



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

**OBTENCIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE MEDIANTE
MÉTODO MASW Y COMPARACION CON ENSAYO TIPO DOWNHOLE EN
ESTACIONES SISMOLÓGICAS DE ZONA CENTRAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

NICOLLE ANDREA CORREIA MACHUCA

PROFESOR GUIA

RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

CESAR PASTEN PUCHI

ROBERTO GESCHE SCHULER

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TITULO DE INGENIERA CIVIL
POR: NICOLLE CORREIA MACHUCA
FECHA: 07/01/2015
PROF. GUIA: SR. RICARDO MOFFAT C.

**“OBTENCIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE MEDIANTE MÉTODO MASW Y
COMPARACION CON ENSAYO TIPO DOWNHOLE EN ESTACIONES SISMOLÓGICAS DE ZONA
CENTRAL”**

El presente Trabajo de Título tiene como objetivo principal la obtención de los perfiles de velocidad de onda de corte en cuatro estaciones de la red sismológica RENADIC y una estación sismológica de la Universidad de Chile ubicada en Lolleo, mediante el método de ondas superficiales MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) y la comparación de estos resultados con ensayos *downhole* ya realizados en los mismos sitios.

Se presenta una revisión bibliográfica de las ondas sísmicas, en especial de las ondas Rayleigh en las que está basado este método. Se presenta la metodología para obtener la curva de dispersión y el proceso de inversión de los datos para la obtención del perfil de velocidad de onda de corte. Además, se revisa la metodología de los ensayos geofísicos invasivos *crosshole* y *downhole*, dando especial atención a la metodología de este último.

El método MASW fue implementado con 12 geófonos de 4,5 Hz de frecuencia con los cuales se realizaron ensayos de 5 golpes en cada sitio. A partir de los datos obtenidos, se obtuvo la curva de dispersión de cada sitio mediante un análisis f-k realizado con el software Geopsy. Posteriormente, se realizó la inversión de las curvas de dispersión mediante el módulo Dinver, del mismo software, para obtener el perfil de velocidades de onda de corte.

Se reanalizaron datos de ensayos *downhole* obtenidos por Idiem en cuatro estaciones (Maipú, Peñalolén, Casablanca y Melipilla) mediante el Método Directo y se reanalizaron datos en la estación de Maipú con el Método del Intervalo y el Método del Intervalo Modificado.

Se comparan los perfiles de V_s de acuerdo a los resultados de ensayos *downhole* para los 5 sitios, la relación de los resultados con la estratigrafía de cada sector y se comparan los perfiles obtenidos con ensayos *downhole* y ensayos MASW.

Las conclusiones de este Trabajo apuntan a las diferencias en el cálculo de V_{s30} de acuerdo a la metodología utilizada, la influencia en la clasificación sísmica del sitio, la importancia de la estratigrafía en ensayos superficiales, la necesidad de información complementaria para el análisis de ensayos superficiales, como datos topográficos, estudios anteriores entre otros, y la utilidad de contar con sondajes exploratorios para entregar un resultado confiable y certero.

*A mis padres
A mi abuelo*

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este Trabajo de Título quiero agradecerle a mi madre por ese apoyo incondicional, la paciencia y el aguante. Gracias mami, esto es para ti. A mi padre, si pudiera mandar este Trabajo al cielo lo haría..

A mis hermanas y mi hermano por el cariño, la comprensión y los sabios consejos. A mi sobrino, que es mi hermano chico, gracias por esas conversaciones inolvidables y por acompañarme a realizar los ensayos.

Agradezco a mi profesor guía, Ricardo Moffat, por acompañarme en esta larga etapa, por su apoyo y colaboración, la disposición y la confianza.

Agradezco a César Pastén y a Don Roberto Gesche, por su comprensión, participación y comentarios en este proceso.

Agradezco a Omar González y Mario Carrillo por la ayuda, los consejos, las conversaciones, los almuerzos y todo lo que se vive en el Laboratorio.

Agradezco a mis amigos, en especial a Marcela, Álvaro y Verónica. El aporte de ustedes es infinito en mi vida, gracias por la espera, la confianza, el ánimo y el cariño. Marcela... la manda llegó a su fin! A Claudio, Sebastián y Mauricio por el apoyo, la fuerza y la compañía.

Agradezco a todos quienes aportaron en este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación del estudio.....	1
1.2 Objetivos del estudio.....	2
1.3 Esquema del estudio	2
CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Introducción	4
2.2 Ondas Sísmicas.....	4
2.3 Caracterización mediante ondas Superficiales	5
2.4 Ensayos Geofísicos	6
2.4.1 Ensayos invasivos	6
2.4.2 Ensayos no invasivos	15
CAPÍTULO 3 MÉTODOLÓGIA Y MEDICIONES DE TERRENO	39
3.1 Introducción	39
3.2 Estaciones de Monitoreo.....	39
3.2.1 Maipú	40
3.2.2 Peñalolén.....	43
3.2.3 Casablanca.....	46
3.2.4 Melipilla.....	49
3.2.5 Lolleo	51
3.3 Equipo de medición.....	53
3.3.1 Geode	53
3.3.2 Geófonos	54
3.3.3 Fuente	56
3.3.4 Equipo general y accesorios de medición	57

3.4	Arreglo y ensayo	58
3.4.1	Ensayo de Prueba	59
3.5	Análisis de datos.....	62
3.5.1	Determinación de la Curva de Dispersión.....	62
3.5.2	Inversión del Perfil de Velocidad de Onda de Corte	65
3.5.3	Consideraciones en el procesamiento	68
CAPÍTULO 4 RESULTADOS DE TERRENO		72
4.1	Introducción	72
4.2	Maipú	72
4.3	Peñalolén.....	77
4.4	Casablanca.....	81
4.5	Melipilla.....	84
4.6	Llolleo	89
CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN MASW vs DOWNHOLE		93
5.1	Introducción	93
5.2	Comparación <i>Downhole</i>	93
5.2.1	Maipú	93
5.2.2	Peñalolén.....	95
5.2.3	Casablanca.....	97
5.2.4	Melipilla.....	99
5.2.5	Método Intervalo y Ley de Snell	102
5.3	Comparación Ensayos <i>Downhole</i> con Ensayos MASW	107
5.3.1	Maipú	107
5.3.2	Peñalolén.....	109
5.3.3	Casablanca.....	110

5.3.4	Melipilla.....	112
5.3.5	Llolleo	113
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES.....		116
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA		120

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Tipos de ondas superficiales.....	5
Figura 2-2: Esquema de ensayo <i>downhole</i> (Modificado Geodatos)	7
Figura 2-3: Determinación del tiempo de llegada de la onda P y S (ASTM D7400 – 08).....	8
Figura 2-4: Resultado ensayo <i>downhole</i> , onda S y onda P (Anexo B, Informe Red Sismológica, Idiem).....	8
Figura 2-5: Esquema del método directo (Kim et al, 2004)	10
Figura 2-6: Esquema del método de Intervalo (Kim et al, 2004)	11
Figura 2-7: Esquema método de Intervalo Modificado (Kim, et al, 2004)	12
Figura 2-8: Esquema método de Trayectoria según Ley de Snell (Kim et al, 2004)	13
Figura 2-9: Esquema de ensayo Crosshole (AIG Instrumentos Venezuela)	15
Figura 2-10: Ejemplos de la dispersión en medios estratificados (Modificado Rix 1988, Foti 2000)	16
Figura 2-11: Representación de la dispersión de las ondas Rayleigh dependiendo de la longitud de onda (Modificado Rix 1988, Foti 2000)	17
Figura 2-12: Esquema de mediciones de ondas superficiales (Modificado de Park Seismic)	18
Figura 2-13: Curva de dispersión (Peredo V., 2011)	18
Figura 2-14: Curva de dispersión con influencia multi-modal (O’Neil, 2004)	19
Figura 2-15: Comparación de resolución en la curva de dispersión (Park et al, 1998)	20
Figura 2-16: Esquema explicativo “problema inverso” (Modificado de Park Seismic)	22
Figura 2-17: Esquema “forward modelling” (Modificado de Park Seismic).....	22

Figura 2-18: Ejemplo de combinación errónea de modos (Modificado de Park Seismic).....	23
Figura 2-19: Configuración método SSR (Joh S.H., 1996)	25
Figura 2-20: Determinación de la velocidad de onda de corte mediante Método SRR (Joh s.H., 1996).....	25
Figura 2-21: Relación longitud de onda con respecto a la profundidad (GeoVision).....	26
Figura 2-22: Configuración en terreno método SASW (Rix et al., 1991).....	27
Figura 2-23: Arreglo de eje de simetría método SASW (Ochoa F., 2007)	28
Figura 2-24: Arreglo de fuente común, método SASW (Ochoa F., 2007)	28
Figura 2-25 Ejemplo de curva de dispersión experimental (Peredo V., 2011).....	29
Figura 2-26: Ejemplo de curva de dispersión experimental promedio (Peredo V., 2011)	30
Figura 2-27: Esquema de prospección en terreno (ParkSeismic)	31
Figura 2-28: Esquema MASW con fuente activa (ParkSeismic)	32
Figura 2-29: Registro de campo que ilustra el rango utilizable de separación de la fuente (ParkSeismic).....	33
Figura 2-30: Datos de terremotos alrededor del planeta mostrando fuertes ondas superficiales (ParkSeismic).....	35
Figura 2-31: Comparación de métodos de rotación con MASW (ParkSeismic)	36
Figura 2-32: Una analogía del enfoque multicanal sísmica a los conceptos de imagen digital de número de bits y píxeles. (ParkSeismic)	37
Figura 2-33: Configuración en terreno para método SASW (Park et al., 1997)	37
Figura 2-34: Configuración en terreno para método MASW (Park et al., 1997).....	38
Figura 3-1: Ubicación estaciones analizadas (Google Earth)	40
Figura 3-2: Ubicación punto sondaje Estación de Maipú	41
Figura 3-3. Resultados ensayo SPT	42
Figura 3-4: Ubicación punto de sondaje Estación Peñalolén.....	43
Figura 3-5: Resultado ensayos SPT	45

Figura 3-6: Ubicación sondaje Casablanca y punto de ensayo superficial	46
Figura 3-7: Resultado ensayos SPT	48
Figura 3-8: Ubicación sondaje Melipilla y punto de ensayo superficial	50
Figura 3-9: Resultado ensayo SPT.....	51
Figura 3-10: Punto ubicación sondaje	52
Figura 3-11: Resumen antecedentes geotécnicos estación de Lollole (Verdugo R., 2008).....	53
Figura 3-12: Equipo de adquisición de datos.....	54
Figura 3-13: Geófono vertical utilizado	55
Figura 3-14: Especificaciones geófono Geospace	55
Figura 3-15: Masa de ensayo SPT utilizada en las mediciones.	56
Figura 3-16: Mecanismo de caída y golpe de ensayos.....	57
Figura 3-17: Configuración ensayo de prueba.....	60
Figura 3-18: Gráfica en Geopsy de un ensayo de prueba con trigger automático.....	60
Figura 3-19: Gráfica en Geopsy de un ensayo con trigger manual	61
Figura 3-20: Gráfica en Geopsy de los datos analizados para múltiples golpes.....	62
Figura 3-21: Opción de análisis lineal con fuente activa en Geopsy	63
Figura 3-22: Opciones de análisis de Geopsy. (a) geometría para el pre-proceso; (b) tiempos de análisis; (c) rango de frecuencia para el análisis.....	63
Figura 3-23: Imagen de dispersión obtenida en Geopsy, (a) lentitud vs frecuencia; (b) velocidad vs frecuencia	64
Figura 3-24: Discretización de curva de dispersión en Geopsy (a) con auto-pick; (b) pick manual ..	64
Figura 3-25: Curva de dispersión discretizada y menú de opciones para los datos de la curva.....	65
Figura 3-26: Inicialización módulo dinver en Geopsy	65
Figura 3-27: Curva de dispersión cargada en módulo dinver	66
Figura 3-28: Parámetros iniciales para el proceso de inversión	66
Figura 3-29: Proceso de inversión, se señala error del proceso	67

Figura 3-30: Perfil de velocidad de onda de corte obtenido	67
Figura 3-31: Modelos de V_s con desajuste de 0,02.....	68
Figura 3-32: Curva de dispersión con auto-pick	69
Figura 3-33: Proceso de inversión curva de dispersión anterior	69
Figura 3-34: Perfil de velocidad de onda de corte con error de 0,18	70
Figura 4-1: Disposición en terreno de ensayo MASW en Maipú	73
Figura 4-2: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy	74
Figura 4-3: Gráfico de curvas de dispersión para Maipú	75
Figura 4-4: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Maipú	76
Figura 4-5: Disposición en terreno de ensayo MASW en Peñalolén.....	77
Figura 4-6: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy	78
Figura 4-7: Gráfico de curvas de dispersión para Peñalolén.....	79
Figura 4-8: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Peñalolén.....	80
Figura 4-9: Disposición en terreno de ensayo MASW en Casablanca.....	81
Figura 4-10: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy	82
Figura 4-11: Gráfico de curvas de dispersión para Casablanca.....	83
Figura 4-12: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Casablanca	84
Figura 4-13: Disposición en terreno de ensayo MASW en Melipilla.....	85
Figura 4-14: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy	86
Figura 4-15: Gráfico de curvas de dispersión para Melipilla.....	87
Figura 4-16: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Melipilla.....	88
Figura 4-17: Disposición en terreno de ensayo MASW en Llole	89
Figura 4-18: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy	90
Figura 4-19: Gráfico de curvas de dispersión para Llole	91
Figura 4-20: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Llole	92

Figura 5-1: Selección de Llegadas onda S para <i>downhole</i> de Maipú	94
Figura 5-2: perfiles de V_s para Maipú	95
Figura 5-3: Selección de Llegadas onda S para <i>downhole</i> de Peñalolén.....	96
Figura 5-4: perfiles de V_s para Peñalolén	97
Figura 5-5: Selección de Llegadas onda S para <i>downhole</i> de Casablanca.....	98
Figura 5-6: perfiles de V_s para Casablanca	99
Figura 5-7: Selección de Llegadas onda S para <i>downhole</i> de Melipilla.....	100
Figura 5-8: perfiles de V_s para Melipilla	101
Figura 5-9: Comparación entre métodos de análisis de <i>downhole</i> para Maipú	102
Figura 5-10: Comparación entre métodos de análisis de <i>downhole</i> para Peñalolén	104
Figura 5-11: Comparación entre métodos de análisis de <i>downhole</i> para Casablanca	105
Figura 5-12: Comparación entre métodos de análisis de <i>downhole</i> para Melipilla	106
Figura 5-13: Perfiles de V_s para Maipú	108
Figura 5-14: Perfiles de V_s para Peñalolén	109
Figura 5-15: Perfiles de V_s para Casablanca	111
Figura 5-16: Perfiles de V_s para Melipilla.....	112
Figura 5-17: Perfiles de V_s para Lolleo	114

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Parámetros para la adquisición de datos para métodos MASW (valores recomendados) (Park et al. 2002)	34
Tabla 3-1. Estaciones de la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC)	39
Tabla 3-2. Estratigrafía sondaje Maipú.....	41
Tabla 3-3. Resultado ensayo <i>downhole</i>	43

Tabla 3-4. Perfil de V_s según estratigrafía	43
Tabla 3-5. Estratigrafía sondaje Peñalolén	44
Tabla 3-6. Resultado ensayo <i>downhole</i>	46
Tabla 3-7. Perfil de V_s según estratigrafía	46
Tabla 3-8. Estratigrafía sondaje Casablanca	47
Tabla 3-9. Resultado ensayo <i>downhole</i>	49
Tabla 3-10. Perfil de V_s según estratigrafía	49
Tabla 3-11. Estratigrafía sondaje Melipilla	50
Tabla 3-12. Resultado ensayo <i>downhole</i>	51
Tabla 3-13: Clasificación de suelos según D.S. N°61	70
Tabla 4-1: Velocidad de onda de corte para Maipú	77
Tabla 4-2: Velocidad de onda de corte para Peñalolén	80
Tabla 4-3: Velocidad de onda de corte para Casablanca	84
Tabla 4-4: Velocidad de onda de corte para Melipilla	89
Tabla 4-5: Velocidad de onda de corte para Llole	92
Tabla 5-1: Velocidad de onda de corte para Maipú	95
Tabla 5-2: Velocidad de onda de corte para Peñalolén	97
Tabla 5-3: Velocidad de onda de corte para Casablanca	99
Tabla 5-4: Velocidad de onda de corte para Melipilla	101
Tabla 5-5: Velocidad de onda de corte para Maipú	103
Tabla 5-6: Velocidad de onda de corte para Peñalolén	104
Tabla 5-7: Velocidad de onda de corte para Casablanca	105
Tabla 5-8: Velocidad de onda de corte para Melipilla	106
Tabla 5-9: Velocidad de onda de corte para Maipú	108
Tabla 5-10: Velocidad de onda de corte para Peñalolén	110

Tabla 5-11: Velocidad de onda de corte para Casablanca	111
Tabla 5-12: Velocidad de onda de corte para Melipilla	113
Tabla 5-13: Velocidad de onda de corte para Lollole	114

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A – Curvas de dispersión

ANEXO B – Trazas Ensayos Downhole

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del estudio

El pasado terremoto de Febrero de 2010 que afectó principalmente a la zona centro y sur del país, dejó como evidencia grandes daños estructurales en edificios habitacionales, puentes y estructuras viales. Dentro de la oportunidad de mejora frente a las consecuencias de este movimiento telúrico, se consideraron modificaciones a la norma NCh 433 Of96, como por ejemplo la clasificación sísmica de suelo, en donde toma fuerza el valor y la metodología para la determinación de la velocidad de onda de corte en el suelo (V_s).

En primera instancia se promulgó el Decreto N°117 y con posterioridad el Decreto Supremo N°61 (DS61) oficializado en Diciembre de 2011, ambos modificando el sistema de clasificación sísmica de suelos de la NCh 433. Actualmente se encuentra vigente el DS61, en el cual se exige que el suelo sea clasificado sísmicamente mediante la velocidad de onda de corte promedio de los 30 m más superficiales (V_{s30}).

Es por esto que resulta fundamental determinar de manera confiable la velocidad de propagación de las ondas de corte en los primeros 30 metros. Por eso, esta modificación de la normativa exige que se realicen mediciones mediante métodos geofísicos de carácter invasivos o no invasivos. En el caso de ensayos invasivos, se necesita la perforación de un sondaje para poder realizar ensayos del tipo *downhole* o *crosshole*. En el caso de métodos no invasivos, existe la posibilidad de utilizar ensayos ReMi, SASW y MASW, descartando la posibilidad de utilizar refracción sísmica o determinar V_s a partir de las ondas compresionales (V_p).

Para estimar el perfil de velocidades de onda de corte mediante ensayos tipo *downhole*, es necesario contar con un arreglo de 3 sensores ortogonales (se utilizaron datos de *downhole* obtenidos con un geófono triaxial en este estudio), el cual será introducido en el sondaje previamente perforado y entubado solidario al terreno, para así poder medir la propagación de las ondas a través del suelo en profundidad. Así se construye un perfil de velocidad de onda de corte de forma directa, de acuerdo a las mediciones realizadas en terreno, las cuales pueden ser verificadas observando el registro estratigráfico de los testigos del sondaje. La manera de producir la vibración en el terreno es mediante golpes de martillo o martinete en la superficie, de manera vertical y horizontal para generar ondas de corte y compresionales respectivamente.

Por otro lado, los métodos SASW, MASW y ReMi no necesitan de la perforación de un sondaje para estimar la velocidad de onda de corte. La metodología de estos ensayos consiste en la ubicación de geófonos verticales en la superficie del terreno, con configuraciones de espaciamiento y arreglo geométrico; para el MASW y SASW es necesario contar con una fuente activa de golpe vertical. En el caso del método ReMi, éste utiliza las vibraciones ambientales como fuente, lo que se conoce como fuente pasiva.

En este Trabajo de Título se implementará el método MASW, con la utilización de 12 geófonos verticales de 4,5 Hz de frecuencia y se realizarán mediciones en algunas de las estaciones de la red sísmológica de Chile, las cuales cuentan con perfiles de velocidad de onda de corte estimados mediante ensayos *downhole*; realizados con fecha posterior al terremoto de 2010.

1.2 Objetivos del estudio

El objetivo principal de este Trabajo de Título corresponde a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte, para los 30 primeros metros de profundidad, de 5 estaciones de la Red Nacional de Acelerómetros (RENADIC) con el método de análisis multicanal MASW.

Para poder desarrollar este objetivo se han planteado objetivos específicos, los cuales se detallan a continuación;

- Implementación de la metodología MASW en terreno mediante arreglos lineales de 12 geófonos de 4,5 HZ pertenecientes al Laboratorio de Sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- Obtención de la curva de dispersión de los ensayos realizados en las 5 Estaciones seleccionadas y posterior perfil de V_s mediante el método de inversión con software Geopsy.
- Comparación y validación de los perfiles de V_s obtenidos mediante este método superficial y los ensayos del tipo *downhole* realizados en las estaciones analizadas.

1.3 Esquema del estudio

Este Trabajo de Título se ha organizado de la siguiente manera:

- Capítulo 2, Revisión Bibliográfica: se realiza una revisión y se resumen los métodos geofísicos que están siendo utilizados en la ingeniería geotécnica actualmente, en especial del método MASW y *downhole*.
- Capítulo 3, Metodología y Medición en Terreno: se describe la metodología empleada en terreno en la ejecución de los ensayos en las 5 estaciones seleccionadas.
- Capítulo 4, Resultados de Terreno: en esta sección se entrega el resultado de la curva de dispersión y del perfil de velocidades obtenido en las distintas estaciones analizadas.
- Capítulo 5, Comparación MASW v/s *Downhole*: se presentan las diferencias y semejanzas obtenidas entre ensayos *downhole* y de acuerdo a los resultados obtenidos en el Capítulo 4, entre éstos y los ensayos MASW.

- Capítulo 6, Conclusiones y Recomendaciones: se entregan las conclusiones obtenidas en este estudio y las recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introducción

Dentro de los factores que influyen en la respuesta sísmica de un sitio frente a la sollicitación de un sismo, se encuentran las características de la fuente de excitación, como la frecuencia y amplitud de la onda incidente, las propiedades dinámicas de las distintas unidades de suelos que conforman en perfil estratigráfico, la geometría de la cuenca y su topografía.

Dentro de estas variables, es la velocidad de onda de corte la que nos permite estimar las propiedades dinámicas del suelo y nos ayuda a predecir manera el comportamiento del suelo frente a un sismo.

Para poder entender el problema de la determinación del perfil en profundidad de la velocidad de onda de corte, es necesario reconocer y comprender el tipo de sollicitación junto con la evolución que los métodos geofísicos han tenido durante los años.

2.2 Ondas Sísmicas

En un sismo se transmiten ondas que viajan al interior de la Tierra, siguiendo caminos curvos de acuerdo a la variada densidad y composición de las capas del interior de la Tierra. Estas ondas sísmicas son un tipo de onda elástica, producto de la propagación de perturbaciones temporales en el campo de esfuerzos que generan el movimiento del medio.

Como la corteza de la Tierra es un objeto sólido, puede soportar el paso de ondas de cuerpo o internas, y en su superficie ondas superficiales. Las ondas sísmicas que atraviesan el material se llaman ondas P, de ondas *primarias*, y las ondas transversales se llaman ondas S o *secundarias*. Ya que cualquier material fluido, sólido o líquido soporta esfuerzos compresionales, las ondas P pueden viajar a través de cualquier clase de material. Sin embargo, las ondas S dependen de la resistencia a una fuerza transversal o de corte, la cual no existe en medios líquidos ni gaseosos, de modo que solo puede viajar sobre las partes sólidas de la Tierra.

Las ondas P son ondas longitudinales o compresionales, lo que significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de propagación. Las ondas P son simplemente sonoras en el aire, con una velocidad (V_p) de 340 m/s. En el agua, la velocidad de las ondas P es de unos 1.450 m/s. En un material sólido, como se considera un estrato de suelo, la velocidad de onda va a depender del módulo de elasticidad y de su densidad. Por ejemplo, en materiales como el granito la velocidad de las ondas P puede llegar a 5.000 m/s (SMIS, 2014).

Las ondas S son ondas transversales o de corte, que implican movimiento de la tierra de manera perpendicular a la dirección de propagación, alternadamente de un lado hacia y hacia el otro.

Viajan sólo a través de sólidos, con una velocidad (V_s) de aproximadamente un 60% de la velocidad de la onda P, por lo que en un registro sísmico éstas llegan después que las ondas P (SMIS; 2014).

Cuando un sólido posee una superficie libre, como es el caso de la Tierra con la interfaz suelo-aire o suelo-agua, pueden generarse ondas que viajan a lo largo de la superficie de la interfase en dirección paralela, con una amplitud decreciente con la distancia y la profundidad (Biot, 1962). Estas ondas se conocen como ondas Love y ondas Rayleigh. Las ondas Love son ondas netamente superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie. La velocidad de estas ondas es cercana a un 90% de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh. Por su parte, las ondas Rayleigh son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo. Son ondas más lentas que las ondas internas y su velocidad de propagación es aproximadamente un 70% de la velocidad de las ondas S (Henríquez C., 2007)

La Figura 2-1 presenta un esquema del movimiento del terreno que producen las ondas descritas anteriormente.

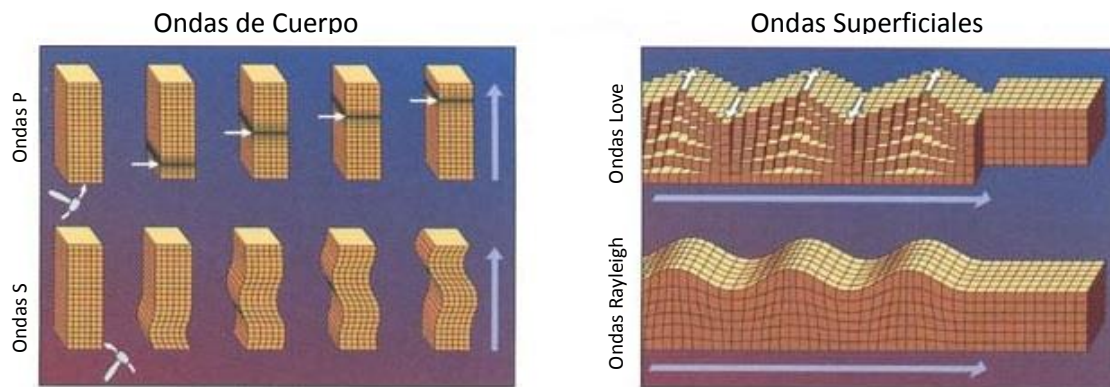


Figura 2-1: Tipos de ondas superficiales

2.3 Caracterización mediante ondas Superficiales

La utilización de las ondas superficiales en la caracterización del suelo se debe a la naturaleza de este tipo de ondas y algunas de sus propiedades. Debido a que estas ondas viajan por la superficie libre, es relativamente fácil medir el movimiento asociado a ellas, obteniendo información importante sobre las propiedades mecánicas del suelo.

Debido al comportamiento de las ondas superficiales en su propagación en medios estratificados, se han desarrollado aplicaciones en el campo de la sismología con el objetivo de inferir las características de la roca en donde se genera la propagación de las ondas (Dorman and Ewing, 1962). En particular, las ondas superficiales tienen una gran influencia en el movimiento asociado a los terremotos, por lo que se inició una investigación para utilizar la información obtenida en sismógrafos para obtener un conocimiento más profundo en cuanto a la estructura de la Tierra y su sistema de capas.

Aplicaciones a la caracterización geotécnica comenzaron por los años cincuenta, con el método geofísico Steady State Rayleigh (SSRM). Posteriormente, en los años ochenta, se introduce el método llamado Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) junto con otras alternativas para la modelación de la propagación de las ondas superficiales y la obtención de un perfil de V_s asociado.

2.4 Ensayos Geofísicos

Este tipo de ensayos han sido adoptados por la ingeniería geotécnica para poder estimar la velocidad de onda de corte en la profundidad. De acuerdo a la fuente de excitación que se utilice pueden clasificarse como pasivos o activos, siendo los activos aquellos que utilizan una fuente externa que genere una vibración en el medio, mientras que los ensayos pasivos utilizan la vibración medioambiental como fuente (ruido).

Otra forma de clasificar este tipo de ensayos, es si necesitan de un sondaje o no para poder realizar la medición. Este tipo de ensayos se conoce como invasivo, es decir, la instrumentación debe ser instalada en profundidad dentro de uno o más sondajes como es el caso de los ensayos *downhole* y *crosshole*. Los ensayos no invasivos son los que permiten posicionar la instrumentación en la superficie del terreno y realizar la medición con una fuente activa también ubicada en superficie. Dentro de estos ensayos encontramos los de tipo SASW (spectral analysis surface waves) y MASW (multichannel analysis surface waves).

2.4.1 Ensayos invasivos

Como se mencionó anteriormente, los ensayos *downhole* y *crosshole* son los más comunes dentro de esta clasificación. A partir de 1960 fueron desarrollados y adaptados de los ensayos de penetración de cono dinámico (SCPT) (Campanella et al, 1986).

2.4.1.1 Ensayo *Downhole*

El método *downhole* ha sido ampliamente utilizado para la medición de perfiles de velocidad de onda de corte in situ para el análisis de la respuesta sísmica de un terreno. De acuerdo al procedimiento detallado en la norma ASTM D7400 – 08 Standard Test Methods for Downhole Seismic Test, este método se limita a la determinación de las velocidades en intervalos de tiempo de la llegada de las ondas sísmicas de compresión y corte polarizadas, que se generan en las cercanías de la superficie y que viajan hacia abajo a un arreglo de sensores instalados verticalmente.

Por ello la norma recomienda el uso de 3 transductores ubicados ortogonalmente para formar un arreglo triaxial o en su defecto, utilizar sensores uniaxiales o biaxiales tomando en consideración que los transductores estén orientados en la dirección más paralela posible a la dirección de la fuente de ondas S o radialmente en el caso de las ondas P. Además se plantea utilizar dos geófonos separados una distancia conocida, que van profundizando en el sondaje para realizar la medición, o en su defecto, realizar las mediciones con un solo geófono triaxial realizando las

mediciones en profundidad y tomando las consideraciones necesarias en el cálculo de la velocidad de onda de corte.

En este ensayo se generan ondas sísmicas en la superficie, mediante golpes verticales y horizontales en una placa ubicada a una distancia de 1 a 3 metros aproximadamente del pozo, registrándose los tiempos de llegada de las ondas de compresión (ondas P) y corte (ondas S). El objetivo del ensayo es tomar medidas de los tiempos de viaje de las ondas sísmicas internas generadas a partir de la energía de la fuente emisora.

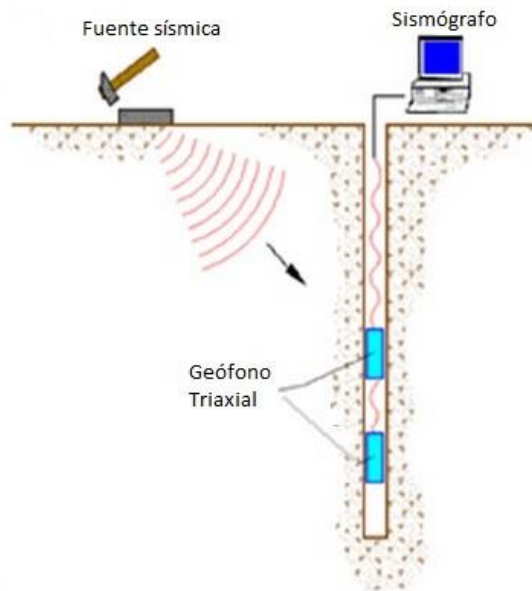


Figura 2-2: Esquema de ensayo *downhole* (Modificado Geodatos)

Las ondas P y S son registradas por el o los geófonos situados en la parte inferior de la sonda, midiéndose éstas cada 1 o 2 metros (distancia nominal comúnmente empleada) hasta alcanzar la profundidad del pozo estudiado.

En la interpretación de datos, la norma ASTM D7400 – 08 propone que la identificación de la llegada de la onda P como la primera desviación horizontal luego del tiempo $t=0$. La onda S se puede identificar de acuerdo a dos características:

- Un incremento abrupto en la amplitud
- Un abrupto cambio en la frecuencia coincidente con el cambio de amplitud.

Gráficamente esto se presenta en Figura 2-3.

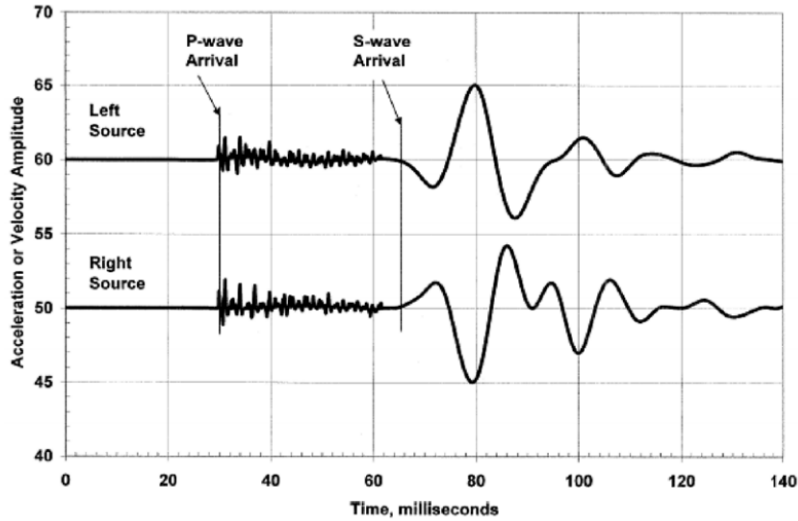


Figura 2-3: Determinación del tiempo de llegada de la onda P y S (ASTM D7400 – 08)

Conociendo la geometría fuente-geófonos del dispositivo y los tiempos de llegada de las ondas sísmicas es posible calcular las velocidades de propagación a distintos niveles de profundidad a lo largo del pozo, tal como se presenta en la Figura 2-4, obteniendo la gráfica de V_S y V_P en profundidad.

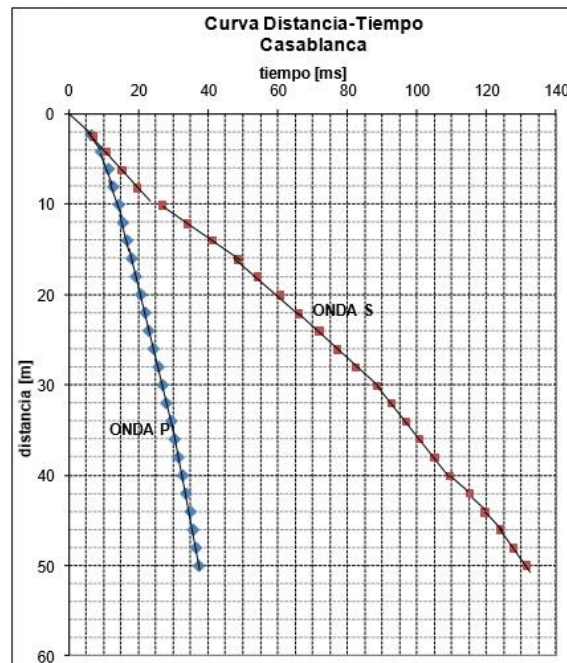


Figura 2-4: Resultado ensayo *downhole*, onda S y onda P (Anexo B, Informe Red Sismológica, Idiem)

Basados en la velocidad de propagación de las ondas de compresión (ondas P) y de corte (ondas S); y la densidad de los materiales este ensayo permite estimar los módulos dinámicos de deformación del terreno, tales como, Razón de Poisson, Módulo de Corte, Módulo de Young, Modulo Volumétrico Dinámico, entre otros.

Entre las principales aplicaciones destaca:

- Es uno de los métodos geofísicos activos actualmente recomendado para la obtención de la velocidad de propagación de las ondas de corte y con ello la clasificación de suelos según el DS61 of. 2011.
- Reconocer los contactos entre las distintas unidades litológicas reconocidas hasta la profundidad de investigación.
- Evaluar las características geotécnicas de cada unidad geológica e identificar posibles zonas de falla, de fracturamiento/alteración de rocas.
- Con los módulos que se obtienen, se pueden realizar cálculos del comportamiento sísmico en diversas estructuras u obras civiles, según normativa de diseño vigente.

Sin embargo, este método también tiene limitaciones, entre las cuales podemos encontrar:

- Requiere de una gran precisión en la determinación de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas.
- Para la aplicación del método, la habilitación del pozo debe asegurar la integridad de éste a medida que se ejecuta el ensayo.
- Las lecturas pueden sufrir posibles distorsiones por presencia de fluidos en el sondeo, por lo que se recomendaría algún perfilaje de tipo acústico en el caso de contar con un pozo que presente dicha característica.
- Excesivo o insuficiente impulso al generar la onda, según profundidad en la que es captada por el receptor, puede influir en la calidad de señal/ruido.
- Importancia en que la sonda se desplace centrada a medida que baja o sube por el pozo, pues podría afectar los tiempo de llegada en que son recogidas por el sensor receptor y propiciar una interpretación errónea respecto de la isotropía del medio.
- Cuando el pozo es entubado (para evitar colapso), existe el riesgo que la onda viaje a través del relleno del espacio anular del pozo. Por lo tanto el relleno debe ejecutarse con un grout (lechada de cemento) de densidad similar a la del suelo.

Para que el resultado de un ensayo *downhole* sea confiable es necesario cumplir con dos condiciones: 1) mediciones precisas del tiempo de viaje de la onda elástica, y 2) la utilización correcta de la reducción de datos considerando la trayectoria de la onda (Kim et al, 2004).

En los ensayos del tipo *downhole*, la onda generada en la superficie viaja a través de un medio estratificado y la trayectoria de la onda podría ser refractada de acuerdo a la diferencia de rigidices de las distintas capas. Entonces, la reducción de datos se debe considerar en materiales en donde ocurra un abrupto cambio en la densidad o en la elasticidad, donde la trayectoria de la

onda puede no ser una línea recta. En estos casos, se debe utilizar la Ley de Snell de refracción. Ensayos realizados a profundidades mayores a 20m no están fuertemente influenciados por la Ley de Snell. Para sitios en donde el material superior va a ser removido, no es necesario utilizar la Ley de Snell en el cálculo del perfil de velocidad de onda de corte (ASTM D7400 – 08).

Considerando lo anterior, se han realizado investigaciones en que la reducción de datos ha sido mejorada considerando la ley de Snell o modificando el método de Intervalo. A continuación se describen los métodos comunes utilizados y uno que incorpora la Ley de Snell, para luego entregar la data de los ensayos realizados de acuerdo a estos métodos.

2.4.1.1.1 Método Directo

El método directo es el más simple de utilizar y fue el utilizado por Idiem en el desarrollo del estudio de mecánica de suelo para la red sísmológica, encargado por la ONEMI.

La data obtenida del ensayo donwhole corresponde al tiempo de la primera llegada de la onda elástica desde la fuente hacia el receptor para cada ubicación de éste. El tiempo de viaje medido (t) en el camino inclinado puede ser corregido al tiempo de viaje, t_c , en la trayectoria vertical utilizando la siguiente ecuación y de acuerdo a la Figura 2-5.

$$t_c = D \frac{t}{R} \quad 2-1$$

Donde,

t_c : tiempo de viaje corregido

D : profundidad del ensayo desde la superficie de terreno

t : tiempo de la primera llegada

R : distancia entre la fuente y el receptor

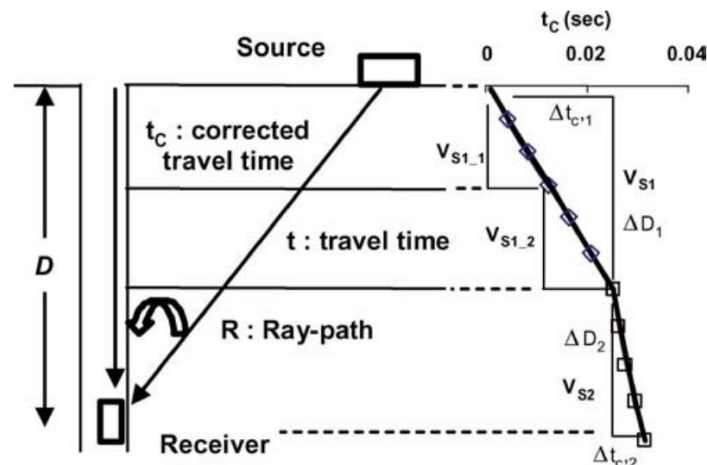


Figura 2-5: Esquema del método directo (Kim et al, 2004)

Al graficar el tiempo de viaje corregido frente a la profundidad, la velocidad de cada capa puede ser obtenida a partir de la pendiente de la curva de ajuste utilizando los datos que tengan una

tendencia similar de acuerdo a la ecuación 5-1. La pendiente del ajuste de curva representa la velocidad de onda en cada rango. Como se muestra en la Figura 2-5, el tiempo de viaje corregido puede ser ajustado por medio de dos líneas rectas, y los perfiles de velocidad del sitio pueden ser identificados como dos capas promedio. Para un perfil de velocidad de onda más detallado, se pueden realizar subdivisiones de ΔD , pero se debe considerar un aumento potencial en las estimaciones de los tiempos de llegada en la interpretación de datos.

$$V_d = \frac{\Delta D}{\Delta t_c} \quad 2-2$$

Donde,

ΔD : profundidad del intervalo con similar pendiente

Δt_c : diferencia de tiempo de viaje corregido según ΔD

2.4.1.1.2 Método de Intervalo e Intervalo Modificado

El método de Intervalo considera el intervalo de tiempo de viaje de la onda entre dos receptores instalados a diferentes profundidades. La velocidad de onda de una capa de suelo entre dos posiciones de receptores se obtiene utilizando la siguiente ecuación en relación con la Figura 2-6.

$$V = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad 2-3$$

Donde,

R_1, R_2 : distancia entre la fuente y el receptor superior e inferior respectivamente

t_1, t_2 : tiempos de viaje al receptor superior e inferior respectivamente

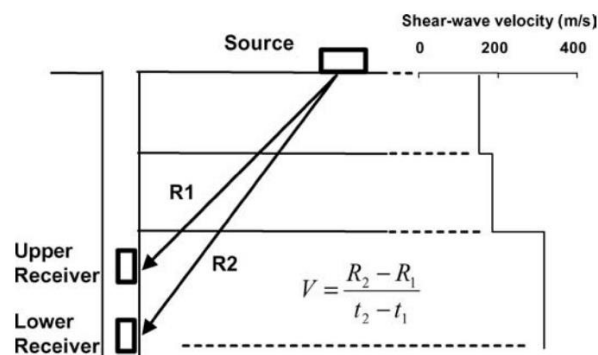


Figura 2-6: Esquema del método de Intervalo (Kim et al, 2004)

El método de Intervalo es simple en el ensayo, muestreo e interpretación de los datos, sin embargo este método no considera la velocidad de onda de las capas superiores a lo largo de la trayectoria de la onda, y la velocidad de onda no puede ser determinada en el caso en que $t_2 - t_1$ sea negativo, es decir, cuando el tiempo de viaje hacia el receptor inferior es más rápido que hacia el superior, como en el caso en que se tiene un suelo muy blando sobre uno rígido.

En el método de Intervalo Modificado, el procedimiento de muestro y los datos son los mismos del método de Intervalo. En el método de Intervalo Modificado se considera que el suelo está compuesto por una serie de capas horizontales de espesor similar al intervalo del ensayo y la onda de corte se propaga a su propia velocidad en cada capa, tal como se muestra en la Figura 2-7.

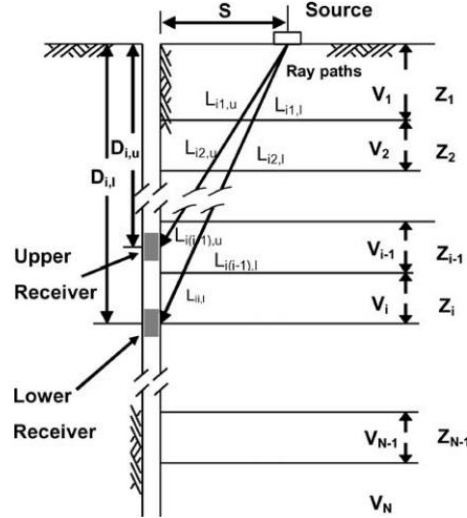


Figura 2-7: Esquema método de Intervalo Modificado (Kim, et al, 2004)

Los tiempos de viaje de las ondas que pasan a través de cada capa desde la fuente hacia el receptor superior e inferior puede ser representado según la ecuación 5-4 y 5-5. Utilizando las velocidades de onda de las capas superiores y el tiempo de viaje de un intervalo entre dos receptores, el tiempo de viaje en el sensor inferior se obtiene con la ecuación 5-6. La longitud de viaje de la onda elástica en cada capa se determina con la ecuación 5-7 también. De acuerdo a lo anterior, la velocidad de onda de cada capa se obtiene con la ecuación 5-8.

$$T_{i,u} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_{ij,u}}{V_j} = \frac{L_{i1,u}}{V_1} + \frac{L_{i2,u}}{V_2} + \dots + \frac{L_{i(i-1),u}}{V_{i-1}} \quad 2-4$$

$$T_{i,l} = \sum_{j=1}^i \frac{L_{ij,l}}{V_j} = \frac{L_{i1,l}}{V_1} + \frac{L_{i2,l}}{V_2} + \dots + \frac{L_{ii,l}}{V_i} \quad 2-5$$

$$T_{i,l} = DT_i + T_{i,u} \quad 2-6$$

$$L_{ij,l} = \frac{R_{i,l}}{D_{i,l}} \times Z_j \quad 2-7$$

$$V_i = \frac{L_{ii,l}}{T_{i,l} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_{ij,l}}{V_j}} \quad 2-8$$

Donde;

V_i : velocidad de onda de la capa i

$D_{i,j}$: i -ésima profundidad del receptor inferior

DT_j : demora de tiempo entre el receptor superior y el inferior

$T_{i,u}$: tiempo de viaje del i -ésimo ensayo en el receptor superior

$L_{ij,j}$: largo de la trayectoria en la capa j del i -ésimo ensayo en el receptor inferior

Z_j : espesor de la capa j

Este método mejora el esquema de reducción de datos en comparación con el método de Intervalo, ya que considera la velocidad de onda de las capas a lo largo de la trayectoria, pero considera ésta como una trayectoria recta de la onda lo cual es una limitación del método.

2.4.1.1.3 Método Rayo-Trayectoria según Ley de Snell

Este método es similar el método de Intervalo Modificado, sin embargo éste asume que la onda se propaga a lo largo de la trayectoria refractada basada en la Ley de Snell, como se muestra en la Figura 2-8 y se deben satisfacer las siguientes relaciones.

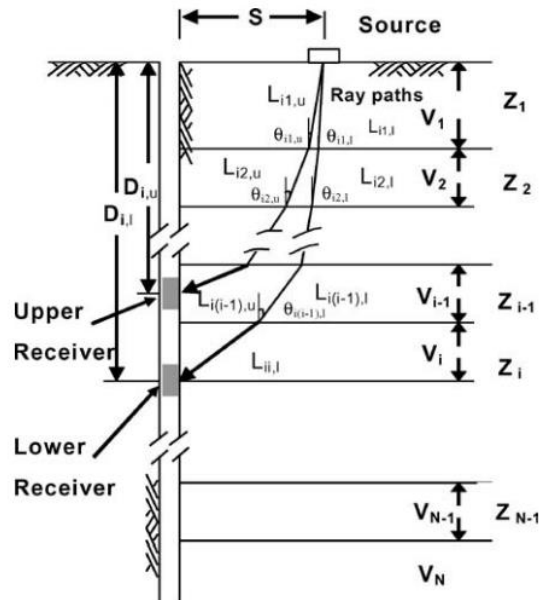


Figura 2-8: Esquema método de Trayectoria según Ley de Snell (Kim et al, 2004)

$$\frac{\sin \theta_{i1}}{V_1} = \frac{\sin \theta_{i2}}{V_2} = \dots = \frac{\sin \theta_{ij}}{V_j} = \dots = \frac{\sin \theta_{ii}}{V_i} \quad 2-9$$

$$Z_1 \tan \theta_{i1} + \dots + Z_j \tan \theta_{ij} + \dots + Z_i \tan \theta_{ii} = S \quad 2-10$$

Donde,

θ_j : ángulo incidente de la capa j hacia la próxima capa i

S : distancia de la fuente al sondaje

Z_j : espesor de la capa j

La velocidad de onda de la primera capa puede ser determinada de la misma manera que en el método de intervalo, ya que la rigidez se asume constante y la trayectoria de la onda es recta. Pero en la evaluación de la velocidad de onda del segundo estrato, la trayectoria refractada debe ser considerada. Para determinar esa trayectoria, se requiere la velocidad de la capa superior ya determinada y asumir una velocidad de onda en la capa evaluada. Los tiempos de viaje de las ondas sísmicas entre la fuente y el receptor medidas a cada profundidad de ensayo son las mismas que en el método de Intervalo Modificado. Utilizando las ecuaciones 5-9 y 5-10 la trayectoria es calculada y la velocidad de onda es calculada con la ecuación 5-8 considerando la nueva trayectoria. El proceso de evaluación de datos es similar al del método de Intervalo Modificado, pero la longitud de cada capa se determina considerando la trayectoria de la onda refractada y la ecuación 5-11 es aplicada en lugar de la ecuación 5-7.

$$L_{ij} = Z_j / \cos \theta_j \quad 2-11$$

El proceso de iteración continúa hasta que la velocidad asumida coincide con la calculada dentro del límite permitido, que es 0,01% de diferencia entre dos velocidades. Una vez que se determina la velocidad relativa de la capa, el procedimiento se continúa a la siguiente capa. Se recomienda que el valor de velocidad inicial sea el determinado por el método de Intervalo Modificado para una mejor convergencia en el proceso iterativo. Este método sería el método de interpretación más avanzado para la reducción de datos de ensayos *downhole*, ya que considera la trayectoria refractada determinada por las velocidades de las capas superiores a lo largo del trayecto.

2.4.1.2 Ensayo Crosshole

Este ensayo sísmico utiliza dos o más sondeos para medir la velocidad de las ondas sísmicas. El dispositivo consiste en dos sondajes, el primero con la fuente emisora de energía y el segundo con el receptor situados a la misma profundidad. De esta manera se miden la velocidad de propagación de las ondas a través del material situado entre ambos sondajes. Repitiendo el ensayo a distintas profundidades se obtiene un perfil de velocidades versus la profundidad.

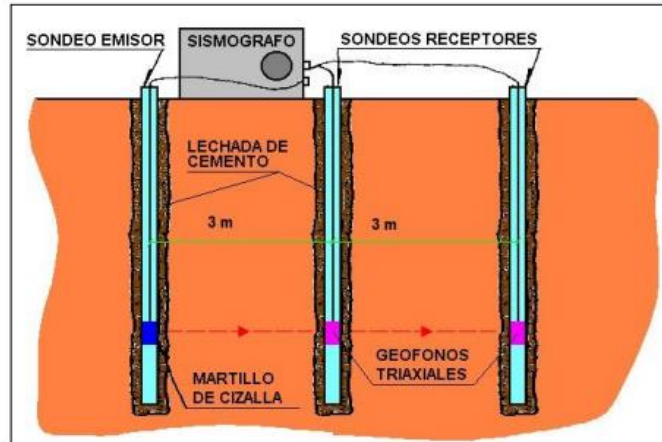


Figura 2-9: Esquema de ensayo Crosshole (AIG Instrumentos Venezuela)

Se recomienda utilizar por lo menos dos o tres sondajes para minimizar los errores provenientes de las medidas del tiempo de disparo, los efectos del material superficial e intersondajes y la anisotropía. Las velocidades de onda se calculan a partir de la diferencia en los tiempos de llegada en el par de pozos. Los tiempos de llegada se determinan visualmente usando puntos de fase común (primera llegada, primer peak, etc), o por medio de técnicas de correlaciones cruzadas usadas habitualmente en exploración petrolera.

En función del tipo de fuente emisora utilizada en la generación de las ondas sísmicas, el contenido en ondas P y S es diferente. Por ejemplo para explosivos el contenido en ondas P es mayor particularmente cuando se utilizan grandes cantidades y se detona cerca de la superficie del suelo.

Las fuentes de tipo mecánico son ensayos de penetración tipo SPT, impactos verticales y cargas torsionales en la base del sondaje. Los impactos verticales también tienen un contenido elevado en ondas P, por ello se recomienda utilizar impactos horizontales en la superficie del suelo que generan mayor contenido en ondas S (Aponte J., 2011).

Las ventajas de este método son las siguientes:

- Permite obtener perfiles de velocidades a profundidades de 30 a 60 m utilizando fuentes emisoras mecánicas. Con fuentes emisoras tipo explosivo puede alcanzar profundidades mayores.
- Detecta capas débiles con mayor facilidad que otros métodos como por ejemplo la sísmica de refracción.

2.4.2 Ensayos no invasivos

Un ensayo no invasivo no considera la extracción de muestra ni la necesidad de realizar uno o más sondajes de perforación, es decir, permite realizar el muestreo o ensayo sin tener que perturbar el terreno.

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentran los de refracción y reflexión sísmica. En estos métodos se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen una serie de sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como línea de refracción sísmica. A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, con la ayuda de un martillo o la detonación de explosivos, los cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores del arreglo.

Existen otros métodos que utilizan las ondas superficiales del tipo Rayleigh, como el SSRM (Steady State Rayleigh Method), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), los cuales también cuentan con un arreglo de sensores en superficie y una fuente de excitación ubicada a una distancia conocida. La diferencia con la refracción y reflexión de onda es justamente el tipo de onda utilizado en su análisis.

A continuación se describe cada método y se hace revisión de los fundamentos de los métodos que utilizan ondas Rayleigh.

2.4.2.1 Caracterización mediante ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh en un semiespacio homogéneo, isotrópico y elástico no son dispersivas, lo que quiere decir que su velocidad es una función de las propiedades mecánicas del medio, pero no de la frecuencia. En medios estratificados sí se tiene el fenómeno de la dispersión geométrica, por lo que la velocidad de onda es función de la frecuencia, tal como se presenta en la Figura 2-10.

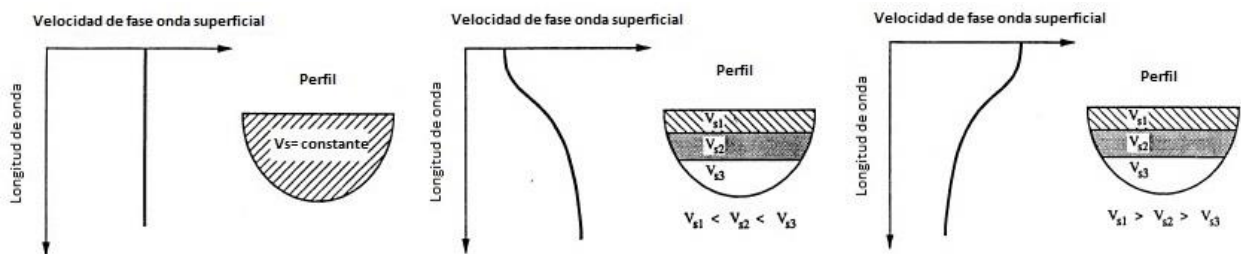


Figura 2-10: Ejemplos de la dispersión en medios estratificados (Modificado Rix 1988, Foti 2000)

Este fenómeno se puede explicar teniendo en cuenta un medio compuesto por una serie de capas homogéneas, isotrópicas, lineales y elásticas, considerando el grado de deformación del suelo causado por una perturbación de una determinada longitud de onda que viaja por la superficie. Tal como se presenta en la Figura 2-11, en el caso *b* se tiene una perturbación representada por una longitud de onda corta, mientras que el caso *c* corresponde a una perturbación representada por una longitud de onda larga. Este sistema se caracteriza entonces por una curva de dispersión, que viene a ser una relación entre la frecuencia y la velocidad de fase de la onda de superficie, la que permitirá mediante su inversión, el perfil de velocidad de onda de corte en la profundidad.

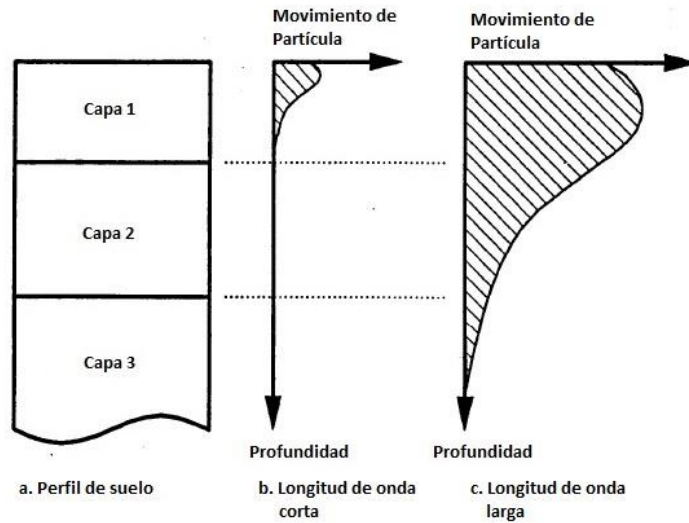


Figura 2-11: Representación de la dispersión de las ondas Rayleigh dependiendo de la longitud de onda (Modificado Rix 1988, Foti 2000)

2.4.2.1.1 Obtención de la Curva de Dispersión

Este es el primer paso del tratamiento de datos en la mayoría de los métodos que utilizan ondas superficiales. El objetivo es estimar una o más curvas de dispersión, que son a su vez necesarios para el siguiente paso en el proceso de inversión, el cual será definido posteriormente y que permite obtener un perfil de V_s . Tradicionalmente, se ha utilizado el modo fundamental del suelo (M_0) en la determinación de la curva de dispersión. Las curvas de los modos más altos se utilizan de manera ocasional.

Entre los años 1950 y 60, en la etapa temprana del uso de ondas superficiales para la medición de velocidad de onda de corte de un estrato de suelo, se utilizaba un vibrador monótono como fuente, que excitaba el suelo en una sola frecuencia a la vez (f), la distancia entre dos amplitudes máximas consecutivas (L_f) fue medida mediante la exploración de la superficie del terreno mediante un sensor. Así, la velocidad de onda de fase, (C_f), se calculó como $C_f=L_f*f$. Esta medición fue repetida para diferentes frecuencias para poder construir la curva de dispersión. De manera subyacente a este enfoque, se consideró el dominio del modo fundamental M_0 en las ondas superficiales en el campo.

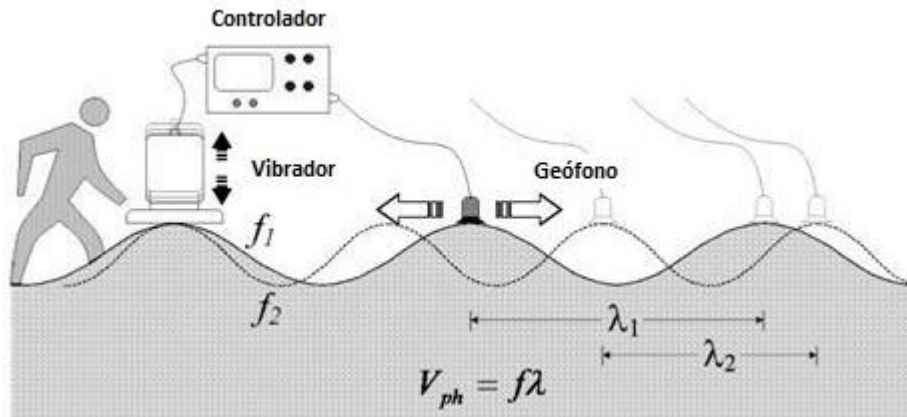


Figura 2-12: Esquema de mediciones de ondas superficiales (Modificado de Park Seismic)

Este enfoque fue ampliado en el transcurso del tiempo, desarrollándose el análisis espectral de ondas superficiales (SASW) que resulta ser más eficiente. En lugar de tratar de medir la distancia L_f , se trata de medir la diferencia de fase (d_p) para una frecuencia (f) entre dos receptores separados a una distancia conocida, de acuerdo a la expresión $C_f = 2 * \pi * f / d_p$.

Así, esta metodología se repite para diferentes frecuencias para construir una curva de dispersión, como la que se muestra en la Figura 2-13 donde cada color del gráfico es una curva de dispersión asociada a un ensayo distinto.

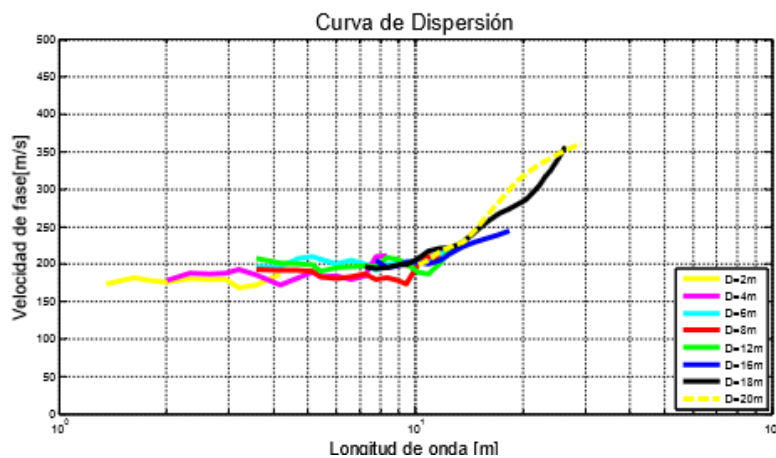


Figura 2-13: Curva de dispersión (Peredo V., 2011)

El concepto de curva de dispersión aparente fue introducido en los años 90, para tomar en cuenta la posibilidad de una influencia multi-modal en el proceso de inversión, ya que a comienzos del método se asumía el modo fundamental como predominante. En la Figura 2-14 se puede ver un ejemplo de una curva de dispersión construida considerando los modos posteriores al modo fundamental (M_0).

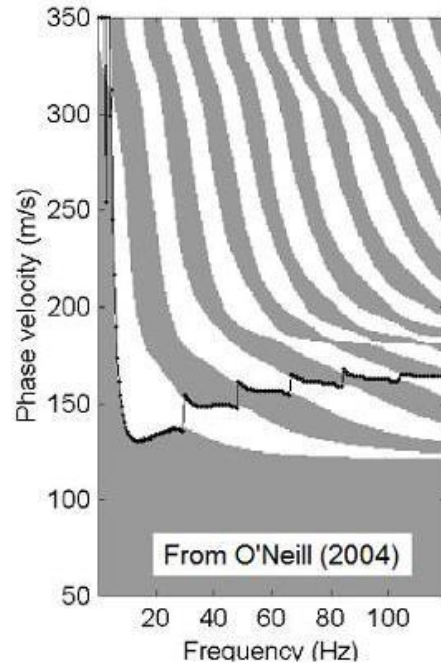


Figura 2-14: Curva de dispersión con influencia multi-modal (O'Neil, 2004)

Por otro lado, el enfoque multicanal no intenta calcular la velocidad de fase de manera individual, pero construye un espacio imaginario donde la tendencia de dispersión son identificadas a partir del patrón de acumulación de energía en este espacio. Entonces, las curvas de dispersión necesarias se extraen siguiendo las tendencias de la imagen. En el proceso, un registro multicanal en el dominio del tiempo (t) - espacio (x) es transformado al dominio de frecuencia (f) - número de onda (k_x) o frecuencia (f) - velocidad de fase (C_p). El método f - k es conocido como el tradicional, mientras que la transformación π - ω (McMechan and Yedlin, 1981) y el método cambio de fase (Phase-shift method) (Parker et al., 1998) son métodos que utilizan la última transformación mencionada. Es conocido que el método f - k resulta en imágenes de baja resolución, en cambio el método de cambio de fase logra una mayor resolución, más que el método π - ω tal como se muestra en la Figura 2-15 (Park et al., 1998, Moro et al., 2003).

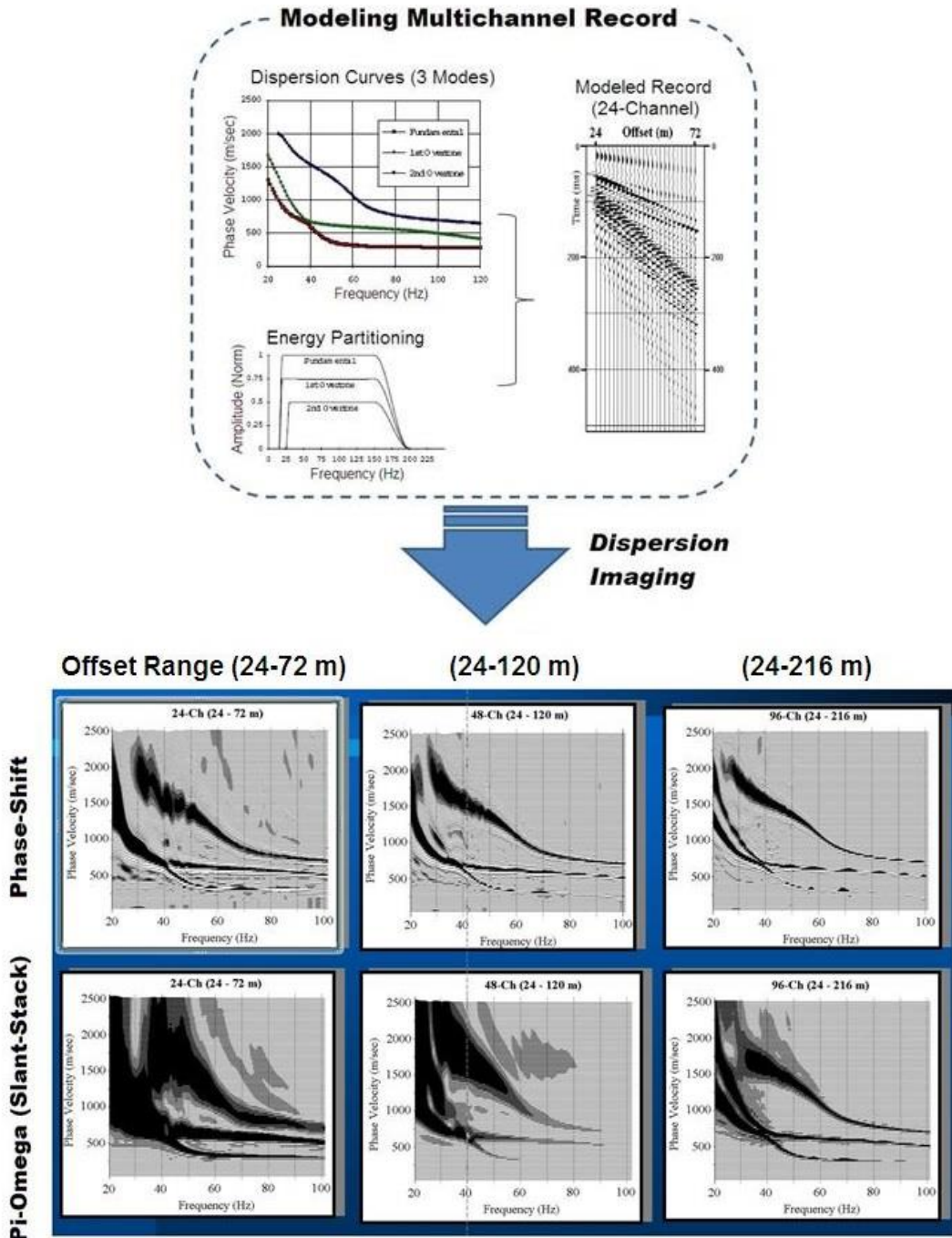


Figura 2-15: Comparación de resolución en la curva de dispersión (Park et al, 1998)

La transformada $f - k$ es ampliamente utilizada en los programas computacionales disponibles para el análisis de ensayos superficiales, como el software Geopsy utilizado en este Trabajo de Título. En este análisis, para la obtención de la curva de dispersión experimental, el movimiento del terreno asociado a la propagación de las ondas Rayleigh puede ser evaluado utilizando la superposición modal (Aki y Richards, 1980), de acuerdo a la siguiente relación:

$$s(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m S(\omega, x) \cdot e^{i(\omega t - k_m(\omega)x)} d\omega \quad 2-12$$

Donde ω corresponde a la frecuencia, m es el número de modo y S

$$S_m(\omega) = I(\omega) \cdot P_m(\omega) \cdot R_m(\omega) \cdot \frac{e^{-\alpha_m(\omega)x}}{\sqrt{x}} \quad 2-13$$

es una combinación de la respuesta del instrumento $I(\omega)$, del espectro de la fuente $P_m(\omega)$ y del camino de respuesta $R_m(\omega)$ con la geometría (representado por el factor $\frac{1}{\sqrt{x}}$) y la atenuación del material $e^{-\alpha_m}$.

El número de onda modal k_m es inversamente proporcional a la velocidad de fase V_{R_m} .

$$k_m(\omega) = \frac{\omega}{V_{R_m}(\omega)} \quad 2-14$$

Y considerando el espaciado entre geófonos igual a Δx , el desplazamiento de fase entre dos geófonos puede escribirse como $k_m(\omega) \cdot \Delta x$.

Aplicando la transformada discreta slant-stack y luego una transformada discreta de Fourier, el espectro f – k puede escribirse como:

$$F(\omega, k) = \sum_m S_m(\omega) \cdot \left[\sum_{n=1}^N e^{-\alpha_m(\omega) \cdot x_n} \cdot e^{i(k - k_m(\omega)) \cdot x_n} \right] \quad 2-15$$

Una vez que los números de onda modal han sido estimados para cada frecuencia, se pueden utilizar para la evaluación de la curva de dispersión a través de la ecuación 2-3.

2.4.2.1.2 Método de Inversión

En general, la inversión corresponde a un proceso de búsqueda de la causa de un resultado. Un concepto opuesto sería la predicción del resultado de la causa dada y esto a menudo se hace referencia como modelación (análisis directo o forward modeling). Un proceso de inversión implica generalmente uno o más de los pasos de análisis directo con el objetivo de examinar los posibles candidatos de causas. Una inversión se llama "única" si existe una solución única, mientras que "no única" si pueden existir varias soluciones. Se llama "lineal", si la relación de causa-resultado con un pequeño cambio en la causa da también un pequeño cambio en consecuencia, mientras que "no lineal" si un pequeño cambio puede dar lugar a un gran cambio en el resultado. (Ver Figura 2-16)



Figura 2-16: Esquema explicativo “problema inverso” (Modificado de Park Seismic)

Históricamente, la inversión de las ondas de superficie ha supuesto una estimación de las propiedades de la tierra a partir de los datos medidos superficialmente. Son las propiedades elásticas las que se estiman entre otras (propiedades eléctricas o magnéticas). Independientemente del tipo de datos utilizados, registros de campo en bruto, imagen de dispersión, curva de dispersión, el problema de la inversión no puede resolverse directamente, por lo que requiere de una técnica de optimización para encontrar la solución dentro de un grupo de candidatos. Esta técnica puede ser un enfoque determinista, al azar, o una combinación de ambos.

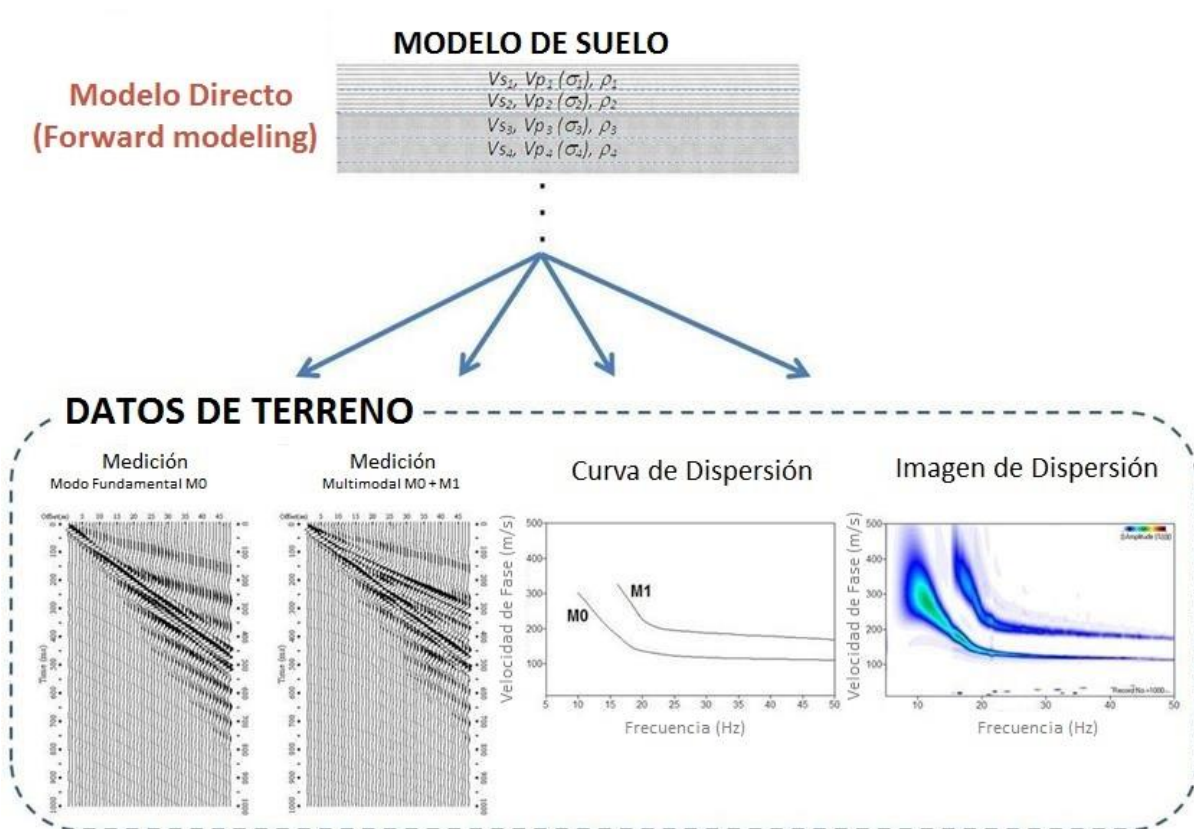


Figura 2-17: Esquema “forward modelling” (Modificado de Park Seismic)

Las propiedades elásticas están representadas por varios parámetros independientes, llamados módulos elásticos, como el módulo de Young o de deformación, módulo de corte, volumétrico, etc. Sin embargo, en la práctica actual, es necesario disponer de una medición sencilla y rápida de

propiedades físicas como la velocidad de onda P y S y la densidad. Entre estas propiedades, es la velocidad de onda de corte, V_s , la cual se estima del proceso de inversión de los datos adquiridos de ondas superficiales. Esto es debido a que el tipo de datos usados en la inversión corresponde al modo fundamental (M_0), cuya forma es determinada principalmente por la estructura de V_s en el terreno. Una expresión más exacta es la que ha asumido que el modo fundamental predomina en los datos recogidos en terreno.

El software Geospy utiliza un algoritmo de inversión llamado “neighborhood algorithm” el cual es un procedimiento numérico de dos etapas para problemas inversos geofísicos no lineales.

La primera, la etapa de búsqueda, se compone de un método de búsqueda directa en un espacio de parámetros multidimensional. El objetivo es encontrar puntos (modelos) con valores de una función objetivo, proporcionada por el usuario, aceptables (altos o bajos). Se trata de un algoritmo de búsqueda directa (sin derivadas), utilizando para el muestreo un espacio de parámetros en donde sólo el rango de parámetros de entrada con respecto a la función objetivo son utilizados para realizar la búsqueda.

La segunda etapa, la evaluación, consiste en un algoritmo para el uso de todo el conjunto de los modelos producidos en la etapa I, y derivar información de ellos en forma de medidas bayesianas de resolución, covarianza, etc.

2.4.2.1.3 Inversión de la Imagen de Dispersión

En este tipo de inversión se utilizan los espectros de velocidad de fase que corresponde a los datos que forman una imagen de dispersión en vez de curvas de dispersión (Ryden y Park, 2006; Forbriger, 2003a, 2003b). Este enfoque elimina los inconvenientes de la inversión de la curva modal, como es la identificación errónea y la mezcla de modos como se presenta en la Figura 2-18 donde se tiene el resultado de ensayos pasivos y activos.

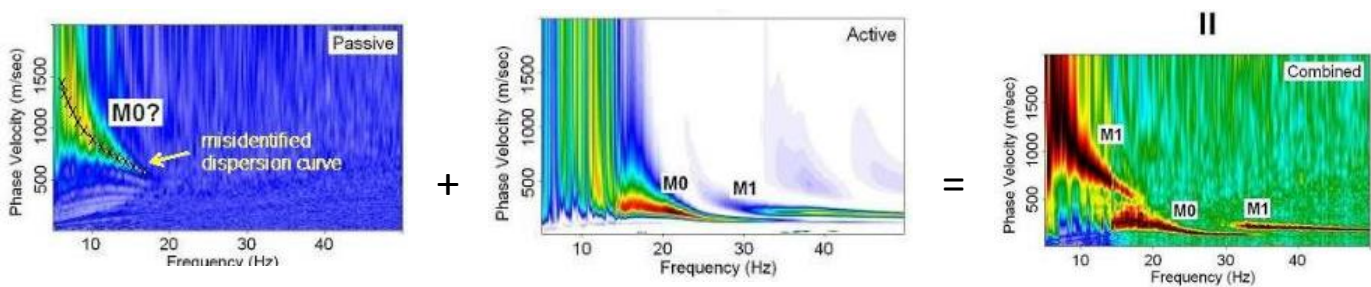


Figura 2-18: Ejemplo de combinación errónea de modos (Modificado de Park Seismic)

Según la figura anterior, el primer cuadro corresponde a un ensayo pasivo, en donde solo se registra frecuencias bajas lo que no permite distinguir si corresponde o no al modo fundamental. El cuadro central corresponde a un ensayo activo, donde se logra registrar mayores frecuencias y se distingue el modo fundamental y el siguiente. El tercer cuadro a la izquierda, corresponde a la combinación de ambos ensayos, en donde se vuelven a distinguir el M_0 y el M_1 .

La identificación errónea corresponde a la determinación incorrecta del modo para la curva de dispersión extraída. Por ejemplo, un modo más alto puede ser fácilmente extraído como la curva M_0 si la adquisición de datos y procesamiento posterior no se realiza adecuadamente. Por otro

lado, una curva que originalmente se identifica como el primer modo superior (M_1) puede ser en realidad el segundo (M_2) o tercero (M_3), etc. Una curva de dispersión con la identificación modal incorrecta puede resultar en un perfil V_s significativamente incorrecto debido a la falta de compatibilidad en el proceso de inversión tratando de coincidir con las curvas de medición y teórica.

El problema de mezcla de modos, es cuando en una curva de dispersión se extrae más de un modo. Por ejemplo, una curva de 10-30 Hz rango puede representar realmente el modo fundamental en las frecuencias más bajas de 10-15 Hz por ejemplo, mientras que el resto sigue la tendencia de un modo superior. Esto ocurre cuando la dominación de energía de las ondas superficiales se desplaza de un modo (por ejemplo, M_0) a otro modo (por ejemplo, M_1) como la frecuencia (por lo tanto, la longitud de onda) cambia a partir de un cierto rango a otro, que se puede predecir a partir del concepto de la excitabilidad modal. Otra causa para la mezcla de modos, es el efecto de amortiguación de las ondas superficiales que cambia con los modos. Por ejemplo, aunque el M_0 puede dominar en el momento de la generación de superficie de onda, el dominio puede quedar desplazado a un modo superior después de que viajar una cierta distancia debido a la diferente atenuación que cada modalidad ha experimentado. Este cambio de energía de un modo a otro en una imagen de dispersión se puede observar ya sea gradual o brusca y, a su vez, puede ser el resultado de un fenómeno físico real, los efectos de procesamiento de datos, o una combinación de ambos.

2.4.2.2 Método SSRM

Este método corresponde al antecesor del SASW y fue propuesto por Jones en la década de los 50 (Jones, 1958). El "Steady State Rayleigh Method" (SSRM) utiliza las ondas superficiales del tipo Rayleigh para determinar el perfil de velocidades en la profundidad del subsuelo. El principal objetivo es determinar la velocidad de fase, que corresponde a la velocidad de propagación de una onda por una frecuencia única.

La configuración del ensayo consiste en dos geófonos y una fuente de excitación vertical que produzca vibraciones de frecuencias conocidas que se propagan a través de la superficie. (Jones 1962, Ballard 1964). Los geófonos se ubican alineados con la fuente y registran el movimiento vertical en sus posiciones. Se determina la mínima distancia, que sería una longitud de onda, entre ambos geófonos a la cual el movimiento de ambos se encuentra en fase con la fuente, es decir, que sus frecuencias de vibración sean las mismas (Richart et al 1970). Una vez que se determina la longitud de onda λ , para una frecuencia f conocida, la velocidad de fase de las ondas Rayleigh (V_R) se calcula de acuerdo a la siguiente relación:

$$V_R = f \cdot \lambda \quad 2-16$$

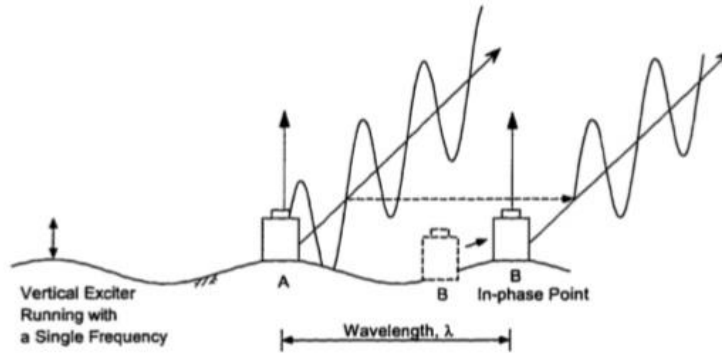
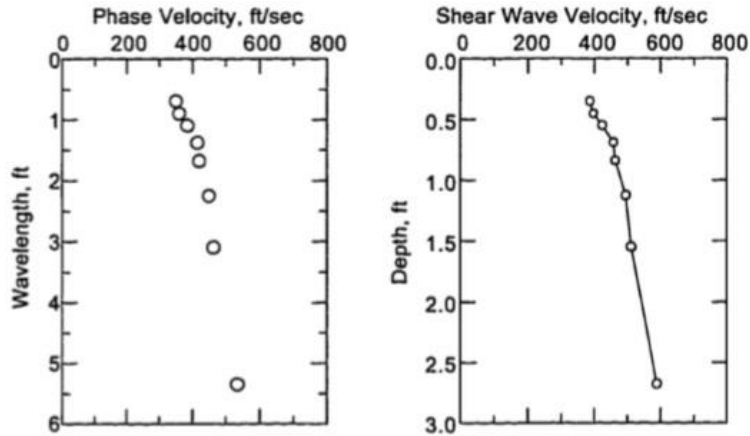


Figura 2-19: Configuración método SSR (Joh S.H., 1996)

Este proceso se repite para diferentes frecuencias generadas por el vibrador, y de esta forma es posible construir la curva de dispersión $v/s \lambda$, la cual se muestra en la Figura 2-20.



(a) Velocidad de fase v/s longitud de onda (b) Velocidad de onda de corte v/s profundidad

Figura 2-20: Determinación de la velocidad de onda de corte mediante Método SRR (Joh s.H., 1996)

Este método considera que la mayor parte de la energía está contenida en la mitad superior de la longitud de onda, por lo que la velocidad de fase para una longitud de onda dada es representativa de las propiedades del material sólo para profundidades iguales a la mitad de la longitud de onda, donde z corresponde a la profundidad.

$$z = \frac{\lambda}{2} \quad 2-17$$

La relación entra la velocidad de onda de corte y la velocidad de fase es:

$$V_S \cong 1,1 \cdot V_R \quad 2-18$$

Donde:

V_S : velocidad de onda de corte
 V_R : velocidad de fase de ondas Rayleigh

Esto quiere decir que la velocidad de ondas de corte es un 10% mayor a la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh. (Peredo V., 2011).

2.4.2.3 Método SASW

El método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) es un método relativamente nuevo para la determinación in situ de perfiles de velocidad de onda de corte. Este ensayo se realiza sobre la superficie del terreno, por lo cual se conoce como un método no invasivo ya que no necesita de un sondaje para la determinación de V_S en profundidad, a diferencia de los métodos conocidos como *downhole* o *crosshole*.

La base de este método es aprovechar la característica dispersiva de las ondas Rayleigh cuando viajan a través de un medio estratificado. La velocidad de las ondas Rayleigh es determinada de acuerdo a las propiedades del material de la superficie a una profundidad de 1 a 2 longitudes de onda. Como se muestra en la Figura 2-21, longitudes de onda mayores penetran más profundamente en el terreno y su velocidad se ve afectada por las propiedades del material a mayor profundidad.

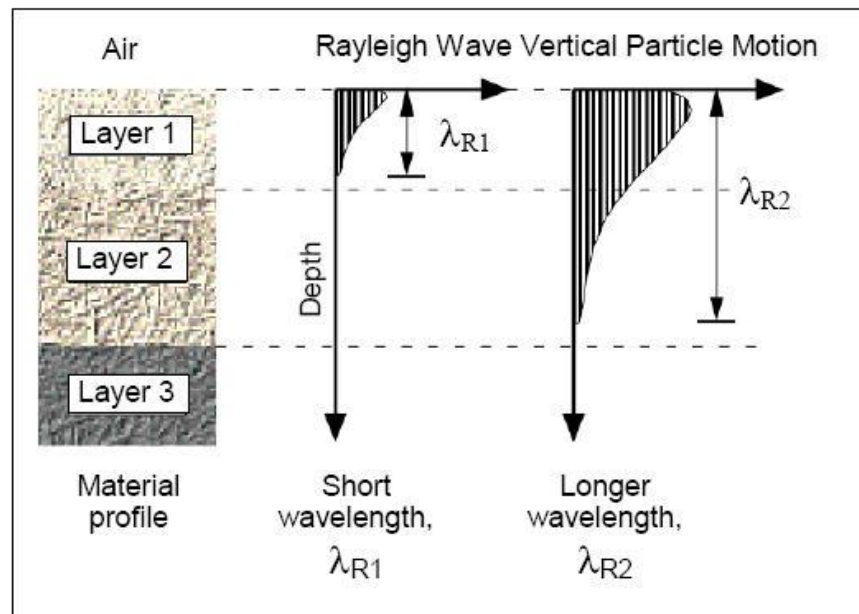


Figura 2-21: Relación longitud de onda con respecto a la profundidad (GeoVision)

Las pruebas de SASW consisten en la medición de la onda dispersiva en superficie en el sitio de interés y la interpretación de ésta para obtener un perfil de velocidad de onda de corte en profundidad.

Se utiliza una fuente dinámica para generar ondas superficiales a diferentes frecuencias o longitudes de onda, las cuales son monitoreadas por dos o más receptores ubicados a ciertas distancias. Los datos de las ondas progresivas y reversas se promedian juntas. Un arreglo más espaciado de los geófonos receptores se utiliza para evitar los efectos de campo cercano asociados con las ondas Rayleigh y la geometría fuente-receptor se optimiza para minimizar la señal de las ondas de cuerpo.

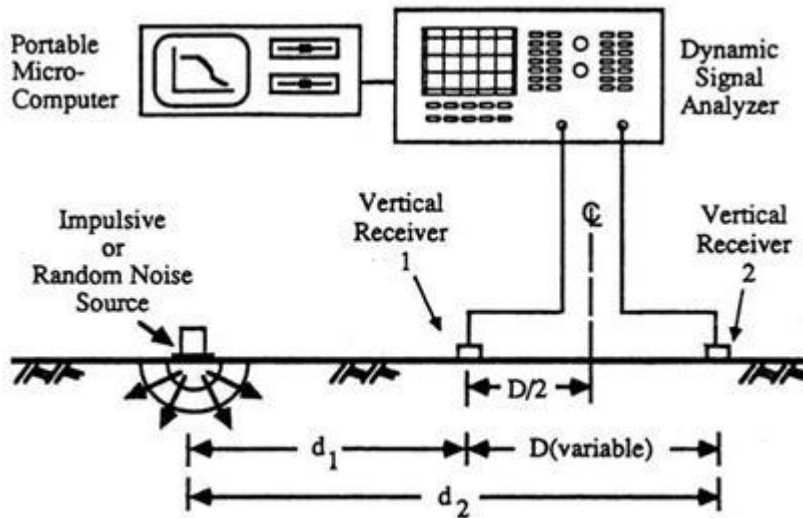


Figura 2-22: Configuración en terreno método SASW (Rix et al., 1991)

En el análisis de datos, toda la información de las fases es chequeada para poder descartar los datos de baja calidad. Hay varias opciones para la interpretación de las curvas de dispersión, dependiendo de la precisión requerida para obtener el perfil de velocidad de onda de corte. Se puede realizar un análisis empírico simple para estimar la velocidad de onda de corte promedio en el perfil. Para mayor precisión, se puede realizar la modelación de la curva de dispersión considerando el modo fundamental del suelo, así como la propagación de ondas de esfuerzo. El método SASW ofrece ventajas significativas en contraste con las mediciones de pozo, las cuales son estimaciones puntuales de la velocidad de onda de corte. SASW es una prueba global, lo que quiere decir que se puede estudiar una zona superficial de mayor volumen. En los sitios que son favorables para la propagación de ondas de superficie, el método SASW permite ahorros considerables de tiempo y costos.

2.4.2.3.1 Procedimiento de terreno para la adquisición de datos

Existen dos configuraciones típicas en la detección de señales en terreno. La primera es a través de la determinación de una línea imaginaria fija, en la cual se instalan dos sensores a una distancia D entre ellos, con el primer sensor colocado a una distancia D de la fuente, siguiendo un eje de simetría imaginario, como se muestra en la siguiente Figura 2-23.

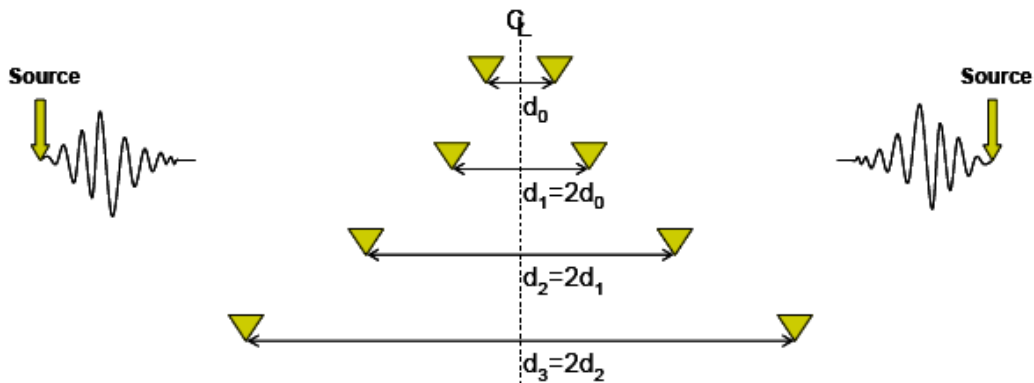


Figura 2-23: Arreglo de eje de simetría método SASW (Ochoa F., 2007)

La segunda configuración se conoce como arreglo de fuente común y consiste en posicionar la fuente de manera fija con respecto al primer sensor y se varía la posición del segundo.

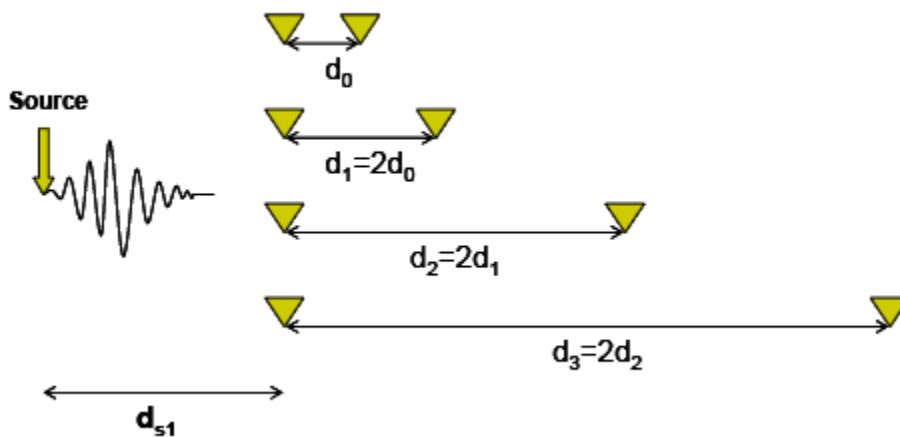


Figura 2-24: Arreglo de fuente común, método SASW (Ochoa F., 2007)

Se realiza una medición directa, ejecutando los golpes con la fuente sísmica a un lado del arreglo de geófonos. Luego se cambia la fuente a una posición simétrica y se ejecuta una nueva serie de perturbaciones, que se conoce como medición inversa. Posterior a ello se promedian los registros de cada sensor para mitigar el ruido.

Una vez registrados los datos para la distancia D , se procede a aumentar la distancia al doble y a realizar la misma cantidad de mediciones recién ejecutadas. Aumentando la distancia y utilizando diferentes fuentes se obtienen curvas de dispersión en un amplio rango de frecuencias, suficientes para realizar la caracterización del terreno bajo el cual se han realizado las mediciones.

2.4.2.3.2 Obtención de curvas de dispersión

Una vez realizadas las mediciones en terreno se debe continuar con la interpretación de los datos, con el objetivo de calcular la curva de dispersión experimental que corresponde a la curva de velocidad de fase en función de la longitud de onda o de la frecuencia, construida a partir de los datos registrados en terreno.

En primer lugar se debe calcular la velocidad de fase, para lo cual se debe conocer el tiempo de viaje de una onda entre ambos geófonos separados a la distancia D conocida.

Una vez calculada la velocidad de fase para cada distancia entre geófonos, que se conoce como curva de dispersión individual, se debe construir la curva de dispersión experimental, que corresponde a una superposición de todas las curvas antes mencionadas.

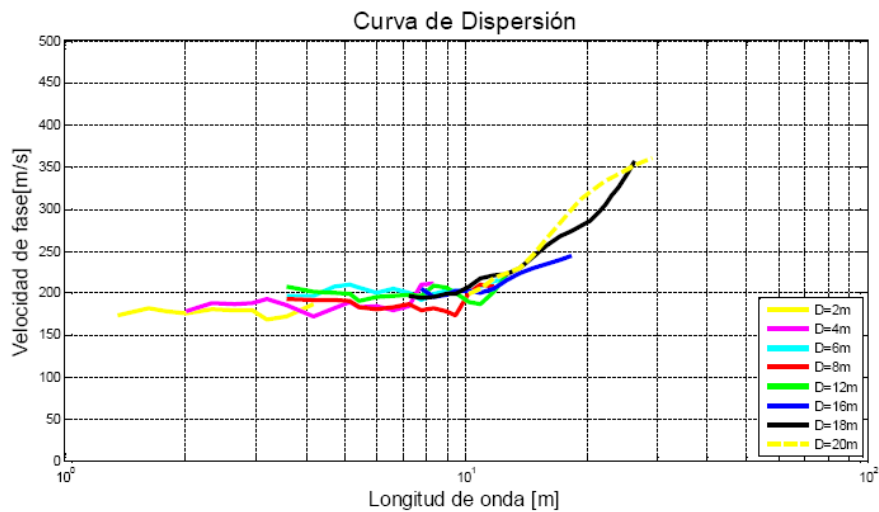


Figura 2-25 Ejemplo de curva de dispersión experimental (Peredo V., 2011)

Una vez que la curva de dispersión experimental está construida, las curvas individuales se deben combinar. A esta combinación se le conoce como curva de dispersión experimental compuesta y de ella se debe calcular una curva experimental promedio, que luego será utilizada en el método inverso.

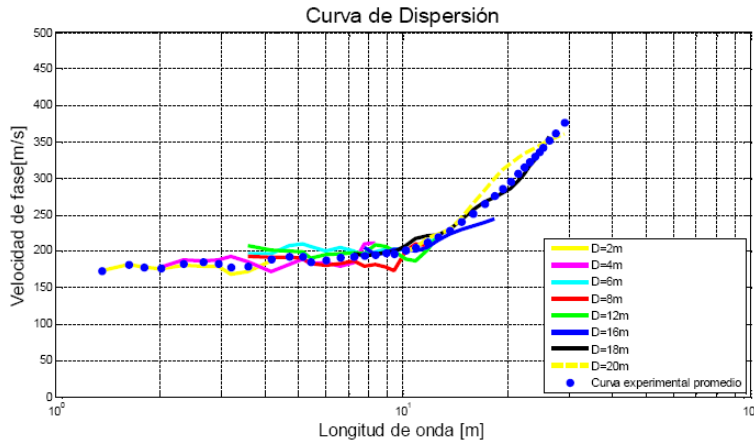


Figura 2-26: Ejemplo de curva de dispersión experimental promedio (Peredo V., 2011)

2.4.2.3.3 Problema Inverso

Este análisis está orientado a identificar parámetros desconocidos de un problema a partir de un modelo físico que reproduzca de buena forma los datos que se obtienen de mediciones experimentales.

Para el análisis de ondas Rayleigh, está dado por la determinación de la curva de dispersión teórica a partir de un modelo físico de propagación de estas ondas en un medio estratificado y la comparación con la curva de dispersión obtenida a partir de los datos en terreno.

El análisis inverso busca minimizar:

$$\text{Error} = \text{Min} (V_{\text{observada}} - V_{\text{teórica}}) \quad 2-19$$

Sin embargo, el método inverso trae consigo dos aspectos críticos:

1. La elección de un modelo consistente para modelar físicamente el suelo, ya que los modelos geotécnicos consideran que el suelo está formado por estratos horizontales planos y que corresponde a un material elástico, lineal y homogéneo. Sin embargo, este punto no es tan significativo en el resultado, ya que el método se encuentra orientado a describir propiedades mecánicas del suelo en profundidad considerando un bosquejo aproximado del subsuelo.
2. La no unicidad de la solución encontrada. El principal problema corresponde para la correcta convergencia de la solución en la optimización es la determinación de una condiciones inicial de iteración, dada por una configuración hipotética de estratos que describa la variación de la rigidez en profundidad, para el posterior proceso de iteración. La condición inicial debe ser bien elegida para la correcta convergencia de la solución.

2.4.2.4 Método MASW

El método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) es uno de los métodos sísmicos de evaluación de la condición elástica del suelo para fines de ingeniería geotécnica. Las mediciones de ondas sísmicas superficiales generadas a partir de diversas fuentes como mazos, analizan la velocidad de propagación de las ondas superficiales y finalmente deduce las variaciones de la velocidad de ondas de corte (V_s) bajo la zona estudiada.

El procedimiento común para muestreos de MASW en 1D, 2D y 3D consta de tres pasos:

1. Adquisición de datos: mediante registros de campo
2. Análisis de dispersión: extracción de curvas de dispersión de cada registro
3. Inversión: cálculo de V_s en profundidad

Para un análisis 2D, se genera un mapa de V_s , el que se construye a través de un esquema de interpolación adecuado mediante la colocación de cada perfil de 1D de V_s en una ubicación superficial correspondiente a la mitad de la línea del receptor.

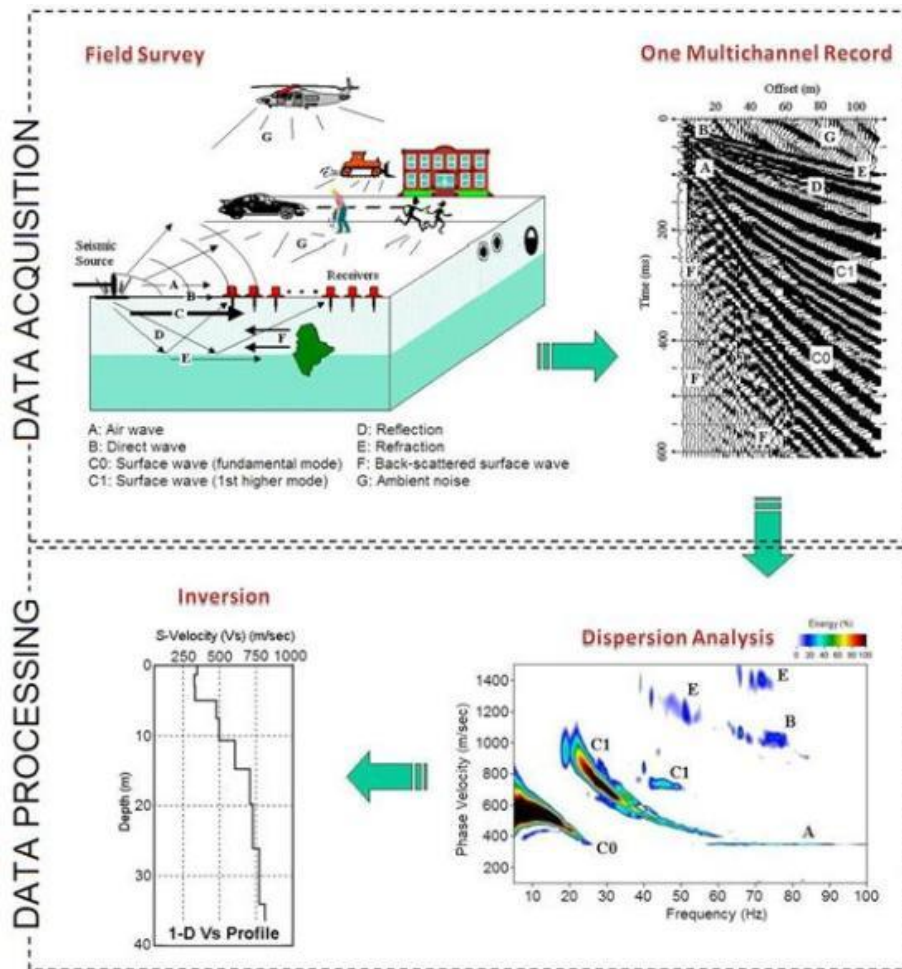


Figura 2-27: Esquema de prospección en terreno (ParkSeismic)

2.4.2.4.1 Procedimiento de terreno para la adquisición de datos

El estudio con fuente activa es el más común utilizado. La profundidad máxima que puede lograrse en la investigación es usualmente entre 10 a 30 m, pero puede variar de acuerdo al sitio y tipo de fuentes activas utilizadas. Las ondas superficiales mejor generadas son en terrenos planos, con una menor variación topográfica dentro de la una línea en la zona de estudio. Sin embargo, cualquier relieve superficial cuya dimensión es mayor que 10% de D (largo del arreglo de geófonos), se convertirá en un significativo obstáculo para la generación de superficie de onda.

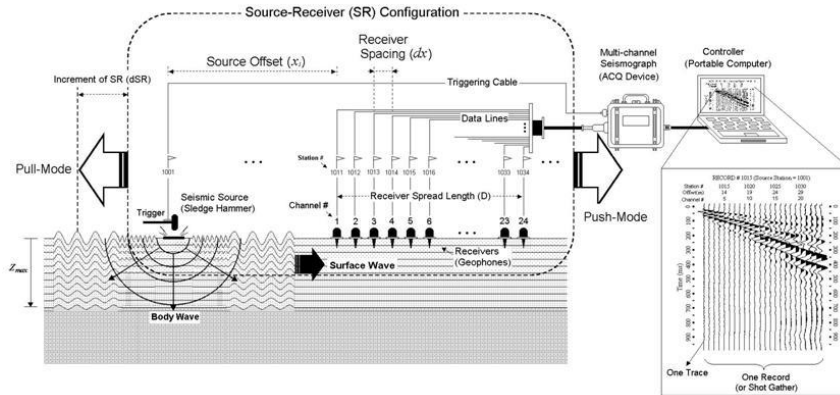


Figura 2-28: Esquema MASW con fuente activa (ParkSeismic)

- Fuente

La profundidad máxima que alcanza el ensayo, Z_{max} , es determinada por la longitud de onda más larga de las ondas superficiales (L_{max}), cumpliendo por lo general con que $Z_{max} \approx 0.5L_{max}$. Con esto se tiene que L_{max} se rige por la potencia de impacto de la fuente sísmica: a mayor impacto, mayor L_{max} y en consecuencia mayor Z_{max} .

Un martillo bastante pesado (por ejemplo, 20 libras) es una buena opción como fuente sísmica, aunque otras fuentes más sofisticadas que pueden entregar más potencia de impacto en tierra (por ejemplo, una caída de peso) puede ser una ventaja sobre un mazo como el anterior, debido a su potencial para generar bajas (más) frecuencias (longitudes de onda) de ondas superficiales. Otra opción es usando una placa de impacto, también llamada placa base, la que ayudará a que el punto de impacto fuente perturbe menos el suelo.

- Receptores

Los geófonos que deben ser utilizados en la implementación de este método deben ser verticales y de bajas frecuencias, como 4,5 Hz. A diferencia de los métodos de reflexión de ondas sísmicas, una disminución en la frecuencia no es tan crítica ni influye de manera considerable en la sensibilidad de los datos adquiridos. Por ejemplo, toma de datos y análisis de ondas superficiales de 450 Hz han sido efectuados usando geófonos de 4,5 Hz (Miller et al., 2000).

- *Geometría de ensayo*

El largo del arreglo de los receptores (D) está directamente relacionado con la longitud de onda más larga (L_{max}) que se pueda analizar, determinando a su vez la profundidad máxima de la investigación (Z_{max}). Por lo general se debe cumplir que D sea igual o mayor que Z_{max} .

$$D = Z_{max} \quad (1 \leq m \leq 3) \quad 2-20$$

Por otro lado, el espaciamiento entre receptores (dx) está relacionada con la longitud de onda más corta (L_{min}) y por lo tanto, determina la profundidad mínima resoluble de la investigación (Z_{min}).

$$Z_{min} = k * dx \quad (0.3 \leq m \leq 1.0) \quad 2-21$$

Sin embargo, en la práctica, L_{max} (y por lo tanto D) está generalmente limitada por la fuente sísmica, siendo éste el factor más significativo que rige en un intervalo de 50 a 100 m. Si se considera un D excesivamente largo, las ondas superficiales generadas por la mayoría de las fuentes activas serán atenuadas por debajo del nivel de ruido en el otro extremo de la serie de receptores. Sin embargo, ondas superficiales de frecuencia bajas y débiles a menudo no aparecen de manera clara en los registros de terreno (sin análisis) debido al alto ruido ambiental que se pueda tener durante el ensayo. Esto puede ayudar en el caso de una zona de baja frecuencia de la curva de dispersión, llevando a un aumento de Z_{max} . En este sentido, el máximo D para proporcionar la máxima Z_{max} suele ser ligeramente más allá de la distancia donde comienza a aparecer ruido en el registro.

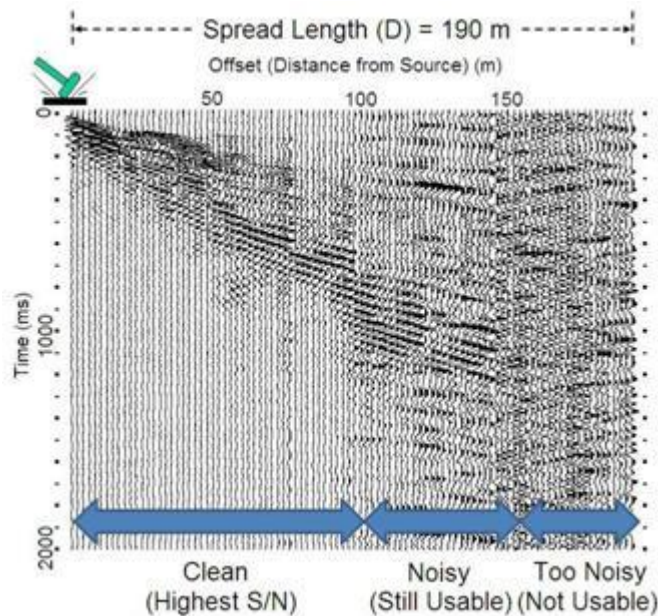


Figura 2-29: Registro de campo que ilustra el rango utilizable de separación de la fuente (ParkSeismic)

La separación de la fuente (x_1) controla el grado de contaminación por los efectos de campo cercano que indican un conjunto de todas las influencias adversas (por ejemplo, no-completamente desarrolladas ondas superficiales) en la adquisición de datos, debido a que la

fente se encuentra demasiado cerca de los receptores. Un valor de alrededor de 20% de D (por ejemplo, $X_1 = 5$ m cuando $D = 25$ m) se sugiere como un mínimo y un 100% como máximo. Un valor x_1 grande (por ejemplo $> 100\%$) y una gran D (por ejemplo, > 100 m), aumenta el riesgo de que predomine los mayores modos y de reducción la razón S/R para el modo fundamental.

2.4.2.4.2 Parámetros de adquisición de datos

Un intervalo de muestreo de un milisegundo ($dt = 1$ ms) es lo más comúnmente utilizado con un tiempo de grabación de 1 seg total ($T = 1$ seg). El uso de un dt menor (por ejemplo, 0,5 ms) se recomienda si cualquier procesamiento de ondas de cuerpo (por ejemplo, la refracción y la reflexión) se ha previsto como estudio adicional. En el caso de velocidades extremadamente bajas (por ejemplo, $V_s < 100$ m / seg), un tiempo T (por ejemplo, 2 segundos) será una mejor elección. Un tiempo T (por ejemplo, 2 segundos) se recomienda también si se tiene un arreglo de receptores muy extenso (D) (por ejemplo, > 100 m). En cualquier caso, un tiempo T excesivamente largo (por ejemplo, $T > = 5$ segundos) se recomienda en un estudio activo, ya que puede aumentar la posibilidad de grabar el ruido ambiente (por ejemplo, tráfico).

En resumen, se presenta a continuación una tabla con las dimensiones de configuración recomendables de acuerdo a las necesidades del ensayo.

Tabla 2-1: Parámetros para la adquisición de datos para métodos MASW (valores recomendados) (Park et al. 2002)

Depth (Z_{max}) ¹ (m)	Source (S) ² (lb)	Receiver (R) ³ (Hz)	Receiver Spread (RS) (m)				SR Move ⁶ (dx)			Recording ⁸				
			Length ⁴ (D)	Source Offset ⁵ (X_1)	Receiver Spacing (dx)		Lateral Resolution ⁷			dt ⁹ (ms)	T ¹⁰ (sec)	Vertical Stack ¹¹		
					24-ch*	48-ch	High	Medium	Low			C	N	VN
≤ 1.0	≤ 1 (1)**	4.5–100 (40)	1–3 (2.0)	0.2–3.0 (0.4)	0.05–0.1 (0.1)	0.02–0.05 (0.05)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
1–5	1–5 (5)	4.5–40 (10)	1–15 (10)	0.2–15 (2)	0.05–0.6 (0.5)	0.02–0.3 (0.25)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
5–10	5–10 (10)	≤ 10 (4.5)	5–30 (20)	1–30 (4)	0.2–1.2 (1.0)	0.1–0.6 (0.5)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
10–20	≥ 10 (20)	≤ 10 (4.5)	10–60 (30)	2–60 (10)	0.4–2.5 (1.5)	0.2–1.2 (1.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
20–30	≥ 10 (20)	≤ 4.5 (4.5)	20–90 (50)	4–90 (10)	0.8–3.8 (2.0)	0.4–1.9 (1.5)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
30–50	≥ 10 (20) or passive	≤ 4.5 (4.5)	30–150 (70)	6–150 (15)	1.2–6.0 (3.0)	0.6–3.0 (2.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–3.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
> 50	≥ 10 (20) or passive	≤ 4.5 (4.5)	> 50 (150)	> 10 (30)	> 2.0 (6.0)	> 1.0 (4.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	≥ 1.0 (2.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)

** Values listed here are by no means definitive and required. There can always be a tolerance of, at least, ±20% to the most recommended values.

¹ maximum depth to be investigated, ² weight of hammer in pounds, ³ natural frequency of geophone, ⁴ approximate total length of receiver spread ($D \approx mZ_{max}$ with $1 \leq m \leq 3$), ⁵ distance between source and the closest receiver ($X_1 \approx \kappa D$ with $0.2 \leq \kappa \leq 1.0$), ⁶ distance in receiver spacing (dx) that the source (S) and receiver (R) setup moves after acquiring data at one location, ⁷ degree of lateral resolution being sought, ⁸ recording parameters for seismograph, ⁹ sampling interval in milliseconds (ms), ¹⁰ total recording time in seconds (sec), ¹¹ number of stacking data in seismograph's memory before being saved under different conditions of calm (C), noisy (N), and very noisy (VN) environment, respectively, ¹² acquisition filter (e.g., low-cut, high-cut, etc.), *24-channel acquisition system.

2.4.2.4.3 Ventajas del Método MASW

A diferencia de los métodos de medición directa de la velocidad de onda de corte, lo cual es notoriamente difícil debido a las dificultades de mantener una razón ruido/señal favorable durante la adquisición y etapas de procesamiento, MASW es uno de los métodos sísmicos más fáciles que entregan resultados competentes. La adquisición de datos es significativamente más tolerante que en otros métodos debido a la facilidad con que se mantiene la razón señal/ruido favorable para la medición. Esta razón señal/ruido es el factor que hace que las ondas de corte superficiales sean las ondas sísmicas más fuertes generadas que pueden viajar distancias mayores que las ondas de cuerpo sin sufrir de contaminación por ruidos externos.

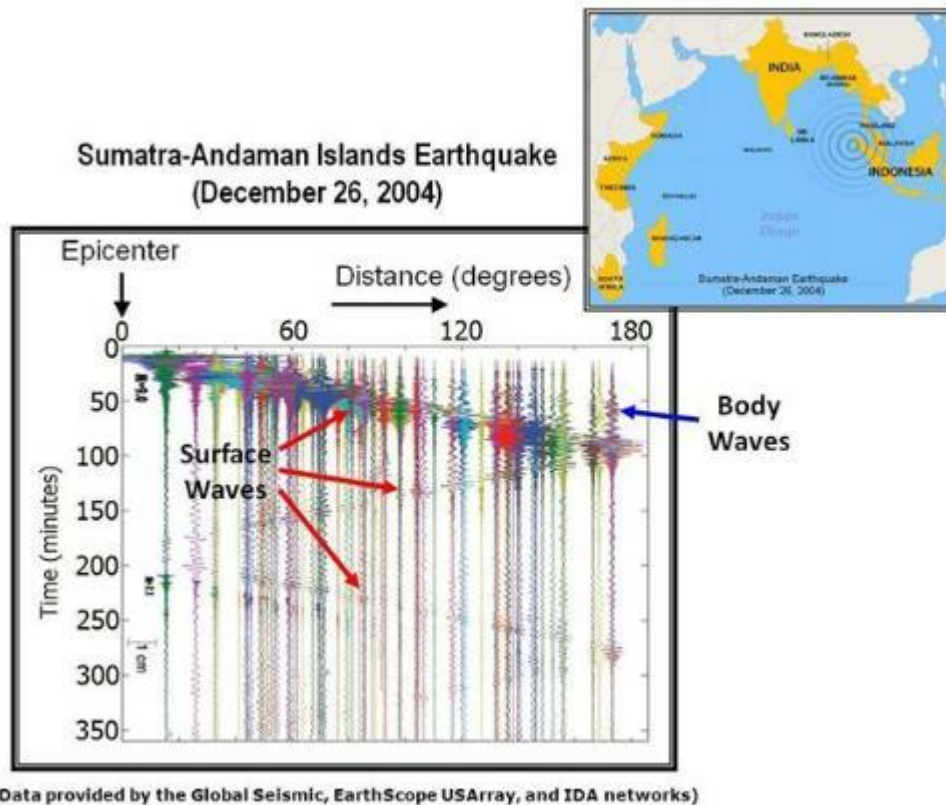


Figura 2-30: Datos de terremotos alrededor del planeta mostrando fuertes ondas superficiales (ParkSeismic)

Los métodos convencionales de rotación como sondajes entregan valores locales del perfil de velocidad de onda de corte, mientras que el método MASW cubre el subsuelo entregando una mayor cobertura.

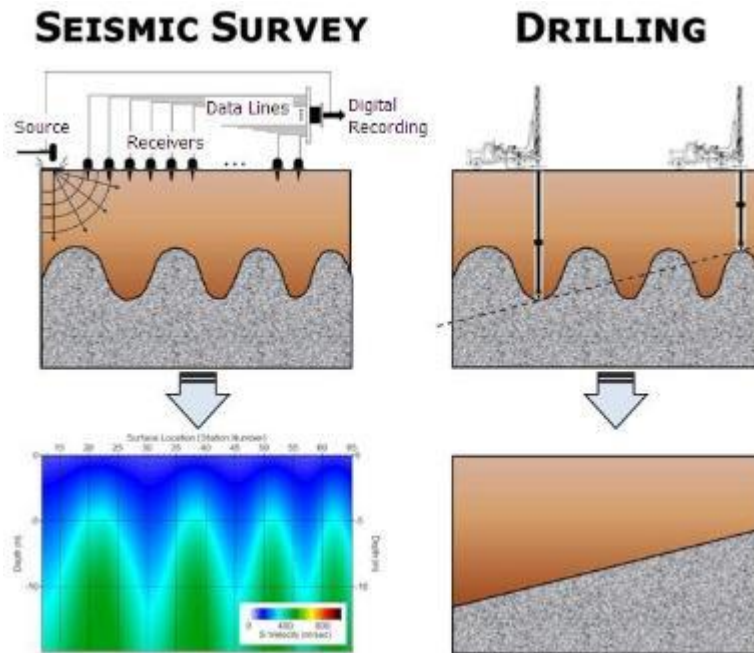


Figura 2-31: Comparación de métodos de rotación con MASW (ParkSeismic)

El método MASW posee una mayor capacidad para discriminar la señal útil en medio de niveles nocivos de ruido, con la cual asegura una mayor resolución en la extracción de la señal que se pueda ver afectada por factores tales como viento, truenos o tráfico. En consecuencia, el procedimiento general de adquisición de datos y el paso posterior de procesamiento de datos es altamente eficaz y tolerante.

El concepto de multicanal es análogo a la resolución en tecnología de imagen digital. A medida que sea mayor el número de bits disponibles, se consigue una resolución de color más amplia, mientras que la mayor resolución de imagen se consigue a medida que más píxeles se utilizan para capturar la imagen. El concepto de número de canales juega un papel similar a los de los conceptos de bits y píxeles en la delimitación de la información del subsuelo.

Multichannel Concept = Color Depth (bit) Concept



Multichannel Concept = Resolution (pixel) Concept



Figura 2-32: Una analogía del enfoque multicanal sísmica a los conceptos de imagen digital de número de bits y píxeles. (ParkSeismic)

2.4.2.5 SASW vs MASW

Ambos métodos utilizan la propiedad de dispersión de las ondas Rayleigh con el propósito de generar un perfil de velocidad de ondas de corte en profundidad.

El método SASW utiliza solo dos receptores para el registro de las ondas superficiales generadas por la fuente sísmica utilizada en el muestreo. Por ello las pruebas deben repetirse con varias configuraciones en campo: diferente fuente sísmica y diferente arreglo de receptores, con el fin de cubrir diferentes profundidades de investigación. Además, las pruebas deben realizarse en dos direcciones para cubrir los efectos de cualquier fase interna que afecte la instrumentación. La necesidad de repetir las pruebas también se justifica con el propósito de disminuir la influencia del ruido aleatorio o de ambiente.

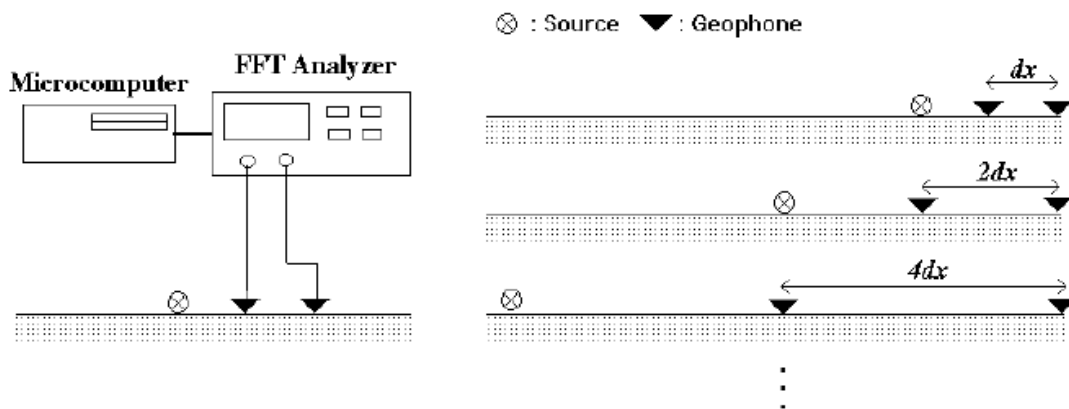


Figura 2-33: Configuración en terreno para método SASW (Park et al., 1997)

Los datos recogidos luego de realizar las pruebas en campo, son analizados para la determinación de la curva de dispersión basada en las diferencias de fases y coherencia, utilizando un analizador de espectro (Stokoe et al., 1994).

Esta metodología influye en el tiempo y costo de mano de obra, debido a la necesidad de repetidas pruebas con configuraciones de campo diferentes. Por lo general toma varias horas completar todo el proceso. Además, puesto que sólo se utilizan dos receptores, no es posible detectar todos los posibles efectos adversos y manejar adecuadamente la adquisición de datos, lo que puede causar errores en los resultados. Estos efectos son la inclusión de las ondas de cuerpo (directo, refracción, reflexión, las ondas P y las ondas de aire), y el aumento de los modos, que se refleja, y las ondas no planas de la superficie. Debido a esto, el control de calidad durante la adquisición y proceso es un período extremadamente difícil y la exactitud de los resultados se puede reducir de manera significativa.

En el método MASW, se utiliza un número mayor de receptores con un sismógrafo de muchos canales. Los receptores se ubican equidistantes y, o bien un geófono o un grupo de geófonos se pueden utilizar como un receptor. Dado que la configuración en terreno es muy similar a la utilizada en muestreo de ondas de cuerpo, ligeramente diferente en el criterio de configuración óptima de adquisición de datos (Park et al., 1996c), el muestreo de ondas superficiales puede ser realizado como un subproducto de ondas de cuerpo, haciendo que 100 por ciento de la energía sísmica registrada sea útil.

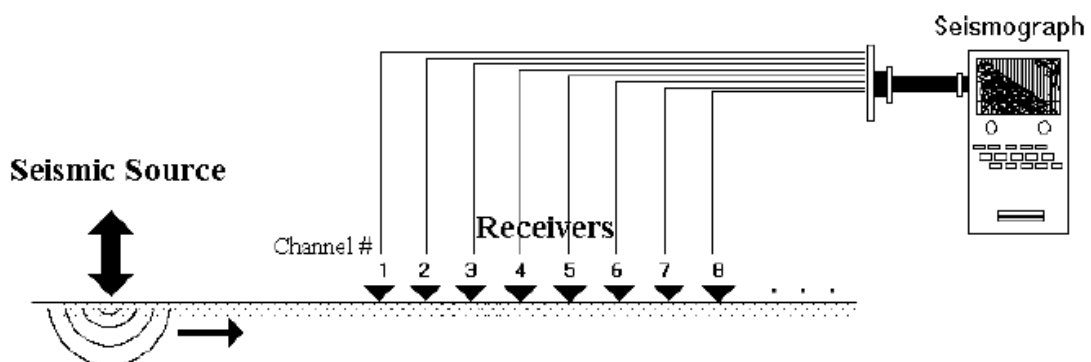


Figura 2-34: Configuración en terreno para método MASW (Park et al., 1997)

La técnica de procesamiento de datos no implica el cálculo de diferencia de fase de las ondas superficiales registradas como en el caso del método SASW. El cálculo de diferencia de fase es propenso a generar resultados erróneos debido al fenómeno de cruce de fases (wraparound). En su lugar, la técnica calcula velocidades de fase basada en un parámetro de correlación espectral (Park y col., 1997a). Por lo tanto, la curva de dispersión calculada puede tener una confianza mucho mayor que el calculado por el método de SASW. La velocidad de cálculo de esta técnica es también más rápida que las de las técnicas empleadas en el método SASW.

CAPÍTULO 3 MÉTODOLÓGIA Y MEDICIONES DE TERRENO

3.1 Introducción

En el desarrollo de este Trabajo de Título fue necesario la determinación de los lugares de muestreo basada en los antecedentes disponibles de cada uno. Para ello se tomó como base el proyecto de caracterización geotécnica encargado por la ONEMI al Idiem junto con los antecedentes que se manejan de cada una, así como una visita de inspección para determinar la factibilidad de realizar los ensayos.

Junto con ello y de forma paralela se trabajó en la determinación de los equipos que se contaban en el Laboratorio de Sólidos de la Facultad, para luego realizar la compra de lo necesario para la realización de las mediciones. Como parte importante del desarrollo de las pruebas, se tuvo que determinar la forma de conseguir una excitación vertical que asegurara una profundidad de muestreo de por lo menos 30m.

Es así, como en el desarrollo de este capítulo se describen las decisiones y el procedimiento que se llevó a cabo en el desarrollo de este trabajo.

3.2 Estaciones de Monitoreo

Dentro de los alcances del proyecto encargado por la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) al Idiem, estaba la caracterización geotécnica de las distintas estaciones de monitoreo sísmológico y el perfil de velocidades mediante el ensayo *downhole*. Las estaciones con la información disponible se presentan en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1. Estaciones de la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC)

Estación	Coordenada E (UTM)	Coordenada N (UTM)	Prof. Downhole	Ensayos de Laboratorio
Angol	294.836	6.270.355	50,00	SI
Casablanca	275.521	6.310.535	50,00	SI
Constitución	736.120	6.086.221	50,40	SI
Curicó	295.955	6.125.759	-	NO
Hualañé	243.876	6.125.957	61,45	SI
Maipú	335.420	6.290.911	30,45	SI
Matanzas	234.420	6.234.428	30,45	SI
Melipilla	294.836	6.270.355	60,00	SI
Peñalolén	353.324	6.292.264	31,00	SI
San Pedro de la Paz	668.676	5.920.719	80,75	SI
Talca	258.057	6.075.981	60,00	SI

Las estaciones seleccionadas fueron las de Peñalolén y Maipú en Santiago, Melipilla y Casablanca. Además se agregó la estación de monitoreo de la Universidad de Chile ubicada en Llole, en donde también se cuenta con sondajes y *downhole*, ensayos de laboratorio y sismógrafos ubicados a distintas profundidades. La información disponible de esta estación se encuentra en Verdugo (2008).

La decisión de considerar estas Estaciones en el desarrollo de este trabajo, se basó principalmente en la calidad de la información disponible, la presencia de terreno amplio para la realización de los arreglos lineales y la cercanía con Santiago en lo que refiere al traslado de los quipos.

Una representación espacial de la ubicación de las Estaciones seleccionadas se presenta en la Figura 3-1.

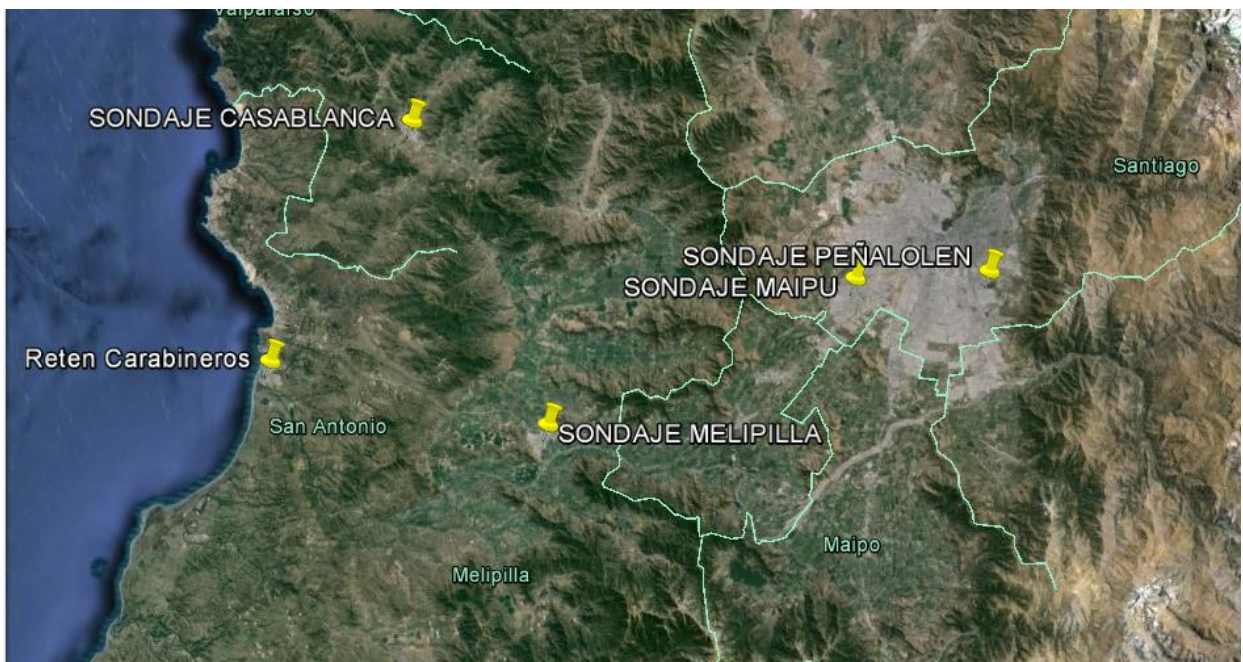


Figura 3-1: Ubicación estaciones analizadas (Google Earth)

3.2.1 Maipú

El sismógrafo correspondiente a esta estación se encuentra en el Centro de Salud Referencial (CSR) de Maipú y el sondaje perforado por Idiem, se realizó en los estacionamientos del Centro. Al costado de dicho estacionamiento se cuenta con una franja de terreno bastante horizontal y extensa que permite el montaje de un arreglo lineal de aproximadamente 80 m (Figura 3-2).



Figura 3-2: Ubicación punto sondaje Estación de Maipú

La exploración geotécnica realizada por Idiem consistió en un sondaje de 30,45m de profundidad en el cual se realizó ensayos SPT (Standard Penetration Test), ensayo sísmico del tipo *downhole* y se tomaron muestras de testigos.

a) Estratigrafía

El suelo encontrado en la exploración corresponde a un estrato de grava de 7,5m de espesor, seguidos de arena limosa del tipo pumicitas hasta el término del sondaje.

La descripción estratigráfica se presenta en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Estratigrafía sondaje Maipú

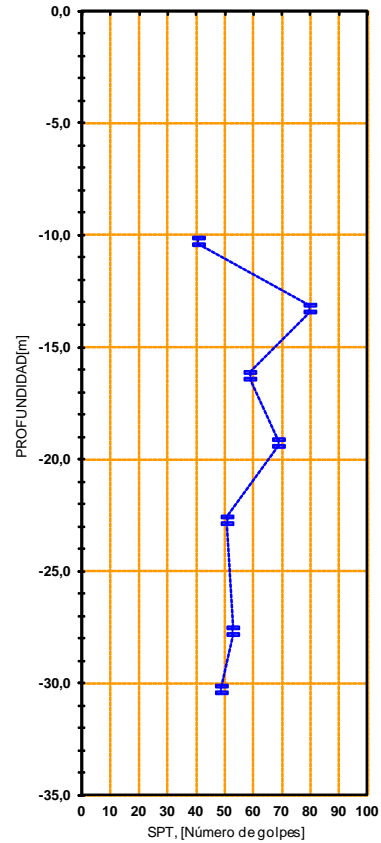
Estrato	Profundidad [m]		Espesor [m]	Descripción Estratigráfica
	Inicial	Final		
I	0,00	0,90	0,90	Suelo orgánico.
II	0,90	8,40	7,50	Grava pobremente graduada de tamaño máximo 3". Cantos redondeados y sub-redondeados, sin recuperación de matriz. Se observa una arena arcillosa en el retorno de agua.
III	8,40	27,40	19,00	Arena limosa (Pumicita) color café, humedad media, consistencia media a alta y plasticidad baja.
IV	27,40	30,45	3,05	Arena limosa (Pumicita) color café claro, humedad alta, consistencia alta y plasticidad nula

b) Ensayo SPT

El ensayo SPT fue realizado a partir del estrato de pumicita. Los resultados se presentan en la siguiente figura.

PROFUNDIDADES [m]	
Inicial	Final
10,00	10,45
13,00	13,45
16,00	16,45
19,00	19,45
22,45	22,90
27,40	27,85
30,00	30,45

PENETRACIONES - N° DE GOLPES			
N1	N2	N3	Nf
13	18	23	41
18	36	44	80
19	27	32	59
21	33	36	69
13	27	24	51
14	25	28	53
15	23	26	49



Observaciones:

- N1 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los primeros 15 cm. Iniciales.
- N2 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los segundos 15 cm. Intermedio.
- N3 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los terceros 15 cm. Finales.
- Nf = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los últimos 30 cm. (N2+N3).
- R = Rechazo, la cuchara no penetra y rebota con los golpes del martinete.

Figura 3-3. Resultados ensayo SPT

c) Ensayo Downhole

Con los registros del ensayo sísmico *downhole* se estimaron velocidades de onda de compresión y corte para los distintos estratos. En la Tabla 3-3, estas se presentan los resultados del ensayo *downhole*, mientras que en la Tabla 3-4 se presenta la interpretación según la estratigrafía del sector.

Tabla 3-3. Resultado ensayo *downhole*

Profundidad [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
Inicial	Final		
0,00	2,00	410	200
2,00	6,00	800	520
6,00	8,00	1420	520
8,00	12,00	1420	440
12,00	30,00	1420	460

Tabla 3-4. Perfil de V_s según estratigrafía

Estrato	Profundidad [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
	Inicial	Final		
I	0,00	0,90	419	208
II	0,90	8,40	805	526
III	8,40	27,40	1428	447
IV	27,40	30,45	1428	463

3.2.2 Peñalolén

Al igual que en la Estación de Maipú, el sismógrafo perteneciente a la Estación de Peñalolén se encuentra instalado en un centro de salud, en este caso el Hospital Luis Tisné. El sondaje fue realizado en un área verde cercana a los estacionamientos de los funcionarios, al igual que en Maipú, el terreno presentaba las condiciones necesarias para realizar un ensayo MASW con un arreglo lineal cercano a los 100 m (Figura 3-4).

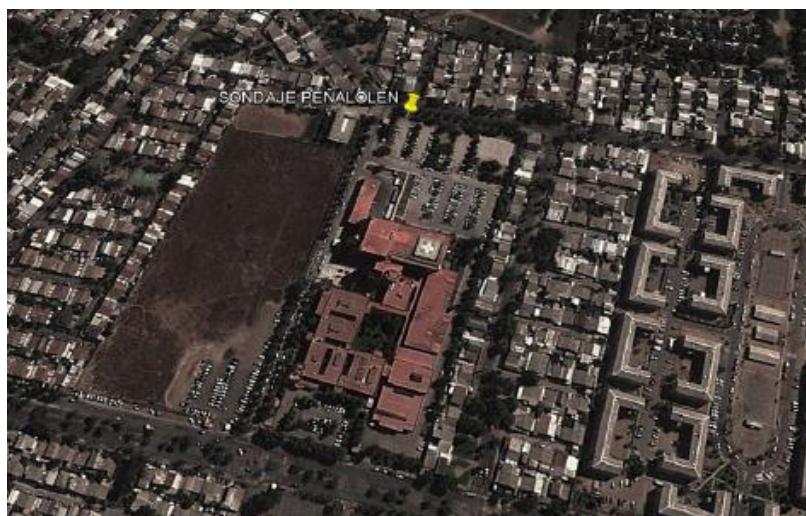


Figura 3-4: Ubicación punto de sondaje Estación Peñalolén

La exploración geotécnica realizada por Idiem consistió en un sondaje de 31 m de profundidad en el cual se realizaron ensayos in-situ del tipo SPT (Standard Penetration Test), ensayo sísmico del tipo *downhole* y se tomaron muestras de testigos.

a) Estratigrafía

El primer estrato que se identifica en el suelo estudiado corresponde a una arcilla de baja plasticidad con presencia variable de gravas, y bajo éste subyacen estratos de gravas, arcillas y arena limosa.

Tabla 3-5. Estratigrafía sondaje Peñalolén

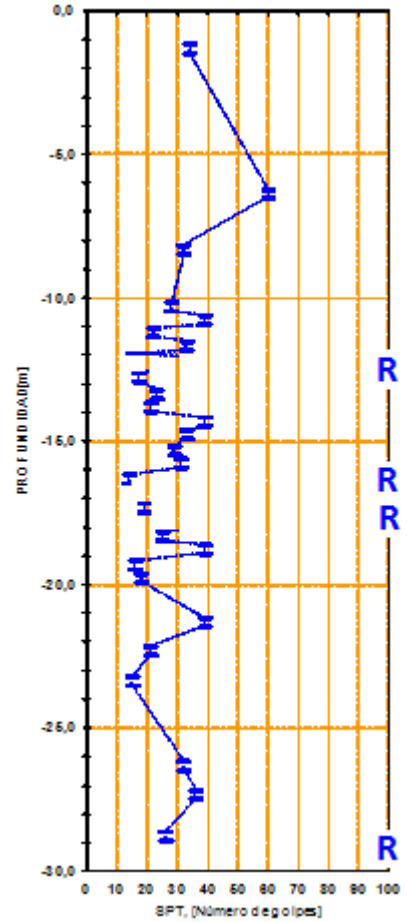
Estrato	Profundidad [m]		Espesor [m]	Descripción Estratigráfica
	Inicial	Final		
I	0,00	23,95	23,95	Arcilla color café, consistencia media a alta, humedad media y plasticidad baja. Presencia variable de gravas de cantos angulares y sub-angulares, tamaño máximo 1 ½".
II	23,95	26,00	2,05	Grava de cantos angulares y sub-angulares, tamaño máximo 2", sin recuperación de matriz. Se observa arena gruesa color negro en el retorno de agua.
III	26,00	27,45	1,45	Arcilla color café, consistencia media, humedad media y plasticidad baja. Presencia variable de gravas de cantos angulares y sub-angulares.
IV	27,45	28,45	1,00	Arena limosa color rosado, compacidad alta, humedad media y plasticidad nula.
V	28,45	31,00	2,55	Grava de cantos angulares y sub-angulares, tamaño máximo 2", sin recuperación de matriz. Se observa arena gruesa color negro en el retorno de agua y un lente de arcilla al comienzo del estrato.

b) Ensayo SPT

La Figura 3-5 presenta los resultados del ensayo de penetración estándar realizado en los distintos estratos.

PROFUNDIDADES [m]	
Inicial	Final
1,00	1,45
6,05	6,50
8,00	8,45
10,00	10,45
10,45	10,90
10,90	11,35
11,35	11,80
11,80	12,45
12,45	12,90
13,05	13,50
13,50	13,95
14,00	14,45
14,45	14,90
15,00	15,45
15,45	15,90
16,00	16,45
16,45	16,70
17,00	17,45
17,45	17,90
18,00	18,45
18,45	18,90
19,00	19,45
19,45	19,90
21,00	21,45
21,45	21,87
22,00	22,45
22,45	22,90
23,05	23,50
23,50	23,95
26,00	26,45
26,45	26,90
27,00	27,45
28,00	28,45
28,45	28,90
29,20	29,23
29,60	29,65

PENETRACIONES - N° DE GOLPES			
N1	N2	N3	Nf
8	14	20	34
12	15	45	60
11	15	17	32
9	12	16	28
21	19	20	39
12	10	12	22
8	16	17	33
10	9	6	15
7	6	11	17
9	10	13	23
8	10	11	21
22	21	18	39
14	18	15	33
13	11	18	29
9	14	17	31
5	6	8	14
21	R		R
5	8	11	19
8	12	10	22
9	10	15	25
19	19	20	39
5	6	10	16
7	7	11	18
18	20	19	39
33	R		R
9	11	10	21
13	15	21	36
10	8	7	15
11	14	10	24
6	14	18	32
4	12	9	21
10	14	22	36
18	26	37	63
9	12	14	26
R			R
R			R



Observaciones:

- N1 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los primeros 15 cm. Iniciales.
- N2 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los segundos 15 cm. Intermedio.
- N3 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los terceros 15 cm. Finales.
- Nf = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los últimos 30 cm. (N2+N3).
- R = Rechazo, la cuchara no penetra y rebota con los golpes del martinete.

Figura 3-5: Resultado ensayos SPT

c) Ensayo Downhole

Con los registros del ensayo sísmico *downhole*, presentados en la Tabla 3-6, se estimaron velocidades de onda de compresión y corte para los distintos estratos, estas se presentan en la Tabla 3-7.

Tabla 3-6. Resultado ensayo *downhole*

Profundidad [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
Inicial	Final		
0,00	2,00	380	250
2,00	8,00	570	250
8,00	16,00	570	430
16,00	26,00	860	430
26,00	32,00	860	600

Tabla 3-7. Perfil de V_s según estratigrafía

Estrato	Profundidad [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
	Inicial	Final		
I	0,00	23,95	380	250
II	23,95	26,00	860	430
III	26,00	27,45	860	430
IV	27,45	28,45	860	430
V	28,45	31,00	860	600

3.2.3 Casablanca

En esta localidad, la ubicación del sondaje realizado por Idiem no permitía la realización de los ensayos superficiales por encontrarse en el interior de un recinto particular. Sin embargo, en las inmediaciones del punto de sondaje se encontraba un terreno despejado y de gran dimensión, en donde no se presentaban dificultades para realizar los ensayos superficiales. Esto se detalla en la Figura 3-6.



Figura 3-6: Ubicación sondaje Casablanca y punto de ensayo superficial

d) Estratigrafía

El suelo en estudio está constituido principalmente por intercalaciones de estratos de arenas mal graduadas y arcillas de baja plasticidad, sobre un estrato de grava, como se presenta en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8. Estratigrafía sondaje Casablanca

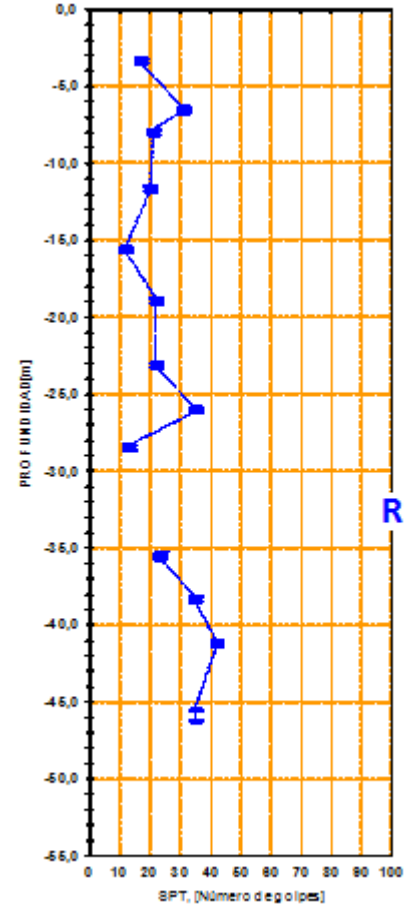
Estrato	Profundidad [m]		Espesor [m]	Descripción Estratigráfica
	Inicial	Final		
I	0,00	1,00	1,00	Arcilla color café, humedad alta, consistencia media y plasticidad baja. Presencia de basura.
II	1,00	26,00	6,65	Arena color café mal graduada, humedad alta, compacidad media a alta y contenida variable de finos sin plasticidad.
III	7,65	15,30	8,10	Arena color café verdoso, humedad media, consistencia media y plasticidad baja.
IV	15,30	21,40	6,10	Arena arcillosa color café mal graduada, humedad media, compacidad media y plasticidad baja.
V	21,40	26,15	4,75	Arcilla color café verdoso, humedad media a alta, consistencia media y plasticidad baja.
VI	26,15	28,60	2,45	Arena arcillosa color café mal graduada, humedad media, compacidad media y plasticidad baja.
VII	28,60	29,70	1,10	Arcilla color café verdoso consolidada, humedad alta, consistencia alta y plasticidad alta.
VIII	29,70	39,40	9,70	Arena color gris, mal graduada, humedad alta, compacidad media a alta y contenido variable de finos sin plasticidad.
IX	39,40	42,20	2,80	Arcilla gris verdoso, consolidada, humedad alta, consistencia alta y plasticidad baja.
X	42,20	46,20	4,00	Arena olor gris, mal graduada, humedad alta, compacidad alta y contenido variable de finos sin plasticidad.
XI	46,20	50,00	3,80	Grava de diversos colores, cantos angulares y sub-angulares, tamaño máximo 2", sin recuperación de matriz. Se observa arena en el retorno de agua.

e) Ensayo SPT

La Figura 3-7 presenta los resultados de los ensayos de penetración estándar realizados en los estratos superficiales correspondientes a arcillas y arenas.

PROFUNDIDADES [m]	
Inicial	Final
3,00	3,45
6,20	6,65
7,65	8,10
11,30	11,75
15,30	15,75
18,60	19,05
22,80	23,25
25,70	26,15
28,15	28,60
32,40	32,65
35,20	35,65
38,00	38,45
40,90	41,35
45,35	46,20

PENETRACIONES - N° DE GOLPES			
N1	N2	N3	Nf
3	7	10	17
3	16	15	31
5	7	14	21
5	8	12	20
5	5	7	12
6	8	14	22
6	10	12	22
12	15	20	35
15	8	5	13
30	50	R	R
6	9	14	23
11	15	20	35
11	20	22	42
11	15	20	35



Observaciones:

- N1 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los primeros 15 cm. Iniciales.
- N2 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los segundos 15 cm. Intermedio.
- N3 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los terceros 15 cm. Finales.
- Nf = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los últimos 30 cm. (N2+N3).
- R = Rechazo, la cuchara no penetra y rebota con los golpes del martinete.

Figura 3-7: Resultado ensayos SPT

f) Ensayo Downhole

Con los registros del ensayo sísmico *downhole* presentados en la Tabla 3-9 se estimaron velocidades de onda de compresión y corte para los distintos estratos. Estos resultados se presentan en la Tabla 3-10.

Tabla 3-9. Resultado ensayo *downhole*

Profundidad [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
Inicial	Final		
0,00	2,00	350	210
2,00	6,00	830	440
6,00	8,00	1330	440
8,00	10,00	1330	270
10,00	16,00	1590	270
16,00	22,00	1590	330
22,00	30,00	1590	360
30,00	34,00	1590	470
34,00	40,00	1790	470
40,00	42,00	1790	360
42,00	44,00	1790	450
44,00	46,00	2400	450
46,00	50,00	2400	520

Tabla 3-10. Perfil de Vs según estratigrafía

Estrato	Profundidad [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
	Inicial	Final		
I	0,00	1,00	350	210
II	1,00	7,65	830	440
III	7,65	15,30	1330	270
IV	15,30	21,40	1590	330
V	21,40	26,15	1590	360
VI	26,15	28,60	1790	360
VII	28,60	29,70	-	-
VIII	29,70	39,40	1790	470
IX	39,40	42,20	1790	360
X	42,20	46,20	2400	450
XI	46,20	50,00	2400	520

3.2.4 Melipilla

Para esta localidad fue más difícil encontrar un terreno cercano al punto donde se realizó el sondaje. De acuerdo como se muestra en la Figura 3-8, el punto amarillo corresponde a las coordenadas informadas por Idiem para el punto de sondaje y puntero rojo marca la zona en donde se encontró un terreno que permitiera realizar un ensayos superficial con un arreglo lineal de más de 100 m. La distancia entre ambos puntos de muestreo va a ser un factor de

consideración en el análisis de los resultados, ya que en esta estación es en donde más distancia entre sondaje y ensayo se tiene.



Figura 3-8: Ubicación sondaje Melipilla y punto de ensayo superficial

g) Estratigrafía

El suelo en estudio está constituido por estratos superficiales de arenas arcillosas y arcillas de baja plasticidad hasta los 6.00m de profundidad, y bajo estos un estrato de gravas y bolones de 53,50 m de espesor. Finalmente, se observa roca correspondiente a un conglomerado (sedimentaria) entre los 59,50 m y 60,00 m de profundidad

Tabla 3-11. Estratigrafía sondaje Melipilla

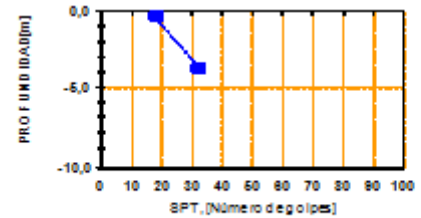
Estrato	Profundidad [m]		Espesor [m]	Descripción Estratigráfica
	Inicial	Final		
I	0,00	0,45	0,45	Arena arcillosa color café, compacidad media, humedad baja y plasticidad baja.
II	0,45	1,95	1,50	Arcilla color café, consistencia alta, humedad baja y plasticidad baja.
III	1,95	6,00	4,05	Arena arcillosa color café, compacidad alta, humedad baja y plasticidad baja. Presencia de gravas dispersas de cantos sub-angular a angulares y tamaño máximo 1 ½”.
IV	6,00	59,50	53,50	Gravas y bolones de cantos redondeados a sub-redondeados, tamaño máximo 6”, no se recuperó matriz. Se observa material arenoso color negro en el retorno de agua.
V	59,50	60,00	0,50	Conglomerado, matriz con contenido calcáreo, tamaño de grano arena media, polimíctico.

h) Ensayo SPT

Los resultados del ensayo de penetración estándar realizado en los estratos correspondientes a la arena arcillosa y arcillas de baja plasticidad se presentan en la Figura 3-9.

PROFUNDIDADES [m]	
Inicial	Final
0,00	0,45
3,45	3,90

PENETRACIONES - N° DE GOLPES			
N1	N2	N3	Nf
5	8	10	18
10	15	17	32



Observaciones:

- N1 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los primeros 15 cm. Iniciales.
- N2 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los segundos 15 cm. Intermedio.
- N3 = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los terceros 15 cm. Finales.
- Nf = Número de golpes necesario para que la CUCHARA NORMAL avance los últimos 30 cm. (N2+N3).
- R = Rechazo, la cuchara no penetra y rebota con los golpes del martinete.

Figura 3-9: Resultado ensayo SPT

i) Ensayo Downhole

Con los registros del ensayo sísmico *downhole* entregados en la Tabla 3-12, se estimó la velocidad de onda de corte para el estrato IV correspondiente a gravas y bolones, la cual corresponde a 700 m/s a partir de los 6 m de profundidad. Mayores detalles de los resultados se presentan en el Anexo B.

Tabla 3-12. Resultado ensayo *downhole*

Profundidad [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
Inicial	Final		
0,00	12,00	-	-
12,00	56,00	-	700

3.2.5 Lolloe

Esta estación de monitoreo no se encuentra entre las estudiadas por Idiem de acuerdo a la petición de la ONEMI. Esta estación corresponde a un punto de monitoreo de la Universidad de Chile, del Departamento de Ingeniería Civil ubicada en la tenencia de carabineros de Lolloe, la cual ha sido instrumentada con fines académicos. El terreno es amplio y se pudo instalar el arreglo lineal bordeando la caseta de monitoreo en donde se encuentra en sondaje.



Figura 3-10: Punto ubicación sondaje

Esta estación fue documentada por Verdugo (2008) y por Carla Camus en su Trabajo de Título “Respuesta Sísmica de un Depósito de Suelos” desarrollada en 2005. Los antecedentes con los que se cuenta se resumen en la Figura 3-11.

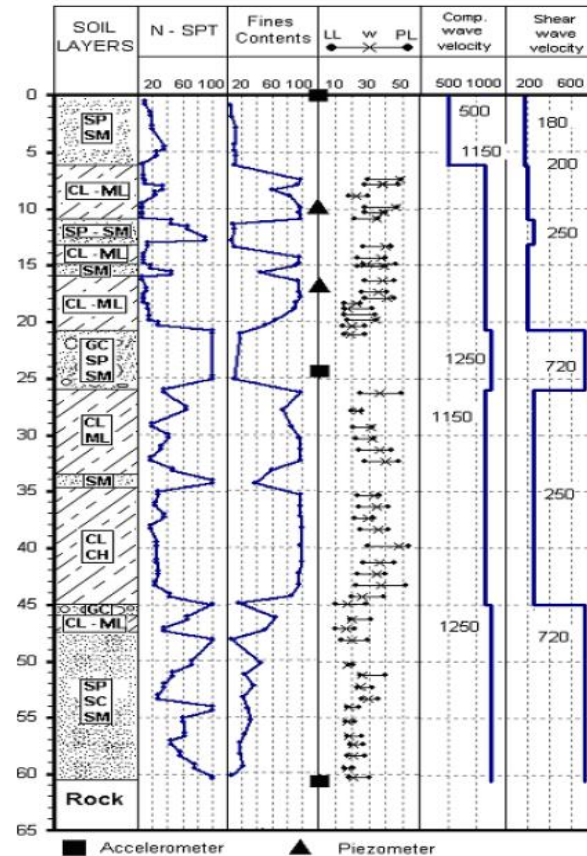


Figura 3-11: Resumen antecedentes geotécnicos estación de Lolloe (Verdugo R., 2008)

3.3 Equipo de medición

El equipo utilizado en terreno para la realización de los ensayos de MASW pertenece al Laboratorio de Sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Los principales componentes son:

3.3.1 Geode

El sistema de adquisición de datos está compuesto por un sismógrafo modelo Geode perteneciente a la empresa Geometrics. Este equipo permite la medición de 24 canales de 24 bits cada uno que registran lecturas de cambio de voltaje en el tiempo. Las características generales del equipo se detallan a continuación:

- Ancho de banda para mediciones, desde 1,75 Hz a 20 kHz.
- Precisión para Stacking de 1/32 veces el intervalo de muestreo.
- Almacenamiento de datos de hasta 16.000 muestras por canal.
- Intervalos de muestreo de 0,02 hasta 16 ms.

- Frecuencia de corte inferior de 10 Hz y superior de 1000 Hz.
- Formato de datos del tipo SEG-2, SEG-D y SEG-Y.
- Requiere de batería externa de 12 V.
- Conexión a PC mediante cable red (Ethernet).

En la siguiente figura se presenta los componentes para la adquisición de datos.

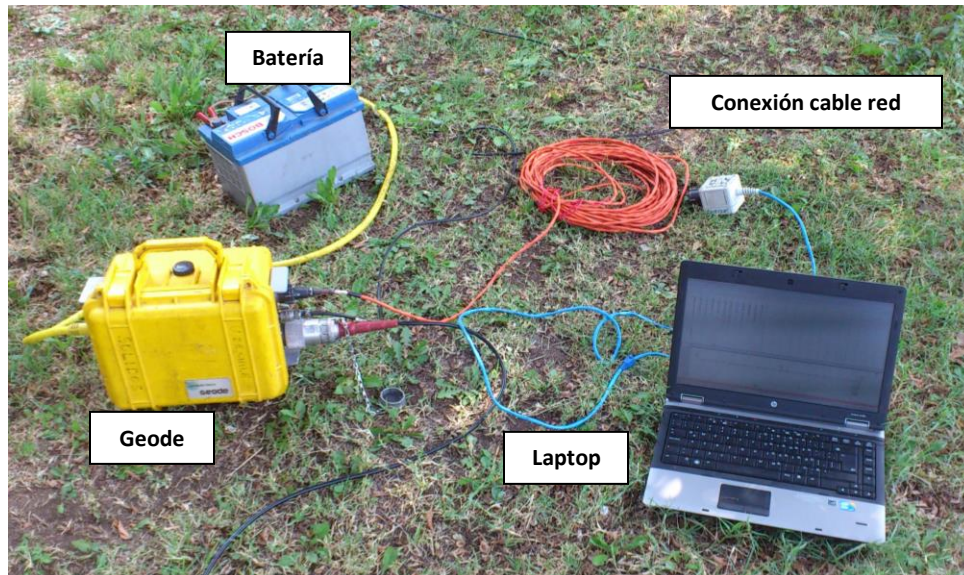


Figura 3-12: Equipo de adquisición de datos

3.3.2 Geófonos

Los ensayos MASW realizados en este Trabajo de Título utilizaron 12 geófonos verticales de la marca Oyo Geospace presentados en la Figura 3-13, que cuentan con las siguientes características:

- Modelo GS-11D/PC-803.
- Frecuencia de muestreo de 4,5 Hz.
- Amortiguamiento de 50%.
- Frecuencia plana de corte de 80 Hz.
- Sensibilidad de ~ 0.7 V/in/s



Figura 3-13: Geófono vertical utilizado

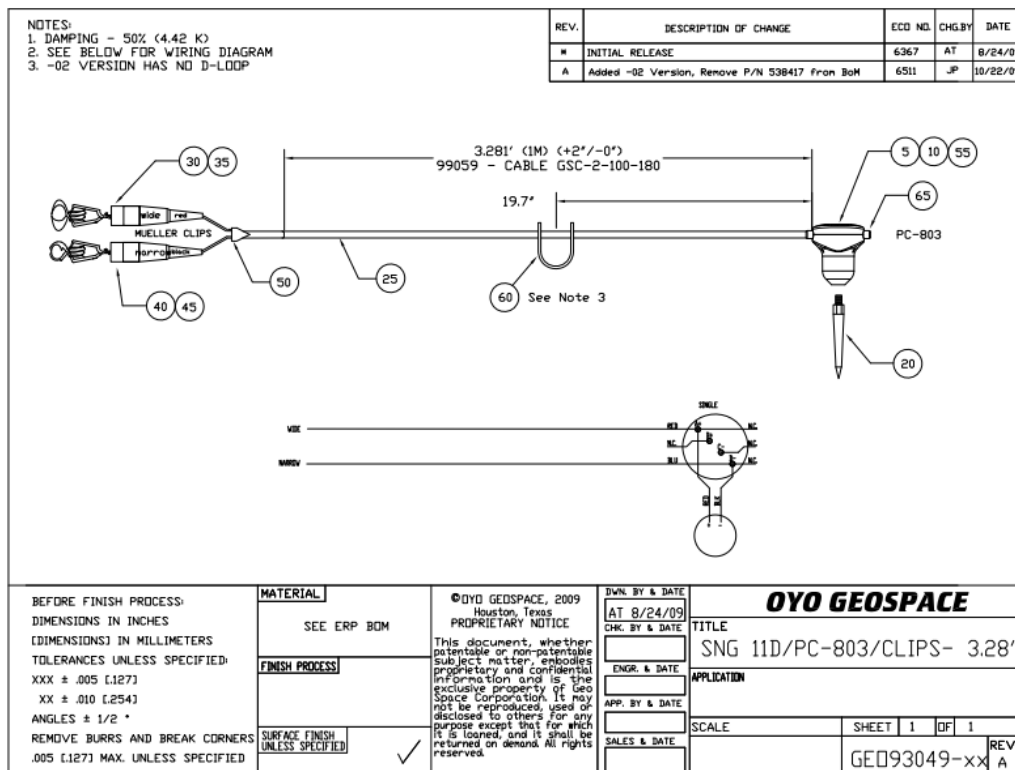


Figura 3-14: Especificaciones geófono Geospace

En terrenos duros o pavimento donde no sea posible clavar el geófono, se utilizaron maceteros de plásticos rellenos con tierra del sector con tal de mantener en posición vertical los geófonos (Figura 3-13). Se ha demostrado que la utilización de estos maceteros no influye en las mediciones (Humire F., 2013).

Tal como se puede ver en la Figura 3-13, los geófonos poseen dos pinzas de conexión hacia un cable sísmico. Este cable tiene 12 conexiones dobles espaciadas cada 10 m, donde se conecta cada geófono permitiendo el paso de la información desde cada geófono hacia el Geode para su respaldo y posterior análisis.

3.3.3 Fuente

La fuente utilizada en estos ensayos corresponde al impacto de la masa del ensayo SPT (Standard Penetration Test) de 63,5 kg, la cual se deja caer desde una altura aproximada de 1,30 m.



Figura 3-15: Masa de ensayo SPT utilizada en las mediciones.

Para llevar a cabo un impacto limpio sobre el terreno, fue necesario utilizar un sistema de levante de la masa con ayuda de una roldana ubicada en la parte superior de un teque de acero que levanta un peso máximo de 1000 kg. Desde el punto de fijación de la roldana, baja una guía para la masa, correspondiente a un perfil de acero que guía la caída pero sin presentar roce al sistema. Este perfil termina en una placa de acero de 5 cm de espesor, la cual tiene un agujero en el medio, por donde pasa el perfil. Para generar la caída libre, se realiza un nudo falso el que al tirar de un extremo se desarma, eliminando el soporte de la masa y provocando su caída libre. Este mecanismo se detalla en la Figura 3-16:

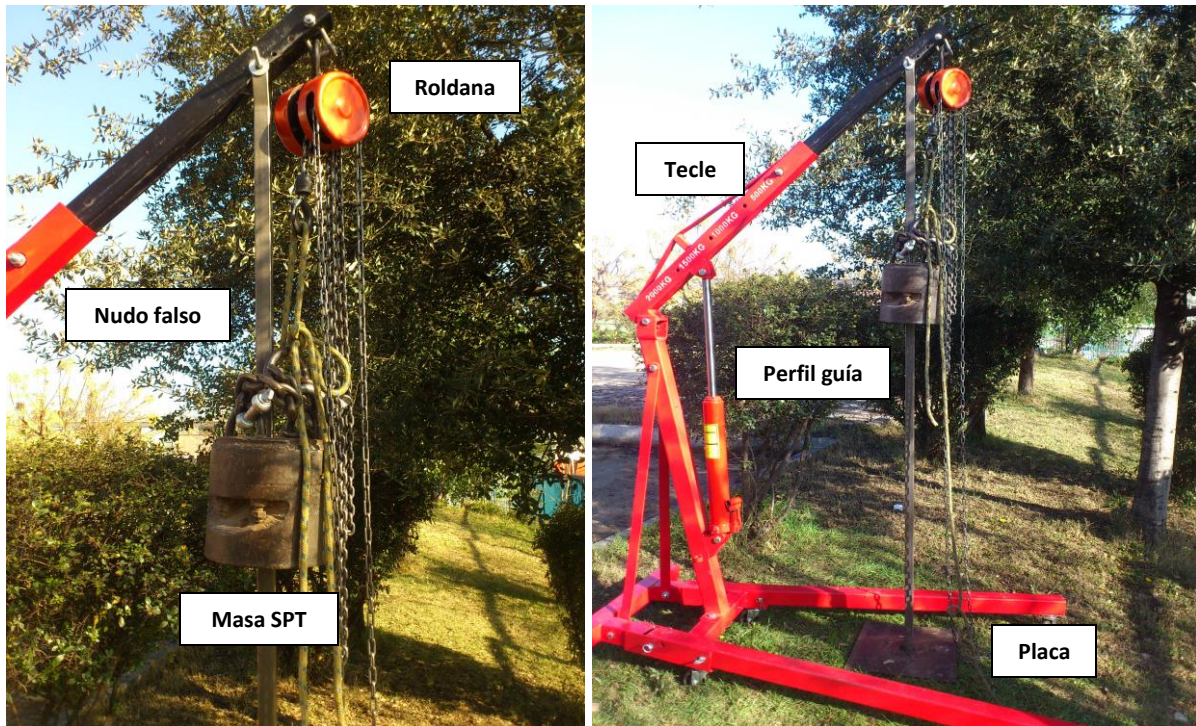


Figura 3-16: Mecanismo de caída y golpe de ensayos

3.3.4 Equipo general y accesorios de medición

En resumen, el equipo necesario para las mediciones junto con los accesorios necesarios se detalla a continuación:

- Equipo Geode y cables de conexión
- Cable sísmico de conexión de geófonos con 12 puertos
- 12 geófonos
- Computador portátil
- Batería
- Estaca y combo (utilizados en terreno duro para instalación de geófonos)
- Maceteros de plástico
- Tecla de acero
- Roldana
- Perfil de Acero
- Placa de acero con agujero
- Cuerda
- GPS para posicionamiento y referencia a estación RENADIC
- Cuaderno de apuntes
- Huincha de medir

En estos ensayos no se utilizó un gatillador automático conectado a la placa base como en las investigaciones de Peredo (2011) y Pinilla (2012), en las cuales comenzaba la grabación de datos a

partir del impacto de la masa en la placa. En esta investigación, en los ensayos de prueba se pudo comprobar que el trigger no estaba en condiciones de ser utilizado, además de presentar un retardo entre el golpe y el inicio de la grabación de datos lo que significó la pérdida de la medición de los primeros geófonos. Para solucionar esto, se modificó en el Geode la opción para considerar un trigger manual y se amplió la ventana de medición de los ensayos. Esto quiere decir, que la grabación de los datos comenzó antes de registrar el golpe, lo cual no genera problema en el análisis de datos, tal como se explicará en el punto 3.5.

3.4 Arreglo y ensayo

De acuerdo a los antecedentes planteado en este Trabajo de Título y las recomendaciones expuestas en la Tabla 2-1, se consideró la realización de un ensayo que alcanzara los 30m de profundidad en la obtención de V_s . Para ello se consideraron los siguientes parámetros:

- Masa de golpe mayor a 9 kg (20 lb).
- Receptores de 4,5 Hz o menor frecuencia.
- Largo del arreglo no menor a 30 m y no mayor a 90 m.
- Espaciamiento entre la fuente y primer geófono entre 4 y 90 m.
- Espaciamiento mayor a 3,8 m entre geófonos.

Además de las especificaciones descritas, se debe considerar las restricciones topográficas del sector seleccionado para el ensayo. Éste debe ser lo más plano posible en la vertical y horizontal y tener una extensión suficiente para la instalación de los 12 geófonos equiespaciados y la fuente de impacto, además de no presentar singularidades que generen alguna condición de borde al ensayo.

Considerando lo anterior, para las estaciones de Peñalolén, Maipú, Melipilla y Llole se consideró un espaciamiento de 5m entre geófonos y 8m entre la fuente y el primer geófono. Para Casablanca, la separación entre geófonos se redujo a 4m y la separación entre la fuente y el primer geófono se extendió a 10 m. Esta modificación fue producto de un canal existente en el sector seleccionado para el ensayo, lo cual llevó a la reducción de distancia entre geófonos para evitar la singularidad o condición de borde en que se podría transformar.

Luego de determinar que el terreno cumple con las necesidades del ensayo, se procede a la instalación de los equipos. Para los arreglos lineales, se traza la línea recta del largo del arreglo para la instalación de los geófonos de acuerdo a la separación establecida. Además se instala el brazo de levante con la placa de impacto en el lugar donde se dejará caer la masa de impacto.

Los geófonos son colocados lo más vertical posible cuidando que se mantengan verticales y sin perturbaciones. Si el terreno se encuentra muy duro, se inserta una estaca de fierro de ancho similar a la púa de los geófonos para realizar una perforación en donde luego se introducirá la púa del geófono. Si se trata de un sector pavimentado o no se puede clavar el geófono, se pueden colocar éstos dentro de maceteros rellenos con tierra asegurando la verticalidad y la estabilidad durante la medición. Posteriormente, se conectan los geófonos al cable sísmico.

Una vez conectada la línea de 12 geófonos, se debe poner en funcionamiento el Geode. Para ello se conecta la batería, el cable sísmico y el computador al Geode y se verifica que los 12 canales estén recibiendo la información de cada geófono.

Para la instalación de la fuente activa, se identifica el punto de impacto, se posiciona el brazo de levante y se arma, colocando la roldana y la guía de caída en el extremo de éste. La guía, que consiste en un perfil cuadrado de acero, una vez que se encuentre erguida, debe tener enterrado su extremo inferior en el terreno, pasando por el agujero que tiene la placa y por el interior de la masa del SPT. Una vez establecida la configuración, se sube la masa con ayuda de la roldana, realizando el nudo falso de amarre que permitirá soltar la masa desde la altura deseada.

Una vez completada la instalación de los equipos y de la fuente se realiza una medición de prueba, dejando caer la masa. Para ello se establece el trigger manual en el programa "Seismodule" y se configura la geometría de la prueba de acuerdo a lo instalado en terreno, ingresando la separación entre geófonos y la distancia entre la fuente y el primer geófono. Se establece una ventana de medición de 8 segundos y una tasa de muestreo de 0,02ms. Si el golpe de prueba entrega resultados coherentes se procede a iniciar las mediciones del ensayo.

En cada estación se registraron 5 golpes, generando un archivo por cada uno para luego ser procesados en conjunto por el software Geopsy. Se recomienda la revisión in situ de los datos obtenidos para descartar el golpe y realizar inmediatamente la corrección necesaria y contar con los datos correctos para el posterior análisis.

3.4.1 Ensayo de Prueba

Como parte de la puesta en marcha de método multicanal de ondas superficiales, se realizaron mediciones de prueba en las instalaciones de la Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento en la adquisición de los datos.

Se eligió un sector en donde se instalaron dos geófonos y el equipo de medición de datos. La fuente de impacto no fue instalada en el sector, ésta fue reemplazada por un mazo de 1,8 kg (4 lb). La disposición de los equipo se presenta en la Figura 3-17.

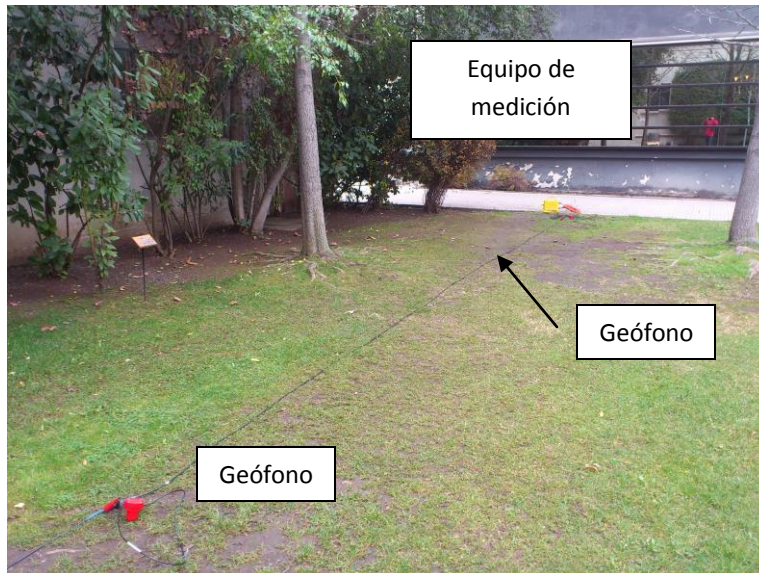


Figura 3-17: Configuración ensayo de prueba

Se configuró el software de adquisición de datos de acuerdo a lo establecido en terreno y se realizaron mediciones para ver el correcto funcionamiento del equipo. Un ejemplo de los datos registrados se presenta en la Figura 3-18.

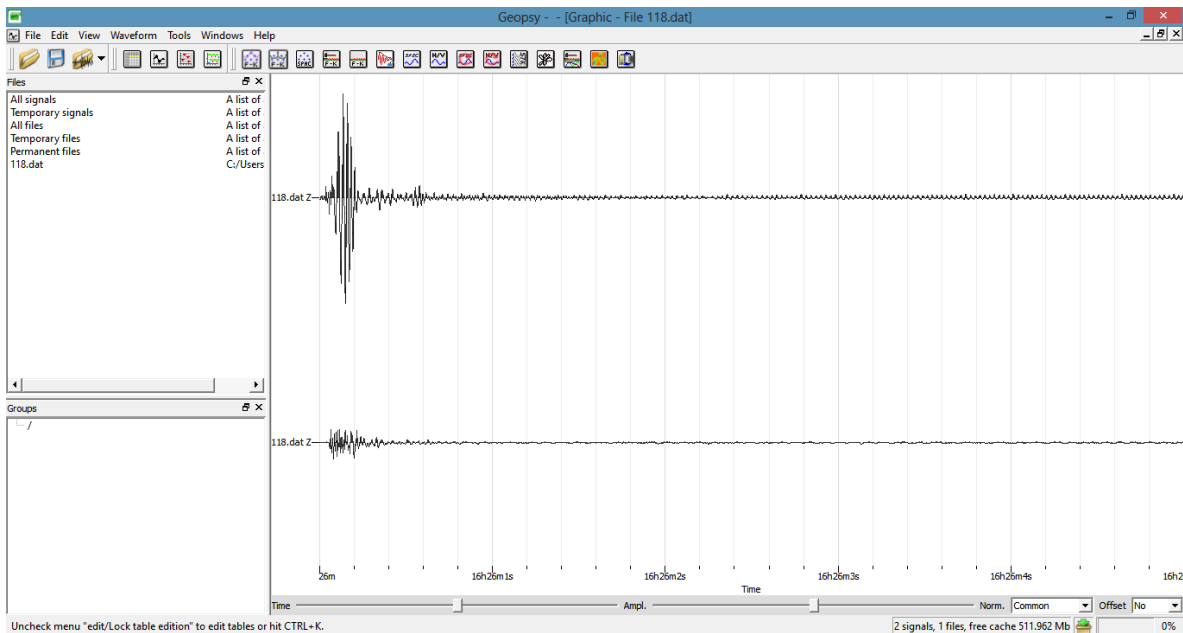


Figura 3-18: Gráfica en Geopsy de un ensayo de prueba con trigger automático

Durante la realización de los ensayos de prueba se utilizó el trigger automático conectado al martillo de golpe, tal como se puede ver en la Figura 3-18. Este funcionó de manera correcta, al abrir la venta de grabación de datos una vez que el golpe era ejecutado. Sin embargo, cuando se fue a terreno, el trigger no se pudo conectar a la masa de caída puesto que el cable interfería en la caída libre y era muy probable que se dañara en el golpe. Por lo anterior, el trigger fue adherido a

la placa de impacto, esperando que se activara con la caída de la masa. Este procedimiento no siempre lograba activar la grabación de datos y el cable era propenso a ser aplastado por la masa ya que éste se movía con el impacto de la masa en la placa. Además, cuando lograba grabar los datos, existía un pequeño desfase en el registro del primer geófono, por lo que se perdía información. En consecuencia, se optó por una activación manual del trigger, es decir se configuró el Geode para que comenzara la grabación de datos una vez que se presionara una tecla en el computador en una ventana de tiempo de 8 segundos. La forma en que se genera el archivo de datos se presenta en la Figura 3-19.

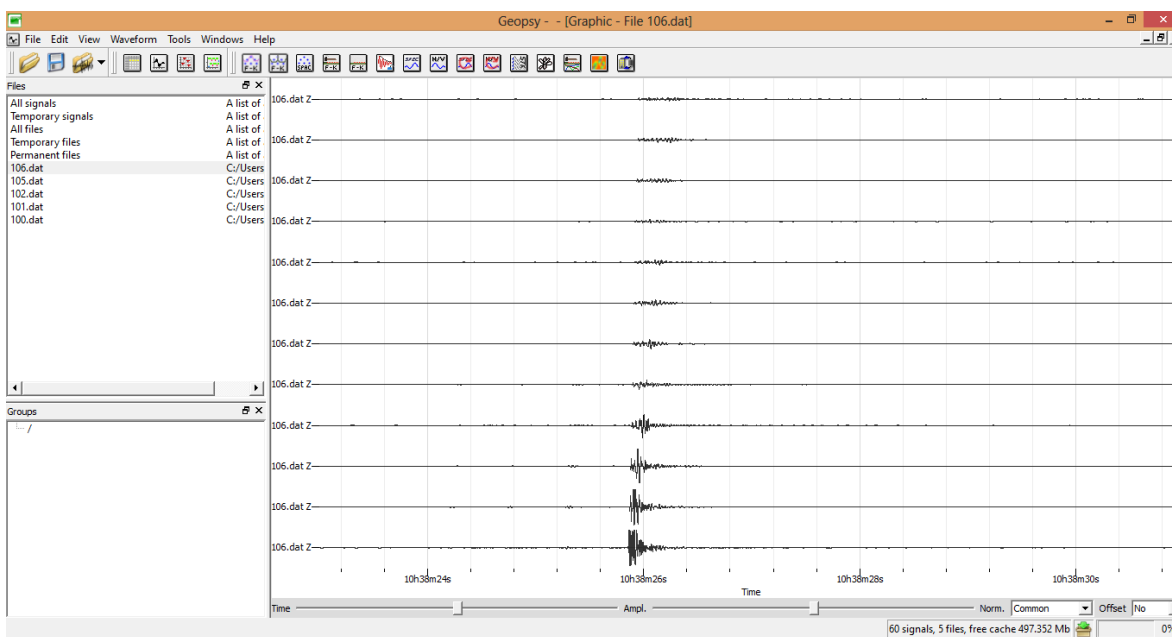


Figura 3-19: Gráfica en Geopsy de un ensayo con trigger manual

Esto no genera problema en el paso posterior que es el análisis de datos, puesto que el software Geopsy, el utilizado en el la obtención de curva de dispersión y posterior inversión y perfil de velocidad de onda de corte, es capaz de identificar los tramos de datos donde se registra el golpe. Esto queda ejemplificado en la Figura 3-20, en donde cada rectángulo verde corresponde a los datos tomados en cuenta en el análisis.

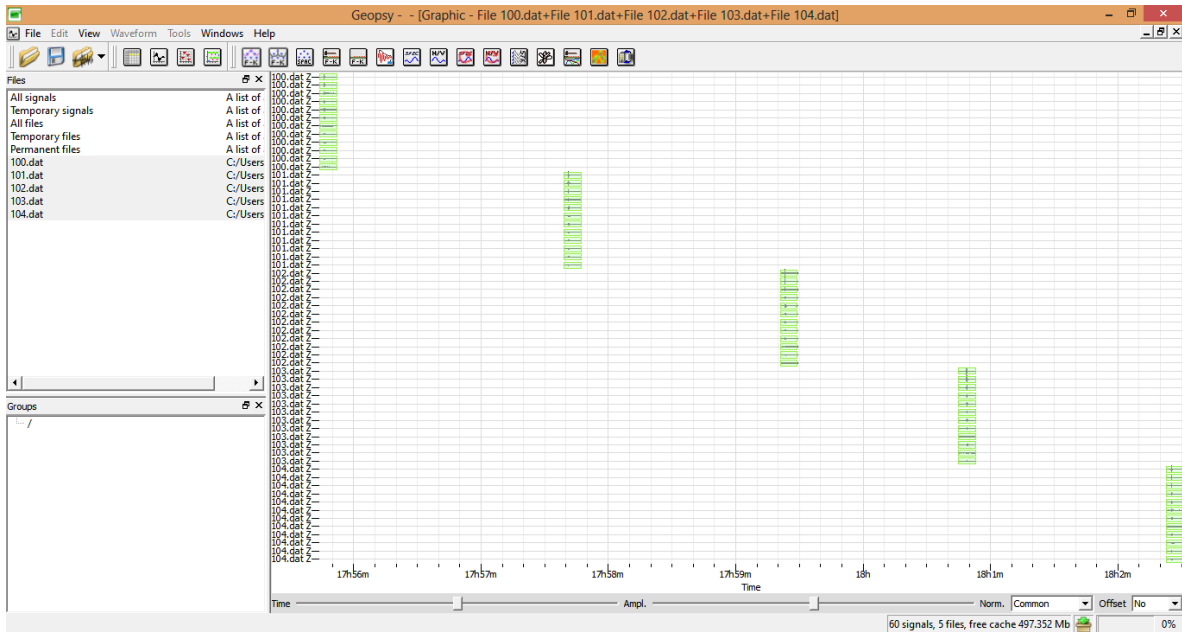


Figura 3-20: Gráfica en Geopsy de los datos analizados para múltiples golpes

3.5 Análisis de datos

El análisis de datos considera dos etapas: determinación de la curva de dispersión e inversión para obtener el perfil de velocidad de onda de corte. El análisis de los datos comienza una vez que se generan los 5 golpes para la medición de cada sitio.

En primer lugar y antes de comenzar con la curva de dispersión, se verifica que cada golpe esté registrado de manera correcta, sin perder información y con la configuración de terreno sin desviaciones. Una vez verificado los 5 golpes, se procede a la obtención de la curva de dispersión.

3.5.1 Determinación de la Curva de Dispersión

Una vez determinado que el registro de los 5 golpes está correcta para el proceso, se procede con la obtención de la curva de dispersión. Para ello, en el software Geopy se elige la opción de realizar un análisis f-k con fuente activa para ensayos lineales, tal como se muestra en la Figura 3-21.

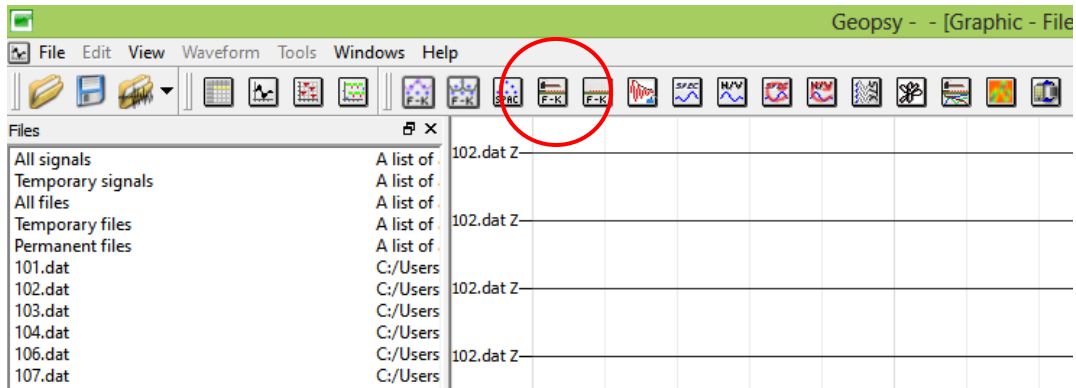


Figura 3-21: Opción de análisis lineal con fuente activa en Geopsy

Tal como se comentó en el Capítulo 2, la conversión de datos en el dominio x-t al dominio f-k permite la identificación de la velocidad de fase a través de la relación $v = f/k$.

Una vez ingresado en este módulo, se procede a configurar el proceso de análisis de acuerdo a la pestaña de herramientas de Geopsy. Tal como se muestra en la Figura 3-22, se debe indicar geometría, tiempos de análisis y rangos de frecuencia para el análisis.

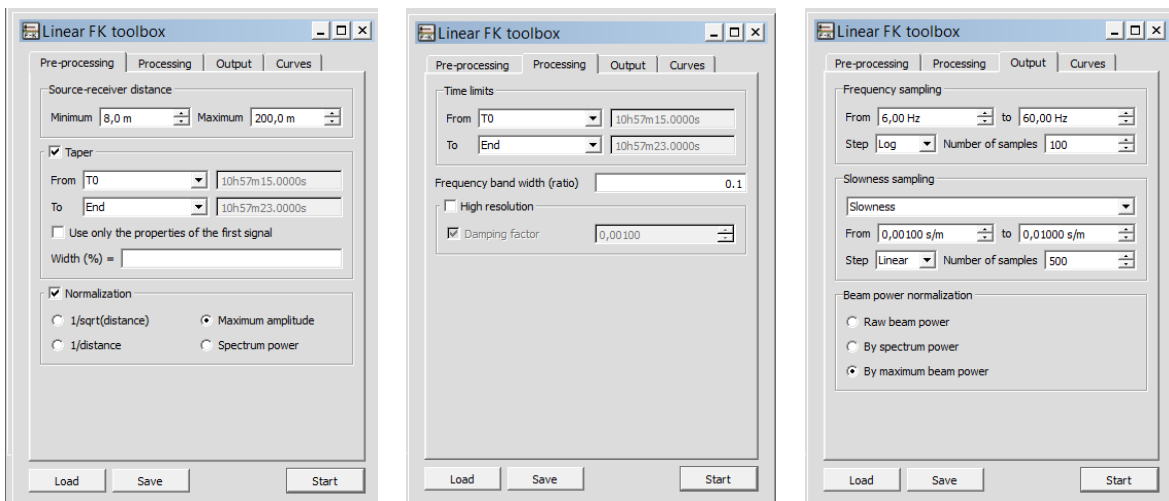


Figura 3-22: Opciones de análisis de Geopsy. (a) geometría para el pre-proceso; (b) tiempos de análisis; (c) rango de frecuencia para el análisis

Una vez definidos estos parámetros, se da inicio al cálculo de la curva de dispersión. El resultado puede ser el lentitud vs frecuencia o velocidad de fase vs frecuencia, según sea lo deseado. En la Figura 3-23 se presenta una curva de dispersión presentada mediante lentitud vs frecuencia para un rango entre 6 y 60 Hz en la figura (a) y la misma curva pero representada por velocidad de fase vs frecuencia en el mismo rango en la figura (b).

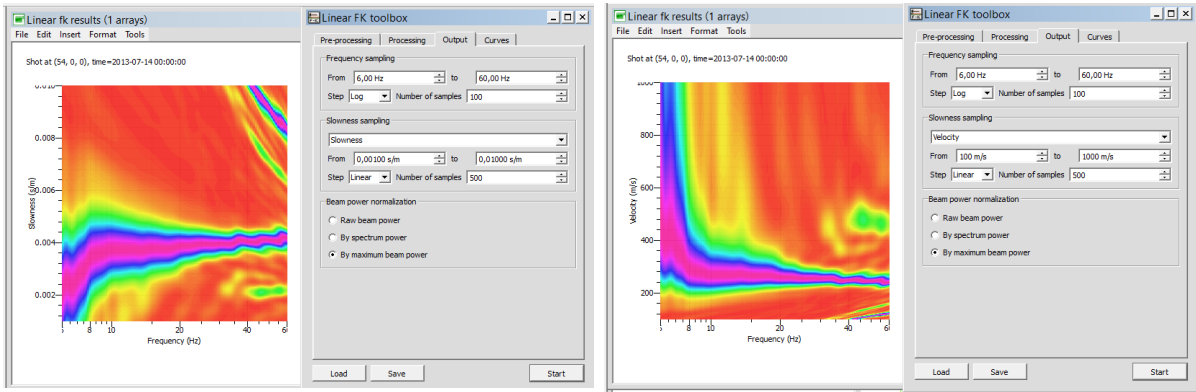


Figura 3-23: Imagen de dispersión obtenida en Geopsy, (a) lentitud vs frecuencia; (b) velocidad vs frecuencia

En la figura anterior se puede ver que fácilmente se identifica el modo fundamental del suelo (M_0), con el cual se puede determinar el perfil de V_S . La curva de dispersión se puede obtener de dos maneras: con un auto-pick o de forma manual. El auto-pick es cuando el mismo programa reconoce los puntos con mayor energía (sector de color magenta) y discretiza la curva de dispersión. La forma manual es cuando el usuario va seleccionando en el diagrama de energía entregado de acuerdo a su apreciación y determina la curva de dispersión. Se debe destacar que la opción automática lleva a errores, ya que el programa discretiza a lo largo de todo el rango de frecuencia y que cuando se tiene un diagrama de energía en el cual no es claro identificar el primer modo, el programa puede entregar una curva completamente errónea. A continuación se presenta la diferencia entre cada método en la Figura 3-24.

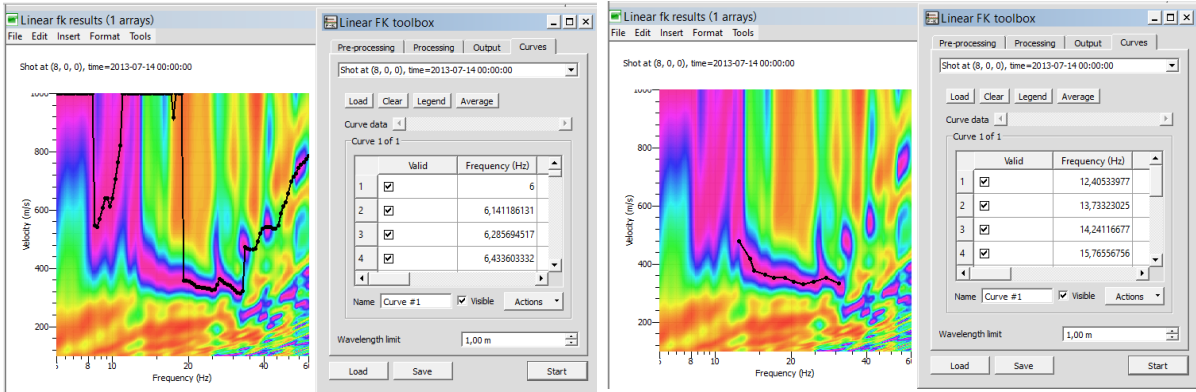


Figura 3-24: Discretización de curva de dispersión en Geopsy (a) con auto-pick; (b) pick manual

Siguiendo con la Figura 3-23 y de acuerdo a la anterior, una vez discretizada la curva de dispersión, ésta se puede volver a muestrear, ser suavizada o cortada de acuerdo a las opciones que presenta el software. Cuando se tiene la curva definitiva, ésta se guarda en formato *. * para su posterior inversión.

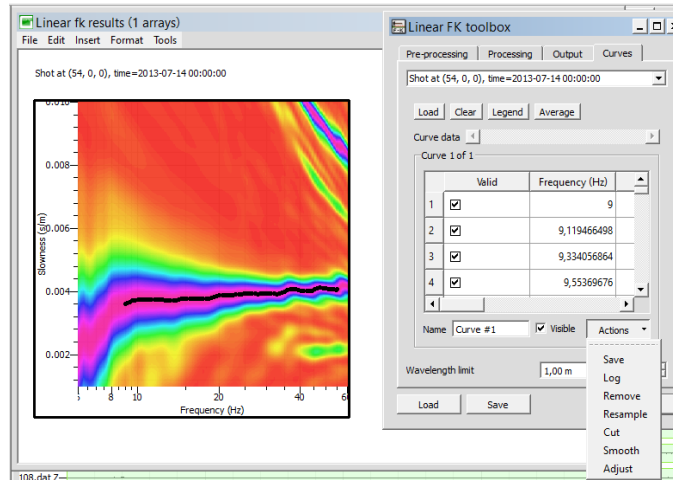


Figura 3-25: Curva de dispersión discretizada y menú de opciones para los datos de la curva

3.5.2 Inversión del Perfil de Velocidad de Onda de Corte

Con la curva obtenida y el archivo *.*g* guardado se da paso al proceso de inversión para obtener el perfil de velocidad de onda de corte. Para ello se utiliza el módulo “*Dinver*” de Geopsy, el cual permite realizar la inversión de la curva de dispersión bajo las directrices del “neighborhood algorithm”

En primer lugar, para inicializar este módulo, se debe indicar que se va a realizar una inversión de onda superficial, tal como se muestra en la Figura 3-26.

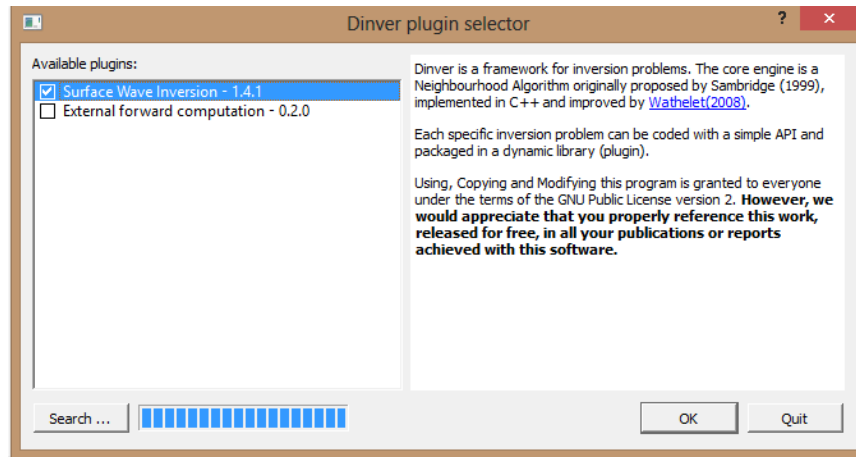


Figura 3-26: Inicialización módulo dinver en Geopsy

El paso siguiente es indicar en el menú que se trata de una inversión de una curva de dispersión y luego cargar la curva antes guardada, como se muestra en la Figura 3-27. Nuevamente el programa permite mejorar la curva, suavizándola, recortando las frecuencias de borde o muestreando de nuevo para reducir el número de puntos. Una vez cargada la curva se deben ingresar los parámetros para la inversión.

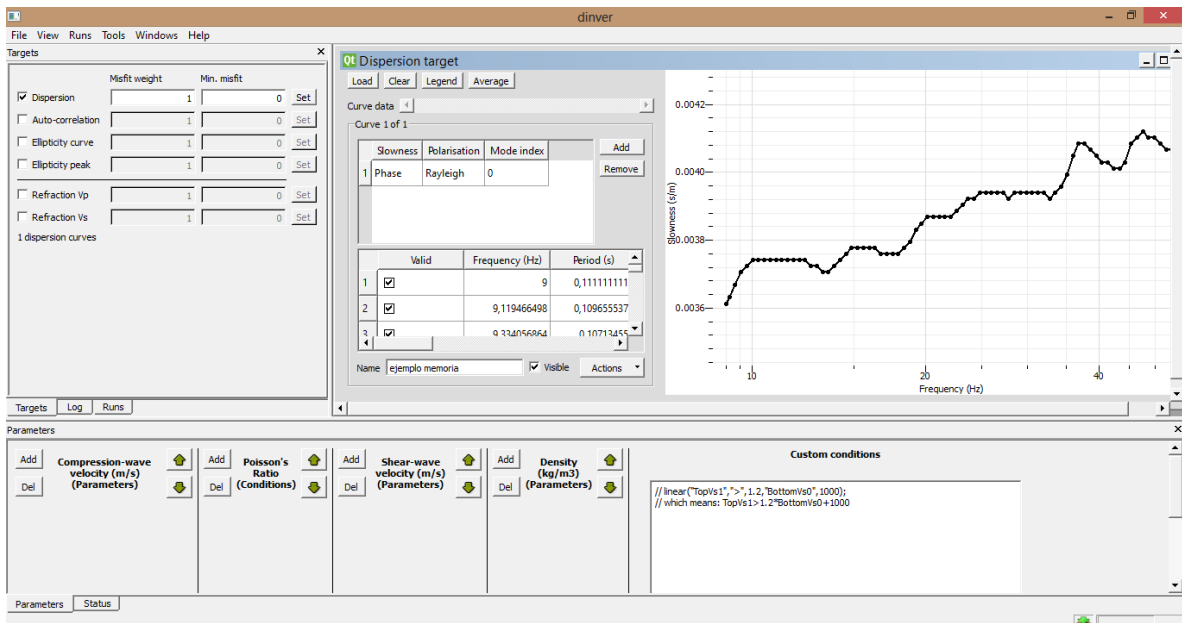


Figura 3-27: Curva de dispersión cargada en módulo dinver

En la figura anterior, en la ventana inferior, se puede ver la sección en donde se cargan las propiedades con las cuales se comienza la inversión. Tal como se mencionó en el Capítulo 2, el algoritmo utilizado por el software Geopsy para la inversión necesita de un rango de valores de parámetros iniciales para realizar la inversión, que en este caso corresponde a la velocidad de onda compresional, módulo de Poisson, velocidad de onda de corte y densidad.

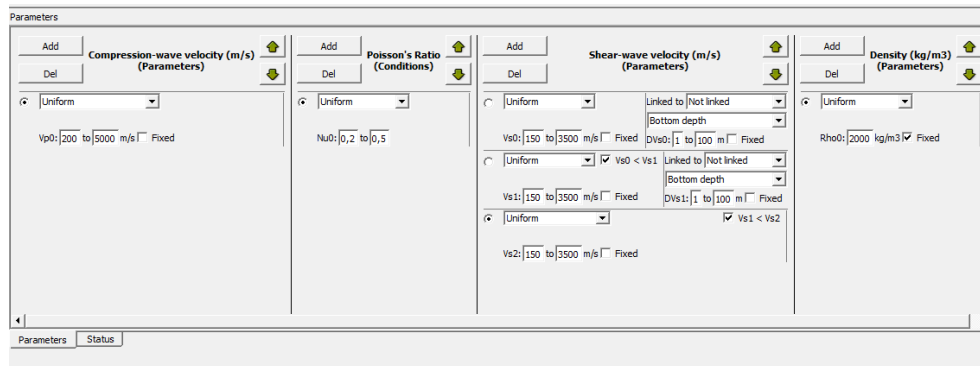


Figura 3-28: Parámetros iniciales para el proceso de inversión

En esta investigación se utilizó la velocidad de onda de corte como parámetro en la inversión, indicando 3 a 4 capas según los datos, y modificando el límite de velocidad máxima a 1000 m/s y la profundidad del perfil a 50m. Se debe indicar además una capa para las otras propiedades.

Una vez ingresado los datos de base para la inversión se agrega una "corrida" a la pestaña "Run" y se verifica que el error registrado de la inversión del orden de 0,01 (Figura 3-29).

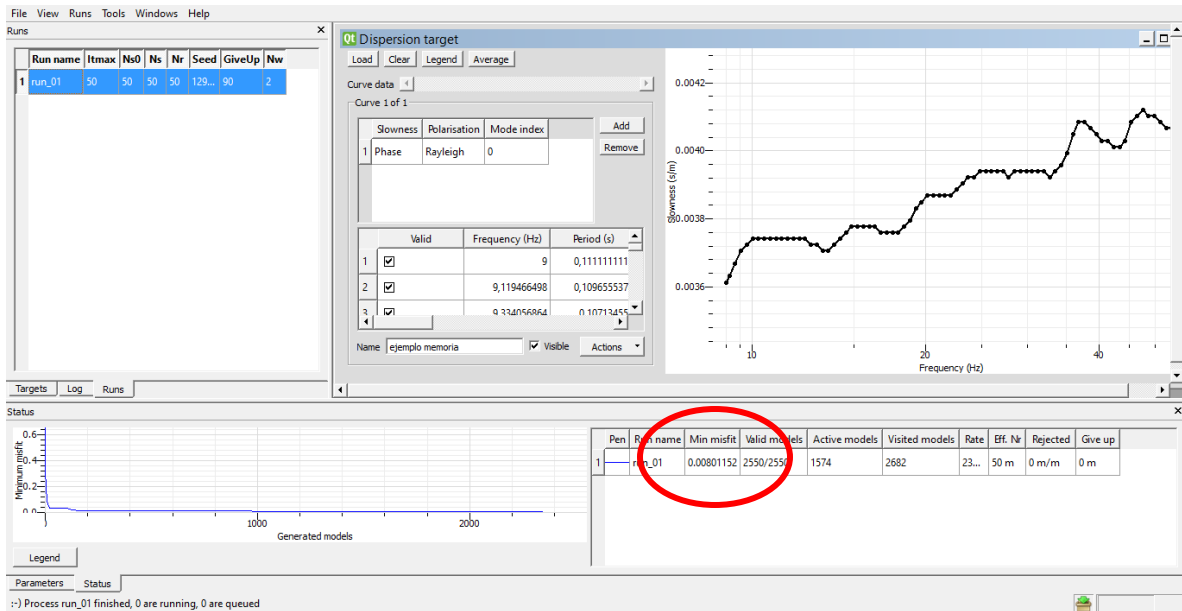


Figura 3-29: Proceso de inversión, se señala error del proceso

Una vez terminada la inversión se puede ver el perfil de velocidad de onda de corte obtenido, presentado en la Figura 3-30.

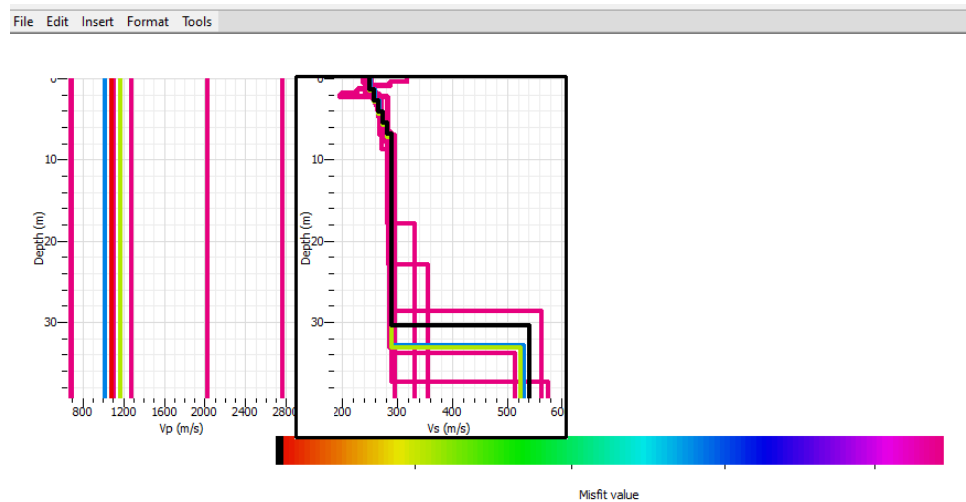


Figura 3-30: Perfil de velocidad de onda de corte obtenido

En la figura anterior, en color negro se presenta el perfil de V_s con el menor error asociado. Cabe destacar que para claridad de la figura no se han presentado todos los modelos, sino solo aquellos que tienen el menor error registrado.

Se puede ver de la figura anterior, que la curva de dispersión invertida produce modelos que no son necesariamente correctos, puesto que existe en esta inversión un modelo con velocidad decreciente y que no se ajusta a los demás. Por otro lado, si se considera el resto de modelos, existe una gran variación en el perfil de velocidad, tal como se muestra en la Figura 3-31 en donde se toman modelos con el doble del error anterior.

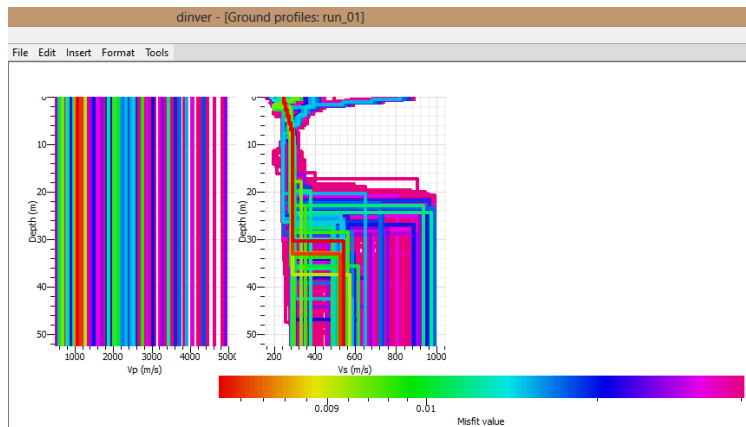


Figura 3-31: Modelos de V_s con desajuste de 0,02

3.5.3 Consideraciones en el procesamiento

Como se ha descrito en este capítulo, existe una gran cantidad de variables que pueden influir en el resultado final de este método, que es el perfil de velocidad de onda de corte. Errores o mala interpretación de los datos en la obtención de la curva de dispersión traerán errores mayores en el proceso de inversión que no tiene una solución única.

En la determinación de la curva de dispersión se encontraron los siguientes alcances:

- No determinar la influencia modal: es decir considerar los siguientes modos del suelo en el análisis trae como consecuencia un perfil de V_s con mayores velocidades (Park et al, 1998)
- Considerar zonas con baja resolución de los datos: al no tener claridad para cierto rango de frecuencias, se puede inferir de manera errónea la curva de dispersión.
- Utilizar auto-pick de las curvas sin revisión: el software Geopsy entrega una curva de dispersión por todo el rango de frecuencias, sin discriminar si corresponde a no al M0 o si se tiene claridad o no en los datos. (ver Figura 3-24)

Para el caso de la inversión, asumiendo que la curva de dispersión está correcta, se encontraron los siguientes puntos de cuidado en Geopsy:

- Acotar los valores de V_s para el proceso de inversión.
- Acotar la profundidad del perfil a obtener.
- Si no se tiene certeza de algún estrato rígido intermedio, utilizar la opción $V_i < V_{i+1}$
- Utilizar como parámetro de entrada V_s para varios estratos y dejar los otros parámetros como default.

Como ejemplo de una mala curva de dispersión y un perfil errado se presenta la Figura 3-32 y la Figura 3-33 correspondiente al análisis de todos los datos de un golpe de la estación de Maipú.

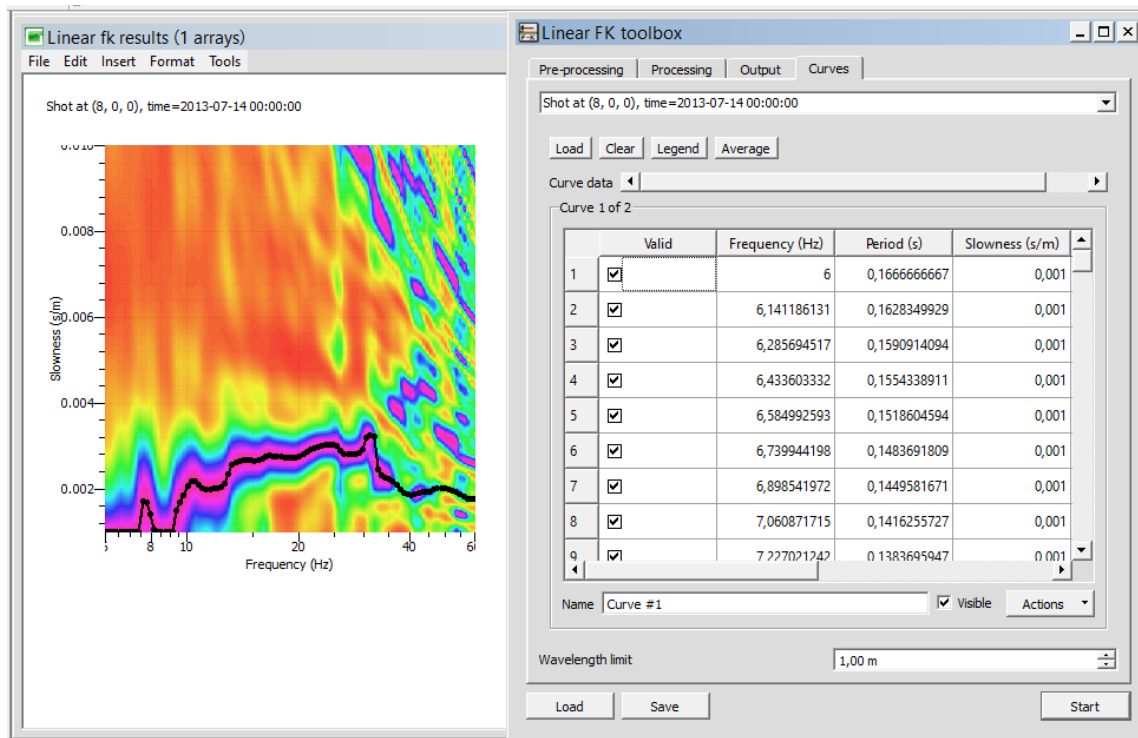


Figura 3-32: Curva de dispersión con auto-pick

De la figura anterior, se debería cortar la curva a los 10 Hz y a los 27 Hz aproximadamente. En la tabla de datos se puede ver que existen valores de lentitud de 0,001 para un importante número de datos.

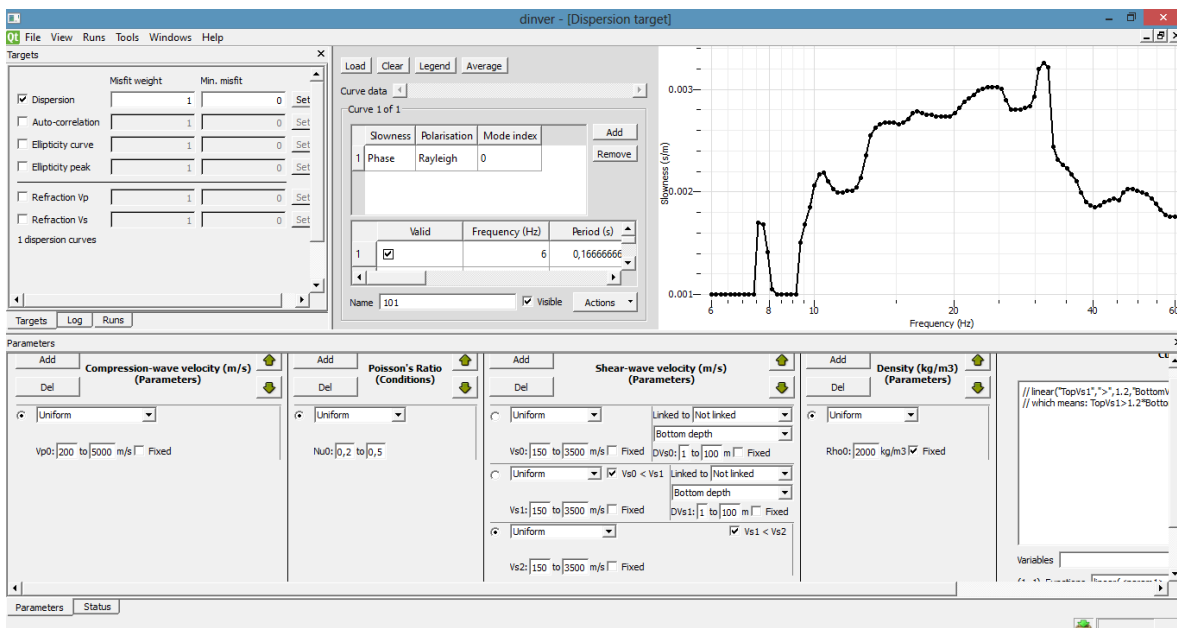


Figura 3-33: Proceso de inversión curva de dispersión anterior

El proceso de inversión fue realizado sin ninguna modificación a los parámetros de entrada para la inversión, tal como se ve en la parte inferior de la Figura 3-33.

El resultado obtenido presenta un error de 0,18 aproximadamente y entrega una velocidad promedio de 280 m/s aproximadamente en una columna de 30m de suelo, sin identificar mayormente otros estratos.

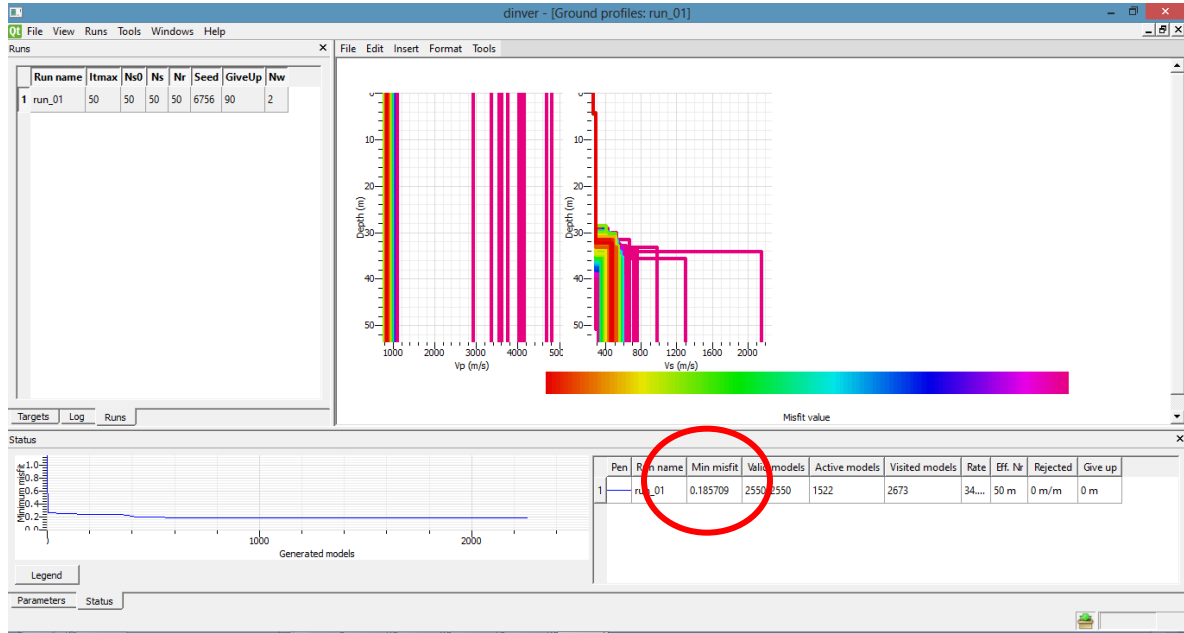


Figura 3-34: Perfil de velocidad de onda de corte con error de 0,18

La Tabla 3-13 presenta la clasificación sísmica de suelos de acuerdo al Decreto Supremo N°61, con la cual se clasificará el suelo considerado en el ejemplo.

Tabla 3-13: Clasificación de suelos según D.S. N°61

Suelo Tipo		V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	(N_1) (golpes/pie)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,4$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,3$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E	Suelo de compacidad o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F	Suelos especiales	*	*	*	*	*

El DS considera: “Para Suelo Tipo D se debe justificar $V_{s\ 30}$ más, N_1 , en caso de arenas, y S_u en el caso de suelos finos.

En depósitos de suelos arenosos donde se disponga de mediciones del índice de Penetración, al menos cada un metro de profundidad en los 30m superiores y se cumple que $N_1 > 30$ golpes/pie, se podrá clasificar automáticamente el terreno como Suelo Tipo D, sin necesidad de otras mediciones. Dentro de los 30 metros de medición del N_{SPT} se acepta en total no más de 5 metros con N_1 , en el rango de 20 – 29 golpes/pie.

En el caso que sólo se disponga del perfil de V_s en profundidad y que dicho perfil indique claramente que V_s aumenta monótonamente con la profundidad y además, se cumple que $V_s > 180$ m/s, se podrá clasificar automáticamente como Suelo Tipo E, sin necesidad de otras mediciones.”

De acuerdo al último párrafo y considerando solamente el perfil de velocidad de onda de corte obtenido, este suelo se puede clasificar como tipo E ya que el perfil presenta aumento de V_s en la profundidad.

Sin embargo, el perfil analizado corresponde a un golpe realizado en la Estación de Maipú, el cual de acuerdo a los antecedentes entregados en el punto 3.2.1 podría clasificar como suelo tipo D o incluso C. Esto significa un cambio considerable en lo que es la condición del terreno, como por ejemplo si se tratara de un edificio habitacional de más de 5 pisos.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS DE TERRENO

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las 5 estaciones seleccionadas de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo anterior. Tal como se mencionó, en la discretización de la curva de dispersión, ésta se realizó de manera manual considerando las zonas correspondientes al modo fundamental del terreno.

Además, como parte de la verificación de los modelos, se utilizó otro software, llamado PickWin para corroborar los resultados obtenidos en Geopsy. Este software es el utilizado en Idiem para el análisis de ensayos de ondas superficiales y *downhole* y se contó con el apoyo del Ingeniero a cargo de estos análisis.

Para poder comparar en términos de velocidad promedio, se realiza el cálculo de V_{S30} de acuerdo a lo indicado en el Decreto Supremo N°61, el cual corresponde a la relación:

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S-i}}} \quad 4-1$$

Donde

V_{S-i} : velocidad de ondas de corte del estrato i en m/s.

h_i : espesor del estrato i en metros.

n : número de estratos en los 30 metros superiores del terreno.

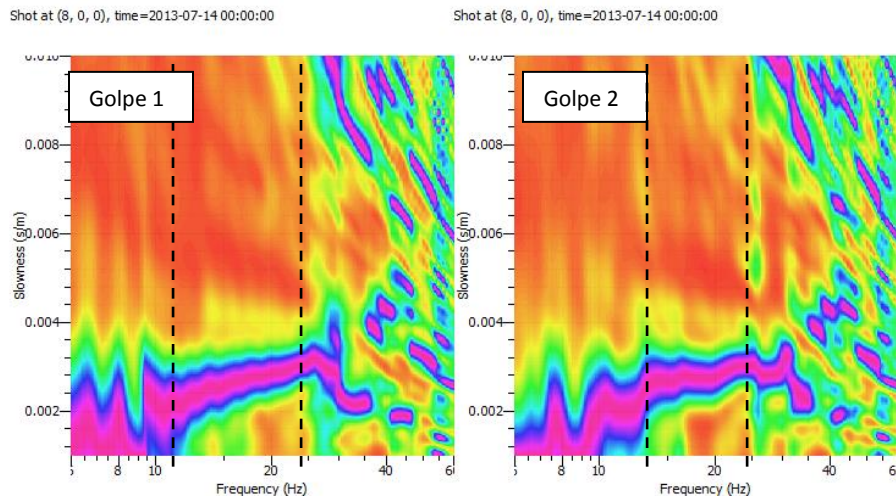
4.2 Maipú

En la estación de Maipú, ubicada en el Centro de Salud Referencial (CSR) se realizó un ensayo lineal de 12 geófonos separados cada 5m y la fuente de impacto instalada a 8m del primer geófono. Se registraron 5 golpes independientes en ventanas de 8 segundos cada una. En la Figura 4-1 se presenta parte del proceso de adquisición de datos y se puede apreciar el monolito del sondaje realizado por Idiem.



Figura 4-1: Disposición en terreno de ensayo MASW en Maipú

El resultado del análisis f-k para los 5 golpes por separado más el stack de éstos realizado en el software Geopsy se presenta en la Figura 4-2. Las líneas verticales indican el rango de validez de los datos procesados.



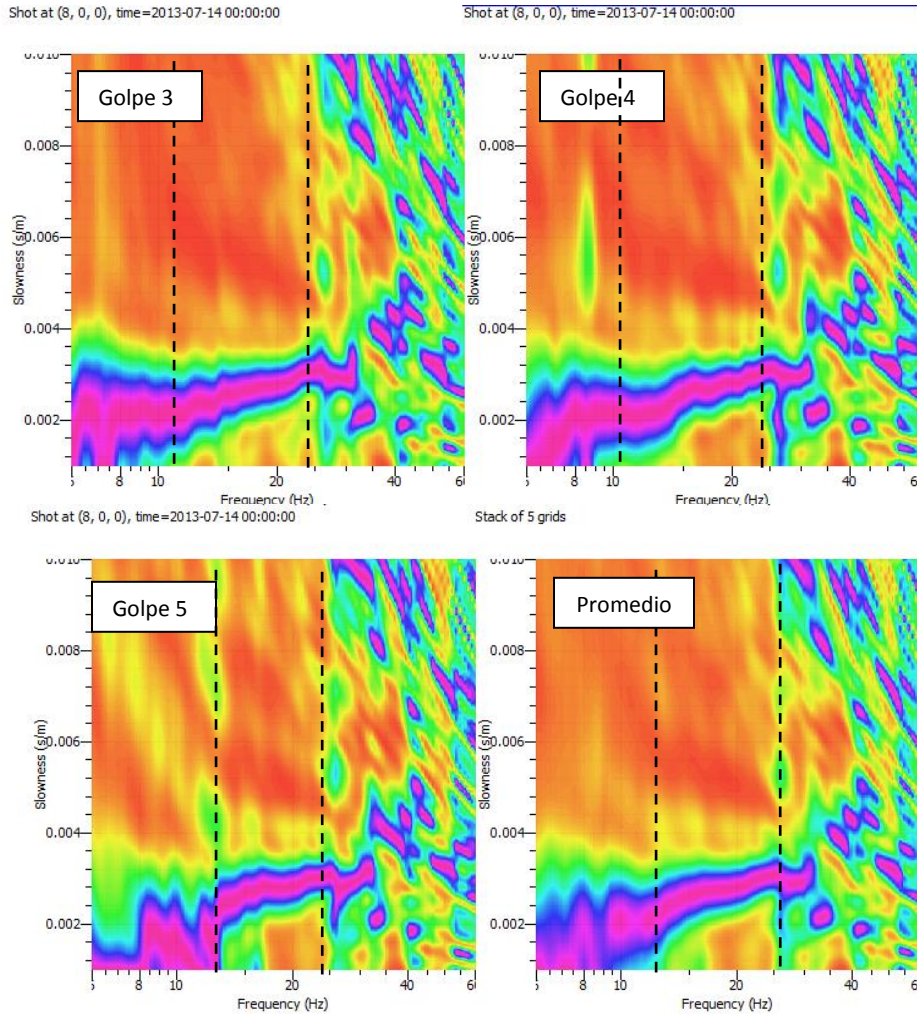


Figura 4-2: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy

En la Figura 4-3 se presenta la curva de dispersión obtenida con el programa PickWin, la curva promedio de los 5 golpes calculada con el software Geopsy y finalmente la curva de dispersión utilizada en el análisis que corresponde al golpe con mejor resolución, que de acuerdo a la figura anterior sería el *Golpe 1*.

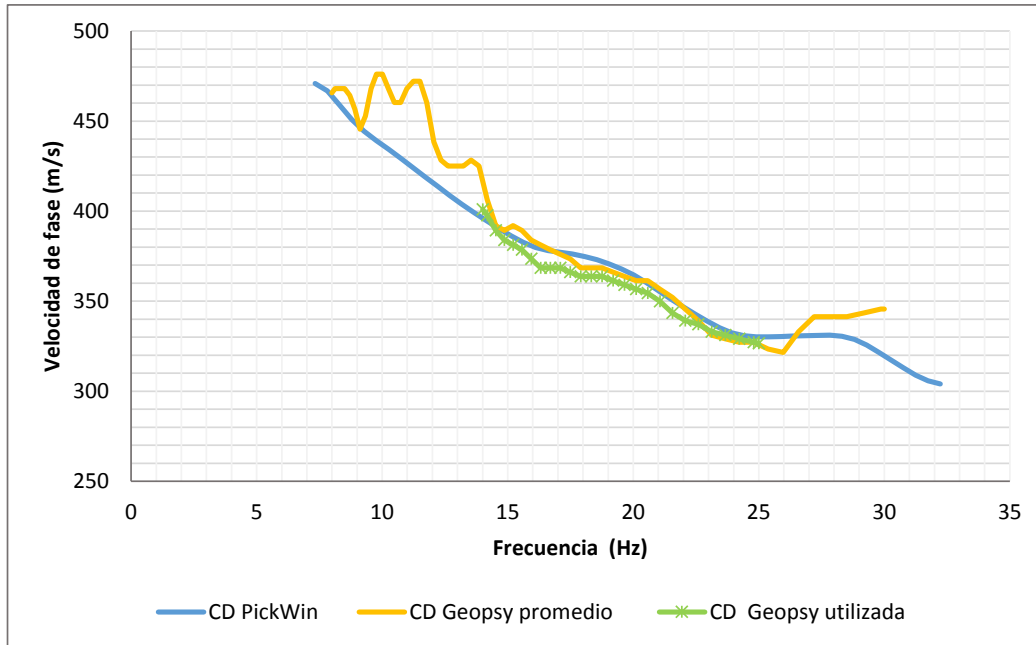


Figura 4-3: Gráfico de curvas de dispersión para Maipú

En este caso, la curva promedio calculada en Geopsy (curva amarilla) no fue utilizada para el proceso de inversión, sino que se optó por utilizar un golpe en particular debido a la mejor resolución en lo que al diagrama de energía respecta, correspondiente a la curva verde en la Figura 4-3. La curva entregada por el programa PickWin fue calculada golpe por golpe hasta elegir el de mejor resolución que es la representada por el color azul en la Figura 4-3.

Se puede ver en la curva promedio como hacia los extremos se pierde claridad en la tendencia sin que pueda ser justificado por pérdida de información en esas frecuencias. Si esa curva se hubiese invertido, el resultado sería un perfil de velocidad de onda de corte erróneo. Por eso se debe tener especial cuidado en tomar en cuenta los antecedentes geotécnicos que se pueda tener de cada lugar de medición, para así poder determinar una curva de dispersión acorde con las propiedades geotécnicas del sector de estudio.

En el proceso de inversión, la curva obtenida por el software PickWin fue utilizada en su totalidad de acuerdo a lo planteado por el ingeniero de Idiem. Junto con la curva de dispersión obtenida por Geopsy, correspondiente a la curva verde, ninguna fue suavizada ni vuelta a muestrear al momento de realizar el proceso de inversión. Los parámetros de entrada para la inversión a realizar en Geopsy fueron 4 estratos con velocidad de onda de corte desde 150 m/s hasta 1000 m/s repartidos en una profundidad de 50m. Para el caso del software PickWin éste utiliza una inversión similar a la utilizada en la refracción sísmica en donde no es necesario ingresar parámetros iniciales, como los anteriores mencionados. El perfil de velocidad de onda de corte encontrado mediante ambos métodos se presenta en la Figura 4-4.

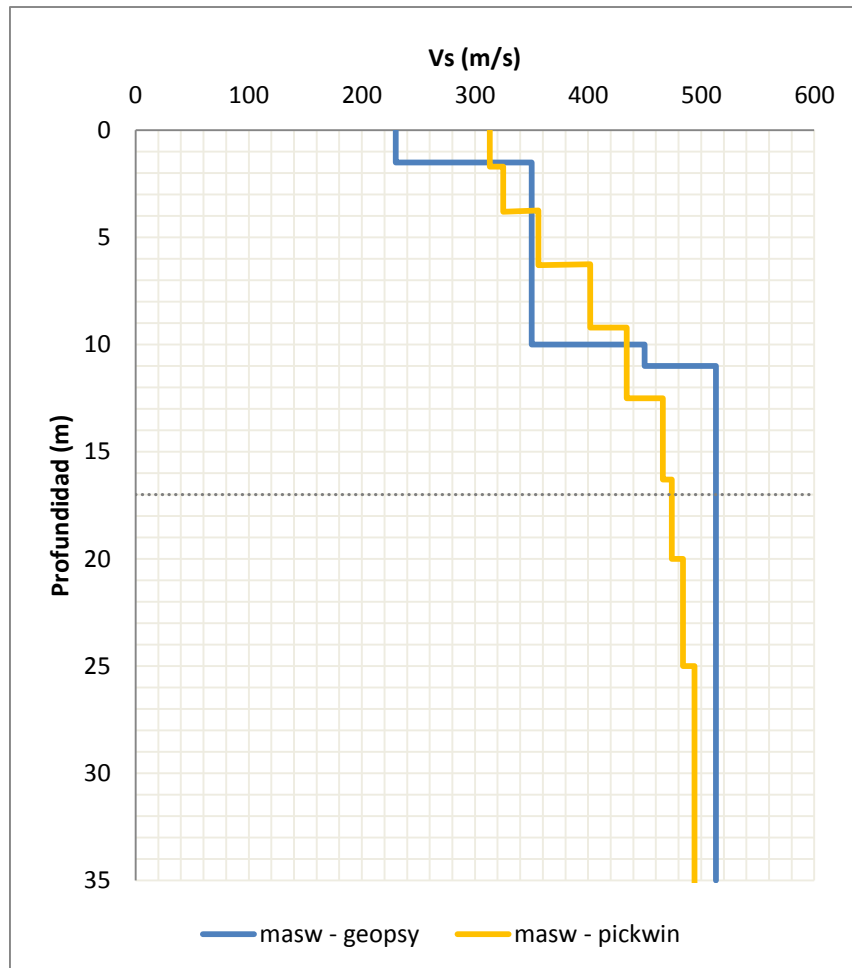


Figura 4-4: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Maipú

La línea gris segmentada corresponde a la validez en profundidad del ensayo. De acuerdo a la velocidad de fase asociada a la menor frecuencia de la curva verde de la Figura 4-3, se puede ver que:

$$\lambda_{\max} \approx \frac{350}{12} \approx 30m$$

$$z_{\max} \approx \frac{\lambda_{\max}}{2} \approx 15m$$

La principal diferencia que se aprecia del gráfico anterior es la cantidad de estratos que utiliza el programa PickWin en la inversión. Debido a que el proceso de inversión es una “caja negra” en dicho software no se tiene un control en el proceso, a diferencia del software Geopsy, el cual permite discretizar el terreno y darle un rango de velocidades en donde puede calzar la inversión.

La velocidad de onda de corte en los primeros 30 m para este sector y de acuerdo a cada método es de:

Tabla 4-1: Velocidad de onda de corte para Maipú

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Geopsy	428
V_{S30} PickWin	427

4.3 Peñalolén

En la estación sismológica de Peñalolén se realizó un ensayo MASW de 12 geófonos espaciados cada 5m y con una distancia de 8m entre la fuente y el primer sensor. Tal como en el caso anterior, se registraron 5 golpes independientes en ventanas de 8 segundos de medición.

En la Figura 4-5 se presenta el sector en donde se realizó el ensayo, correspondiente a una franja de terreno paralela a la calle trasera del hospital Luis Tisné.



Figura 4-5: Disposición en terreno de ensayo MASW en Peñalolén

Siguiendo con el procedimiento, se obtuvo una curva de dispersión con el programa PickWin y con el software Geopsy se obtuvo una curva promedio, al juntar los 5 golpes en un solo gráfico. El resultado obtenido en el software Geopsy se presenta en la Figura 4-6.

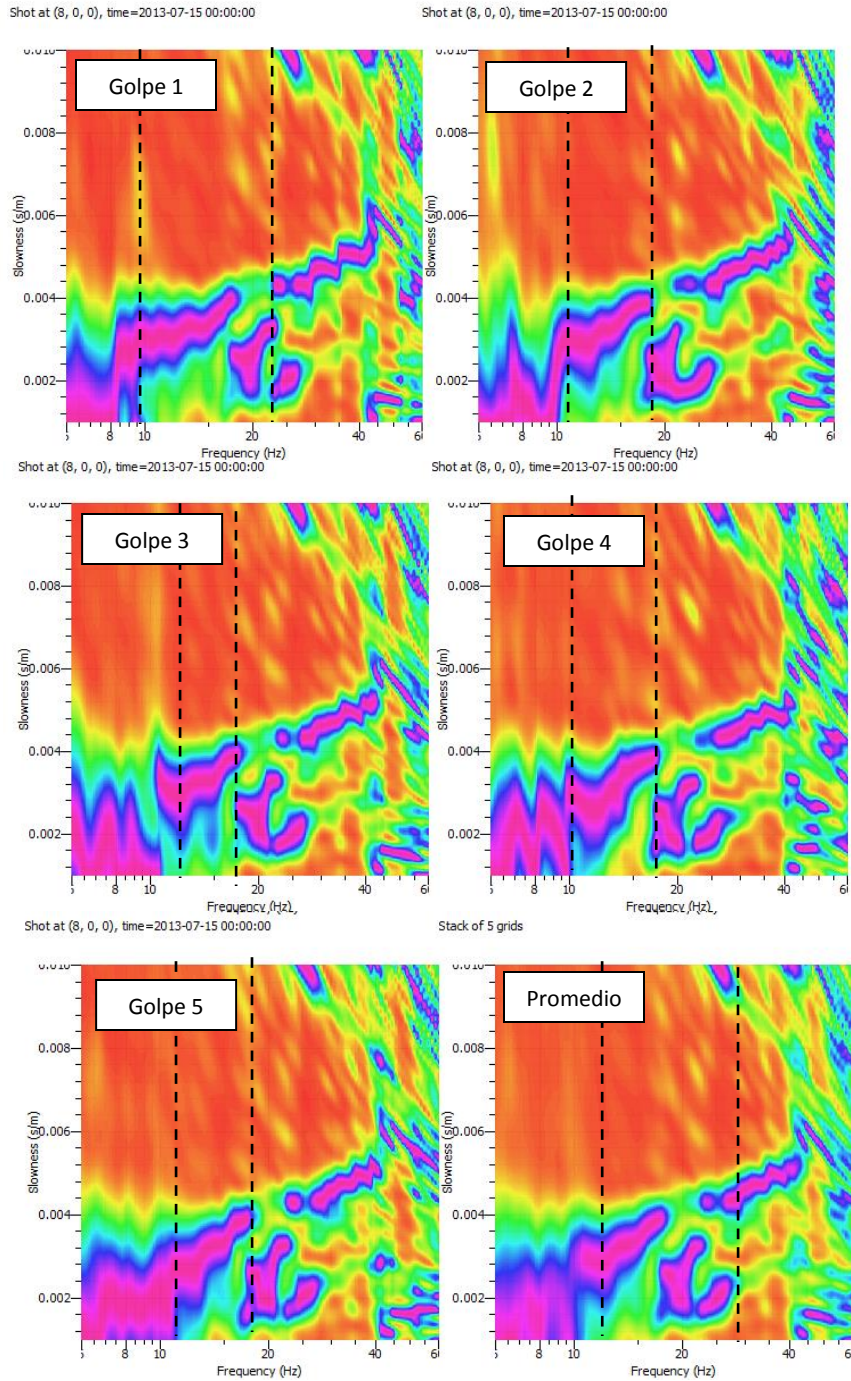


Figura 4-6: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy

En curva promedio se dejó fuera del análisis un pequeño tramo de bajas frecuencias ya que se aleja de la tendencia de la dispersión. Las curvas se presentan en la Figura 4-7.

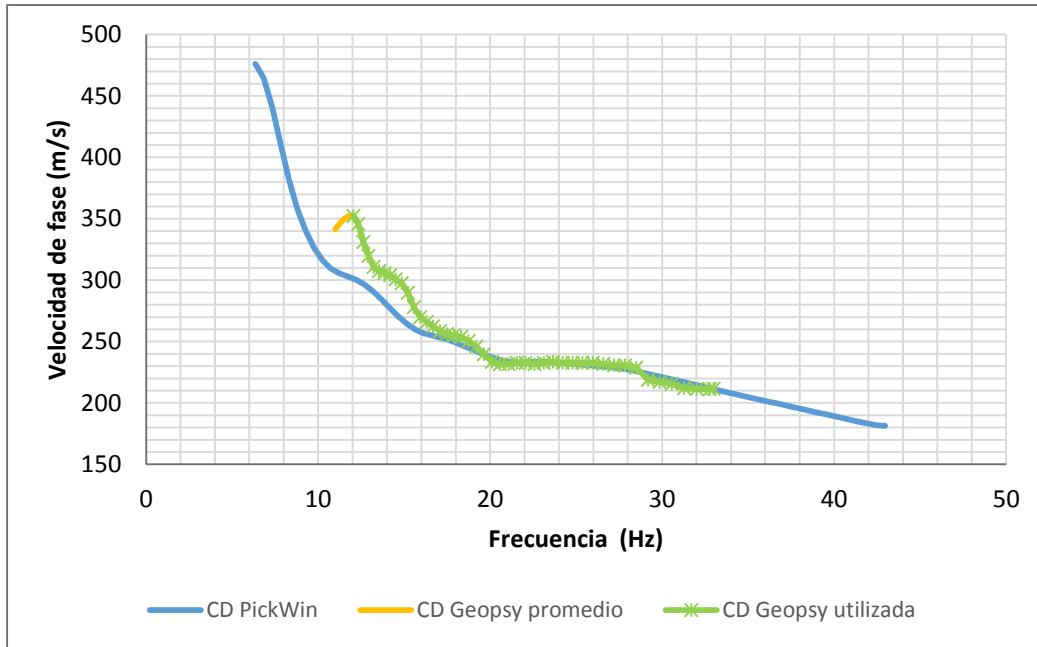


Figura 4-7: Gráfico de curvas de dispersión para Peñalolén

Como se ve en la Figura 4-7, existen desviaciones entre las curvas entregadas por ambos programas aunque se mueven en rangos de frecuencias similares. Esto puede ser debido a que con el PickWin se elige un solo golpe para el análisis y con el Geopsy se realizó en este caso, un stack de los 5 golpes para disminuir el ruido y corroborar el rango de frecuencias en donde es válida la dispersión. La curva verde es la utilizada en el proceso de inversión.

El perfil de velocidades de onda de corte asociado a las curvas de dispersión antes presentadas se muestra en la Figura 4-8.

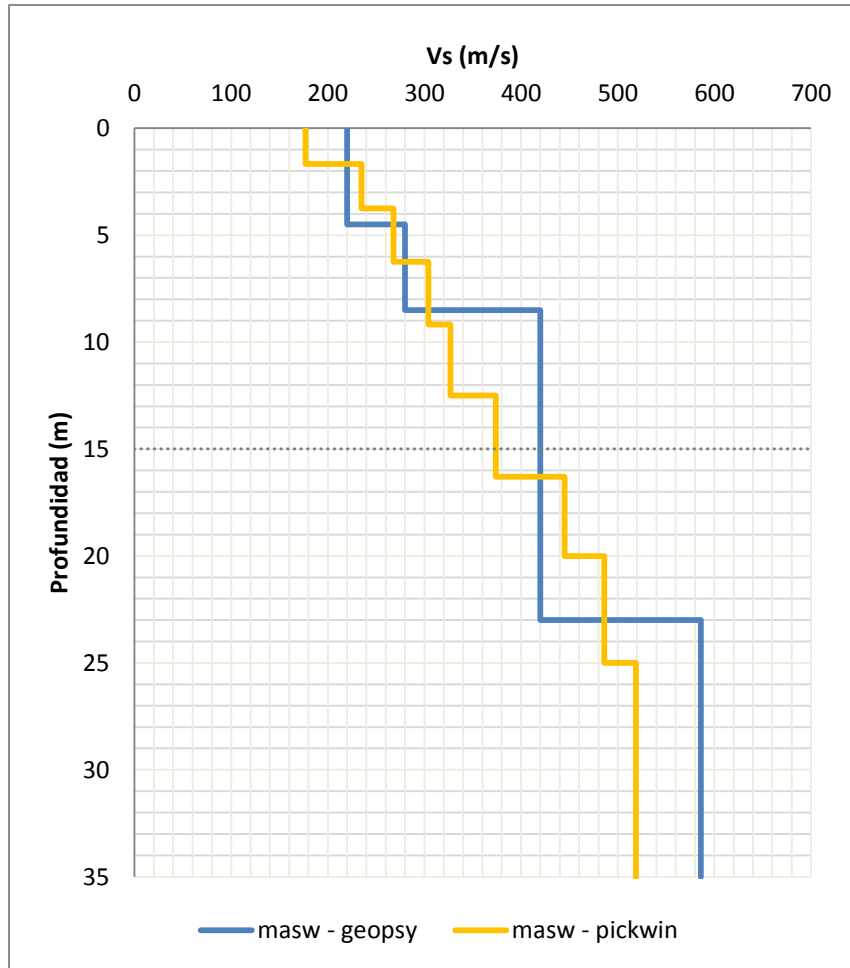


Figura 4-8: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Peñalolén

Nuevamente, la validez del ensayo en profundidad está representada por la línea gris segmentada en los 15 m de profundidad.

En este caso también se aprecia la diferencia en la cantidad de estratos identificados en ambos programas, sin embargo ambas curvas presentan un aumento gradual de la velocidad de onda de corte en profundidad, como es de esperarse de acuerdo a la estratigrafía de este sector, presentada anteriormente en la Tabla 3-5.

La velocidad de onda de corte en los primeros 30m para este sector y de acuerdo a cada método es de:

Tabla 4-2: Velocidad de onda de corte para Peñalolén

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Geopsy	369
V_{S30} PickWin	350

4.4 Casablanca

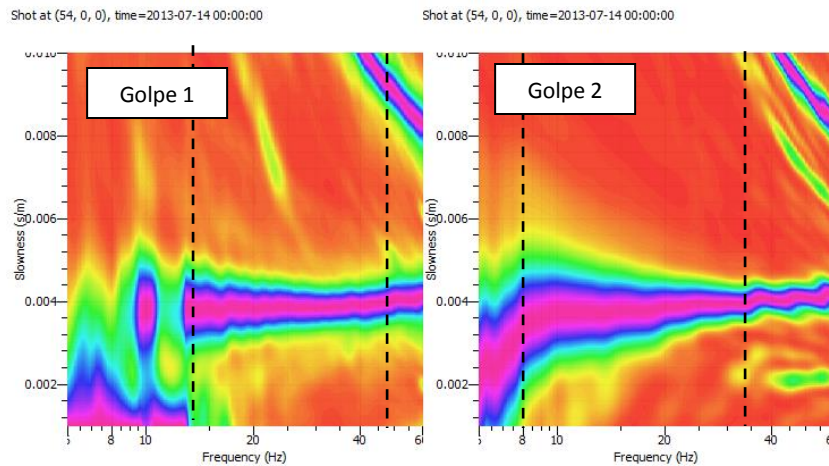
En este sector, la configuración anterior cambia al tener los geófonos espaciados cada 4m de acuerdo a la extensión del terreno, además la separación entre la fuente de impacto y el primer geófono es de 10 m. Lo que no cambia es la adquisición de datos, ya que fueron 5 golpes independientes tomados en ventanas de 8 segundos cada uno.

Como se puede apreciar en la Figura 4-9, los geófonos fueron instalados en maceteros rellenos con tierra del sector debido a que el terreno natural se encontraba demasiado duro para clavar los geófonos o incluso la estaca de metal lo cual podría significar problemas en las mediciones al no asegurar que los geófonos se mantuvieran de forma vertical durante todo el ensayo.



Figura 4-9: Disposición en terreno de ensayo MASW en Casablanca

Al igual que en los casos anteriores, se analiza en el software Geopsy cada golpe por separado y luego se realiza el stack de éstos para determinar la curva y el rango de frecuencias para la inversión. En la Figura 4-10 se presentan los golpes por separado y el último gráfico corresponde al stack de los 5 golpes-



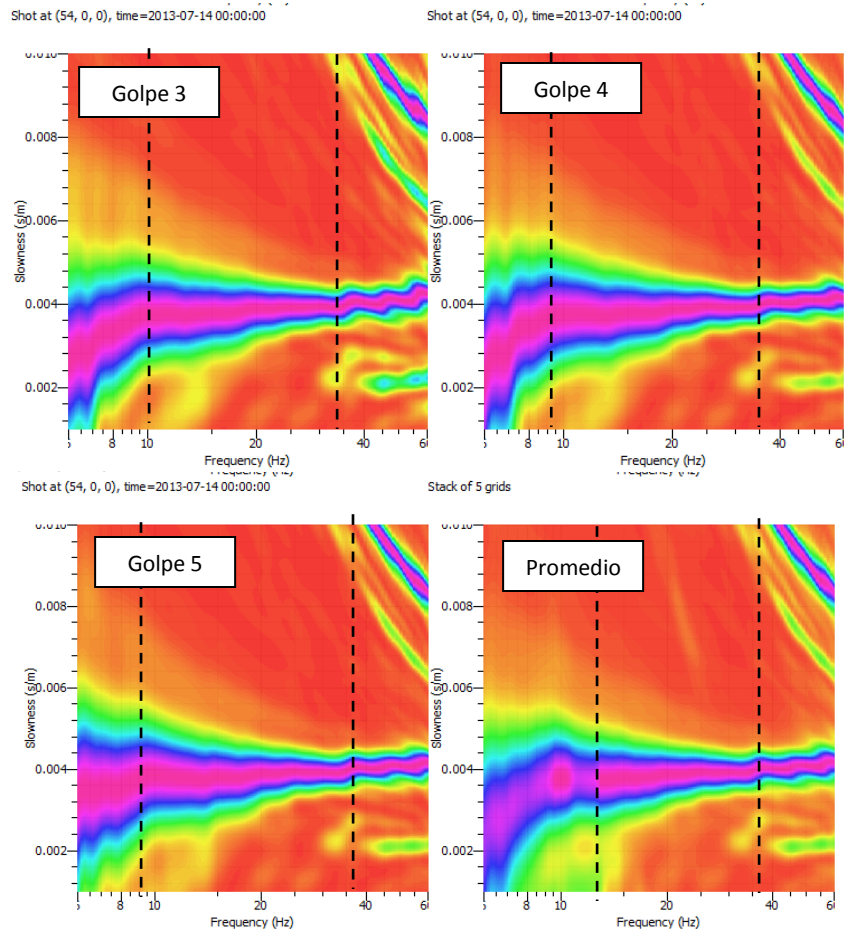


Figura 4-10: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy

Las curvas de dispersión encontradas por ambos softwares se presentan en la Figura 4-11.

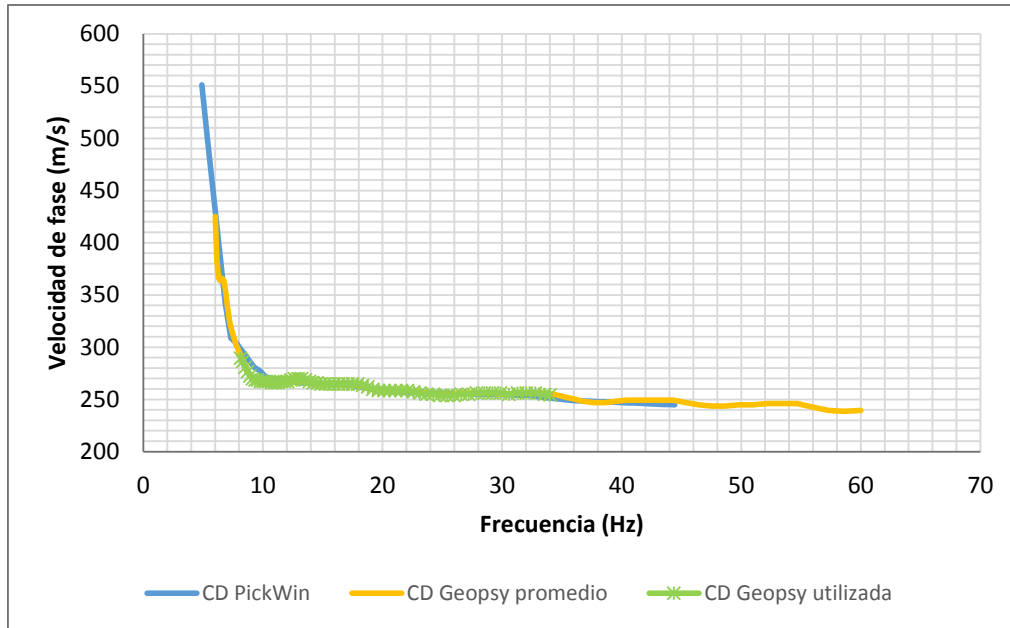


Figura 4-11: Gráfico de curvas de dispersión para Casablanca

Se puede ver que la curva obtenida con el software PickWin coincide con la curva promedio obtenida con el software Geopsy. Nuevamente la curva verde representa el tramo de frecuencia y velocidades de fase utilizadas para la inversión, correspondiente al Golpe 3 de la Figura 4-10.

De acuerdo a la estratigrafía del sector, presentada en el Capítulo 3, se puede justificar que debido a que el terreno presenta una columna de un poco más de 40m de intercalaciones de arenas con arcillas de bajos espesores no se tiene tanta desviación en las curvas de dispersión. Ambos métodos entrega curvas de dispersión en rangos de frecuencia similares.

De la misma manera, en la Figura 4-12 donde se presentan los perfiles de velocidad de onda de corte, es en los primeros 15 metros en donde no se tiene mayor diferencia entre los valores de ambos métodos; ya en profundidad de empiezan a separar las curvas.

Esta diferencia está asociada al rango de validez del ensayo en profundidad, de acuerdo a frecuencia válida utilizada, la cual corresponde a la línea gris segmentada. De acuerdo a la Figura 4-11, la frecuencia mínima de la curva de dispersión es de 8 Hz asociada a 300 m/s de velocidad de fase, con ello se tiene que:

$$\lambda_{\max} \approx \frac{300}{8} \approx 38m$$

$$z_{\max} \approx \frac{\lambda_{\max}}{2} \approx 19m$$

Esto quiere decir que hasta los 19 m se tienen valores confiables de la estimación de la velocidad de onda de corte, que es hasta donde aproximadamente las curvas de cada método tienen rangos de velocidad similar.

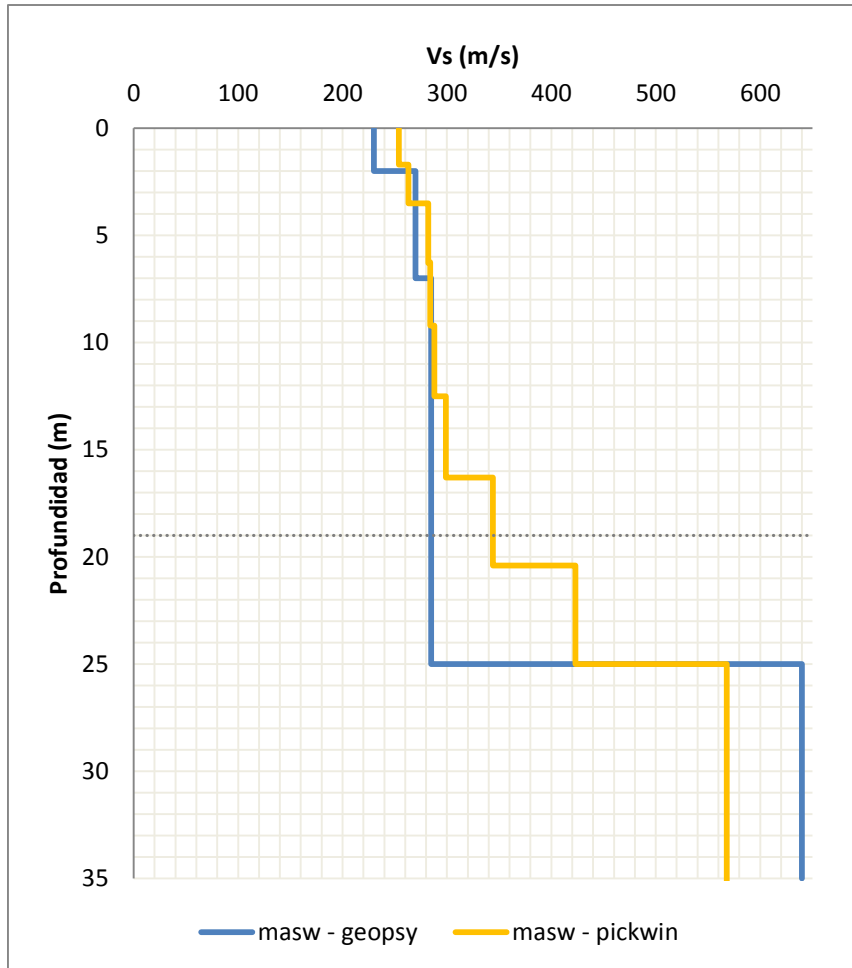


Figura 4-12: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Casablanca

De igual manera, se tiene que la velocidad de onda de corte en los primeros 30m para este sector y de acuerdo a cada método es de:

Tabla 4-3: Velocidad de onda de corte para Casablanca

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Geopsy	324
V_{S30} PickWin	335

4.5 Melipilla

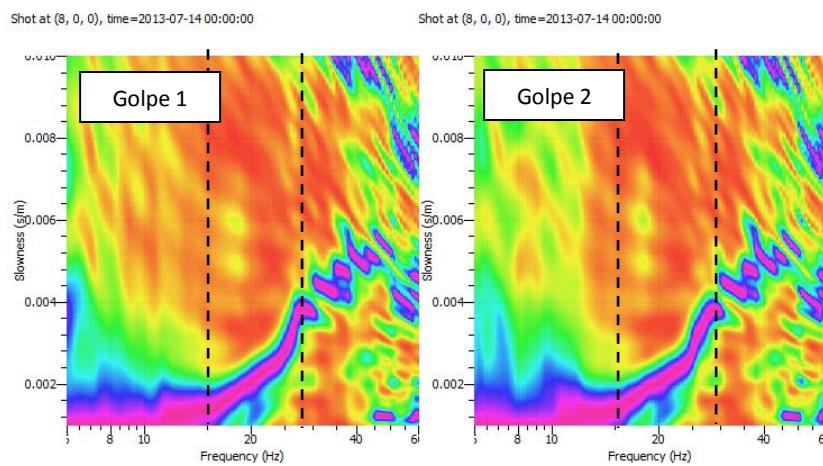
En la estación de Melipilla no fue posible realizar el ensayo en las cercanías del punto de sondaje, puesto que no se daban las condiciones de terreno ya que aunque se pudiesen instalar los geófonos en la vereda con ayuda de los maceteros, la fuente necesariamente iba a impactar o la vereda o el pavimento. Por ello el ensayo fue trasladado hacia el sector noreste en donde se

encontró una franja de terreno en donde se pudo ejecutar el golpe de caída. En la Figura 4-13 se ven las condiciones de este terreno.



Figura 4-13: Disposición en terreno de ensayo MASW en Melipilla

El resultado del análisis f-k para cada golpe y el stack de estos se presenta en la Figura 4-14.



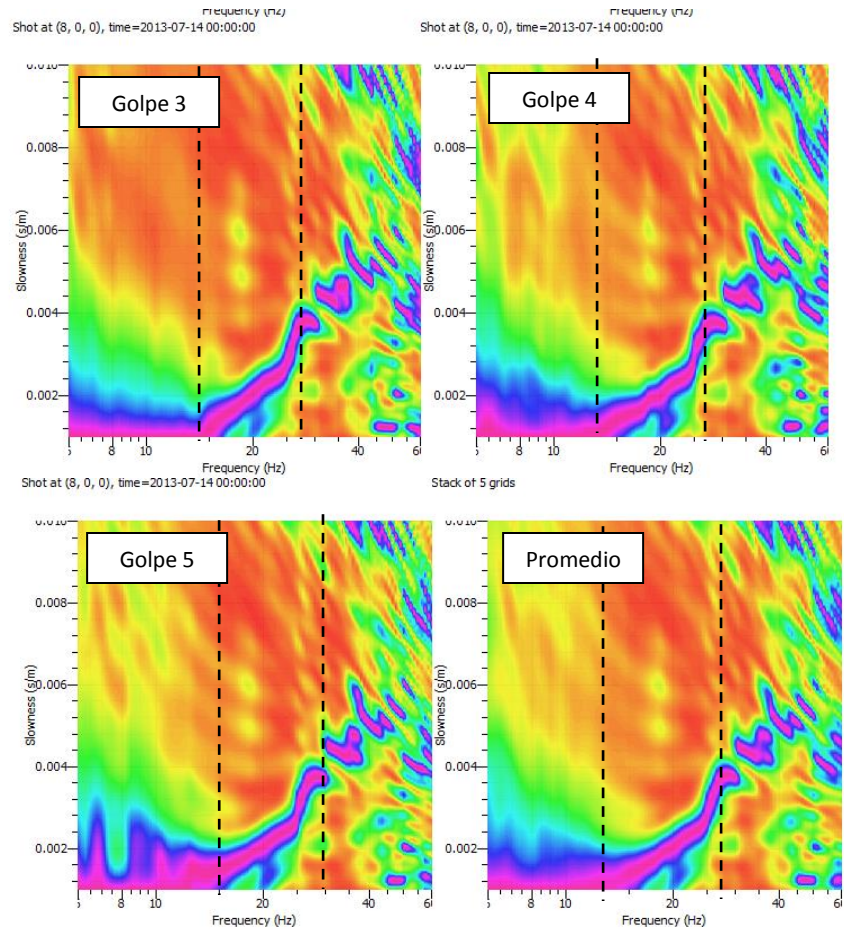


Figura 4-14: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy

Las curvas de dispersión obtenidas mediante los dos softwares se presentan en la Figura 4-15.

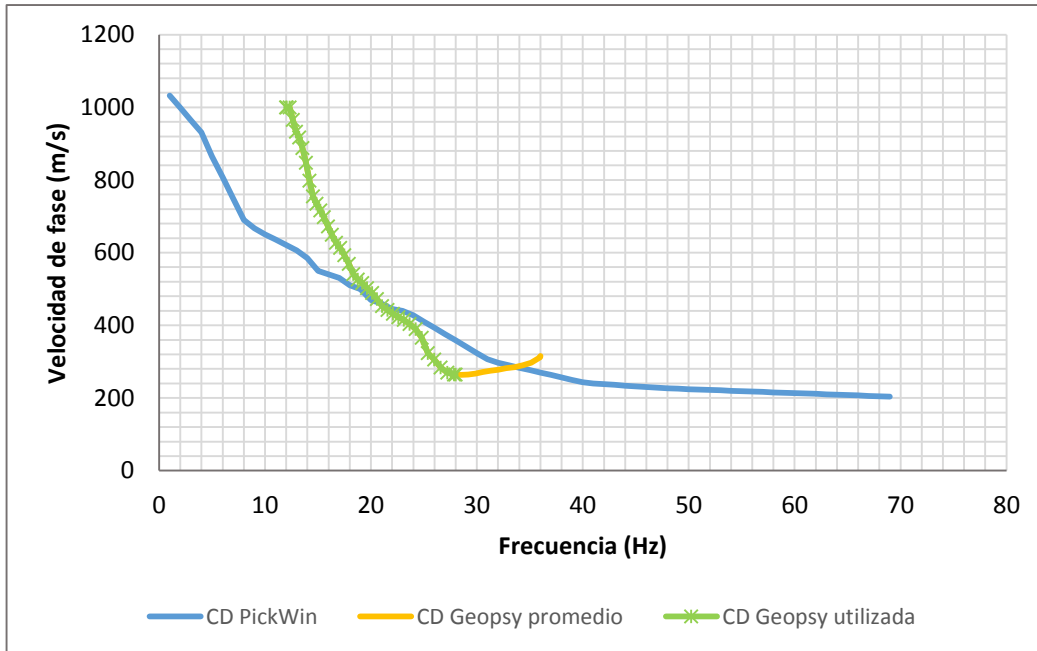


Figura 4-15: Gráfico de curvas de dispersión para Melipilla

En este caso se tiene una gran diferencia en la inclinación de las curvas. Según PickWin a pequeñas frecuencias se tiene una velocidad de fase mayor, la cual va decreciendo con el aumento de la frecuencia. Por otro lado, la curva obtenida de Geopsy se realizó con un corte a los 6 Hz debido a que para frecuencias menores no es posible distinguir con claridad el modo fundamental del suelo y por otro lado, los geófonos de 4,5 Hz de frecuencia no permiten obtener de manera confiable los resultados a tan bajas frecuencias. Lo mismo ocurre para altas frecuencias, ya que este tipo de geófonos tiene su frecuencia de corte a los 80 Hz según sus especificaciones técnicas.

Los perfiles de velocidad de onda de corte asociados a ambas curvas se presenta en la Figura 4-15.

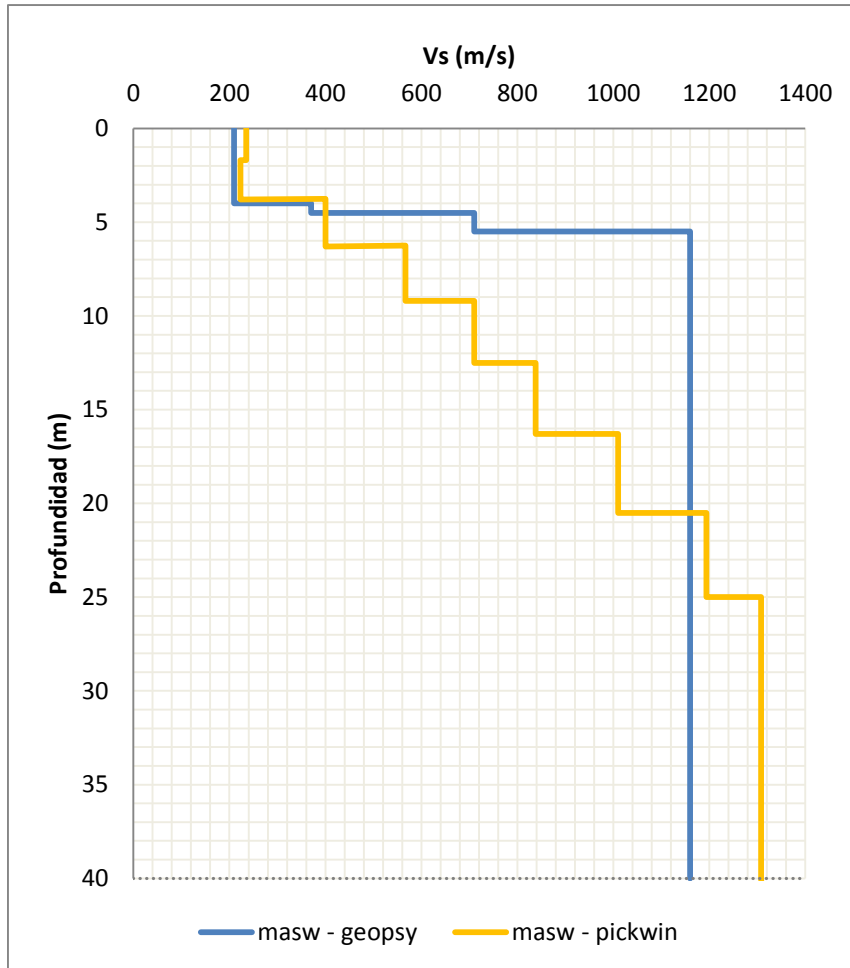


Figura 4-16: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Melipilla

En ese caso, al tener una velocidad de fase bastante alta para bajas frecuencia, la profundidad de validez del ensayo es cercana a los 40 m.

De esta figura se puede ver la diferencia en los perfiles obtenidos. Nuevamente el software PickWin entrega un perfil con un aumento gradual de V_s con la profundidad mientras que el perfil de Geopsy entrega que cerca de los 5m de profundidad se encuentra un estrato altamente competente con un aumento de velocidad importante, llegando por sobre los 1000 m/s. Si se revisa la estratigrafía de este sector, de acuerdo a la Tabla 3-11 desde los 6m aparece un estrato de gravas al cual se le atribuye este aumento de velocidad.

Calculando la velocidad de onda de corte en los primeros 30m de acuerdo a cada método, se puede apreciar una diferencia importante en los valores, cercano a los 90 m/s. La Tabla 4-4 presenta estos valores.

Tabla 4-4: Velocidad de onda de corte para Melipilla

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Geopsy	699
V_{S30} PickWin	612

4.6 Lolleo

La estación de Lolleo corresponde a una estación de monitoreo de la Universidad de Chile y no está incluida en los reportes de Idiem de la RENADIC. En este sector se realizó un ensayo lineal con fuente activa con una separación de 5 m entre geófonos, y 8 m entre la fuente y el primer geófono. El registro de datos es el mismo que en las otras estaciones, 5 golpes independientes en ventanas de 8 segundos.



Figura 4-17: Disposición en terreno de ensayo MASW en Lolleo

En la Figura 4-18 se presenta el resultado del análisis f-k para los 5 golpes por separado más el stack de éstos realizado en el software Geopsy. Las líneas verticales indican el rango de validez de los datos procesados.

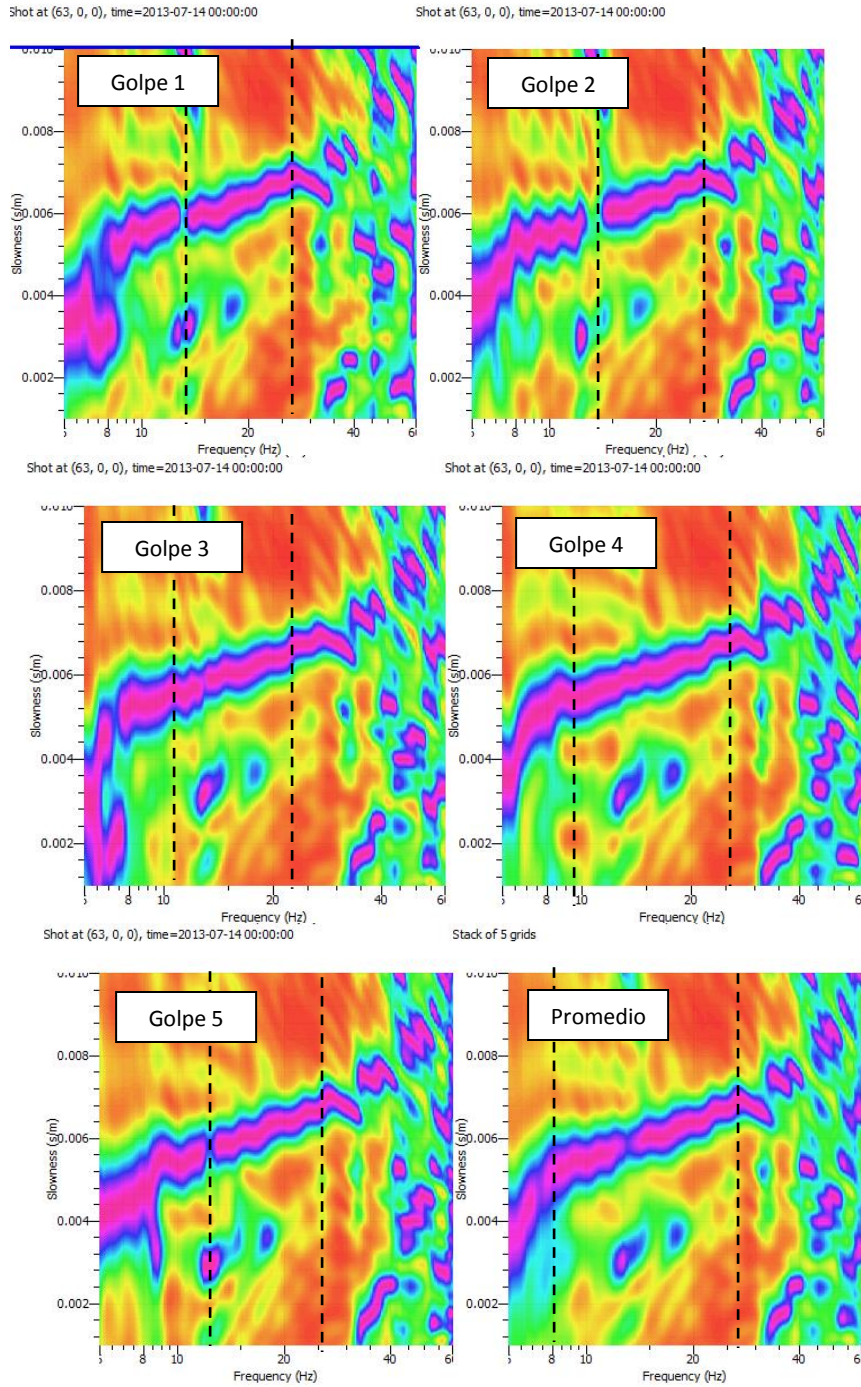


Figura 4-18: Análisis f-k de cada golpe y promedio de éstos en Geopsy

Las curvas de dispersión obtenidas se presentan en la Figura 4-19.

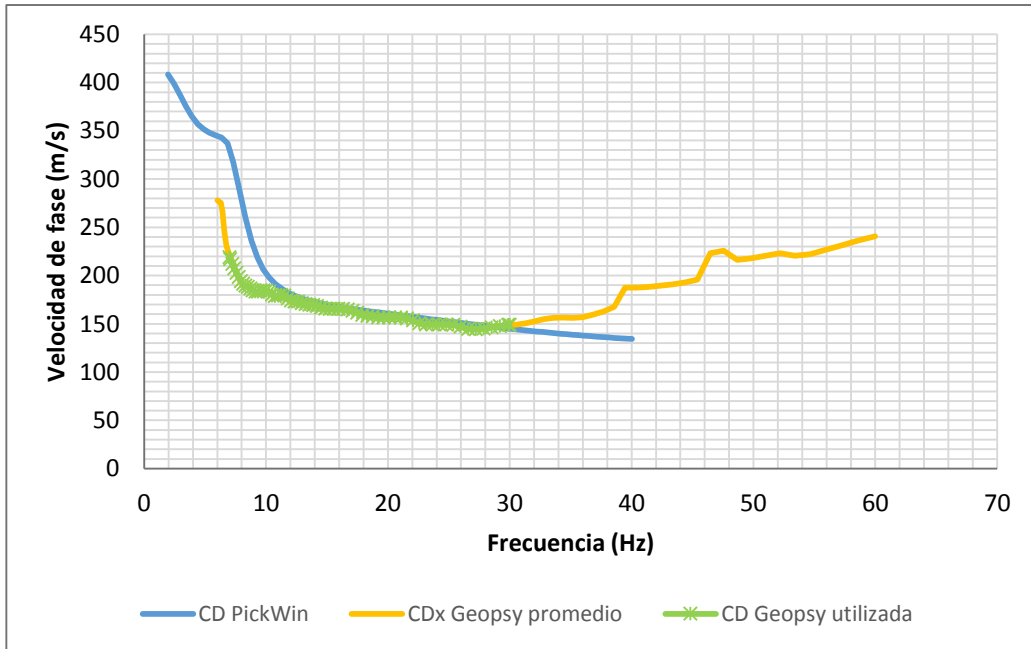


Figura 4-19: Gráfico de curvas de dispersión para Lolloe

Al igual que en el caso de Maipú, para altas y bajas frecuencia existe una diferencia entre las curvas de dispersión. Sin embargo, la curva analizada en Geopsy (curva verde) tiene gran semejanza con la curva en PickWin en ese tramo. Nuevamente, el corte de la curva de dispersión en Geopsy es por la baja resolución de la imagen lo que no permite identificar con certeza la dispersión a más bajas frecuencias que las presentada en la Figura 4-19. Los perfiles de velocidad de onda de corte se presentan en la Figura 4-20.

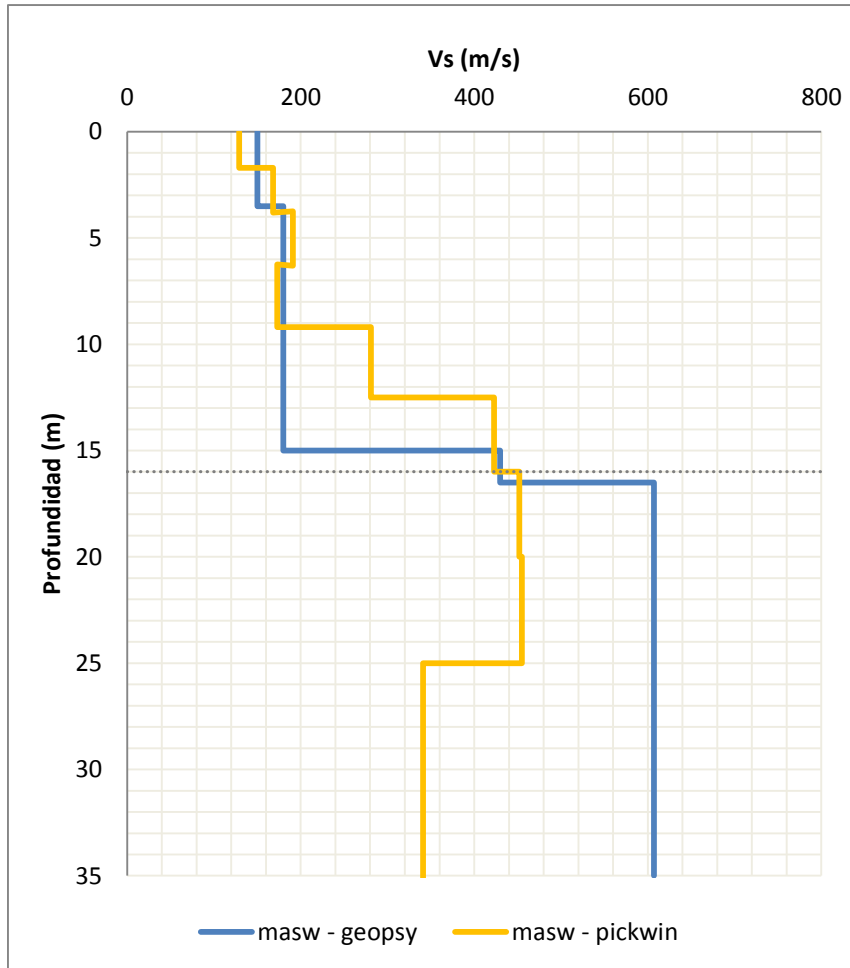


Figura 4-20: Perfil de velocidad de onda de corte según ensayo MASW para Lolloe

De esta figura se puede ver que hasta aproximadamente los 10 m de profundidad ambos perfiles concuerdan en la velocidad, sin embargo a mayor profundidad se ve la presencia de un estrato mucho más competente el cual influye en el modelo. Los valores bajo los 16 m de profundidad pierden validez de acuerdo a los datos de la Figura 4-19.

A continuación se entrega la velocidad de onda de corte en los primeros 30 m para este sector y de acuerdo a cada método.

Tabla 4-5: Velocidad de onda de corte para Lolloe

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Geopsy	266
V_{S30} PickWin	272

CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN MASW vs DOWNHOLE

5.1 Introducción

En este Trabajo de Título se han descrito dos métodos geofísicos para la obtención del perfil de velocidad de onda de corte en profundidad para un terreno. Se ha detallado el procedimiento de cada uno, los recursos que implican tanto de equipos como de terreno, el manejo de datos y procedimientos para llegar al resultado del perfil de V_s .

Para poder discriminar entre un método u otro, en términos de resultado final, se establece la comparación entre los resultados obtenidos mediante *downhole* con ensayos multicanales de ondas superficiales de acuerdo a la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros (V_{s30}). En el desarrollo de este capítulo se plantean las diferencias y semejanzas de los resultados encontrados para las cinco estaciones seleccionadas.

5.2 Comparación *Downhole*

Los datos entregados por Idiem de los ensayos *downhole* realizados en las Estaciones de Maipú, Peñalolén, Casablanca y Melipilla fueron utilizados para calcular nuevamente el perfil de velocidad de onda de corte de acuerdo al Método Directo, ya que los datos entregados por Idiem corresponden a un ensayo con un solo geófono triaxial que se posiciona a diferentes profundidades a lo largo del sondaje.

Posteriormente, la estación de Peñalolén es revisada con el Método de Intervalo Modificado y Método de Snell, considerando los valores de tiempo de llegada en cada postura del geófono y así determinar el intervalo.

5.2.1 *Maipú*

La traza del ensayo se presenta en la Figura 5-1 en donde se vuelve a procesar los datos para obtener un nuevo perfil de onda de corte (línea roja), calculado de acuerdo al Método Directo.

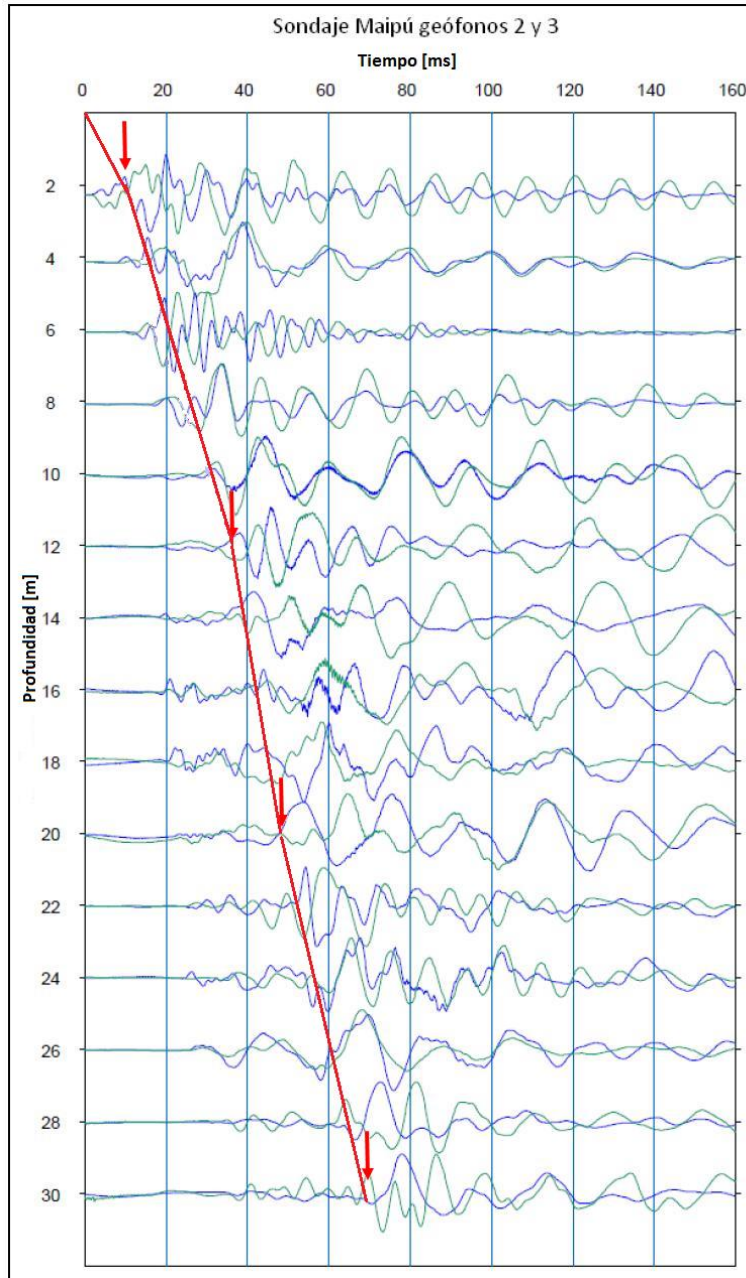


Figura 5-1: Selección de llegadas onda S para *downhole* de Maipú

El perfil de velocidad de onda de corte obtenido de este nuevo análisis se presenta en la Figura 5-2 mediante la curva roja. La curva verde corresponde al perfil entregado por Idiem.

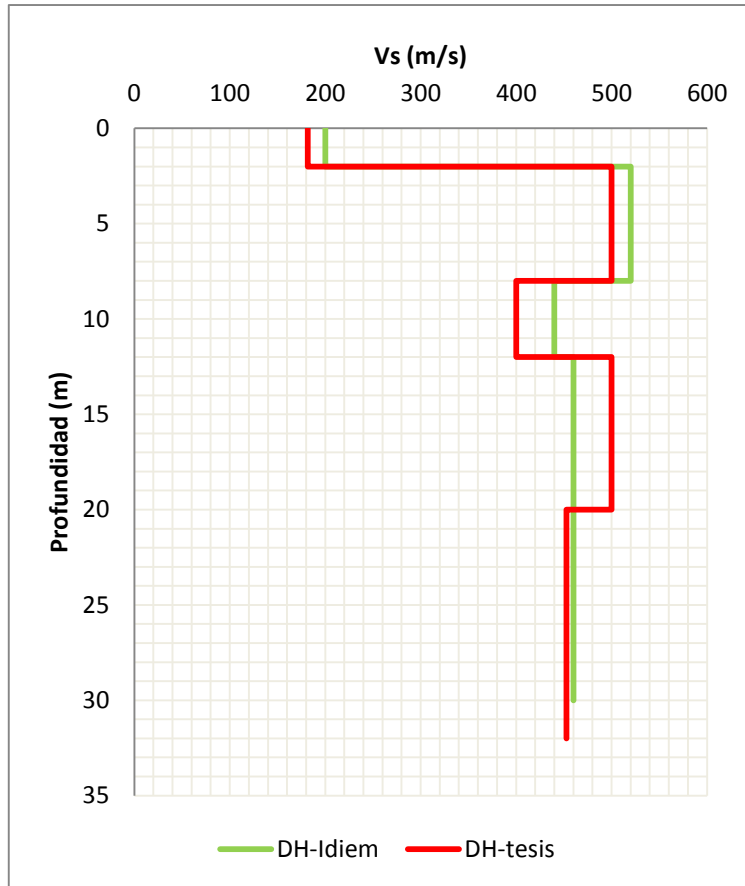


Figura 5-2: perfiles de Vs para Maipú

El valor de V_{S30} obtenido de acuerdo a estas dos curvas se entrega en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Velocidad de onda de corte para Maipú

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Idiem	430
V_{S30} Tesis	422

Ambos análisis identifican el estrato superficial de mayor velocidad y luego una disminución de ésta en profundidad. De acuerdo a la velocidad de onda de corte en los primeros 30 m, no existe mayor diferencia entre los dos análisis.

5.2.2 Peñalolén

En la Figura 5-3 se presenta el análisis realizado a los datos entregados por Idiem. En la Figura 5-4 se presentan los perfiles de velocidad de onda de corte, en rojo la curva de este nuevo análisis y en verde la curva entregada por Idiem.

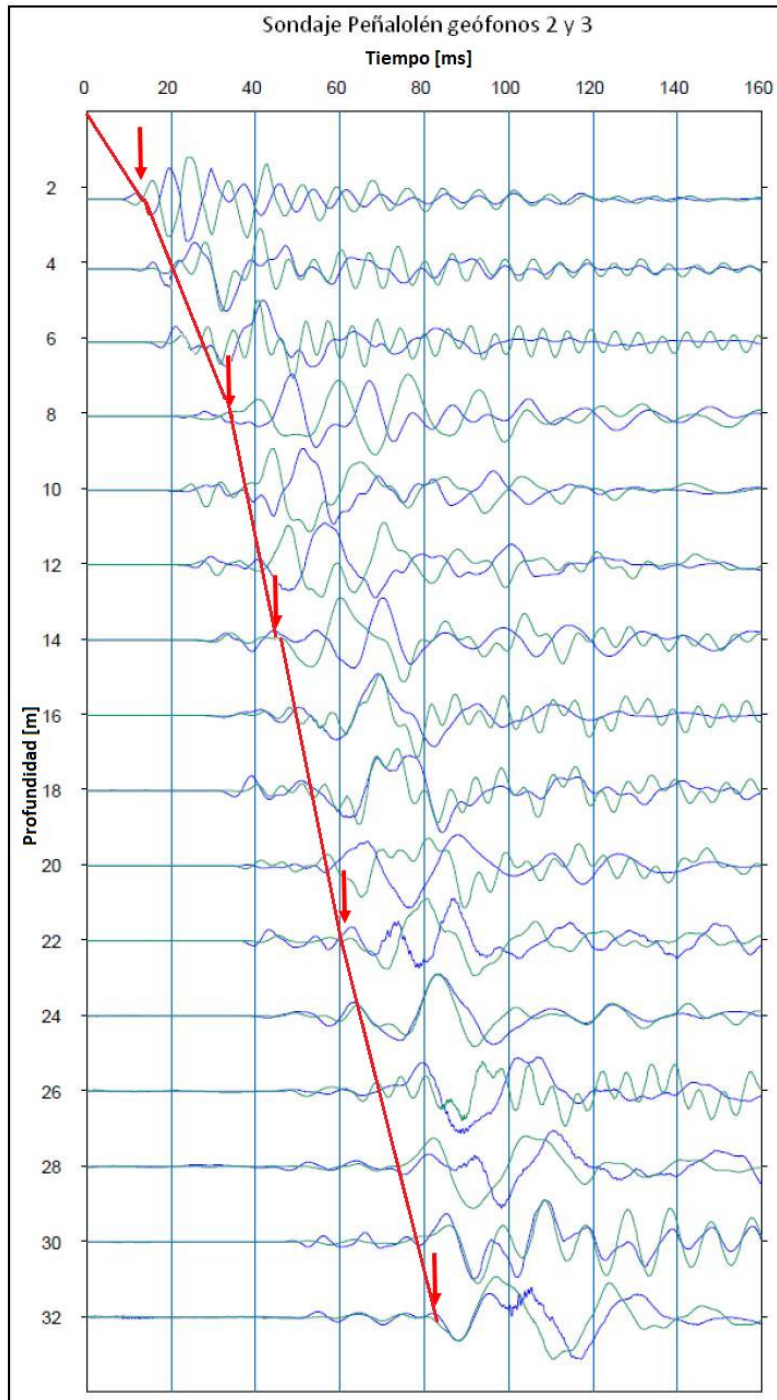


Figura 5-3: Selección de llegadas onda S para *downhole* de Peñalolén

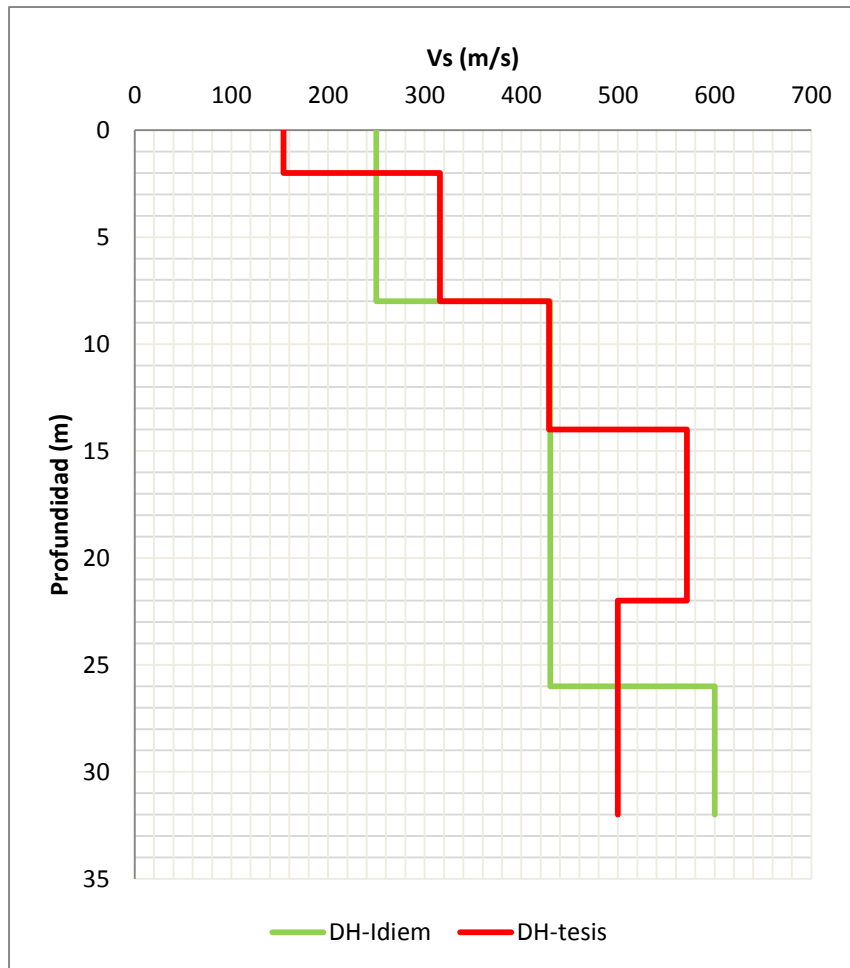


Figura 5-4: perfiles de V_s para Peñalolén

Para este sitio se tiene mayor diferencia en las velocidades estimadas y los estratos de suelo inferidos. Esto se ve reflejado en el cálculo de la velocidad promedio de los 30 primeros metros, como se presenta en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Velocidad de onda de corte para Peñalolén

V_{s30} [m/s]	
V_{s30} Idiem	373
V_{s30} Tesis	400

5.2.3 Casablanca

El análisis realizado a la traza del ensayo *downhole* para el sitio de Casablanca se presenta en la Figura 5-5 a continuación.

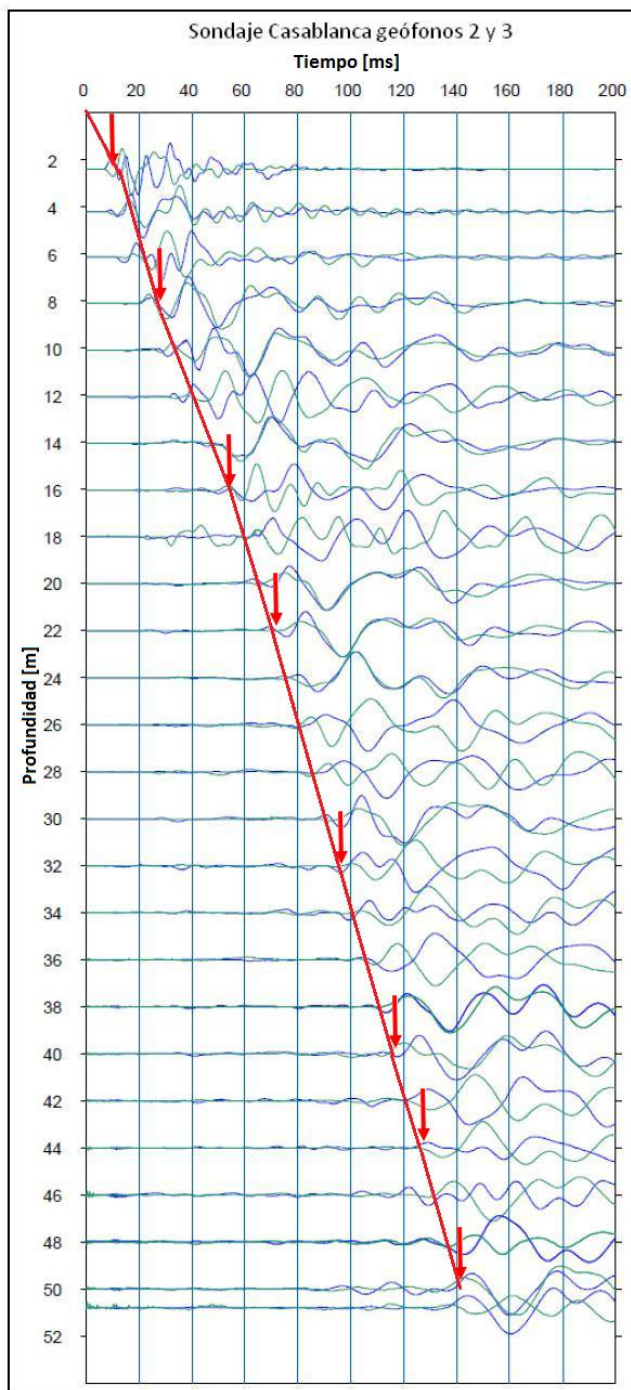


Figura 5-5: Selección de llegadas onda S para *downhole* de Casablanca

El perfil de velocidad de onda de corte obtenido se presenta en la Figura 5-8 en la curva roja, mientras que con la curva verde se entrega el perfil obtenido por Idiem.

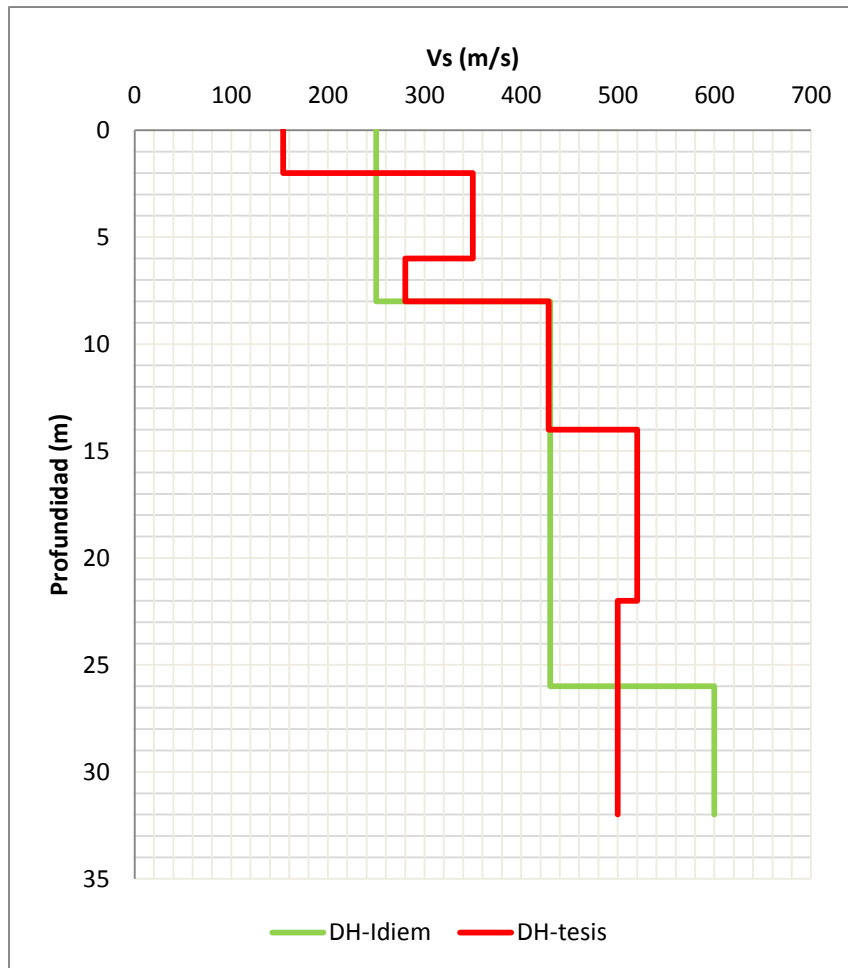


Figura 5-6: perfiles de V_s para Casablanca

Se puede ver bastante diferencia en los metros superiores, en donde se encuentra un estrato de mayor velocidad en los primeros metros en la curva roja. Luego a los 15 m de profundidad se tiene otra desviación, con mayor velocidad de onda de corte. Estas variaciones quedan reflejadas en el valor de V_{S30} , que se entrega en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Velocidad de onda de corte para Casablanca

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Idiem	281
V_{S30} Tesis	341

5.2.4 Melipilla

El informe de diem realizado para este sitio entrega un perfil de velocidad de onda de corte, de 700 m/s uniforme y a partir de los 12 m de profundidad debido a la poca claridad en las trazas de los ensayos.

De acuerdo a lo presentado en la Figura 5-11, en los primeros metros no se tiene claridad en la identificación de la llegada de la onda S (línea roja segmentada), por lo que se consideró el arribo a las 22 ms. Ya en profundidad se puede ver de mejor manera la llegada de la onda S para estimar la velocidad de onda de corte.

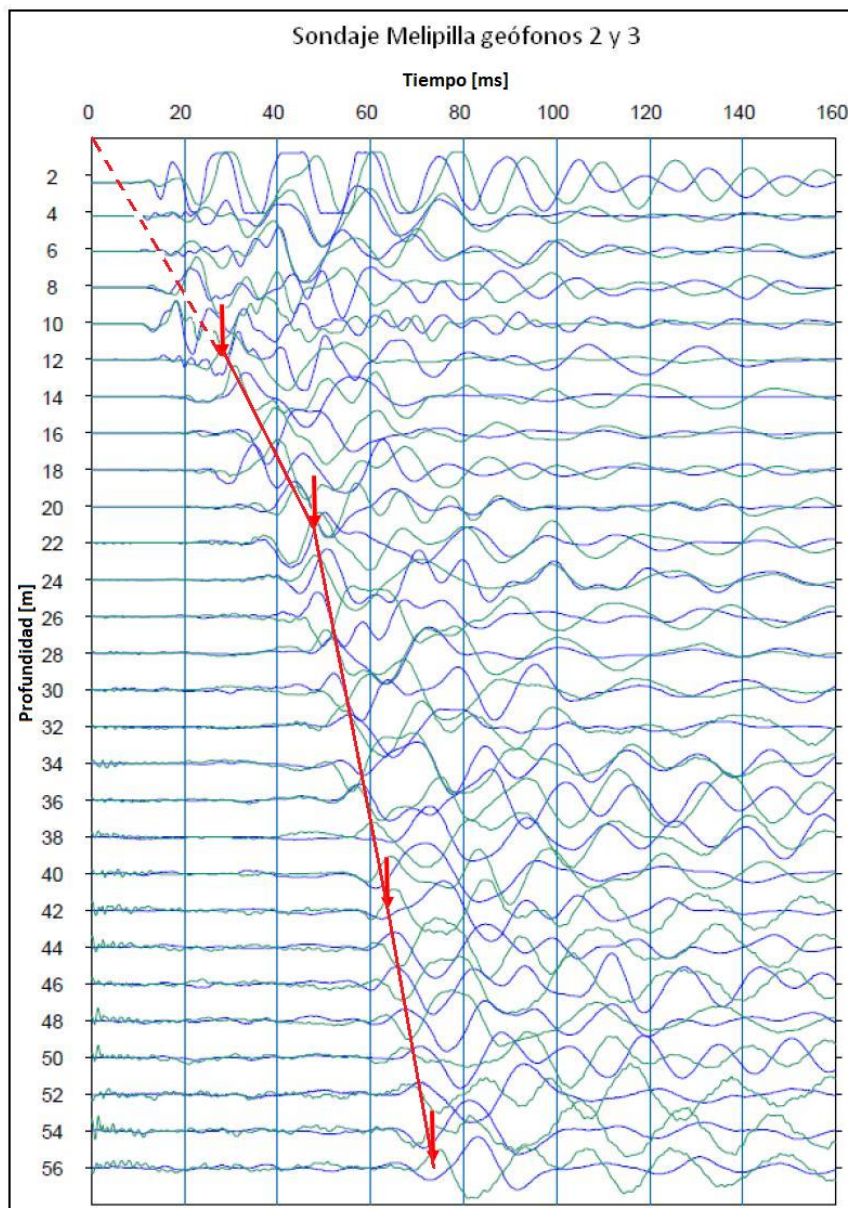


Figura 5-7: Selección de llegadas onda S para *downhole* de Melipilla

La comparación de los perfiles de velocidad se presenta en la Figura 5-8. En ésta se puede ver un primer estrato con velocidad del orden de los 500 m/s hasta una profundidad de 22 metros. Luego hay un aumento importante en la velocidad de onda de corte, subiendo a un valor cercano a los 1.400 m/s.

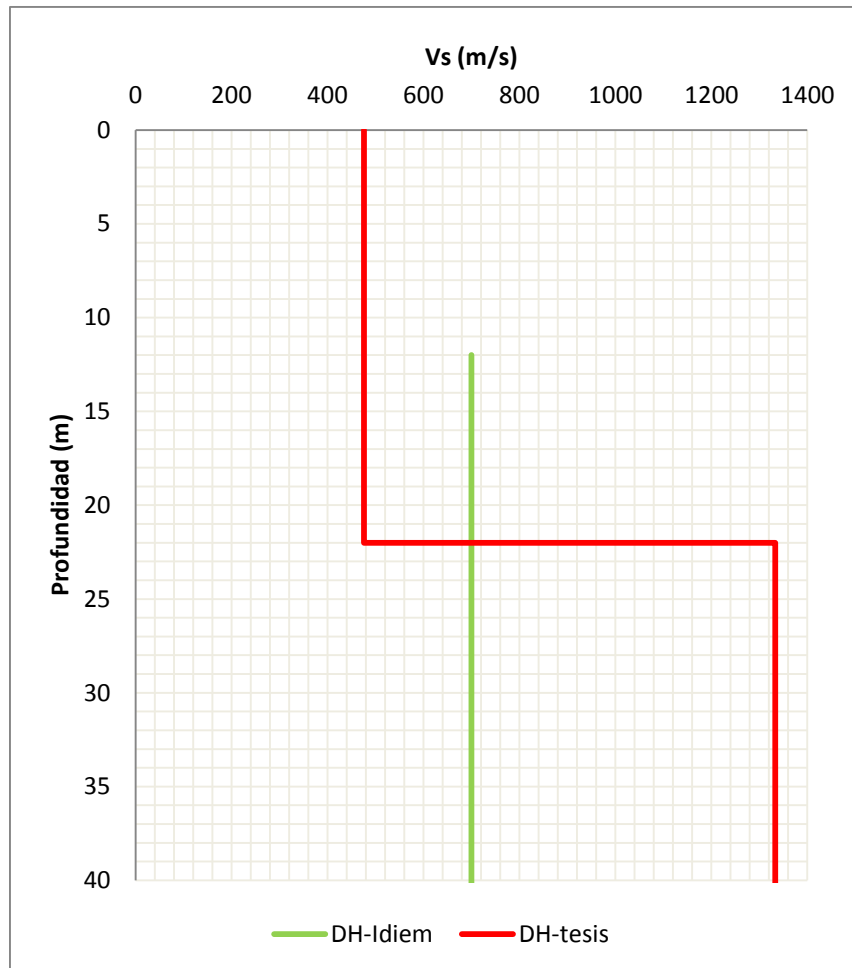


Figura 5-8: perfiles de V_s para Melipilla

A pesar de tener una velocidad mayor el perfil realizado en el nuevo análisis, la velocidad promedio de los 30 primeros metros es menor a la obtenida a partir del perfil de Idiem, tal como se muestra en la Tabla 5-4. Esto se debe a que como este cálculo es ponderado por el espesor del estrato, los primeros 20 m que tienen menor velocidad hacen disminuir el valor de V_{s30} .

Tabla 5-4: Velocidad de onda de corte para Melipilla

V_{s30} [m/s]	
V_{s30} Idiem	700
V_{s30} Tesis	575

5.2.5 Método Intervalo y Ley de Snell

Además de presentar el cálculo con el Método Directo en la sección anterior, se presenta el resultado de realizar el cálculo de acuerdo al Método de Intervalo y Ley de Snell. Para las estaciones de Peñalolén, Casablanca y Melipilla se presentan los perfiles obtenidos por el Método de Intervalo mientras que para Maipú se presenta además el perfil obtenido por el Método de Ley de Snell.

Para el sitio de Maipú, los nuevos perfiles de velocidad de onda de corte se presentan en la Figura 5-9.

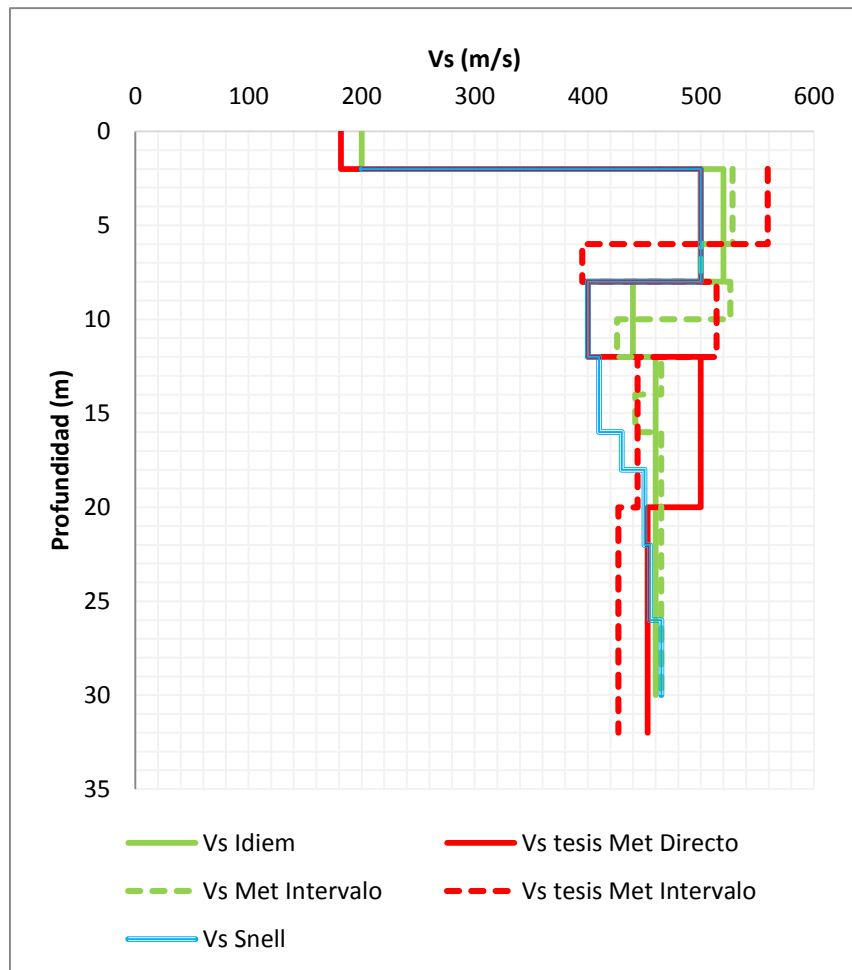


Figura 5-9: Comparación entre métodos de análisis de *downhole* para Maipú

Las líneas continuas verde y roja corresponden al análisis realizado en la sección anterior, con el Método Directo, de acuerdo a los datos entregados por Idiem. Las líneas segmentadas corresponden al análisis realizado con el Método de Intervalo a los datos utilizados en la sección anterior. La línea celeste corresponde al análisis de los datos entregados por Idiem, que se encuentran en el Anexo B, con el Método de Ley de Snell.

Se debe mencionar que para realizar los análisis, como el ensayo de Idiem es realizado solo con un geófono, se consideró el dato anterior al calculado como segundo geófono. Por ello, para profundidades 2 o 4 metros no se tienen valores en los gráficos.

Además, para el Método de Snell, las iteraciones se realizaron considerando que la velocidad de onda de corte cercana a la superficie es correcta como parámetro de entrada. Se puede ver que en las capas superiores, donde hay un cambio de rigidez, ésta afecta el resultado, teniendo una disminución en la velocidad de onda de corte la cual se hace cada vez menor avanzando en profundidad

Como valor de comparación de estos resultados se presenta la Tabla 5-5

Tabla 5-5: Velocidad de onda de corte para Maipú

Método de Cálculo	$V_{S30 \text{ Idiem}}$ [m/s]	$V_{S30 \text{ Tesis}}$ [m/s]
Método Directo	430	422
Método Intervalo	508	426
Ley de Snell	479	-

Para Peñalolén, se obtuvieron las siguientes curvas presentadas en la Figura 5-10.

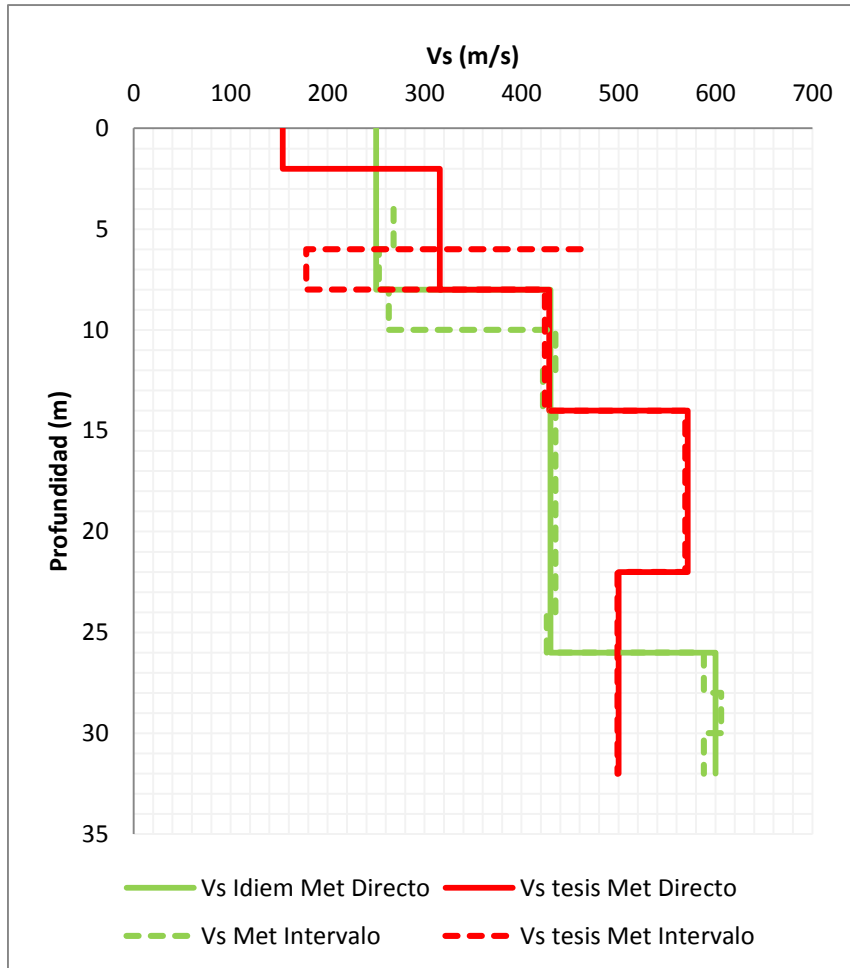


Figura 5-10: Comparación entre métodos de análisis de *downhole* para Peñalolén

De esta figura se puede desprender que para ambas mediciones no existe mucha diferencia entre ambos métodos, sólo pequeñas desviaciones en espesores para la curva del nuevo proceso de datos, llamado “Vs tesis”.

En la Tabla 5-6 se presentan los valores de V_{S30} según los métodos utilizados.

Tabla 5-6: Velocidad de onda de corte para Peñalolén

Método de Cálculo	$V_{S30 \text{ Idiem}}$ [m/s]	$V_{S30 \text{ Tesis}}$ [m/s]
Método Directo	373	400
Método Intervalo	386	470

Para la estación de Casablanca, el resultado del nuevo análisis se presenta en la Figura 5-11 a continuación.

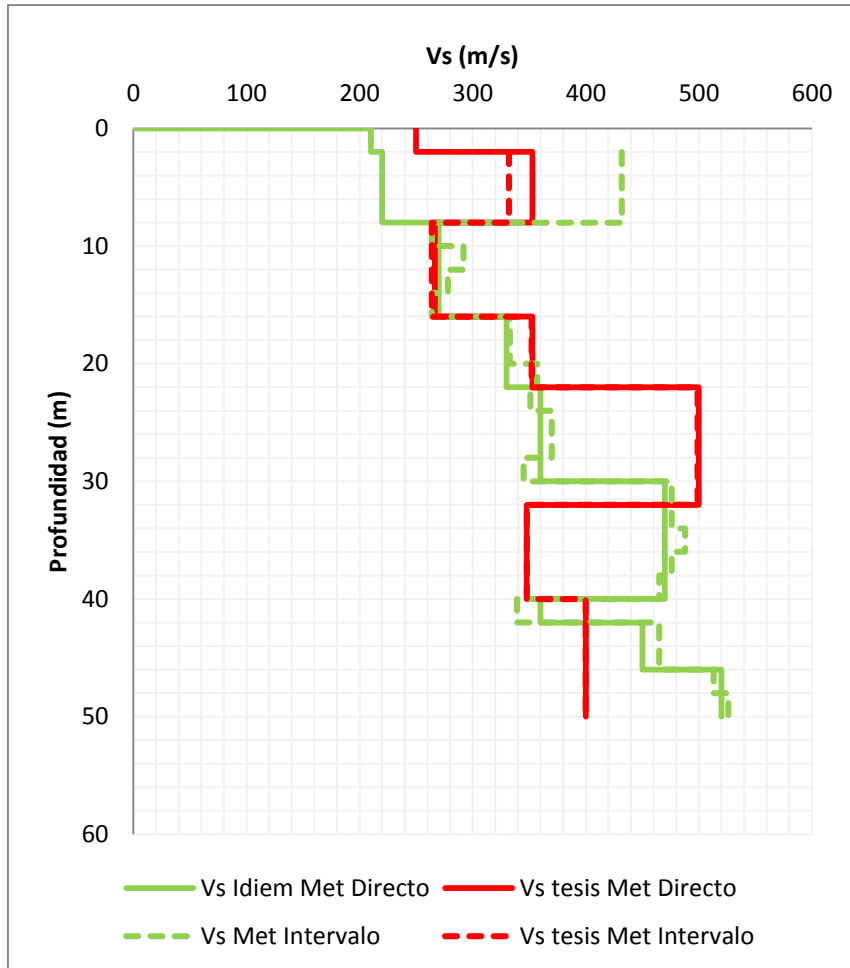


Figura 5-11: Comparación entre métodos de análisis de *downhole* para Casablanca

Para este caso, en los perfiles con los tiempos de llegada deducidos por Idiem, se tiene que en el primer estrato existe una discrepancia entre el Método Directo y el Método de Intervalo. En cambio para los datos analizados completamente en este Trabajo, la discrepancia en el primer estrato es menor y frente a una clasificación de suelo no traería mayor complicación.

En la Tabla 5-7Tabla 5-6 se presentan los valores de V_{S30} según los métodos utilizados.

Tabla 5-7: Velocidad de onda de corte para Casablanca

Método de Cálculo	$V_{S30 \text{ Idiem}}$ [m/s]	$V_{S30 \text{ Tesis}}$ [m/s]
Método Directo	281	341
Método Intervalo	326	334

En el caso de Melipilla, en el informe de Idiem no se entrega un perfil completo de la velocidad de onda de corte en toda la profundidad cubierta con el sondaje. Del informe no se desprende mayor conclusión de por qué se trató así el análisis de datos para este sector. Por otra parte, al revisar las trazas de las ondas P y S para rehacer el cálculo, la identificación de la onda P no tuvo mayores

inconvenientes, pero con respecto a la onda S a ciertas profundidades no se tenía la claridad de identificación de su arribo, tanto al verificar cambio de amplitud como cambios en la frecuencia.

Como resultado del nuevo análisis de *downhole* por el Método Directo, se pudo apreciar un aumento de velocidad de onda de corte en profundidad, encontrando 3 posibles estratos competentes, con velocidades de 500 m/s en los primeros metros hasta sobrepasar los 1.000 m/s. Si se contrastan estos resultados con la estratigrafía tendría sentido las velocidades altas, llegando a considerar el último estrato como roca.

La Figura 5-12 presenta los resultados encontrados en esta estación.

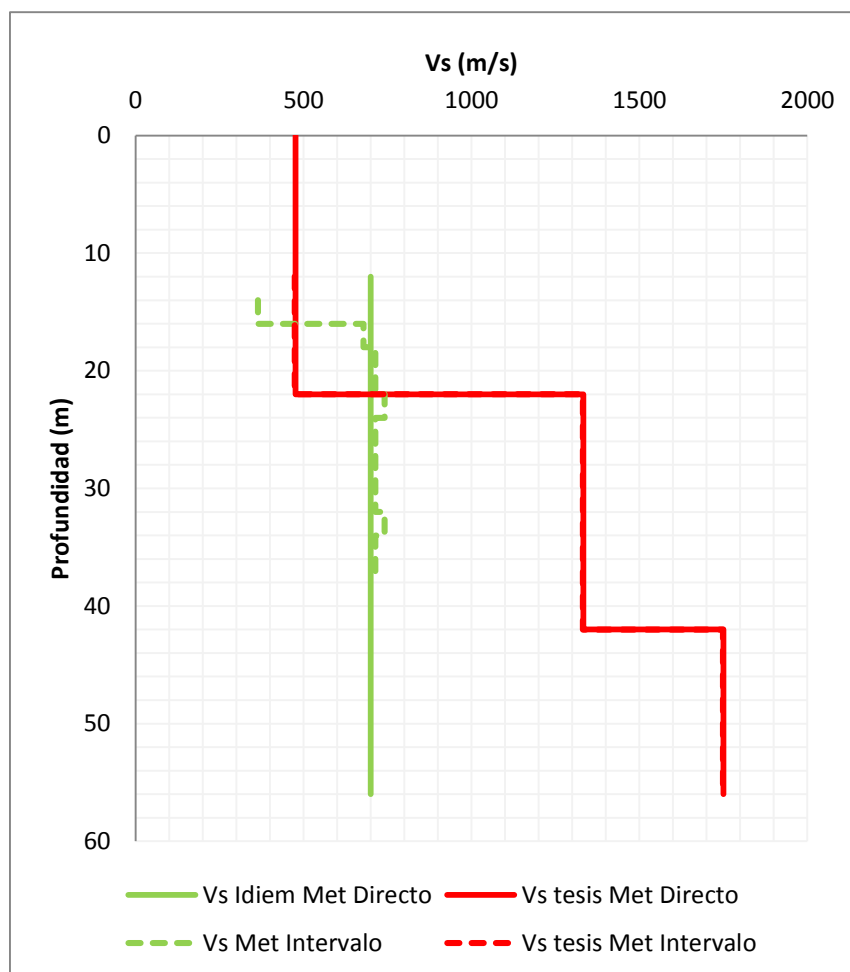


Figura 5-12: Comparación entre métodos de análisis de *downhole* para Melipilla

Los valores de V_{S30} según los métodos utilizados se entregan en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8: Velocidad de onda de corte para Melipilla

Método de Cálculo	V_{S30} Idiem [m/s]	V_{S30} Tesis [m/s]
Método Directo	700	575
Método Intervalo	471	572

Solo para el análisis realizado por Idiem se tienen pequeñas diferencias entre las velocidades encontradas y se podría identificar un estrato superior de calidad geotécnica un poco inferior al estrato principal informado. La velocidad entregada en la Tabla 5-8 de 471 m/s corresponde considerando la baja velocidad desde la superficie hasta los 12 m de profundidad.

Las desviaciones con el Método del Intervalo se pueden justificar con la razón de rigidez, ya que al aumentar la razón de rigidez (V_{s2}/V_{s1}) el error asociado aumenta (Kim et al, 2004). A su vez cuando se tiene que la diferencia de tiempos es negativa, no se puede calcular un valor de V_s y esta misma razón significa un aumento del error en el Método de Intervalo Modificado.

Con respecto al Método de Intervalo Modificado y el de Ley de Snell, si se tiene el estrato superior más rígido que el inferior, la diferencia entre la trayectoria recta y la trayectoria refractada es menor y el error no afecta de manera significativa la determinación del perfil de V_s . Si el caso fuera el contrario, donde la capa inferior es más rígida que la capa superior, la diferencia entre la trayectoria recta y la trayectoria modificada con la Ley de Snell es significativa, lo cual no permite la determinación correcta del perfil de V_s . Este comportamiento se tiene en estratos de 2 capas o más que tengan un aumento o disminución gradual de V_s con la profundidad, por ejemplo en una tercera capa ya el error entre el Método de Intervalo Modificado y el de Ley de Snell ya no es significativo, puesto que la diferencia entre las trayectorias se hace menor con el aumento de velocidad.

Por otro lado, si se tuviera una capa de distinta rigidez entre dos capas más, o menos, competentes que la intermedia, se debe tener en consideración el cambio en las trayectorias al considerar la Ley de Snell lo que traería diferencias significativas en el momento de evaluar el perfil de velocidad de onda de corte.

5.3 Comparación Ensayos *Downhole* con Ensayos MASW

5.3.1 Maipú

Para el sector de Maipú se obtuvieron los perfiles de velocidad de onda de corte que se presentan en la Figura 5-13.

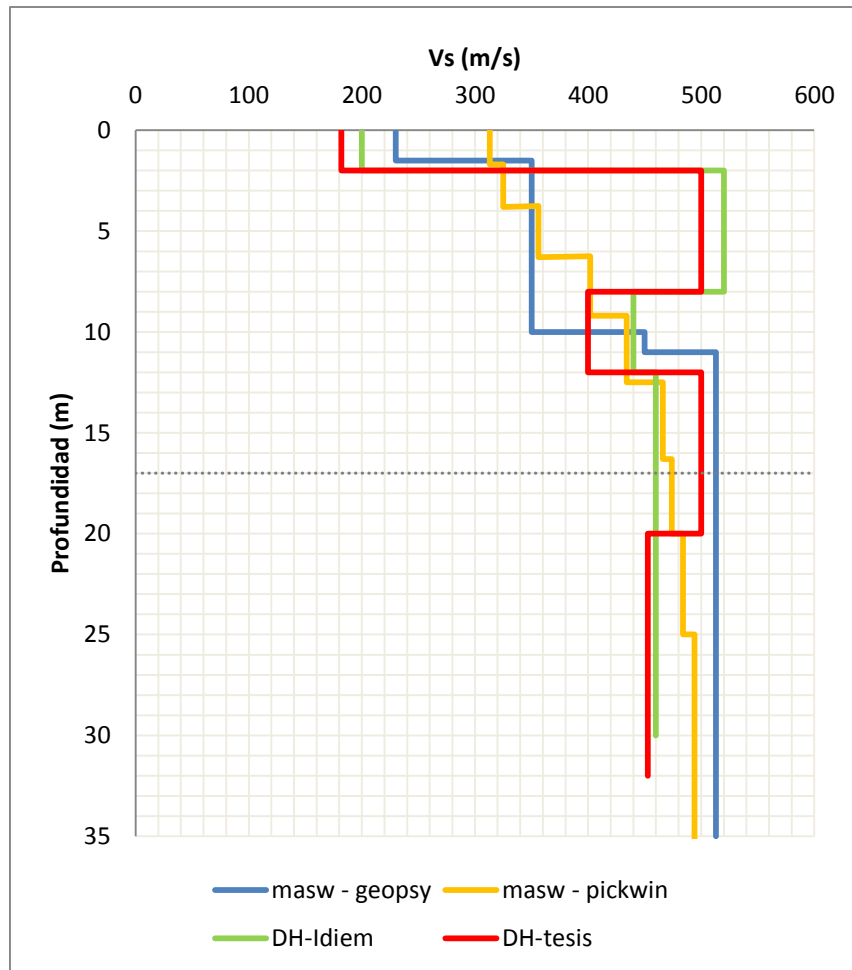


Figura 5-13: Perfiles de V_s para Maipú

Los valores de V_{s30} asociados a cada curva se presentan en la Tabla 5-9, de los cuales se puede ver que no presentan mayores diferencias entre cada método.

Tabla 5-9: Velocidad de onda de corte para Maipú

V_{s30} [m/s]	
V_{s30} Geopsy	428
V_{s30} PickWin	427
V_{s30} Idiem	430
V_{s30} Tesis	422

De lo expuesto en el Capítulo 4.2 existe una tendencia común en los resultados de MASW, independientemente de la cantidad de estratos que el programa PickWin entregue, indicando un aumento de velocidad con la profundidad.

Ahora, comparando estos perfiles con los obtenidos por el ensayo *downhole*, desde los 10 m y avanzando en la profundidad, se ve que las 4 curvas se mueven entre los 450 y los 500 m/s. Sin

embargo, en los primeros 10 m, es decir, en la capa superficial, el ensayo MASW no logra identificar una capa de suelo más rígida, que en el *downhole* indica que su velocidad de onda de corte es cercana a los 500 m/s. Este estrato de velocidad mayor está identificado en ambas interpretaciones del ensayo *downhole* y por estratigrafía coincide con un estrato de gravas que abarca desde el metro de profundidad hasta aproximadamente los 9m para luego dar paso a un estrato de arena, del tipo pumicitas, de mucha mayor potencia.

5.3.2 Peñalolén

Los perfiles de velocidad de onda de corte determinados para la estación de Peñalolén se presentan en la Figura 5-14.

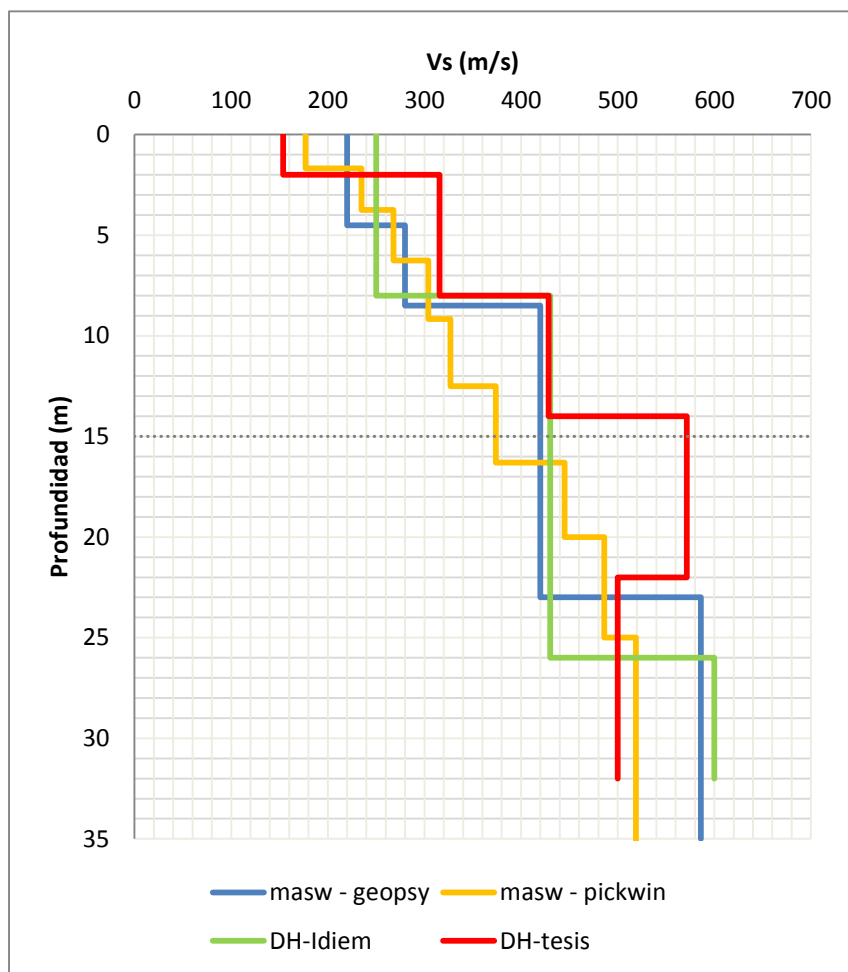


Figura 5-14: Perfiles de V_s para Peñalolén

En la Tabla 5-10 se entregan valores de V_{s30} asociados a cada curva de la Figura 5-14. Se puede ver que el valor de la velocidad para cada método es bastante similar.

Tabla 5-10: Velocidad de onda de corte para Peñalolén

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Geopsy	369
V_{S30} PickWin	350
V_{S30} Idiem	373
V_{S30} Tesis	400

De la figura anterior se puede ver el perfil obtenido mediante el software PickWin es más conservador al indicar un aumento de velocidad de onda de corte en la profundidad de manera gradual utilizando varios estratos. Por otro lado, se puede ver que existe una relación entre el ensayo MASW analizado con Geopsy (curva azul) con el *downhole* de Idiem. Se tiene la misma cantidad de estratos y hasta los 23 m aproximadamente presentan valores muy similares para la velocidad de onda de corte. Alrededor de los 25m existe una diferencia en la potencia del estrato, pero el valor de la velocidad es similar.

Con el *downhole* analizado por método Directo en este Trabajo, se encontró un estrato más rígido en los primeros 5 m el cual no fue percibido por los otros métodos, lo cual llama a una nueva evaluación de las trazas del ensayo para este sector. Además por estratigrafía, los primeros 24 m corresponden a una arcilla, la cual debería tener un aumento en sus propiedades geotécnicas alrededor de los 8 m, donde se ve un aumento de velocidad de 200 a 400 m/s aproximadamente.

5.3.3 Casablanca

De los ensayos realizados y analizados para el sector de Casablanca se obtuvo como resultado los perfiles de velocidad de onda de corte que se presentan en la Figura 5-15.

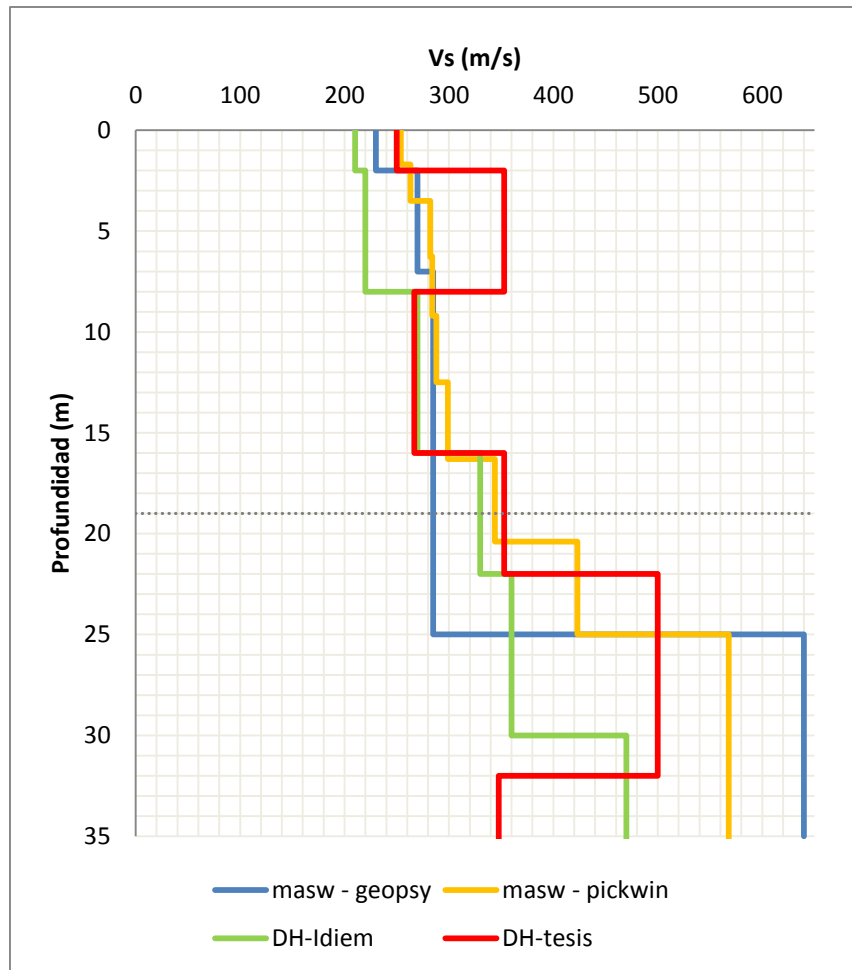


Figura 5-15: Perfiles de V_s para Casablanca

Los valores de V_{s30} para cada método utilizado se entregan en la Tabla 5-11.

Tabla 5-11: Velocidad de onda de corte para Casablanca

V_{s30} [m/s]	
V_{s30} Geopsy	324
V_{s30} PickWin	335
V_{s30} Idiem	281
V_{s30} Tesis	341

Se puede ver que el valor de la velocidad de onda de corte en los 30 metros de profundidad es similar en todos los análisis menos en el resultado del ensayo *downhole* informado por Idiem, el cual es más conservador.

De la Figura 5-15 se tiene que hasta los 15 m se ve una similitud en la velocidad de onda de corte entregada por los ensayos de ondas superficiales y el ensayo *downhole* de Idiem. El *downhole* analizado por el Método Directo (curva roja), entrega un aumento de velocidad entre los 2 y 8 m de profundidad lo cual no se aprecia en las otras curvas. Sin embargo, se puede ver una diferencia

en los estratos entre los perfiles, ya que alrededor de los 17 m existe otro estrato con un aumento de velocidad de corte, de cerca de 70 m/s, que el perfil de Geopsy no lo distingue, sino que a los 25 m entrega un aumento importante en la velocidad de corte, el cual se encuentra fuera de la profundidad de validez de este ensayos (19 m, línea gris segmentada).

Con respecto a la estratigrafía, el sector de Casablanca presenta una intercalación de estratos de arena y arcilla hasta los 46 m aproximadamente. Hasta los 15 m de profundidad se podría considerar de propiedades similares ambos estratos, encontrando que bajo los 15 m sus propiedades geotécnicas mejoran.

5.3.4 Melipilla

En la Figura 5-16 se presentan los perfiles de velocidad de onda de corte para el sitio analizado de Melipilla. Se debe recordar que los ensayos superficiales no se pudieron realizar en el mismo sector en donde se perforó el sondaje y se realizó el ensayo *downhole*.

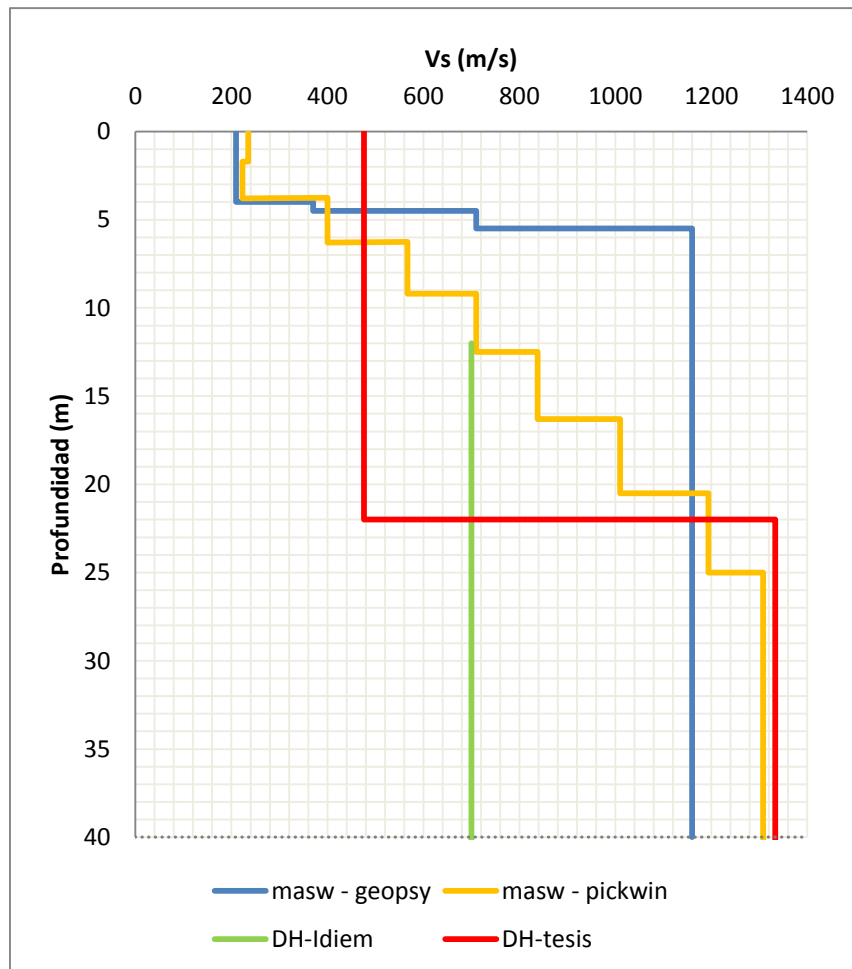


Figura 5-16: Perfiles de V_s para Melipilla

Los valores de V_{S30} asociados a cada curva se presentan en la Tabla 5-12.

Tabla 5-12: Velocidad de onda de corte para Melipilla

V_{S30} [m/s]	
V_{S30} Geopsy	699
V_{S30} PickWin	612
V_{S30} Idiem	700
V_{S30} Tesis	575

En el caso de Melipilla el ensayo *downhole* de Idiem no entrega mucha información, salvo que se trata de un suelo competente con una velocidad de corte alta. El nuevo análisis de esos datos entrega un estrato de más de 20 m con una velocidad de 500 m/s para luego tener un estrato profundo con velocidad por sobre los 1.000 m/s, lo cual estaría de acuerdo con la estratigrafía del sector. Por otro lado, ambos análisis de MASW entrega un aumento de velocidad en profundidad. En el perfil entregado por Geopsy se distingue claramente el comienzo del estrato de mejor calidad geotécnica, mientras que el perfil de PickWin entrega un mayor número de estratos de menor espesor que van aumentando gradualmente la velocidad de onda de corte, dificultando la identificación del cambio de estrato.

5.3.5 Lollole

En la estación de Lollole sólo se tiene análisis de MASW ya que no se cuenta con información de las trazas del ensayo *downhole*, sino sólo el perfil (Verdugo R., 2008). En la Figura 5-17 se pueden ver los perfiles encontrados.

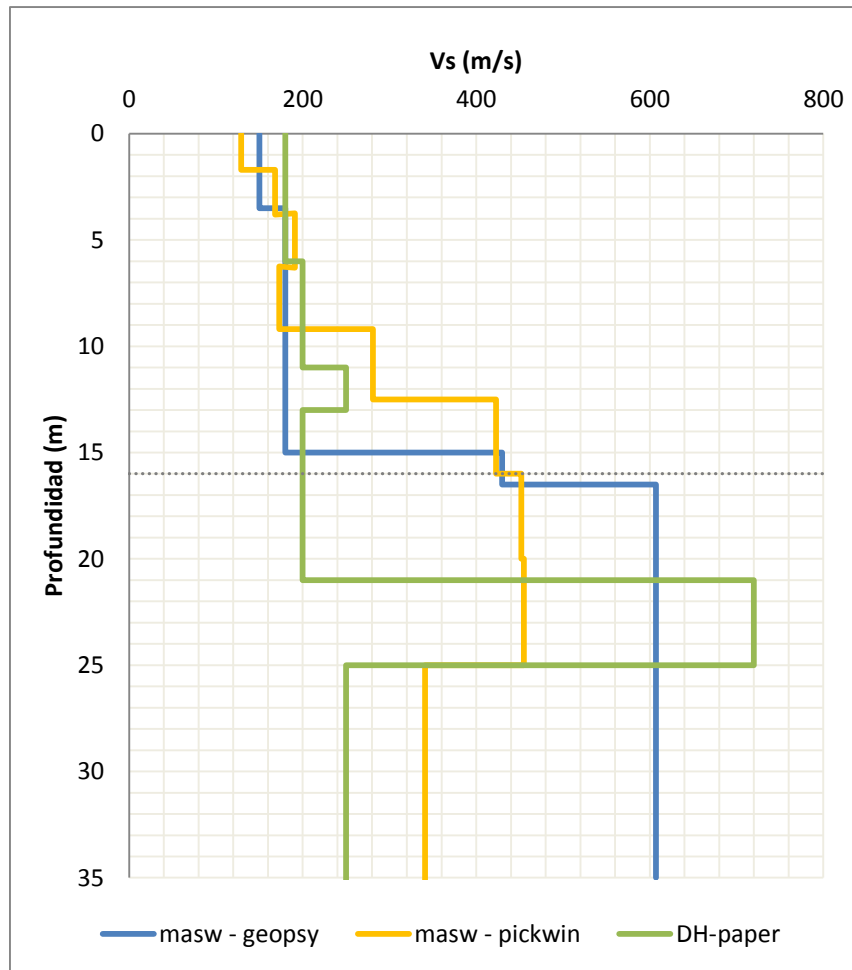


Figura 5-17: Perfiles de V_s para Lolloe

Las velocidades de onda de corte para los 30 primeros metros se entregan en la Tabla 5-13 a continuación.

Tabla 5-13: Velocidad de onda de corte para Lolloe

V_{s30} [m/s]	
V_{s30} Geopsy	266
V_{s30} PickWin	272
V_{s30} Downhole	227

Se puede ver que para los ensayos superficiales el valor de V_{s30} es mayor que el calculado de acuerdo al ensayo *downhole*. Esto se debe que a partir de los 15 se presenta una mayor diferencia en las curvas aumentando el valor de V_s , coincidiendo con el límite de validez del ensayo.

En los primeros 10 m no se tiene una diferencia marcada en lo que es la velocidad de onda de corte, pero si se puede distinguir una influencia del estrato de mayor rigidez que aparece cercano a los 20m de profundidad según el perfil de *downhole*. Ambas curvas, Geopsy y PickWin, evidencian el aumento de velocidad aproximadamente a los 15 m de profundidad. Por un lado, la

curva determinada con Geopsy entrega un valor de velocidad de 600 m/s aproximadamente, pero no se puede distinguir la baja de velocidad que se tiene a los 25 m. Por otro lado, la curva entregada por PickWin puede distinguir el aumento de velocidad y luego la disminución a los 25 m, el valor de la velocidad del estrato rígido no se acerca a la encontrada por el *downhole*.

De aquí se puede tener dos consecuencias: si se elige el perfil de Geopsy se puede asumir que bajo los 15 m ya se encontró la roca. Si se elige el perfil de PickWin, se distingue un estrato competente pero de una velocidad de onda no tan alta y de mayor potencia que el real.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Con respecto al ensayo MASW:

- Corresponde a un método bastante eficiente en tiempo de ejecución. La disposición en terreno de los equipos y la adquisición de datos con fuente activa se pueden realizar en un par de horas, obteniendo buenos resultados.
- La fuente de impacto utilizada en esta investigación corresponde a una masa de más de 60 kg que se suelta desde una altura superior a 1,30 m en caída libre. Esta permitió generar golpes que en algunos casos abarcaron desde los 6 Hz hasta los 40 Hz en lo que refiere a frecuencia en la dispersión.
- Se recomienda que para estudios posteriores, sea optimizado el levante de la masa y la caída libre con un sistema motorizado y evitar que se genere rebote en el golpe, con el uso de algún amortiguador.

Con respecto al análisis de datos, se debe tener consideración con:

- Influencia Modal: el perfil de velocidad de onda de corte debe ser obtenido de acuerdo al modo fundamental del suelo (M_0), ya que considerar los siguientes modos significa estimar velocidades mayores. Se debe tener especial cuidado cuando en el diagrama de energía no se pueda determinar con certeza el M_0 y que efectivamente las desviaciones sean reflejo de un aumento de la rigidez (o decaimiento).
- Baja resolución: esto va acompañado con el punto anterior, ya que por alguna desviación del ensayo como por ejemplo alto ruido ambiental, se puede perder resolución al realizar la transformada f-k y así no tener certeza en los límites de la curva de dispersión o tener algún tramo indefinido. Al tener una curva de dispersión errónea no se tiene certeza que tan desviado resulte el perfil de V_s .
- Funciones automáticas: si bien el software Geopsy tiene rangos de validez de los modelos que entrega, el realizar la discretización de la curva de dispersión de manera automática puede traer errores significativos, ya sea para la inversión como para el posterior uso de los datos. Como se planteó en dicho capítulo, esto puede llevar a errores que modifiquen la clasificación sísmica de un terreno, lo cual trae riesgos que no son considerados en la evaluación de proyectos, por ejemplo.

Para el proceso de inversión se encontraron los siguientes focos de atención:

- Acotar los valores de V_s para el proceso de inversión: al utilizar los valores por defecto de Geopsy, se pierde precisión en las iteraciones del proceso de inversión y se visitan más modelos que se alejan de la realidad del sector. En este trabajo, sólo para el sector de

Melipilla no se trabajó con una velocidad de onda de corte de hasta 1.000 m/s como límite superior para las iteraciones.

- Acotar la profundidad del perfil a obtener: al igual que en el punto anterior, Geopsy por defecto va a considerar 100 m de profundidad en los modelos de inversión. Sin embargo, al reducir esta profundidad se ahorra en tiempo de proceso y se limita el espacio de modelos de V_S posibles en la inversión.
- Utilizar la opción $V_i < V_{i+1}$: si bien los métodos basados en ondas Rayleigh no deberían tener dificultad para identificar estratos rígidos sobre blandos, los modelos de inversión se comportan de mejor manera al considerar el aumento de velocidad de onda de corte con la profundidad.
- Parámetro de entrada: recomienda utilizar V_S como el parámetro de entrada para la inversión y definir por lo menos 3 estratos si no se tiene la claridad de cuantos son. Los otros parámetros solo se deben inicializar como un solo valor continuo para el perfil a obtener. Este procedimiento es el que trajo menor variabilidad y menores errores en los perfiles de velocidad de onda de corte en la profundidad.

Por otro lado, se puede ver que en los análisis en Geopsy, alrededor de los 8 a 10 Hz de frecuencias se pierde información y se dificulta la interpretación de la curva de dispersión. Por lo tanto no se alcanza con claridad los 30 m de profundidad, necesarios para la clasificación sísmica del terreno, por ejemplo. La explicación a este problema es que la separación de geófonos fue aproximadamente la misma en todos los terrenos de acuerdo al largo máximo que se pudo lograr en sitio. En consecuencia se propone realizar las mediciones aumentando la separación de geófonos aunque eso signifique disminuir la cantidad de sensores o realizar ensayos en donde no se encuentren equiespaciados.

Otra forma de ganar resolución sería combinar la curva de dispersión activa con una proveniente de ensayos pasivos para así poder tener datos de bajas frecuencias y lograr una curva de dispersión más completa. La limitación de este tipo de ensayo es el tiempo requerido, ya que para tener una medición robusta es necesario una ventana amplia de medición, es decir, se está pasando de ventanas de 8 segundos a ventanas de 40 minutos aproximadamente.

Con respecto a los métodos de análisis de *downhole*, se tiene que el método de Snell es el apropiado para las distintas configuraciones que se puedan tener en terreno, con respecto a capas más rígidas por sobre o bajo capas menos rígidas. El Método de Intervalo trae errores bastante considerables, como lo expuesto para Maipú por ejemplo, y el Método de intervalo Modificado también trae errores importantes cuando hay un cambio brusco en las rigideces de las capas del suelo.

De los resultados obtenidos para el MASW, se tienen diferencias entre el software Geopsy y el PickWin. El primero tiene una mayor cantidad de variables a definir dentro del proceso lo cual hace que el usuario deba tener conocimiento de qué significa cada una, mientras que el segundo resulta ser de una interfaz más amigable pero con la desventaja que no se puede intervenir en el proceso de datos. Geopsy permite ver las curvas de dispersión en espacio lentitud v/s frecuencia y velocidad v/s frecuencia lo cual ayuda a discernir en situaciones de poca claridad, lo mismo con la discretización de la curva. En PickWin se puede ver la curva en el espacio velocidad v/s frecuencia

y el usuario se debe ayudar de la curva propuesta por el software al momento de definirla. Por último, los algoritmos de inversión son distintos, Geopsy utiliza el “neighborhood algorithm” permitiendo definir y acotar el espacio en donde debe buscar los modelos que más calzan con la curva de dispersión utilizada. La metodología del software PickWin utiliza un algoritmo similar al de la refracción sísmica de tiempo y funciona como “caja negra” al no permitir manipulación de los datos para la inversión.

Con respecto a los perfiles de velocidad de onda de corte encontrados, se puede decir que:

- Maipú: de acuerdo al resultado del ensayo *downhole* aparece una estrato más competente entre los 2 y 8 metros de profundidad. Este estrato no es distinguido por el análisis MASW lo cual no es correcto ya que de acuerdo a las condiciones de ensayo, son los primeros metros de profundidad los que debería ver con claridad un ensayo activo. Se debe descartar que este estrato competente no sea puntual de la zona donde se realizó el sondaje.
- Peñalolén: se encuentra una buena correlación entre el MASW analizado con Geopsy y el *downhole*. Existe una diferencia nuevamente en los primeros metros de profundidad, donde es posible la existencia de un estrato más competente. De acuerdo a la estratigrafía no sería así por lo que se asume como un error en la interpretación de la llegada de la onda S en las trazas del ensayo *downhole*.
- Casablanca: en este sitio se presenta una estratigrafía de arena sobre arcillas intercalados en profundidad hasta los 46 m en donde aparece grava. De los perfiles encontrados, tienen relación con la estratigrafía los encontrados por MASW y el *downhole* de Idiem. Los perfiles de MASW se ajustan en los primeros 15 a 20 metros de profundidad, luego se desvían.
- Melipilla: la velocidad de onda de corte encontrada es bastante elevada la cual coincide con el tipo de suelo, el cual corresponde principalmente a una columna de gravas por sobre un conglomerado. Si se revisa la Figura 5-16 se pueden identificar dos modelos, uno conservador con aumento gradual de velocidad y otro con un salto brusco en donde se puede identificar el comienzo del estrato de gravas. En ambos modelos, el suelo clasificaría como tipo B.
- Lolleo: los perfiles de velocidad de onda de corte son válidos hasta una profundidad de 15 m aproximadamente, por lo cual no se alcanza a distinguir el estrato de mayor rigidez. Se recomienda repetir los ensayos variando la separación de geófonos.

Las semejanzas y diferencias encontradas en los perfiles de velocidad de onda de corte influyen directamente en la clasificación sísmica del sitio, como el caso de Casablanca, donde existe una diferencia de hasta 60 m/s entre los valores de V_{S30} .

En el caso de Maipú no existen mayores diferencias en la estimación de V_{S30} , sin embargo, considerando la gráfica de los ensayos *downhole* está la presencia de un estrato superficial de mayor rigidez el cual no se visualiza en los resultados del ensayo superficial. Este estrato podría

considerarse apto como sello de fundación para un eventual proyecto, por lo que determinar su presencia en el área comprometida por éste es de gran importancia.

En conclusión, existen ensayos y metodologías en la determinación del perfil de velocidad de onda de corte en profundidad que dependiendo de las características del suelo entregarán mejor o mayor información. Sin embargo, si el usuario necesita determinar V_s solamente con ensayos del tipo MASW o de ondas superficiales no invasivos, se recomienda la búsqueda de antecedentes que puedan servir de apoyo a las decisiones de implementación y de análisis de datos, como por ejemplo la presencia de un estrato de mayor o menor rigidez en profundidad, antecedentes geológicos, estudios anteriores, entre otros, ya que permitirán optimizar los recursos disponibles y obtener mejores resultados.

Por lo anterior, se recomienda y se reconoce necesario que exista un apoyo de sondajes con recuperación de muestra y una estratigrafía de las distintas capas identificadas como apoyo a los ensayos no invasivos, con el objetivo de poder respaldar los resultados obtenidos con los métodos superficiales. Claramente se debe tener mayor cuidado cuando existe un estrato de mayor rigidez en medio de la columna de suelo, por lo que estos tipos de ensayos estudiados en este trabajo se consideran complementarios para una correcta caracterización geotécnica del sitio de estudio.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

AIG Instrumentos Venezuela, Sitio Web (www.aig-instrumentos.com)

Aki K., Richards P.G., (1980) "Quantitative Seismology: Theory and Methods" Freeman, S. Francisco, 2 vol., pp. 932.

Armstrong M., (2008) "Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) determined surface-wave velocity profile and its relation to observations of the near-surface polar firm layer" GCAS 2008/09

Aponte J., (2011) "Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica" Tesis de Grado Magister en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá.

Asten M.W., and Boore D.M. (2005) "Comparison of Shear-Velocity Profiles of Unconsolidated Sediments near the Coyote Borehole (CCOC) Measured With Fourteen Invasive and Non- Invasive Methods"

ASM D7400 – 08, Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing

Biot, M.A. (1962) "Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media". Journal of Applied Physics 33 (4).

Campanella, R.G., Robertson, P.K., and Gillespie, D. (1986) "Seismic cone penetration test, Use of in situ tests in geotechnical engineering". Proceedings, In Situ '86, ASCE.

Fliender M., Treitel S., MacGregor L. "Full-waveform inversion of seismic data with the Neighborhood Algorithm" Rock Solid Image

Foti S., (2000) "Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves" Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica (XII ciclo), Politecnico di Torino.

Foti S., Lancellota R., Sambuelli L., Socco L., (2000) "Notes on fk analysis of Surface waves" Annali di Geofisica, Vol 43 N 6. Surveys in Geophysics, 32, 6, 777-825

Foti S., Parolai S., Albarello D., Picozzi M.(2011), "Application of Surface-wave methods for seismic site characterization"

Gayá, M (2005) "Proceso de Sísmica de Reflexión Superficial en la cuenca de Ainsa, Huesca (España)". Proyecto de Grado para el Título de ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

Geodatos, Sitio Web (www.geodatos.cl)

Henríquez C., (2007) "Mejora de Terrenos Potencialmente Licuables con Inyecciones de Compactación". Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid.

Humire F., (2013) "Aplicación de métodos geofísicos basados n ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos. Aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago" Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica de Chile.

Hunter J.A., Crow H.L, (2012) "Shear Wave Velocity Measurement Guidelines for Canadian Seismic Site Characterization in Soil and Rock" GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA OPEN FILE 7078

IDIEM 2012, "Red Sismológica, Estudio de Mecánica de Suelos Rev 0"

Iwasaki T (2002) "Extended time-term method for identifying lateral structural variations from seismic refraction data" Earth Planets Space, 54, 663–677.

Joh, S.H. (1996) "Advances in the Data Interpretation Technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements", University of Texas at Austin, Dissertation.

Joh, S.H., Kang, T.H., Kwon, S.A., and Won, M.C. (2006) "Accelerated Stiffness Profiling of Aggregate Bases and Subgrades for Quality Assessment of Field Compaction", Paper Prepared for the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, D.C.

Jones R. (1958) "In-situ measurements of the dynamic properties of soil by vibration methods", Geotechnique, Volume 8 (1), pp. 1-21.

Kayal, J.R., "Seismic Waves and Earthquake Location" Geological Survey of India, 27, J.L. Nehru Road Road, Kolkata – 700 016.

Kim, D., Bang E., Kim W. (2004) "Evaluation of Various Downhole Data Reduction Methods for Obtaining Reliable V_s Profile" Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 6

Moro, G. Dal , Pipan M., Forte E., Finetti I., "Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments" , Exploration Geophysics Group, Department of Geological Environmental and Marine Sciences, University de Trieste, Italia

Nazarian, S., and Stokoe, K.H., II. (1984) "Nondestructive testing of pavements using surface waves". Transportation Research Record 993, pp. 67-79.

Ochoa, F. (2007) "Caracterización Geotécnica a través del uso de ondas Rayleigh", Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Ingeniería Geotécnica.

Park, Richard D. Miller, and Hidetoshi Miura "Optimum Field Parameters of an MASW Survey" Kansas Geological Survey

Park, C. B., Xia, J., and Miller, R. D., (1998), "Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record" 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1377–1380.

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., (1999), "Multichannel analysis of surface waves (MASW)" Geophysics, 64, 800-808.

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., (2001), "Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW)" Proceedings of the SAGEEP 2001, Denver, Colorado, SSM-4.

Peredo, V (2011) "Aplicación del Método SASW en Suelos", Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil, Universidad de Chile.

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.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Sitio Web (www.smis.org.mx).

Richart, F.E., Jr., Hall, J.R. and Woods, R.D. (1970) "Vibrations of Soils and Foundations". Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 414 p.

Rix, G., & Leipski, E. (1991). Accuracy and Resolution of Surface Wave Inversion. 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. C., Hebel G., (2001) "Recent Advances in Surface Wave Methods for Geotechnical Site Characterization" XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Stokoe, K.H., Joh, S., Woods, R. (2004) "Some Contributions of In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems".

Stokoe, K.H., II and Santamarina, J.C. (2000) "Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering". Plenary Paper, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000, Melbourne, Australia, pp. 1490-1536.

Stokoe, K.H., II, Wright, S.G., Bay, J.A. and J.M. Roesset (1994) "Characterization of geotechnical sites by SASW method". Geophysical Characteristics of Sites, ISSMFE, Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, International Science Publishers, New York, pp. 15-25.

Stokoe, K.H., II, C. J, T. M. (2004) "SASW Measurements at the NEES Garner Valley Test Site, California". Data Report.

Stokoe, K.H., Cox B., Cheng Lin Y., (2006) "Introduction of SASW Technique and Its Data Reduction Procedures"

Sudhish B., Anbazhagan P., Sitharam T., (2006) "Development of theoretical dispersion curves and comparison with multichannel analysis of Surface waves (MASW)" 13th Symposium on Earthquake Engineering-

Verdugo, R. (2008), "Amplification Phenomena Observed in Downhole Array Records Generated on a Subductive Environment", *Physics of Earth and Planetary Interiors* 175(2009) 63-77.

Zamora A (2012) "Métodos Geofísicos en Geotecnia: Georadar, Resistividad, Crosshole" Informe de Pasantía para el Título de ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

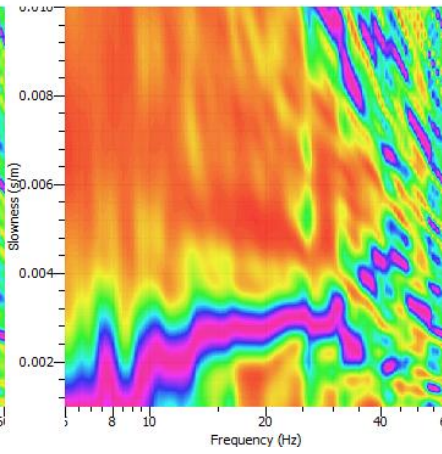
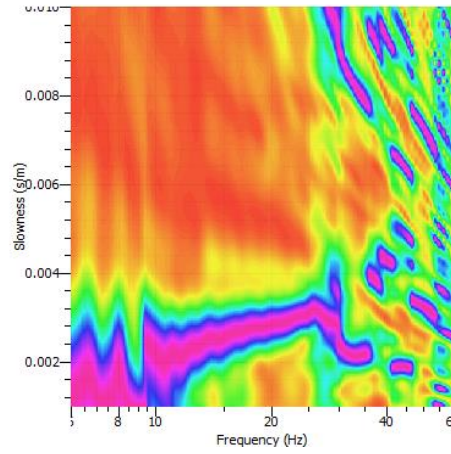
ANEXO A – Curvas de Dispersión

1. Maipú

- Lentitud v/ Frecuencia

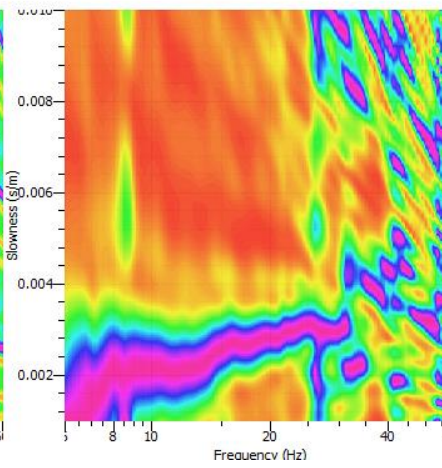
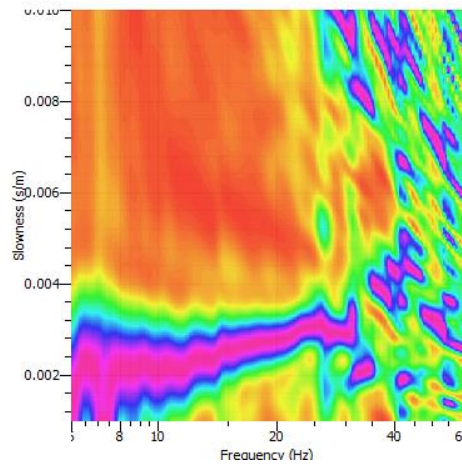
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00

Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



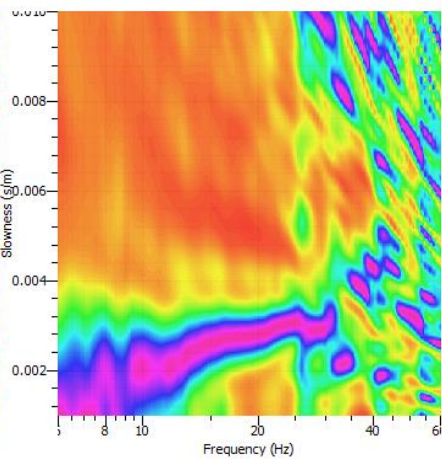
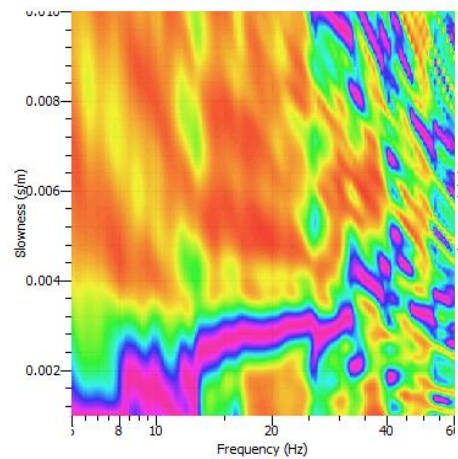
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00

Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



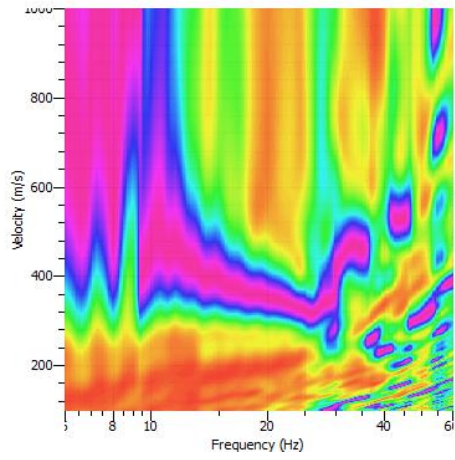
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00

Stack of 5 grids

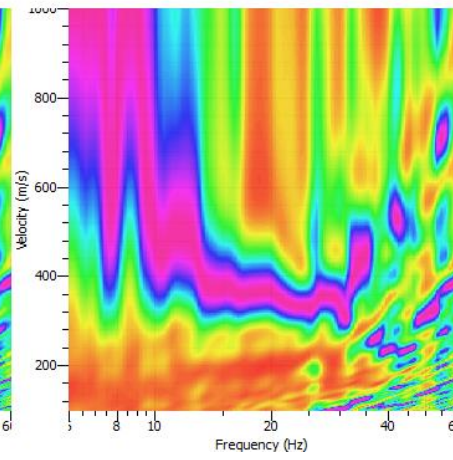


- Velocidad v/s Frecuencia

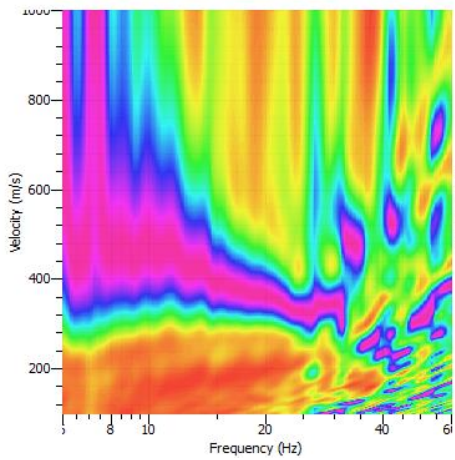
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



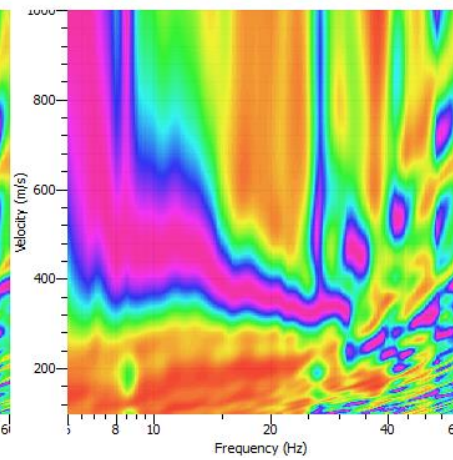
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



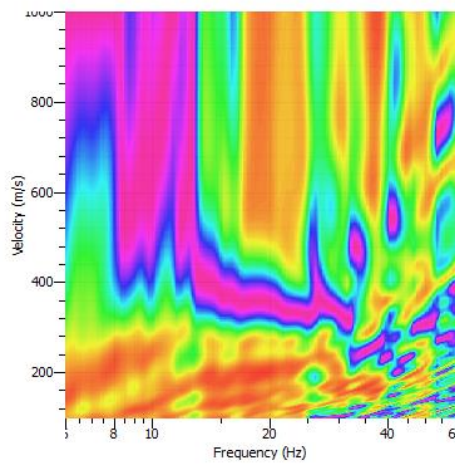
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



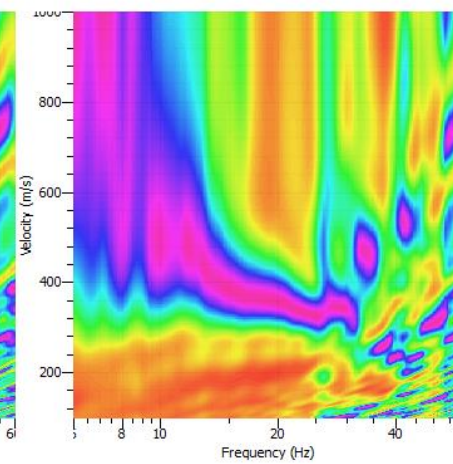
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



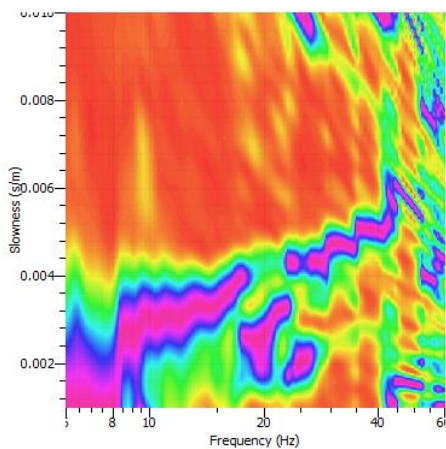
Stack of 5 grids



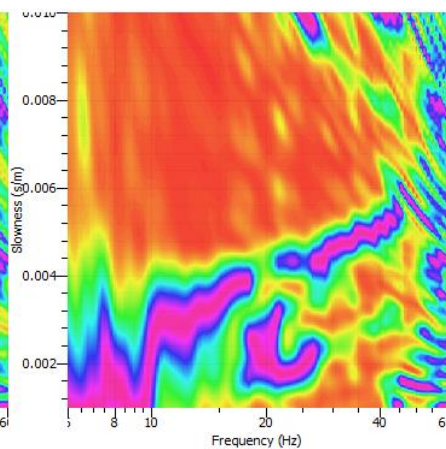
2. Peñalolén

- Lentitud v/s Frecuencia

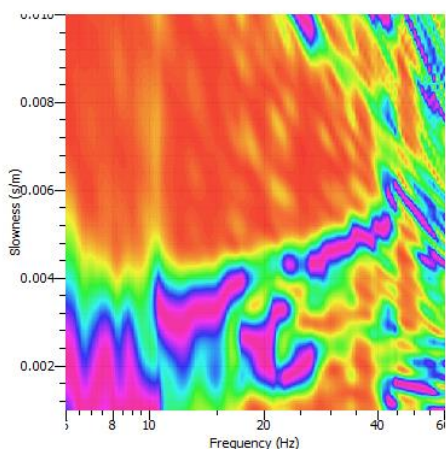
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



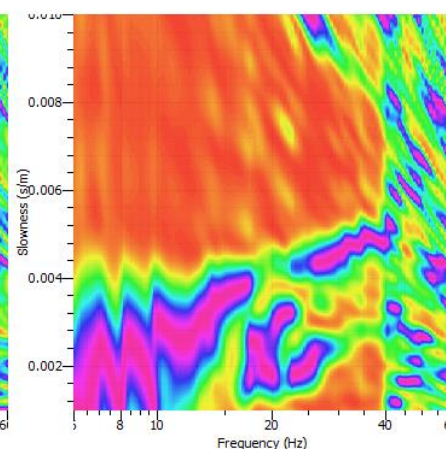
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



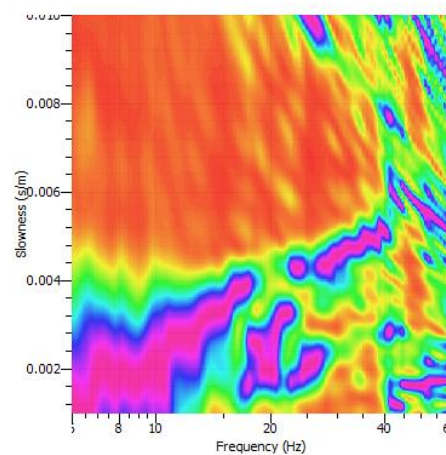
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



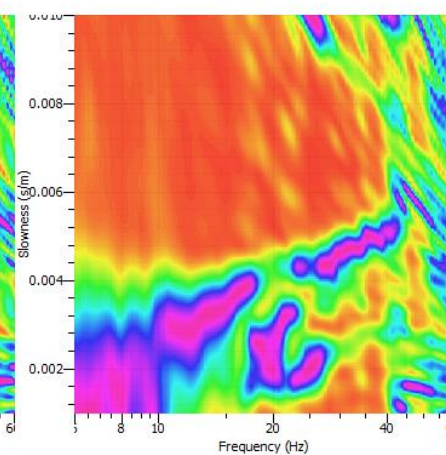
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00

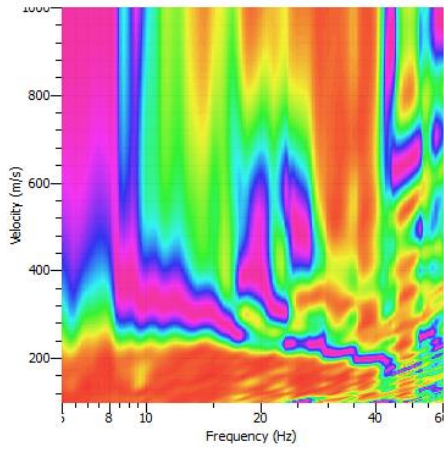


Stack of 5 grids

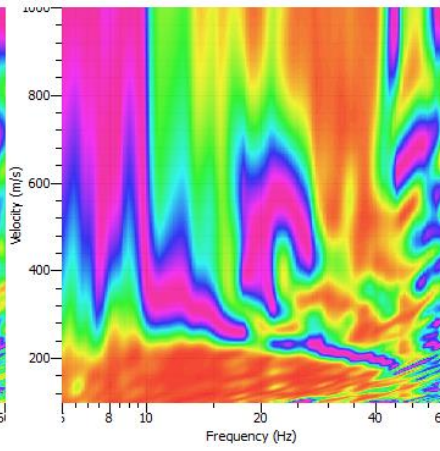


- Velocidad v/s Frecuencia

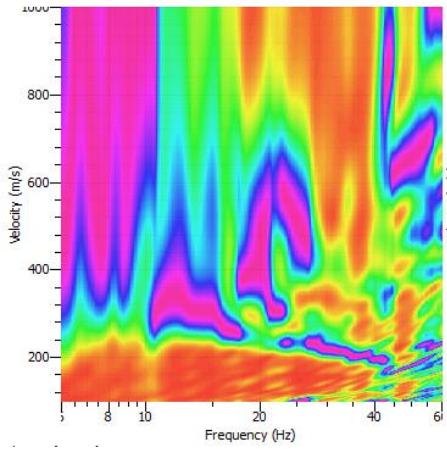
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



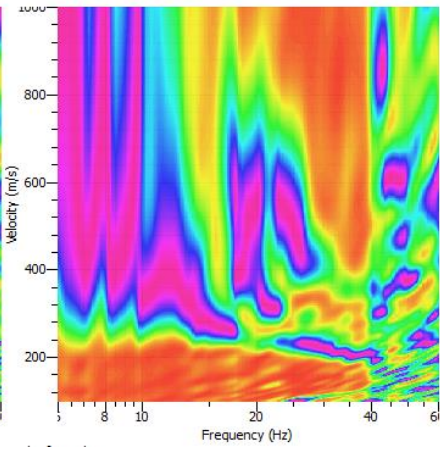
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



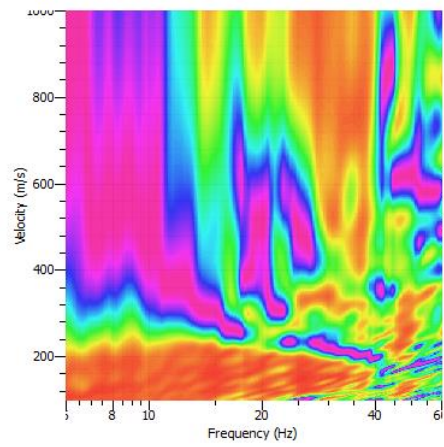
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



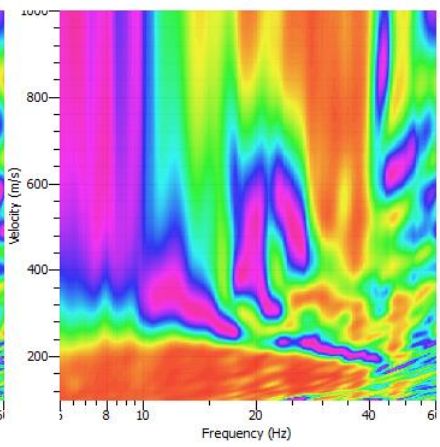
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-15 00:00:00



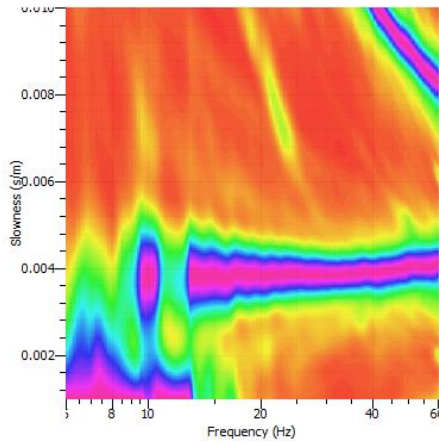
Stack of 5 grids



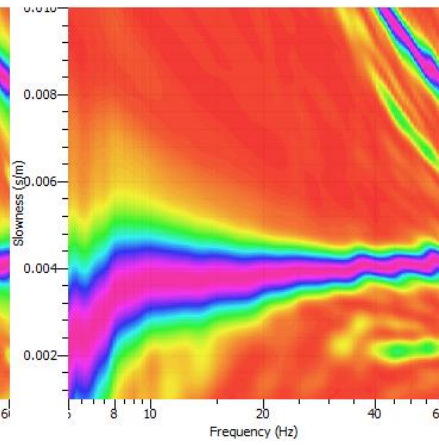
3. Casablanca

- Lentitud v/s Frecuencia

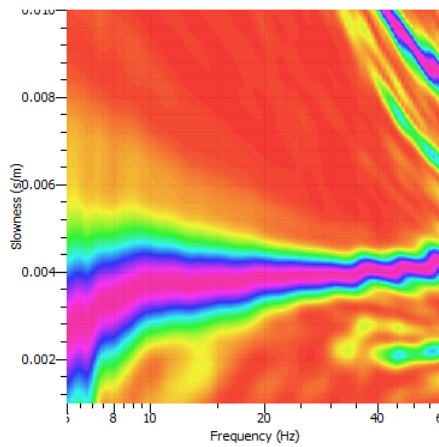
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



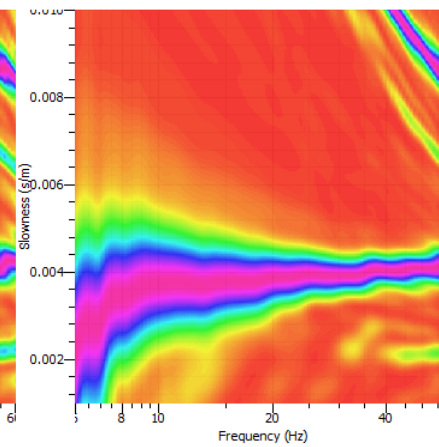
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



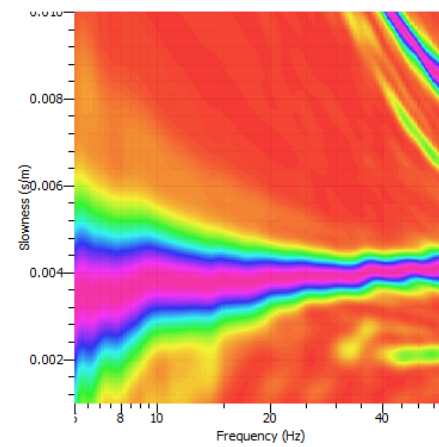
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



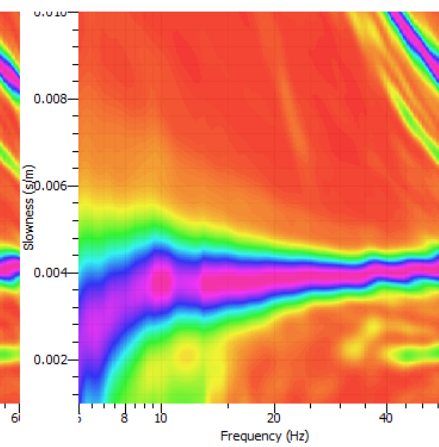
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00

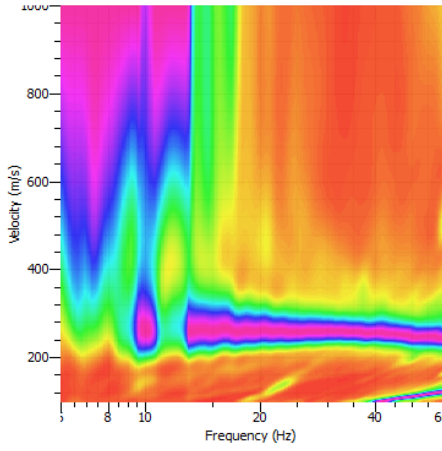


Stack of 5 grids

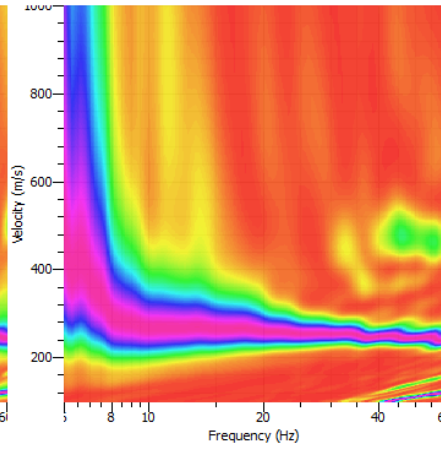


- Velocidad v/s Frecuencia

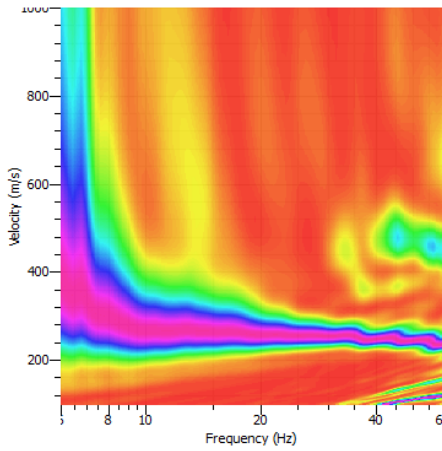
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



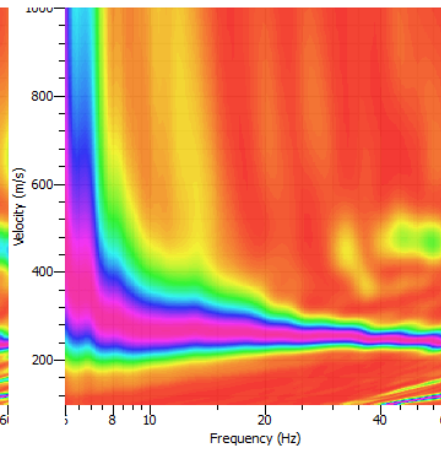
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



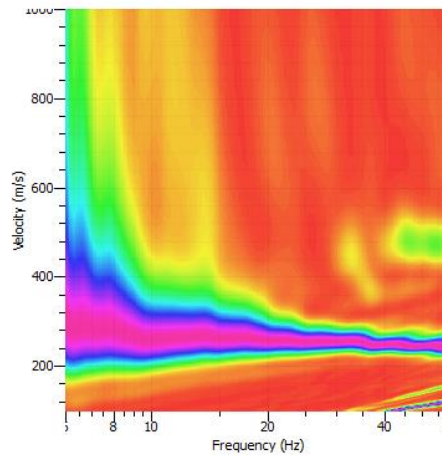
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



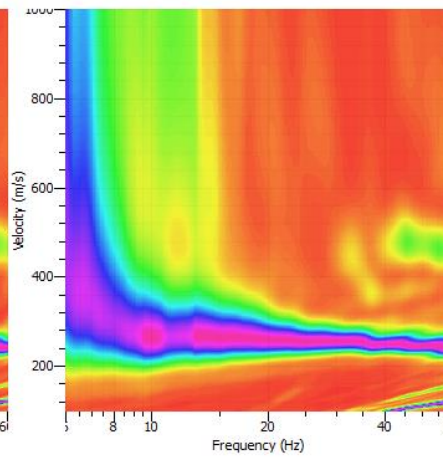
Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



Shot at (54, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



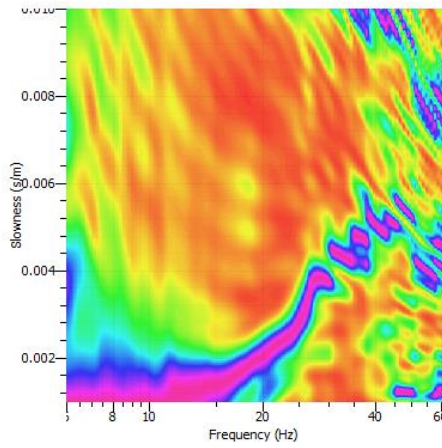
Stack of 5 grids



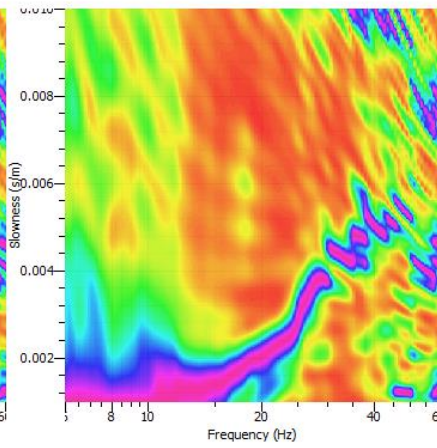
4. Melipilla

- Lentitud v/s Frecuencia

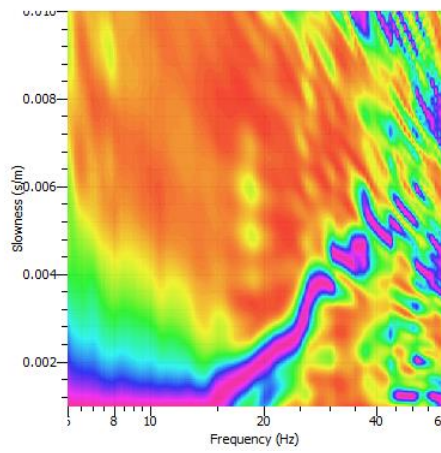
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



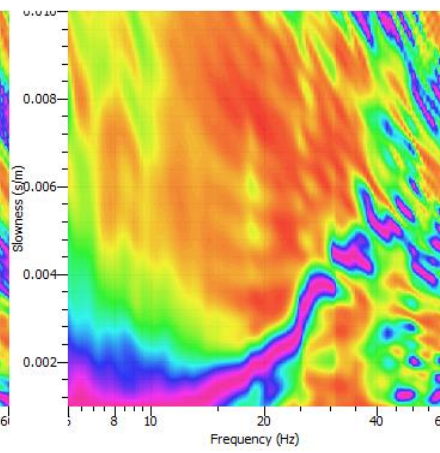
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



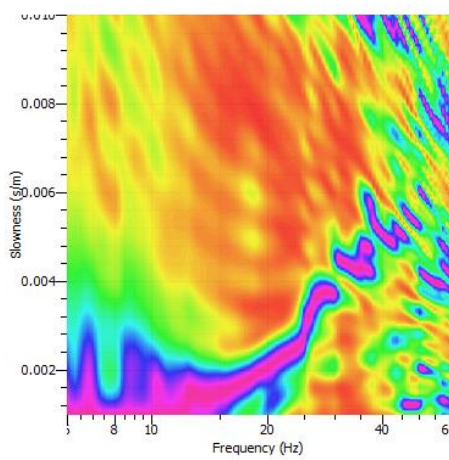
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



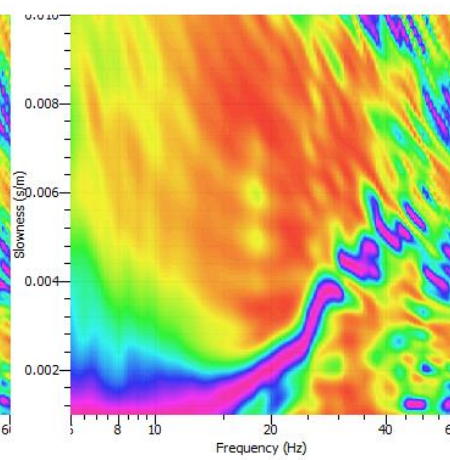
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00

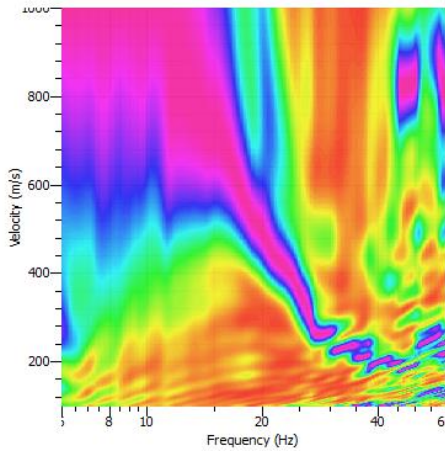


Stack of 5 grids

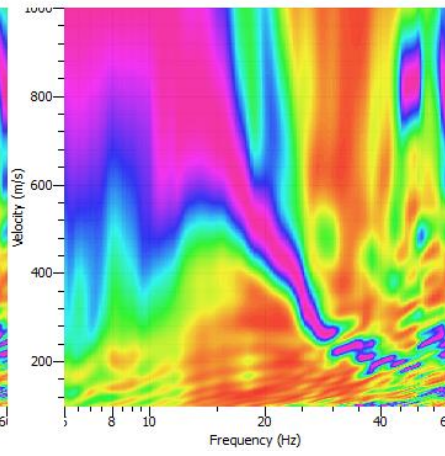


- Velocidad v/s Frecuencia

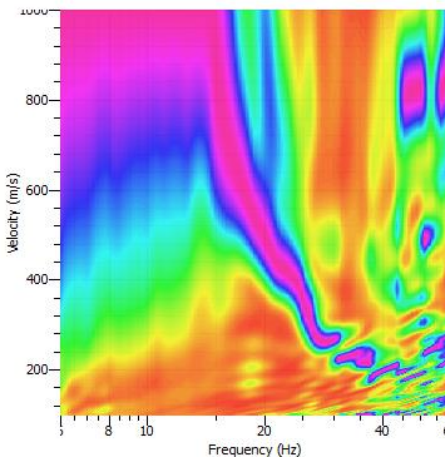
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



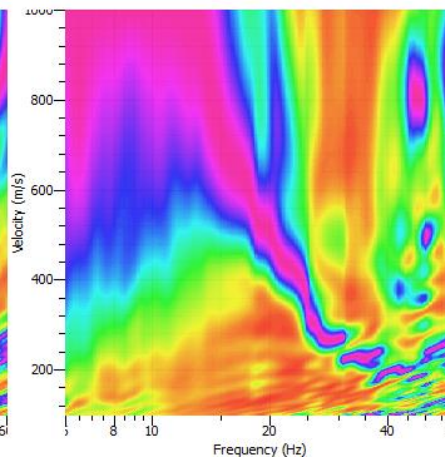
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



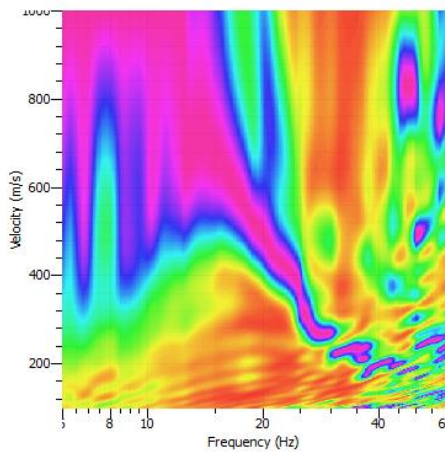
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



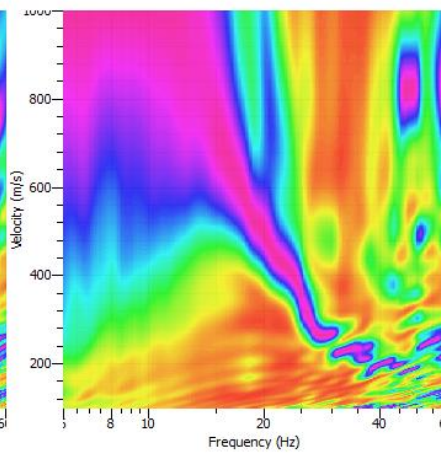
Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



Shot at (8, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



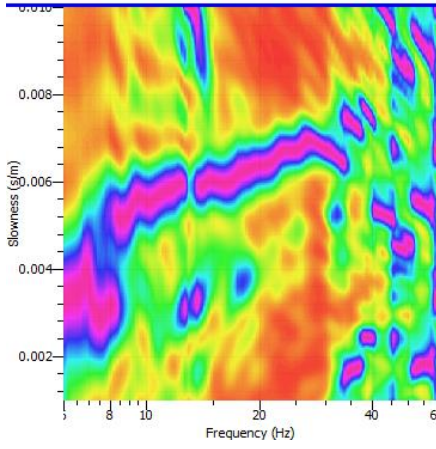
Stack of 5 grids



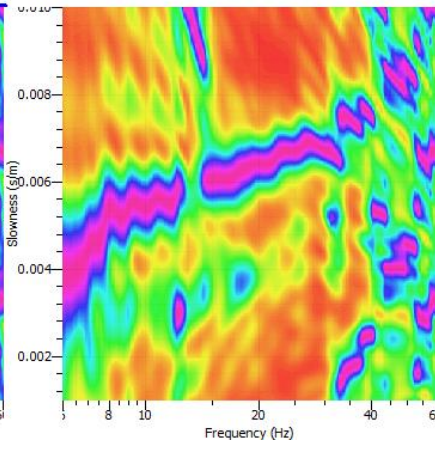
5. Lolloo

- Lentitud v/s Frecuencia

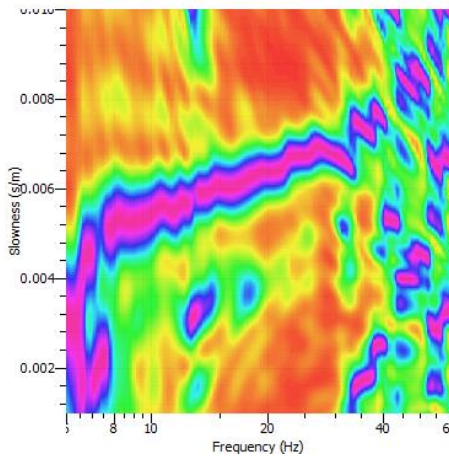
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



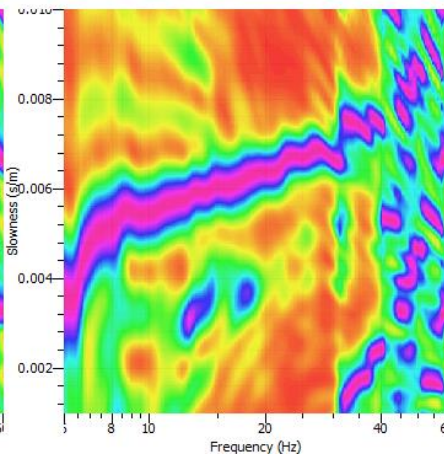
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



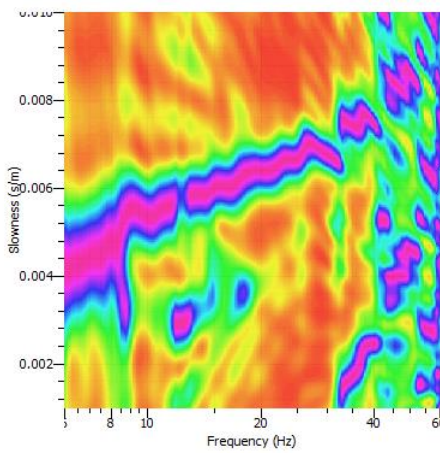
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



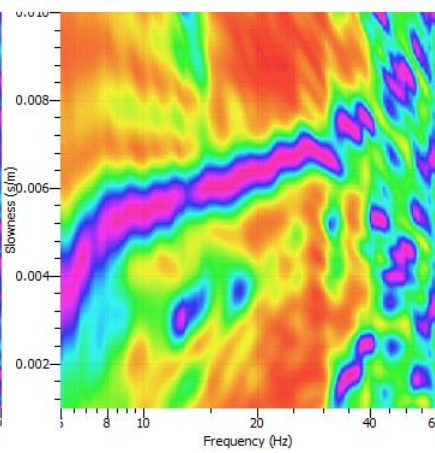
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00

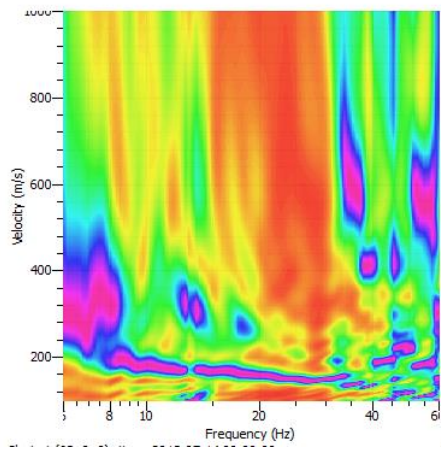


Stack of 5 grids

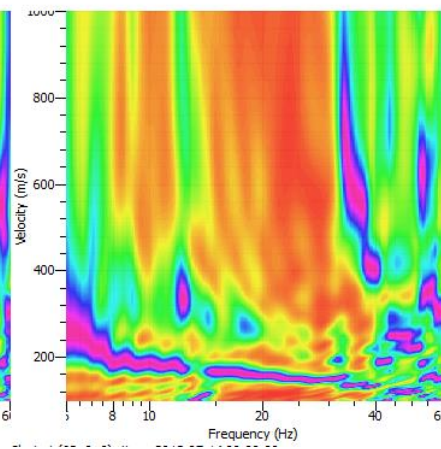


- Velocidad v/s Frecuencia

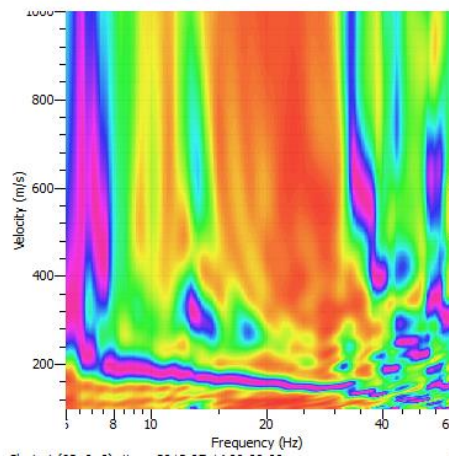
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



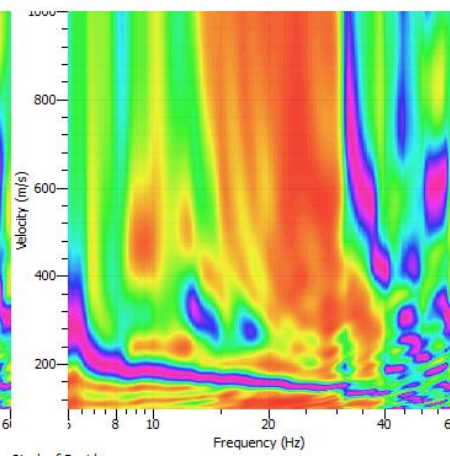
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



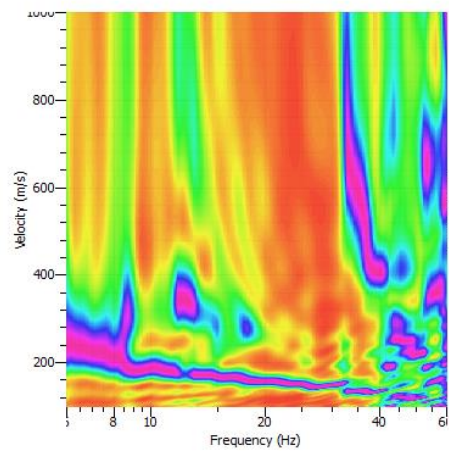
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



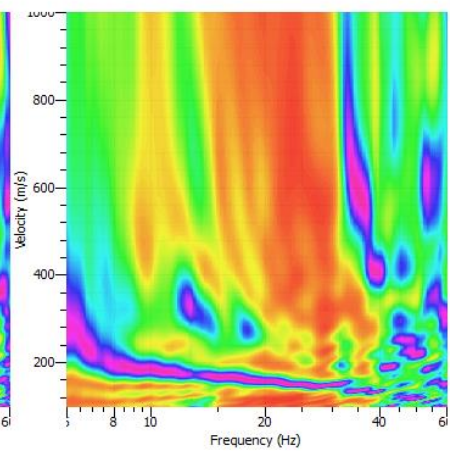
Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



Shot at (63, 0, 0), time=2013-07-14 00:00:00



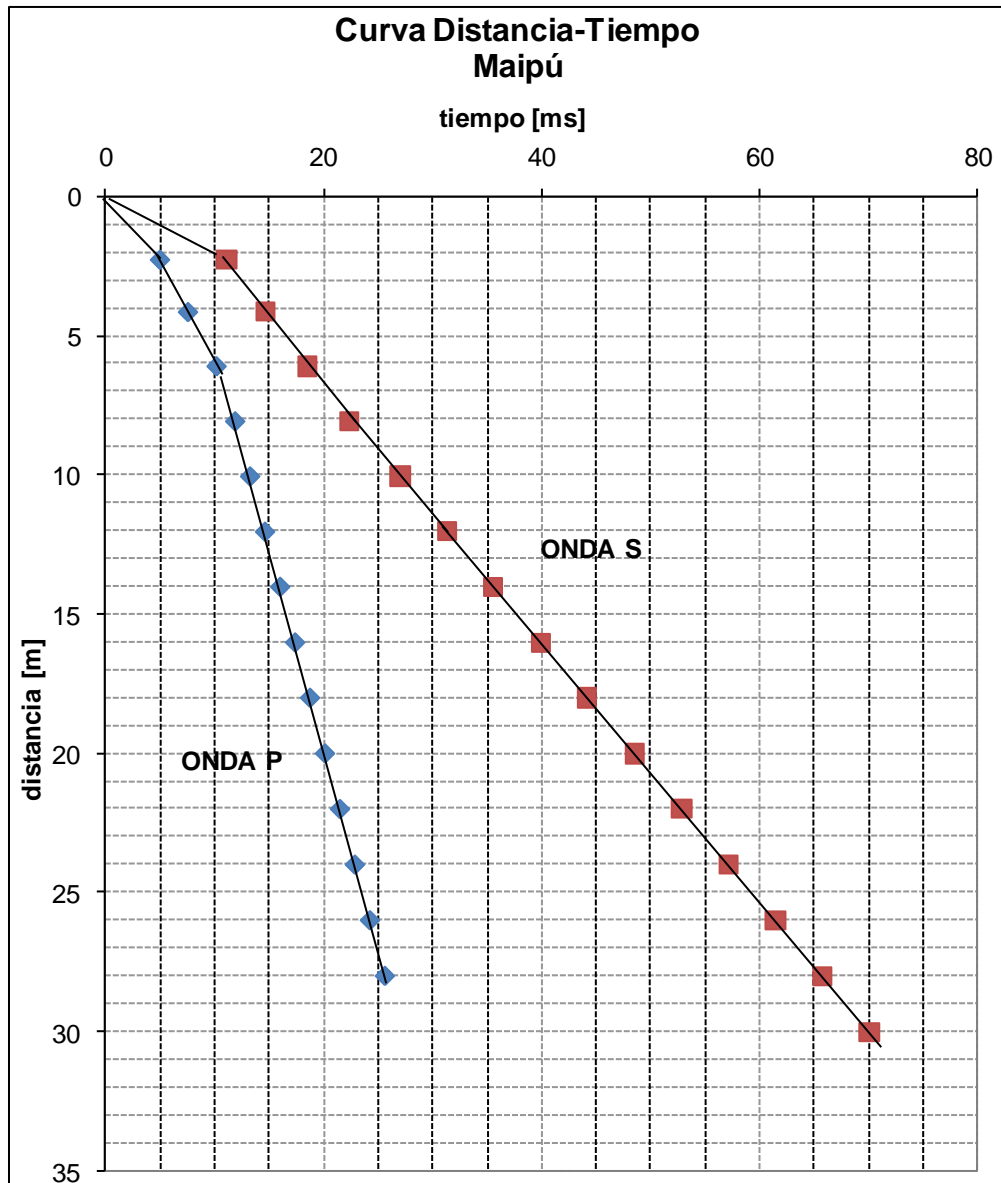
Stack of 5 grids

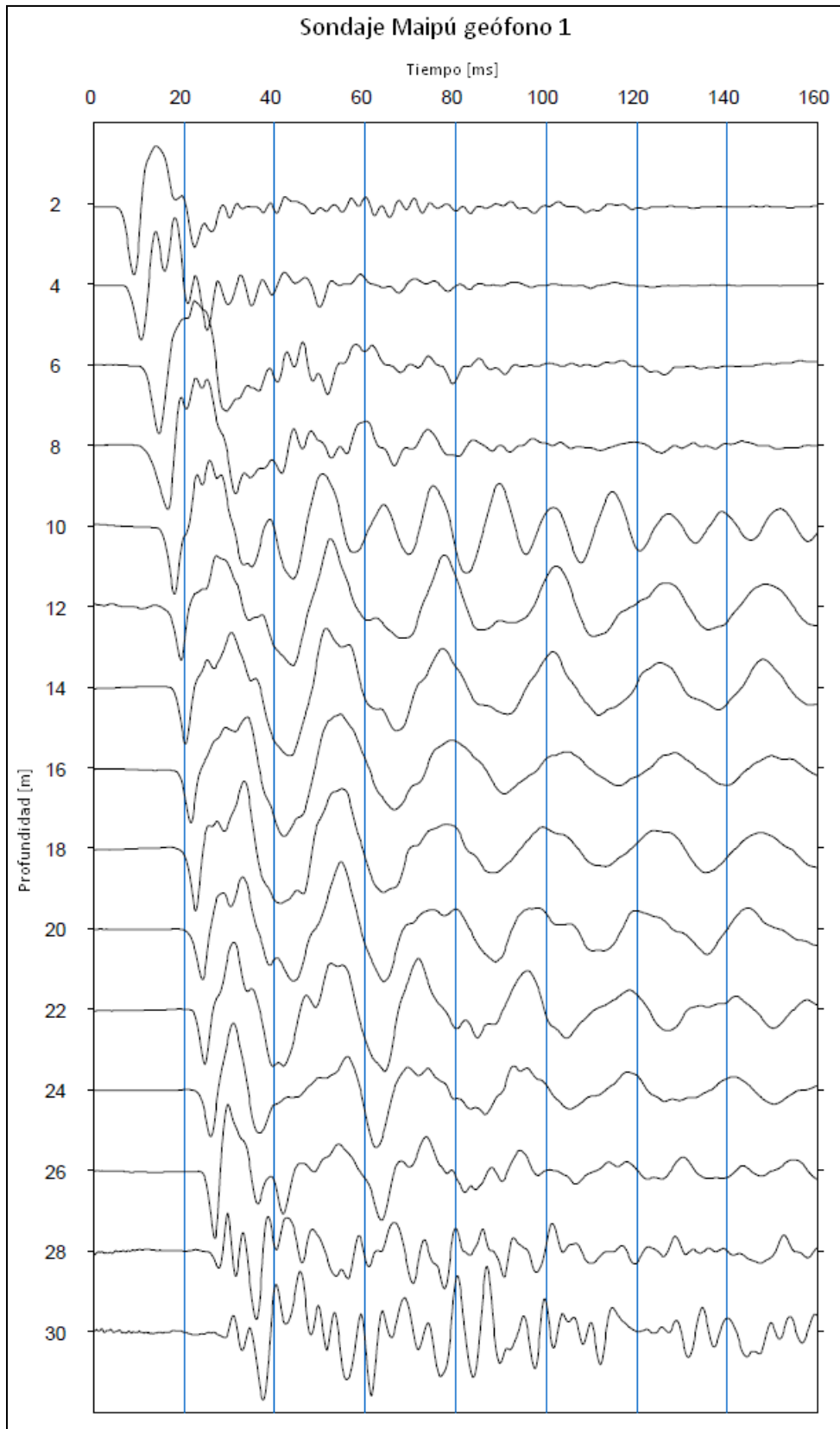


ANEXO B – Trazas Ensayos Downhole

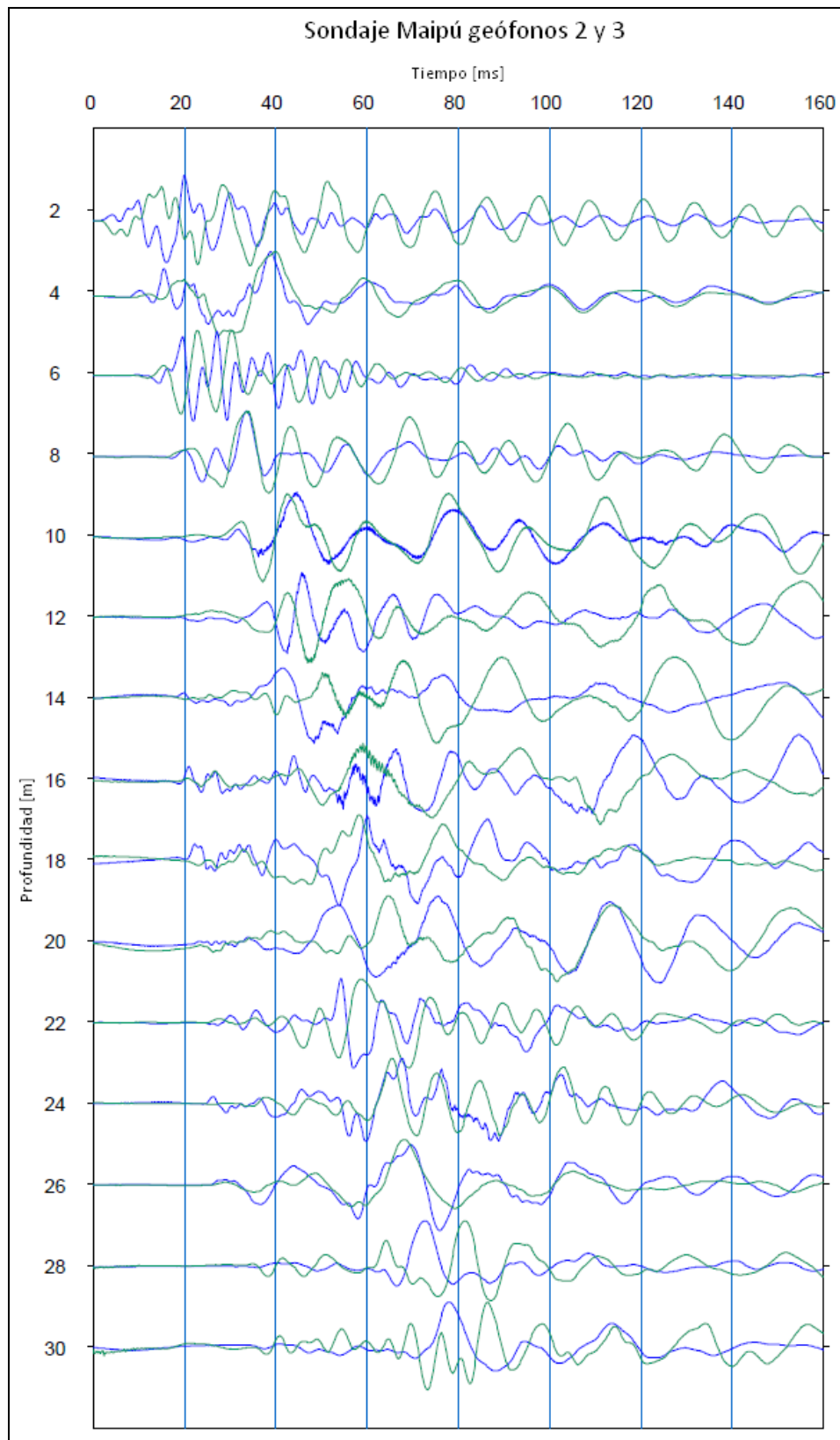
1. Maipú

ENSAYO DE MEDICION DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS DOWN - HOLE			
Proyecto		RED SISMOGRAFICA	
Sondaje		ESTACION MAIPU	
Profundidad		30m	
Coordenadas		335.514,23m E 6.290.907,99m S	
Fecha Ejecución		7-12-2011	
PROFUNDIDAD	DISTANCIA RECORRIDA	TIEMPOS DE ARRIBO	
[m]	[m]	Ondas de Compresion [ms]	Ondas de Corte * [ms]
2,0	2,3	5,0	11,1
4,0	4,2	7,6	14,7
6,0	6,1	10,2	18,5
8,0	8,1	11,9	22,3
10,0	10,1	13,3	27,0
12,0	12,1	14,7	31,3
14,0	14,0	16,1	35,6
16,0	16,0	17,4	39,9
18,0	18,0	18,8	44,2
20,0	20,0	20,2	48,5
22,0	22,0	21,6	52,8
24,0	24,0	22,9	57,1
26,0	26,0	24,3	61,5
28,0	28,0	25,7	65,8
30,0	30,0	-	70,1
Velocidades			
Cota Inferior	Cota Superior	Velocidad de ondas de Compresión [m/seg]	Velocidad de Ondas de Corte [m/seg]
0,00	2,00	410	200
2,00	6,00	800	520
6,00	8,00	1420	520
8,00	12,00	1420	440
12,00	30,00	1420	460
<i>Observaciones:</i> Existe lectura de napa a los 8m de profundidad.			





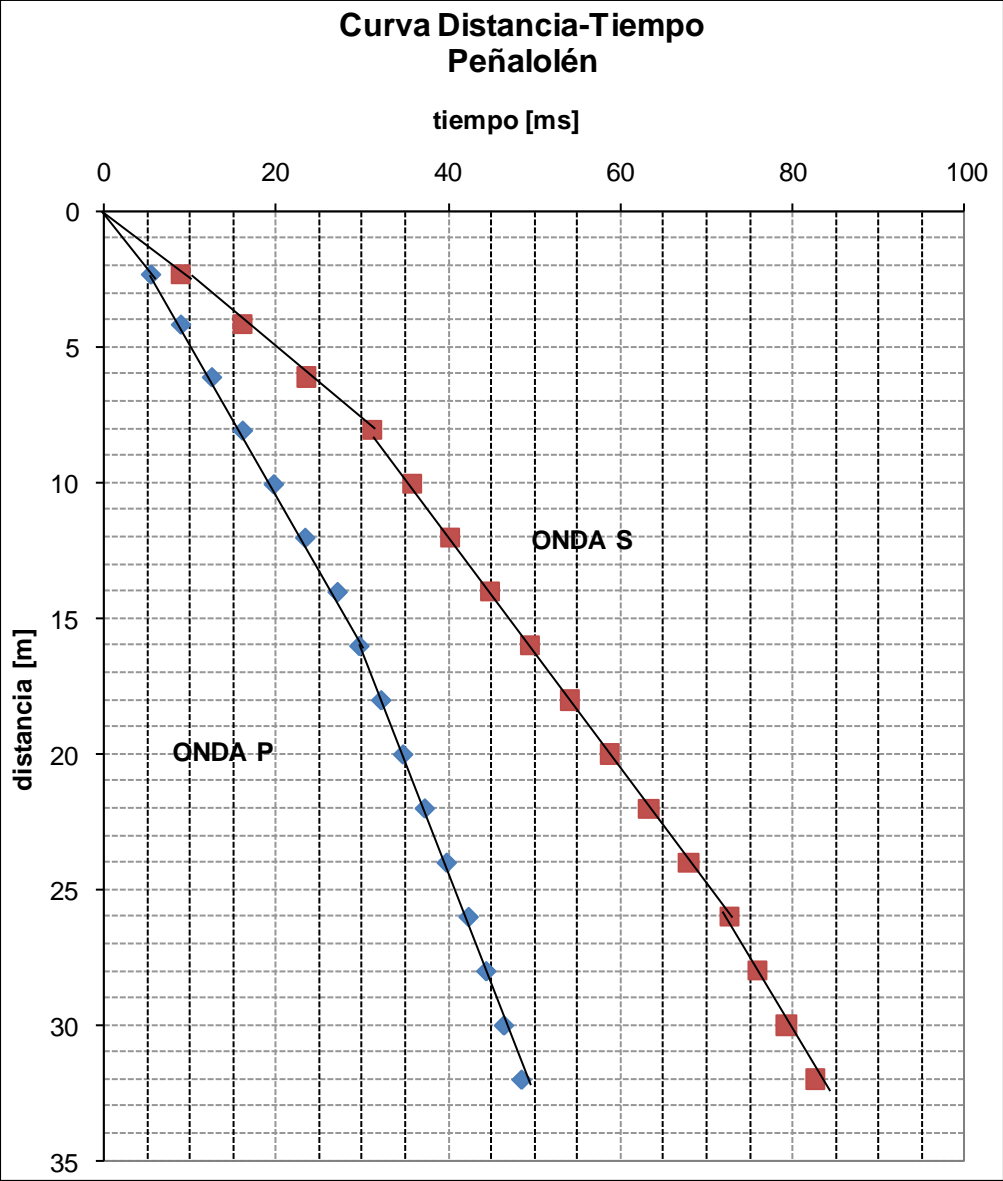
Registro medición onda P

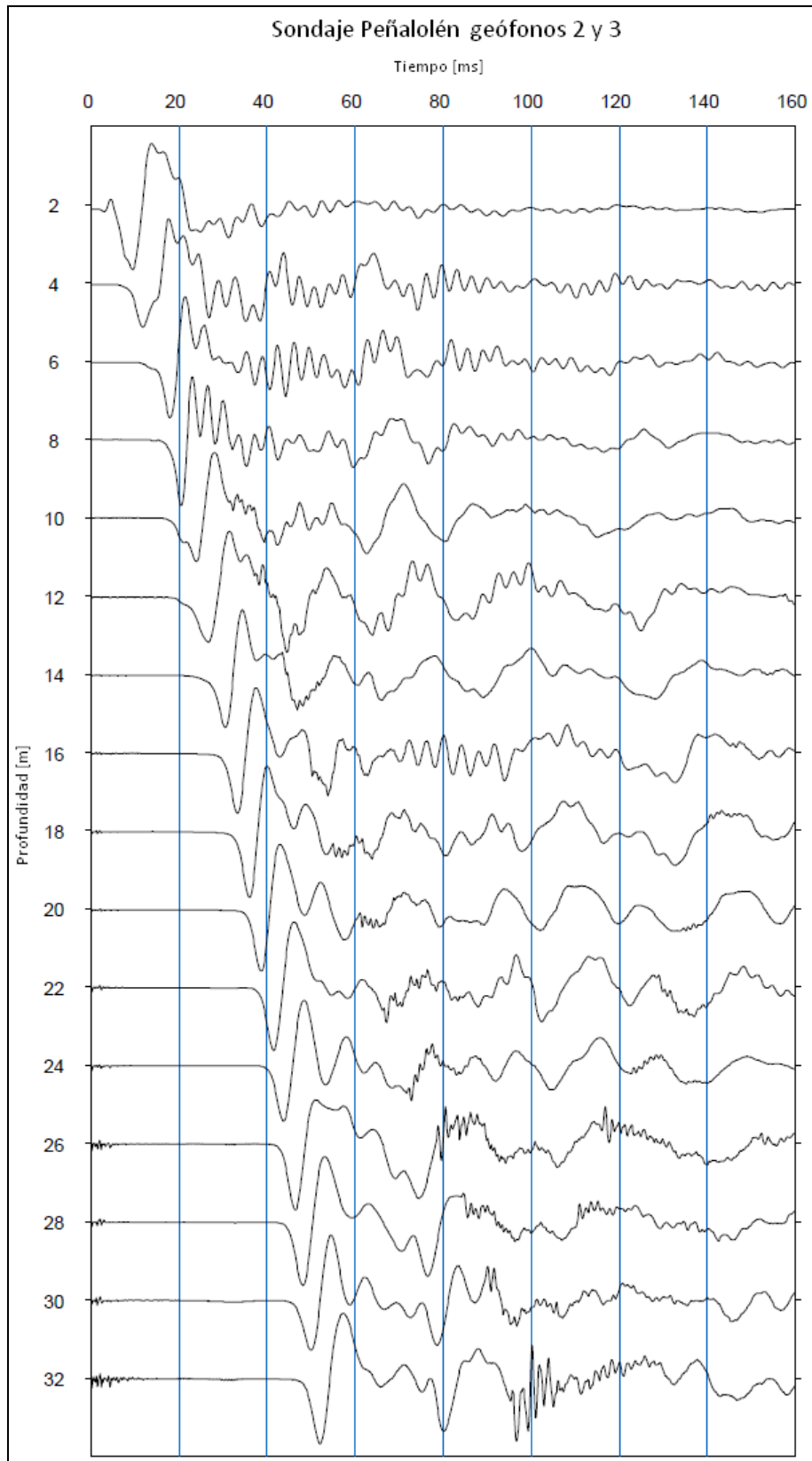


Registro medición onda S

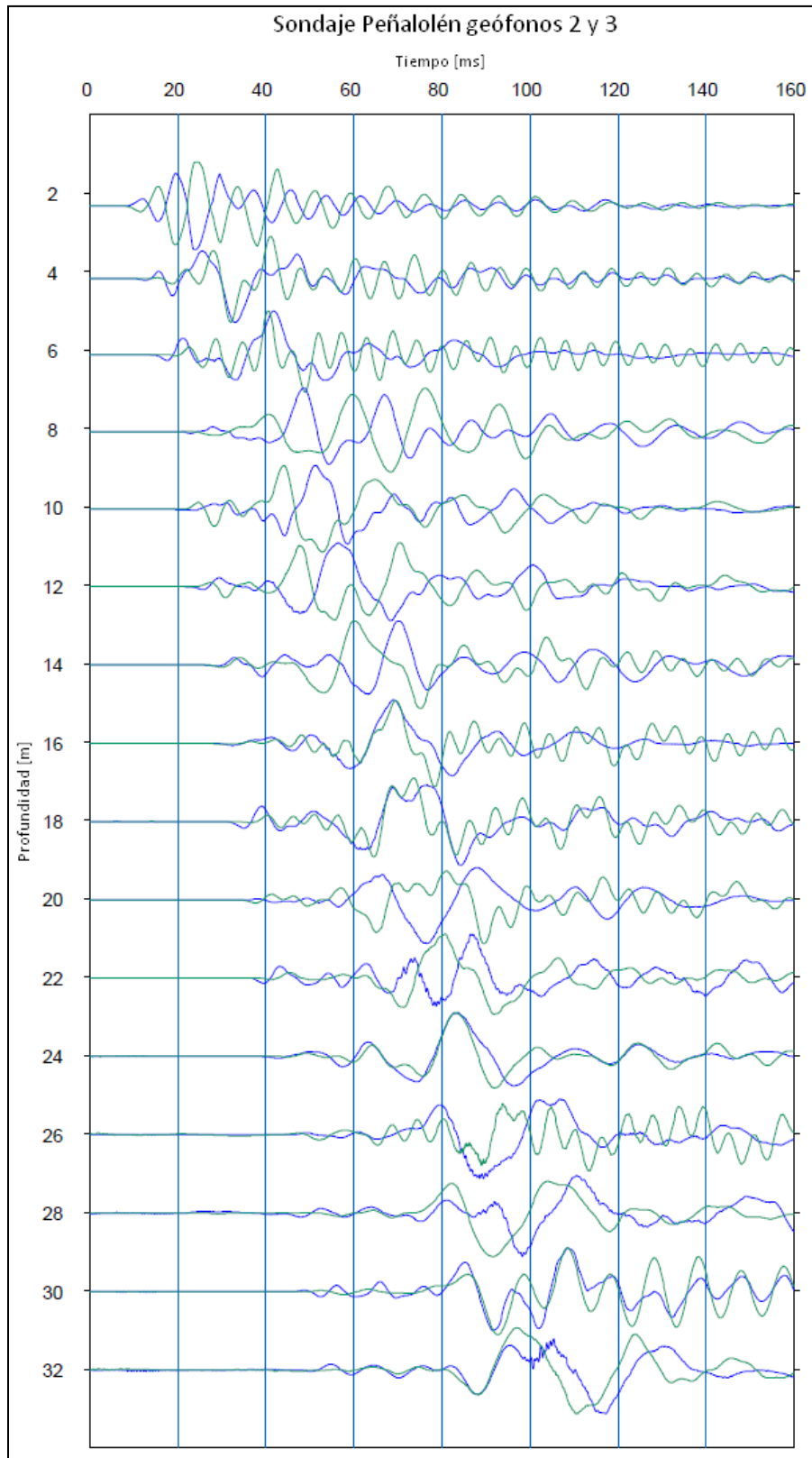
2. Peñalolén

ENSAYO DE MEDICION DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS DOWN - HOLE			
Proyecto		RED SISMOGRAFICA	
Sondaje		ESTACION PEÑALOLEN	
Profundidad		32m	
Coordenadas		353.322,95m E 6.292.263,76m S	
Fecha Ejecución		7-12-2011	
PROFUNDIDAD	DISTANCIA RECORRIDA	TIEMPOS DE ARRIBO	
[m]	[m]	Ondas de Compresion [ms]	Ondas de Corte * [ms]
2,0	2,3	5,4	9,0
4,0	4,2	8,9	16,1
6,0	6,1	12,5	23,6
8,0	8,1	16,1	31,2
10,0	10,1	19,7	35,8
12,0	12,0	23,4	40,3
14,0	14,0	27,1	44,9
16,0	16,0	29,7	49,5
18,0	18,0	32,2	54,1
20,0	20,0	34,8	58,7
22,0	22,0	37,3	63,3
24,0	24,0	39,8	67,9
26,0	26,0	42,4	72,6
28,0	28,0	44,5	76,0
30,0	30,0	46,5	79,3
32,0	32,0	48,6	82,7
Velocidades			
Cota Inferior	Cota Superior	Velocidad de ondas de Compresión [m/seg]	Velocidad de Ondas de Corte [m/seg]
0,00	2,00	380	250
2,00	8,00	570	250
8,00	16,00	570	430
16,00	26,00	860	430
26,00	32,00	860	600
<i>Observaciones:</i>			





Registro medición onda P



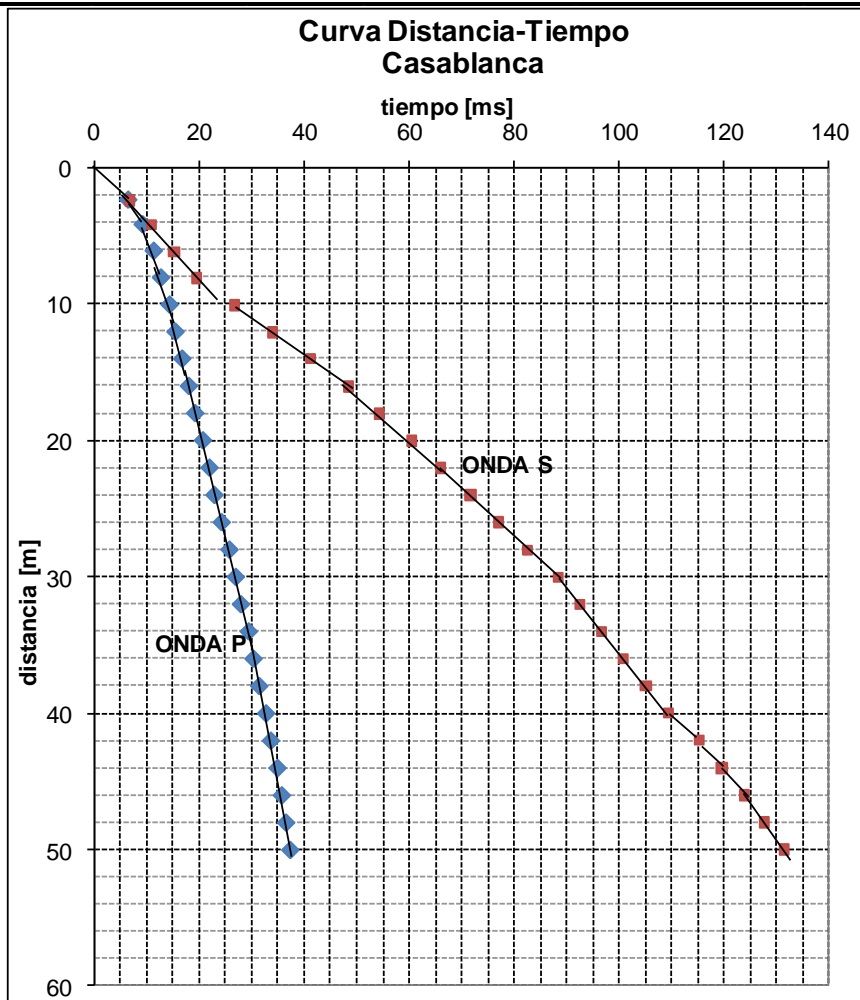
Registro medición onda S

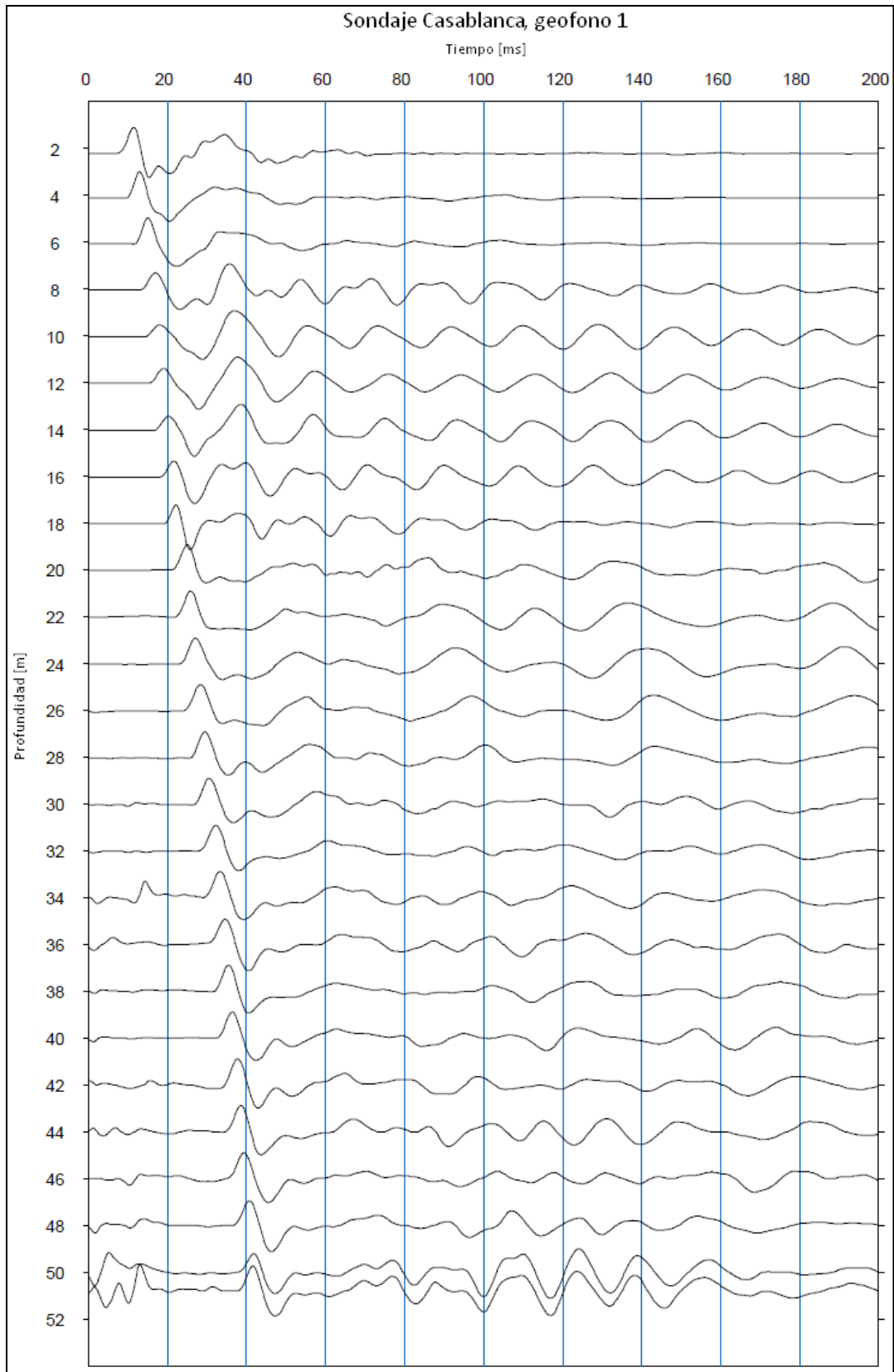
3. Casablanca

DOWN - HOLE			
Proyecto		RED SISMOGRAFICA	
Sondaje		ESTACION CASABLANCA	
Profundidad		50m	
Coordenadas		275.521,46m E 6.310.535,16m S	
Fecha Ejecución		6-12-2012	
PROFUNDIDAD	DISTANCIA RECORRIDA	TIEMPOS DE ARRIBO	
[m]	[m]	Ondas de Compresion	Ondas de Corte *
		[ms]	[ms]
2,0	2,4	6,4	6,8
4,0	4,2	9,2	10,9
6,0	6,2	11,3	15,2
8,0	8,1	12,7	19,6
10,0	10,1	14,3	26,8
12,0	12,1	15,4	34,0
14,0	14,1	16,7	41,2
16,0	16,0	18,0	48,4
18,0	18,0	19,2	54,4
20,0	20,0	20,7	60,4
22,0	22,0	21,9	66,0
24,0	24,0	22,8	71,7
26,0	26,0	24,2	77,1
28,0	28,0	25,7	82,5
30,0	30,0	26,9	88,3
32,0	32,0	27,9	92,5
34,0	34,0	29,4	96,7
36,0	36,0	30,3	100,8
38,0	38,0	31,4	105,0
40,0	40,0	32,7	109,3
42,0	42,0	33,6	115,2
44,0	44,0	34,9	119,5
46,0	46,0	35,7	123,8
48,0	48,0	36,5	127,7
50,0	50,0	37,3	131,5

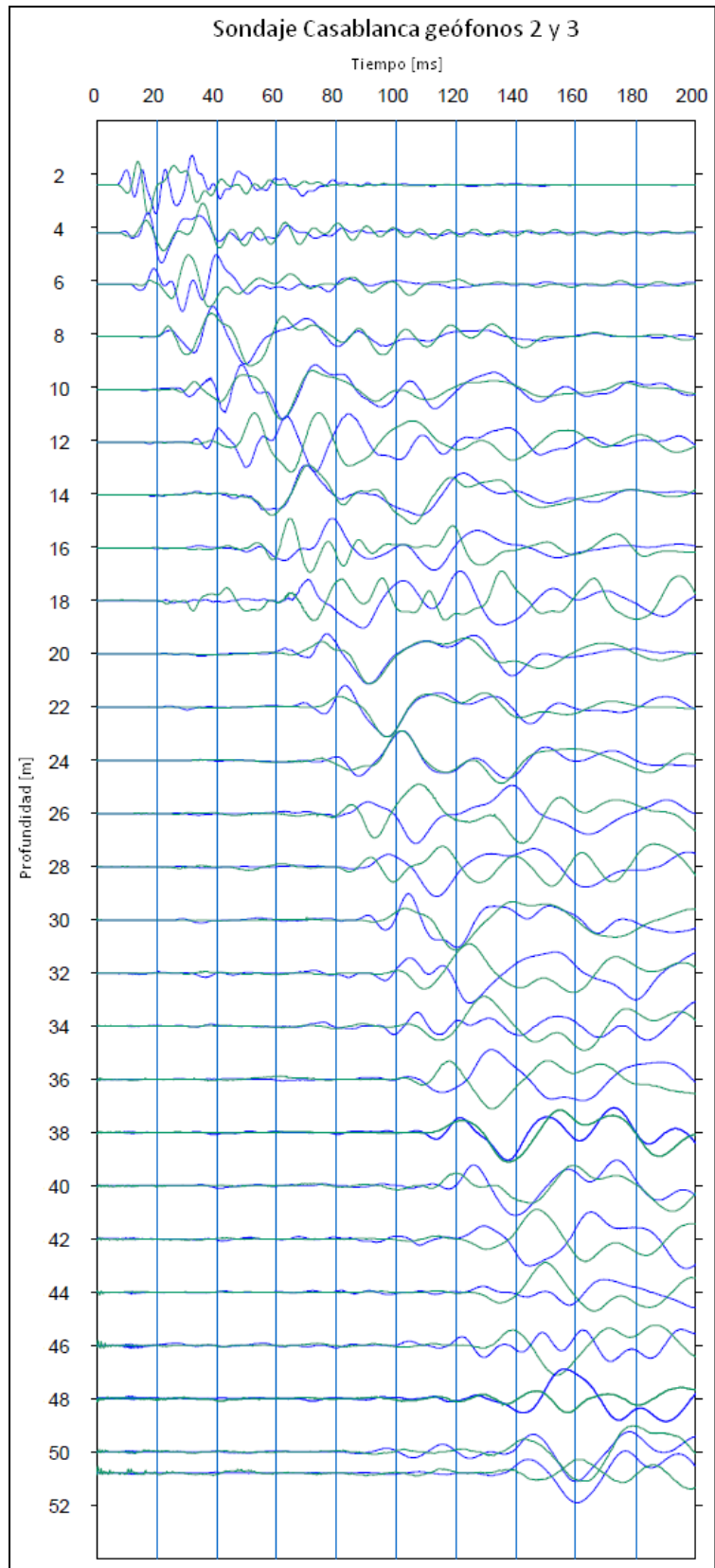
Velocidades			
Cota Inferior	Cota Superior	Velocidad de ondas de Compresión [m/seg]	Velocidad de Ondas de Corte [m/seg]
0,00	2,00	350	210
2,00	6,00	830	440
6,00	8,00	1330	440
8,00	10,00	1330	270
10,00	16,00	1590	270
16,00	22,00	1590	330
22,00	30,00	1590	360
30,00	34,00	1590	470
34,00	40,00	1790	470
40,00	42,00	1790	360
42,00	44,00	1790	450
44,00	46,00	2400	450
46,00	50,00	2400	520

Observaciones:
*No se pudo llegar con el geófono más abajo producto de las condiciones del suelo.





Registro medición onda P



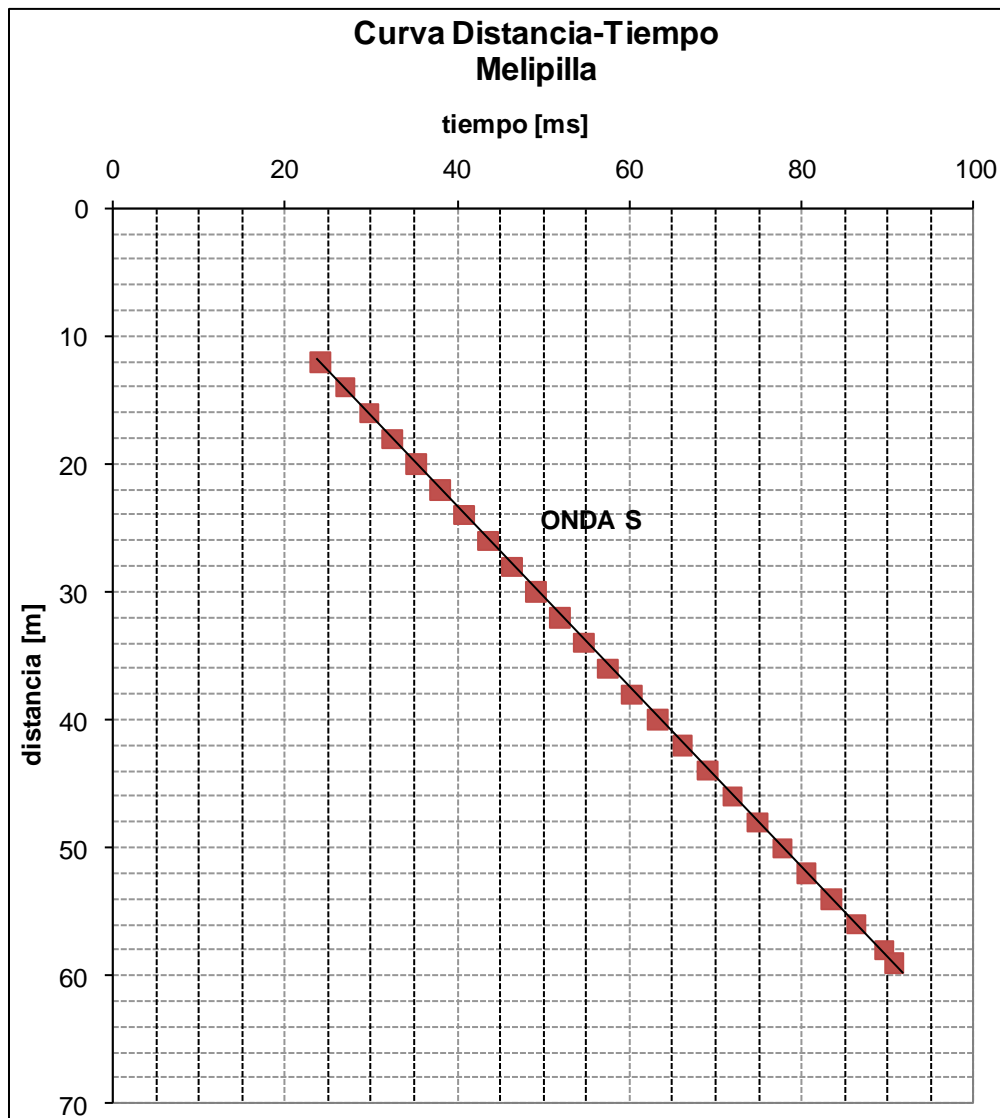
Registro medición onda S

4. Melipilla

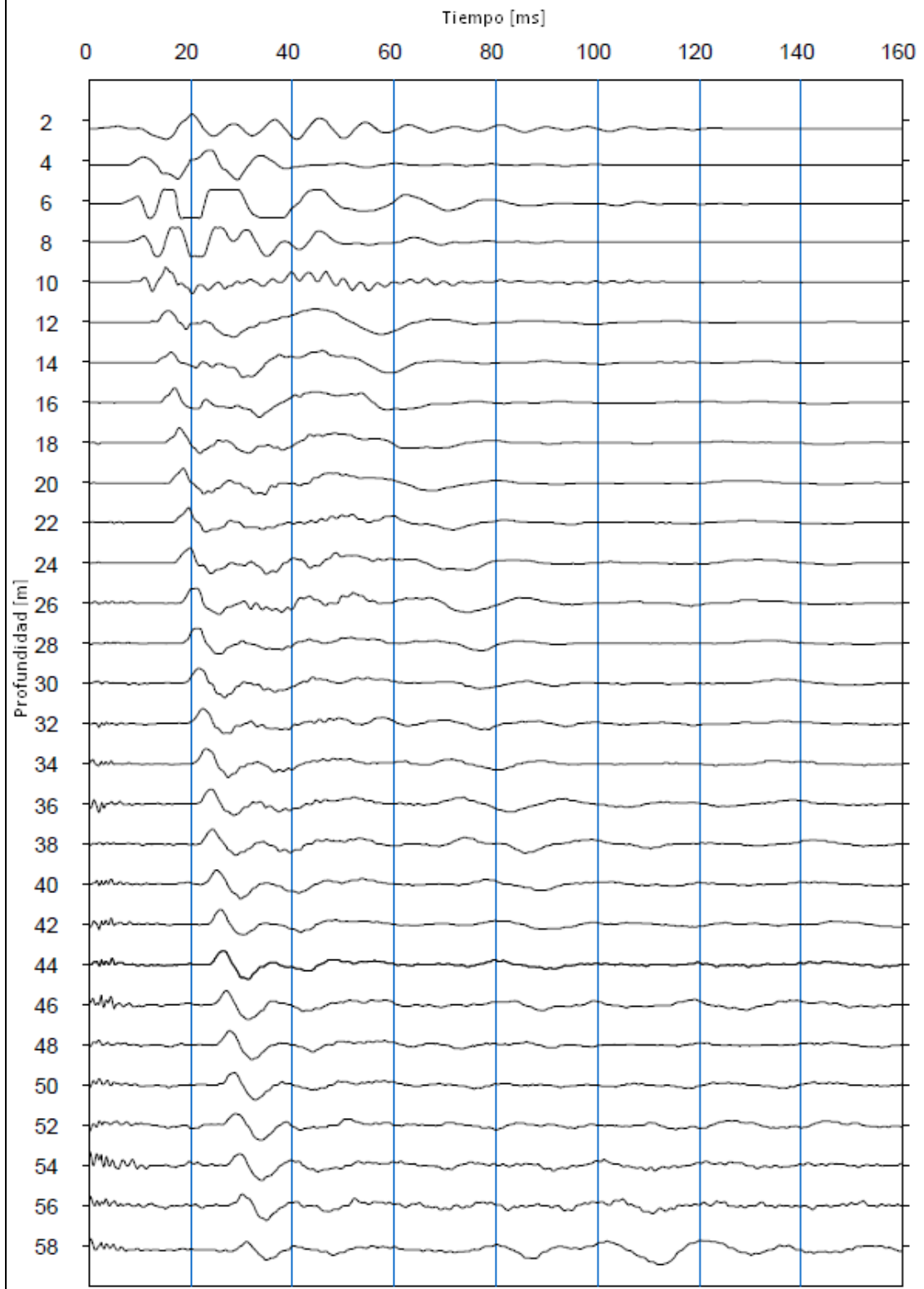
ENSAYO DE MEDICION DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS DOWN - HOLE		TIEMPOS DE ARRIBO	
Proyecto RED SISMOGRAFICA		Ondas de Compresion	Ondas de Corte *
Sondaje ESTACION MELIPILLA		[ms]	[ms]
Profundidad 59m		-	-
Coordenadas 294.836.14m E 6.270.355,81 m S		-	-
Fecha Ejecución 6-12-2011		-	-
PROFUNDIDAD	DISTANCIA RECORRIDA	-	-
[m]	[m]	-	-
2,0	2,4	-	24,1
4,0	4,2	-	26,9
6,0	6,2	-	29,7
8,0	8,1	-	32,5
10,0	10,1	-	35,3
12,0	12,1	-	38,0
14,0	14,1	-	40,8
16,0	16,0	-	43,6
18,0	18,0	-	46,4
20,0	20,0	-	49,2
22,0	22,0	-	51,9
24,0	24,0	-	54,7
26,0	26,0	-	57,5
28,0	28,0	-	60,3
30,0	30,0	-	63,3
32,0	32,0	-	66,2
34,0	34,0	-	69,1
36,0	36,0	-	72,0
38,0	38,0	-	74,8
40,0	40,0	-	77,7
42,0	42,0	-	80,6
44,0	44,0	-	83,5
46,0	46,0	-	86,4
48,0	48,0	-	89,5
50,0	50,0	-	90,7
52,0	52,0	-	
54,0	54,0	-	
56,0	56,0	-	
58,0	58,0	-	
59,0	59,0	-	

Velocidades			
Cota Inferior	Cota Superior	Velocidad de ondas de Compresión [m/seg]	Velocidad de Ondas de Corte [m/seg]
0,00	12,00	-	-
12,00	56,00	-	700

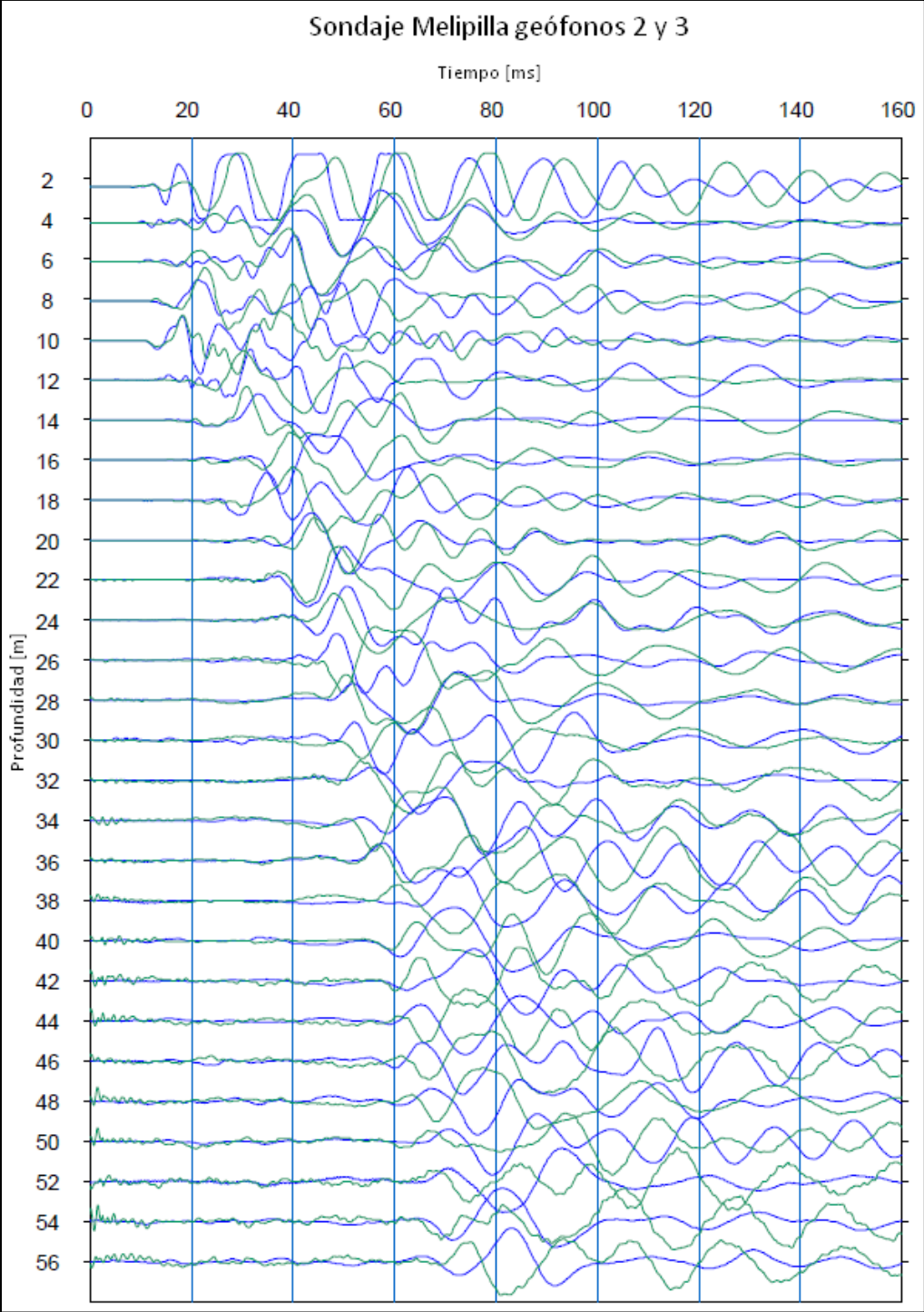
Observaciones:
Las velocidad de compresión no pudo ser analizada, al igual que la velocidad de corte en los 12 primeros metros.



Sondaje Melipilla geófono 1



Registro medición onda P



Registro medición onda S