



INFORME DE ESTUDIO SISMICO

**PROYECTO:
MALL CENCO MAIPU**

**COMUNA DE MAIPU
REGION METROPOLITANA**

REV_0

ABRIL DE 2025

**Dirección: Mar Pésico 8600, Peñalolén, Santiago.
Teléfonos :(+56) 973337398
www.hnconsultores.cl**

INDICE

1. INTRODUCCION	2
2. METODOLOGÍA	4
2.1. Refracción de Microtremores (Remi)	4
3. TOMA DE DATOS	7
4. LINEA SISMICA N°1	9
5. LINEA SISMICA N°2	13
6. MEDICION DE PERIODO FUNDAMENTAL	17
6.1. Métodos aplicados	17
6.2. Cantidades	17
7. MÉTODO DE RELACIÓN ESPECTRAL DE MOVIMIENTO HORIZONTAL VERSUS VERTICAL (NAKAMURA H/V)	17
7.1. Instrumentación	19
7.2. Ubicación De Medidas.....	19
7.3. Procesamiento De Datos.....	20
8. RESULTADOS.....	24
8.1. Resultados Gráficos.....	24
8.2. Resumen de Relación Espectral de Movimiento Horizontal V/S Vertical.....	26
9. CONCLUSIONES.....	26
10. LIMITACIONES	27

1. INTRODUCCION

La Empresa de Ingeniería, MINHC Ingenierías fue contratada para la realización de ensayos geofísicos ReMi (Refraction Microtremor) en el proyecto “Mall Cenco Maipú”, Comuna de Maipú, Región Metropolitana.

El ensayo ReMi permite determinar la velocidad de propagación de onda transversal (también conocida como onda S u onda de corte) de los materiales existentes. Permite además empleando los resultados del ensayo, interpretar la estratigrafía del sitio explorado a lo largo de la extensión de los geófonos y hasta una profundidad que dependerá del distanciamiento entre geófonos, obteniendo una iluminación directamente proporcional a la separación entre geófonos.

Luego de obtener las velocidades de corte promedio a los 30 m de profundidad, es posible determinar la tomografía de los estratos, es decir la variación de la velocidad de onda de corte en profundidad y a lo largo de toda la línea realizada.



Imagen N° 1: Emplazamiento del proyecto.

Clasificación Sísmica del Terreno de Fundación						
Suelo Tipo		V _{s30} (m/s)	RQD	q _u (MPa)	(N ₁) (golpes/pie)	S _u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	≥ 50%	≥ 10 (ε _{qu} ≤ 2%)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		≥ 0,40 (ε _{qu} ≤ 2%)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		≥ 0,30 (ε _{qu} ≤ 2%)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	≥ 0,05
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	< 0,05
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Tabla n°1: Clasificación de suelos según Vs30 (DSN°61)

Donde Vs30 está definido por la siguiente expresión:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-1}}}$$

En donde:

h_i : Espesor del estrato analizado i=1....n : Número de estratos considerados.

V_{s-1}: Velocidad de ondas de corte de cada estrato.

Dirección: Mar Pérsico 8600, Peñalolén, Santiago.

Teléfonos :(+56) 973337398

www.hnconsultores.cl

2. METODOLOGÍA

Para la obtención de la velocidad de ondas de corte promedio (V_s), la normativa actual señala que este parámetro puede ser obtenido por diferentes ensayos como son down-hole, cross-hole o sonda de suspensión; o a partir de mediciones de ondas superficiales Rayleigh, por métodos como SASW, MASW o ReMi, este último será el utilizado para este estudio.

2.1. Refracción de Microtremores (Remi)

A continuación, presentamos la descripción de la metodología del método empleado estudio realizado, así como las características técnicas de los equipos utilizados.

El ensayo geofísico ReMi (Refraction Microtremor), es un método de refracción sísmica empleado para evaluar la velocidad propagación de ondas de corte (V_s) con base en la determinación de la dispersión de la propagación de ondas superficiales. El ensayo está definido por dos ideas tecnológicas básicas.

La primera es que los geófonos empleados para registrar el ruido ambiental son dispuestos a lo largo de una línea recta. Estos geófonos registran las ondas superficiales con frecuencias tan bajas como 4.5 Hz dependiendo del tipo de sensores que se utilicen.

La segunda idea es que una transformada en dos dimensiones, lentitud (inverso de la velocidad de propagación de los componentes de ondas superficiales) y frecuencia (p-f), de un registro de micro tremores (vibraciones ambientales o inducidas) permite separar la llegada de las ondas Rayleigh de la llegada de otras ondas sísmicas. Una vez las ondas Rayleigh son identificadas, es posible determinar su verdadera velocidad de fase y no su velocidad aparente (Louie, 2001).

El ensayo ReMi puede utilizar como señal generadora de ondas las vibraciones naturales del terreno, bien sea debidas a vibraciones ambientales, o vibraciones inducidas por actividades antrópicas como de construcción, impactos en el suelo,



tráfico, actividades industriales, trabajos de exploración del subsuelo, etc. (Liu et al, 2005). Esta característica representa una ventaja significativa con respecto a otros tipos de ensayos geofísicos ya que permite su aplicación en ambientes urbanos con altos niveles de ruido.

Debido a que el ensayo ReMi es un método no invasivo y no destructivo que usualmente sólo utiliza el ruido ambiente como fuente sísmica, no se requieren permisos o preparativos especiales para su aplicación. Las líneas sísmicas ReMi pueden ser realizadas a lo largo de los separadores de las carreteras o en las obras de construcción, sin perturbar los trabajos de construcción o el flujo normal del tránsito. A diferencia de otros métodos geofísicos usados para determinar velocidad de propagación de las ondas de corte, el ensayo ReMi utiliza estas actividades como fuentes de señales sísmicas. Así las cosas, generalmente no es necesario cerrar una calle o interrumpir los trabajos de construcción con el fin de adquirir los registros necesarios. Un ensayo ReMi usualmente toma menos de dos horas, lo cual representa un ahorro importante en tiempo y costos asociados.

Para la realización de los ensayos se utilizan los siguientes equipos:

Geófonos: Marca R. T. Clark y modelo RTC 4.5 Instrumentos que se introducen en el terreno a lo largo de la línea que se va a estudiar. Cuenta con sensores que permiten detectar cualquier tipo de onda, o vibración que se presente en la zona a evaluar como vibraciones inducidas.

Línea Sísmica: Es un arreglo conformado por 12 o más geófonos verticales de 4.5 Hz en forme lineal.



Sismógrafo: Marca DMT modelo “Summit xtream”. Este equipo se conecta por medio de un cable sísmico a los diferentes sensores o geófonos, que se han distribuido a lo largo de la línea a estudiar, y permite conocer las gráficas de ruido en tiempo real y las de tiempo contra voltaje cuando se produce el golpe.

Una vez realizado el registro en campo, el primer paso del procesamiento del análisis ReMi consiste en generar un espectro de velocidades de frecuencia v/s tardanza (inverso de la velocidad), llamado espectro $p-f$, con el software de procesamiento “SeisOptReMi”.

Finalmente, mediante un modelo iterativo con la gráfica periodo v/s velocidad de fase onda Rayleigh se traza la curva de dispersión, con la cual se establecen los espesores de los diferentes estratos y la velocidad de ondas de corte (V_s). Ver imagen se resume la metodología.

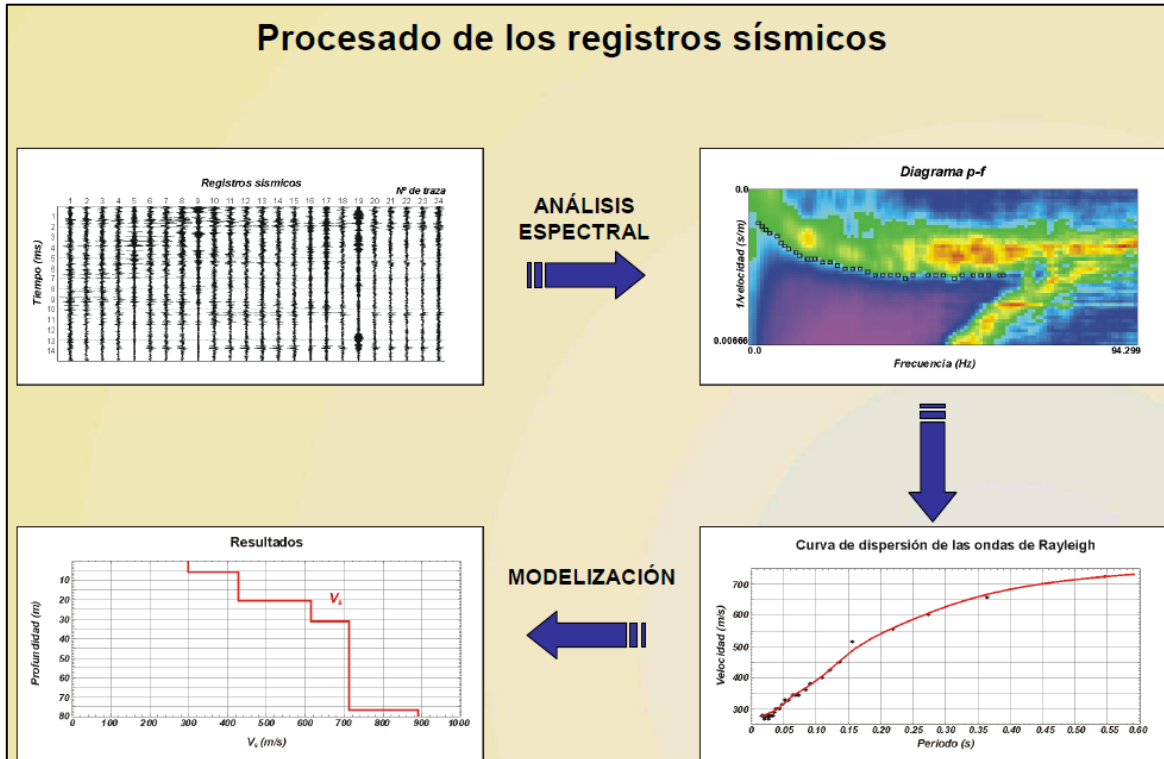


Imagen N°2. Proceso de Método ReMi.

3. TOMA DE DATOS

La obtención de datos en terreno fue realizada en el mes de abril del 2025, Para cada geófono se procesan los datos mediante la metodología ReMi para obtener las velocidades promedio en el tramo correspondiente, luego se agrupa la información de toda la línea para determinar la tomografía. La longitud de la línea 1 corresponde a 115 m utilizando 24 geófonos con espaciamentos de 5 m, alcanzando una profundidad promedio de 30 m. Para el caso de la línea 2 corresponde a 115 m, se utilizaron 24 geófonos con espaciamentos de 5 m, con lo cual se alcanza una profundidad promedio de 30 m.

A continuación presentamos los resultados obtenidos en la realización de las líneas de geofísica:



Imagen N° 3: Localización de Líneas Geofísicas.

Tabla N° 2: Coordenadas

Línea Sísmica		Coordenadas UTM (19H) (m)	
Arreglo N°	Geófono N°	C. Este	C. Norte
1	1	338366	6290301
1	24	338434	6290205
2	1	338445	6290293
2	24	338349	6290216
Nakamura	Geófono PSF-N°	Coordenadas UTM (19H) (m)	
	1	338321	6290196
	2	338344	6290319
	3	338398	6290260
	4	338458	6290310
	5	338446	6290185

Dirección: Mar Pérsico 8600, Peñalolén, Santiago.
Teléfonos :(+56) 973337398
www.hnconsultores.cl

4. LINEA SISMICA N°1

La Imagen N°4 presenta el gráfico con el registro de Ruido Ambiental obtenido utilizando 24 geófonos distanciados a 5.0 m durante 15 segundos.

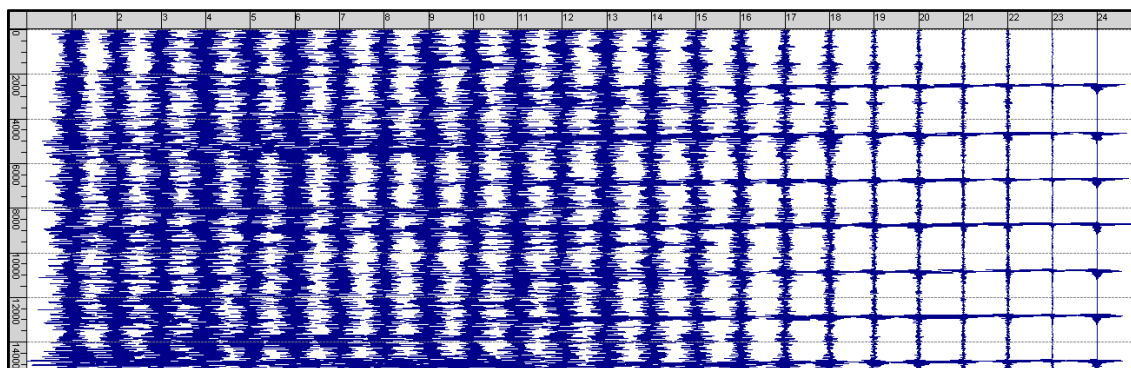


Imagen N° 4: Registro Perfil N° 1.

La Imagen N°5 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo.

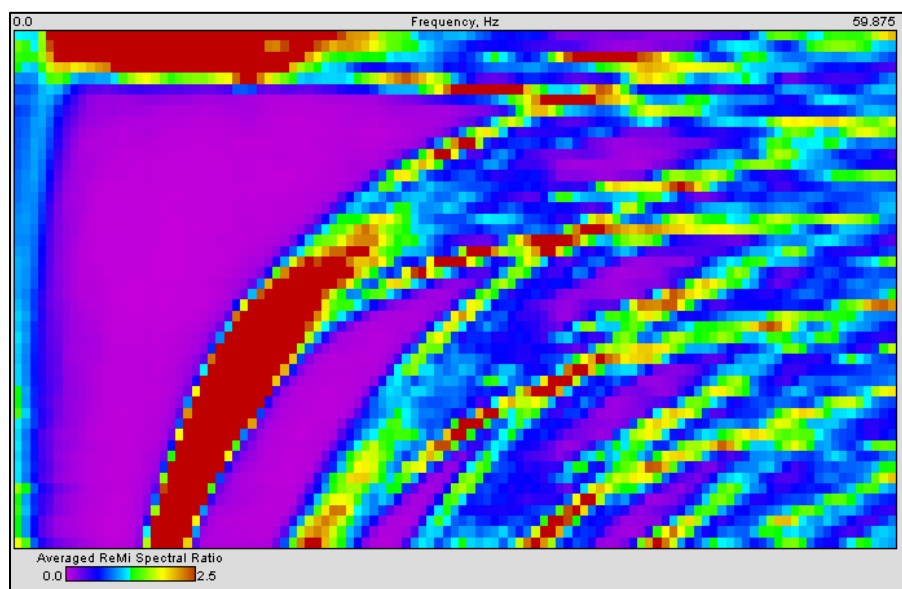


Imagen N° 5: Gráfico de fase-frecuencia (p-f) Perfil N° 1.

Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Imagen N°6 a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de ondas S.

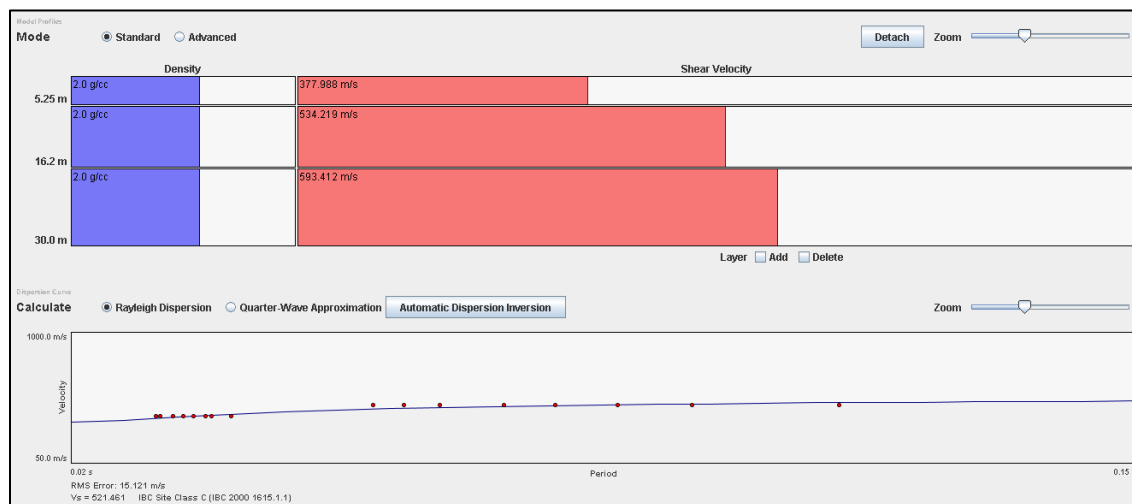
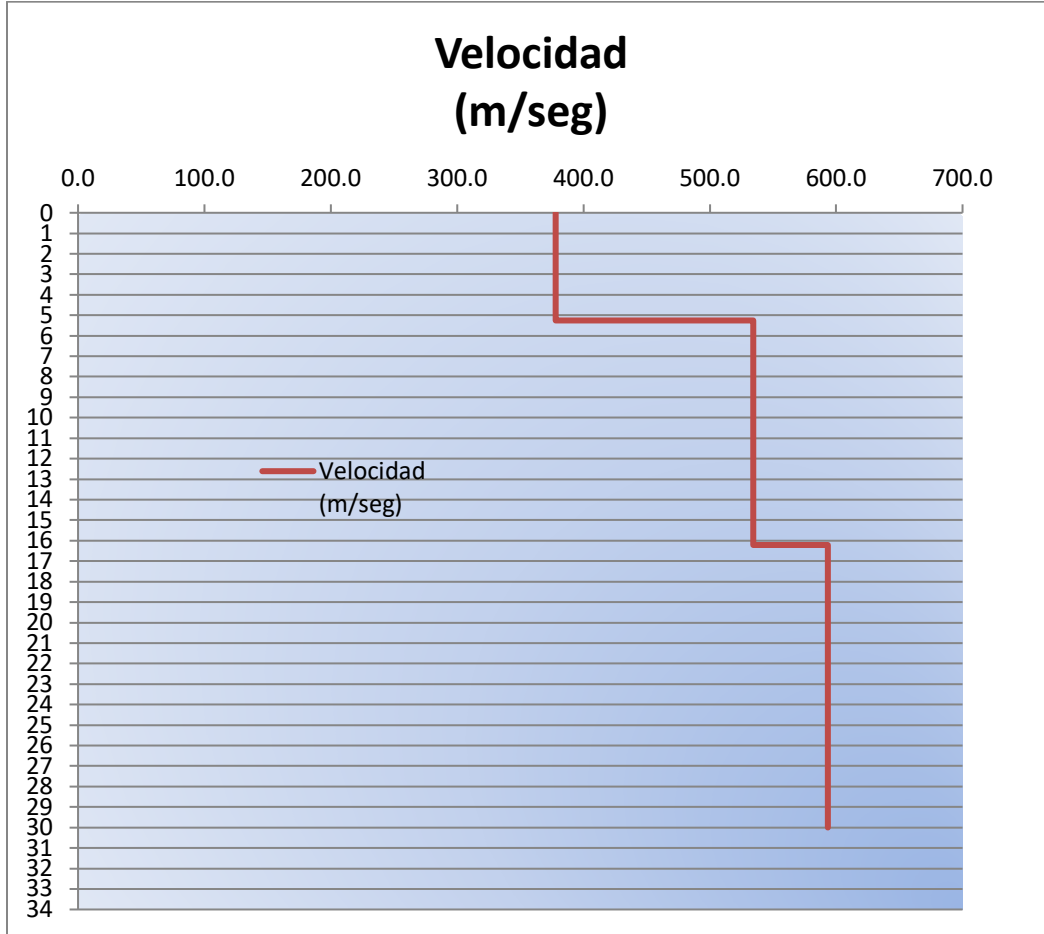


Imagen N° 6: Interpretación de microtremores Perfil N° 1.

En la siguiente tabla se determina el valor de Vs30 para el perfil N°1, utilizando la ecuación descrita anteriormente:

Tabla N° 3: Velocidad de ondas de corte en profundidad y determinación de Vs30 Perfil N° 1.

Estratos	Profundidad (m)	Espesores (m)	Velocidad (m/seg)
1	5.25	5.25	378.0
2	16.20	10.95	534.2
3	30.00	13.80	593.4
Vs30 (m/seg)			520.45



Fotografías Perfil N° 1.



Dirección: Mar Pésico 8600, Peñalolén, Santiago.
Teléfonos :(+56) 973337398
www.hnconsultores.cl

5. LINEA SISMICA N°2

La Imagen N°7 presenta el gráfico con el registro de Ruido Ambiental obtenido utilizando 24 geófonos distanciados a 5.0 m durante 15 segundos.

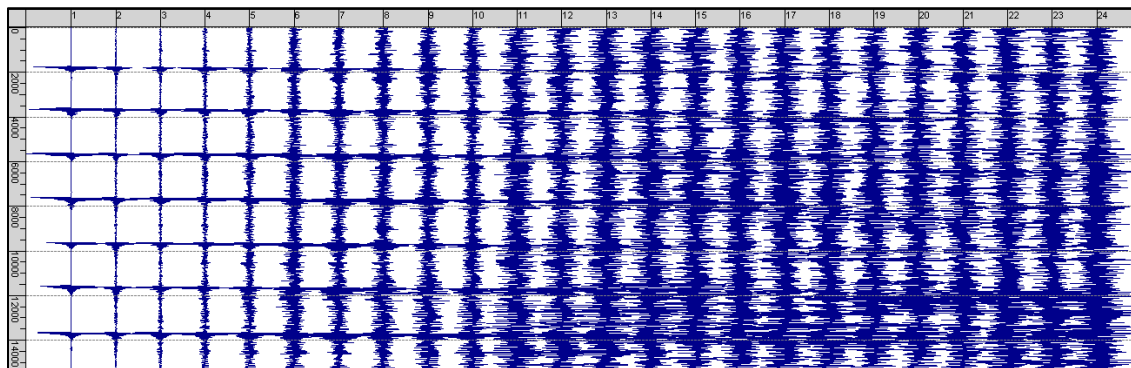


Imagen N° 7: Registro Perfil N° 2.

La Imagen N°8 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo.

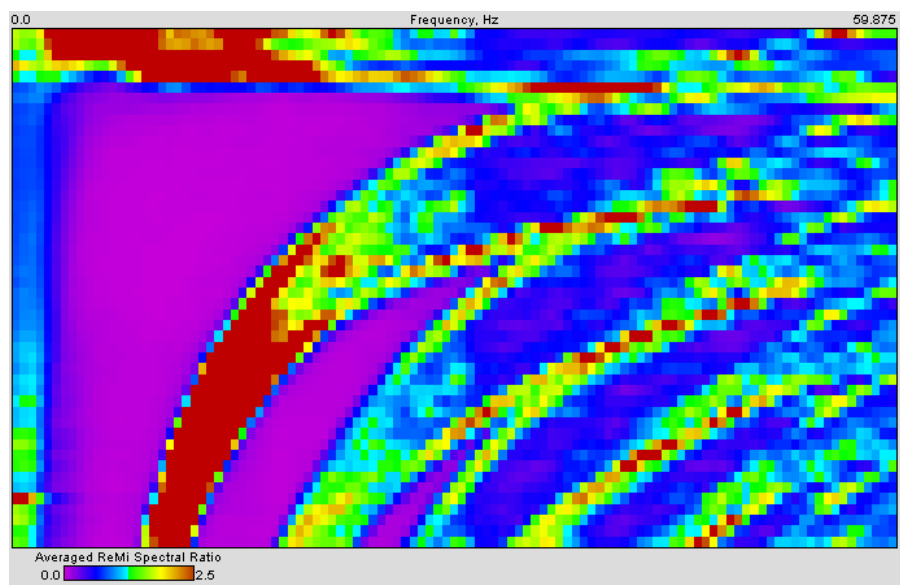


Imagen N° 8: Gráfico de fase-frecuencia (p-f) Perfil N° 2.

Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Imagen N°9 a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de ondas S.

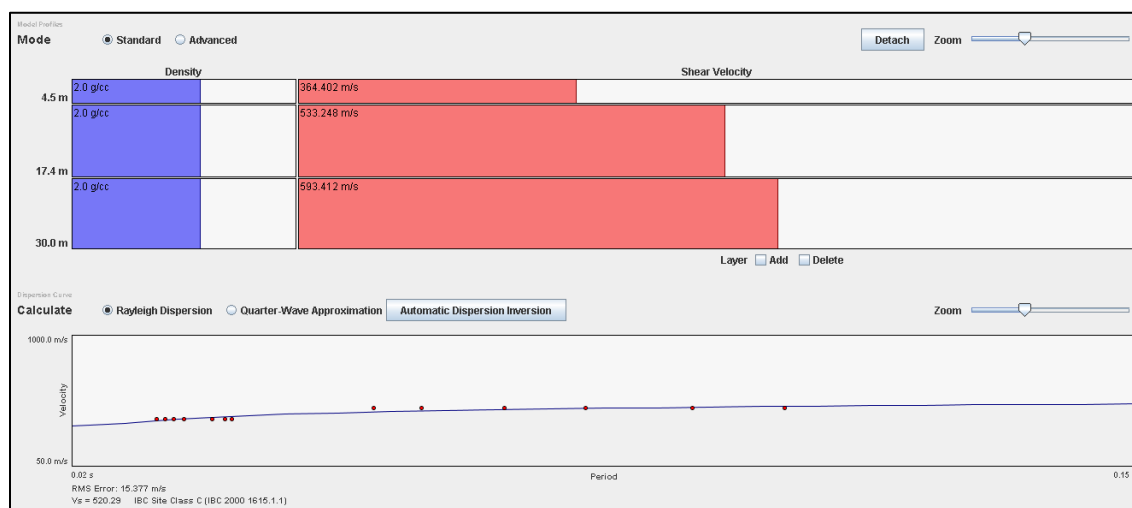
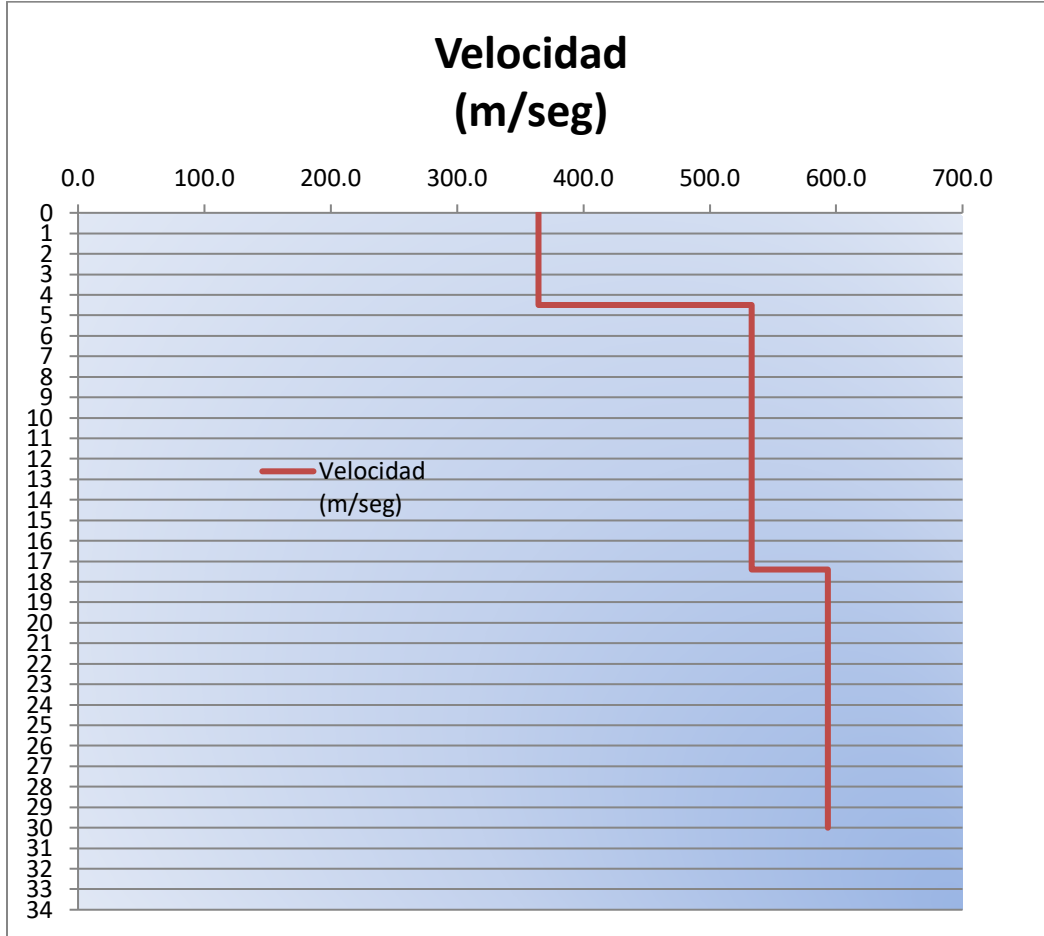


Imagen N° 9: Interpretación de microtremores Perfil N° 2.

En la siguiente tabla se determina el valor de Vs30 para el perfil N°2, utilizando la ecuación descrita anteriormente:

Tabla N° 4: Velocidad de ondas de corte en profundidad y determinación de Vs30 Perfil N° 2.

Estratos	Profundidad (m)	Espesores (m)	Velocidad (m/seg)
1	4.50	4.50	364.4
2	17.40	12.90	533.2
3	30.00	12.60	593.4
Vs30 (m/seg)			519.27



Fotografías Perfil N° 2.





6. MEDICION DE PERIODO FUNDAMENTAL

6.1. Métodos aplicados

- Método Sísmico de relación espectral de movimiento horizontal versus vertical (Nakamura H/V).

6.2. Cantidades

Estaciones sísmicas adquiridas: El día **17 de abril de 2025**, se adquirieron datos desde 5 estaciones, 30 registros sísmicos de un minuto en cada uno, contabilizando un total de 150 registros.

7. MÉTODO DE RELACIÓN ESPECTRAL DE MOVIMIENTO HORIZONTAL VERSUS VERTICAL (NAKAMURA H/V)

El estudio de campo para caracterización sísmica de un sitio es conocido como un método rápido y económico para la caracterización de áreas urbanas. Este estudio se basa en el método descrito por Nakamura (o H/V) y emplea mediciones de ruido ambiental (compuesto de ondas superficiales tipo Rayleigh) producido por la interacción viento – estructuras, tráfico y varias formas de actividad humana (Lermo and Chávez-García). Se ha demostrado que el cociente espectral entre los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales de estas mediciones ofrece un buen estimado de la frecuencia fundamental de depósitos sedimentarios sueltos y, en cierta forma, del factor de amplificación. El uso extensivo del método permite el mapeo rápido y detallado de estas frecuencias en áreas urbanas. Combinando información sobre la respuesta de suelo y su vulnerabilidad, se puede anticipar los efectos potenciales de un sismo a diferentes estructuras como edificios, puentes, etc.

La teoría y las hipótesis del método no son aceptadas unánimemente por la comunidad científica, pero las comparaciones con otras técnicas han mostrado y probado la validez y la eficiencia de la técnica presentada por Nakamura (Lermo and Chávez-García).

Nakamura desarrolló la técnica basándose sobre tres hipótesis:

1. El ruido ambiental es generado por la reflexión y refracción de ondas de corte al interior de capas de suelo superficiales y por ondas de superficie.
2. Fuentes superficiales locales de ruido, no afectan el ruido ambiental en la base de la estructura no consolidada.
3. Capas de suelo suave no amplifican la componente vertical del ruido ambiental.

Las funciones de transferencia SE y AS que representan la respuesta sísmica intrínseca del sitio y el efecto singular de la onda Rayleigh, se definen respectivamente, como el cociente entre los espectros de las componentes horizontales y verticales del ruido ambiental en superficie y en el basamento.

$$S_e = \frac{H_s}{H_B} \quad A_e = \frac{V_s}{V_B}$$

Nakamura y Theodulidis et al. demuestran que el espectro de las componentes vertical y horizontal es equivalente en la base de la estructura.

Por lo tanto la respuesta sísmica del sitio, SM, puede ser expresada como el cociente espectral de las componentes horizontal y vertical del ruido ambiental en superficie.

Resumiendo, esto implica que un estimado práctico de la respuesta del sitio puede ser obtenido grabando ruido ambiental con un sismógrafo sencillo a 3 componentes.

7.1. Instrumentación

- Sismógrafo **Vibralog**.
- Transductor triaxial amplificado.
- Notebook de última generación y especialmente diseñado para terreno.

7.2. Ubicación De Medidas

La Imagen N°10 muestra el emplazamiento de las estaciones de adquisición. En el Anexo se incluyen fotografías obtenidas durante los ensayos.

Las estaciones se dispusieron de manera tal de lograr representatividad del terreno para posteriormente obtener un estimado promedio.



Imagen N° 10: Ubicación de las Estaciones de Adquisición de Datos.

7.3. Procesamiento De Datos

El procesamiento de los datos constó de varias etapas:

- Revisión de registros de cada canal del geófono.
- Revisión de frecuencias de análisis.
- Selección de registros adecuados dependiendo de la variación vertical. En ciertos casos fue necesario subdividir los registros para borrar los Spikes.

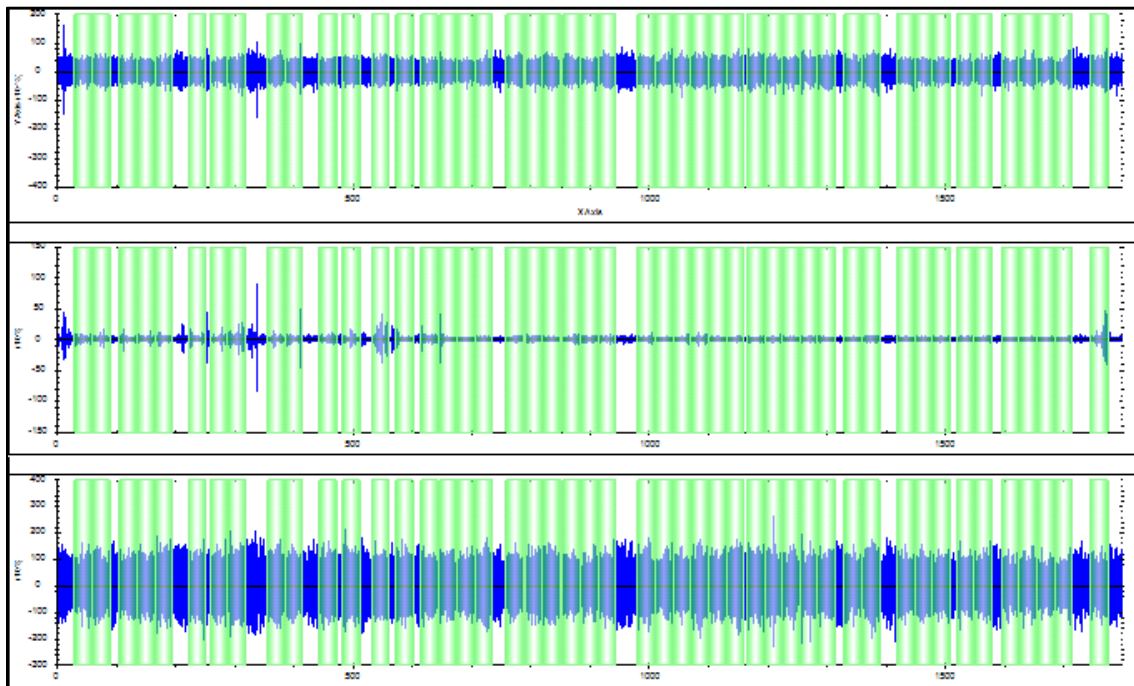


Imagen 11. Señal para PFS-N-1

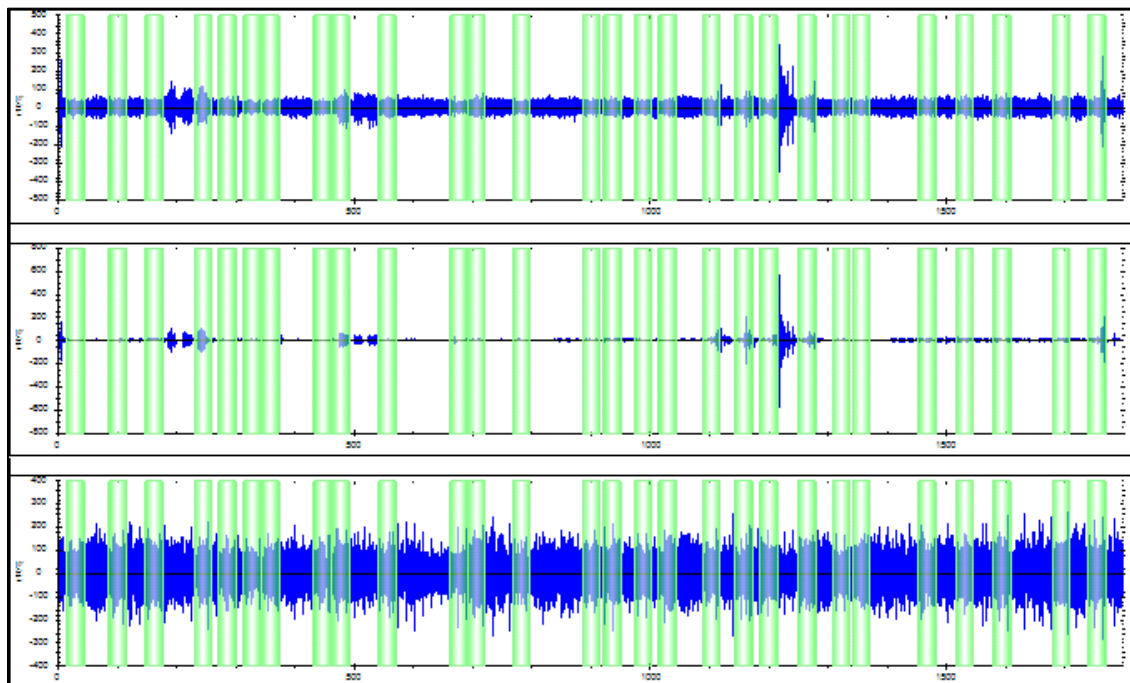


Imagen 12. Señal para PFS-N-2

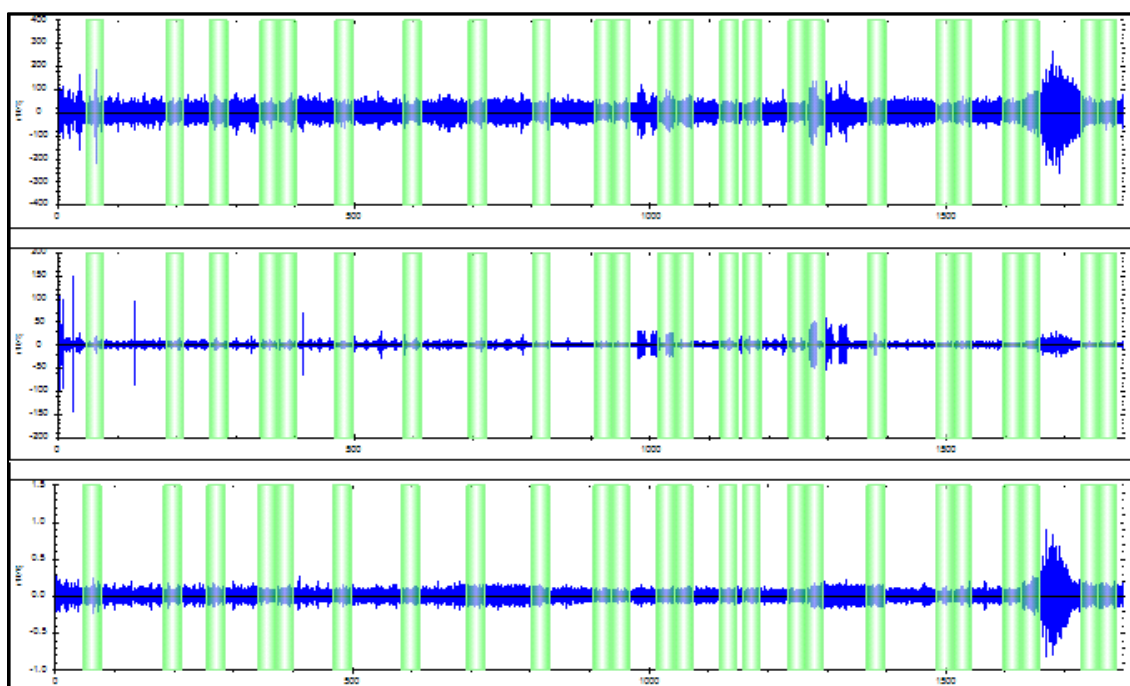


Imagen 13. Señal para PFS-N-3

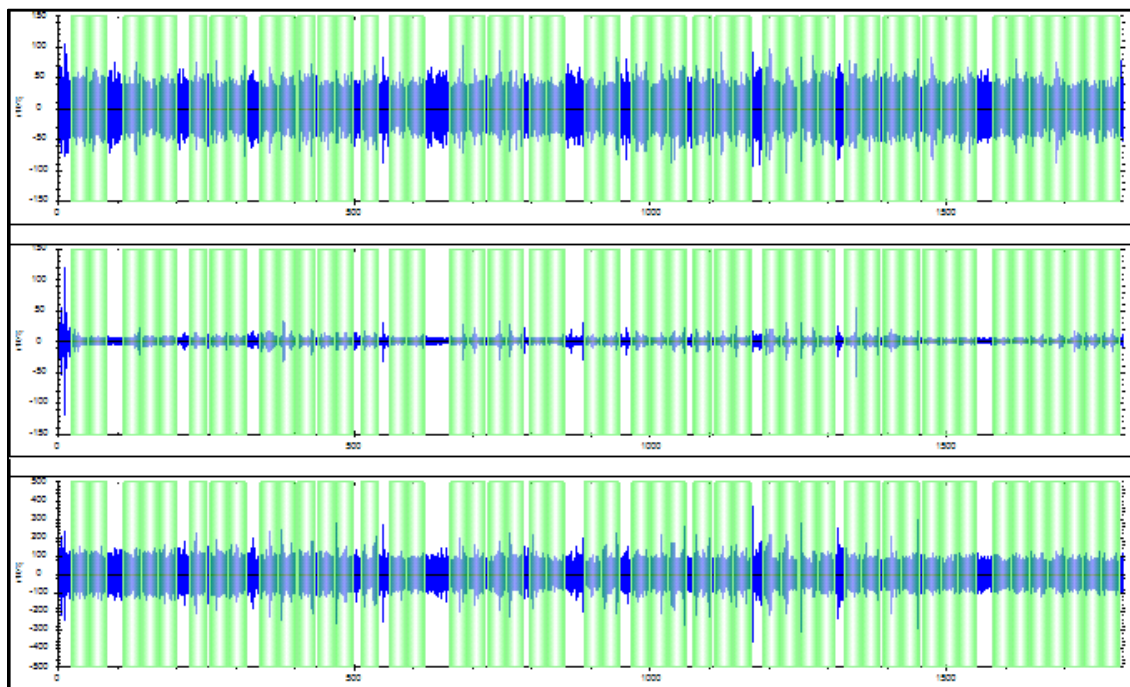


Imagen 14. Señal para PFS-N-4

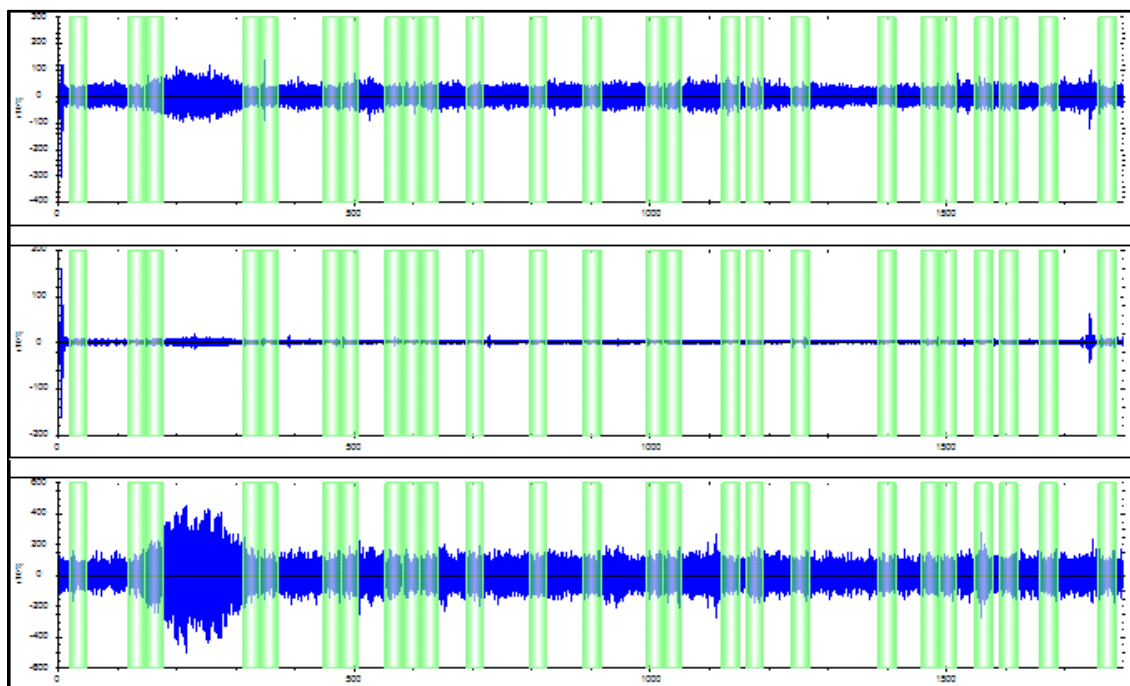


Imagen 15. Señal para PFS-N-5

- Considerando el dominio de la frecuencia, se realiza un análisis a través del espectro de amplitud H/V, de donde se eligen las frecuencias de mayor magnitud.
- El valor final de la frecuencia natural del suelo para cada estación, es un promedio de las selecciones ya mencionadas.

Registro Fotográfico Toma de datos Nakamura.



PFS-N-1



PFS-N-2



PFS-N-3



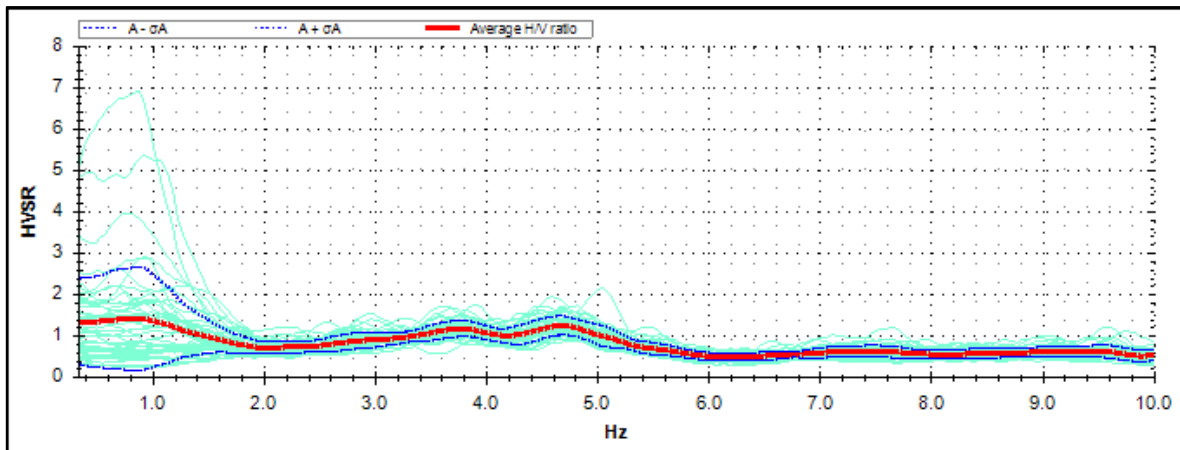
PFS-N-4



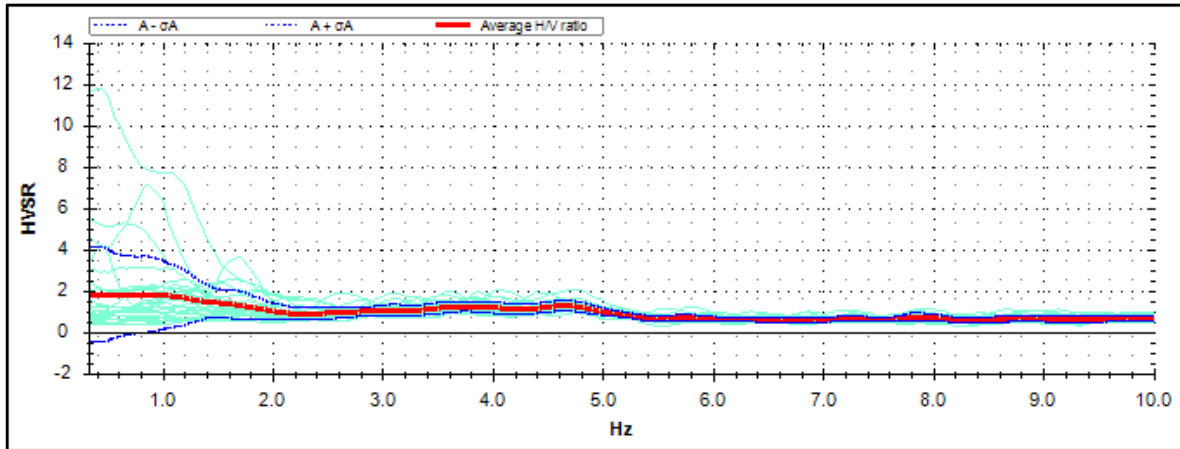
PFS-N-5

8. RESULTADOS

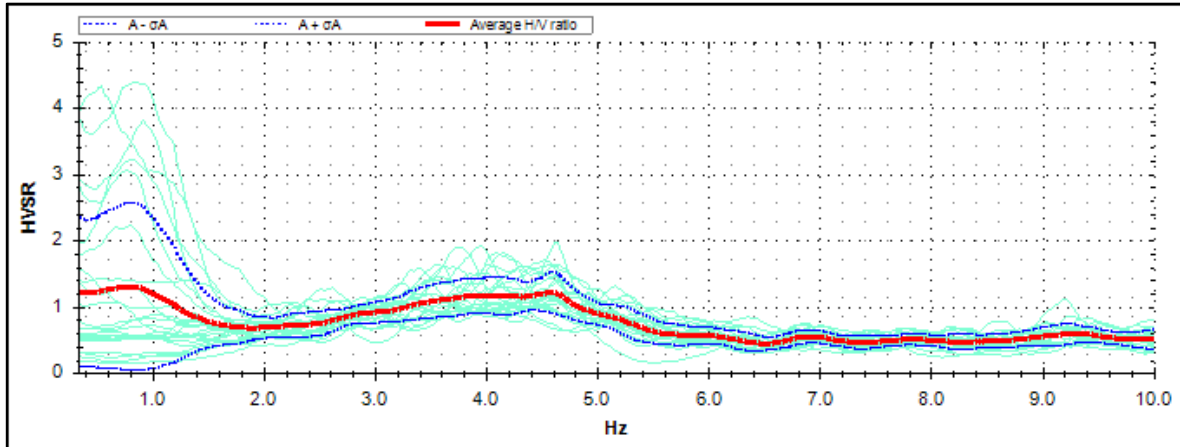
8.1. Resultados Gráficos



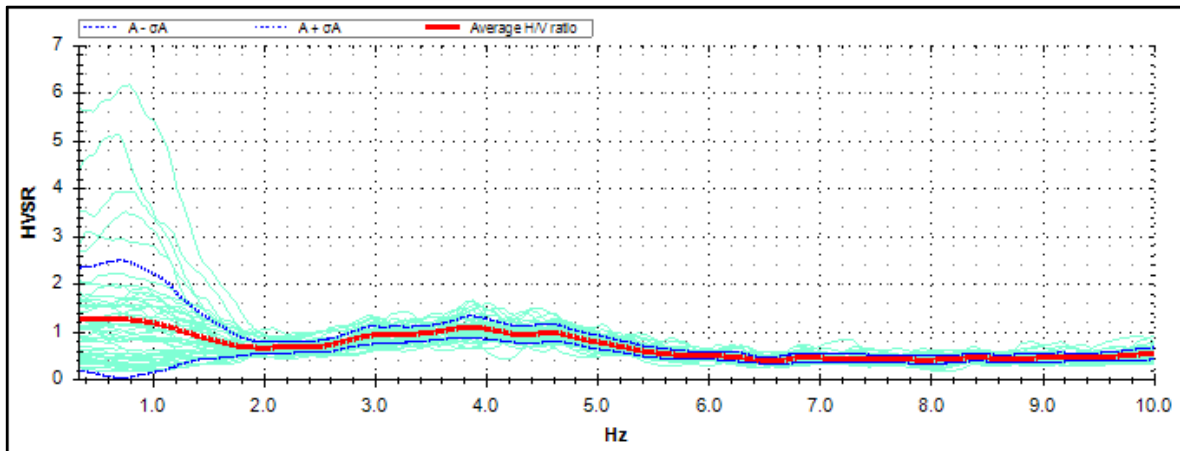
PFS-N-1



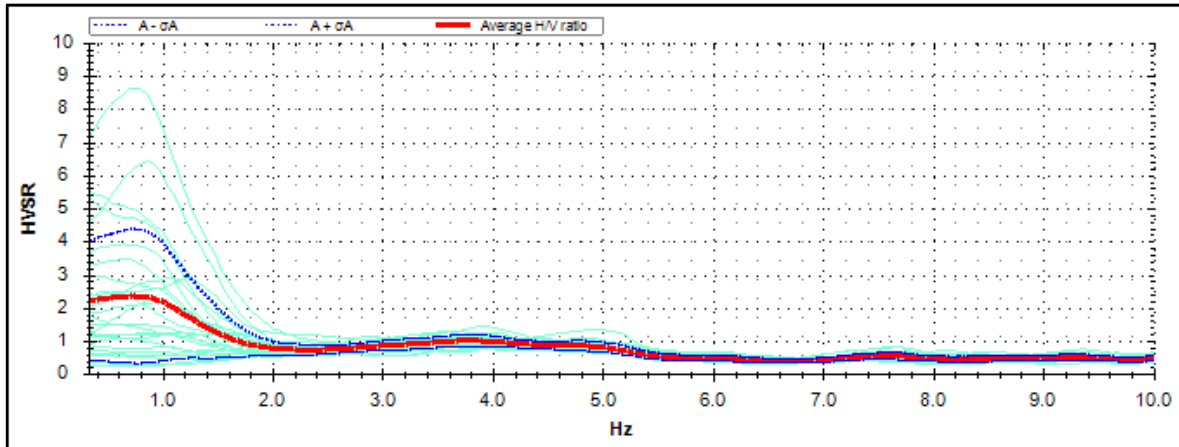
PFS-N-2



PFS-N-3



PFS-N-4



PFS-N-5

8.2. Resumen de Relación Espectral de Movimiento Horizontal V/S Vertical

A continuación, se presenta un cuadro resumen con el promedio de todas las frecuencias obtenidas en cada selección de señal, para cada estación.

NOMBRE ESTACIÓN	FRECUENCIA PROMEDIO CADA ESTACIÓN (Hz)
Estación 1	Curva Plana
Estación 2	Curva Plana
Estación 3	Curva Plana
Estación 4	Curva Plana
Estación 5	Curva Plana
VALOR PROMEDIO TOTAL	Curva Plana

9. CONCLUSIONES

Como se puede evidenciar en el estudio realizado, en ambos perfiles la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros (V_{s30}), son mayores a 500 [m/s].

Para el método Nakamura NO se presenta una frecuencia predominante en las cinco mediciones realizadas “in situ”, después de analizar los resultados se puede concluir que el predio estudiado no presenta “efecto de sitio” (amplificación de ondas), debido a que no presenta amplitudes importantes, ni frecuencias definidas en los intervalos de mayor importancia, su espectro se define de Curva Plana.



10. LIMITACIONES

Por tratarse de un método geofísico de inherente carácter indirecto, la interpretación de los resultados depende de concepto técnico del especialista, por lo que la misma puede variar ligeramente entre especialistas.

Cualquier situación no prevista en este informe, así como modificaciones que se deseará realizar en su contenido, deberá ser consultada y aprobada por el suscrito.

Mohamed Nimer Hassan
Ingeniero Civil