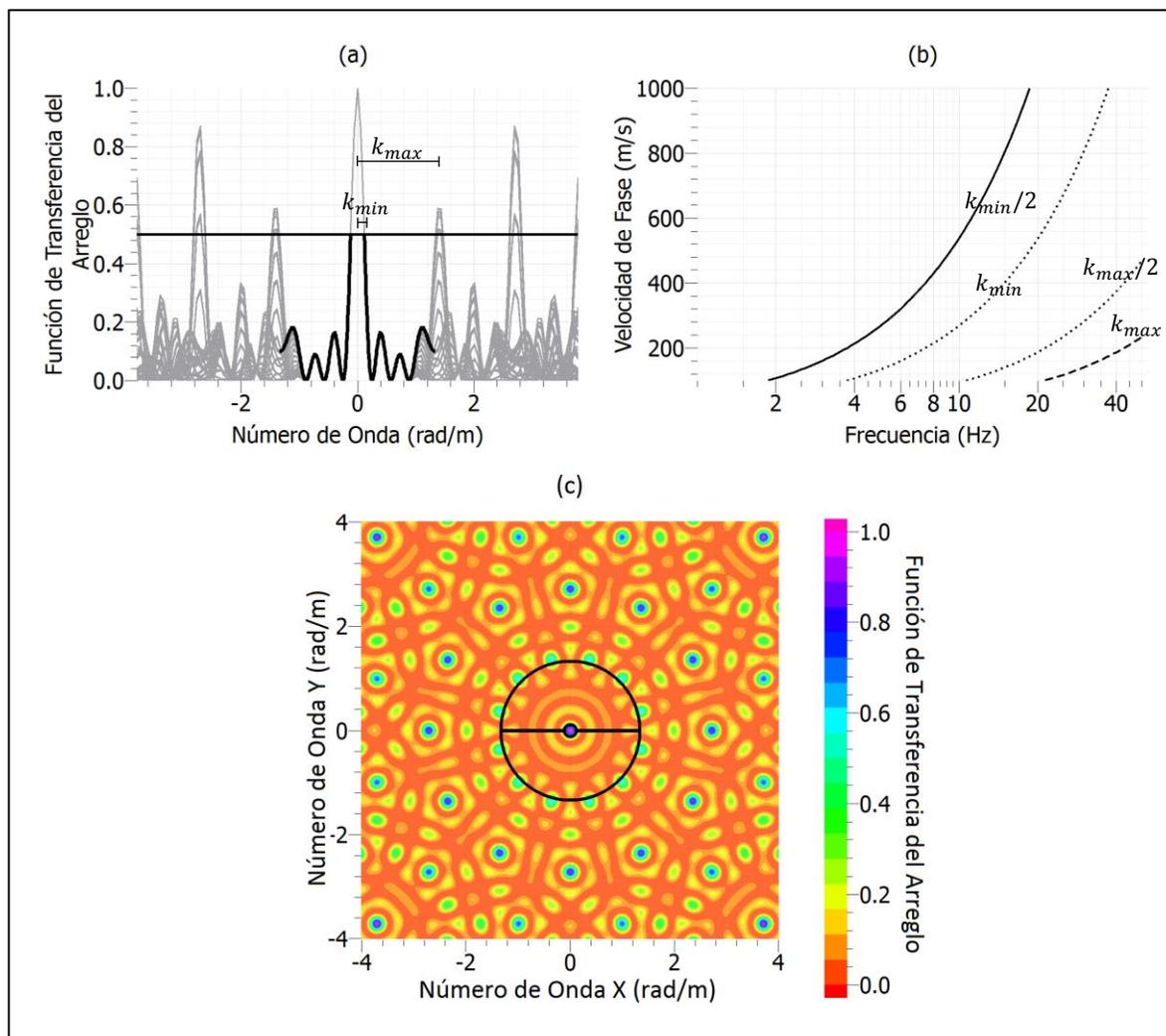


Figura 3.10: (a) respuesta del arreglo para distintos ángulos de propagación del frente de ondas, (b) límites teóricos para los arreglos bidimensionales, (c) respuesta teórica del arreglo R9_12 en el plano k_x, k_y

3.3.1.1. Arreglos lineales

Se evalúa el desempeño de los mismos arreglos utilizados en ensayo activos (L12 y L24 descritos en la Tabla 3.1), en dos sitios ubicados en zonas urbanas, pero con diferentes condiciones de tráfico vehicular. En ambos sitios se utilizó el mismo tiempo de registro para el análisis.

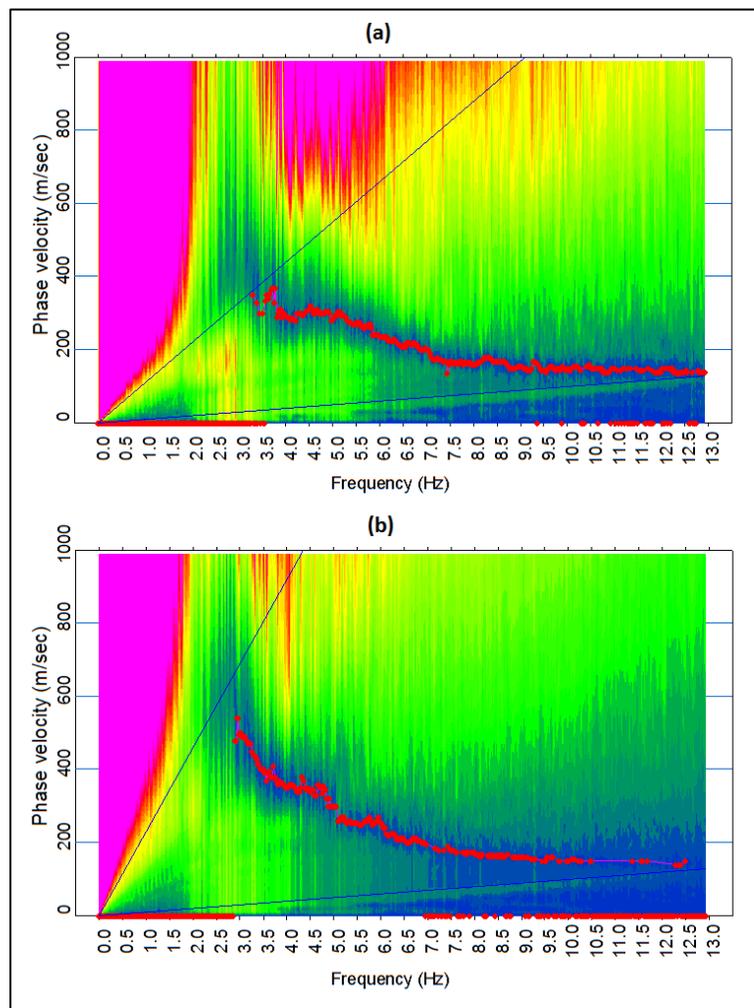


Figura 3.11: Curvas de dispersión obtenidas con arreglos lineales usando (a) 12 y (b) 24 geófonos espaciados cada 5 metros en un mismo suelo blando

En la Figura 3.11 se indican los diagramas de dispersión obtenidas en un sitio de alto tráfico vehicular. Con el arreglo de 12 geófonos es posible identificar la curva de dispersión entre 3.5 y 13 Hz aproximadamente, mientras que con el arreglo 24 geófonos, se puede identificar la curva para frecuencias entre 3 y 13 Hz aproximadamente. Si bien, se observa una mejora al aumentar el espaciamiento máximo entre geófonos, la mejora no es tan significativa.

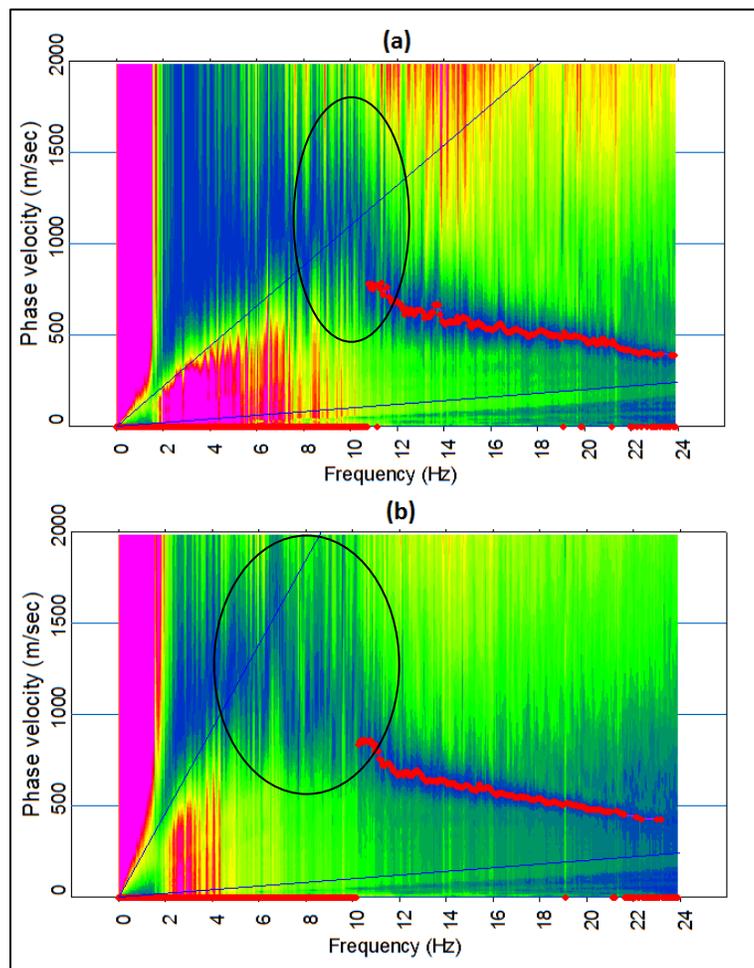


Figura 3.12: Curvas de dispersión obtenidas con arreglos lineales usando (a) 12 y (b) 24 geófonos espaciados cada 5 metros en un suelo rígido

En la Figura 3.12 se muestran los diagramas de dispersión obtenidos con estos arreglos en el sitio de bajo tráfico vehicular. En ellos, la curva de dispersión es identificable con claridad para frecuencias similares a 11 Hz para el arreglo de 12 geófonos, mientras que la frecuencia mínima explorada es cercana a los 10 Hz para el arreglo de 24 geófonos. En ambos casos se observa que no es posible identificar la curva de dispersión hasta los límites teóricos, ya que las concentraciones de energía son difusas para esos rangos de frecuencias (zona encerrada en elipses negras).

En este último caso, el hecho de que no se haya podido explorar satisfactoriamente hasta los límites teóricos en las frecuencias bajas, puede ser atribuido a la baja cantidad de ruido ambiental registrado para este nivel de frecuencias. Sin embargo, también puede estar asociado a la incertidumbres inherentes al método producto del desconocimiento de la dirección de propagación del frente de ondas, y que de acuerdo a las investigaciones de Park y Miller (2008) pueden inducir a errores superiores al 10%. De todas formas, es recomendable utilizar tiempos de registro más largos en situaciones con bajo ruido ambiental.

3.3.1.2. Arreglos bidimensionales

Se evalúa el desempeño de los cuatro arreglos bidimensionales utilizados en esta investigación (Tabla 3.6) en un sitio ubicado en una zona urbana, pero lejos de tráfico vehicular intenso. Los diagramas de dispersión obtenidos se grafican en la Figura 3.13. En ellos, además se indican los límites teóricos asociados a cada arreglo.

Los resultados obtenidos con los arreglos de 9.7 m de radio son muy similares entre sí, ya que ambos exploran satisfactoriamente hasta los 14 Hz aproximadamente (límite teórico del arreglo). Además, en ambos la frecuencia máxima explorada es cercana a los 28 Hz, no alcanzando la frecuencia mínima de exploración entregada por los límites teóricos del arreglo. Por el contrario, con los arreglos de 19.2 m de radio, si bien en ambos, se explora satisfactoriamente hasta los 10 Hz (muy cercano al límite teórico de los arreglos), se observan problemas de *aliasing*. Por ejemplo, para frecuencias sobre los 21 Hz con el arreglo de 12 geófonos (R19_12).

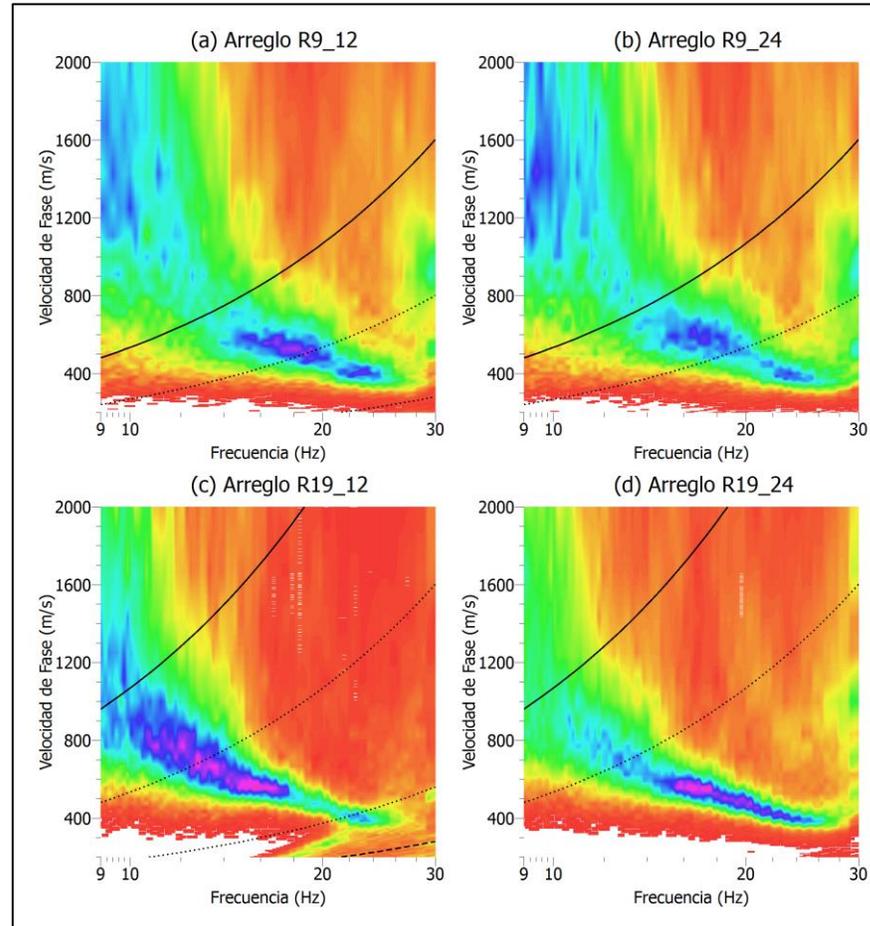


Figura 3.13: Curvas de dispersión obtenidas en ensayos pasivos con arreglos (a) R9_12, (b) R9_24, (c) R19_12 y (d) R19_24

3.3.2. Tiempo de Registro y Filtro de señales

El método f-k resuelve el problema para un segmento o intervalo de tiempo en particular, por ello las señales registradas son divididas en ventanas de tiempo, tal como se indica en la Figura 3.14. Además, se resuelve el problema para una frecuencia en particular, por ello se utilizan ventanas de tiempo dependientes de la frecuencia. Típicamente, se utilizan ventanas de tiempo iguales 10 veces el recíproco de la frecuencia evaluada (periodo).

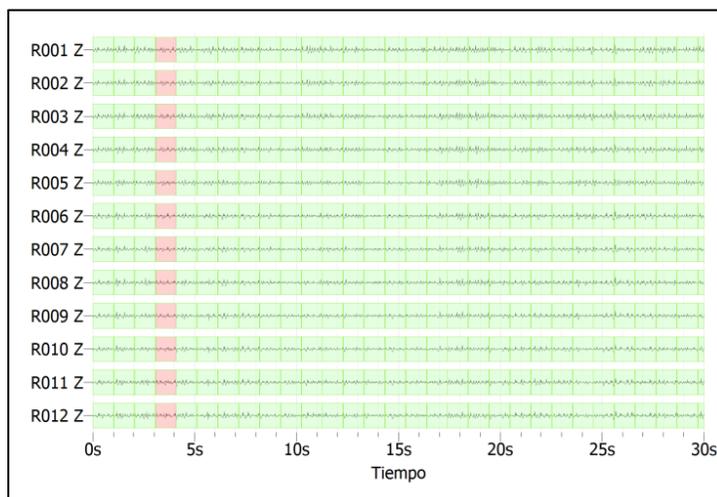


Figura 3.14: Registro de vibraciones ambientales analizado con ventanas de tiempo de 1 segundo para frecuencias de 10 Hz

Además, las señales son filtradas para no considerar aquellas partes del registro que se vean afectadas por frentes de ondas que no correspondan a vibraciones ambientales, así como distorsiones en la grabación. En particular se aplican tres criterios para filtrar la señal:

- Eliminar todas aquellas partes “cortadas” de las señales.
- Establecer un valor umbral sobre el cual se rechaza esa parte de la señal. Este criterio tiene por objetivo remover *peaks* originados por golpes y otros pulsos indeseados. Este umbral se encuentra implementado como un porcentaje de la máxima amplitud registrada a lo largo de toda la señal, y se rechazan las partes de la señal cuyas amplitudes se encuentren por sobre este umbral. En esta investigación se utiliza, por lo general, un umbral igual al 99% de la máxima amplitud.
- Se aplica el filtro conocido como la razón del promedio en ventanas de corta duración (STA) sobre el promedio en ventanas de larga duración (LTA) o STA/LTA. Este criterio fue diseñado para rechazar las partes del registro que contengan frentes de ondas transientes. Para esta investigación, el STA se calcula para 1 segundo, mientras que el LTA se calcula para 30 segundos. Wathelet (2013)

sugiere aceptar porciones de la señal con un valor mínimo de STA/LTA de 0.2, y con un máximo de 2.5.

3.4. Aplicación a suelos típicos de la región Metropolitana

Con el objeto de estudiar la aplicación de los métodos f-k y Roadside MASW, se seleccionaron tres sitios de la región Metropolitana (Anexo B), los cuales están compuestos por suelos de características geológicas y propiedades dinámicas diferentes. Es importante mencionar que los tres sitios se encuentran ubicados en áreas urbanas, pero lejanas de carreteras de alto tráfico vehicular. En cada uno de ellos, se calcula la curva de dispersión utilizando fuentes activas y pasivas, para posteriormente, inferir el perfil de velocidades de ondas de corte para los primeros 30 metros de profundidad.

3.4.1. Caso 1: Suelos Rígidos

Se realizaron ensayos en el Campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile, que se encuentran en el límite entre los depósitos de gravas del río Mapocho y los depósitos de gravas del río Maipo (Valenzuela, 1978). En este lugar se han realizado una serie de estudios de mecánica de suelos (Ampuero y Van Sint Jan, 2004) que han permitido determinar la estratigrafía del suelo al interior del Campus San Joaquín, los que se resumen en la Tabla 3.7.

En este lugar se realizaron ensayos activos con 24 geófonos espaciados cada 5 metros, utilizando la fuente sísmica de 100 kg a 20, 30, 40, 50 y 100 metros del primer geófono, golpeando en seis ocasiones para cada ubicación de la fuente. Además, se efectuaron ensayos pasivos lineales con 24 geófonos espaciados a 5 metros, y ensayos pasivos circulares con configuraciones R9_24 y R19_24. En cada caso se tomaron registros de 16 minutos y un intervalo de muestreo de 0.125 ms.

Tabla 3.7: Estratigrafía del suelo del Campus San Joaquín de la Universidad Católica (Ampuero y Van Sint Jan, 2004)

Estrato	Descripción
I	Arcilla de mediana plasticidad de color café, consistencia media y humedad cercana al límite plástico. Su profundidad es variable entre 1 y 2 metros, dependiendo de la posición en el campus.
II	Grava arcillosa de color café y compacidad media a alta. Este estrato se encuentra siempre bajo el estrato I y la profundidad máxima a la que se ha medido su base es 4.0 m
III	Grava arenosa de color gris, con intercalaciones de lentes de arena. Este estrato se encuentra siempre bajo el estrato II, y se ha encontrado hasta la máxima profundidad prospectada (8.0 metros en pozos y 26.5 metros en sondajes).

3.4.1.1. Ensayos Activos

Se obtienen los diagramas de dispersión empíricos asociados a cada distancia de disparo, a través del *stacking* en tiempo de los seis ensayos efectuado para cada distancia, tal como se observa en la Figura 3.15 (a, b, c, d y e). Las curvas obtenidas con golpes a 20 y 30 m, permiten obtener la curva de dispersión para frecuencias hasta alrededor de los 7 Hz, mientras la obtenida con golpes a 40 m, permite obtener la curva de dispersión hasta los 8 Hz. Si bien, la curva obtenida con golpes 50 m permite obtener la curva de dispersión para frecuencias superiores a los 6 Hz, la concentración de energía para frecuencias bajo los 9 Hz es más difusa, tendiendo a aumentar las velocidades de fase obtenidas para ese rango de frecuencias, en comparación a las curvas obtenidas con golpes a 20 y 30 m (Figura 3.15h). A su vez, los resultados obtenidos con disparos a 100 metros, si bien entregan una tendencia de la curva de dispersión, no permiten obtener la curva con la misma resolución que con los disparos a menores distancias.

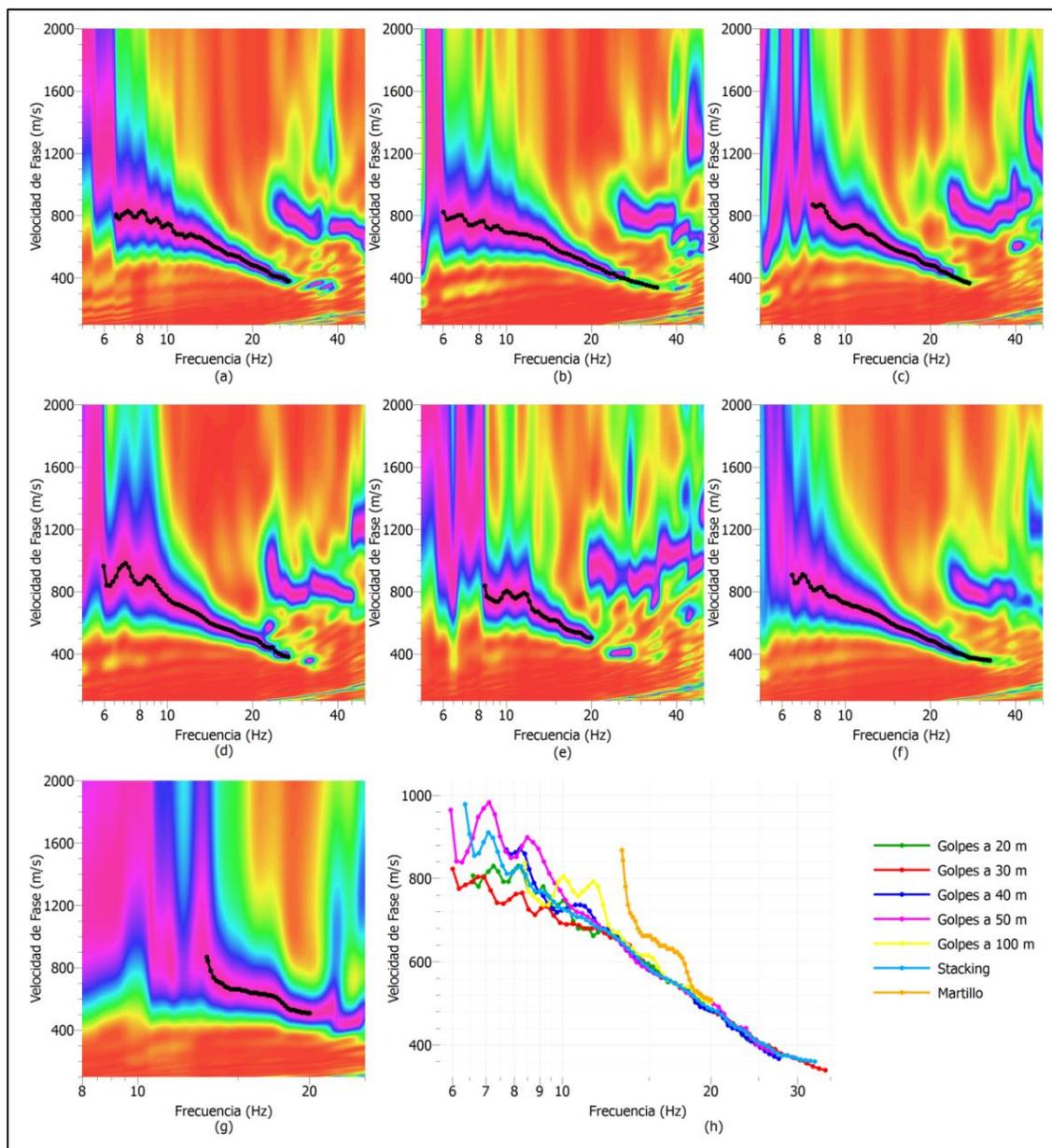


Figura 3.15: Curvas de dispersión para ensayos activos en el caso 1 con golpes a (a) 20, (b) 30, (c) 40, (d) 50 y (e) 100 m del primer geófono. (f) Curva resultante del *stacking* en frecuencia para golpes a 20, 30 y 40 m de distancia, (g) Curva obtenida con golpes de martillo, (h) Comparación de las curvas de dispersión obtenidas.

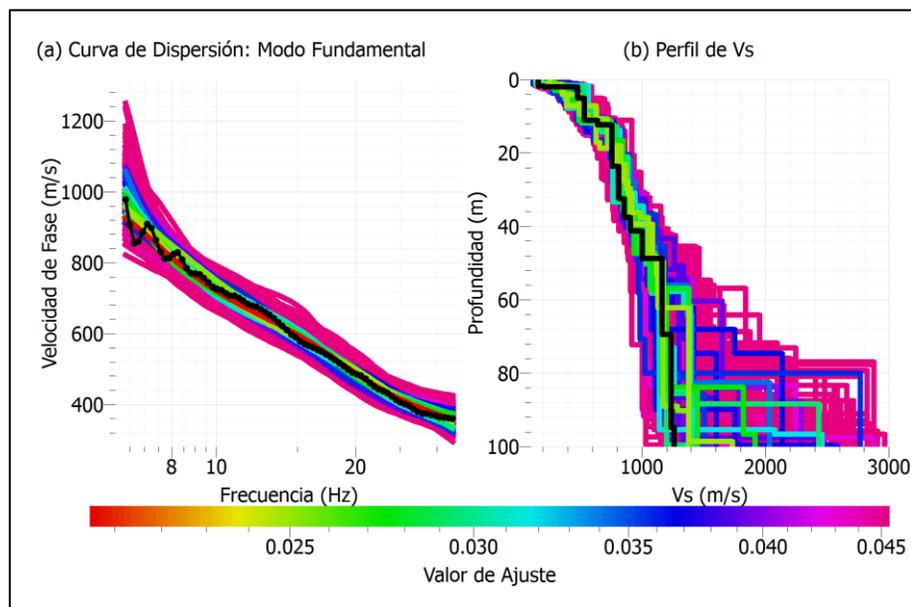


Figura 3.16: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando la caída libre del peso de 100 kg. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste.

Tal como se observa en la Figura 3.15h, para frecuencias sobre los 10 Hz, las curvas obtenidas para las distintas distancias tienen velocidades de fase muy similares entre ellas. Entre los 6 y 10 Hz existen diferencias, especialmente entre la obtenida con golpes a 50 m, y las obtenidas con golpes a 20 y 30 m. Los diagramas obtenidos para golpes a 20, 30 y 40 m se combinan (*stacking* en frecuencia) y se obtiene el diagrama indicado en la Figura 3.15f, el cual permite estimar la curva de dispersión para frecuencias entre 6 y 33 Hz aproximadamente. Con golpes de martillo, la mejor curva de dispersión estimada, corresponde a la obtenida con el *stacking* en tiempo de golpes a 25 m (Figura 3.15g). Sin embargo, esta curva sólo se define para frecuencias entre 14 y 20 Hz, donde las velocidades de fase sobre los 15 Hz son consistentes con las obtenidas utilizando la fuente sísmica.

Al utilizar la curva de dispersión indicada en la Figura 3.15f, se obtienen los modelos indicados en la Figura 3.16, donde el perfil obtenido es confiable⁶ hasta los 60 metros de profundidad, y es consistente con la estratigrafía indicada en la Tabla 3.7. Por otro lado, la curva de dispersión obtenida con golpes de martillo, entrega los modelos indicados en la Figura 3.17, donde el perfil de Vs obtenido es confiable aproximadamente hasta los 20 m de profundidad, lo que está relacionado con la longitud de onda máxima alcanzada (cerca a los 50 m para este caso).

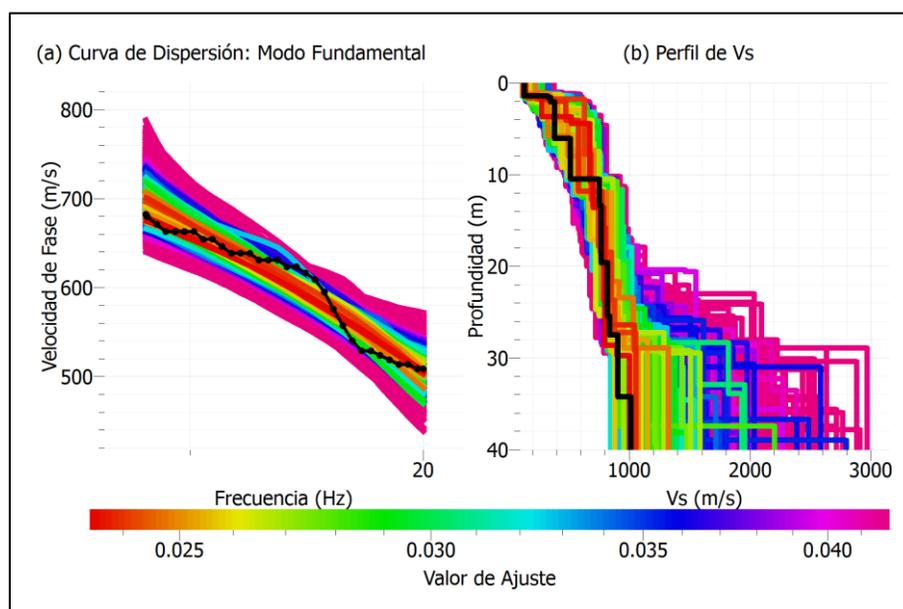


Figura 3.17: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando golpes de martillo. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste.

⁶ Se considera que el perfil obtenido es confiable, hasta una profundidad en la que se observe en que modelos de perfiles de Vs sean consistentes entre sí. En las figuras, esto se observa cuando el ancho de banda del Vs obtenido para una profundidad determinada, se amplía bruscamente en comparación a las capas superiores.

3.4.1.2. Ensayos Pasivos

La curva de dispersión pasiva obtenida con el arreglo lineal empleando la técnica Roadside MASW (Figura 3.18) tiene una buena resolución para un rango entre los 7 y los 24 Hz aproximadamente. Por otro lado, con los arreglos bidimensionales R9_24 y R19_24, es posible obtener curvas de dispersión para frecuencias mayores a 13 y 9 Hz, respectivamente (Figura 3.19).

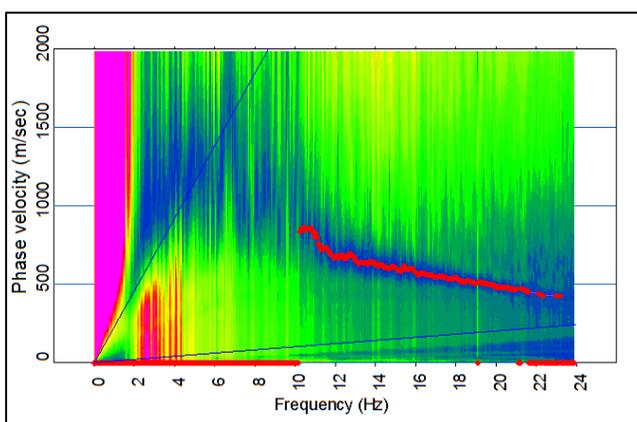


Figura 3.18: Curva de dispersión para arreglo lineal en caso 1

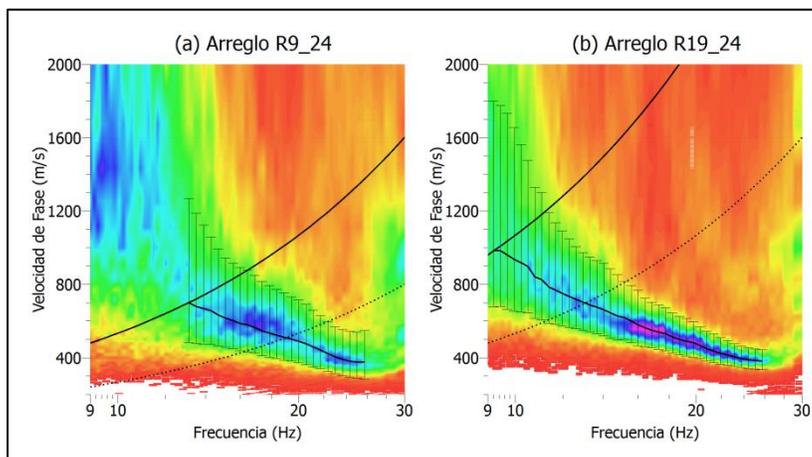


Figura 3.19: Curva de dispersión para arreglos bidimensionales en el caso 1

El perfil de V_s obtenido (Figura 3.20) tiene una baja variabilidad hasta los 25 metros aproximadamente, obteniendo resultados consistentes con la estratigrafía del sitio hasta esa profundidad. Bajo esa profundidad, el V_s de los indicados en la figura oscilan entre 700 y 1400 m/s, por lo que resultados para mayores profundidades no se consideran confiables.

Por otro lado, a partir de la curva obtenida con el arreglo circular de menor tamaño es posible determinar un perfil de V_s confiable hasta los 25 metros de profundidad (Figura 3.20), mientras que con el arreglo de mayor tamaño, la profundidad de exploración aumenta a 35 metros aproximadamente (Figura 3.21). A diferencia de las curvas activas y pasivas lineales, las curvas obtenidas con ensayos pasivos circulares, tienen asociada una desviación estándar, la cual incrementa el valor de ajuste obtenido (ecuación 3.1), lo que en ningún caso significa que los resultados sean menos precisos, pues simplemente refleja que se empleó mayor cantidad de información durante el proceso de inversión.

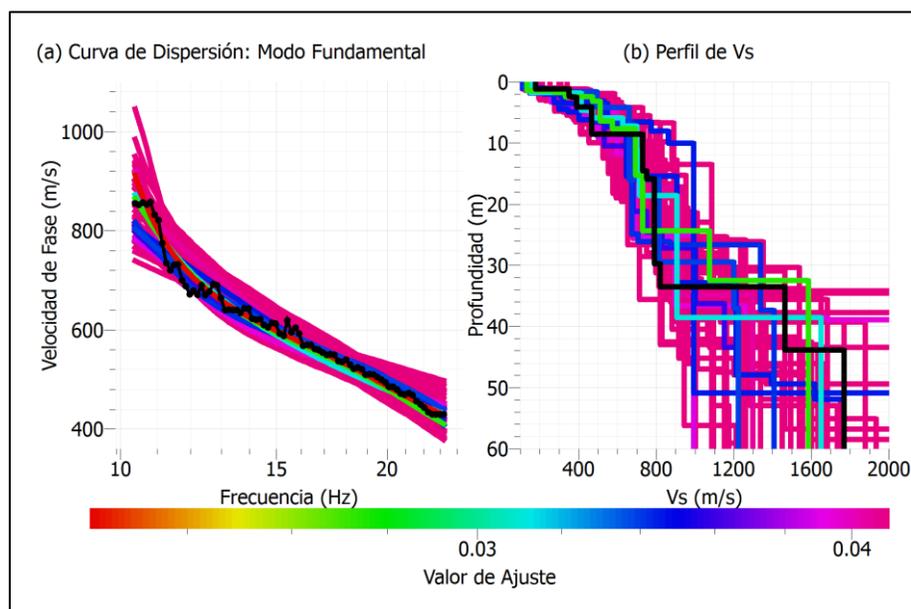


Figura 3.20: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando arreglos lineales pasivos. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste

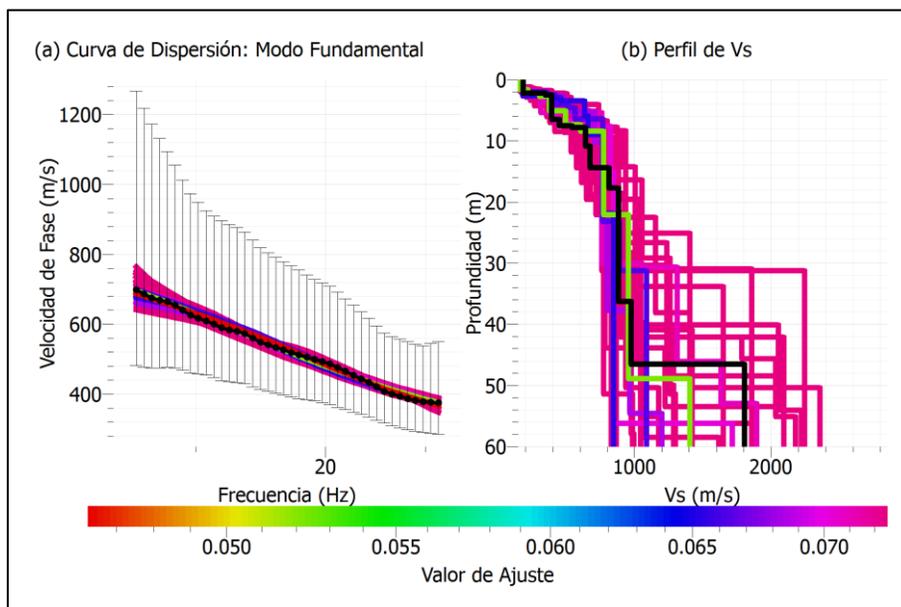


Figura 3.21: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando el arreglo R9_24. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste

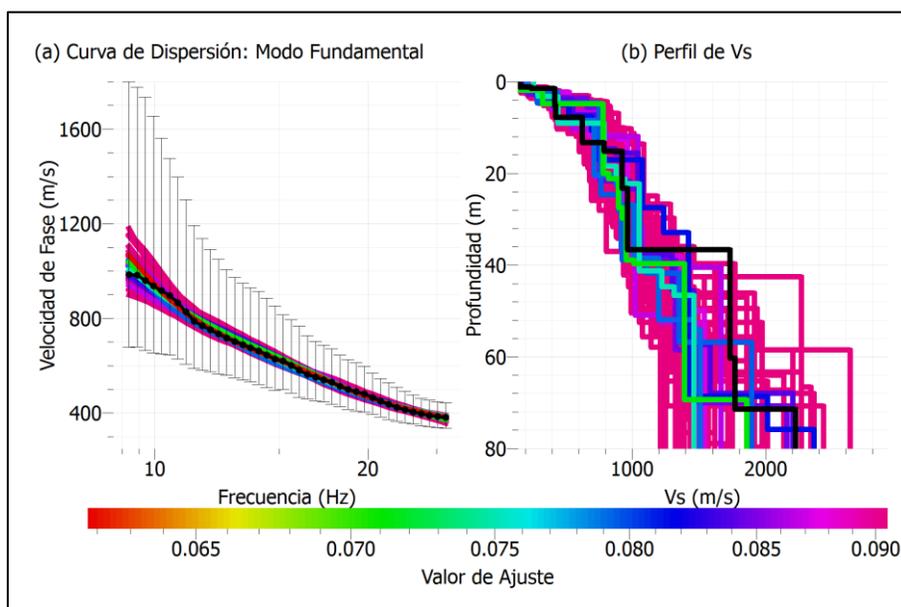


Figura 3.22: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 1 utilizando el arreglo R19_24. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste

3.4.1.3. Comparación de Resultados

Riddell et al. (1992) realizaron estudios con el objeto de clasificar geotécnicamente los sitios donde se encuentran ubicados las estaciones acelerográficas de la red UC en el marco de un proyecto con la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA). En el marco de dicho estudio, se realizaron ensayos de microvibraciones utilizando arreglos de grandes dimensiones desarrollando perfiles de velocidades de ondas de corte confiables a grandes profundidades. Estos perfiles fueron determinados mediante el método de autocorrelación espacial (SPAC). La Figura 3.23, presenta la comparación entre dicho perfil y los obtenidos en el presente estudio (hasta la profundidad explorada por cada uno de ellos).

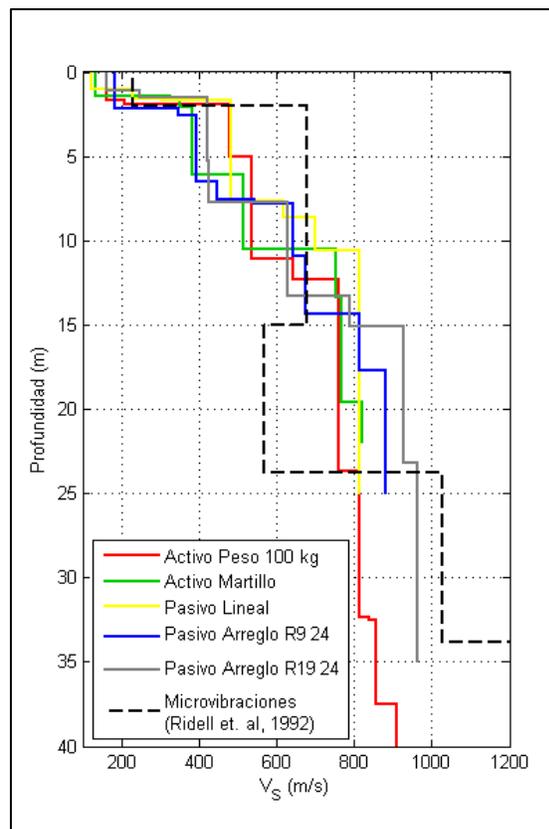


Figura 3.23: Comparación de los perfiles de Vs obtenidos para el caso 3 y el obtenido por Riddell et al. (1992)

En general, se observa que los perfiles obtenidos anteriormente son consistentes entre ellos. Todos indican la presencia de una capa superficial de no más de 2 metros de profundidad y con bajos valores de V_s , para luego aumentar en forma monótona con la profundidad desde 400 m/s en promedio para los 5 m de profundidad, hasta los 900 m/s en promedio a los 30 m. En comparación con la curva obtenida con SPAC, la principal diferencia está en el estrato de menor velocidad encontrado con estas mediciones sin embargo; a pesar de eso, las velocidades son muy similares al comparar los valores promedios.

3.4.2. Caso 2: Cenizas Volcánicas

En la comuna de Pudahuel existen varios depósitos de ceniza volcánica, específicamente ignimbrita (Valenzuela, 1978). Este tipo de suelo ha mostrado tener un comportamiento singular ante cargas sísmicas, manifestado en términos de intensidades sísmicas (Molina, 2011). Por ello, se seleccionó un sitio en esta comuna para estudiar la aplicación de los métodos multi-canales en este tipo de suelo.

En el marco del proyecto de microzonificación sísmica del sector poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2012a), se realizó un sondaje en un sitio para realizar un estudio de suelos más detallado. Los resultados de este sondaje se resumen en la Tabla 3.8.

En este sitio se realizaron ensayos activos con 12 geófonos espaciados cada 5 metros, utilizando como fuente:

- Caída libre de un peso de 100 kg a 14 y 28 metros del primer geófono.
- Martillo de 18 libras con golpes a 5, 10, 15, 20 y 25 metros del primer geófono.

Se ejecutaron tres golpes para cada distancia con respecto a la fuente. Además se efectuaron ensayos pasivos lineales con 12 geófonos espaciados a 5 metros, y un ensayo

pasivo circular con configuración R9_12. En cada caso se tomaron registros de 16 minutos y un intervalo de muestreo de 0.125 ms.

Por último, se efectuó un ensayo *down-hole*, con objeto de comparar sus resultados con los obtenidos con el análisis multi-canal. Sus resultados se presentan por separado en el Anexo C, Figura C.1.

Tabla 3.8: Resumen de la estratigrafía determinada en base al sondaje en Pudahuel (Seremi Metropolitana MINVU, 2012a)

Horizontes (m)		Descripción visual del suelo
De	Hasta	
0.00	11.00	Pumicita, arena fina a media con gravas aisladas, tamaño máximo 1", color gris amarillento, humedad baja, compacidad media a alta, estructura homogénea.
11.00	23.00	Pumicita, arena fina a media con gravas tamaño máximo 3", color gris amarillento, humedad media, compacidad media a alta, estructura homogénea, partículas de color blanco.
23.00	40.00	Pumicita, arena fina a media, con gravas aisladas, tamaño máximo 6", color gris amarillento, humedad media a alta, compacidad alta, estructura homogénea, gravas aisladas de color negruzco y blanco.

3.4.2.1. Ensayos Activos

En la Figura 3.24a se observan los mejores resultados obtenidos tanto con la caída libre del peso de 100 kg, mientras en la Figura 3.24b los obtenidos con martillo. Para el primer caso, se seleccionó el mejor de los 6 golpes efectuados, ya que entregaba información para un rango más amplio de frecuencias, mientras que para el segundo caso se utilizó el *stacking* en tiempo de los golpes a 10 metros del primer geófono. Las curvas de dispersión obtenidas con la caída del peso de 100 kg (Figura 3.24a), lo hacen para un

rango de frecuencias entre los 7 y 20 Hz aproximadamente, mientras que las obtenidas para el ensayo activo con martillo (Figura 3.24b), muestran una buena resolución en su modo fundamental para frecuencias entre los 15 y 22 Hz aproximadamente. Si bien, en ambos casos, se observan concentraciones de energía sobre las frecuencias máximas de las curvas de dispersión, estas no pueden ser asociadas a una inversión del modo fundamental producto que se observan múltiples *peaks* para un misma frecuencia, probablemente por la presencia de un modo superior cercano, o bien del *aliasing*.

En la Figura 3.25 se observan los resultados de la inversión obtenidos utilizando la caída libre del peso de 100 kg, mientras que en la Figura 3.26 se muestran la inversión de la curva de dispersión obtenida utilizando golpes de martillo. Se observa que el perfil obtenido con golpes de martillo, tiene baja variabilidad hasta los 12 metros de profundidad aproximadamente, mientras que el obtenido con el peso de 100 kg, permite obtener un perfil confiable entre 5 y 30 metros aproximadamente. Es importante mencionar que en ambos casos, el valor numérico del desajuste es muy bajo, por lo tanto, la profundidad efectiva de penetración es independiente del valor numérico del desajuste de la inversión con respecto a los datos empíricos.

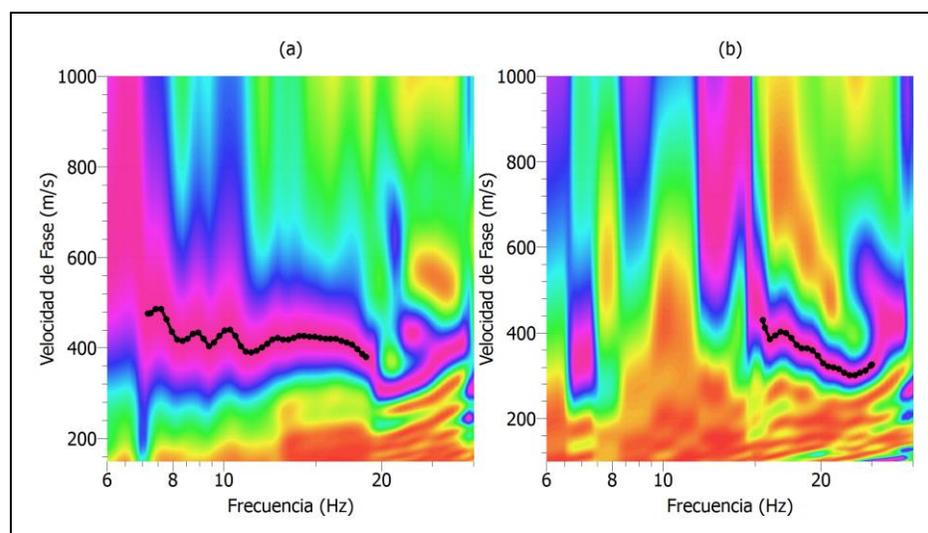


Figura 3.24: Resultados para el caso 2 con ensayos activos: (a) curva de dispersión obtenida con la caída libre del peso de 100 kg y el *stacking* de los cuatro mejores golpes, (b) curva de dispersión obtenida con el mejor golpe de martillo

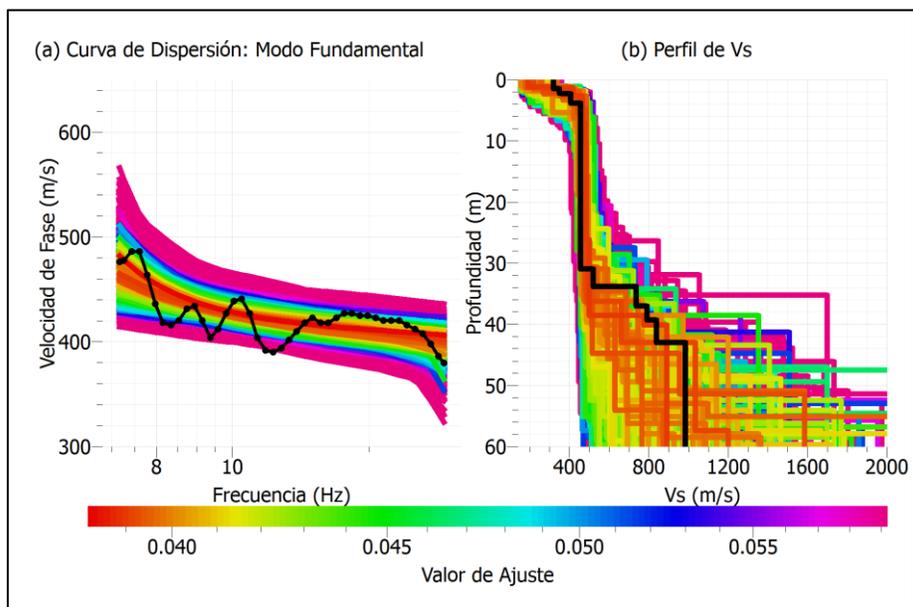


Figura 3.25: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando la caída libre del peso de 100 kg. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste.

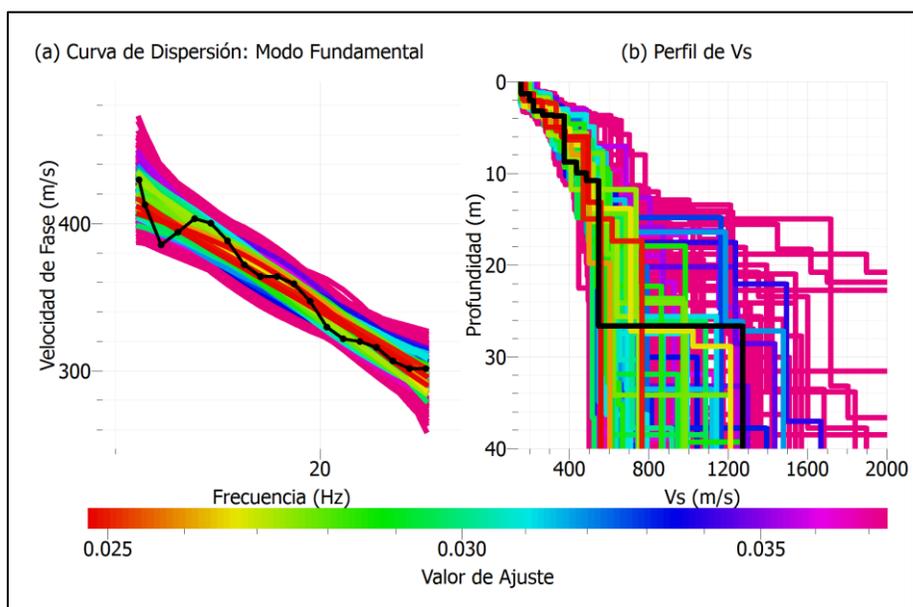


Figura 3.26: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando golpes de martillo. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste.

3.4.2.2. Ensayos Pasivos

La curva de dispersión obtenida con el arreglo lineal (Figura 3.27a) tiene una buena resolución para un rango entre los 5 y los 23 Hz aproximadamente, con un salto entre 10.5 y 13 Hz que, donde la zona de concentración de energía es más difusa. Para el análisis, se utiliza la información entre 5 y 10.5 Hz, y entre 13 y 23 Hz. Con ello, se obtienen la curva de dispersión y el perfil de velocidades de ondas de corte que se observan en la Figura 3.28. El perfil resultante permite lograr una respuesta confiable por sobre los 30 metros de profundidad.

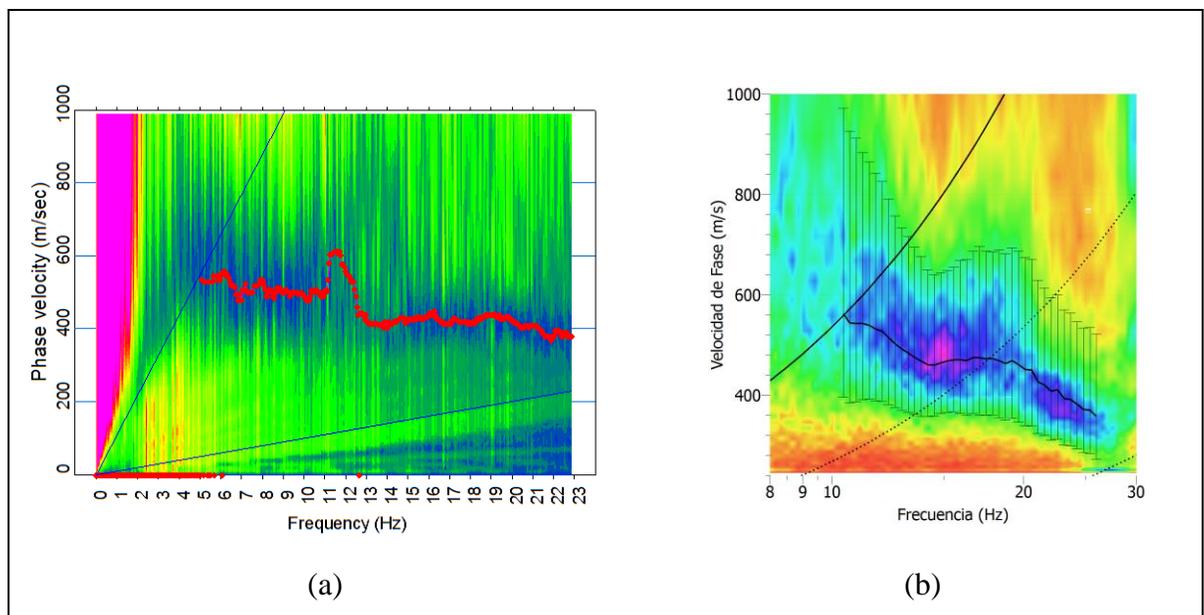


Figura 3.27: Curvas de dispersión obtenidas para el caso 2 con ensayos pasivos: (a) Arreglo lineal y método Roadside MASW, (b) Arreglo R9_12 y método f-k

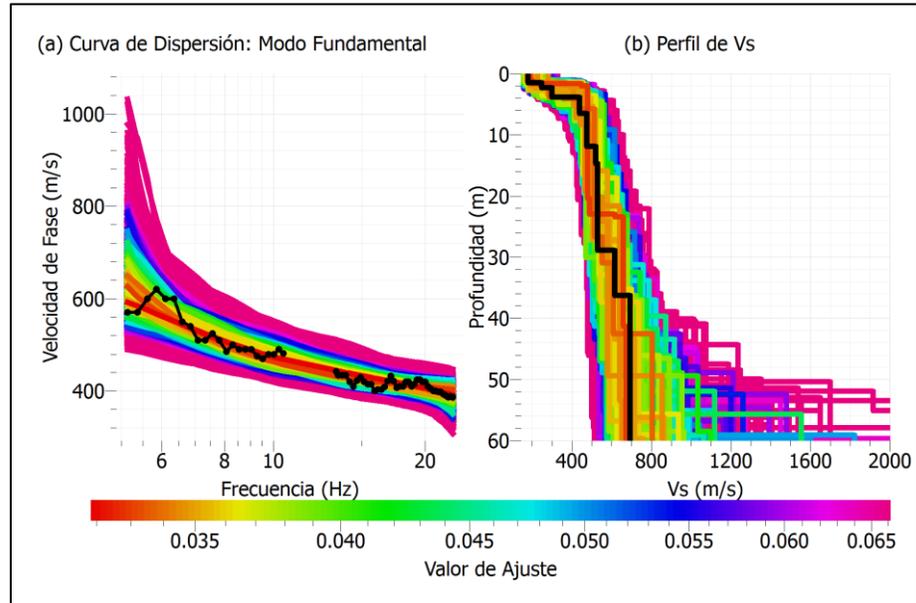


Figura 3.28: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando arreglos lineales. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste

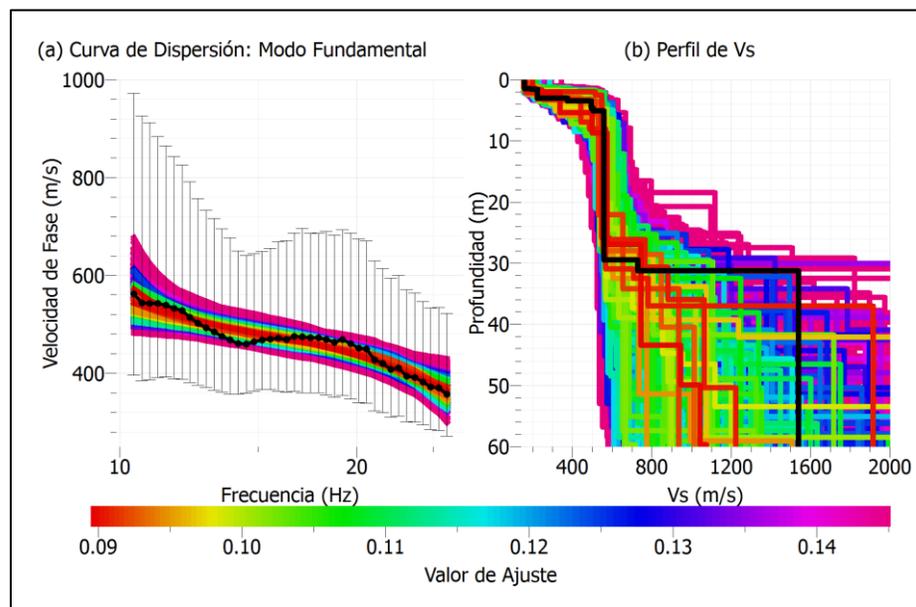


Figura 3.29: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 utilizando el arreglo R9_12. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste

Por otro lado, tal como se observa en la Figura 3.27, el rango de frecuencias para el que la curva de dispersión obtenida con el arreglo bidimensional R9_12 es válida, oscila entre los 10.5 y los 26 Hz aproximadamente. Se observa que el perfil de velocidades de ondas de corte ajustado (Figura 3.29) tiene una baja variabilidad desde la superficie hasta los 25 metros aproximadamente. Sin embargo, para los primeros tres metros hay una gran variabilidad para los valores de Vs obtenidos para los distintos modelos indicados en la Figura 3.29b, lo que se además se refleja en que la velocidad de la primera capa del modelo con mejor ajuste, difiere demasiado de los valores que se observan en la curva de dispersión, donde el valor más bajo para la velocidad de fase es de 350 m/s. Entonces, el perfil de velocidades obtenido es confiable desde los 3 a los 25 metros aproximadamente.

3.4.2.3. Comparación de Resultados

En la Figura 3.30 se presenta una comparación entre los perfiles obtenidos y el modelo entregado por el *down-hole*. Una de las principales diferencias es la capa superficial entregada por los modelos geofísicos, cuya velocidad es muy inferior a la entregada por el *down-hole*, y que coincide con aquella zona, en que los perfil generados tiene alta variabilidad (Figura 3.26b y Figura 3.25b). Ya que las altas frecuencias están asociadas a las capas superficiales, es posible que la frecuencia máxima explorada por cada de dispersión no sean suficientes para definir en forma adecuadas los primeros 3 ó 4 metros del terreno.

Al comparar únicamente con el perfil obtenido con el peso de 100 kg, se observa que a partir de los 21 metros ambos modelos difieren en al menos 100 m/s, coincidiendo con la zona de mayor variabilidad del modelo. El modelo entregado por el ensayo pasivo lineal se ajusta bastante bien al obtenido con el *down-hole* bajo los 15 metros, tal como se observa en la Figura 3.30 obteniendo velocidades más bajas para varios de los tramos más superficiales del perfil. Por otro lado, el ensayo pasivo circular presenta velocidades mayores entre los 3 y 27 metros, además de una capa superficial con una velocidad muy inferior a la entregada por el *down-hole*, y que, al igual que para los ensayos activos

coincide con la zona donde hay una alta variabilidad en los modelos generados (Figura 3.25b).

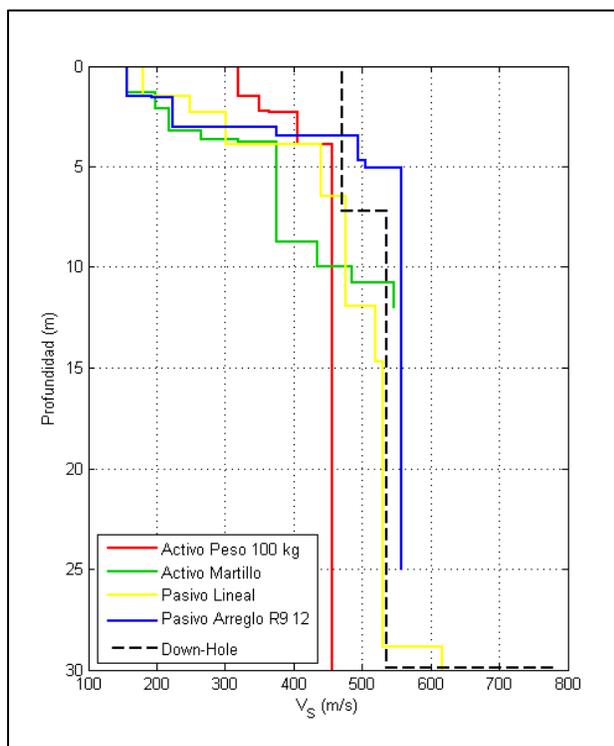


Figura 3.30: Comparación de los perfiles de Vs obtenidos para el caso 2 y los resultados del ensayo *down-hole*

3.4.3. Caso 3: Suelos Finos

El sitio estudiado se encuentra ubicado en la comuna de Lampa, cercano al estero del mismo nombre. De acuerdo a antecedentes geológicos (Gálvez, 2012), estos suelos corresponden a arenas con intercalaciones de finos y gravas. Sin embargo, es posible encontrar estratos de finos hasta los 30 metros de espesor, debido a la cercanía con un estero.

De igual forma que en el caso 2, se dispone de un sondaje efectuado en el marco del proyecto de microzonificación sísmica del sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2012b). Los resultados de este sondaje se resumen en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Resumen de la estratigrafía determinada en base al sondaje en Lampa (Seremi Metropolitana MINVU, 2012b)

Horizontes (m)		Descripción visual Del suelo
De	Hasta	
0.00	2.00	Limo arenosos de baja plasticidad color café claro, humedad baja, consistencia firme, estructura homogénea, se observa algo de mica
2.00	5.50	Arena fina limpia con escasos finos no plásticos, color gris amarillento, humedad baja, compacidad media, estructura homogénea, se observa algo de mica.
5.50	7.00	Limo arenoso de mediana plasticidad, color café oscuro, humedad sobre el límite plástico, consistencia firme, estructura homogénea, se observa algo de mica.
7.00	10.00	Arena limosa de baja plasticidad, color gris oscuro, humedad sobre el límite plástico, consistencia media, estructura heterogénea.
10.00	18.00	Arcilla limo arenosa de mediana plasticidad, color gris rojizo, humedad sobre el límite plástico, consistencia firme, estructura heterogénea, lentes aislados de cenizas volcánicas.
18.00	21.13	Arena fina a media limosa no plástica, color café oscuro, humedad media, compacidad densa, estructura homogénea, y algo de mica.
21.13	22.11	Arena gruesa a media, con finos de baja plasticidad, color gris oscuro, compacidad densa, estructura homogénea.
22.11	24.85	Limo arenoso de mediana plasticidad, color café claro, humedad sobre el límite plástico, consistencia muy firme, estructura homogénea.
24.85	28.10	Conglomerado de arenas gruesas con gravas y escasos finos no plásticos, color gris, humedad media, compacidad densa, estructura heterogénea, gravas tamaño máximo 2 1/2".
28.10	40.00	Arena limosa algo cementada de baja plasticidad, color café, humedad sobre el límite plástico, consistencia muy firme, estructura heterogénea.

En este lugar se realizaron ensayos activos con 12 geófonos espaciados cada 5 metros, utilizando como fuente:

- Caída libre de un peso de 100 kg a 5 y 10 metros del primer geófono.
- Martillo de 18 libras con golpes a 3, 6, 9 y 12 metros del primer geófono.

Se ejecutaron tres golpes para cada distancia con respecto a la fuente. Además se efectuaron ensayos pasivos lineales con 12 geófonos espaciados a 5 metros, y un ensayo pasivo circular con configuración R9_12. En cada caso, se tomaron registros de 16 minutos y un intervalo de muestreo de 0.125 ms.

Por último, se efectuó un ensayo *down-hole*, con objeto de comparar sus resultados con los obtenidos con el análisis multi-canal. Sus resultados se presentan por separado en el Anexo C, Figura C.2.

3.4.3.1. Ensayos Activos

Al igual que en el caso 2, se seleccionó el mejor de los 12 golpes con martillo efectuados (Figura 3.31a), ya que los otros golpes no entregaban información completa, mientras que para la caída libre de los 100 kg se utilizó el *stacking* en frecuencia de los dos mejores golpes (Figura 3.31b).

Las curvas de dispersión obtenidas para el ensayo activo con martillo muestran una buena resolución en su modo fundamental para frecuencias entre los 6.5 y 21 Hz aproximadamente, mientras que las obtenidas con la caída del peso de 100 kg, muestran buenos resultados entre 4.7 y 21 Hz aproximadamente. El perfil de velocidades de ondas de corte obtenido con golpes de martillo (Figura 3.32b), tiene baja variabilidad hasta los 20 metros de profundidad aproximadamente, mientras que el obtenido con el peso de 100 kg (Figura 3.33b), permite aumentar el rango, hasta los 27 metros aproximadamente.

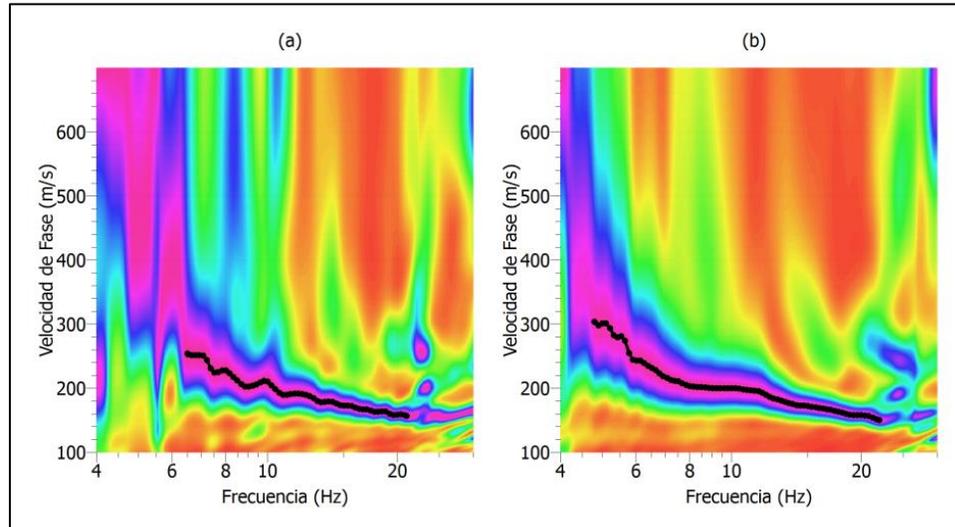


Figura 3.31: Resultados para el caso 3 con ensayos activos: (a) curva de dispersión obtenida con el mejor golpe de martillo, (b) curva de dispersión obtenida con la caída libre del peso de 100 kg y el *stacking* de los dos mejores golpes

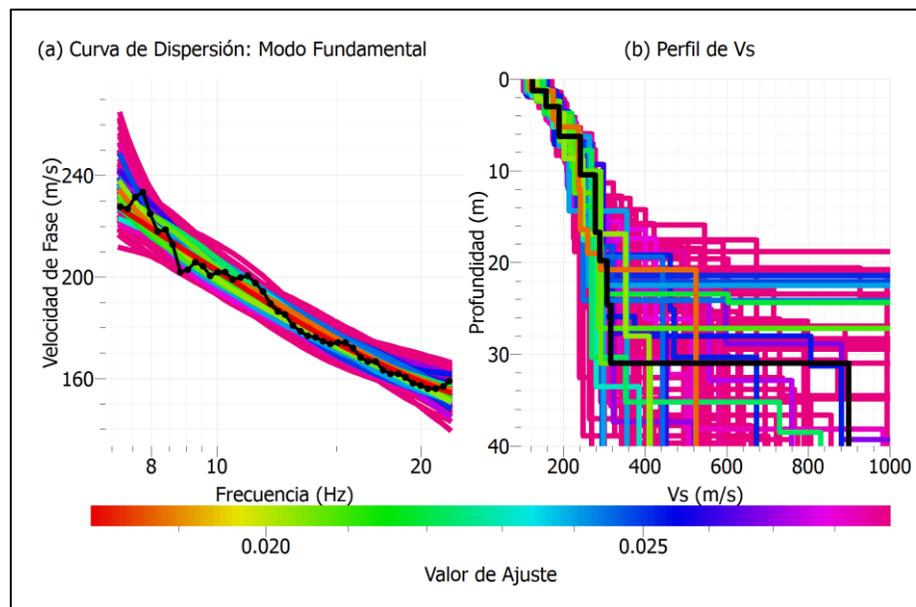


Figura 3.32: Perfil de V_s y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando el mejor golpe de martillo. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste.

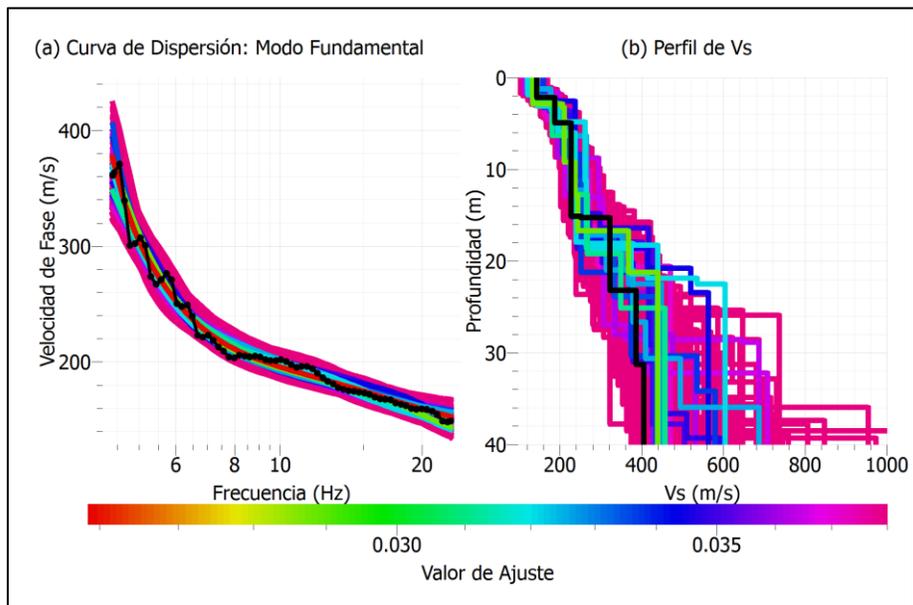


Figura 3.33: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando la caída libre del peso de 100 kg. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste.

3.4.3.2. Ensayos Pasivos

La curva de dispersión pasiva obtenida con el arreglo lineal (Figura 3.34a) tiene una buena resolución para un rango entre los 6 y los 17 Hz aproximadamente. Entre los 5 y 6 Hz, se observa una concentración de energía más difusa, pero de todas formas se utiliza esta información como parte de la curva de dispersión, para analizar sus implicancias en el modelo generado. Por otro lado, con el arreglo bidimensional R9_12 se obtiene una curva de dispersión que es válida, entre los 6.3 y 25 Hz aproximadamente (Figura 3.34b)

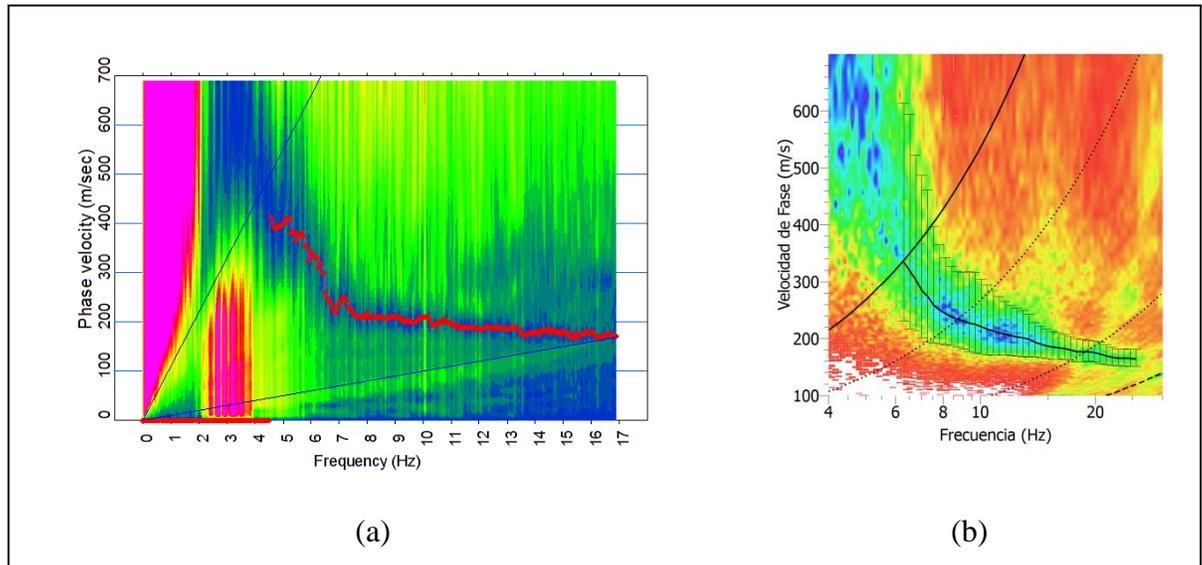


Figura 3.34: Curvas de dispersión obtenidas para el caso 3 con ensayos pasivos: (a) Arreglo lineal y método Roadside MASW, (b) Arreglo R9_12 y método f-k

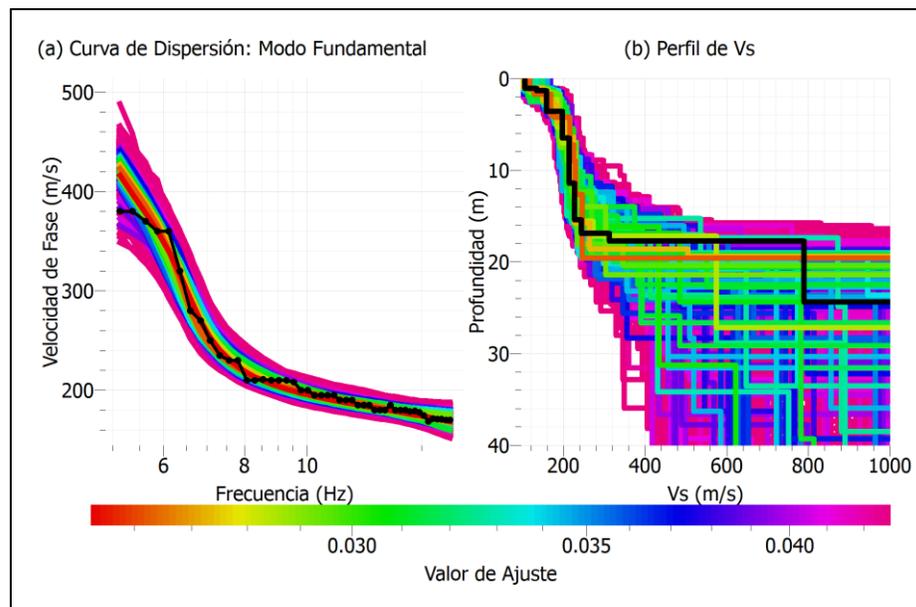


Figura 3.35: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando arreglos lineales. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste

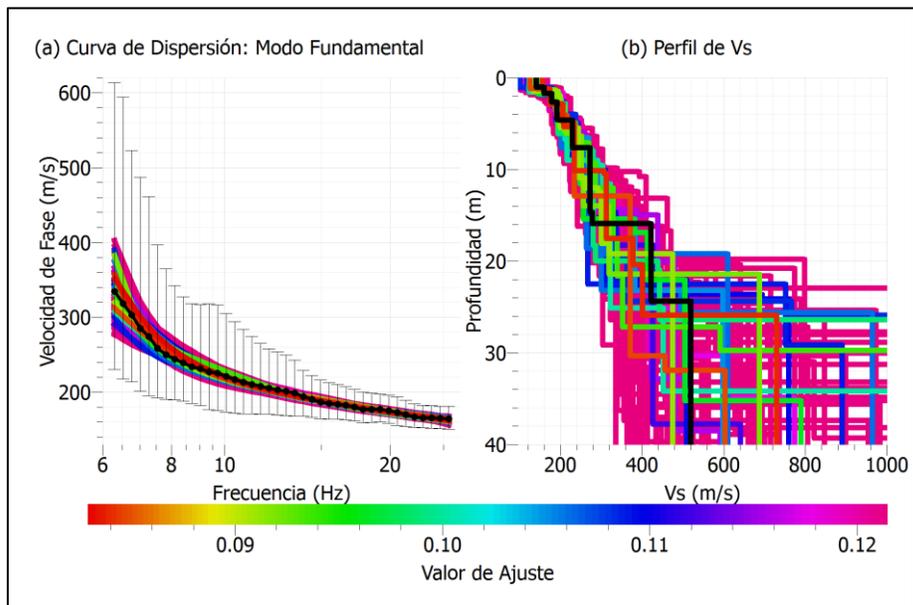


Figura 3.36: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 utilizando el arreglo R9_12. La curva negra en (a) corresponde a la curva de dispersión obtenida en terreno, mientras que en (b) corresponde al perfil con el menor desajuste

El perfil de velocidades de ondas de corte obtenido con el arreglo lineal, sólo permite explorar hasta los 16 metros de manera confiable (Figura 3.35b). Esto tiene explicación en el último tramo de la curva de dispersión ajustada (Figura 3.35a), donde entre 5 y 6 Hz hay una gran diferencia entre los distintos modelos generados. Esta diferencia en algunos casos bordea los 100 m/s entre modelos con valores de ajuste similares. Por otro lado, los modelos del perfil de Vs obtenidos con el arreglo circular (Figura 3.36b), son consistentes entre sí, hasta una profundidad de 20 m. En este caso, la limitación está dada por las capacidades del arreglo, y su incapacidad para acceder a longitudes de onda mayores.

3.4.3.3. Comparación de Resultados

En la Figura 3.37 se presenta una comparación entre los perfiles obtenidos y el modelo entregado por el *down-hole*. Los modelos obtenidos son consistentes entre sí, hasta

sus respectivas profundidades de exploración. El perfil obtenido con la caída de 100 Kg, es el que permite la mayor exploración, y si bien sus resultados son muy cercanos a los obtenidos con el *down-hole*, no es capaz de detectar el lente de grava que aparece tanto en los datos del sondaje como en el *down-hole*. Esta diferencia se puede deber a que el *down-hole* entrega un resultado de carácter puntual, a diferencia de los métodos basados en ondas superficiales cuyo resultado abarca un volumen de suelo. También se puede deber a una pérdida de resolución para longitudes de onda largas, restringiendo la profundidad de exploración del método. Además, al igual que en el caso 2, se observan diferencias en las capas superficiales entregada por los modelos geofísicos, cuyas velocidades son inferiores a las obtenidas con el *down-hole*.

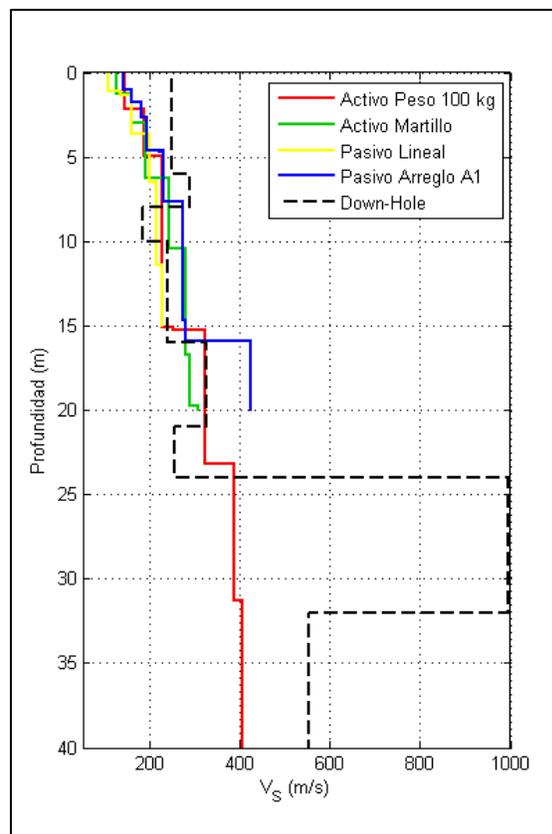


Figura 3.37: Comparación de los perfiles de V_s obtenidos para el caso 3 y los resultados del ensayo *down-hole*

3.5. Resumen

Al utilizar arreglos de gran longitud en ensayos activos, es posible mejorar la definición de la curva de dispersión obtenida, pero en términos prácticos, el rango de frecuencias explorado no necesariamente aumenta. Incluso, en situaciones con alto ruido ambiental, el uso de arreglos de gran longitud puede empeorar los resultados, disminuyendo el rango de frecuencias explorado. En ese sentido, al disponer de equipos con un gran número de receptores, se recomienda la utilización de arreglos con menor espaciamiento, que permitan explorar eficientemente las capas más superficiales del terreno.

El alto ruido ambiental corresponde a una de las principales limitantes en el análisis de ensayos activos, especialmente en aquellos llevados a cabo con fuentes de baja energía. En general, una fuente de mayor energía permite ampliar el rango de frecuencias explorado, sin embargo esta mejora no es tan significativa en suelos blandos, como sí lo es en suelos rígidos.

En ensayos pasivos, las dimensiones de los arreglos definen los límites teóricos, para los cuales es posible identificar la curva de dispersión. Sin embargo, es importante tener en consideración, que los resultados también pueden estar limitados por el “contenido” de frecuencias del ruido ambiental registrado.

En general, se observó que la utilización de las curvas de dispersión por si solas, son insuficientes para la determinación del perfil de velocidades de ondas de corte de los primeros 30 metros de profundidad. Sólo los ensayos activos utilizando la caída libre de 100 kg, entregaron resultados satisfactorios para los tres casos. En el siguiente capítulo se buscará establecer una metodología que permita la caracterización sísmica de un sitio, utilizando equipos de refracción tradicionales (sin fuentes de gran energía).

4. COMBINACIÓN DE TÉCNICAS

Tal como se observó para muchos de los caso estudiados en el capítulo anterior, las curvas obtenidas con los ensayos pasivos y activos con fuentes de baja energía (martillo), pueden ser insuficientes para la exploración de los primeros 30 metros de profundidad por sí solos. Para lograr una mayor exploración en profundidad, (utilizando un equipamiento “estándar”, sin fuentes de gran energía, como la caída libre de 100 kg utilizada en esta investigación) es necesario combinar las curvas de dispersión obtenidas con distintos métodos, y así aumentar el ancho de banda de las frecuencias exploradas (Rix et al., 2001). En general, este procedimiento amplía el rango de frecuencias para el que se dispone información, y con ello, la profundidad de exploración. Por ejemplo, Rosenblad y Li (2008) evaluaron el desempeño de ensayos activos con fuentes de gran energía (4900 kg) y arreglos de gran longitud (450 m), logrando resultados consistente entre sí, para longitudes de onda cercanas a los 600 metros.

Si bien, los ensayos activos son considerados de alta confiabilidad debido a que se conoce a priori la dirección del frente de propagación de ondas y la ubicación de la fuente, en muchas situaciones, si no se dispone de una fuente de gran energía, la curva de dispersión obtenida estará limitada a longitudes de ondas muy cortas (tal como se observa en las Tablas 3.3 y 3.5). Por ello, es común que se recurra a ensayos pasivos para explorar frecuencias más bajas, sin embargo, al tratarse de vibraciones ambientales se desconoce la dirección de propagación de los frentes de ondas incidentes que cruzan el arreglo. En ese sentido, es importante revisar los supuestos planteados por cada método. Por ejemplo, uno de los supuestos fundamentales del método f-k es plantear que el campo de ondas está compuesto únicamente por frentes de ondas planos, lo que no constituye una buena hipótesis si existen fuentes de ondas cercanas a los arreglos, cuyos frentes de ondas serán más bien cilíndricos. Por otro lado, el método Roadside MASW, que si bien incorpora en su metodología el análisis de frentes de ondas cilíndricos, es un método desarrollado para ser ejecutado al costado de carreteras.

Por último, se puede complementar los resultados obtenidos en términos de curvas de dispersión con las curvas de autocorrelación obtenidas con el método SPAC. Los resultados obtenidos con el método SPAC sobre un sólo arreglo de geófonos, en general, permiten explorar las propiedades dispersivas de un sitio para un rango de frecuencias más bajo, pero a la vez más acotado que los obtenidos con los métodos f-k pasivo y activo. Por ello, estos resultados, deben ser complementados con ensayos activos y/o ensayos pasivos analizados con el método f-k. Otra alternativa, consiste en realizar ensayos pasivos con arreglos de distintas aperturas e ir resolviendo con el método SPAC cada uno de ellos (Midorikawa, 2012).

4.1. Evaluación de curvas de dispersión con SPAC

Tal como se indicó en el capítulo 2, el método de autocorrelación espacial (SPAC) permite calcular las curvas de autocorrelación y a partir de ellas, estimar la curva de dispersión. En la Figura 4.1, se observan las curvas de autocorrelación obtenidas para un registro de vibraciones ambientales utilizando el arreglo R9_12 (Tabla 3.6). El procedimiento para calcularlas se puede resumir en:

- Se agrupan los pares de geófonos cuyas distancias entre ambos receptores sean las mismas. Cada conjunto de pares de geófonos se conoce como “anillo”.
- Al igual que en el análisis f-k, el registro total se divide en ventanas de tiempo, y se calcula el coeficiente de autocorrelación espacial asociado a cada ventana⁷.
- Finalmente, para cada frecuencia, se calcula el promedio del coeficiente de autocorrelación para todas las ventanas de tiempo y su desviación estándar asociada.

En la Figura 4.2 se indican las velocidades de fase asociadas a cada frecuencia y coeficiente de autocorrelación de las curvas indicadas en la Figura 4.1, pero sólo una parte

⁷ Para el análisis SPAC se aplican los mismos criterios para filtrar aquellas señales no deseadas en el registro que en el método f-k (sección 3.3.2)

de estos resultados corresponden a la curva de dispersión buscada. De acuerdo a recomendaciones de Wathelet (2012), se debe seleccionar aquellas zonas donde exista una mayor concentración de puntos en el histograma de la Figura 4.2. Al utilizar el método SPAC modificado, esta zona se identifica como aquella donde varios anillos coinciden en los valores de velocidades de fase obtenidos. En la Figura 4.2, esta zona aparece encerrada entre dos líneas grises continuas, una línea negra continua y una línea negra segmentada. Estas dos últimas líneas están dadas por el número de onda máximo y mínimo donde los resultados SPAC definen la curva de dispersión, y no tienen relación con los límites definidos para el método f-k (Figura 3.10). Los tramos de las curvas de autocorrelación asociados a esta zona encerrada serán utilizados en el proceso de inversión.

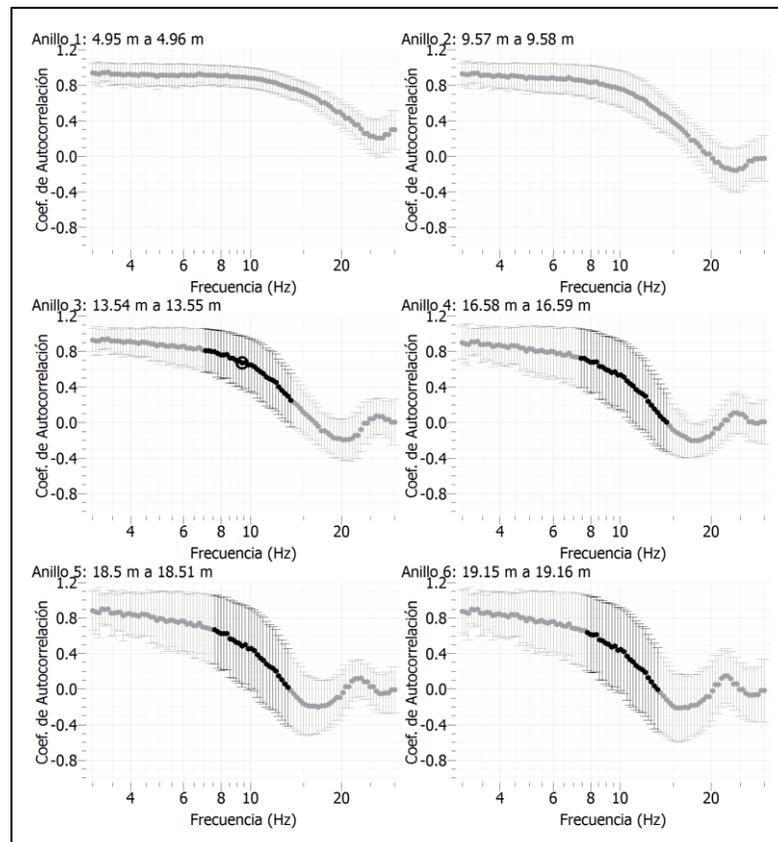


Figura 4.1: Curvas de autocorrelación obtenidas mediante el método SPAC. En color negro se destacan aquellos tramos de las curvas de autocorrelación asociados a la zona encerrada de la Figura 4.2

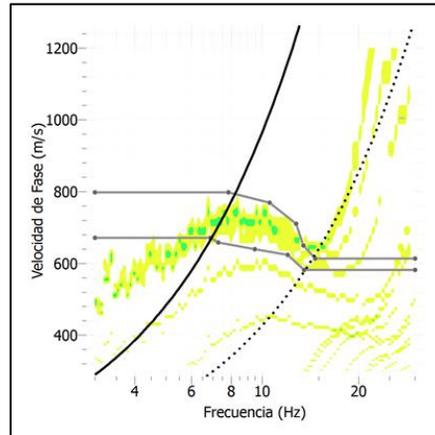


Figura 4.2: Velocidades de fase asociadas a coeficientes de autocorrelación para distintas frecuencias y curva de dispersión seleccionada

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el método SPAC para los casos estudiados en la sección §3.4, utilizando arreglos circulares y arreglos lineales. Cabe mencionar que se trata de complementar las exploraciones utilizando los mismos datos, registrados con los mismos arreglos usados para el método f-k.

4.1.1. Método SPAC aplicado a arreglos circulares

Para el caso 1 (suelos rígidos) se analizaron los arreglos R9_12, R9_24, R19_12 y R19_24 y sus resultados se indican en la Figura 4.3. En primer lugar, se observa que utilizar un mayor número de geófonos no implica una mejora significativa de los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos con el arreglo R9_12 muestran con claridad la curva de dispersión hasta los 8 Hz (80 m de longitud de onda aproximadamente) lo que a priori debiera garantizar la exploración satisfactoria de los primeros 30 m de profundidad. Por otro lado, con el arreglo R19_12 el resultado es más difuso y no es posible identificar con claridad la curva de dispersión. Debido a que no se pudo acceder a frecuencias menores, se presume que el tiempo de grabación no fue suficiente para registrar frentes de

ondas con esas características, o existía poco ruido ambiental durante la ejecución del ensayo, pues éstos fueron efectuados en distintos momentos.

En la Figura 4.4 se observa el enlace de la curva de dispersión obtenida con SPAC para el arreglo R9_12, con las obtenidas con el ensayo activo utilizando la caída libre del peso de 100 kg (línea roja), con el ensayo pasivo lineal (línea rosada) y las obtenidas con el método f-k sobre el arreglo R19_24 (línea azul). El enlace con las tres curvas hasta los 14 Hz es muy bueno, además, los valores obtenidos entre 8.5 y 14 Hz son consistentes con los obtenidos para el ensayo activo. Sin embargo, para frecuencias menores a 11 Hz, las curvas pasivas obtenidas con Roadside MASW y f-k, muestran velocidades superiores a las obtenidas con SPAC.

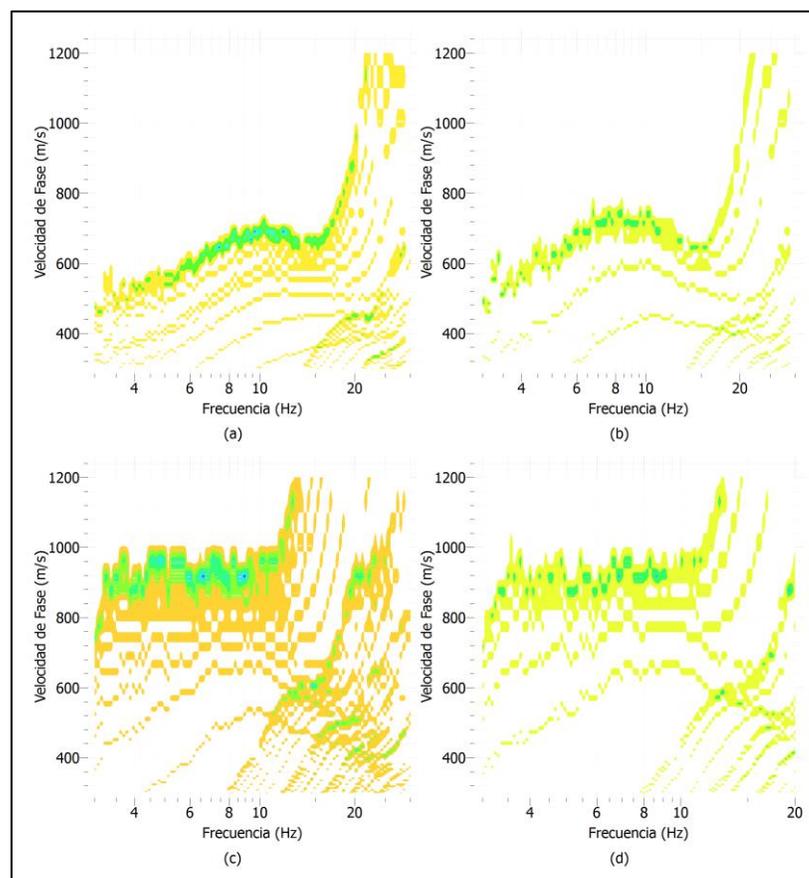


Figura 4.3: Resultados SPAC para caso 1 con los arreglos (a) R9_24, (b) R9_12, (c) R19_24 y (d) R19_12

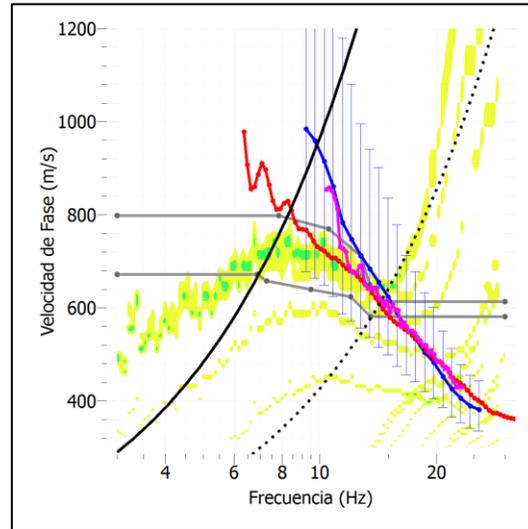


Figura 4.4: Curva de dispersión obtenida con SPAC para el caso 1 y enlace con las dadas por ensayos activos (rojo), pasivos lineales (rosado) y pasivos para arreglo R19_24 (azul)

Las diferencias observadas son atribuibles a la falta de información para frecuencias menores a los 11 Hz. Esto, sumado al antecedente de que el resultado obtenido sobre el arreglo R9_24 con el método SPAC tampoco entrega resultados satisfactorios, sugiere que al utilizar arreglos de mayor tamaño los 16 minutos registrados podrían ser insuficientes para explorar todo el rango de frecuencias que el arreglo permite. En ese sentido, si se requieren realizar exploraciones a grandes profundidades utilizando vibraciones ambientales, y por tanto, se utilizaran arreglos bidimensionales de gran tamaño, se recomienda realizar mediciones de mayor duración.

En el caso 2 (cenizas volcánicas), al observar los resultados de SPAC para el arreglo R9_12 (Figura 4.5a), se obtiene una mayor concentración de puntos asociada a las curvas de autocorrelación entre 6 y 10 Hz aproximadamente. En la Figura 4.5b se observa que hay un enlace satisfactorio entre los resultados de SPAC con los obtenidos con el ensayo activo y el pasivo lineal a los 8 Hz, pero a la vez, se observa que las velocidades de fase entregadas por el ensayo pasivo lineal para frecuencias inferiores a 7 Hz, tienden a elevarse. Esto es algo similar a lo que sucede en el caso 1, y puede estar asociado a la falta de ruido ambiental en ese rango de frecuencias.

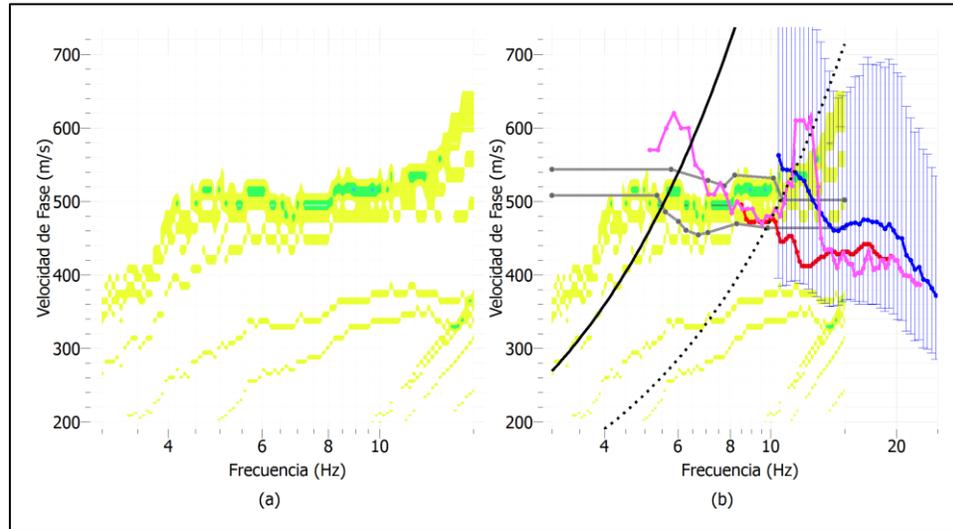


Figura 4.5: Curva de dispersión obtenida con SPAC para el caso 2 y enlace con las dadas por ensayos activos (rojo), pasivos lineales (rosado) y pasivos para arreglo R9_12 (azul)

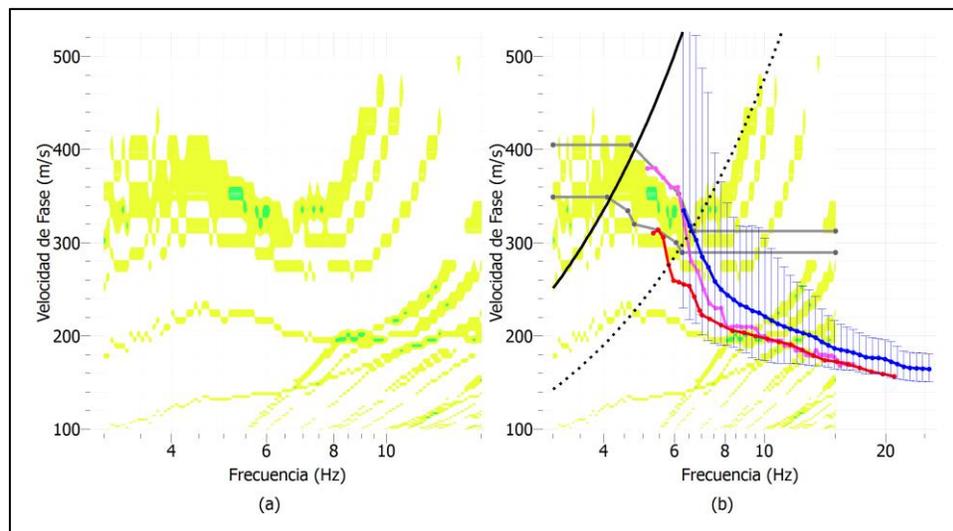


Figura 4.6: Curva de dispersión obtenida con SPAC para el caso 3 y enlace con las dadas por ensayos activos (rojo), pasivos lineales (rosado) y pasivos para arreglo R9_12 (azul)

Para el caso 3 (suelos finos), y tal como se observa en la Figura 4.6a, se puede identificar una concentración de puntos asociada a la curva de dispersión entre 4 y 6 Hz. Para este caso, el enlace de los resultados obtenidos con SPAC y las otras curvas de

dispersión es muy bueno, y permite extender el rango de frecuencias explorado hasta los 4 Hz, inclusive (Figura 4.6b).

4.1.2. Método SPAC aplicado a arreglos lineales

En esta sección, las curvas de dispersión se presentarán en función de la lentitud, en lugar de la velocidad de fase. Esto permite que los resultados se observen con mayor claridad, y además, facilitan la identificación de la curva de dispersión.

En la Figura 4.7a se observan los resultados obtenidos con SPAC para el arreglo lineal en el caso 1. A pesar de que se observa una zona con mayor concentración de puntos (entre 3 y 20 Hz), la identificación de la curva de dispersión, resulta menos evidente que en los resultados obtenidos con arreglos circulares. Una manera de facilitar la identificación de la curva de dispersión, es superponer la curva obtenida con el método Roadside MASW, sobre los resultados SPAC. Dado que ambos resultados se obtuvieron utilizando el mismo conjunto de datos, se deben obtener resultados coincidentes. En efecto, y tal como se observa en la Figura 4.7b, al superponer la curva obtenida con el método Roadside MASW (línea azul), se facilita la identificación de la curva de dispersión en los resultados SPAC, entre los 4 y 18 Hz aproximadamente, obteniendo una extensión de la misma hacia las bajas frecuencia de casi 6 Hz.

En los resultados SPAC del caso 2, se observan concentraciones de energía entre 5 y 11 Hz, que pueden ser asociadas a la curvas de dispersión (Figura 4.8a). Al superponer la curva Roadside MASW (Figura 4.9b), se observa un calce perfecto de ambas curvas entre los 5 y 9 Hz. Es importante notar, que a diferencia del caso anterior, el rango de frecuencias explorado por SPAC ya era cubierto en gran medida por el rango explorado por el método Roadside MASW, por lo tanto, incluir SPAC en el análisis no implica un aumento significativo del rango frecuencias explorado.

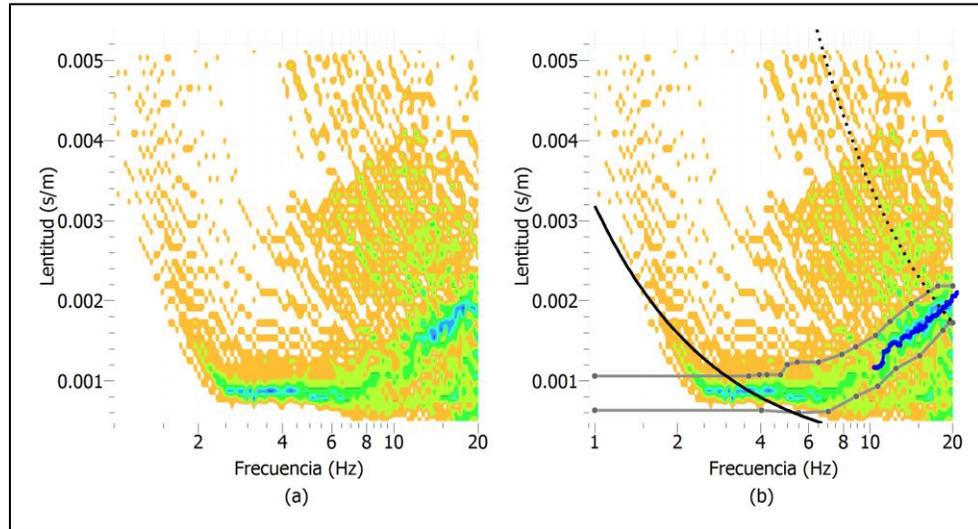


Figura 4.7: Resultados obtenidos con SPAC aplicado al arreglo lineal para el caso 1 y superposición de la curva de dispersión obtenida con Roadside MASW (azul)

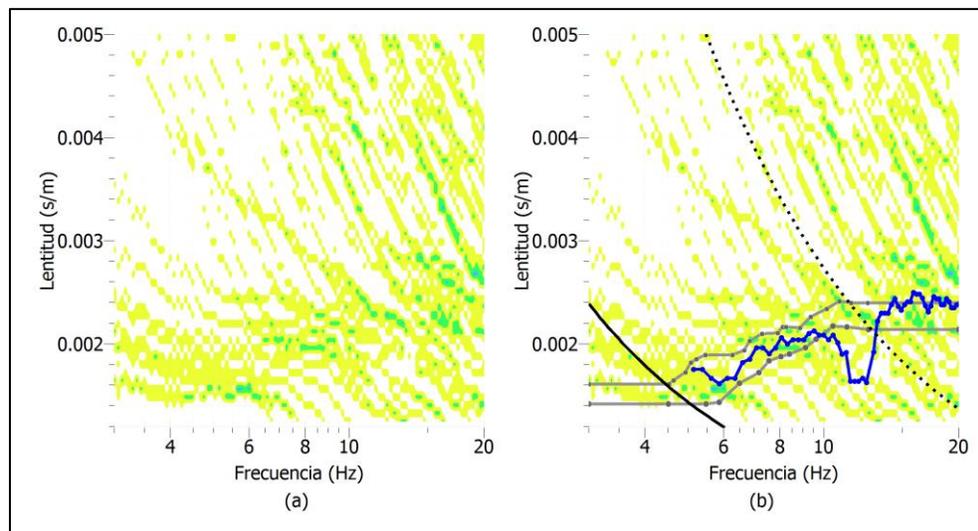


Figura 4.8: Resultados obtenidos con SPAC aplicado al arreglo lineal para el caso 2 y superposición de la curva de dispersión obtenida con Roadside MASW (azul)

Para el caso 3, mirando la Figura 4.9a, sólo se observa una concentración de puntos en las altas frecuencias. Sin embargo, al superponer la curva Roadside MASW, se observa

que ésta se enlaza de buena manera con los resultados del análisis SPAC, ampliando el rango de frecuencias obtenido con el arreglo lineal entre 3 y 6 Hz.

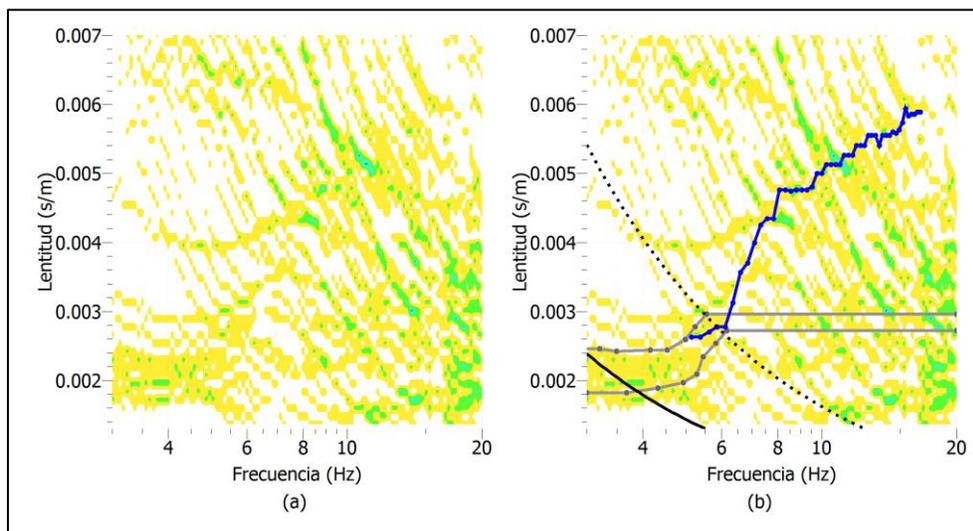


Figura 4.9: Resultados obtenidos con SPAC aplicado al arreglo lineal para el caso 3 y superposición de la curva de dispersión obtenida con Roadside MASW (azul)

4.2. Evaluación del perfil de Vs a través de la combinación de técnicas

En la sección §3.4, se evaluó el perfil de velocidades de ondas de corte, utilizando por separado cada una de las curvas de dispersión obtenidas con los ensayos activos y pasivos descritos en esa misma sección. A excepción de la curva activa obtenida con la caída libre del peso de 100 kg, las curvas de dispersión por sí solas, fueron insuficientes para una exploración satisfactoria de los primeros 30 metros de profundidad.

En esta sección se evalúan distintas combinaciones de datos para la evaluación del perfil de velocidades de ondas de corte. El objetivo es establecer una combinación de datos que asegure la exploración de los primeros 30 metros de profundidad, utilizando equipos de refracción convencionales sin tener que recurrir a fuentes sísmicas de gran energía.

4.2.1. Combinación de curvas de dispersión

En la Figura 4.10 se resumen las curvas de dispersión obtenidas la sección §3.4 para los tres casos en estudio, y se contrastan con los resultados obtenidos con el método SPAC sobre el arreglo circular. A su vez, en la Figura 4.11 se resumen las mismas curvas de dispersión, pero comparadas con los resultados del método SPAC sobre el arreglo lineal.

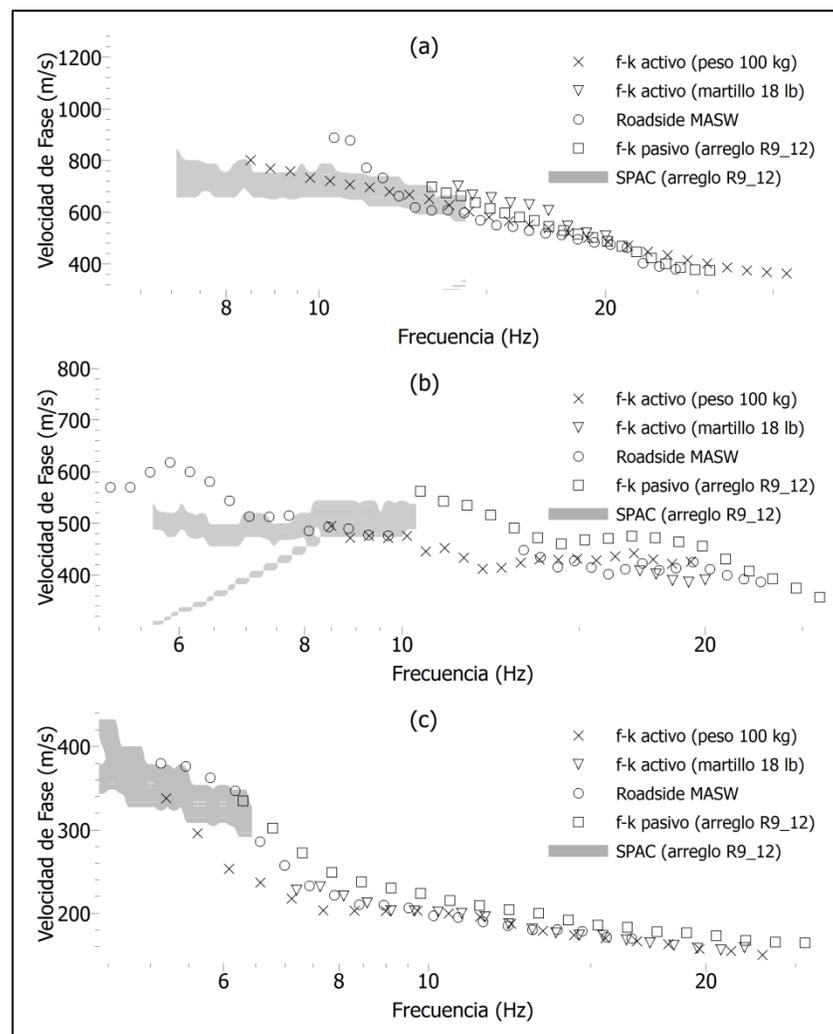


Figura 4.10: Curvas de dispersión y resultados SPAC sobre arreglos circulares en: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3

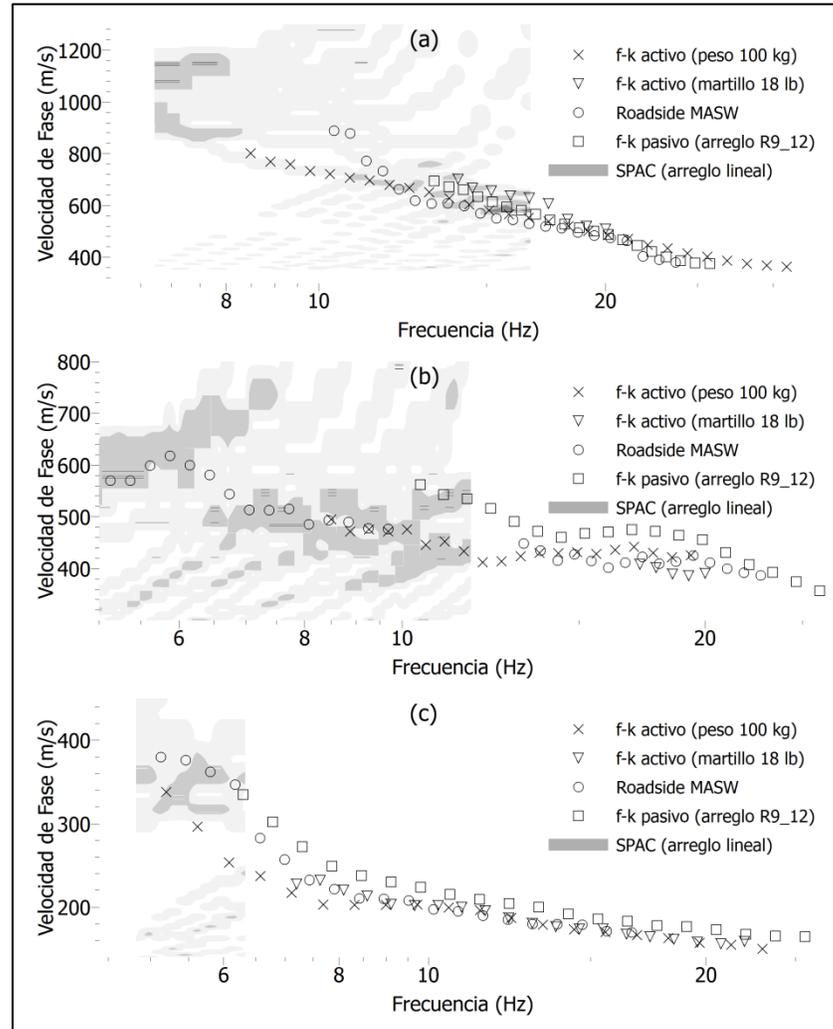


Figura 4.11: Curvas de dispersión y resultados SPAC sobre arreglos lineales en: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3

En el caso 1, se observa que cada método explora diferentes rangos de frecuencias. En el ensayo activo con golpes de martillo y con el método f-k sobre el arreglo circular, la frecuencia mínima explorada es del orden de 14 Hz, lo que de acuerdo a los resultados de la sección §3.4.1 son insuficientes para la exploración de los primeros 30 metros. Por el contrario, las curvas activa con la caída libre de 100 kg, pasiva lineal con Roadside MASW, y los resultados obtenidos con SPAC (lineal y circular), permiten una exploración por debajo los 10 Hz. Es importante notar, que los rangos de frecuencias explorados para un mismo arreglo, son muy diferentes al utilizar diferentes técnicas de análisis (f-k y

SPAC). Además, se observa una tendencia de los resultados obtenidos con el método Roadside MASW de sobreestimar las velocidades de fase para frecuencias bajo los 12 Hz, en comparación a los resultados obtenidos con los otros métodos.

En el caso 2, las curvas de dispersión obtenidas con los distintos métodos presentan muchas diferencias entre ellas. La curva de dispersión obtenida con los golpes de martillo explora un rango de frecuencia muy acotado, en comparación a las otras curvas. Por el contrario, la curva obtenida con la caída libre de 100 kg permite estimar la curva de dispersión en un rango de frecuencias mucho más amplio, llegando a frecuencias cercanas a los 8.5 Hz. Los resultados de los ensayos pasivos lineales obtenidos con SPAC y Roadside MASW permiten estimar la curva de dispersión hasta los 5 Hz aproximadamente, siendo los métodos que permiten acceder a las menores frecuencias. Los resultados provenientes del análisis SPAC sobre el arreglo circular permiten acceder a la curva de dispersión hasta frecuencias cercanas a los 6 Hz. Sin embargo, se observa que las velocidades de fase de las curvas obtenidas con SPAC circular para frecuencias bajo los 8 Hz, son ligeramente inferiores a las obtenidas con los ensayos pasivos lineales (SPAC y Roadside MASW). A su vez, los resultados obtenidos con el método f-k sobre el arreglo circular, presenta velocidades ligeramente superiores a los curvas obtenidas con todos los otros métodos.

En resumen, para el caso 2, se observa una clara consistencia entre los resultados obtenidos con arreglos lineales (activo f-k, SPAC lineal y Roadside MASW), pero a la vez muchas diferencias con los resultados obtenidos con arreglos circulares, lo que probablemente esté ligado a una distribución anisotrópica del suelos para las profundidades asociadas a los rangos de frecuencias donde se observan estas diferencias.

Por último, en el caso 3, se observa una clara consistencia entre todas las curvas de dispersión estimadas. Con la caída libre de 100 kg es posible estimar la curva de dispersión hasta los 5 Hz, en comparación a los 7 Hz logrados utilizando los golpes de martillo. Es importante destacar que, a diferencia de los casos anteriores, el rango de frecuencias estimado en el ensayo activo con golpes de martillo es sólo ligeramente inferior al obtenido con la fuente de mayor energía. Por otro lado, el enlace entre curvas activas y

pasivas es excelente para un amplio tramo de frecuencias, con una pequeña diferencia entre las curvas obtenidas con el arreglo R9_12 y las obtenidas con los arreglos lineales, del orden de 25 m/s. Sólo para frecuencias menores a 6 Hz, se observa una tendencia de los ensayos pasivos de sobreestimar las velocidades de fase, en comparación a las velocidades obtenidas con los ensayos activos. Los resultados obtenidos con SPAC, utilizando tanto el arreglo circular como el arreglo lineal, permiten estimar la curva de dispersión para frecuencias entre los 4.5 y 6 Hz, que si bien es un rango de frecuencias muy acotada, complementan de muy buena manera las curvas obtenidas con los otros métodos (ensayos activos, Roadside MASW y f-k pasivo).

4.2.2. Evaluación del perfil de V_S utilizando distintas combinaciones de curvas de dispersión

En esta sección se muestran los resultados de la inversión de las curvas de dispersión o combinaciones de éstas, que exploran un amplio rango de frecuencias. En resumen, en esta sección se evalúa el desempeño de las siguientes combinaciones de datos:

- **AH:** Sólo la curva de dispersión obtenida en el ensayo activo con la caída libre del peso de 100 kg desde 3 m de altura.
- **LP:** Sólo la curva de dispersión obtenida en el ensayo pasivo lineal con el método Roadside MASW.
- **LPA:** Combinación de las curvas de dispersión obtenida con el ensayo pasivo lineal con el método Roadside MASW, y la obtenida con el ensayo activo utilizando como fuente el martillo de 18 lb.
- **LCPA:** Combinación de las curvas de dispersión obtenida a partir de los ensayos pasivos con arreglos lineales (Roadside MASW) y circulares (f-k y SPAC), y la curva obtenida con el ensayo activo utilizando como fuente el martillo de 18 lb.
- **LPA2:** : Combinación de las curvas de dispersión obtenida a partir de las curvas obtenidas con el ensayos pasivo lineal (Roadside MASW y SPAC), y la curva obtenida con el ensayo activo utilizando como fuente el martillo de 18 lb.

A lo largo de esta sección, las distintas combinaciones de datos serán llamadas de acuerdo al acrónimo indicado en negrilla. Es importante destacar que sólo la combinación AH utiliza equipos de refracción no convencionales, y que actualmente, las combinaciones LP y LPA son las más usadas en Chile para la evaluación del perfil de velocidades de ondas de corte.

Diversos autores (Xia et al. 1999; Wathelet, 2005) han planteado que el perfil de velocidades de ondas de corte (V_S), es el parámetro más influyente en el proceso de inversión. Por ello, en los procesos de inversión, los intervalos para el módulo de Poisson y la densidad fueron fijados entre 0.2 y 0.5, y 1700 y 2100 kg/m³, respectivamente. Tanto el valor de V_S como el espesor de cada capa son incógnitas del problema, mientras la velocidad de ondas de compresión esta explícitamente asociada a V_S a través del módulo de Poisson. Si bien, se disponía de información estratigráfica para cada sitio estudiado, para el proceso de inversión esta información no fue incorporada y la inversión se efectuó completamente a “ciegas”.

En la Figura 4.12 se observan los resultados de la inversión utilizando las distintas combinaciones de datos para los tres casos en estudio. Sólo se graficaron los perfiles con un *misfit* igual o menor a 1.5 veces el mínimo *misfit* alcanzado en cada proceso de inversión. De esta forma fue posible identificar hasta que profundidad los resultados son confiables, asociándola a aquella profundidad donde se observe una alta variabilidad entre los perfiles generados. Por ejemplo, para el caso 1 con LP y LPA la profundidad máxima de exploración es aproximadamente los 20 metros. El detalle de las curvas de dispersión y/o autocorrelación asociadas a las combinaciones de datos se encuentra en el Anexo D.

En general, se observa que los resultados obtenidos con las combinaciones AH, LCPA y LPA2 permiten estimar el perfil de V_S hasta los 30 metros de profundidad satisfactoriamente. A su vez, las combinaciones LP y LPA tienden a sobrestimar las velocidades obtenidas para las capas más profundas, como se observa en los casos 1 y 3. Esto se puede explicar, debido a las curvas de dispersión obtenidas en los ensayos pasivos lineales con el método Roadside MASW, tienden a sobreestimar las velocidades de fase

para frecuencias bajas, en comparación a las obtenidas con la fuente de 100 kg y con el método SPAC.

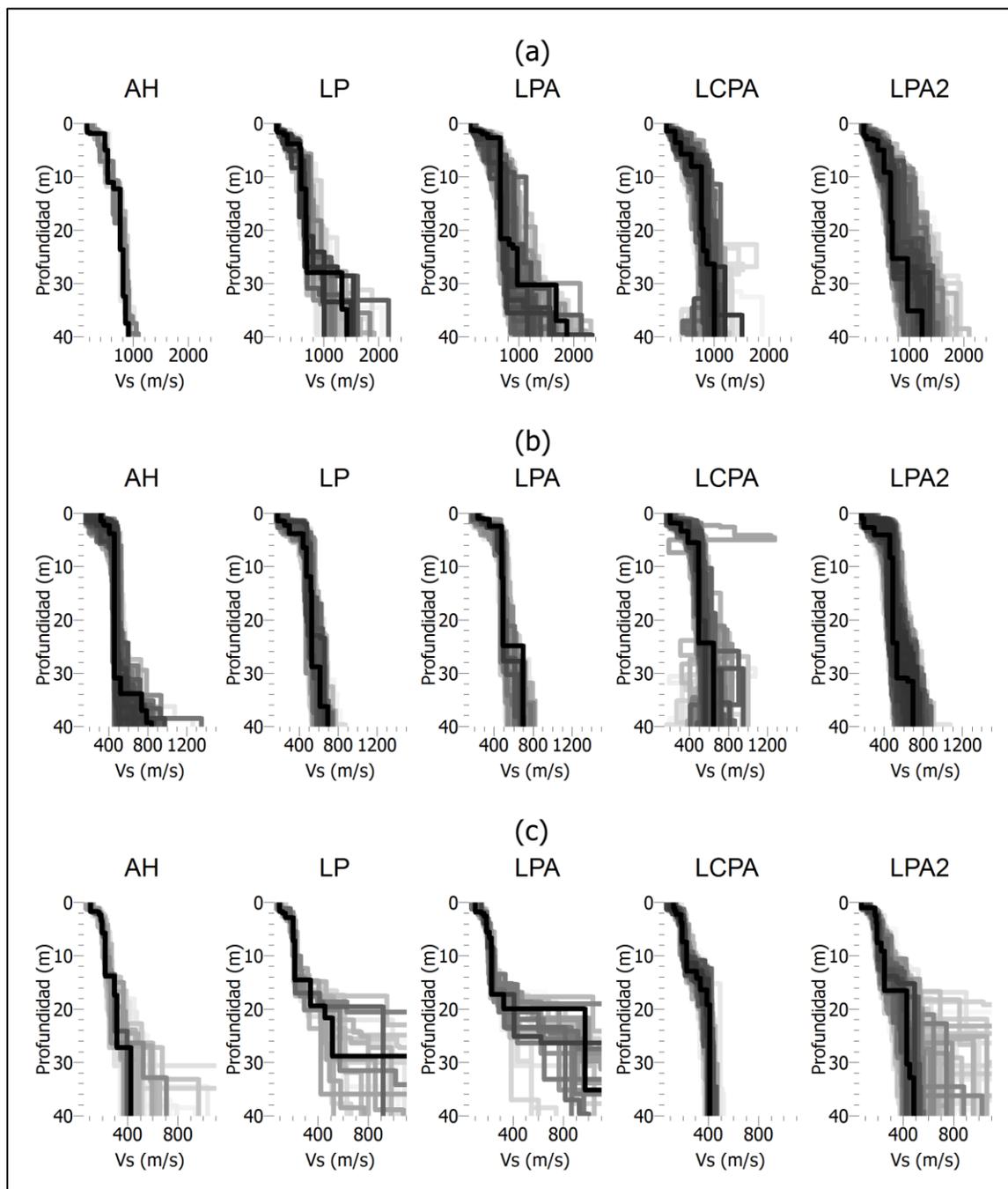


Figura 4.12: Perfiles de velocidades de ondas de corte para las distintas combinaciones de datos: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3

En la Figura 4.13 se comparan los resultados obtenidos con las distintas combinaciones de datos, con los disponibles de otras fuentes. En particular, se utilizan los resultados de los ensayos *down-hole* para los casos 2 y 3, mientras que para el caso 1 se utilizan los resultados obtenidos por Riddell et al. (1992).

Para el caso 1, los resultados obtenidos son las combinaciones AH, LCPA y LPA2 son consistentes entre sí, con los obtenidos por Riddell et al. (1992) y con la estratigrafía del sitio (Ampuero y Van Sint Jan, 2004). Por otro lado, las combinaciones LP y LPA tienden a incrementar las velocidades obtenidas para profundidades mayores a 30 metros.

En el caso 2, se observan resultados muy consistentes entre los resultados *down-hole* y los perfiles obtenidos con las distintas combinaciones de datos, siendo la principal diferencia entre ambos, las velocidades obtenidas para las capas más superficiales. El ensayo *down-hole* indica que las velocidades para las capas más superficiales son superiores a los 400 m/s, mientras que las velocidades obtenidas con las combinaciones de datos son mucho menores. Esto se explica debido a que los ensayos basados en ondas superficiales están limitados por el menor espaciamiento entre geófonos para la exploración de las capas más superficiales. En ese sentido, para poder explorar efectivamente esa parte más superficial del sitio, se pueden realizar ensayos con un menor espaciamiento entre geófonos.

Por último, para el caso 3, se obtienen resultados consistentes entre todas las combinaciones de datos y el ensayo *down-hole* hasta los 20 metros de profundidad. A partir de esa profundidad, las combinaciones LP y LPA tienden a incrementar las velocidades obtenidas, lo que se refleja en el incremento de la variabilidad de los V_s obtenidos para profundidades mayores a 20 m. Por otro lado, el lente rígido de grava que se observa en los resultados del ensayo *down-hole*, así como en los resultados del sondaje (Tabla 3.9) no es identificado por ninguna de las combinaciones de análisis. Cabe destacar que los métodos basados en ondas superficiales, son capaces de estimar transiciones de estratos de suelos más rígidos sobre otros más blandos, sin embargo, esta irregularidad detectada en el sondaje tiene la apariencia de ser puntual, ya que no se refleja en la curva de dispersión. Es importante recordar que una de las principales diferencias entre

mediciones globales como los métodos geofísicos superficiales con los métodos *in-hole*, es que realizan un muestreo más global del sitio en estudio, ya que involucran un volumen de suelo.

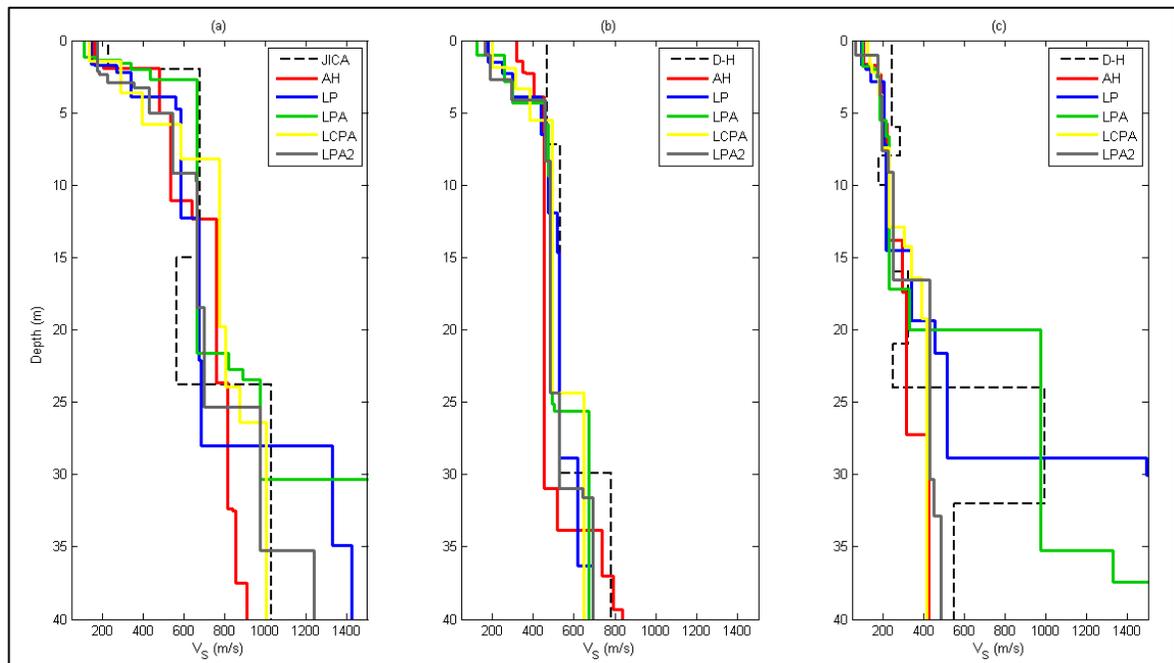


Figura 4.13: Comparación de los perfiles de velocidades de ondas de corte para las distintas combinaciones de datos: (a) Caso 1, (b) Caso 2 y (c) Caso 3

4.2.3. Metodología propuesta para la estimación del perfil de velocidades de ondas de corte y la caracterización sísmica mediante $V_{S,30}$

En Chile la clasificación sísmica se realiza utilizando el promedio armónico de las velocidades de ondas de corte para los primeros 30 metros de profundidad ($V_{S,30}$) y un parámetro estático adicional (generalmente el número de golpes corregido en un ensayo SPT). Ya que para efectuar la clasificación se requiere de ambos parámetros, en este

trabajo se ha optado por denominar la clasificación de los sitios por letras minúsculas para distinguirla de la clasificación oficial. En la Tabla 4.1 se muestran los valores correspondientes a las clasificaciones propuestas, si se considera únicamente la información otorgada por los ensayos geofísicos.

Tabla 4.1: Clasificación sísmica acorde al $V_{S,30}$ (NCh 433, mod DS 61)

$V_{S,30}$ (m/s)	Clasificación Sísmica
$900 \leq V_{S,30}$	a
$500 \leq V_{S,30} < 900$	b
$350 \leq V_{S,30} < 500$	c
$180 \leq V_{S,30} < 350$	d
$V_{S,30} < 180$	e

En las Tabla 4.2, 4.3 y 4.4 se resumen los resultados obtenidos para los tres casos estudiados en el marco de esta investigación, donde los $V_{S,30}$ indicados corresponden a cada una de las combinaciones de datos descritas en la sección anterior (utilizando los mismos acrónimos para identificarlos). De los 10000 modelos generados en cada inversión, un grupo de ellos tienen propiedades dispersivas similares. En términos prácticos, estos modelos son equivalentes de acuerdo al valor de ajuste (o *misfit*) alcanzado, por lo cual se fijó un criterio arbitrario para agrupar aquellos modelos similares. Para ello, se consideran aquellos modelos cuyo valor de ajuste sea igual o menor al mínimo valor de ajuste alcanzado más 0.03. A partir de cada conjunto de modelos similares se estimó el $V_{S,30}$ promedio ($\overline{V_{S,30}}$) así como su desviación estándar ($\sigma_{V_{S,30}}$). En las mismas tablas se indica el $V_{S,30}$ correspondiente al modelo con el mejor ajuste y la desviación estándar del V_S (σ_{V_S}) a los 30 metros.

En general, se observa que los resultados obtenidos con las combinaciones de datos AH y LCPA son muy consistentes entre ellos, pues son las que permiten la mayor profundidad de exploración en los tres casos estudiados, y son las que entregan los mejores

resultados en términos de variabilidad del V_S a los 30 metros, así como la variabilidad del parámetro $V_{S,30}$.

Tal como se indicó en la sección anterior, la combinación LP tiende a sobreestimar las velocidades calculadas para las capas más profundas (lo que se refleja en la desviación estándar a los 30 metros), pero al mismo tiempo subestima las velocidades para las capas más superficiales. La combinación de estos efectos explica por qué el $V_{S,30}$ calculado con esta combinación en el caso 3 es similar a los calculados con las combinaciones AH y LCPA.

Tabla 4.2: $V_{S,30}$ obtenidos para el caso 1

	Conjunto de modelos similares			$V_{S,30}$ del modelo con el mejor ajuste (m/s)	σ_{VS} a 30 m (m/s)
	N° de modelos similares	$\overline{V_{S,30}}$ (m/s)	$\sigma_{VS,30}$ (m/s)		
AH	67	584	74,3	555	46,5
LPA	109	581	109,7	573	163,3
LP	94	566	105,3	524	244,1
LCPA	751	596	82,6	552	37,1
LPA2	126	572	101,6	527	172,6
JICA	-	-	-	608	-

Tabla 4.3: $V_{S,30}$ obtenidos para el caso 2

	Conjunto de modelos similares			$V_{S,30}$ del modelo con el mejor ajuste (m/s)	σ_{VS} a 30 m (m/s)
	N° de modelos similares	$\overline{V_{S,30}}$ (m/s)	$\sigma_{VS,30}$ (m/s)		
AH	535	490	38,4	441	49,1
LPA	311	468	47,1	428	54,9
LP	315	464	48,8	441	50,4
LCPA	2884	459	36,3	463	21,2
LPA2	1576	455	46,3	414	53,9
D-H	-	-	-	519	-

Tabla 4.4: $V_{s,30}$ obtenidos para el caso 3

	Conjunto de modelos similares			$V_{s,30}$ del modelo con el mejor ajuste (m/s)	σ_{VS} a 30 m (m/s)
	N° de modelos similares	$\overline{V}_{s,30}$ (m/s)	$\sigma_{VS,30}$ (m/s)		
AH	262	253	33,3	244	102,9
LPA	134	290	53,1	279	425,3
LP	94	289	62,6	261	358,6
LCPA	78	270	27,8	269	17,5
LPA2	59	272	36,7	257	60,6
D-H	-	-	-	299	-

Por último, en los casos 1 y 2 la curva de dispersión obtenida con los golpes de martillo, abarca un rango de frecuencia muy pequeño, que no contribuye en extender el rango de frecuencias de la curva de dispersión obtenida con el método Roadside MASW. Sólo en el caso 3, es posible extender el rango de frecuencias al sumar la curva de dispersión activa obtenida con el martillo con la curva pasiva lineal. En este caso, se puede observar que al incluir la curva de dispersión activa, y así describir mejor las capas superficiales, pero manteniendo las velocidades obtenidas para las capas más profundas, se tiende a sobrestimar el $V_{s,30}$ calculado

Los resultados obtenidos con los ensayos *down-hole* son mayores en todos los casos, incluso cambiando la clasificación sísmica asignada en el caso 2. Esta diferencia se explica, debido a que en los métodos geofísicos basados en ondas superficiales la profundidad mínima de exploración estará limitada por el espaciamiento mínimo entre geófonos, mientras que el *down-hole* si permite la exploración para estas capas más someras.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las combinaciones de datos AH y LCPA demuestran su capacidad para clasificar sísmicamente suelos para los primeros 30 m de profundidad. Por otro lado, a pesar de que la combinación LPA2, demuestra a priori, ser apta para la clasificación sísmica de suelos, el uso de SPAC con una configuración lineal es una propuesta reciente, que requiere ser estudiada para más casos para poder avalar su

empleo. Además se debe considerar, que los experimentos de Chávez-García et al. (2006) utilizando configuraciones lineales, fueron realizadas en condiciones de bajo ruido ambiental.

En resumen se proponen las siguientes metodologías para la exploración de los primeros 30 metros de profundidad:

- I. Ensayo activo utilizando una fuente de gran energía capaz de explorar los 30 metros de profundidad
- II. Combinación de ensayos activos utilizando fuentes de baja energía (como los golpes con martillo), ensayos pasivos lineales (analizados con SPAC y Roadside MASW), ensayos pasivos circulares (analizados con f-k y SPAC). De acuerdo a los resultados de esta investigación, el arreglo de 9.8 metros de radio es capaz de explorar los primeros 30 metros, para las distintas categorías de suelos establecidas en Chile. Además, el tamaño del arreglo es apropiado para ser utilizado en zonas urbanas.

4.3. Desempeño de las combinaciones de datos para distintas condiciones de tráfico

Para evaluar el efecto del ruido ambiental sobre el desempeño de las combinaciones LP, LPA, LCPA y LPA2, se estudian 20 casos adicionales (todos ellos ubicados en la región Metropolitana) con distintas condiciones de tráfico vehicular. En la Tabla 4.5 se resumen los resultados obtenidos para cada uno de estos casos en términos del $V_{s,30}$ calculado.

Las principales diferencias observadas entre LP y LPA con respecto a LCPA, están asociadas a diferentes condiciones de tráfico. En situaciones de alto tráfico se observa que las mayores diferencias entre LP y LCPA son cercanas al 16%, mientras que las diferencias entre LPA y LCPA son del orden del 12%. Por otro lado, en situaciones de bajo tráfico vehicular, la diferencia máxima observada entre LP y LCPA alcanza el 24%, mientras que al comparar LPA y LCPA, la mayor diferencia observada es cercana al 17%.

En términos generales, LPA2 muestra una independencia de las condiciones de tráfico, y las diferencias en el $V_{s,30}$ calculado con respecto a LCPA son menores en comparación a los otros casos.

Las mayores diferencias se observan en los casos E07, E19 y E20. Como se indica en la Figura 4.14, las mayores diferencias se presentan para las capas más profundas en los tres casos, donde los métodos LP y LPA tienden a sobreestimar las velocidades. Este fue el mismo fenómeno observado en el caso 3 de la sección anterior (suelos finos).

Tabla 4.5: Desempeño de las distintas combinaciones de técnicas y evaluadas para distintas condiciones de tráfico

Caso	Orientación	Tráfico	$V_{s,30}$ (m/s)				Diferencia entre LCPA y		
			LP	LPA	LCPA	LPA2	LP	LPA	LPA2
E01	No orientado	Bajo	329	329	352	343	-6,5%	-6,5%	-2,6%
E02	Perpendicular	Bajo	261	242	243	240	7,4%	-0,4%	-1,2%
E03	Perpendicular	Alto	234	254	255	249	-8,2%	-0,4%	-2,4%
E04	Perpendicular	Alto	276	287	294	305	-6,1%	-2,4%	3,7%
E05	Perpendicular	Alto	516	495	534	494	-3,4%	-7,3%	-7,5%
E06	Perpendicular	Alto	382	332	345	379	10,7%	-3,8%	9,9%
E07	Perpendicular	Alto	488	471	421	458	15,9%	11,9%	8,8%
E08	Perpendicular	Alto	402	425	400	404	0,5%	6,3%	1,0%
E09	Perpendicular	Alto	416	446	429	464	-3,0%	4,0%	8,2%
E10	Perpendicular	Bajo	513	512	509	528	0,8%	0,6%	3,7%
E11	Perpendicular	Bajo	530	533	508	533	4,3%	4,9%	4,9%
E12	Perpendicular	Bajo	441	439	427	431	3,3%	2,8%	0,9%
E13	Paralelo	Alto	409	418	408	414	0,2%	2,5%	1,5%
E14	Paralelo	Alto	306	303	296	317	3,4%	2,4%	7,1%
E15	Paralelo	Alto	372	431	411	442	-9,5%	4,9%	7,5%
E16	Paralelo	Alto	564	572	561	592	0,5%	2,0%	5,5%
E17	Paralelo	Bajo	320	315	317	299	0,9%	-0,6%	-5,7%
E18	Paralelo	Bajo	275	261	258	259	6,6%	1,2%	0,4%
E19	Paralelo	Bajo	345	336	307	309	12,4%	9,4%	0,7%
E20	Paralelo	Bajo	464	440	374	420	24,1%	17,6%	12,3%

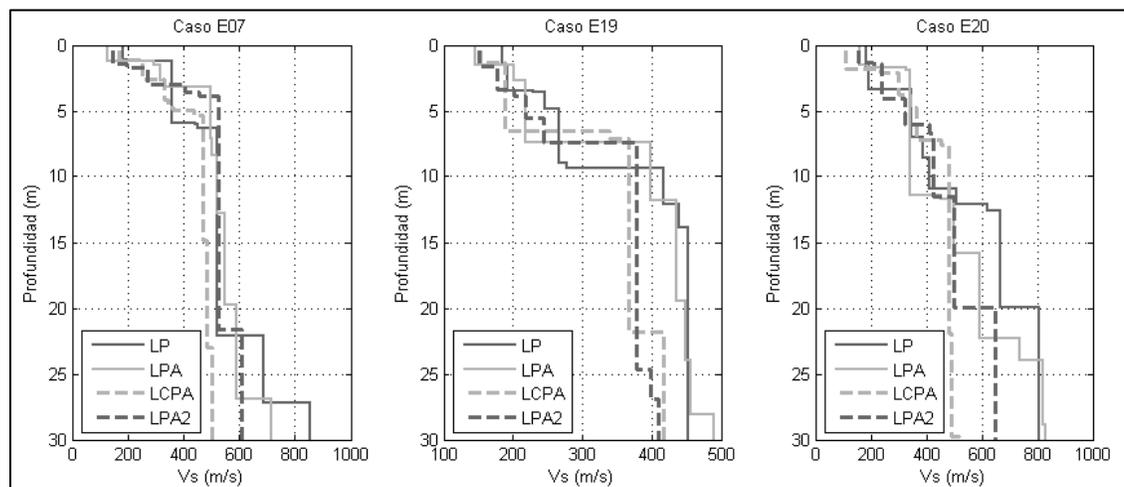


Figura 4.14: Casos observados en la Tabla 3 que presentan las diferencias más severas entre LP y LPA con LCPA: Casos E07, E19 y E20

Los resultados obtenidos con LPA2 en el caso E19, son similares a los obtenidos con LCPA. Sin embargo, esto no sucede en los casos E07 y E20, donde se observan diferencias en las capas más profundas, donde las velocidades estimadas por LPA2 son ligeramente superiores a las obtenidas con LCPA. Esto se refleja en las diferencias en el $V_{S,30}$ presentadas en la Tabla 4.5.

Dada la variabilidad observada en LPA2, no es posible recomendar una clasificación sísmica basada en esta combinación de datos. De todas formas, se recomienda que en futuras investigaciones se revisen más casos utilizando la combinación LPA2, de forma de clarificar si este comportamiento es dependiente del tipo de suelo, ya que cuatro de los cinco ensayos donde se detectaron estas diferencias se encuentran ubicados en los depósitos de cenizas volcánicas (Gálvez, 2012).

Por último, es muy importante notar que en algunos casos (A01, A05 y A06) los $V_{S,30}$ obtenidos con diferentes combinaciones de datos, implican diferentes clasificaciones sísmicas (Tabla 4.1). Acorde a los resultados obtenidos, se recomienda que cuando el $V_{S,30}$ calculado, se encuentre en un 10% por sobre el límite entre dos clases sísmicas, se revise la clasificación sísmica utilizando dos combinaciones de datos diferentes, LCPA y LPA2 preferentemente.

4.4. Resumen

Los resultados obtenidos con el método SPAC permiten extender el rango de frecuencias satisfactoriamente explorado. Sin embargo, la identificación de la curva de dispersión en los resultados obtenidos con SPAC lineal, resulta menos evidente que en los resultados obtenidos con SPAC circular, por lo que su uso requiere de mayor experiencia.

Es posible determinar el perfil de velocidades de ondas de corte para los primeros 30 metros de profundidad utilizando equipos de refracción convencionales y fuentes de baja energía (como los golpes con martillo). Para ello se deben combinar los resultados obtenidos en ensayos activos y pasivos, utilizando arreglos lineales y bidimensionales, combinando el análisis f-k y el enfoque SPAC.

Se observa una dependencia de los resultados obtenidos utilizando el método Roadside MASW con las condiciones de tráfico. Esto, sumado a la sobrestimación de las velocidades para capas profundas, hace que una inversión basada únicamente en el método Roadside MASW no sea recomendable. Si bien, al incluir el método SPAC lineal fue posible estimar satisfactoriamente el perfil de velocidades en varios de los casos, la variabilidad de resultados detectada durante esta investigación impide recomendar una metodología basada únicamente en arreglos lineales.

5. APLICACIÓN A LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL NORTE Y PONIENTE DE SANTIAGO

Tras el terremoto del 27 de febrero de 2010, las autoridades de la Región Metropolitana impulsaron la ejecución de estudios que permitan delimitar aquellas áreas que estén expuestas a una mayor amenaza frente a un sismo de gran magnitud debido a las características locales de los suelos. Por ello, el Servicio Regional del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de la Región Metropolitana (Seremi Metropolitana MINVU) ordenó el estudio de microzonificación sísmica de los sectores norte y poniente de Santiago, que corresponden a zonas donde se observaron respuestas singulares respecto al resto de la región (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012a y 2011-2012b). Los resultados se utilizarán para modificar y/o definir las disposiciones relativas al uso de suelos en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS).

Este estudio abarcó las comunas de Lampa, Colina, Huechuraba y Quilicura en la zona norte de Santiago, mientras que en la zona poniente abarcó las comunas de Renca, Cerro Navia, Pudahuel y Maipú. En cada zona, se realizaron 100 mediciones del perfil de velocidades de ondas de corte a través de ensayos basados en ondas superficiales, utilizando la metodología basada en la combinación de métodos activos y pasivos investigada en este trabajo. Además, se realizaron 100 mediciones del periodo fundamental a través del método de la razón espectral H/V. La definición de las unidades geológicas de las zonas estudiadas, se realizó mediante un análisis de los pozos y sondajes disponibles para cada zona de estudio, complementado con los resultados de los ensayos geofísicos. Los ensayos fueron ejecutados por DICTUC S.A. y la Universidad Diego Portales, y la definición de unidades geológicas fue realizada por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Las mediciones se efectuaron entre diciembre del 2011 y agosto del 2012.

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los estudio de microzonificación sísmica, con énfasis en los $V_{S,30}$ y periodos fundamentales (T_0) obtenidos para cada zona explorada, con el objetivo de mostrar la eficiencia de los métodos

geofísicos basados en ondas superficiales, así como la metodología propuesta en este trabajo, en estudios de clasificación sísmica

5.1. Microzonificación sísmica del norte de Santiago

En la Figura 5.1 y Tabla 5.1 se resume los resultados obtenidos en el sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b). Para cada una de las cinco zonas identificadas es posible asociar un intervalo esperado del valor de $V_{S,30}$. Sin embargo, sólo es posible asociar un rango acotado de periodos fundamentales (T_0) para algunas de estas zonas. En particular, en la zona 1N no fue posible definir un rango de T_0 debido a la baja amplitud de los *peaks* de las curvas H/V (Figura 2.35).

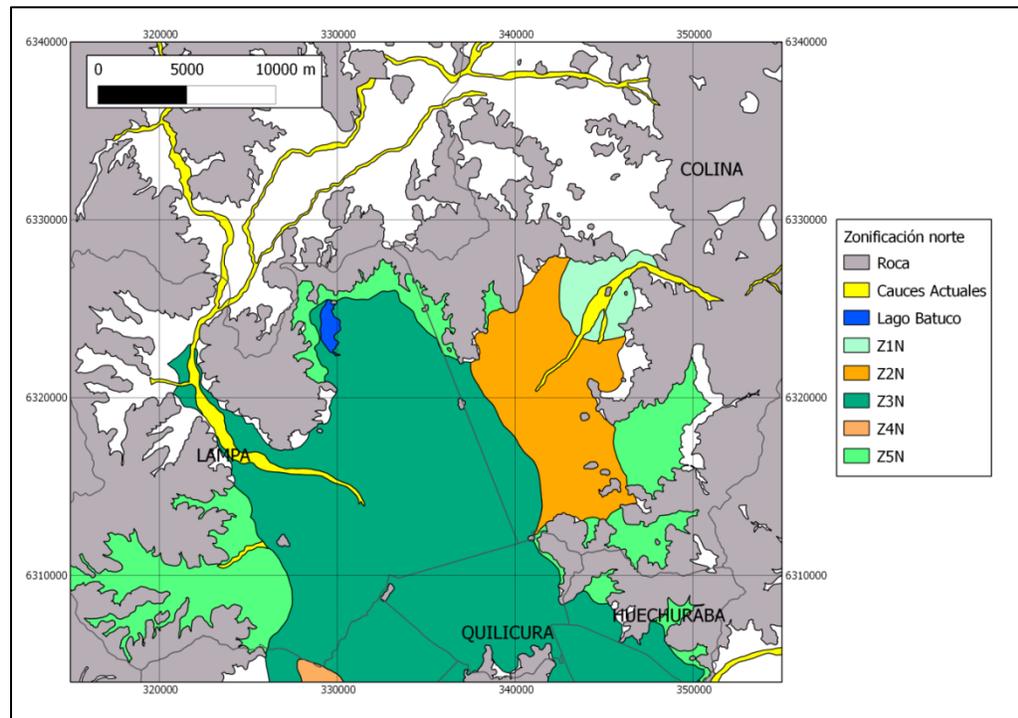


Figura 5.1: Mapa de microzonificación sísmica del norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b)

Tabla 5.1: Resultados microzonificación sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b)

Zona	Estratigrafía predominante	$V_{S,30}$ (m/s)	T_0 (s)	Amplitud
1N	Predominio de arenas y gravas arenosas de compacidad media a alta	> 500	-	Baja a media (2 – 4)
2N	Arcillas y gravas arenosas o arcillosas	400 – 500	0,2 – 2	Baja a media (2 – 4)
3N	Principalmente arcillas y limos, con intercalaciones métricas de arenas, gravas arenosas y localmente, ceniza. Arenas con intercalaciones de limos arcillosos y mezclas de gravas arcillosas (> 45% de limo y arcilla)	240 – 450	0,3 – 3,3	Baja a alta (2 – 6)
4N	Predominio de ceniza volcánica con intercalaciones menores de arenas, limos y gravas	428 – 480	0,3 – 3,3	Baja a media-alta (2 – 5)
5N	Gravas, arenas, finos. Suelo de espesor variable	300 – 500	0,2 – 1,0	Variable, baja a media (2 – 3)

En la Figura 5.2 se indican los lugares donde se realizaron mediciones del perfil de velocidades de ondas de corte. En cada punto se indica el tipo de suelo asociado a la clasificación sísmica utilizando únicamente el parámetro $V_{S,30}$, tal como se definió en la Tabla 4.1. En general, se observa una consistencia entre los antecedentes geológicos de las distintas zonas con alguna clasificación sísmica en particular, observándose las mayores diferencias en las cercanías a los cerros y a los contactos entre zonas. Por otro lado, en la Figura 5.3 se indican los lugares donde se midió el periodo fundamental T_0 a partir del método de la razón espectral H/V. En ella se observa una mayor variabilidad en comparación a los valores de $V_{S,30}$ obtenidos para cada zona.

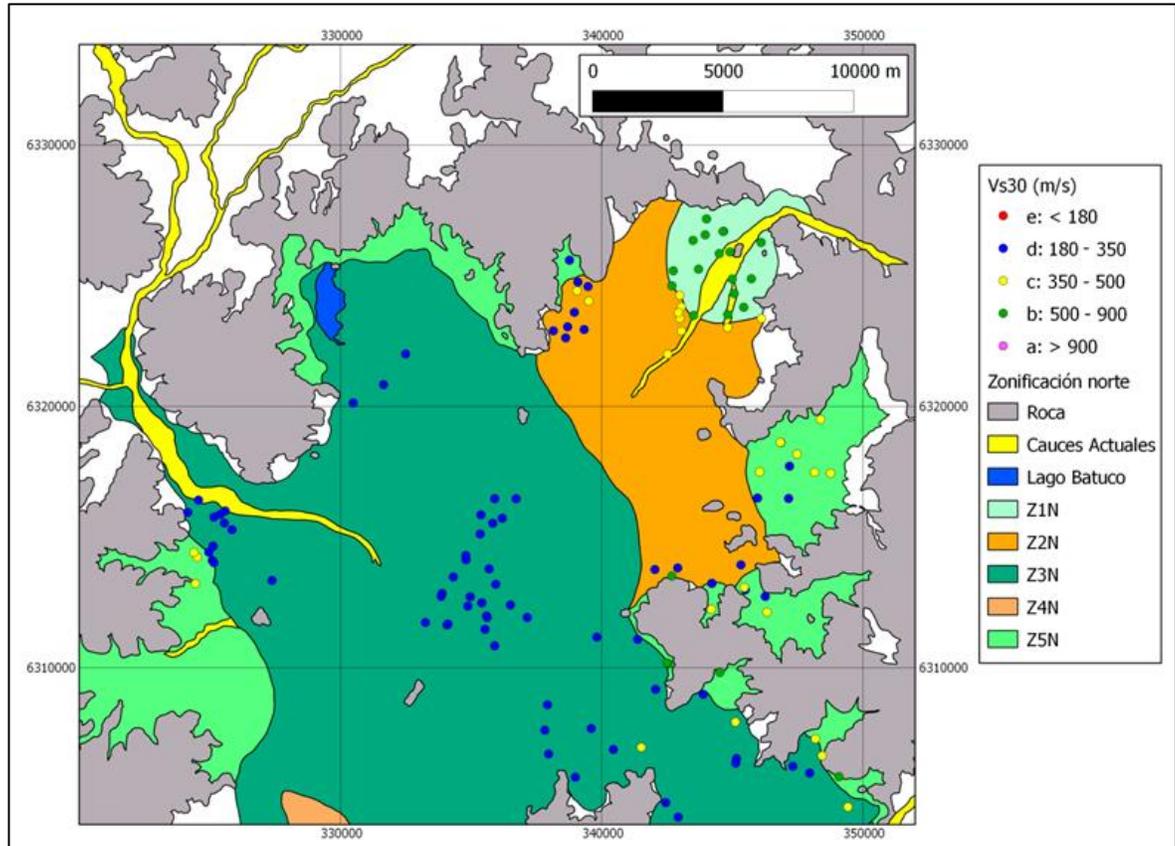


Figura 5.2: Mediciones del perfil de velocidades de ondas de corte en el sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b)

A continuación, se analiza en detalle los resultados obtenidos en las zonas 1N, 3N y 5N, para estudiar la consistencia entre los resultados de $V_{s,30}$ y T_0 en cada una de las zonas. Cabe destacar que en estas zonas se dispone de mayor cantidad de datos, ya que por indicación de la Seremi se solicitó concentrar las mediciones en zonas de futura expansión urbana. En la Figura 5.4 y Figura 5.5 se observan las distribuciones de los $V_{s,30}$ y T_0 obtenidos para cada una de las zonas.

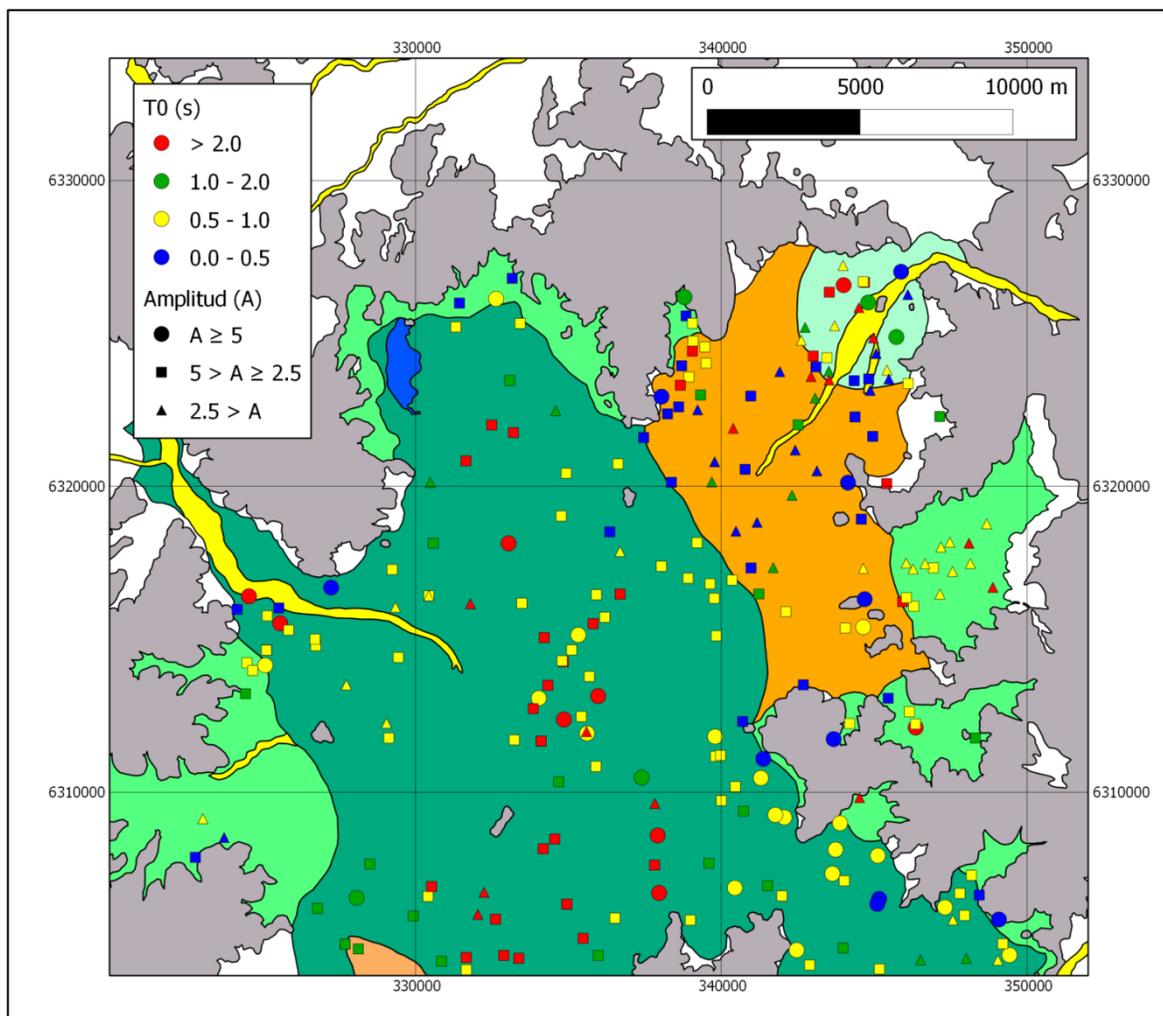


Figura 5.3: Mediciones del periodo fundamental en el sector norte de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b)

De acuerdo a la clasificación sísmica definida utilizando únicamente el parámetro $V_{s,30}$, la zona 1N sólo está conformada por suelos tipo b, lo que muestra una consistencia con la estratigrafía predominante (arenas densas y gravas). Es importante notar que en las cercanías del contacto con la zona 2N los $V_{s,30}$ comienzan a decrecer. Por otro lado, no es posible asociar a esta zona un intervalo claro de T_0 , ya que como se indica en la Tabla 5.1, las amplitudes de las curvas H/V obtenidas para esta zona son bajas, impidiendo la identificación del periodo fundamental en muchos casos. Este comportamiento se relaciona

con la existencia de suelos rígidos, y por lo tanto de contrastes de impedancia menores entre el suelo propiamente tal y la roca basal.

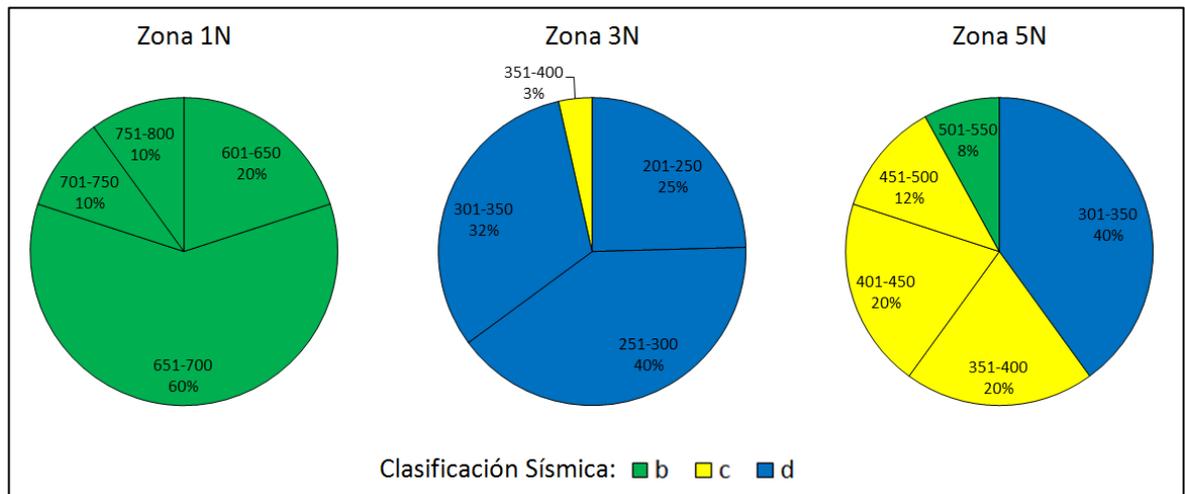


Figura 5.4: $V_{s,30}$ (m/s) obtenidos para las zonas 1N, 3N y 5N

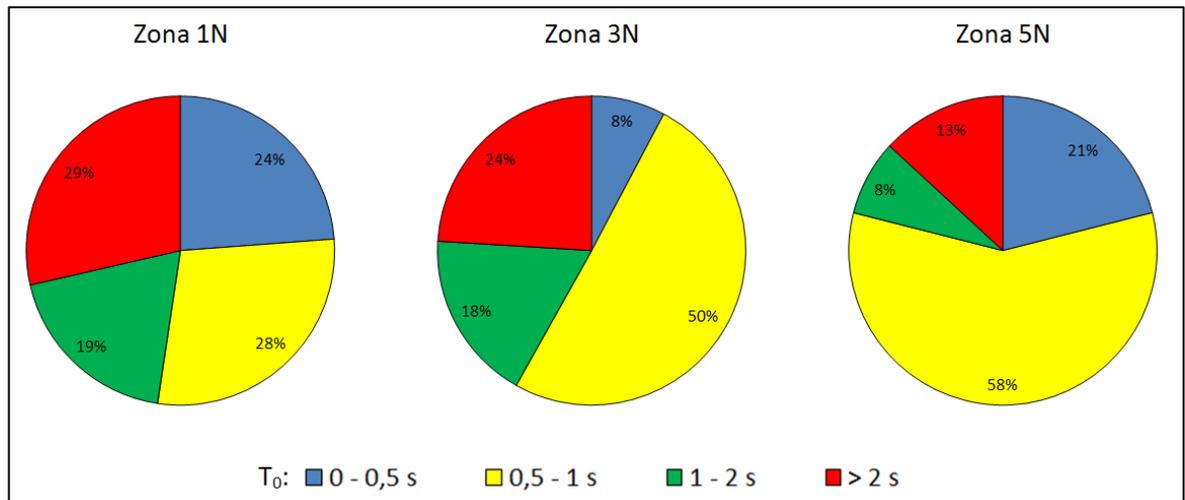


Figura 5.5: T_0 obtenidos para las zonas 1N, 3N y 5N

De acuerdo a lo indicado en la Figura 5.4, en la zona 3N hay una gran presencia de suelos finos, siendo consistente con los $V_{s,30}$ obtenidos. En efecto, un 97% de los $V_{s,30}$

obtenidos indican que este suelo corresponde a una clasificación sísmica tipo d, y sólo en las cercanías de cerros se obtienen valores superiores, ya que los depósitos son menos profundos y el promedio para los primeros 30 metros probablemente incorpore materiales más cercanos a la roca basal. Por otro lado, un 92% de los T_0 obtenidos son mayores a 0.5 s, siendo predominante (50%) el rango entre 0.5 y 1 s (Figura 5.5).

En la zona 5N se observa una mayor variabilidad entre los $V_{S,30}$ obtenidos, siendo predominantes los suelos tipo c (52%). Las diferencias observadas están asociadas a la cercanía a los cerros, ya que el espesor del estrato de suelo que conforma esta zona es variable (Figura 5.4), mientras que los suelos tipo d se presentan en las cercanías al contacto con otras zonas, como la 2N y 3N, probablemente asociado a intercalaciones de materiales en profundidad. Por otro lado, existe un predominio de T_0 entre 0.5 y 1 s (58%) para esta zona (Figura 5.5), y se observan valores menores en las cercanías a los cerros, que corresponden al 21% de T_0 registrados en esta zona.

En la Figura 5.6, se indican los perfiles de velocidades de ondas de corte promedio para los primeros 30 metros de profundidad para las zonas 1N, 3N y 5N (línea roja). Para ello, sólo se utilizaron las mediciones obtenidas por DICTUC S.A (líneas grises). A su vez, en la Tabla 5.2 se observa la clasificación sísmica asociada a cada perfil promedio, las que son acordes a la estratigrafía predominante de cada zona.

Tabla 5.2: $V_{S,30}$ de los perfiles de V_s promedio en las zonas 1N, 3N y 5N

Zona	$V_{S,30}$ (m/s)	Clasificación Sísmica	N° de perfiles promediados
1N	643	b	10
3N	284	d	30
5N	385	c	11

Para la zona 1N en los primeros 10 m de profundidad se observa una gran variabilidad entre los perfiles obtenidos (entre 300 y 700 m/s aproximadamente). A partir

de esa profundidad se observa una mayor consistencia entre los resultados, con velocidades que oscilan entre los 700 y 1000 m/s. En la zona 3N se observa una consistencia entre todas las mediciones hasta los 22 m de profundidad, y un V_S promedio que varía entre 200 y 300 m/s aproximadamente. A partir de esa profundidad se observan mayores diferencias, donde las velocidades observadas en la mayoría de los modelos varían entre 300 y 600 m/s.

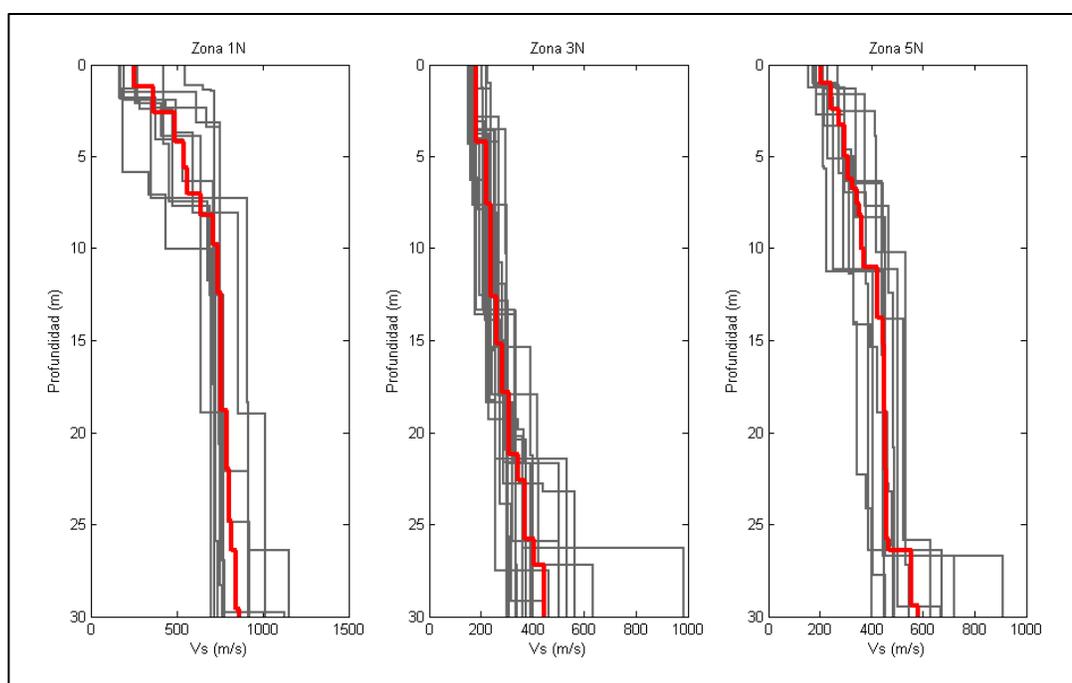


Figura 5.6: Perfiles de V_S promedio para zonas 1N, 3N y 5N (línea roja) construidos en base a los perfiles obtenidos para esta zona (líneas grises)

Finalmente, para la zona 5N se observa un primer tramo hasta los 12 m de profundidad, con velocidades que oscilan entre los 200 y 450 m/s aproximadamente. A partir de esa profundidad y hasta los 26 m, se observa un V_S promedio cercano a los 450 m/s, con velocidades que varían entre 400 y 500 m/s aproximadamente. Por último, bajo los 26 m se observa una velocidad promedio cercana a los 600 m/s, pero con una gran variabilidad entre los V_S de los perfiles obtenidos para esa zona (entre 400 y 900 m/s). Sin

embargo, es importante mencionar que a esta profundidad las incertidumbres del método son mayores, por lo que es difícil definir si esta variabilidad se asocia al método o a los materiales presentes en cada sitio.

5.2. Microzonificación sísmica del poniente de Santiago

En la Figura 5.7 se observan los resultados para el sector poniente de Santiago. En ella se identifican cinco zonas con las propiedades indicadas en la Tabla 5.3. Al igual que para el sector norte, es posible asociar un intervalo de $V_{s,30}$ para cada zona, no así para los T_0 .

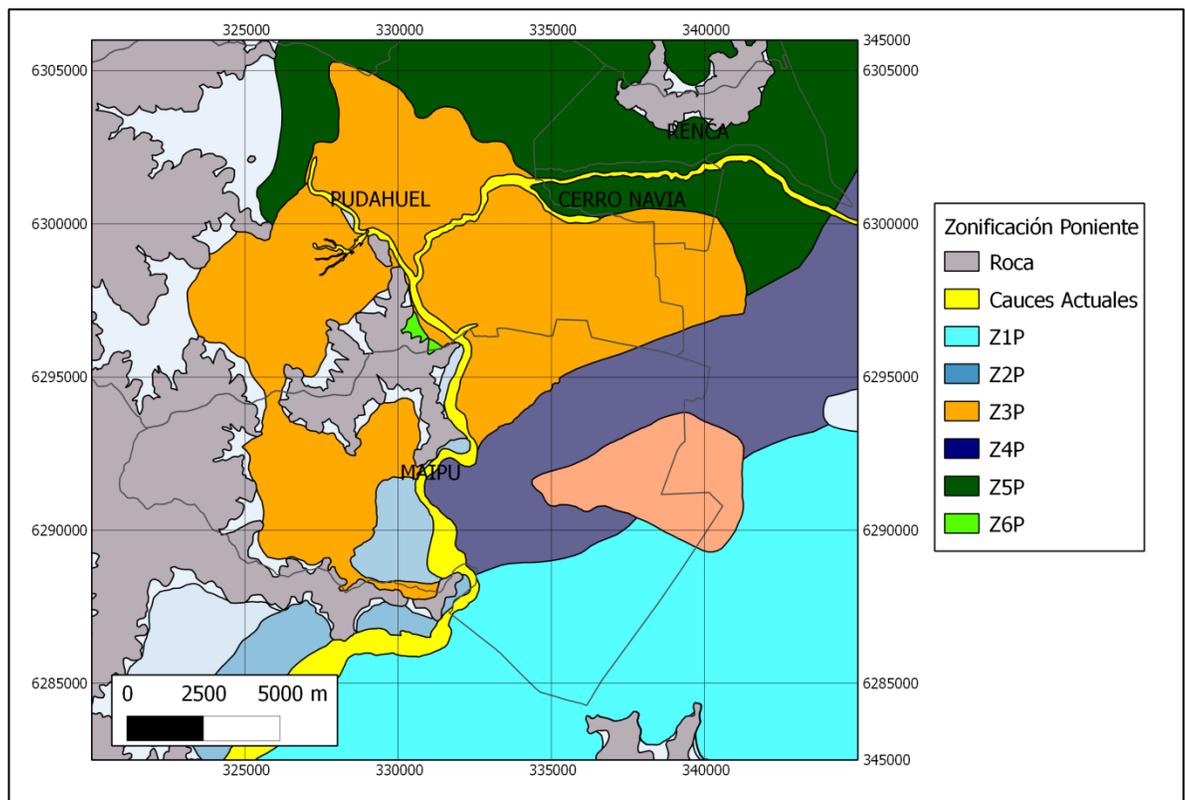


Figura 5.7: Zonificación del poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012a)

Tabla 5.3: Resultados microzonificación sector poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012a)

Zona	Estratigrafía predominante	$V_{S,30}$ (m/s)	T_0 (s)	Amplitud
1P	Gravas y arenas de compacidad media a alta	> 500	-	Curva H/V plana (< 2)
2P	Gravas y arenas de compacidad media a alta	400 – 500	-	Curva H/V plana (< 2)
3P	Predominio de ceniza volcánica con intercalaciones de arenas, limos y gravas.	340 – 450	0,25 – 3,3	Baja a media-alta (2,5 – 5)
4P	Predominio de ceniza volcánica	428 – 480	0,2 – 0,35	Media a media-alta (2,5 – 5)
5P	Finos. Predominio de arcillas con intercalaciones de arenas y localmente de gravas areno-arcillosas.	270 – 370	0,67 – 3,3	Baja a alta (2 – 6)

En las Figura 5.8 y Figura 5.9 se indican los lugares donde se midieron el perfil de velocidades de ondas de corte y el periodo fundamental respectivamente. Al igual que para el sector norte, para cada punto se indica el rango de $V_{S,30}$ y T_0 asociado a cada medición. Además en las Figura 5.10 y Figura 5.11 se indican las distribuciones de los valores de $V_{S,30}$ y T_0 obtenidos para las zonas donde se dispone mayor cantidad de mediciones (zonas 2P, 3P 5P).

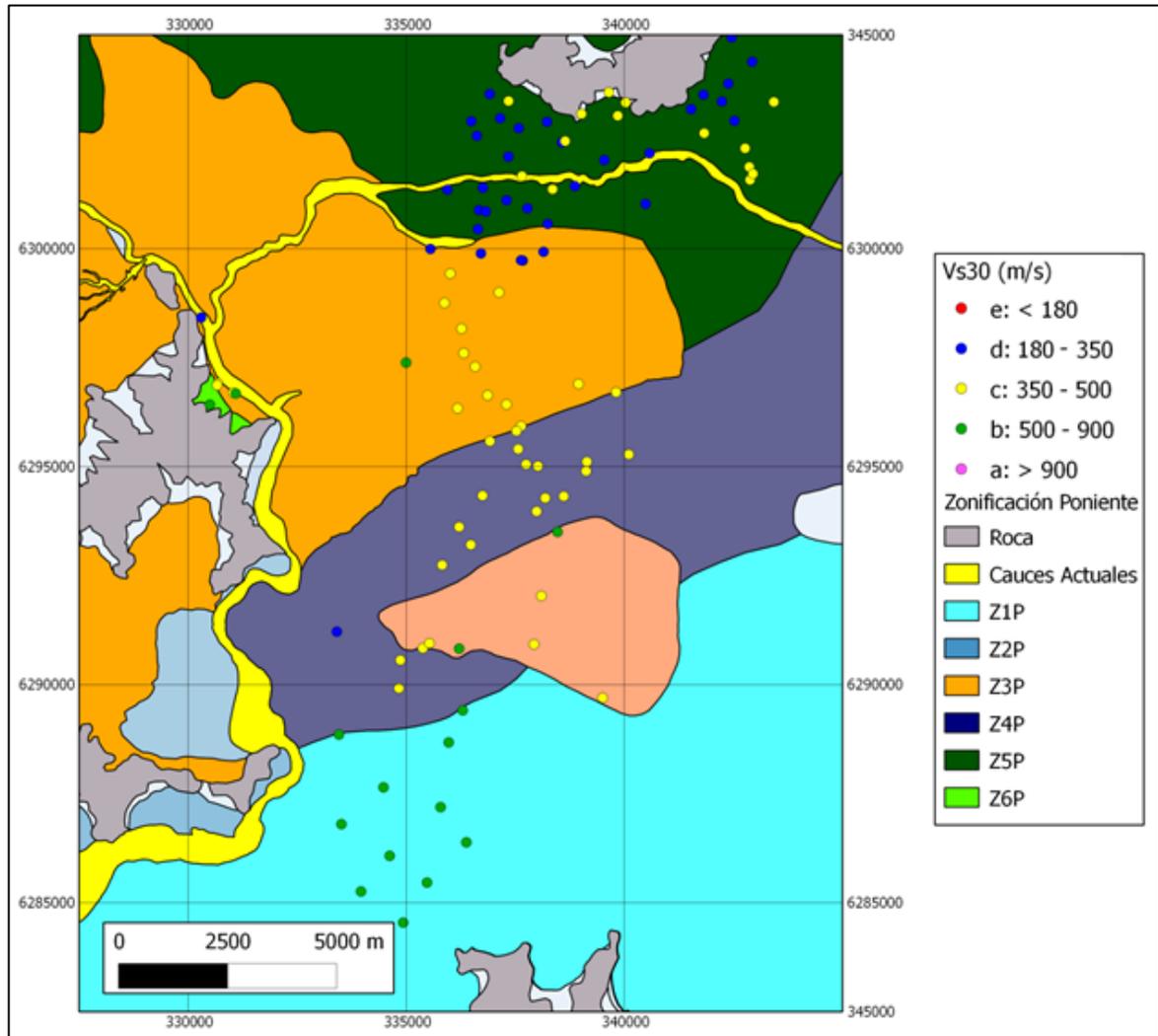


Figura 5.8: Mediciones del perfil de velocidades de ondas de corte en el sector poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012a)

En la zona 2P existe una clara predominancia de suelos tipo c (95%), donde la mayoría de los $V_{s,30}$ obtenidos oscilan entre 400 y 450 m/s. Por el contrario, no existe un rango T_0 predominante, lo que está asociado a la baja amplitud de los *peaks* de las curvas H/V, por tratarse de suelos relativamente rígidos.

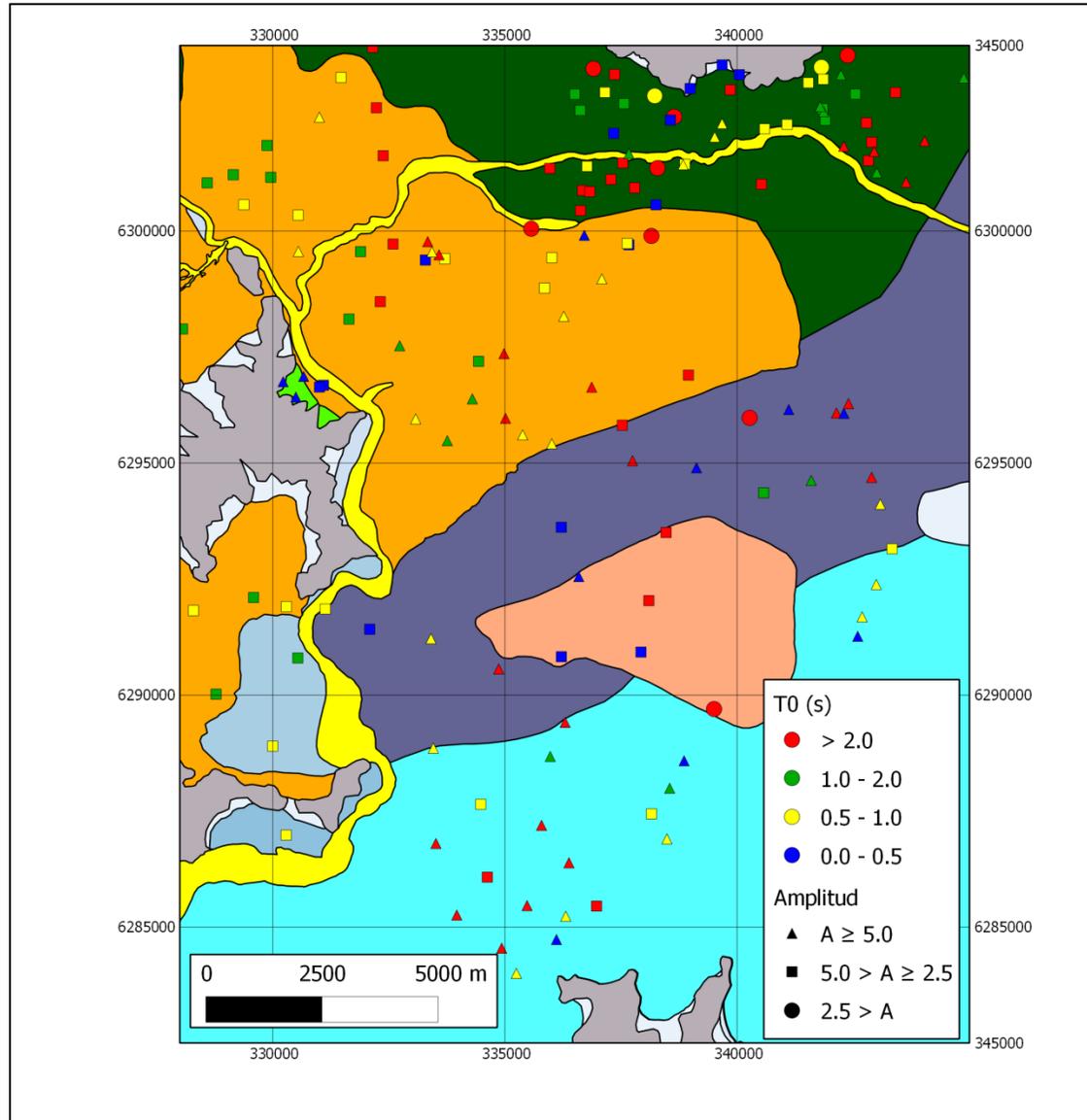


Figura 5.9: Mediciones del periodo fundamental en el sector poniente de Santiago (Seremi Metropolitana MINVU, 2011-2012b)

En la zona 3P se observa una mayor variabilidad de los $V_{s,30}$ obtenidos, oscilando entre 250 y 600 m/s. En la Figura 5.8 se observa que los valores más bajos de $V_{s,30}$ se ubican en las cercanías al contacto con la zona 5P, y también en las cercanías a los cauces actuales, por lo que podrían tratarse de depósitos más recientes y de menor densidad. Por otro lado, un 88% de los T_0 obtenidos son superiores a 0.5 s, salvo en las cercanías a los cerros.

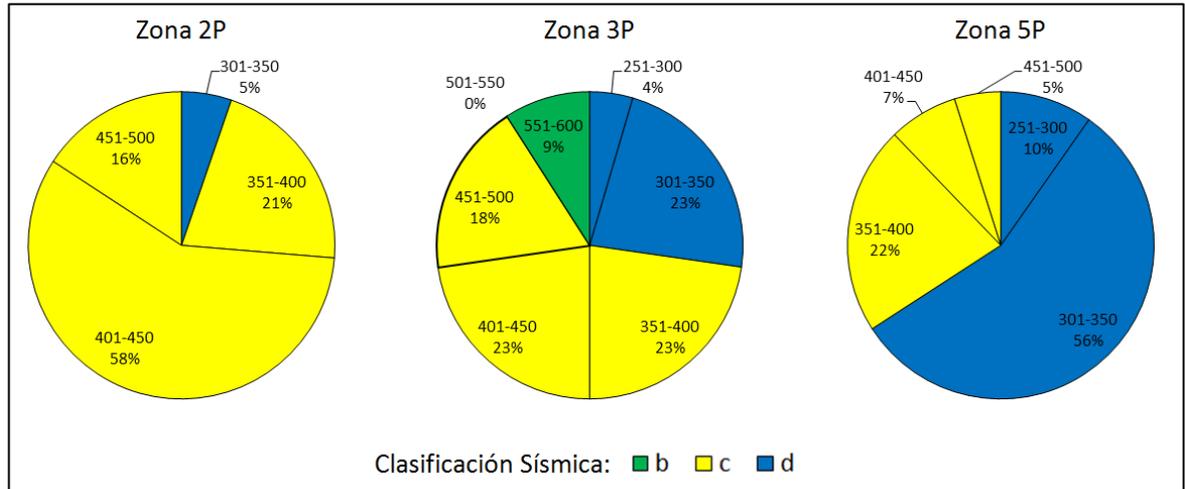


Figura 5.10: $V_{s,30}$ (m/s) obtenidos para las zonas 2P, 3P y 5P

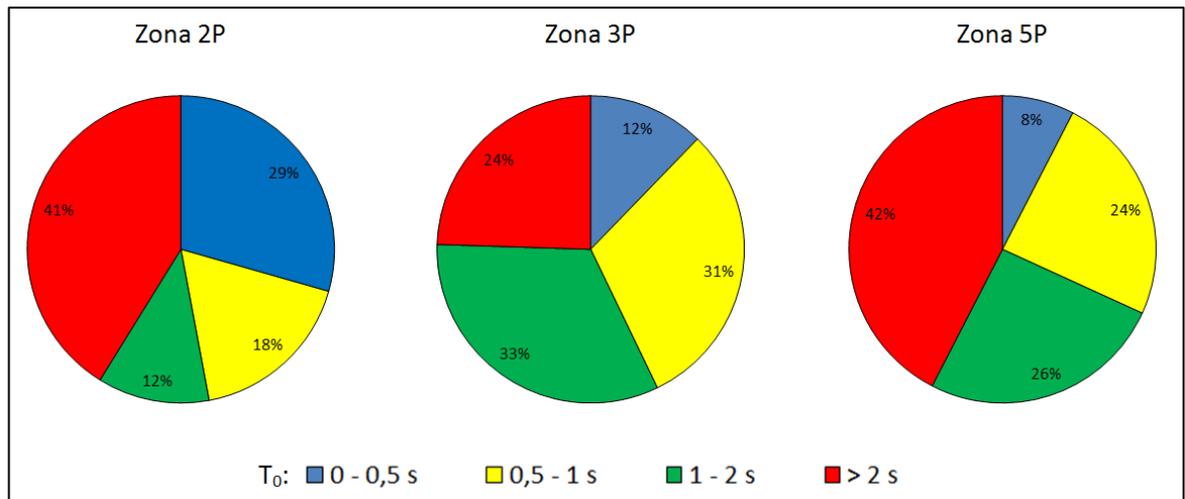


Figura 5.11: T_0 obtenidos para las zonas 2P, 3P y 5P

Por último, la zona 5P presenta en su gran mayoría suelos tipo d, siendo consistente con la estratigrafía predominante (suelos finos), salvo en las cercanías al cerro Renca donde se observan suelos tipo c, probablemente debido a un menor espesor de los depósitos de suelo. También, se observa que el 92% de los T_0 medidos para esta zona son mayores a 0.5 s, salvo por las mediciones realizadas en el borde del cerro Renca, donde la geomorfología complica la efectividad de la técnica.

Los perfiles de velocidades de ondas de corte promedio en los primeros 30 metros de profundidad para las zonas 2P, 3P y 5P se indican en la Figura 5.12. Al igual que para el sector norte, sólo se utilizaron las mediciones obtenidas por DICTUC S.A (líneas grises). En la Tabla 5.4 se observa la clasificación sísmica asociada a cada perfil promedio.

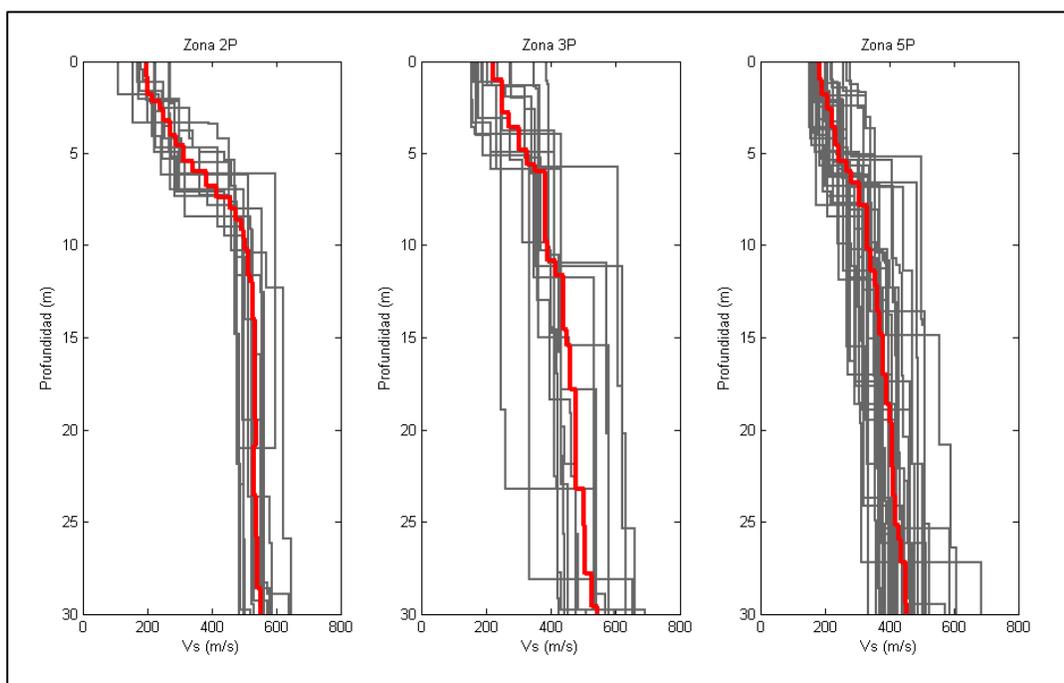


Figura 5.12: Perfiles de V_s promedio para zonas 2P, 3P y 5P (línea roja) construidos en base a los perfiles obtenidos para esta zona (líneas grises)

Tabla 5.4: $V_{s,30}$ de los perfiles de V_s promedio en las zonas 2P, 3P y 5P

Zona	$V_{s,30}$ (m/s)	Clasificación Sísmica	Nº de perfiles promediados
2P	425	c	12
3P	401	c	14
5P	331	d	31

En la zona 2P, se observa una buena consistencia entre los distintos perfiles obtenidos para los 30 metros de profundidad y el perfil promedio, donde las mayores diferencias no superan los 100 m/s en la mayoría de los casos. En la zona 3P, se observa una mayor variabilidad entre los distintos perfiles medidos. Entre 6 y 28 m se observan velocidades que oscilan entre 250 y 650 m/s aproximadamente. Estas diferencias pueden estar asociadas al proceso natural de formación de esta unidad geológica (depósito horizontal de cenizas volcánicas). Al igual que en la zona 2P, en la zona 5P presenta hay una gran consistencia entre los perfiles obtenidos para los 30 metros de profundidad. Las principales diferencias se observan en las capas más profundas con velocidades que varían entre 350 y 600 m/s aproximadamente, que una vez más pueden estar ligadas a las mayores incertidumbres de la técnica a dichas profundidades.

5.3. Resumen

Los $V_{s,30}$ obtenidos utilizando métodos geofísicos basados en ondas superficiales muestran consistencia con la geología superficial en todas las zonas identificadas en el estudio de microzonificación, a diferencia de los periodos fundamentales obtenidos con la razón espectral H/V, donde no es posible asociar un rango de valores en las zonas donde la estratigrafía predominante son gravas y arenas densas, o donde existen complejidades geológicas (bordes de cerro e intercalaciones de materiales). Esto demuestra la eficiencia de la metodología descrita en este trabajo y su aplicabilidad a estudios de microzonificación y caracterización sísmica. Además, fue posible estimar perfiles característicos en cada una de las zonas, ya que los perfiles obtenidos, en general, son consistentes en profundidad. La excepción fue la zona 3P (cenizas volcánicas) donde se observó una mayor variabilidad entre los perfiles de V_s determinados, que probablemente pueda ligarse a la reconocida singularidad de este tipo de suelo, así como la decreciente resolución de la metodología con la profundidad.

6. CONCLUSIONES

En esta investigación fue posible hacer un estudio detallado respecto a la aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos utilizando equipos convencionales de refracción sísmica.

La contribución del ruido ambiental es una de las grandes limitantes en la determinación de la curva de dispersión en ensayos activos con fuentes de baja energía (como los golpes con martillo de gran uso en Chile). Para disminuir su contribución, es importante el uso eficiente del *stacking* tanto en tiempo como en frecuencia. No se recomienda el uso de arreglos de gran longitud en situaciones de alto ruido ambiental, ya que las señales registradas en los geófonos más lejanos a la fuente, suelen estar muy contaminados por las vibraciones ambientales. Al disponer de un gran número de receptores, se recomienda disminuir el espaciamiento entre geófonos, para disminuir el efecto del *aliasing* espacial.

Por otro lado, los ensayos activos realizados con fuentes de gran energía, no se ven afectadas con la presencia de alto ruido ambiental, permitiendo una exploración satisfactoria de los primeros 30 metros de profundidad. A su vez, su uso permite ampliar el rango de frecuencias explorado en comparación al rango explorado con fuentes de baja energía, siendo esta mejora más significativa en suelos rígidos que en suelos blandos.

En ensayos pasivos, las dimensiones máxima y mínima de los arreglos utilizados, así como el contenido de frecuencias de las vibraciones ambientales registradas, acotan el rango de profundidades de exploración. En ese sentido, pueden utilizarse arreglos de grandes dimensiones, pero si el tiempo de registro no es el suficiente, el resultado no será confiable de todos modos. Un ejemplo de ello, es que los resultados más satisfactorios obtenidos con el método Roadside MASW, corresponden a situaciones de alto ruido ambiental. Por otro lado, el análisis SPAC permite acceder a frecuencias menores que las obtenidas con los análisis f-k y Roadside MASW, empleando arreglos de idéntica extensión. Por ello, el análisis SPAC es en una excelente herramienta para acceder a mayores profundidades.

En general, al realizar el proceso de inversión utilizando en forma separada las curvas de dispersión obtenidas con los distintos métodos activos y pasivos, no fue posible explorar satisfactoriamente los primeros 30 metros de profundidad. Sólo la fuente sísmica de gran energía permitió una exploración satisfactoria en todos los casos.

Por lo tanto, para estimar el perfil de velocidades de ondas de corte para los primeros 30 metros de profundidad con equipos de refracción convencionales, es necesario combinar los resultados obtenidos con distintos métodos y técnicas de análisis. Para este propósito, se propone una metodología basada en la combinación de los resultados obtenidos en los ensayos activos con golpes de martillo, ensayos pasivos lineales (Roadside MASW y SPAC) y ensayos pasivos circulares (f-k y SPAC). El arreglo circular de 9.8 metros de radio, utilizado en esta investigación, demostró su capacidad para la exploración de los primeros 30 metros de profundidad en todos los casos por medio del análisis SPAC. Es importante destacar que el tamaño de este arreglo es adecuado para ser utilizado en zonas de alta densidad urbana.

Existe una fuerte dependencia entre los resultados obtenidos con el análisis Roadside MASW y la proximidad a carreteras de alto tráfico vehicular. Esto se refleja que en muchos de los casos estudiados, el rango de frecuencias explorado es insuficiente para explorar los primeros 30 metros de profundidad. Por ello, y dado que esta es una de las metodologías más usadas en Chile, se recalca que no es recomendable que el proceso de inversión se realice utilizando como única información de terreno la curva de dispersión obtenida con el método Roadside MASW. Del mismo modo, una metodología de inversión basada en la combinación de las curvas de dispersión obtenida con fuentes activas de baja energía y los resultados de Roadside MASW, tampoco garantiza la correcta exploración de los primeros 30 metros. De hecho, los $V_{s,30}$ obtenidos pueden aumentar, debido a que se mejora la exploración en las capas más superficiales, pero con velocidades sobreestimadas para capas más profundas.

Además, se observó que un cambio en la combinación de datos usada, puede conducir a distintas clasificaciones sísmicas. En ese sentido, se recomienda que cuando el

$V_{s,30}$ calculado sea un 10% superior al $V_{s,30}$ límite entre dos clasificaciones sísmicas, se verifique la clasificación utilizando al menos dos combinaciones de datos diferentes.

Los $V_{s,30}$ calculados en el estudio de microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago, muestran una clara consistencia con la geología superficial. Sólo se observan diferencias en las cercanías a cerros y a las zonas de contacto entre unidades geológicas. Por otro lado, no fue posible definir un intervalo definido de T_0 en aquellas zonas con una estratigrafía predominante de suelos rígidos (gravas y arenas densas). Esto confirma la eficiencia del método y la metodología estudiada en este trabajo, y lo presenta como una herramienta de gran utilidad para futuros estudios de microzonificación sísmica.

6.1. Trabajo a futuro

En este trabajo se utilizaron geófonos de 4.5 Hz de frecuencia natural. Para caracterizar suelos muy blandos, en ocasiones fue necesario utilizar la información entregada por las curvas de dispersión para frecuencias menores a dicho valor. Se recomienda que en el futuro se investigue sobre las consecuencias de incluir tramos bajo las frecuencias naturales de los geófonos.

Para esta investigación, el método de inversión utilizado fue un algoritmo de optimización global. Sin embargo, el método de inversión más utilizado en Chile es un algoritmo basado en gradientes. Se recomienda que se revisen las implicancias de utilizar uno y otro método, y en particular, si es posible identificar situaciones en las que no linealidad del problema inverso sea severa.

Los resultados obtenidos con la metodología LPA2 (combinación de ensayos activos con fuentes de baja energía y ensayos pasivos analizados con Roadside MASW y SPAC) no fueron satisfactorios en la totalidad de los casos estudiados. Por ello, una clasificación sísmica basada únicamente en los resultados de LPA2 no es recomendada. Sin embargo, para futuras investigaciones se recomienda evaluar el desempeño de esta metodología en más casos, especialmente en los depósitos de cenizas volcánicas, donde

más diferencias se observaron. Además, se recomienda que en futuras investigaciones la ejecución de esta metodología se utilicen arreglos lineales perpendiculares entre sí, con el objeto de averiguar si las diferencias presentadas entre una metodología y otra, son atribuibles a una distribución anisotrópica del suelo, o si están asociadas a la existencia de una dirección predominante del ruido ambiental.

Para futuros estudios de microzonificación sísmica, se recomienda el uso de arreglos de grandes dimensiones para realizar mediciones de vibraciones ambientales con el objeto de estimar perfiles de velocidades de ondas de corte a grandes profundidades. Para ello, se recomienda la utilización de geófonos triaxiales de baja frecuencia, que permitan incorporar al proceso de inversión, mediciones de ondas superficiales de Love, y curvas de elipticidad (curva H/V).

REFERENCIAS

- Achenbach, J. D. (1973). *Wave propagation in elastic solids*. North-Holland: North-Holland Publishing Company.
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415–456.
- Aki, K. (1988). Local site effects on ground motion. En J. L. Von Thun (Ed.), *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation* (págs. 103- 155). New York: Geotechnical Special Publication No. 20, American Society of Civil Engineers.
- Aki, K., & Richards, P. G. (1980). *Quantitative seismology, Second Edition*. University Science Books.
- Ampuero, A., & Van Sint Jan, M. (2004). Velocidades de onda medidas en Santiago con el ensayo de refracción sísmica. *V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*. Santiago.
- Asten, M., & Henstridge, J. (1984). Array estimator and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics*, 49(11),1828-1837.
- ASTM D 4428/D 4428M. (2007). *Standard test methods for crosshole seismic testing*. ASTM standards.
- ASTM D 7400 - 08. (2007). *Standard test methods for downhole seismic testing*. ASTM standards.
- Bettig, B., Bard, P., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Cornou, C., & Hatzfeld, D. (2001). Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): application to the Grenoble area. *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, 281-304.
- Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant P., & Verdugo, R. (2008). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical Journal International*, 176, 925–937.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79, 205–227.

- Bullen, K. E. (1963). *An introduction to the theory of seismology*. Cambridge University Press.
- Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57, 1408–1418.
- Casto, D., Luke, B., Calderón-Macías, C., & Kaufmann, R. (2009). Interpreting Surface-wave Data for a Site with Shallow Bedrock. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 14(3), 115-127.
- Chávez-García, F. J., Rodríguez, M., & Stephenson, W. R. (2005). An Alternative Approach to the SPAC Analysis of Microtremors: Exploiting Stationarity of Noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 277-293.
- Chávez-García, F. J., Rodríguez, M., & Stephenson, W. R. (2006). Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 729–736.
- Comina, C., Foti, S., Boiero, D., & Socco, L.V. (2011). Reliability of VS₃₀ Evaluation from Surface-Wave Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, 579-586.
- Doyle, H. (1995). *Seismology*. New York: Wiley.
- Foti, S. (2000). *Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves*. Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- Foti, S. (2005). Surface wave testing for geotechnical characterization. En S. G. Lai, & K. Wilmski, *Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks*, CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer Wien New York.
- Foti, S., Lancellota, R., Socco, L. V., & Sambuelli, L. (2001). Application of FK analysis of surface waves for geotechnical characterization. *Proceedings: Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D. Liam Finn, Paper No. 1.14*. San Diego, California.
- Foti, S., Sambuelli, L., Socco, L., & Strobbia, C. (2002). Spatial Sampling Issues In Fk Analysis Of Surface Waves. *15th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*.

- Gabriels, P., Snieder, R., & Nolet, G. (1987). In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode rayleigh waves. *Geophysical Prospecting*, 35, 187-196.
- Gálvez, C. (2012). *Microzonificación sísmica en los sectores de Lampa y Batuco, Región Metropolitana, Chile*. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Gilbert, F., & Backus, G. (1966). Propagator matrices in elastic wave and vibration problems. *Geophysics*, 31, 326–332.
- Haskell, N. A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, 17-34.
- Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. (1993). *Array signal processing*. Prentice-Hall: Upple Saddle River (N. J.).
- Jones, R. B. (1958). In-situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods. *Geotechnique*, 8 (1), 1-21.
- Kausel, E., & Roesset, J. M. (1981). Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 1743-1761.
- Kennett, B. L. (1974). Reflections, rays, and reverberations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64, 1685-1696.
- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88, 228-241.
- Kværna, T., & Ringdahl, F. (1986). Stability of various fk-estimation techniques, in Semiannual Technical Summary, 1 October 1985 - 31 March 1986. *NORSAR Scientific Report 1-86/87*, (págs. 29–40). Kjeller, Norway.
- Lacoss, R., Kelly, E., & Toksöz, M. (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, 34, 21–38.
- Lai, C. (2005). Surface Waves in Dissipative Media: Forward and Inverse Modelling. En C. Lai, & K. Wilmanski, *Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks*, CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer Wien New York.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1574–1594.

- 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. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. Santiago, Chile.
- Louie, J. (2001). Faster, better: Shear-Wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 347-364.
- McMechan, G., & Yedlin, M. (1981). Analysis of dispersive waves by wave-field transformation. *Geophysics*, 46(6), 869-874.
- Midorikawa, S. (2012). Comunicación Personal.
- Miller, P. K., Ryden, N., Tinkey, Y., & Olson, L. (2008). A Comparison of Shear Wave Velocities Obtained from the Crosshole Seismic, Spectral Analysis of Surface Waves and Multiple Impacts of Surface Waves Methods. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Volume 21, Issue 1, Poster Overviews II.
- Molina, J. (2011). *Intensidades sísmicas del terremoto del 27 de febrero del 2010 en las 34 comunas del gran santiago*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Q.R. Rail. Tech*, 30, 25–30.
- Nazarian, S., & Desai, M. (1993). Automated surface wave method: field testing. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (7), 1094-1111.
- Nazarian, S., & K.H. Stokoe II. (1984). In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves. *Proc. 8th Conf. on Earthquake Eng.* (págs. 31-38). San Francisco: Prentice-Hall.
- Nogoshi, M., & Igarashi, T. (1970). On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*, 23, 264-280.
- Nolet, G. (1981). Linearized inversion of (teleseismic) data. In R. Cassinis (Ed.), *The Solution of the Inverse Problem in Geophysical Interpretation* (pp. 9-37). New York: Plenum Press.
- Ochoa, F. (2007). *Caracterización geotécnica a través del uso de ondas de Rayleigh*. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

- Okada, H. (2003). *The Microtremor Survey Method, Geophysical Monographs Series, no.12*. Published by Society of Exploration Geophysicists.
- Okada, H. (2006). Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method. *Exploration Geophysics, 37*, 73-85.
- Park, C. (2005). *MASW-Horizontal resolution in 2-D shear-wave velocity (Vs) mapping*. Kansas Geological Survey Open-file Report 2005-4.
- Park, C. (2008). Imaging dispersion of passive surface waves with active scheme. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2008)*. Philadelphia, April 6-10: Proceedings on CD Rom.
- Park, C., & Carnevale, M. (2009). 3-D MASW. *Proceedings of SAGEEP 2009*. Fort Worth, Texas, March 29-April 2.
- Park, C., & Miller, R. (2008). Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 13*, 1-11.
- Park, C., Miller, R., & Ivanov, J. (2002). Filtering surface waves., (pág. Proceedings of the SAGEEP 2002). Las Vegas, Nevada, 12SEI9.
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *The Society of Exploration Geophysicists, 1377-1380*.
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics, 64* (3), 800-808.
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (2001). Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW). *Proceedings of the SAGEEP 2001*. Denver, Colorado.
- Pasten, C. (2007). *Respuesta Sísmica de la Cuenca de Santiago*. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- 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.

- Pinilla, C. (2012). *Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuesta en suelos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Richart, F., Woods, R., & Hall, J. (1970). *Vibration of soils and foundations*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Riddell, R., Van Sint Jan, M., Midorikawa, S., & Gajardo, J. (1992). *Clasificación geotécnica de los sitios de estaciones acelerográficas en Chile*. Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile: Publicación DIE 92-2.
- Rix, G. (2005). Near-surface site characterization using surface waves. En C. Lai, & K. Wilmanski, *Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks*, CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer Wien New York.
- Rix, G., & Leipski, E. (1991). Accuracy and Resolution of Surface Wave Inversion. En S. K. S. K. Bhatia (Ed.), *Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics* (págs. 17-32). American Society of Civil Engineers.
- Rix, G., Lai, C., Orozco, M., Hebel, G., & Roma, V. (2001). Recent Advances in Surface Wave Methods for Geotechnical Site Characterization. *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Istanbul, Turkey.
- Rosenblad, B., & Li, J. (2009). Performance of Active and Passive Methods for Measuring Low-Frequency Surface Wave Dispersion Curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, 1419-1428.
- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with neighborhood algorithm - I. Searching the parameter space. *Geophysical Journal International*, 138, 479-494.
- Sambridge, M. (2001). Finding acceptable models in nonlinear inverse problems using a neighbourhood algorithm. *Inverse Problems*, 17, 387-403.
- Sambridge, M., & Mosegaard, K. (2002). Monte Carlo methods in geophysical inverse problems. *Reviews of Geophysics*, 40,3.
- Sanchez-Salineró, I. (1987). *Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications*. Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2001). *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. Wiley.

- Sauter, F. (1989). *Fundamentos de ingeniería sísmica: Introducción a la sismología*. Castago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Seed, H. B., Ugas, C., & Lysmer, J. (1976). Site-dependent spectra for earthquake-resistant design. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66 (1), 221-243.
- Semblat, J., & Pecker, A. (2009). *Waves and Vibrations in Soils*. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Seremi Metropolitana MINVU. (2011-2012a). *Estudio de riesgo y modificación PRMS sector poniente de Santiago*.
- Seremi Metropolitana MINVU. (2011-2012b). *Estudio de riesgo y modificación PRMS sector norte de Santiago*.
- SESAME European research project. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation*. SESAME European research project - Research General Directorate.
- SESAME European Research Project. (2005). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation*.
- Shabani, E., Cornou, C., Haghshenas, E., Wathelet, M., Bard, P., Mirzaei, N., & Eskandari-Ghadi, M. (2008). Estimating shear-waves velocity structure by using array methods (FK and SPAC) and inversion of ellipticity curves at a site in south of Tehran. *14th World Conference on Earthquake Engineering Innovation Practice Safety*. October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Snieder, R. (1998). The role of nonlinearity in inverse problems. *Inverse Problems*, 14 387-404.
- Socco, L., & Strobbia, C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 165-185.
- Stokoe, K. H., Rathje, E. M., Wilson, C. R., Rosenblad, B. L., & Menq, F. Y. (2004). Development of the NEES Large-Scale Mobile Shakers and Associated Instrumentation for In Situ Evaluation of Nonlinear Characteristics and Liquefaction Resistance of Soils. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada, August.

- Stokoe, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A., & Roesset, J. M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. En R. Woods, *Geophysical characterization of sites*. Oxford Publ.
- Strobbia, C. (2003). *Surface Wave Methods: Acquisition, processing and inversion*. Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- Thompson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21, 89-93.
- Tokimatsu, K. (1992). Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), 1529-1543.
- Tokimatsu, K. (1997). Geotechnical site characterization using surface waves. En Ishihara (Ed.), *Proc. 1st Intl. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*, 3, págs. 1333–1368. Balkema.
- Towhata, I. (2008). *Geotechnical earthquake engineering*. Berlin: Springer.
- Tsai, V., & Moschetti, M. (2010). An explicit relationship between time-domain noise correlation and spatial autocorrelation (SPAC) results. *Geophysical Journal International*, 182, 454–460.
- Tselentis, G., & Delis, G. (1998). Rapid assessment of S-wave profiles from the inversion of multichannel surface wave dispersion data. *Annali di Geofisica*, 41(1), 1-15.
- Valenzuela, G. (1978). Suelo de Fundación del Gran Santiago. *Boletín 33, Instituto de Investigaciones Geológicas*.
- Wathelet, M. (2005). *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*. Ph.D. thesis, Université de Liège, Liège, Belgium.
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35, L09301, doi:10.1029/2008GL033256.
- Wathelet, M. (Dirección). (2011). *GEOPSY, Geophysical Signal Database for Noise Array Processing. Version 2.7.4* [Película].
- Wathelet, M. (2012). Comunicación Personal.
- Wathelet, M. (2013). *GeopsyWiki*. Obtenido de <http://www.geopsy.org/wiki/>
- Wolf, J. (1985). *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, *64*, 691-700.

Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Ivanov, J., Tian, G., & Chen, C. (2004). Utilization of high-frequency Rayleigh waves in near-surface geophysics. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, *23*, 753-759.

Xia, J., Miller, R., Park, C., & Tian, G. (2003). Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *Journal of Applied Geophysics*, *52*, 45-57.

ANEXOS

ANEXO A. PROCESAMIENTO DE SEÑALES ACTIVAS

Las señales registradas en ensayos activos son analizadas mediante el método f-k implementado en GEOPSY, el cual dispone de una serie de herramientas que permiten incrementar la calidad de los resultados:

- Combinación de señales para reducción del ruido ambiental (*stacking*). A excepción del *stacking* espacial para golpes ubicados a distintas distancias del primer geófono, que se realiza mediante una función desarrollada en Matlab.
- Normalización de las señales en función de la distancia entre fuente y receptor.
- Selección de las distancias entre fuente y receptor a considerar para el análisis.
- Selección del tiempo de registro a considerar para el análisis.

A.1. Combinación de señales para reducción del ruido ambiental (*stacking*)

Las señales registradas en ensayos activos, suelen estar alteradas por la presencia de vibraciones ambientales (ruido). Este es un problema recurrente, especialmente si los ensayos son realizados en zonas urbanas y/o con alto tráfico vehicular. Para mejorar la calidad de los resultados obtenidos, se combinan las señales obtenidas en distintos ensayos para una misma fuente activa (técnica conocida como *stacking*), lo que permite reducir el ruido presente en la señal. El fundamento de esta técnica está en la aleatoriedad de los frentes de onda que componen el ruido, ya que al promediar varias señales el aporte del ruido tiende a cero (Towhata, 2008).

Una señal registrada en un ensayo activo $u(x, t)$ (Figura A.1c) puede expresarse como la suma de la contribución de la fuente activa $s(x, t)$ (Figura A.1a) y del ruido ambiental $n(x, t)$ (Figura A.1b), tal como se indica en la ecuación A.1 y en la Figura A.1.

$$u(x, t) = s(x, t) + n(x, t) \quad (\text{A.1})$$

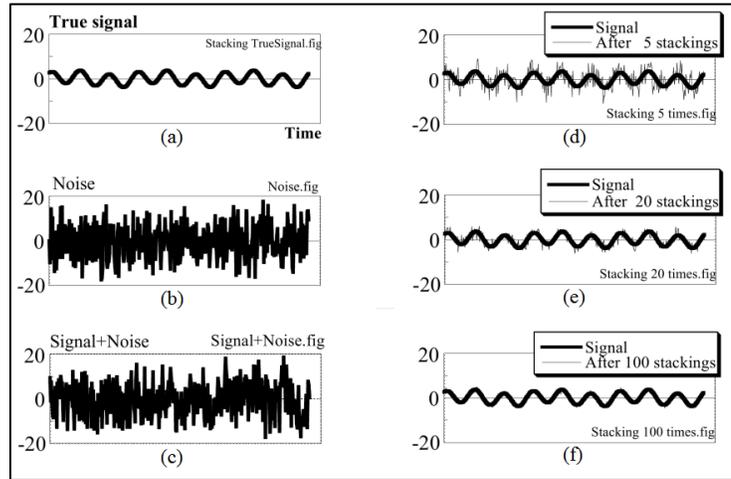


Figura A.1: Esquema que resume el proceso de *stacking* (Towhata, 2008)

Luego, se obtiene una señal combinada $\bar{u}(x, t)$ a partir del promedio de N señales registradas.

$$\bar{u}(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(x, t) \quad (\text{A.2})$$

La combinación se puede realizar a partir del número que se estime conveniente. En las Figura A.1d, e y f se muestran los resultados del *stacking* de 5, 20 y 100 señales, y en ellos se observa, el efecto sobre la calidad de la señal, a medida que se aumenta el número de combinaciones. En efecto, mientras mayor sea el número de combinaciones, la contribución del ruido ambiental ira disminuyendo hasta tender a cero.

$$\bar{u}(x, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(x, t) = s(x, t) \quad (\text{A.3})$$

Este primer enfoque, corresponde al *stacking* en tiempo, donde se promedian varias señales originadas por una misma fuente y para un tiempo inicial común. Para ejemplificar su aplicación al análisis de ondas superficiales, en la Figura A.2a se muestran las trazas obtenidas para un ensayo activo en una zona urbana, mientras en la Figura A.2b se muestran las trazas obtenidas tras la combinación de 10 señales registradas en la misma zona y la misma fuente. Si bien, las señales se ven similares a simple vista, se observan

grandes diferencias en los diagramas de dispersión calculados con el método f-k. El diagrama de dispersión obtenido con la señal sin *stacking* (Figura A.2c) presenta zonas donde la energía es difusa, especialmente para frecuencias bajas, lo que hace imposible la identificación de la curva de dispersión. Por otro lado el espectro entregado por la señal combinada, permite identificar con claridad zonas de mayor concentración de energía hasta los 5 Hz inclusive.

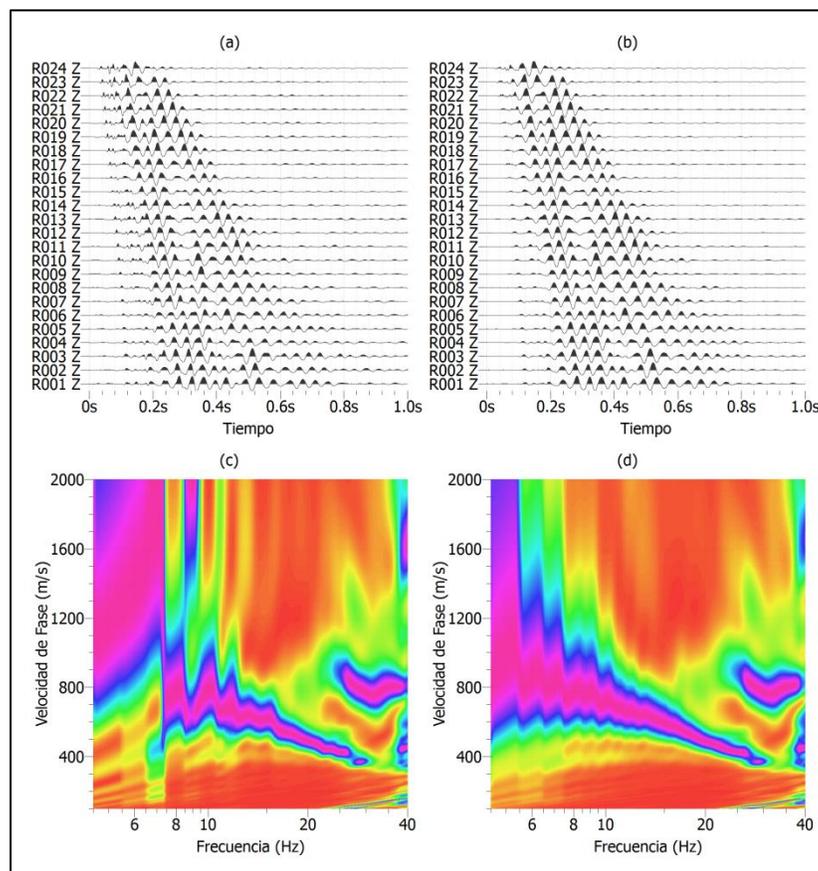


Figura A.2: Efecto del *stacking* en tiempo

Un segundo enfoque consiste en realizar el *stacking* en frecuencias, donde se promedian los diagramas de dispersión obtenidos con el método f-k. A diferencia del *stacking* en tiempo, esta técnica permite combinar fuentes a distintas distancias. A partir

del mismo ejemplo anterior, se calculan los espectros asociados a las 10 señales registradas (Figura A.3a) y se combinan para obtener un espectro promedio como el indicado en la Figura A.3b, donde es posible identificar la curva de dispersión hasta 5 Hz inclusive. Estos resultados muestran que el realizar el *stacking* por una vía o la otra, no genera grandes diferencias en el resultado de la curva de dispersión.

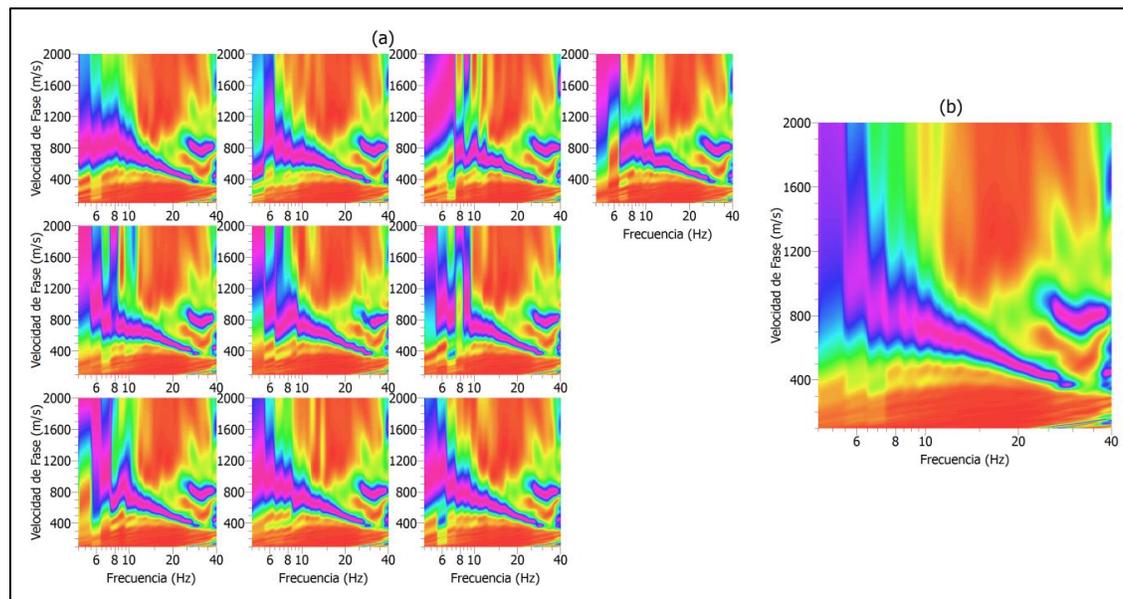


Figura A.3: Efecto del *stacking* en frecuencia

Otro de los objetivos buscados con el *stacking* es la posibilidad de combinar señales registradas con distintas distancias entre fuente y receptores. Con ello, se amplía el rango de longitudes de onda exploradas, lo que conlleva un mayor rango de profundidades posibles de explorar. Esto puede ser realizado utilizando el *stacking* en frecuencia, siguiendo el mismo procedimiento anterior o empleando un *stacking* espacial.

Para emplear el *stacking* espacial, las señales deben ser combinadas en función de la distancia de los receptores con la fuente. Por ejemplo (y tal como se ilustra en la Figura A.4), las señales registradas por el receptor 3 en el disparo 1, se combinan con la del receptor 3 en el disparo 2 y la del receptor 1 en el disparo 3. Esto se repite para todos los

receptores, resultando un registro combinado que en lugar de los 12 receptores originales tiene 14, abarcando un mayor rango de espaciamiento entre receptores y fuente, y por ende, un mayor rango de longitudes de onda.

Si bien, utilizando ambos enfoques es posible incrementar la calidad de los resultados obtenidos, en general, se opta por el *stacking* en frecuencias, ya que no necesita de un tiempo de inicio común para todos los registros, y por lo tanto, es más sencillo de efectuar en post-proceso y no requiere de un *trigger* en terreno.

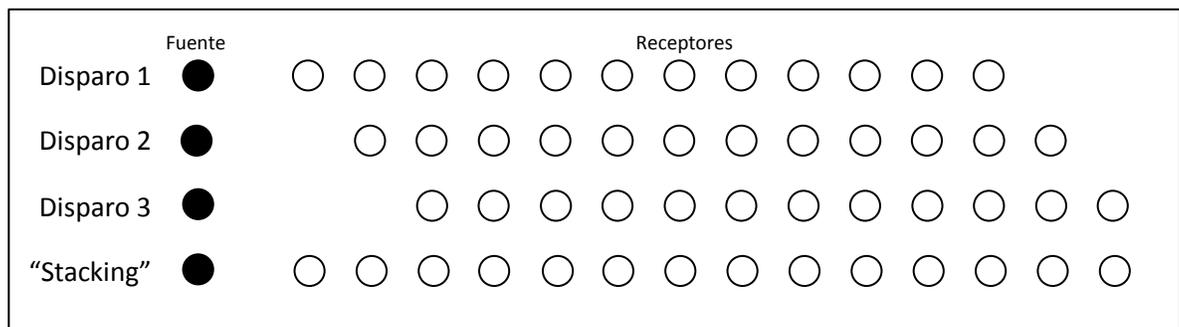


Figura A.4: Esquema del proceso de *stacking* espacial para señales con distintas distancias fuente-receptor

A.2. Normalización de las señales en función de la distancia entre fuente y receptor

Al comparar dos señales registradas en receptores ubicados a distintas distancias de la fuente, las principales diferencias entre ellas son el desfase (utilizado por el método f-k para obtener la curva de dispersión) y la atenuación del frente de ondas observado.

De acuerdo a Wathelet (2013), la normalización de señales producto de la atenuación es muy útil para reducir la contribución de los primeros receptores, cuando sus trazas tienen amplitudes muy altas en comparación a las otras. En GEOPSY, la atenuación puede ser incorporada como un factor por distancia (dividiendo cada señal por la raíz de la

cuadrada de la distancia de cada receptor a la fuente) o a través de la normalización de cada señal por su contenido de energía (normalizando por la máxima amplitud registrada en las trazas, o por la máxima amplitud en el espectro de Fourier de cada señal). Wathelet (2012) recomienda el uso de este último enfoque para incorporar la atenuación geométrica.

A modo de ejemplo, en la Figura A.5 se compara un espectro de energía obtenido utilizando el factor de atenuación por distancia, con el obtenido a partir de la normalización según su contenido de energía y el obtenido sin normalización. El espectro obtenido incorporando la normalización por distancia es prácticamente el mismo al obtenido sin normalización, mientras que el normalizado en función de la energía presenta pequeñas diferencias en las frecuencias exploradas más bajas.

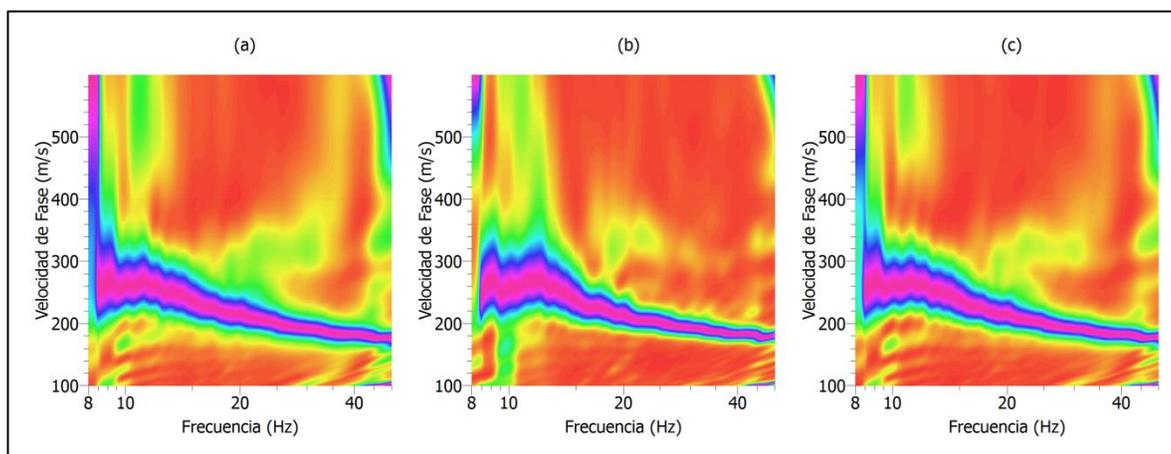


Figura A.5: Efecto del enfoque usado para incorporar la atenuación sobre el espectro de energía: (a) normalización geométrica, (b) normalización en función del contenido de energía, (c) sin normalización.

A.3. Selección del tiempo y las distancias fuente-receptor de las señales a analizar

En ensayos activos, es importante que el análisis se haga considerando la ventana de tiempo para el cual las trazas registran el impacto de la fuente activa (indicadas con color verde en la Figura A.6). Esto es especialmente útil, cuando no se disponen de muchos registros de ensayos activos para realizar el *stacking*, y se quiera reducir el ruido ambiental registrado.

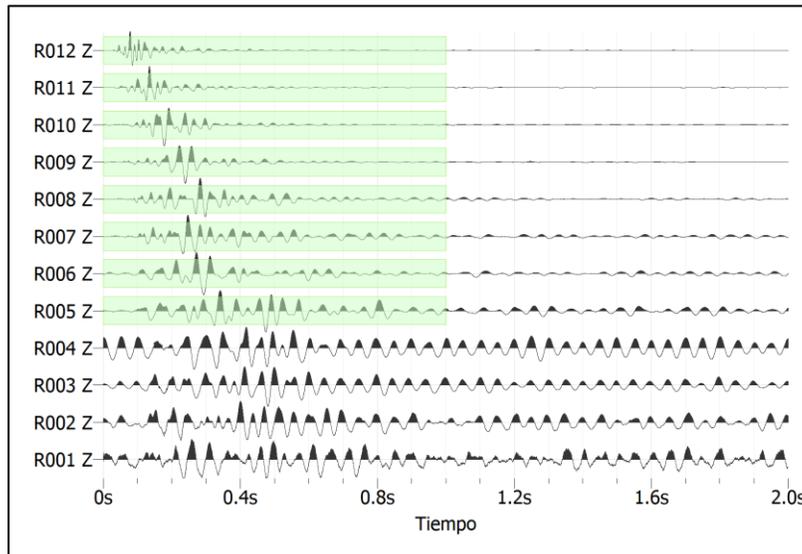


Figura A.6: Registro de un ensayo activo con selección de ventanas de tiempo y distancia fuente-receptor específicas para el análisis

En ocasiones, los receptores ubicados a mayores distancias de la fuente, no pueden registrar el golpe con claridad, ya sea producto del ruido ambiental presente y/o la poca cantidad de energía introducida por la fuente (problema típico al utilizar golpes con martillo). Por ello, es importante verificar que todas las trazas que conforman un registro aporten a la construcción e identificación de la curva de dispersión. Por ejemplo, en la Figura A.6 se muestran las trazas de un ensayo, en el que los últimos cuatro receptores prácticamente no registran el golpe. Al incorporar estas últimas cuatro trazas en el análisis,

el espectro de energía obtenido con el método f-k (Figura A.7a), no presenta concentraciones de energía que permitan identificar la curva de dispersión. Por otro lado, al sacar estas trazas del análisis (Figura A.7b), si se puede identificar la curva de dispersión.

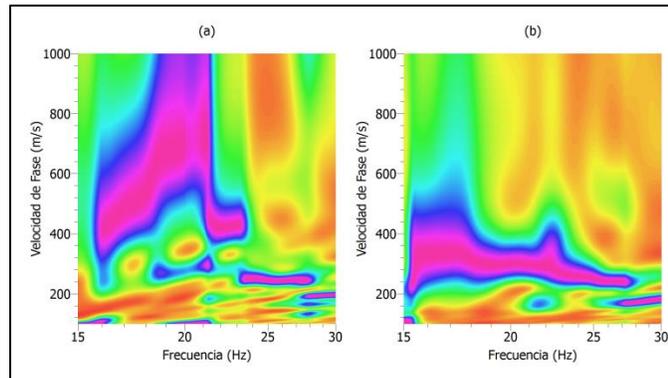


Figura A.7: Efecto de incorporar receptores lejanos a la fuente que no registran el golpe con claridad

ANEXO B. LUGARES SELECCIONADOS PARA EJECUCIÓN DE ENSAYOS

A continuación se indican las ubicaciones de los sitios seleccionados para los ejemplos de aplicación presentados en el capítulo 3. Las líneas rojas corresponden a los arreglos utilizados, mientras la estrella indica el punto aproximado donde se efectuaron los golpes para los ensayos activos.

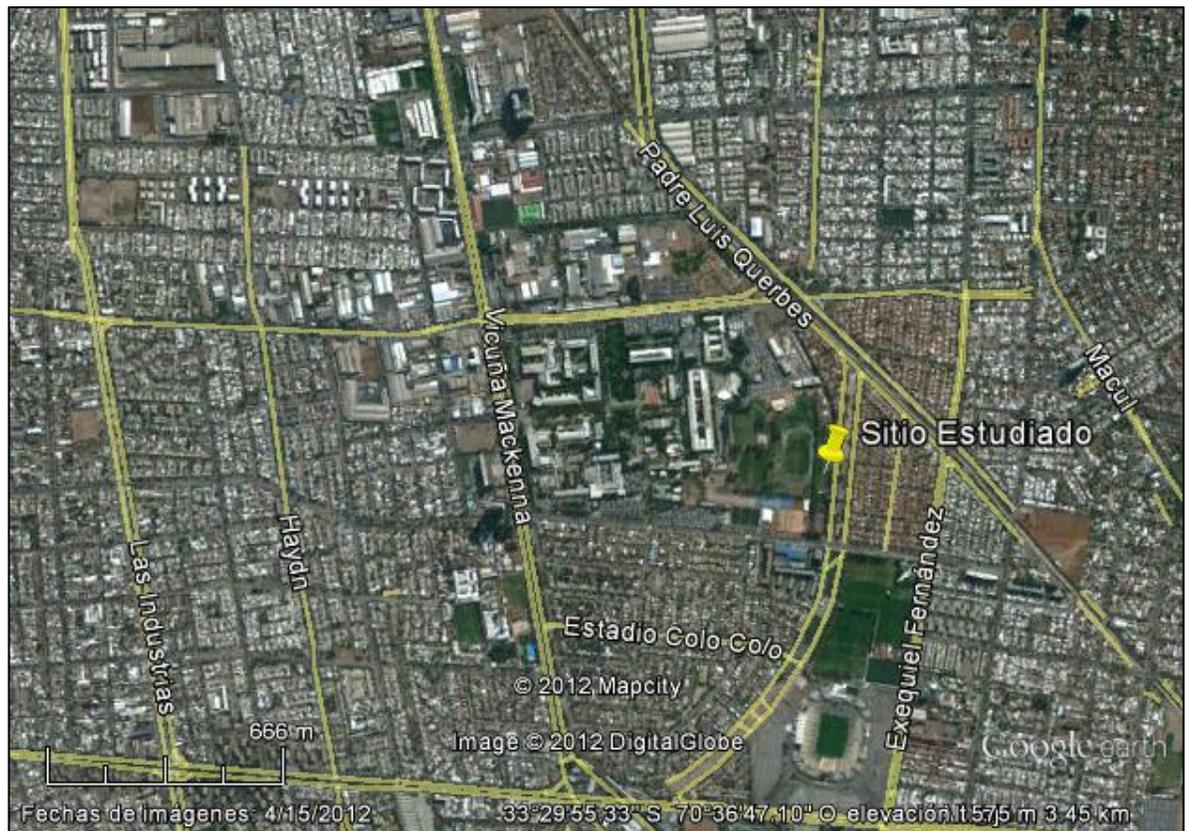


Figura B.1: Ubicación del sitio estudiado para el caso 1



Figura B.2: Arreglos de geófonos utilizados en el sitio de estudio para el caso 1

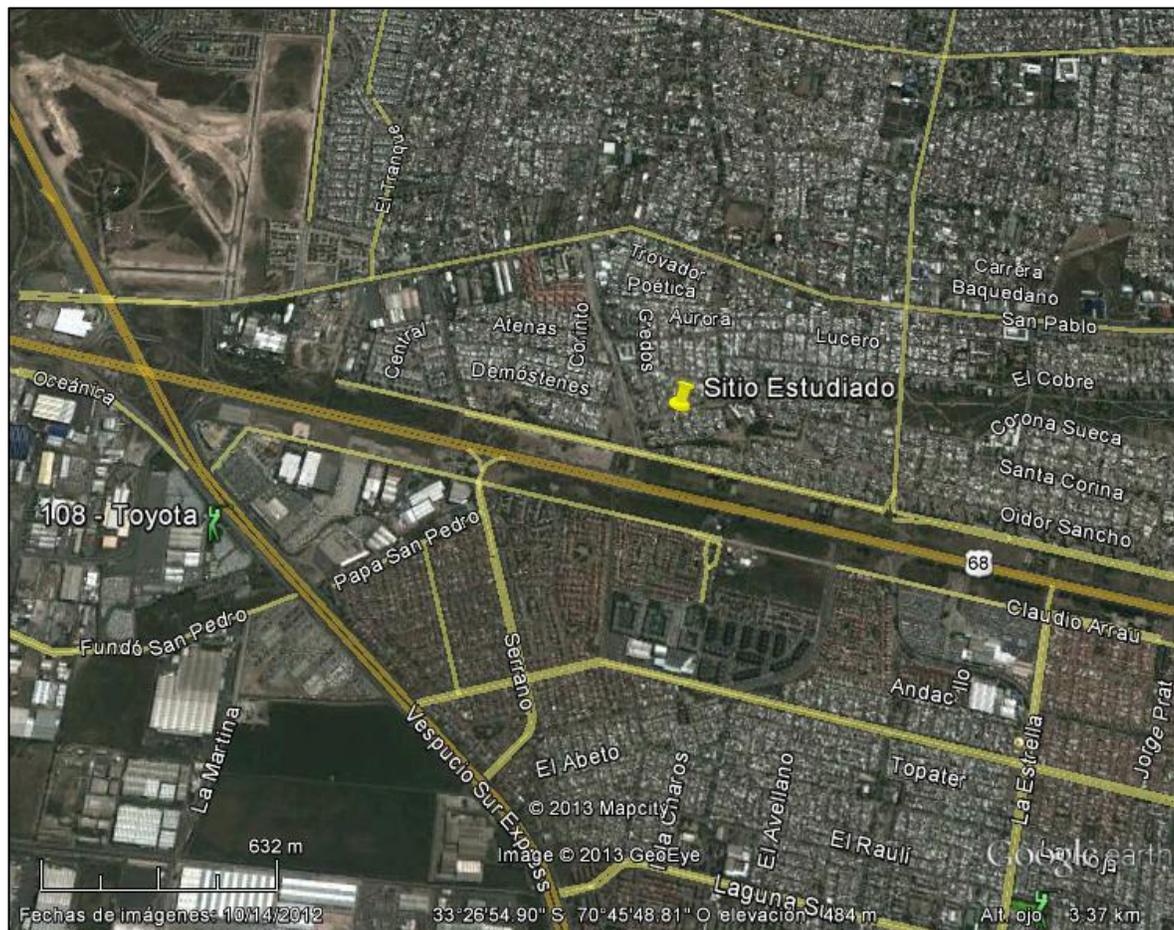


Figura B.3: Ubicación del sitio estudiado para el caso 2



Figura B.4: Arreglos de geófonos utilizados en el sitio de estudio para el caso 2

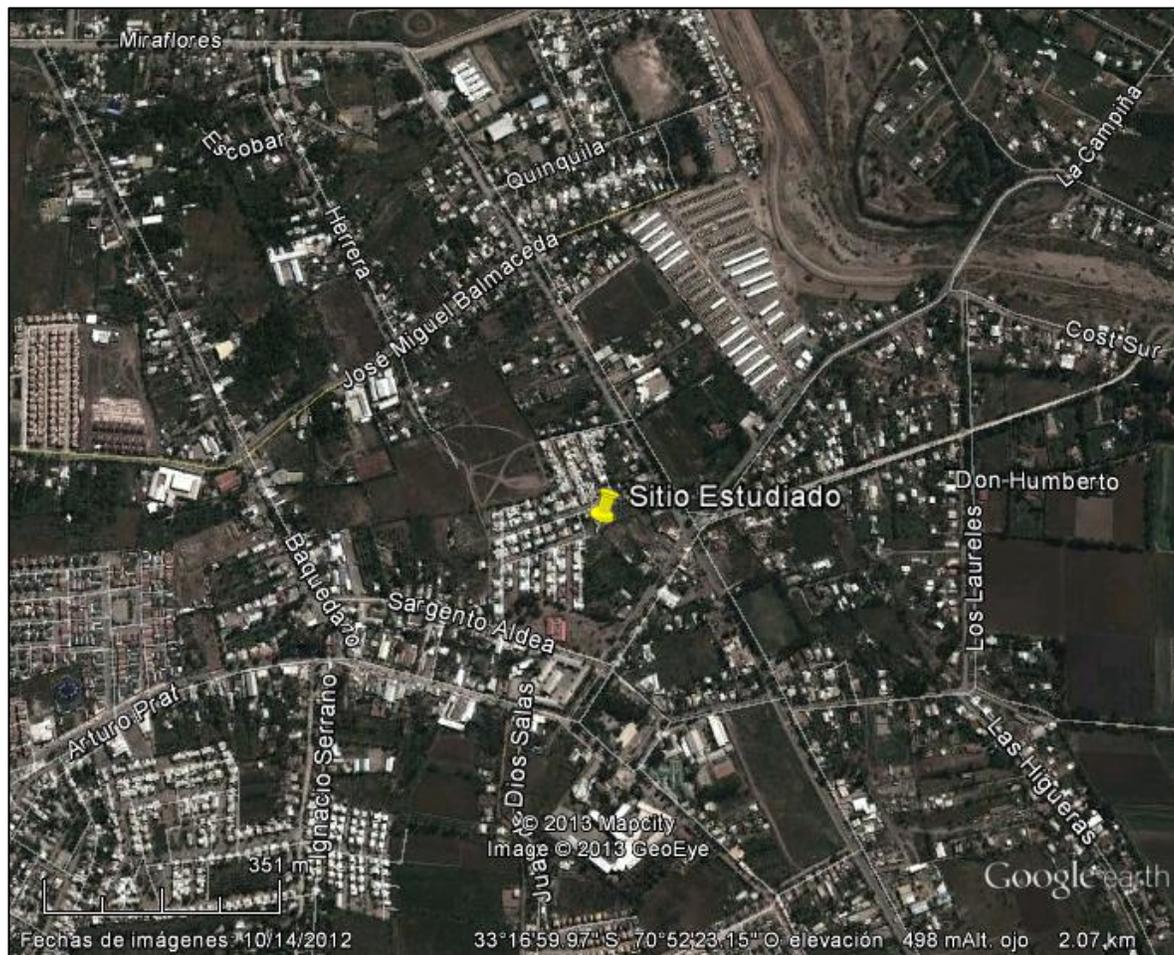


Figura B.5: Ubicación del sitio estudiado para el caso 3



Figura B.6: Arreglos de geófonos utilizados en el sitio de estudio para el caso 3

ANEXO C. RESULTADOS DOWN-HOLE

En los siguientes gráficos se indican los resultados de los ensayos *down-hole*. En ellos se observa la polarización de los golpes efectuados en cada sentido, y a partir de ella, la selección de la llegada de la onda S.

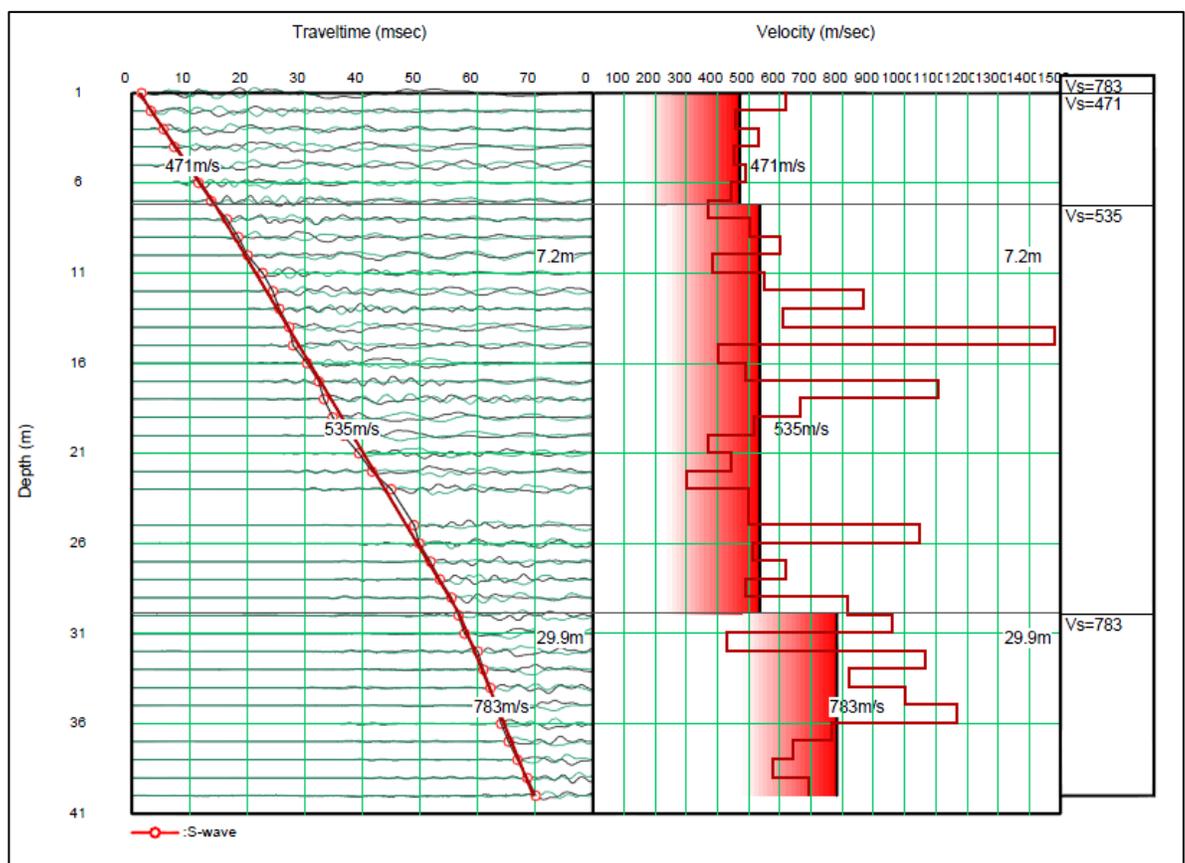


Figura C.1: Resultados de ensayo down-hole para caso 2 (Cenizas Volcánicas)

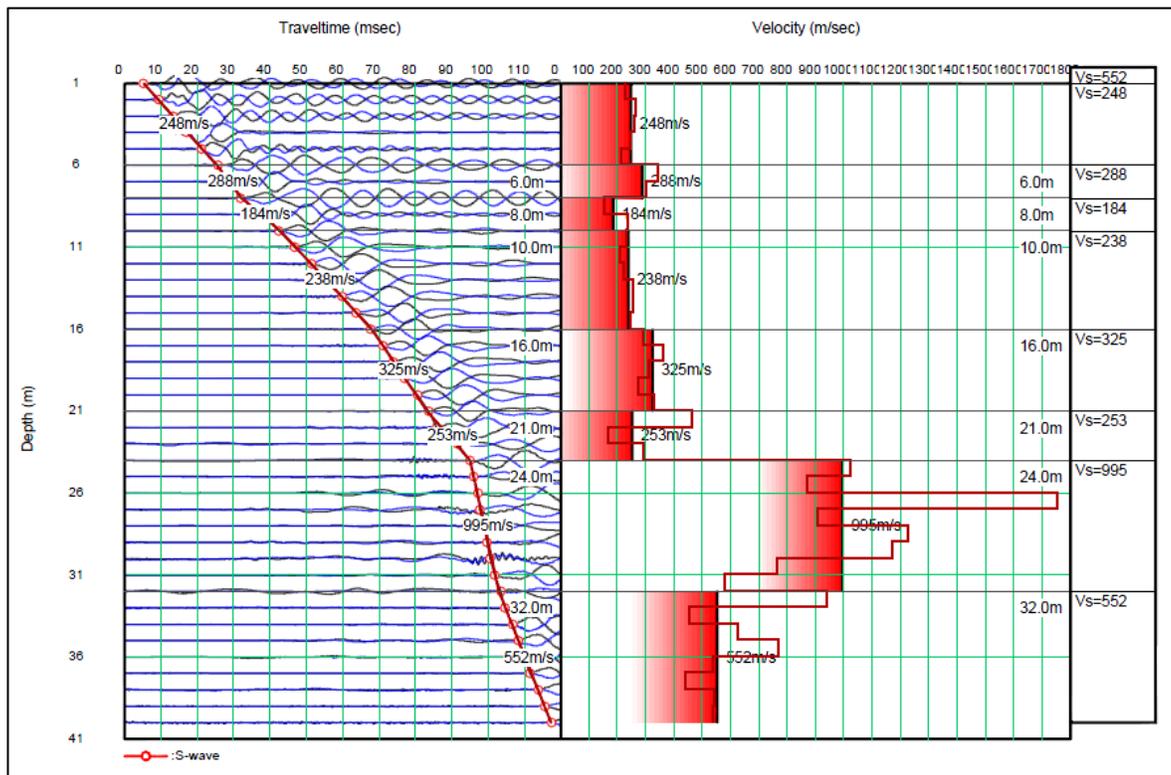


Figura C.2: Resultados de ensayo down-hole para caso 2 (Suelos Finos)

ANEXO D. RESULTADOS DE LA COMBINACIÓN DE TÉCNICAS

.Los siguientes gráficos muestran los resultados obtenidos con las combinaciones de datos descrita en la sección §4.2.2. En cada figura, se indican el ajuste entre la curva de dispersión y/o autocorrelación del modelo con las obtenida en terreno (curva negra). Además se indica los perfiles obtenidos en el proceso de inversión, donde el perfil destacado con color negro corresponde al perfil con el menor desajuste.

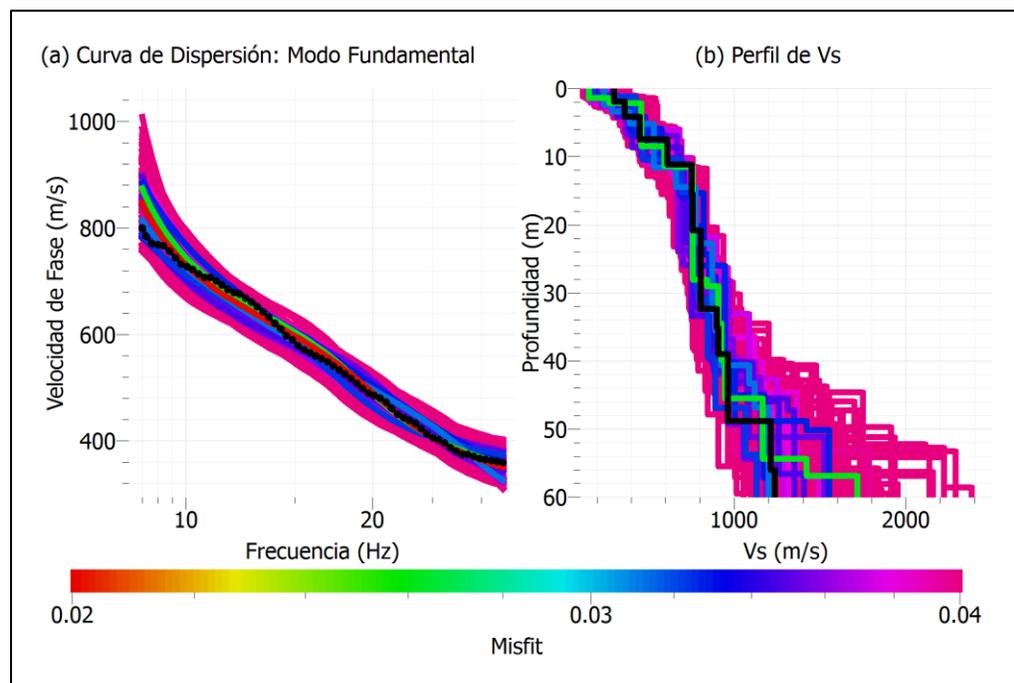


Figura D.1: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con AH

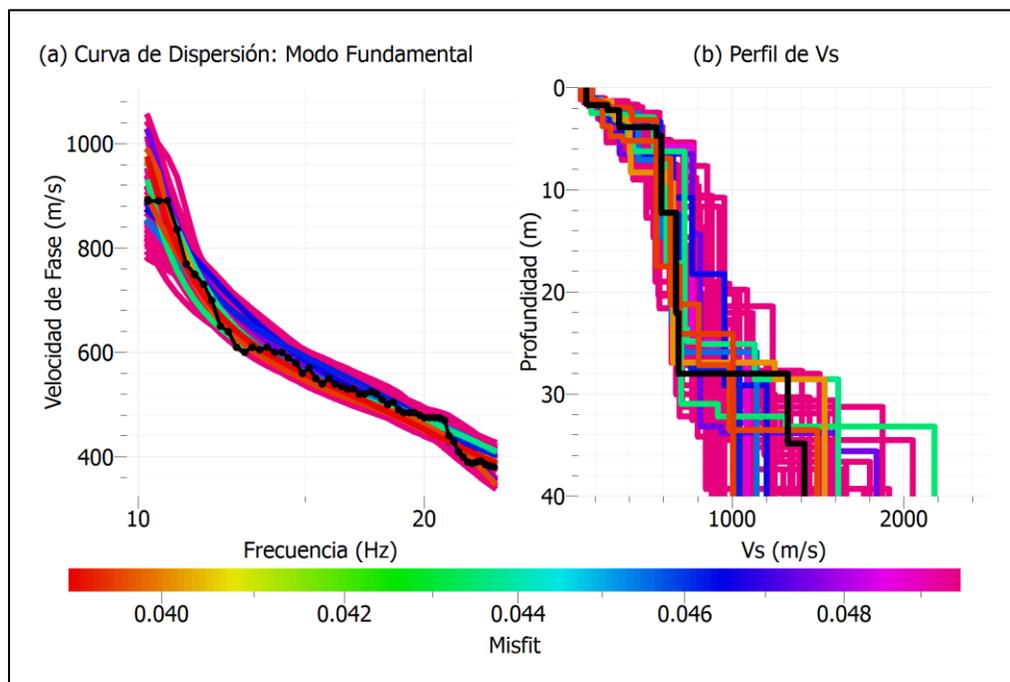


Figura D.2: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LP

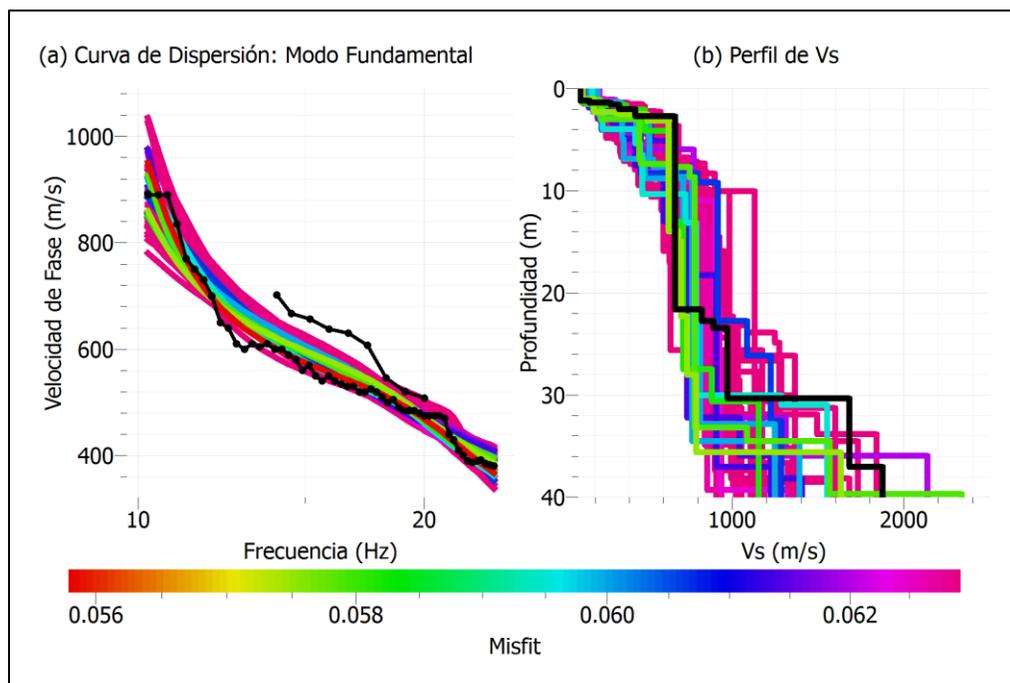


Figura D.3: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LPA

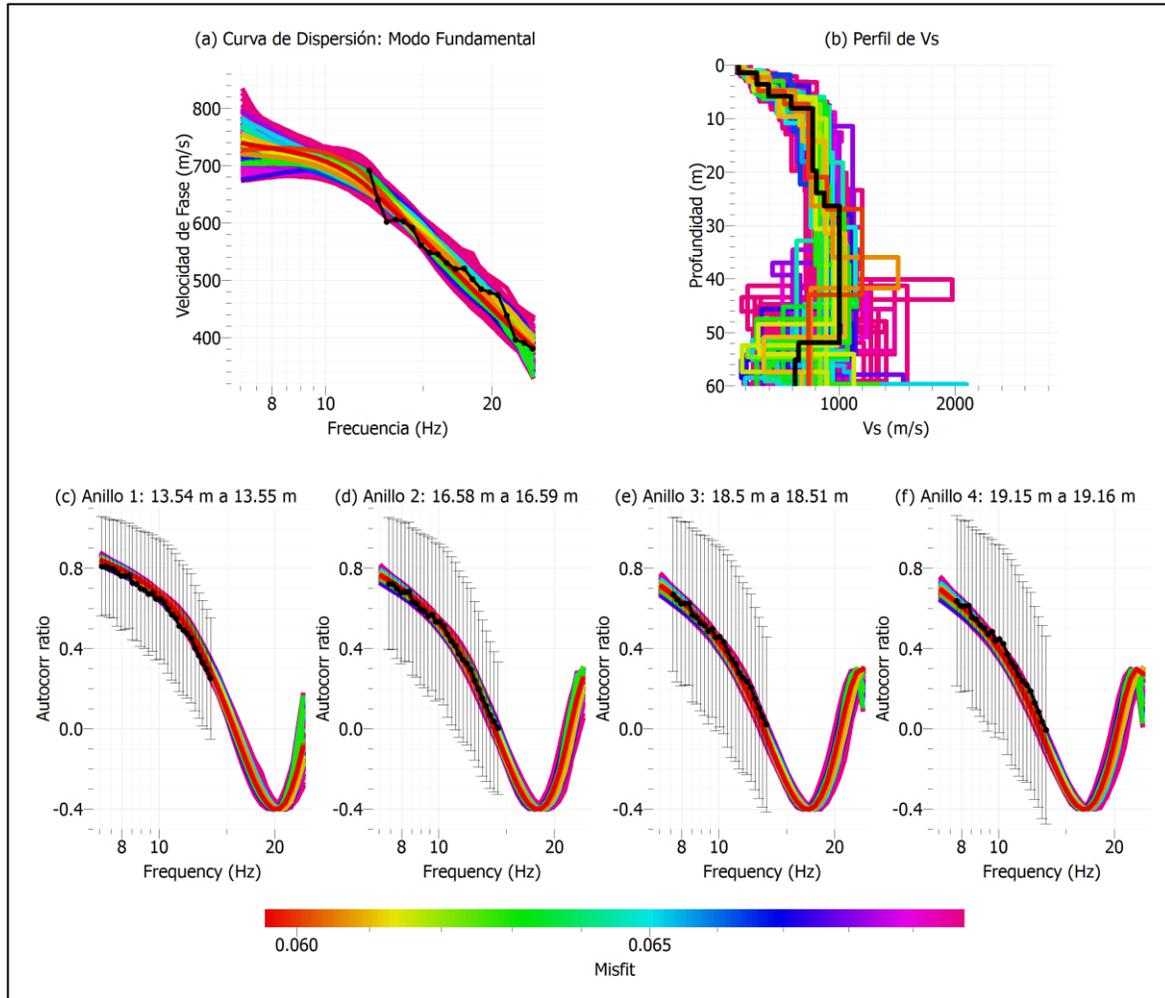


Figura D.4: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LCPA

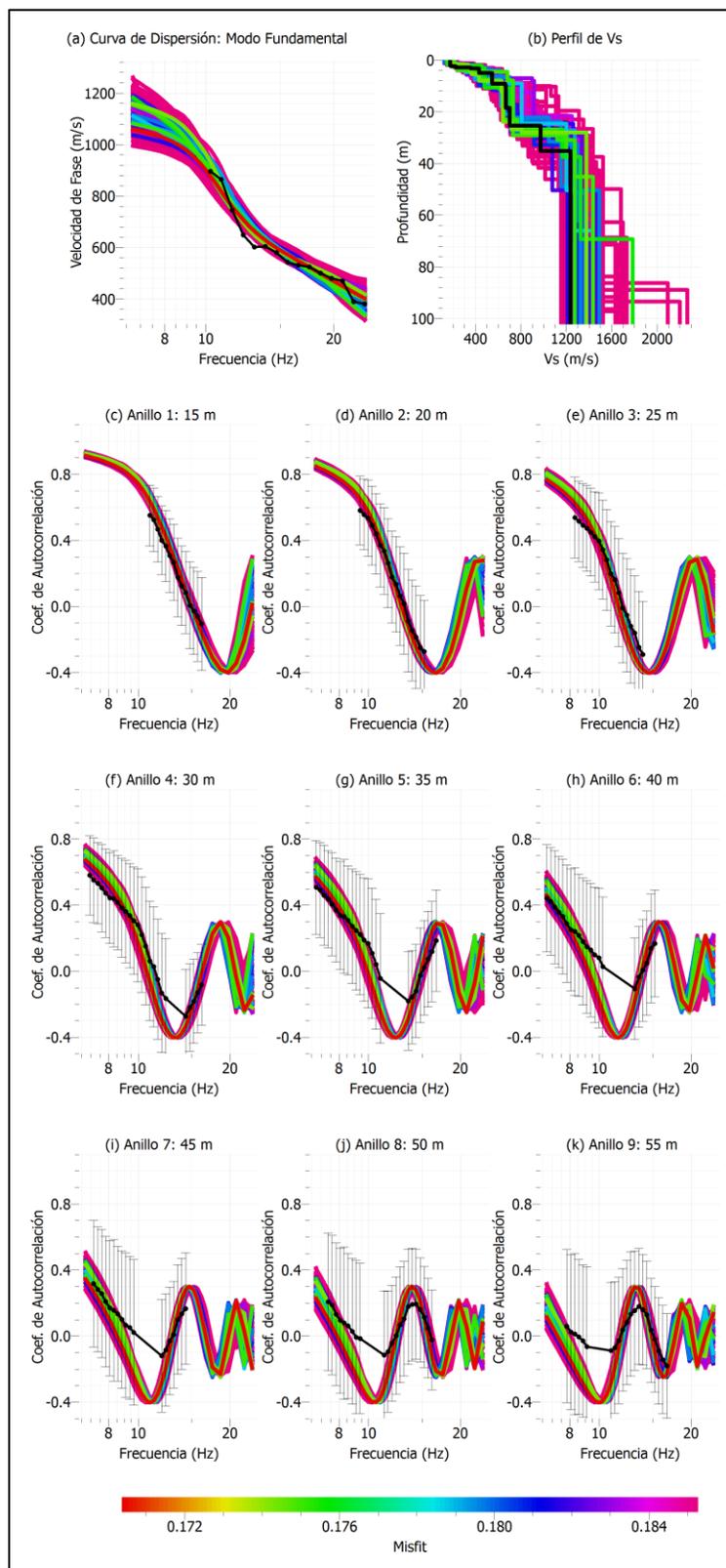


Figura D.5: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 1 con LPA2

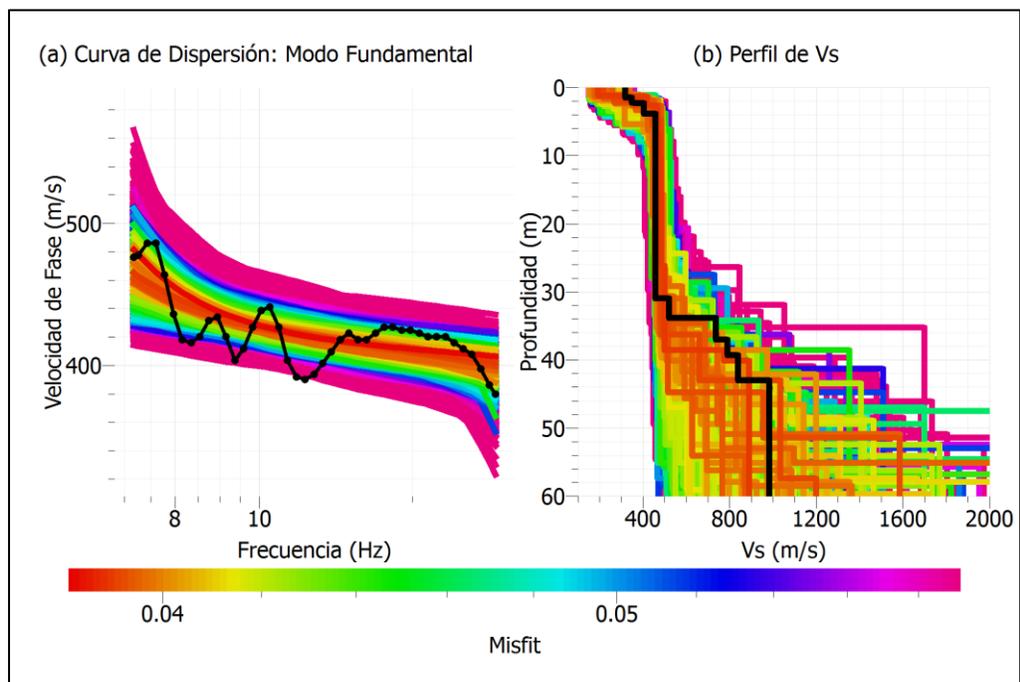


Figura D.6: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con AH

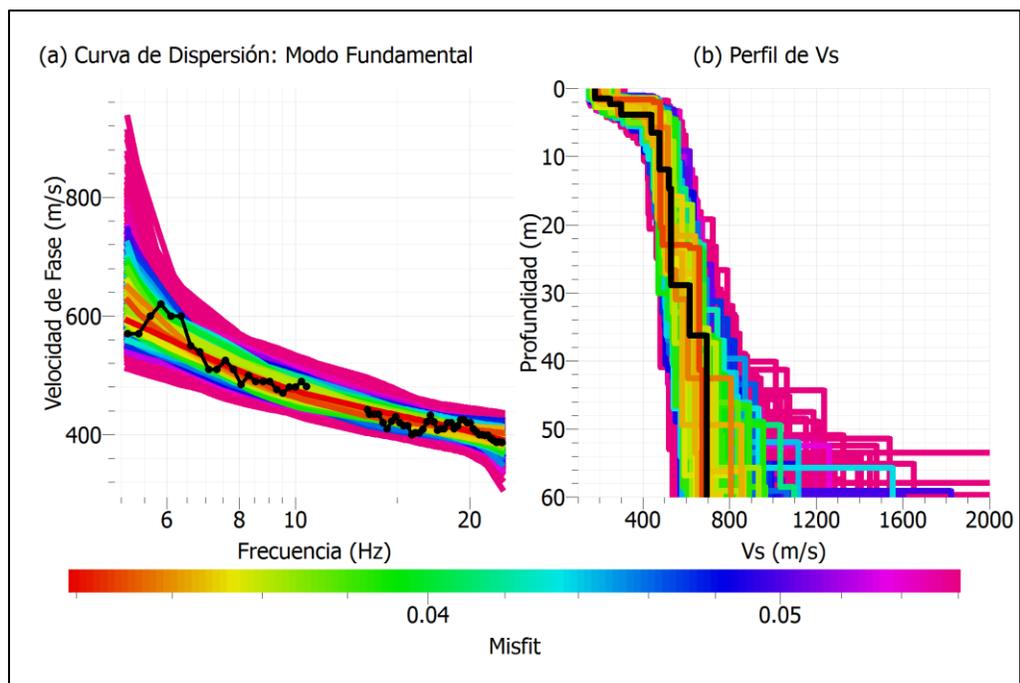


Figura D.7: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LP

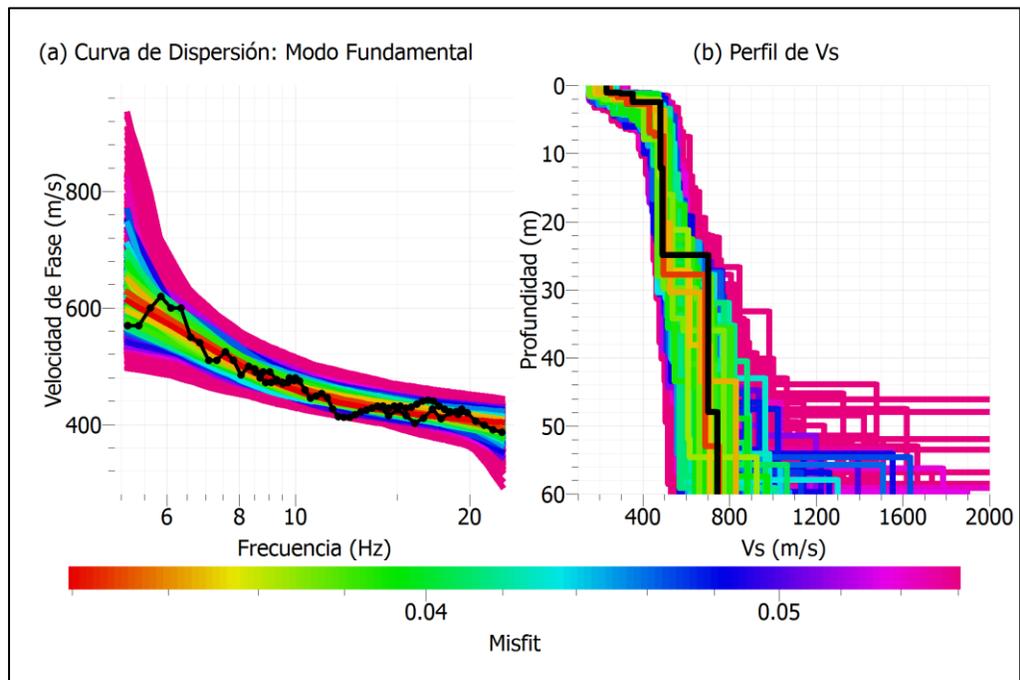


Figura D.8: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LPA

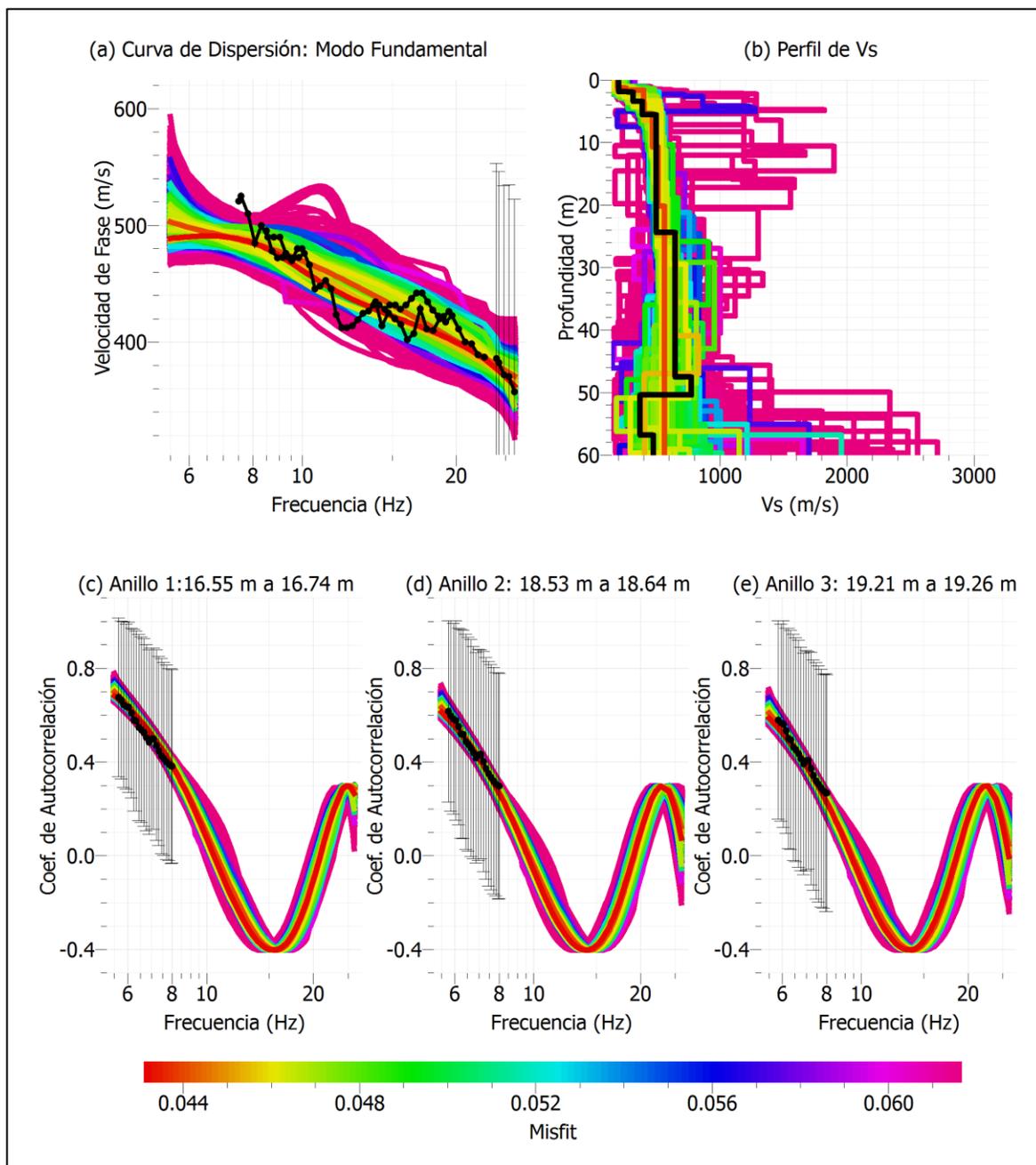


Figura D.9: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LCPA

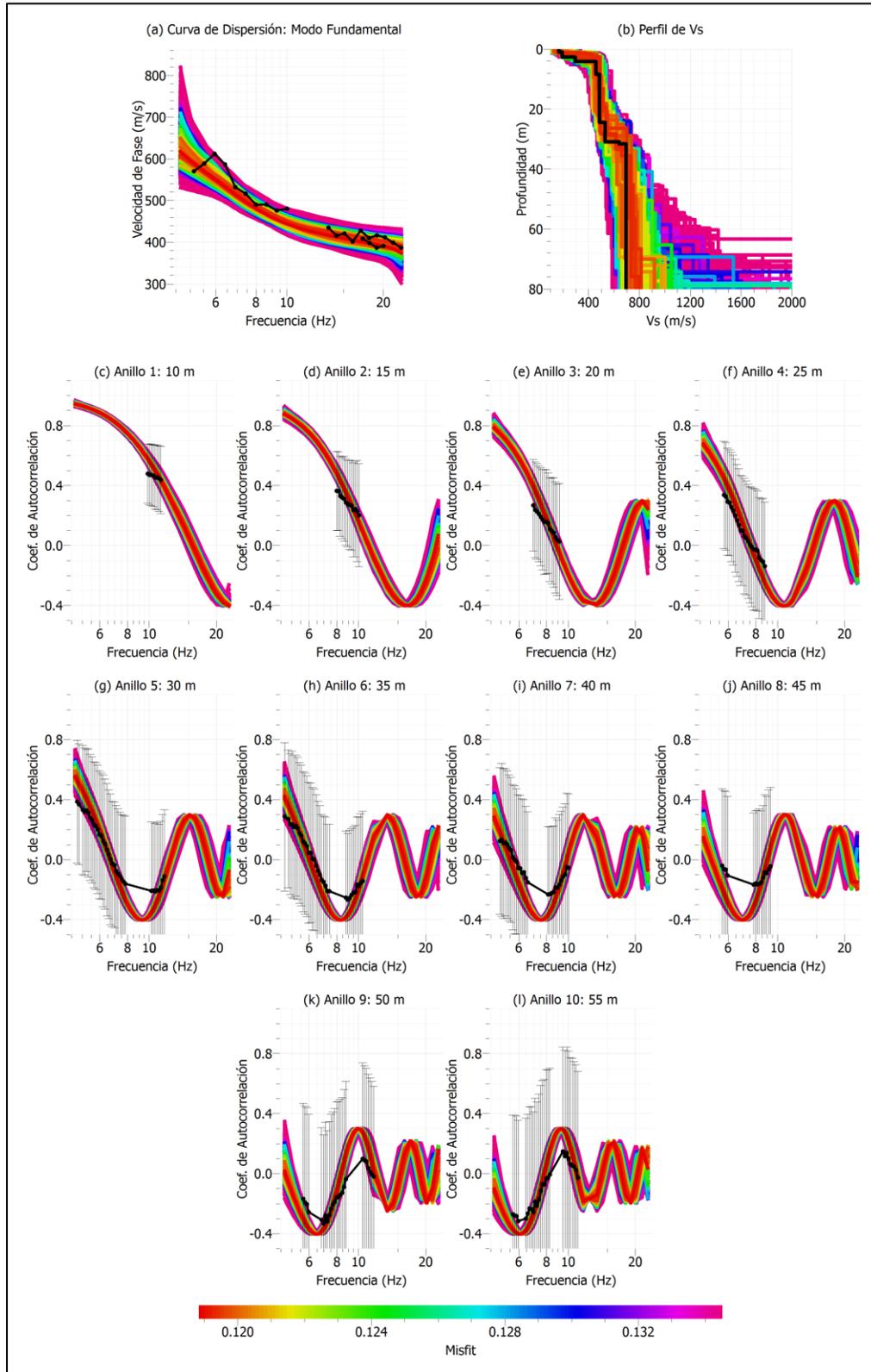


Figura D.10: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 2 con LPA2

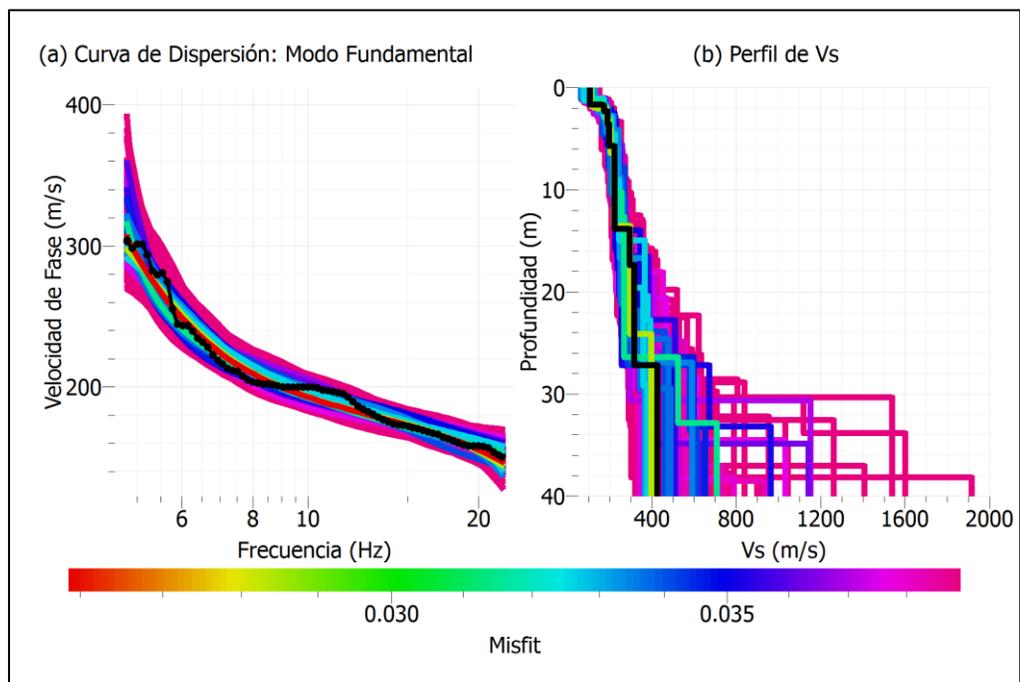


Figura D.11: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con AH

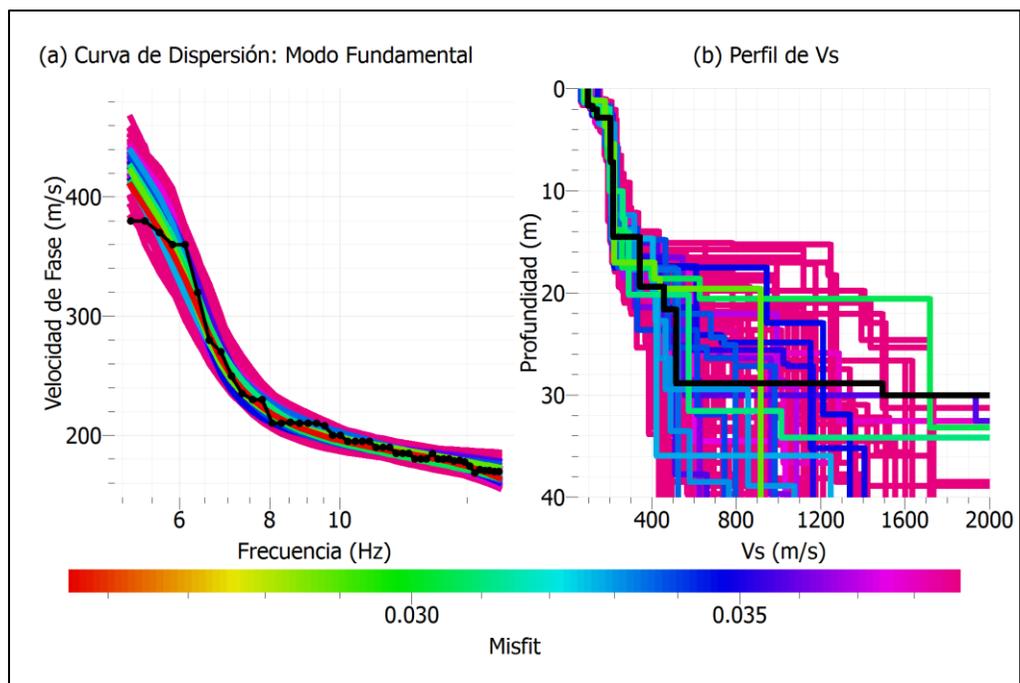


Figura D.12: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LP

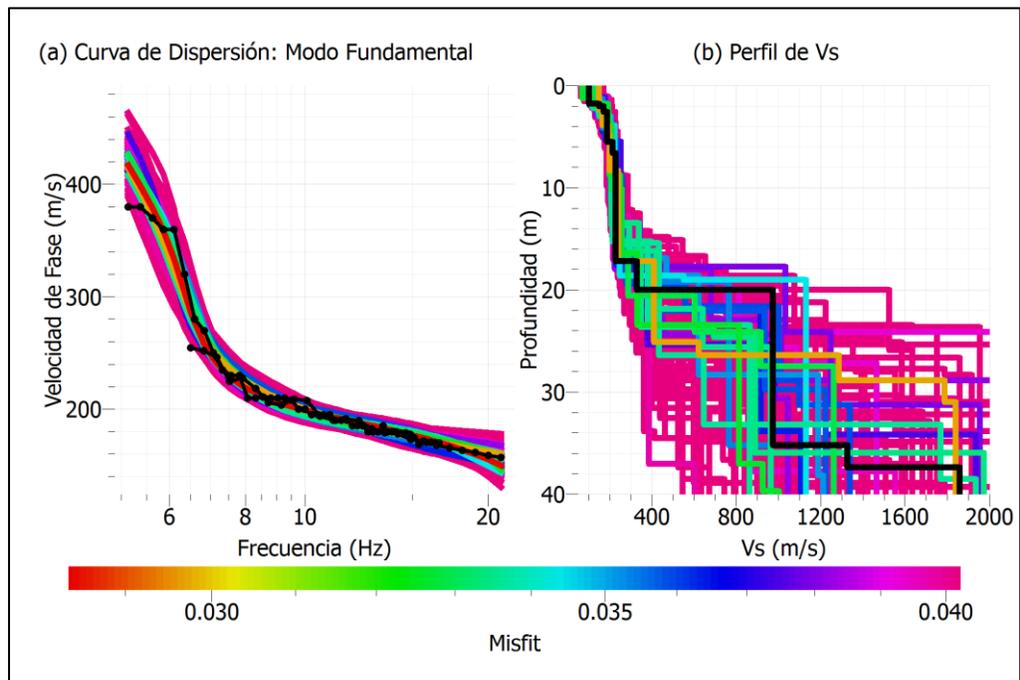


Figura D.13: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LPA

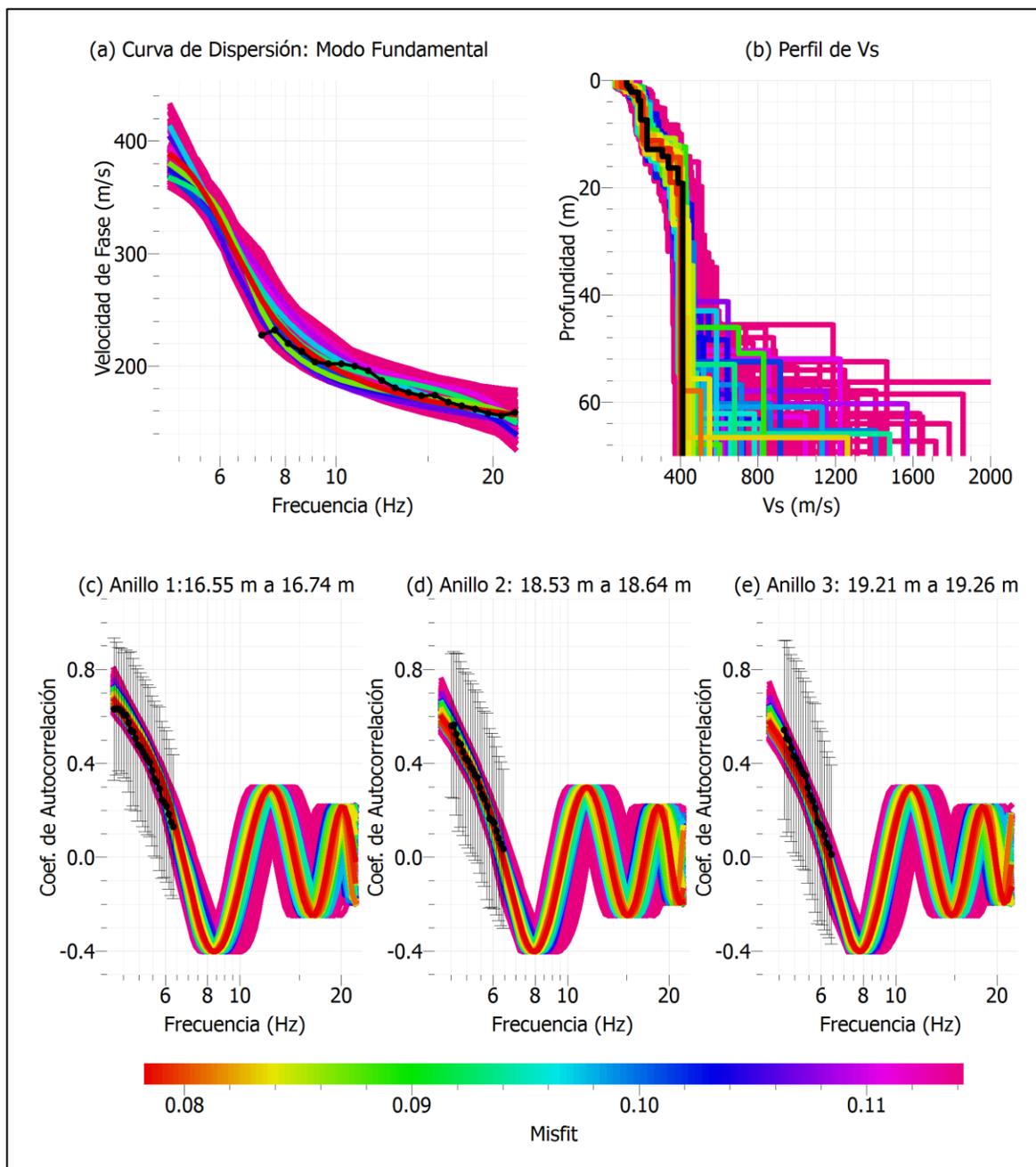


Figura D.14: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LCPA

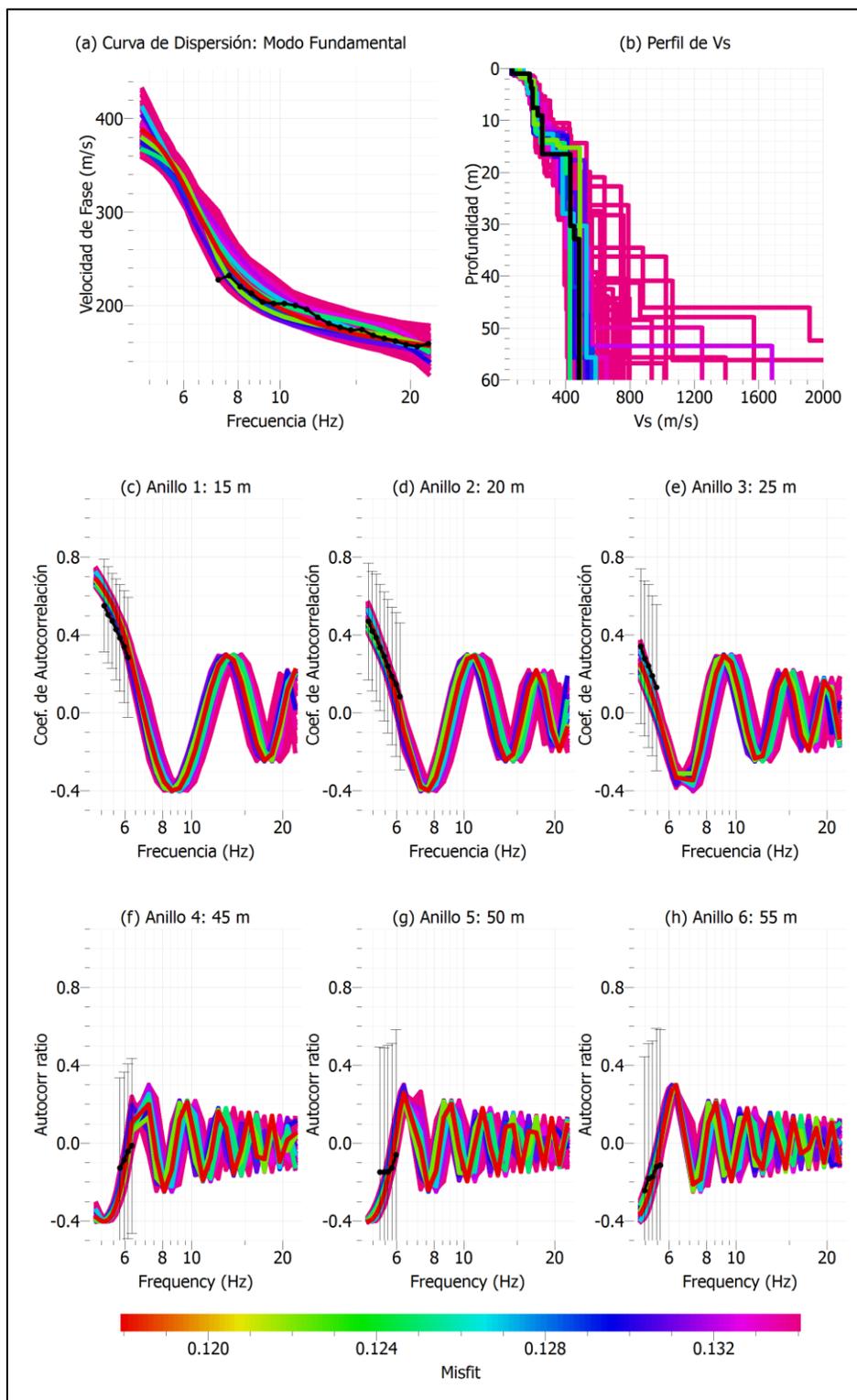


Figura D.15: Perfil de Vs y curva de dispersión ajustados para el caso 3 con LPA2