

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL



Profesor Patrocinante: Oscar Gutiérrez A.
Profesores Comisión: Alexander Opazo V.
Franco Benedetti L.

**“ESTUDIO DEL MÉTODO MASW PARA SU
APLICACIÓN SEGÚN EL DECRETO
SUPREMO N° 61”**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil**

Leonardo Abel Sandoval Contreras

Concepción, Abril 2013

Dedicatoria

Dedicado a mi familia, mis padres Roxana Contreras y Luis Sandoval y a mi hermano Braulio Sandoval, quienes siempre me apoyaron a recorrer el camino de la Universidad y al mismo tiempo ser mi principal incentivo para alcanzar este logro.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por su incondicional apoyo y ayuda en todos estos años, por formarme como persona y entregarme los valores que me servirán para toda la vida.

A mis compañeros, principalmente a Bárbara y Alex, por la valiosa amistad formada y el compañerismo que llevó a que juntos lográramos la meta de esta carrera.

A mi profesor Oscar Gutiérrez por su completo apoyo durante la realización de mi Tesis y por darme mi primera oportunidad laboral profesional. A mis compañeros de la oficina: Cristian, Miriam, Víctor, Josselyn (ambas) y Luis, por la paciencia en enseñarme y acoplarme el mundo laboral y a Diego por su significativa ayuda en la realización de mis mediciones en terreno.

NOMENCLATURA

MASW : Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (Multichannel Analysis of Surface Waves).

ReMi : Refracción de ruido ambiental (Refraction Microtremor).

SASW : Análisis Espectral de Ondas Superficiales (Spectral Analysis of Surface Waves).

NSPT: Índice de Penetración Estándar.

Vs: Velocidad de propagación de ondas de corte.

Vs30: Velocidad de onda de corte equivalente de los 30 m superiores del terreno.

DS N° 61: Decreto Supremo N° 61.

INDICE GENERAL

NOMENCLATURA.....	iv
INDICE GENERAL.....	v
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.2. Objetivos de la Investigación.....	3
1.2.1. <i>Objetivo General.</i>	3
1.2.2. <i>Objetivos Específicos.</i>	3
1.3. Justificación del Tema.	4
1.3.1. <i>Evolución Normativa respecto a los suelos de fundación.</i>	4
1.4. Metodología de Trabajo.....	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Ondas Sísmicas.....	8
2.2. Métodos de medición de ondas.....	9
2.3. Fenómeno de Dispersión.	10
2.4. Curvas de Dispersión.....	10
2.5. Procesamiento de datos.....	12
3. METODOLOGIA DEL ANALISIS DE DATOS	13
3.1. Equipo.....	13
3.2. Evaluación del espaciamiento entre geófonos.....	14
3.2.1. <i>Prueba 1.</i>	15
3.2.2. <i>Prueba 2.</i>	17
3.3. Ensayos in-situ.....	19
3.3.1 <i>Ensayo 1: Sector Aserradero Universidad del Bío-Bío.</i>	19
3.3.2. <i>Ensayo 2: Dichato.</i>	23
3.3.3. <i>Ensayo 3: Lomas de Bellavista, Concepción.</i>	24
3.3.4. <i>Ensayo 4. Osorno.</i>	25
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	27
4.1. Ensayo 1: Sector Aserradero Universidad del Bío-Bío.	27
4.2. Ensayo 2: Dichato.....	30
4.3. Ensayo 3: Lomas de Bellavista, Concepción.....	31

4.4. Ensayo 4. Osorno.....	32
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
5.1. Conclusiones.....	34
5.2. Recomendaciones.	35
6. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.....	37
6.1. Bibliografía.....	37
6.2. Referencias.....	37

ESTUDIO DEL MÉTODO MASW PARA SU APLICACIÓN SEGÚN EL DECRETO SUPREMO N° 61

Autor: Leonardo Abel Sandoval Contreras

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: leosando@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Oscar Gutiérrez Astete

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: gutierrez.oscar@gmail.cl

RESUMEN

En la actualidad, debido a la gran actividad sísmica de nuestro país, es de vital importancia el estudio del comportamiento de los distintos tipos de suelo donde fundamos nuestras edificaciones. Es por esto, que luego del terremoto del 27 de Febrero del 2010, las normas vigentes fueron actualizadas para lograr un mejor desempeño de las estructuras frente a las sollicitaciones sísmicas y evitar posibles daños o colapsos que pueden llegar a ser desastrosos.

Una de estas actualizaciones es la nueva clasificación de suelos publicado en el Decreto Supremo N° 61. Para clasificar los suelos ahora es necesario determinar el Vs30, mediante MASW, ReMi o SASW. Por lo tanto, en el presente Proyecto de Título, se empleó el método MASW para determinar el Vs30 de diferentes tipos de suelos, analizando las diferencias existentes entre ellos. Para tener claridad en la metodología de la medición, se realizaron mediciones con parámetros variables, en este caso, el espaciamiento entre geófonos (receptores) y se determinaron las diferencias entre los resultados y cuando podrían ser aplicables.

Número de Palabras: $8237+7*250=9987$

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de estudio y trabajo de la Ingeniería Civil, el área de la geotecnia está tomando más fuerza, especialmente para realizar caracterizaciones de los suelos, identificándolos de manera más efectiva y correlacionándolos con la Norma actual. Por esta razón, los nuevos métodos tradicionales exploración del subsuelo irán dando lugar a los nuevos debido al carácter no invasivo, menores costos de ejecución, mayor información obtenida, etc., y así optimizar los diseños de edificaciones u otros. Este aspecto es muy importante en un país sísmico como lo es Chile.

Estos métodos consisten principalmente en el análisis de las ondas de corte producidas en el subsuelo y la posterior obtención de parámetros, como la velocidad de esta onda a los 30 m. con el cual se puede caracterizar una zona en particular.

En el presente Proyecto de Título se busca comprender estas nuevas tecnologías, entender la teoría de fondo para interpretar los resultados y aplicarla a la realidad local, con el fin de relacionar los resultados con la Normativa actual Chilena y hasta con las internacionales.

Por lo tanto, el método a estudiar es el MASW, el cual usando un equipo de exploración geofísica, y con ayuda de software especializados, se analizarán, interpretarán los resultados obtenidos para posteriormente realizar la clasificación del suelo.

1.2. Objetivos de la Investigación.

1.2.1. Objetivo General.

- Interpretar el método MASW para la medición del Vs30 para diferentes tipos de suelos.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Contrastar los espectros de pseudo-aceleración de la Norma Nch 433, Diseño sísmico de edificios, con el DS N° 61 para interpretar el criterio del cambio de clasificación de suelos.
- Demostrar la variabilidad de los resultados al realizar mediciones con diferentes espaciamentos de geófonos y como optimizar este parámetro para mediciones confiables.
- Relacionar la información obtenida de estas mediciones con la existente de estos suelos para comparar perfiles estratigráficos y verificar si las ondas generadas penetran hasta los 30 m.
- A medida que se realizan los ensayos, analizar los diferentes tipos de espectros de las curvas de dispersión obtenidas y definir las diferencias entre estas y por qué se producen.
- Determinar en terreno la velocidad de las ondas de corte a los 30 metros en suelos de la región del Bío-Bío mediante MASW y clasificar el suelo de acuerdo a las nuevas disposiciones del Decreto Supremo N° 61.

1.3. Justificación del Tema.

Debido al terremoto del 27 de Febrero del 2010, que afectó a nuestro país desde la región de Valparaíso hasta la región de la Araucanía, donde las mayores intensidades se percibieron en la región del Maule y la del Bío-Bío, con una magnitud de 8.8 Mw, se promulgó el Decreto Supremo N° 61 que modificará la actual Norma Chilena Nch 433, Diseño sísmico de edificios, en el cual se propone una nueva clasificación de suelos basada en la velocidad de ondas de corte a los primeros 30 metros de profundidad, donde en el artículo 7°- Situaciones transitorias se indica que:

“Durante los dos primeros años de vigencia del presente decreto, Vs se debe determinar mediante una medición in-situ, o del análisis de los datos y ensayos obtenidos de la exploración geotécnica. A partir del tercer año de vigencia de este decreto la medición de Vs in-situ será **obligatoria**.”

Por esta razón, es necesario aprender la metodología de las tecnologías a usar para las mediciones in-situ e interpretar sus resultados para la obtención coherente de los parámetros de utilidad.

1.3.1. Evolución Normativa respecto a los suelos de fundación.

En la Norma Nch 433 of.96 mod.09 los suelos se encontraban clasificados en 4 tipos I, II, III y IV (ver Tabla A1), determinados por la velocidad propagación de las ondas de corte, índices de densidad, NSPT, etc. como se muestra en la Tabla A2. A partir de este parámetro junto con otros es posible calcular los espectros de diseño. Sin embargo, en la transición entre el suelo II y el III, se producían discrepancias en los espectros con diferencias muy grandes entre ellos debido a que inexistencia de un tipo de suelo intermedio.

Sin embargo, posteriormente al terremoto del 27 de Febrero del 2010, el 5 de Noviembre del mismo año se promulgó el Decreto Supremo N°117 (DS N°117), el cual introdujo modificaciones a la Norma Nch 433 of.96 mod.09, entre los cuales destacan las deformaciones sísmicas, nuevo espectro de diseño, etc. Además se propuso una nueva clasificación de suelos, donde se agregó un tipo de suelo V para calificar a los suelos especiales.

Con el cambio del Decreto Supremo N°117, en la práctica, al ensayar diferentes suelos prácticamente ningún suelo calificó como suelo II, por lo que la mayoría de estos calificaban como suelo III. Por esta razón, este Decreto no corrigió el problema que existía con la Nch 433 of.96 mod.09 con los suelos tipo II y III.

En Noviembre del 2011, se promulgó una nueva modificación a la norma Nch 433 of.96 mod.09, esta vez con el Decreto Supremo N°61. Este documento, de manera similar al anterior introdujo nuevas disposiciones de diseño, sin embargo, corrigió la incongruencia de la Norma al proponer nuevamente una clasificación de suelos, esta vez denotados con las letras A, B, C, D y E, donde el suelo tipo A corresponde al de mejor comportamiento (roca) hasta el tipo E, siendo este el de mayor exigencia sísmica. La novedad es la incorporación un suelo intermedio entre el tipo II y III correspondiente al suelo tipo C, como se observa en la Tabla A4. Esta nueva clasificación se basa en la rigidez a bajas deformaciones de los estratos a los 30 m. superiores del terreno la cual está relacionada directamente con la velocidad de las ondas de corte a esa profundidad.

En la Figura A1a se puede observar el espectro de respuesta de la Norma Nch 433 of. 1996, mientras que en la Figura A1b se aprecia el de DS N° 61, ambas con $A_0=0.4g$ e $I=1.0$. Se aprecia que los 2 primeros tipos de suelo no varían en demasía entre sí, sin embargo, el suelo C es efectivamente un suelo intermedio entre el suelo III y IV. Otra diferencia significativa es el que ocurre entre el suelo IV y el D, donde este último posee pseudo-aceleraciones considerablemente más altas que el suelo IV hasta aproximadamente un periodo $T=1.0$ s. Además, esta nueva clasificación ajusta de mejor forma la inconsistencia que existía en la norma anterior con los suelos I y II que a partir del período de $T=1.2$ s,

estos suelos se invierten, quedando el suelo I con mayores pseudo-aceleraciones que el suelo II. En el nuevo DS N° 61 este conflicto se corrige hasta un periodo $T=2$ s, luego sigue existiendo esta inconsistencia, pero esos periodos ya no se presentan en estructuras comunes por lo que se puede despreciar este problema.

1.4. Metodología de Trabajo.

Los objetivos de la presente Memoria de Título se cumplirán siguiendo las siguientes etapas mostradas en la Figura 1:

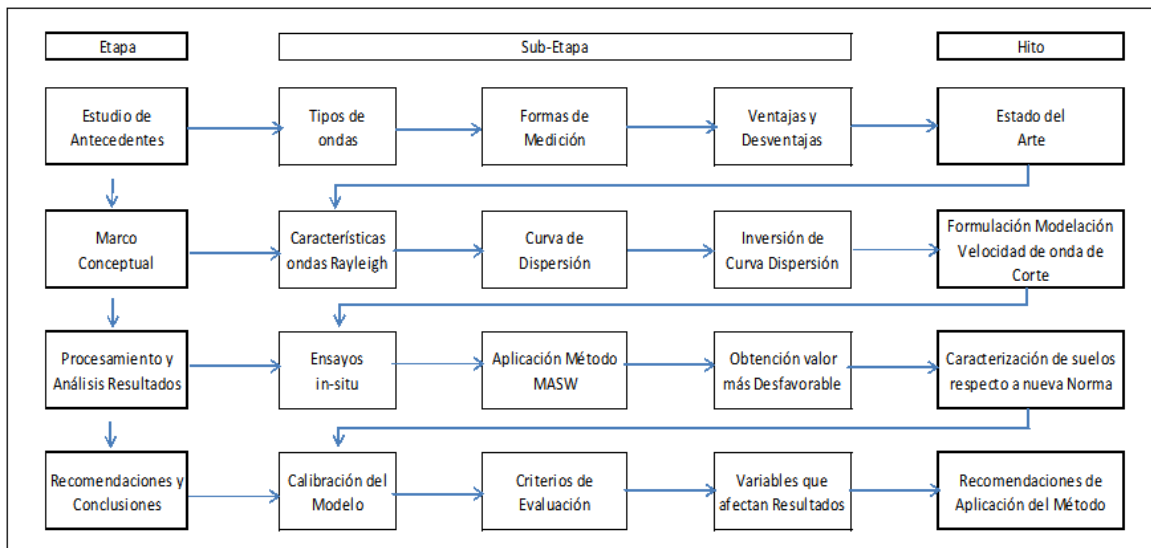


Figura 1. Esquema de Metodología de trabajo.

Etapa 1.- Estudio de antecedentes: Se realiza una investigación técnica sobre los parámetros que intervienen en la medición de ondas de corte, además de una revisión bibliográfica de la Norma Nch 433 of.96 mod. 09, y de las posteriores modificaciones mediante el Decreto Supremo N° 117 y N° 61.

Etapa 2.- Marco Conceptual: Se estudia el tipo de onda medible con los métodos ya mencionados, además se investiga y analiza los procesos para la obtención de las curvas de dispersión y la posterior inversión de la misma para determinar el perfil de ondas característico del suelo en estudio.

Etapa 3.- Procesamiento y análisis de resultados: Luego de la toma de datos en terreno en los sitios elegidos, estos se analizan este mediante software aplicando los criterios determinados en la etapa anterior.

Etapa 4.- Recomendaciones y conclusiones: posteriormente al análisis de resultados, se procede a sintetizar el trabajo para determinar los más efectivos criterios de medición, la susceptibilidad de variación de algunos parámetros de modo de lograr realizar esta medición en cualquier tipo de suelo con resultados satisfactorios.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ondas Sísmicas.

Durante un movimiento sísmico, parte de la energía liberada es transmitida en forma de ondas que viajan en el suelo, estas generan movimiento al perturbar el medio donde viajan. Estas ondas se clasifican principalmente por la profundidad donde actúan, por lo que existen 2 tipos: las ondas sísmicas internas o corporales y las superficiales, las que se explican en detalle en el Anexo A.

Ondas Rayleigh: Es un tipo de onda sísmica superficial también llamada ground roll, en este caso, las partículas se desplazan mediante una trayectoria elíptica retrograda en el plano vertical del medio de propagación (ver Figura A8), teniendo así bajas velocidades, bajas frecuencias y gran amplitud. Está demostrado que $2/3$ de la energía liberada durante un sismo corresponden a estas ondas, por lo tanto son las principales ondas que son percibidas durante un terremoto y además son las más peligrosas para las fundaciones que pueden producir daños considerables a las estructuras, incluso pudiendo entrar en resonancia con algunas edificaciones, por lo tanto son las analizadas en las mediciones superficiales.

2.2. Métodos de medición de ondas.

Los métodos para la medición de ondas superficiales, dependiendo del tipo de fuente que utilicen, se clasifican principalmente 3 tipos, los métodos activos, pasivos y los híbridos. Ver Anexo A.

El método MASW es una medición del tipo activa, donde la fuente generadora de las perturbaciones corresponde a una fuente impulsiva como el golpe de un martillo en el suelo. Como dice su nombre, el arreglo de geófonos es de múltiples canales con al menos 12 geófonos (Roma, 2006), estos se disponen linealmente, equidistantes entre ellos en distancias cortas (1-2 m) y largas (50-100 m) (Linares, 2005). Luego del registro, se obtiene la curva de dispersión de las ondas superficiales (Rayleigh) permitiendo identificar y/o rechazar modos de la onda, así como otros ruidos del registro. Posteriormente estas señales pueden ser analizadas por el software respectivo para la determinación del perfil de ondas de corte entre otros parámetros. Para más detalles, dirigirse al Anexo A.

Según el Decreto Supremo N° 61, “La velocidad de propagación de las ondas de corte puede ser medida por ensayos down-hole, cross-hole o sonda de suspensión o a partir de mediciones de ondas superficiales (Rayleigh), por métodos como SASW, MASW o ReMi. En estos casos se deben informar las curvas de dispersión y los resultados del perfil de velocidades en profundidad para dos mediciones preferentemente ortogonales. Adicionalmente, cuando se utilice el método ReMi se debe incluir una medición con una fuente activa de conocida ubicación”.

Por lo tanto, para efectos de este Proyecto de Título, se estudiara el procedimiento de medición de ondas superficiales correspondiente al método MASW, aplicándolo en diferentes tipos de suelo.

2.3. Fenómeno de Dispersión.

Se entiende por dispersión al fenómeno que ocurre durante el movimiento de una onda cuando se “disemina” a distintas frecuencias en el medio en el cual viaja.

Las ondas de Rayleigh son por naturaleza dispersivas, por lo que a cada frecuencias o longitud de onda, el tren de ondas viaja a una determinada velocidad de fase, por lo tanto cada frecuencia penetra una determina profundidad especifica. (Khareshi et al. 2010).

Por lo tanto, si el suelo en estudio es homogéneo en profundidad, las ondas de Rayleigh no son dispersivas, al contrario de un suelo no homogéneo (como casi la totalidad de los suelos), donde se produce el fenómeno de dispersión de las ondas. (Roma, 2006).

Debido a esto, la forma de analizarlas y cuantificarlas es mediante curvas de dispersión graficando la velocidad correspondiente a cada frecuencia de la onda. A partir de estas curvas se puede conseguir información de la distribución de la velocidad de las ondas de corte en el suelo respecto a la profundidad. Justamente esta heterogeneidad de las velocidades la que permite la existencia del comportamiento dispersivo (Lay, 1995). Posteriormente se retomará este tema, el cual es uno de los más importantes para la determinación de resultados de análisis de las ondas superficiales.

2.4. Curvas de Dispersión.

Debido a la naturaleza dispersiva de las ondas de Rayleigh, la determinación de la velocidad de las ondas de corte se obtiene a partir de un análisis de las curvas de dispersión generadas del registro sismológico medido in-situ. Estas curvas corresponden a un espectro de frecuencias vs velocidad de fase, obtenidas luego de aplicar una transformada rápida de Fourier que cambia los datos desde el dominio del tiempo al de la frecuencia.

Los suelos en general son un material atenuante (Park et al. 1999), por lo tanto, la amplitud de las ondas que viajan en el disminuye a medida que se aleja de la fuente que las generó. A

medida que se alcanzan mayores profundidades, la longitud de onda (λ) es mayor que en los estratos superiores, además, como el suelo tiende a aumentar su rigidez a mayores profundidades, hasta llegar a la roca, son las frecuencias más bajas las que penetran más profundo, mientras que las ondas de altas frecuencias viajan en los estratos más superficiales, gracias a que la frecuencia es el inverso de la longitud de onda. Esta situación se demuestra en el Anexo A. Luego la relación entre la profundidad y longitud de onda es la Ecuación 1.

$$z = \frac{\lambda}{2 * \pi * vf * \alpha} \quad \text{Ec. 1}$$

Como se puede advertir en la ecuación anterior, las componentes mayores de longitud de onda (frecuencias bajas) penetran a mayor profundidad que las longitudes de ondas bajas (frecuencias altas) como se puede observar esquemáticamente en la Figura A12.

Así se explica que las ondas al atravesar los diferentes estratos de suelo, esta se encontrará con diferentes características (densidad, humedad, modulo de poisson, etc), generando diferentes componentes de frecuencias, y por lo tanto viajando a diferentes velocidades. De esta forma, el sismógrafo registra estas ondas a diferentes tiempos de llegada.

El método MASW, al ser un método de medición activo, genera ondas que viajan a altas frecuencias por lo que no pueden penetrar grandes profundidades, sin embargo, en la mayoría de las ocasiones puede alcanzar los 30 metros de profundidad, arrojando valores de Vs30 correctos. En algunas mediciones puede que este método sea insuficiente para un análisis más preciso a la profundidad deseada. Estos casos pueden darse cuando el suelo en estudio posea los estratos rígidos a poca profundidad (antes de los 30 m.) o en situaciones con mucho ruido ambiental, el cual dificulta el análisis espectral. En tales casos, es útil el uso combinado de MASW con un método pasivo como ReMi, complementándose en tales situaciones.

2.5. Procesamiento de datos.

Luego de la toma de datos in-situ, el equipo (sismógrafo) es capaz de guardar un registro de los datos de cada ensayo, el cual, luego de 3 etapas:

- obtención de la curva de dispersión experimental,
- cálculo la curva de dispersión aparente,
- inversión de la curva de dispersión aparente

Para luego determinar el perfil de velocidad de ondas de corte del suelo en estudio y el V_{s30} . Se detallan estas etapas en el Anexo A.

3. METODOLOGIA DEL ANALISIS DE DATOS

Las mediciones en terreno se realizan mediante arreglos lineales, es decir, la disposición de los geófonos es en línea recta separados entre sí a una cierta distancia. La fuente impulsiva será el golpe de un martillo a una placa metálica alineada con el arreglo, como se muestra en la Figura 2a. De acuerdo al espacio físico del sitio de exploración, la separación entre los arreglos variará entre los 2 y los 4 m. Debido a esto, se realizarán mediciones de un mismo suelo con diferente espaciamiento entre los geófonos para determinar la sensibilidad del método ante esta variable.

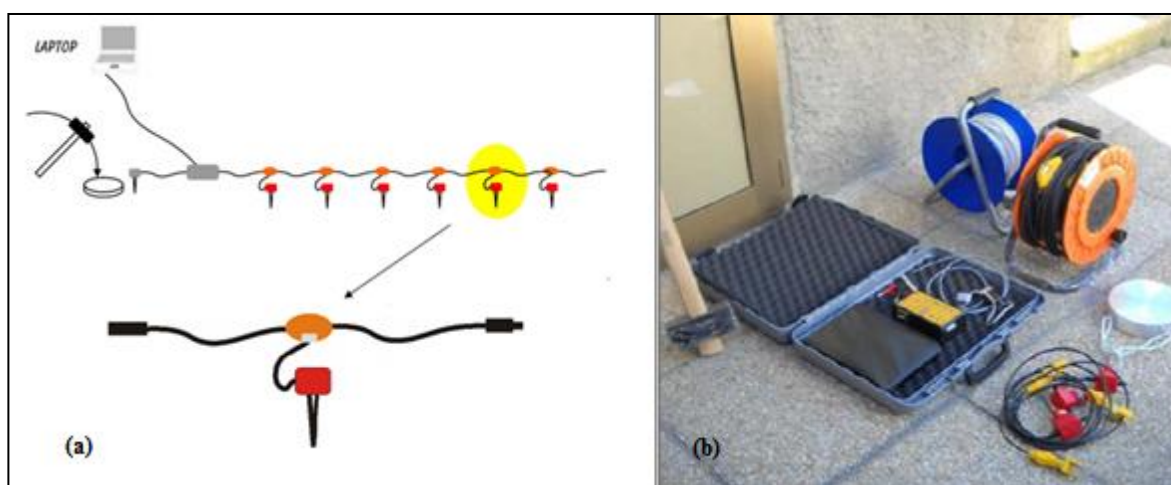


Figura 2. Esquema disposición de geófonos (a) y equipo empleado (b).

Como se aprecia además en el esquema, entre la fuente y los geófonos se encuentra el dispositivo que registra la información de los geófonos y digitaliza esta información guardándola en un notebook.

3.1. Equipo.

- Sismógrafo DoReMi de SARA Electronic Instruments. Ver Figura 2b.

Memoria: 64 kBytes

Rango de Frecuencias: 200 a 20000 Hz. (5 a 0.05 ms)

Resolución: 24 Bytes

Sistema Dinámico: Hasta 155 dB.

- Geófonos de 4.5 Hz.
- Cables de transmisión de datos.
- Martillo.
- Placa metálica.
- Soportes de PVC para geófonos.
- Software DoReMi para digitalización del registro.
- Software EasyMASW para análisis del registro.

El método MASW trabaja con la siguiente configuración:

- Número de canales (geófonos) : 16
- Espaciamiento geófonos : 2-4 m.
- Intervalo de muestreo : 1 ms
- Tiempo Adquisición : 2 s
- Frecuencia : 1000 Hz

De acuerdo a la literatura técnica, el número de geófonos idealmente deberían ser 24, sin embargo con los 16 disponibles la adquisición de información igualmente es apropiada. (Rojas, 2008)

De acuerdo al desarrollador del programa EasyMASW, con los análisis de errores menores a 2% se alcanzan resultados óptimos, por lo que no es necesario volver a examinar el registro.

3.2. Evaluación del espaciamiento entre geófonos.

Dentro de las variables que pueden afectar los resultados de las mediciones, una de las que hay que tener más en consideración es el espaciamiento entre los geófonos en el arreglo lineal. Si bien, para el método MASW, estas varían entre 1-4 m. (Cuadra, 2007), dependiendo del sitio en estudio, puede que no se puedan utilizar todos los geófonos, en

caso de espacios reducidos o separaciones muy grandes en sitios espaciosos. La separación entre los geófonos está directamente relacionada con la longitud de onda y esta con la profundidad máxima de investigación. Según estudios, la profundidad máxima es aproximadamente la mitad del largo del arreglo (Park, 2002).

Por lo tanto, antes de efectuar las mediciones, se procedió a realizar mediciones de prueba en espacios reducidos y amplios, variando la distancia de separación entre los geófonos. Como primera prueba, se tiene una medición del futuro emplazamiento del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Bío-Bío, el cual debido al cerco perimetral de 35x20 m, no se pueden usar espaciamientos grandes. En segundo lugar, se tiene la medición realizada en la cancha de fútbol de la Universidad de Bío-Bío.

3.2.1. Prueba 1.

El objetivo de este ensayo era evaluar cómo afecta al resultado de la medición, realizándola en tramos cortos usando diferentes espaciamientos entre geófonos. El sitio en análisis corresponde al terreno propuesto para el Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad del Bío-Bío como se observa en la Figura B1. Las dimensiones del sitio son de 33x24 m².

Por lo tanto, la primera medición corresponde al arreglo más largo, donde la prueba se realizó variando la separación entre geófonos manteniendo fijo el largo total de arreglo de modo de abarcar la totalidad del sitio. De esta forma, las variables son las que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros medición 1, Depto. Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

Espac. (m)	Num. Geof.	L. total (m)
2	16	32
3	11	33
4	8	32

Luego del análisis de los datos, se determinaron los resultados que se muestran en la Tabla 2, de la que se puede observar que a los 3 m. y 4 m., los valores fluctúan mucho más que a los 2 m. lo que se ve reflejado en los altos valores de desviación estándar a mayor separación entre geófonos, esto debido en gran medida por la imposibilidad del uso de los 16 geófonos.

Tabla 2. Resultados medición 1, Depto. Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

Espac. (m)	2		3		4	
	Vs30 (m/s)	Error (%)	Vs30 (m/s)	Error (%)	Vs30 (m/s)	Error (%)
	244	0.8	280	0.16	305	0.08
	250	0.13	243	0.28	315	0.04
	-	-	307	0.1	268	0.03
Promedio	247	0.33	276.67	0.18	296	0.05
Des. Est.	4.24	0.41	32.13	0.09	24.76	0.03

Nota: En la tercera medición a 2 m , el registro no pudo analizarse debido a una medición fallida por algún tipo de interferencia que ocurrió en ese instante.

Por otro lado, la medición 2 corresponde al lado más corto del sitio en estudio, así la cantidad de geófonos empleados en esta medición es aún menor que en la anterior, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros medición 1, Depto. Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

Espac. (m)	Num. Geof.	L. total (m)
2	13	26
3	8	24
4	6	24

Los resultados son los que se aprecian en la Tabla 4. A simple vista, el Vs30 determinado en las pruebas es muy disperso y no converge a un valor, además se demuestra esta situación al existir desviaciones estándar elevadas.

Tabla 4. Resultados medición 2, Depto. Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

Espac. (m)	2		3		4	
	Vs30 (m/s)	Error (%)	Vs30 (m/s)	Error (%)	Vs30 (m/s)	Error (%)
	291	0.05	296	0.08	379	0.08
	360	0.13	235	0.1	208	0.45
	331	0.07	301	0.07	282	0.46
Promedio	327.33	0.08	277.33	0.08	289.67	0.33
Des. Est.	34.65	0.04	36.75	0.02	85.76	0.22

Por lo tanto, se puede concluir que usando una cantidad menor de geófonos y más aún espaciados a distancias mayores a 3 m. la solución no converge a un resultado en particular. Por esta razón, se realizó otro ensayo de prueba con el caso contrario al descrito anteriormente.

3.2.2. Prueba 2.

El segundo ensayo de prueba fue realizado en las áreas deportivas de la Universidad del Bío-Bío, específicamente en la cancha de fútbol, como se muestra en la Figura B20. En este caso, sin restricciones de espacio, se realizaron mediciones a 2 m, 3 m y 4 m, usando los 16 geófonos disponibles. Los parámetros de los ensayos son los especificados en la Tabla 5. Donde se aprecia las mayores longitudes del arreglo lineal respecto a la prueba 1.

Tabla 5. Parámetros medición 2, Depto. Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

Espac. (m)	Num. Geof.	L. total (m)
2	16	32
3	16	48
4	16	64

Es así que luego de realizada las mediciones, se obtuvieron los resultados de la Tabla 6. Donde se aprecie claramente que en todos los casos, el Vs30 tiende a converger dentro de un rango de valores entre 240 m/s y 250 m/s. por la misma razón, las desviaciones estándar son bajas, comparándolas con la prueba 1.

Tabla 6. Resultados medición, Cancha de fútbol, Universidad del Bío-Bío.

Espac. (m)	2		3		4	
	Vs30 (m/s)	Error (%)	Vs30 (m/s)	Error (%)	Vs30 (m/s)	Error (%)
	258	0.3	262	0.7	264	0.04
	237	0.02	237	0.8	256	0.1
	236	0.07	245	0.9	252	0.3
Promedio	243.7	0.1	248	0.8	257.3	0.1
Des. Est.	12.42	0.15	12.77	0.1	6.11	0.14

Sin embargo, esta información se complementa además con el perfil de velocidades facilitado por el software, el cual es que se muestra en la Figura B31, donde se comparan para los 3 casos estudiados. En la Figura B31a, se muestra el perfil de la prueba con espaciamiento de 2 m, en el que se aprecia que hasta los 9 m de profundidad existe un estrato de velocidad de 130 m/s, luego aumenta su rigidez hasta encontrar la máxima velocidad de 915 m/s a los 22 m. Pero en la Figura B31b-c, correspondientes al ensayo de 3 m y 4 m respectivamente, se distingue que el estrato rígido se encuentra a 28 m y a 30 m. Esta diferencia se debe a que el método MASW trabaja con un rango de frecuencias altas, las cuales no logran penetrar grandes profundidades, lo que hace deducir que este método realizado a espaciamientos cortos (por ej. 2 m), no alcanza la profundidad deseada mínimo 30 m. lo que se mejoraría realizando un ensayo de fuente pasiva como lo es ReMi. Cabe recalcar además que un espaciamiento de 2 m con 16 geófonos conforma un arreglo de 32 m. lo que según las aproximaciones mostradas anteriormente no cumple con la profundidad máxima. Esto se debe principalmente a que la separación entre los geófonos está relacionada con la longitud de onda y esta con la profundidad, como se mencionó anteriormente.

Por lo se concluye que para asegurar que las mediciones in-situ sean capaces de converger a un valor, se pueden usar diferentes espaciamentos entre los geófonos (2 m, 3 m, 4 m), pero se debe forzar a usar el arreglo completo de 16 geófonos o más, ya que en casos contrarios, fácilmente se pueden obtener valores erróneos aún teniendo porcentajes de error bajos. En el caso de 2 m de espaciamento, a pesar de obtener resultados coherentes, los 16 geófonos disponibles no alcanzan la profundidad deseada y para que el análisis sea lo más valido posible debería usarse adicionalmente una medición ReMi o usar un arreglo mas largo, por ejemplo de 24 geófonos o más.

3.3. Ensayos in-situ

3.3.1 Ensayo 1: Sector Aserradero Universidad del Bío-Bío.

Esta medición consintió en la toma de datos en 2 arreglos lineales longitudinales que atravesaban los sondajes realizados anteriormente. Adicionalmente se realizó una medición transversal a estas como lo especifica en DS N° 61. En la Figura C1 se muestra a distribución de las mediciones. La primera medición corresponde a N-S (1), que en la Tabla 7 se señalan los parámetros para empleados en esta medición.

Tabla 7. Parámetros de medición N-S (1).

N° Geófonos	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Orientación
16	32	2	N-S (1)

Por lo tanto, se instala el equipo en la orientación N-S (1) y se realiza la medición, tomando 4 registros. Posteriormente se desplaza el arreglo en la posición N-S 2 y se realizan 4 mediciones. Finalmente, se dispone el arreglo transversalmente a las dos mediciones anteriores, correspondiente a la medición E-O.

Con el sistema completamente armado y conectado, se procede a golpear la placa metálica con el martillo (mazo) para producir la perturbación que será captada por cada uno de los geófonos y acoplada por el sismógrafo. El registro es guardado en el notebook conectado al

sistema, correspondiente a un registro de movimiento vertical respecto al tiempo (x,t) . Se puede apreciar además el “pulso” generado por el golpe del mazo y como este es captado a lo largo del arreglo y como este se va disipando a medida que se desplaza dentro de los 2 segundos de registro.

Luego, mediante el software especializado Easy MASW, se analizó el registro, para generar la curva de dispersión experimental asociada a los datos. Se logra distinguir en la Figura 3a claramente el modo fundamental de las ondas de Rayleigh en el espectro como la curva roja más oscura. Este tipo de espectro se debe principalmente a que el suelo en análisis posee una estratigrafía compuesta de estratos que aumentan su rigidez monótonamente con respecto a la profundidad, por lo que el “tren de ondas” se propaga aumentando su velocidad a medida que penetra a mayores profundidades y no existen “saltos” repentinos que se reflejarían en el espectro como un modo superior al fundamental.

En la Figura 3b, se observa la “elección” de la curva de dispersión aparente, donde se seleccionó el modo fundamental representativo. Estos puntos seleccionados corresponden a un conjunto de puntos de velocidad y frecuencia (v,f) , los cuales se usarán luego en el proceso de inversión. El software además agrega líneas de muestreo que asigna dependiendo de los parámetros iniciales del análisis.

Posteriormente se realizó el último paso del proceso, la inversión de la curva de dispersión aparente. Dado un modelo inicial que supone el software, determinado por el espesor, densidad, módulo de Poisson, velocidad de onda de corte y velocidad de onda P, se simula una curva de dispersión, la cual modificando los parámetros, de forma iterativa, se busca lograr la mayor coincidencia entre la curva de dispersión obtenida. Finalmente, en la Figura 3c, se obtiene el perfil determinado con el mínimo error (línea negra), luego de 1000 iteraciones que realiza el software.

Del perfil se puede percibir que a medida que aumenta la profundidad del terreno, su velocidad de ondas de corte también aumenta, por lo que se puede inferir que los estratos

son cada vez más rígidos con la profundidad. Además se observa que aproximadamente a los 27 m de profundidad se alcanza un estrato rocoso, con una velocidad de 1125 m/s.

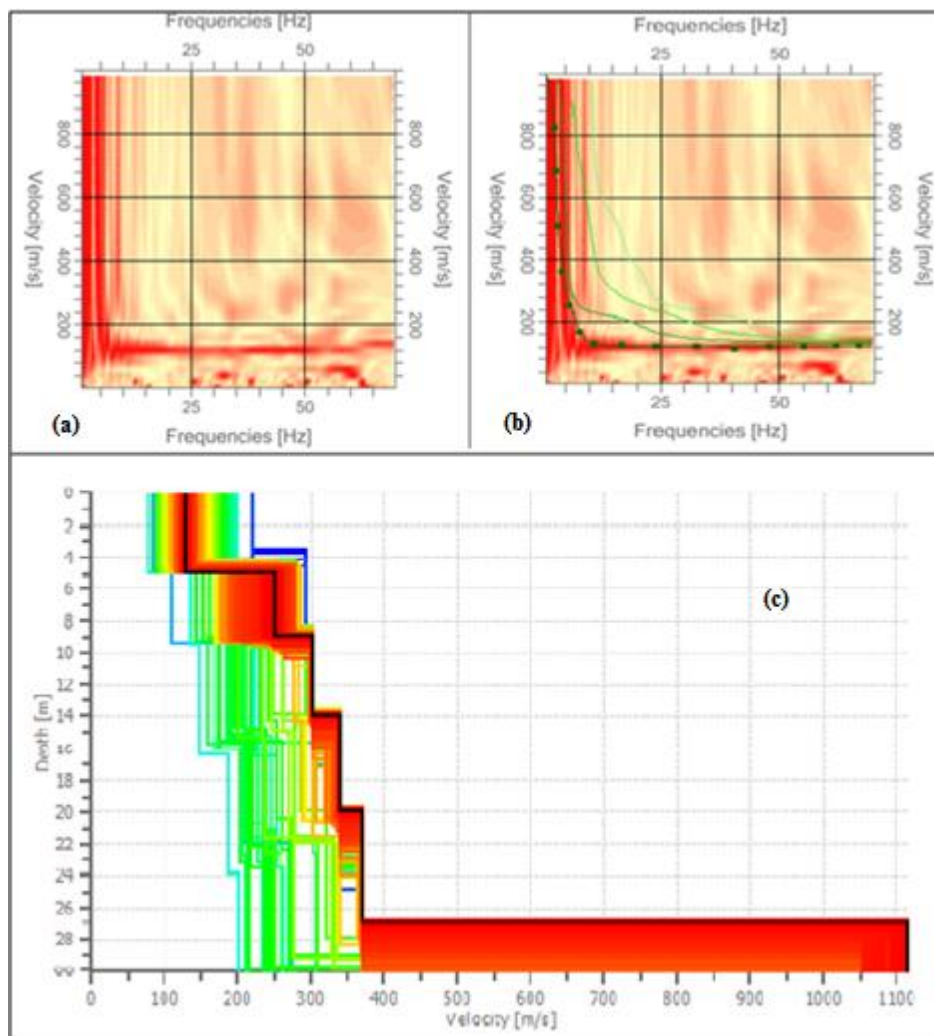


Figura 3. Curva de dispersión experimental (a), Curva de dispersión aparente (b) y perfil de velocidades (c). Sector Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

El resultado final del registro en estudio arroja los siguientes valores que se observan en la Tabla 8. Notar el bajo error del análisis.

Tabla 8. Resultados análisis N-S 1-1. Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

Vs 30 (m/s)	271
Error (%)	1
Tipo de Suelo	D

Por lo tanto, repitiendo este procedimiento con los 4 registros tomados a partir del arreglo N-S 1, en la Tabla 9 se tienen los siguientes resultados:

Tabla 9. Resultados análisis. Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4
Vs 30 (m/s)	271	266	264	266
Error (%)	1	0.9	0.2	0.7
Tipo de Suelo	D	D	D	D

Luego, se vuelve a repetir los pasos mencionados anteriormente para los arreglos N-S 2 y E-O con los cuales se abarca la totalidad del terreno en estudio obteniéndose mediciones representativas del sitio. En la Tabla 10 se señalan los parámetros de medición para esta dirección.

Tabla 10. Parámetros de medición N-S 2. Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

N° Geófonos	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Orientación
16	32	2	N-S (2)

Luego del análisis con software, los resultados de las 4 mediciones es el que muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados análisis N-S 2. Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4
Vs 30 (m/s)	273	251	260	248
Error (%)	0.05	0.2	0.3	0.2
Tipo de Suelo	D	D	D	D

En la dirección E-O se repitió en ensayo para determinar los datos en una dirección ortogonal a las anteriores, los parámetros de la Tabla 12 fueron los aplicados en esta medición.

Tabla 12. Parámetros de E-O. Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

N° Geófonos	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Orientación
16	32	2	E-O

Posteriormente, de la misma forma que en el caso anterior, se obtuvieron los resultados de la dirección E-O, que se muestran la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados análisis E-O. Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4
Vs 30 (m/s)	274	248	295	299
Error (%)	0.04	0.2	0.1	0.6
Tipo de Suelo	D	D	D	D

En resumen, los datos son los señalados en la Tabla 14, donde a partir de ellos se obtiene el valor final del Vs30 del Sector Aserradero de la Universidad del Bío-Bío.

Tabla 14. Resumen del Vs 30 determinado. Aserradero, Universidad del Bío-Bío.

	Vs 30 (m/s)		
	N-S 1	N-S 2	E-O
Medición 1	271	273	274
Medición 2	266	251	248
Medición 3	264	260	295
Medición 4	266	248	299

Por lo tanto, el Vs30 medido en el sector de la Universidad del Bío-Bío es de 248 m/s y pre clasifica según el DS N° 61 como suelo tipo D.

3.3.2. Ensayo 2: Dichato.

La siguiente medición fue realizada en el sector oriente de la localidad de Dichato, comuna de Tomé. La conformación de las mediciones se detalla en la Figura C6, con los parámetros descritos en la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros de medición. Dichato.

N° Geófonos	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Orientación
16	64	4	Todas

Luego de la medición anterior, se determinó que midiendo 2 veces en cada arreglo era suficiente para la obtención de resultados, por lo que se aplicará este criterio para las próximas mediciones. Por lo tanto, los resultados de los siguientes ensayos son los que se observan en la Tabla 16.

Tabla 16. Resumen del Vs30 determinado. Dichato.

	N-S (1)		N-S (2)		E-O	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
Vs 30 (m/s)	260	241	275	278	241	261
Error (%)	0.17	0.14	0.05	0.1	0.14	0.14
Tipo de Suelo	D	D	D	D	D	D

Es así que se determina que el Vs30 del sector Pampa Austral de Dichato es de 241 m/s clasificándose preliminarmente como Suelo Tipo D.

3.3.3. Ensayo 3: Lomas de Bellavista, Concepción.

Esta medición fue realizada en el sector Lomas de Bellavista de Concepción. La ubicación de los arreglos es la mostrada en la Figura C11, mientras que los parámetros de medición son los presentados en la Tabla 17.

Cabe destacar que debido al espacio disponible en el sitio a analizar, los arreglos N-S 1/N-S 2 lograron cubrir el espacio con los 16 geófonos disponibles a un espaciamiento entre geófonos de 4 m, sin embargo, en la dirección transversal, el espacio era limitado por lo que se optó por un espaciamiento entre geófonos de 2.5 m. De esta forma se usó la totalidad de los geófonos y se cubrieron las dimensiones del sitio.

Tabla 17. Parámetros de medición. Lomas de Bellavista, Concepción.

N° Geófonos	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Orientación
16	64	4	N-S (1) / N-S(2)
16	40	2.5	E-O

Luego, los resultados del análisis son los mostrados en la Tabla 18. Se puede señalar que si bien todos los resultados fueron obtenidos con errores muy bajos (entre 1.4% y 0.04%), las diferencias entre los valores finales de Vs30 difieren en mayor medida que en los casos anteriores. Esta particularidad se abordará en el Análisis de Resultados.

Tabla 18. Resumen del Vs30 determinado. Lomas de Bellavista, Concepción.

	N-S (1)		N-S (2)		E-O	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
Vs 30 (m/s)	289	300	271	270	258	262
Error (%)	0.4	1.6	0.04	0.2	0.8	1.4
Tipo de Suelo	D	D	D	D	D	D

3.3.4. Ensayo 4. Osorno.

La medición de Osorno fue realizada en la entrada de la Ciudad, específicamente entre las calles 18 de Septiembre y Julio Buschman. La ubicación y la disposición de la medición se muestran en la Figura C16.

Debido al poco espacio para realizar la medición, solo se efectuó una medición en dirección N-S y una en el sentido transversal E-O. El registro se hizo con 15 geófonos espaciados a 2 m entre ellos para lograr abarcar la totalidad del terreno, como se indica en la Tabla 19.

Tabla 19. Parámetros de medición. Osorno

N° Geófonos	Longitud (m)	Espaciamiento (m)	Orientación
15	30	2	Ambas

Los resultados definitivos de este ensayo se muestran en la Tabla 20, donde se observa que de manera similar a lo sucedido en la medición en las Lomas de Bellavista, el valor del Vs30 fluctuó de mayor forma que en los otros casos. Todas estas singularidades se tratarán con mayor profundidad en el Análisis de Resultados.

Tabla 20. Resumen del Vs30 determinado. Osorno.

	N-S		E-O	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
Vs 30 (m/s)	387	435	429	464
Error (%)	1.2	0.78	2	0.9
Tipo de Suelo	C	C	C	C

Así que se determina que el Vs30 del sector de Osorno es de 258 m/s preclasificándose como Suelo Tipo C.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la información obtenida en la pruebas de campo, corresponde analizar e interpretar el producto de estas, enfocándose principalmente a la forma de las curvas de dispersión, variabilidad del resultado final del Vs30, porcentajes de error obtenidos, influencia del ruido ambiental (cuando corresponda), etc.

Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

4.1. Ensayo 1: Sector Aserradero Universidad del Bío-Bío.

En la medición realizada en este sitio se observa en el registro de la Figura C3a que la señal producida por el impacto del martillo se registro de forma muy clara y limpia, sin interferencias ni ruido ambiental que “ensucie” el registro. Debido a esto, es que la curva de dispersión característica del suelo en estudio corresponde al modo fundamental de las ondas de Rayleigh. El ruido ambiental mancharía el espectro de la curva de dispersión como se puede observar en la Figura 4, entorpeciendo la lectura de los datos y en casos más extremos imposibilitando de identificar el o los modos de vibración.

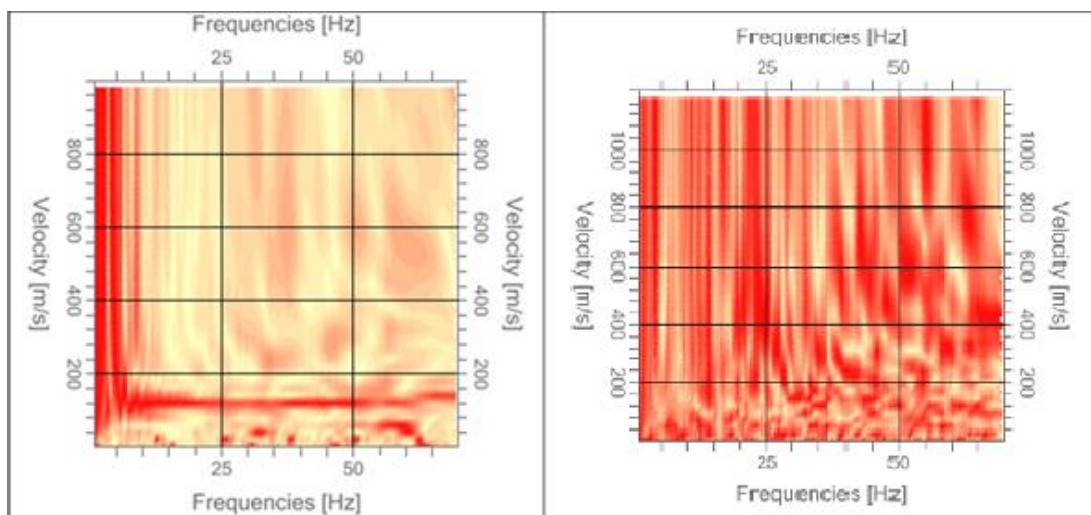


Figura 4. Comparación entre registro “limpio” (izquierda) y “sucio” (derecha).

Cabe señalar que la forma obtenida del espectro de la curva de dispersión en este caso es el ideal para su posterior análisis, puesto que el modo fundamental se marca claramente en el

espectro, facilitando la elección de la curva de dispersión aparente. Esta forma se obtuvo gracias a que los estratos del suelo en análisis siempre aumentaban su rigidez con la profundidad y a al bajo ruido ambiental en el sitio en estudio.

Respecto a los resultados luego de las mediciones en ambos sentidos, se aprecia que los valores de Vs30 determinados son prácticamente iguales entre ellos. En la Tabla 21 se muestra las variables estadísticas de estos valores y de los porcentajes de error alcanzado.

Tabla 21. Promedio y Desviación Estándar de los resultados. Universidad del Bío-Bío.

Medición	N-S 1		N-S 2		E-O	
	Vs 30 (m/s)	Error (%)	Vs 30 (m/s)	Error (%)	Vs 30 (m/s)	Error (%)
M1	271	1	273	0.005	274	0.004
M2	266	0.9	251	0.2	248	0.2
M3	264	0.2	260	0.3	295	0.1
M4	266	0.7	248	0.2	299	0.6
Prom.	266.75	0.7	258	0.18	279	0.23
Desv. Est.	2.99	0.36	11.22	0.12	23.4	0.26

De acuerdo a la Tabla 21, se puede corroborar lo que se preveía. La variación máxima entre los promedios de las mediciones es de 21 m/s, lo cual para un ensayo en terreno es una diferencia mínima, además no hay variaciones tales que clasifiquen al suelo a un tipo diferente al tipo D.

Por lo tanto, el suelo de la Universidad del Bío-Bío medido en el sector del Aserradero preclasifica como suelo D según el DS N° 61, con un Vs30 de 248 m/s correspondiente al menor valor registrado como el más desfavorable.

En este caso, se contó con el informe de mecánica de suelos realizado por Aragón LTDA, correspondiente a 2 sondajes efectuados en el lugar. Sin embargo, una de estas prospecciones se realizó hasta 10 m. por lo que se analizará el sondaje N° 2. Del informe se extrae la información del NSPT mostrado en la Tabla 22, del que se desprende que hasta la profundidad de 5 m se presenta un número de golpes inferior a los 10 golpes/pie. Luego de esta profundidad, el número de golpes aumenta hasta los 16 m. de profundidad valores

entre los 20 y 66 golpes/pie evidenciando una compacidad rígida, para posteriormente obtener rechazos hasta los 31 m. indicando un estrato altamente cementado.

Tabla 22. Número de golpes registrados en el ensayo SPT, sondaje N° 2.

Profundidad (m)	Nspt (golpes/pié)	Profundidad (m)	Nspt (golpes/pié)	Profundidad (m)	Nspt (golpes/pié)
0.55 – 1.00	8	11.55 – 12.00	20	22.55 – 23.00	R
1.55 – 2.00	6	12.55 – 13.00	22	23.55 – 24.00	R
2.55 – 3.00	2	13.55 – 14.00	30	24.55 – 25.00	R
3.55 – 4.00	3	14.55 – 15.00	41	25.55 – 26.00	R
4.55 – 5.00	2	15.55 – 16.00	66	26.55 – 27.00	R
5.55 – 6.00	10	16.55 – 17.00	R	27.55 – 28.00	R
6.55 – 7.00	3	17.55 – 18.00	R	28.55 – 29.00	R
7.55 – 8.00	10	18.55 – 19.00	52	29.55 – 30.00	R
8.55 – 9.00	6	19.55 – 20.00	71	30.55 – 31.00	R
9.55 – 10.00	12	20.55 – 21.00	81		
10.55 – 11.00	17	21.55 – 22.00	R		

También se puede observar en el Figura C20, el gráfico de NSPT del sondaje N°2, donde se refleja la variación de los datos anteriores con respecto a la profundidad.

Se puede notar en el gráfico que desde los 18 m hasta los 22 m. un retroceso en la curva correspondiente a que luego de obtener rechazos en la prueba, se logro tener un valor de NSPT, para posteriormente conseguir rechazos nuevamente. Sin embargo, estos valores del rango en análisis son igualmente altos (ver Tabla) por lo que estos estratos corresponden a suelos rígidos.

En la Figura 5, se aprecia el perfil de velocidad del sitio determinado por el método MASW, en el se logra ver que exactamente hasta los 5 m. existe una baja velocidad de las ondas de corte (119 m/s), determinando la existencia de un estrato de compacidad deficiente, al igual como lo determinó el sondaje. Luego las velocidades aumentan progresivamente con la profundidad donde se muestra que a los 27 m. existe muy estrato rígido, con una velocidad de 1115 m/s, lo que equivale al rechazo obtenido del sondaje.

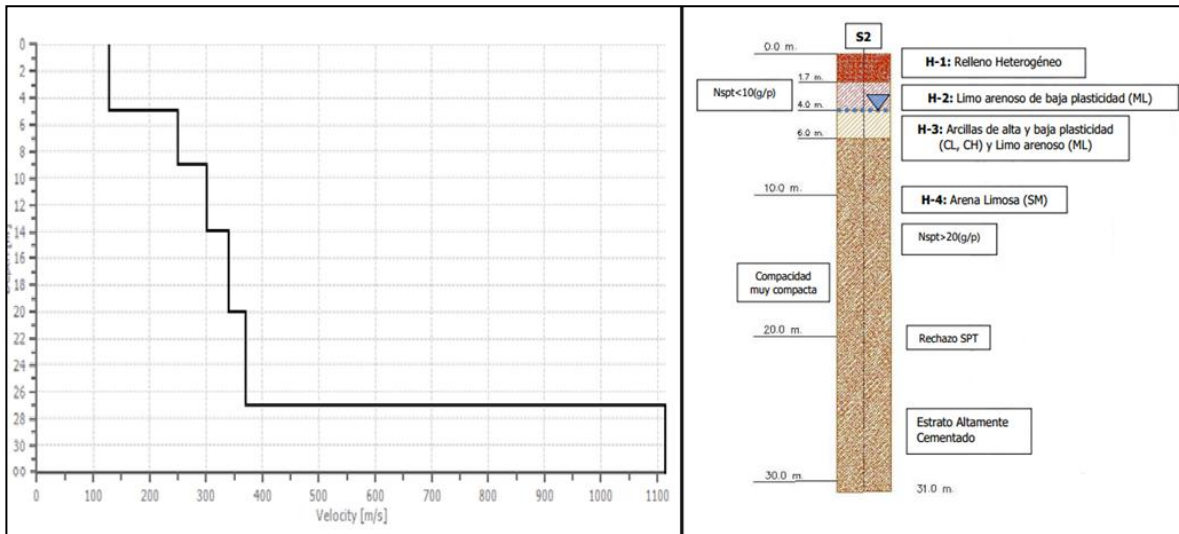


Figura 5. Comparación entre perfil MASW con estratigrafía sondaje.

Sin embargo, la prospección se encontró con este estrato a los 20 m. Esta diferencia se debe posiblemente a que el sondaje se encontró con lentes de suelo con diferencias de densidad entre ellos que no necesariamente son representativos del suelo o a que debido a la alta frecuencia de la fuente, las ondas no alcanzaron a encontrarse con los estratos más profundos, por lo que un análisis más exhaustivo se llevaría a cabo combinando este método con una medición ReMi.

4.2. Ensayo 2: Dichato.

Luego de la obtención de los resultados, se puede analizar que observar que en el análisis espectral se distingue claramente el modo fundamental, el cual fue el usado para la determinación del V_{s30} correspondiente, sin embargo, como se aprecia en la Figuras C8b, C9b y C10b, se distingue también un modo superior. Este modo superior no corresponde al modo 1 (primer modo luego del fundamental), sino a uno más alto, debido a la gran distancia que los separa.

Respecto a los valores obtenidos de la medición se puede analizar que similarmente al caso anterior, los valores de velocidad medidos en todos los arreglos no varían en demasía, lo que se ve reflejado en el bajo valor de desviación estándar de estos, como se señala en la

Tabla 23. De igual manera, los errores son muy bajos, de modo que el resultado es confiable. Por lo tanto, el Vs30 es de 241 m/s, siendo este valor más desfavorable obtenido y clasifica preliminarmente como Suelo Tipo D.

Tabla 23. Promedio y Desviación Estándar de los resultados. Dichato.

Medición	N-S 1		N-S 2		E-O	
	Vs 30 (m/s)	Error (%)	Vs 30 (m/s)	Error (%)	Vs 30 (m/s)	Error (%)
M1	260	0.2	275	0.05	241	0.14
M2	241	0.14	278	0.1	261	0.14
Prom.	250.5	0.16	276.5	0.08	251	0.14
Desv. Est.	13.44	0.02	2.12	0.04	14.14	0
Delta max.	26	0.02	25.5	0.08	25.5	0.02

4.3. Ensayo 3: Lomas de Bellavista, Concepción.

En el análisis espectral, en la curva de dispersión se logra apreciar el modo fundamental además del primer modo como se muestra en la Figura 6. Este modo aparece principalmente porque hasta los 8 m la velocidad aumenta constantemente, luego existe un salto en el valor de la velocidad de corte de las ondas y vuelve a aumentar de forma uniforme. Es este salto el que genera un nuevo tren de ondas, reflejado en el primer modo.

Físicamente se traduce en que aproximadamente a los 8 m de profundidad existe un estrato de rigidez mayor al anterior, mientras que los otros estratos no se producen aumentos tan bruscos.

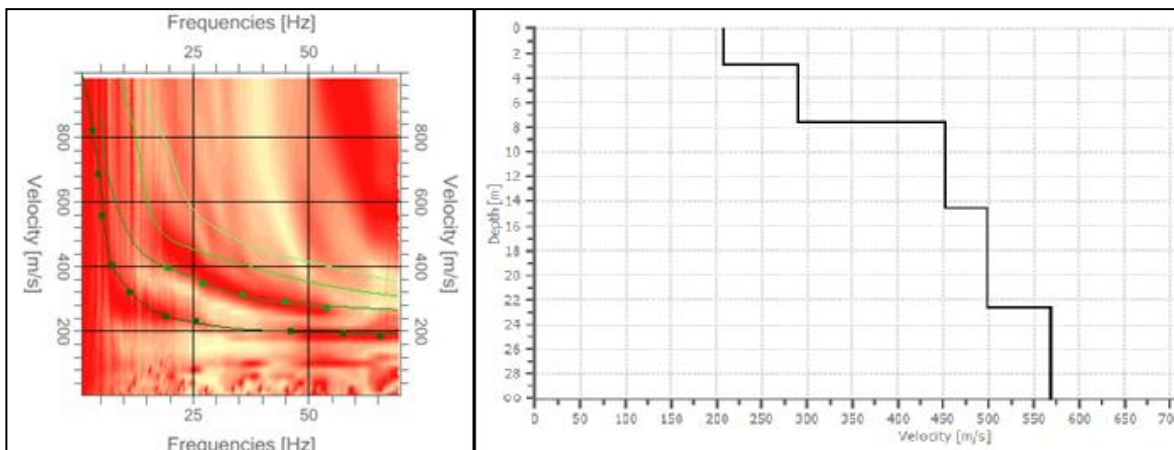


Figura 6. Curva de Dispersión y Perfil de velocidad, Lomas de Bellavista, Concepción.

Por lo tanto, los valores resultantes son los que se muestran en la Tabla 24, donde se demuestra que estos no varían en demasía entre ellos, de hecho, la máxima diferencia es de 34.5 m/s. validando los resultados obtenidos.

Tabla 24. Promedio y Desviación Estándar de los resultados, Lomas de Bellavista, Concepción.

Medición	N-S 1		N-S 2		E-O	
	Vs 30 (m/s)	Error (%)	Vs 30 (m/s)	Error (%)	Vs 30 (m/s)	Error (%)
M1	289	0.4	271	0.04	258	0.8
M2	300	1.6	270	0.2	262	1.4
Prom.	294.5	1	270.5	0.12	260	1.1
Desv. Est.	7.78	0.85	0.71	0.11	2.83	0.42
Delta max.	24	0.1	24	0.98	34.5	0.1

4.4. Ensayo 4. Osorno.

En el caso de la medición realizada en Osorno, como se puede apreciar en la Figura 7, el espectro de la curva de dispersión es difuso y no se logra distinguir fácilmente el o los modos de vibración de la onda. Esto se debe al ruido ambiental registrado por el equipo al momento de realizar la medición generado en este caso por el tránsito vehicular, aunque en mayor medida se debe al estrato blando encerrado entre 2 estratos más rígidos entre los 5 m

y los 16.5 m. aproximadamente. Este estrato genera un tren de onda diferente al que llevaba en el primer estrato, originando un nuevo modo.

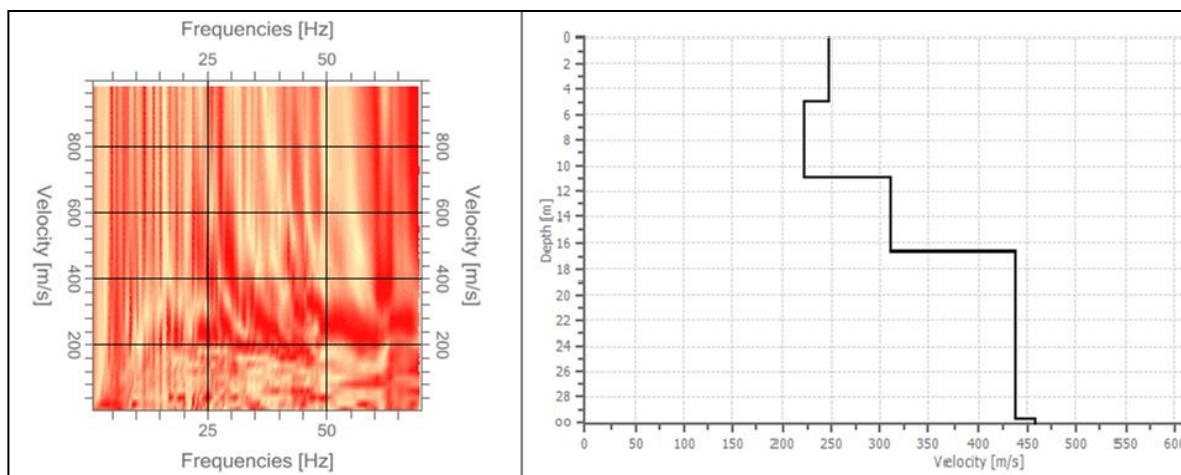


Figura 7. Curva de Dispersión y Perfil de velocidad, Osorno.

Los datos obtenidos del ensayo in-situ son los mostrados en la Tabla 24, donde las diferencias entre los resultados varían un poco más en relación a los ensayos anteriores. Las curvas de dispersión en este caso fueron bastante más difíciles de analizar y requirieron un trabajo e iteraciones más arduas para alcanzar los porcentajes de errores que se pueden observar.

Tabla 24. Promedio y Desviación Estándar de los resultados. Osorno.

Medición	N-S 1		E-O	
	Vs 30 (m/s)	Error (%)	Vs 30 (m/s)	Error (%)
M1	387	1.2	429	2
M2	435	0.78	464	0.9
Prom.	411	0.99	446.5	1.45
Desv. Est.	33.94	0.3	24.75	0.78
Delta max.	35.5	0.46	35.5	0.46

Por lo tanto, el Vs30 del sitio en estudio es de 387 m/s y preclasifica como suelo Tipo C.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

Se elaboró un estudio para la determinación del parámetro V_{s30} para cumplir con las nuevas disposiciones impuestas por el Decreto Supremo N° 61 con el método activo MASW. Luego de una revisión bibliográfica del funcionamiento del método, sus ventajas y desventajas y su aplicación en diferentes suelos se puede concluir que:

- En primer lugar, con la clasificación de suelos de acuerdo a la norma Nch 433 of. 1996, era necesario un suelo intermedio entre el tipo II y III para evitar las significativas diferencias en los espectros entre ambos. Más tarde, con la promulgación del Decreto Supremo N°117 tampoco se corrigió este inconveniente. Hasta que con la nueva clasificación del Decreto Supremo N° 61 finalmente se pudo integrar un suelo intermedio correspondiente al suelo tipo C.
- Adicionalmente a la inclusión del suelo tipo C, se eliminó la discrepancia existente entre el suelo I y II en la norma Nch 433 of 1996 a partir de un periodo de 1.2 s, además de aumentar las pseudo-aceleraciones en periodos pequeños para los demás tipos de suelo, aumentado la demanda sísmica a los suelos. Esto se debe a la mayor cantidad de información existente que permitió realizar una clasificación con datos más actuales.
- Respecto al proceso de obtención del V_{s30} , la inversión de la curva de dispersión se realiza con el método iterativo de Montecarlo ya que gracias a la capacidad de procesamiento de los computadores actuales, es rápido y fácil obtener una solución a partir de un modelo preliminar.
- Se demostró que en los casos que no se pudo completar el arreglo con los 16 geófonos disponibles, los resultados no convergieron entre sí determinados velocidades de 247 m/s a 2 m, 277 m/s a 3 m y 296 m/s a 4 m en la medición 1 y

327 m/s a 2 m, 277 m/s a 3 m y 290 m/s a 4 m en la medición 2, ambas realizadas en el sitio destinado al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Bío-Bío, obteniendo valores muy dispersos con una desviación estándar máxima de 86 m/s, lo cual podría en algunos casos errar en la clasificación del suelo. Por el contrario, al usar la totalidad de los geófonos, 244 m/s a 2 m, 248 m/s a 3 m y 257 m/s a 4 m, con valores poco fluctuantes entre sí, con desviación estándar máxima de 6 m/s.

- El método MASW, al ser un método activo, requiere de un espaciamiento más bien pequeño (1-4 m), sin embargo, con arreglos muy cortos, las ondas generadas con el golpe no alcanzan la profundidad deseada de 30 m. En este caso, con solo 16 geófonos, son preferibles espaciamiento de 3 m o 4 m, que forman arreglos más largos. Si no, se puede adquirir una mayor cantidad de geófonos, por ejemplo 24, pudiendo usar espaciamientos más cortos y arreglos totales más largo.
- El proceso del análisis de las curvas de dispersión es fundamental en la determinación final del perfil de velocidad y el Vs30. La correcta determinación del modo fundamental y de primer modo (en caso que aparezca) conlleva un resultado óptimo. En los casos, donde estos modos no se pueden distinguir tan fácilmente, es necesario iterar manualmente con modelos preliminares del sitio en estudio.

5.2. Recomendaciones.

- En este Proyecto de Título se limitó el estudio al método activo MASW, sin embargo, para asegurarse que las ondas registradas penetren a una profundidad mínima de 30 m, es adecuado el uso conjunto de este método con otro pasivo, como ReMi, ya que ambos se complementarían, registrando las frecuencias altas, ósea los estratos superficiales con el método MASW y las frecuencias bajas y por consiguiente los estratos más profundos, con el método ReMi.

- La realización de estas mediciones se podrían optimizar usando una cantidad de 24 geófonos o más, elaborando arreglos lineales más largos y facilitado el registro de las ondas con mayores longitudes de onda y frecuencias más bajas, las cuales que penetran mayores profundidades.
- En algunos casos, la perturbación generada por el golpe del martillo se disipaba y no era registrada en los últimos geófonos, por esta razón, se puede recomendar el uso de un sistema que suelte una masa desde una cierta altura para generar más energía en el golpe, corrigiendo el problema.

6. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.

6.1. Bibliografía.

1. Zollo, A., Herrero, A., and Emolo, A. (2003). *Terremoti ed onde: Introduzione alla sismologia sperimentale*. Dipartimento di Scienze Fisiche, Università di Napoli Federico II, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italia.
2. Herraíz, M. (1997). *Conceptos básicos de sismología para Ingenieros*. Centro peruano japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres.
3. Easy MASW User's Guide: Easy MASW Software. GeoStru Software. 2012.

6.2. Referencias.

1. Cascante, G., Tallav, F. y Pandey, M. (2009). Experimental and numerical analysis of MASW tests for detection of buried timber trestles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*
2. Cuadra, P. (2007). Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: Análisis de microtemores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.
3. Khaheshi, B., Kasgin y Dariush M. (2010). On the Efficiency of the Multi-Channel Analysis of Surface Wave Method for Shallow and Semideep Loose Soil Layers. Ottawa, Canada.
4. Lay, T. y Wallace, T. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press, California, Estados Unidos.

5. Linares, G. (2005). Introducción y aplicación del método de sísmica de microtremores en área urbanas. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.
6. Louei, J. (2001). Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. Seismological Laboratory and Dept. of Geological Sciences. The University of Nevada, Reno, Estados Unidos.
7. Park, C., Miller, R. y Xia, J., (1999). Multichannel analisis of surface waves. Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, Estados Unidos.
8. Park, C., Richard D., Miller, R., Hidetoshi, M. (2002). Optinum Field Parameters of an MASW Survey. Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, Estados Unidos.
9. Rojas, S. (2008). Sísmica de refracción y de microtremores para caracterización de parámetros dinámicos superficiales en Caracas. Informe de pasantía para optar al título de Ingeniero Geofísico. Universidad Simón Bolívar.
10. Roma, V. (2002). Dynamic Soil Identification by means of Rayleigh Waves. Universidad de Pisa, Pisa, Italia.
11. Roma, V. (2006). Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Universidad de Pisa, Pisa, Italia.