

# Variabilidad de resultados de la exploración geofísica de sitios usando métodos de ondas superficiales

Variability of site geophysical exploration results using surface wave methods

Fecha de entrega: 24 de octubre 2023

Fecha de aceptación: 25 de enero 2024

Felipe Leyton<sup>1</sup>, Gonzalo Montalva<sup>2</sup>, César Pastén<sup>3</sup>, Francisco Ruz<sup>4</sup>, Esteban Sáez<sup>5</sup>, Óscar Taiba<sup>6</sup> y Juan Carlos Tiznado<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Chile, Centro Sismológico Nacional, Beauchef 850, Santiago, Chile, [leyton@csn.uchile.cl](mailto:leyton@csn.uchile.cl) (orcid: 0000-0002-6438-4045)

<sup>2</sup> Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile, [gmontalva@udec.cl](mailto:gmontalva@udec.cl) (orcid: 0000-0001-8598-7120)

<sup>3</sup> Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile, [cpasten@uchile.cl](mailto:cpasten@uchile.cl) (orcid: 0000-0002-6683-0619)

<sup>4</sup> R&V Ingenieros, Licenciado de las Peñas 4909, Ñuñoa, Chile, [francisco@ryv.cl](mailto:francisco@ryv.cl)

<sup>5</sup> P. Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile, [esaezr@uc.cl](mailto:esaezr@uc.cl) (orcid: 0000-0001-5433-0388), [jctiznad@uc.cl](mailto:jctiznad@uc.cl) (orcid: 0000-0002-7295-0588)

<sup>6</sup> Ferrara Proyectos Especiales, Avda. Ossa 235, of. 1150, La Reina, Chile, [oscartaiba@ferrara.cl](mailto:oscartaiba@ferrara.cl)

*Tras el terremoto del Maule 2010 ( $M_w$  8.8), grandes cambios se produjeron en la normativa sísmica a nivel nacional. Uno de los aspectos interesantes fue el cambio en la metodología para la clasificación de suelos en la norma NCh433. En pocas palabras, se pasó del uso de parámetros de resistencia al uso de parámetros dinámicos del suelo, como el promedio armónico de la velocidad de propagación de ondas de corte en los 30 m superiores del terreno ( $V_{s30}$ ) y el periodo predominante ( $T_g$ ), que se evalúa incorporarlo. En este estudio, se comparan resultados obtenidos por 4 equipos de trabajo que exploran seis sitios utilizando diversos sensores, geometrías y procedimientos, todos ellos usando Métodos de Ondas Superficiales (MOS). Se observa que, en general, la estimación de  $V_{s30}$  y  $T_g$  son bastante robustas, pero se encuentran importantes variaciones en los perfiles de velocidad obtenidos; es por ello que es necesario contrarrestar el resultado con la estratigrafía del sondaje. Estos resultados reflejan las limitaciones y potencialidades de los MOS para estimar las propiedades dinámicas de sitios.*

*Palabras clave: Métodos de Ondas Superficiales, variabilidad, dinámica de suelos*

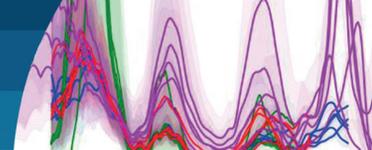
*After the 2010 Maule earthquake ( $M_w$  8.8) major changes were made in seismic regulations at the national level. One of the most interesting aspects was the change in the methodology for the soil classification in the NCh433 design standard. In summary, there was a transition from the use of soil strength parameters to soil dynamic parameters, such as the harmonic average of the shear wave velocity in the first 30 m of the subsoil ( $V_{s30}$ ) and the predominant period ( $T_g$ ), whose incorporation is under review. In this study, results from 4 teams exploring the same 6 sites using various sensors, geometries, and procedures are compared, all of them using Surface Wave Methods (MOS, for its initials in Spanish). It is concluded that, in general, the estimation of  $V_{s30}$  and  $T_g$  are quite robust, but important variations are observed in the shear wave velocity profiles obtained. For that reason, it is necessary the comparison of these results with the stratigraphy. These results point to the limitations and potential of MOS to estimate the dynamic properties of sites.*

*Keywords: Surface Waves Methods, variability, soil dynamics*

## Introducción

Tras el terremoto del Maule 2010 ( $M_w$  8.8), innumerables casos pusieron en evidencia cómo las propiedades dinámicas de los suelos jugaron un rol preponderante en la distribución del daño (Leyton *et al.*, 2011, 2012,

2013). Similares observaciones se han tenido para los terremotos de Iquique 2014 ( $M_w$  8.1) (Becerra *et al.*, 2016) e Illapel 2016 ( $M_w$  8.4) (Fernández *et al.*, 2017). Ello motivó la incorporación de parámetros dinámicos para la clasificación de los suelos en la normativa chilena (por



ejemplo, NCh433 2009 y NCh2369 2023). Es así como se incorporan parámetros como el promedio armónico de los 30 primeros metros del terreno de la onda S ( $V_{s30}$ ) y el periodo predominante ( $T_g$ ), ambos estimados mediante el uso de Métodos de Ondas Superficiales (MOS) y el método de la razón espectral de la componente horizontal sobre la vertical (REHV, Nakamura (1989)).

Es así como estos métodos han cobrado una particular importancia, dedicándose variados estudios a nivel nacional e internacional a su investigación. Sin embargo, pocos trabajos han comparado los resultados obtenidos a partir de MOS con los obtenidos con métodos invasivos y aún menos han comparado resultados con distintos MOS (Garofalo *et al.*, 2016a, 2016b, 2017). En el presente estudio abordamos esta temática y analizamos la variabilidad de los resultados obtenidos al aplicar MOS en la determinación de las propiedades dinámicas de sitios.

Considerando datos de 6 sitios representativos, tomados por 4 grupos de trabajo independientes, se analiza la variabilidad de resultados, incluyendo las curvas de dispersión, perfiles de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) en los primeros 50 m, el  $V_{s30}$  y el periodo predominante  $T_g$ . La gran diferencia del presente estudio frente a esfuerzos previos es que en esta investigación cada equipo efectuó sus propias mediciones con sus propios equipos, frente a ejercicios anteriores donde el conjunto de datos era único y los equipos sólo los analizaron en forma independiente.

## Datos

En este trabajo se consideran 2 campañas de terreno ejecutadas en enero y mayo de 2023, financiadas por el proyecto Fondef ID22I10032, en el que se enmarca esta investigación. En la primera de ellas, se visitaron las ciudades de Puerto Varas y Valdivia; mientras que en la segunda se recolectaron datos de Chillán y Talca, ver mapa en la Figura 1. Durante estas mediciones, se trabajó de manera paralela en 4 grupos, liderados por los autores de este trabajo.

El trabajo en terreno se abordó de manera paralela e independiente, coincidiendo sólo los tiempos de realización de las mediciones. Cada grupo utilizó los equipos a su disposición, tales como:

- Tromino 3G, geófonos de 4.5 Hz, de 3 componentes
- Geometrics Geode, de 24 canales, con geófonos de 4.5 Hz
- Sismómetros Sara SL06, conectados a sensores triaxiales de 0.5 Hz (SS-BHV05) y de 1 Hz (Terrabots)
- Sismómetros 40TDE Guralp

La disposición de los equipos en terreno fue diseñada por cada grupo, buscando caracterizar de la mejor manera los sitios en estudio. Ellos combinaron mediciones en arreglos bidimensionales con arreglos lineales; ejemplos de las geometrías utilizadas se muestran en los paneles del lado derecho de la Figura 1.

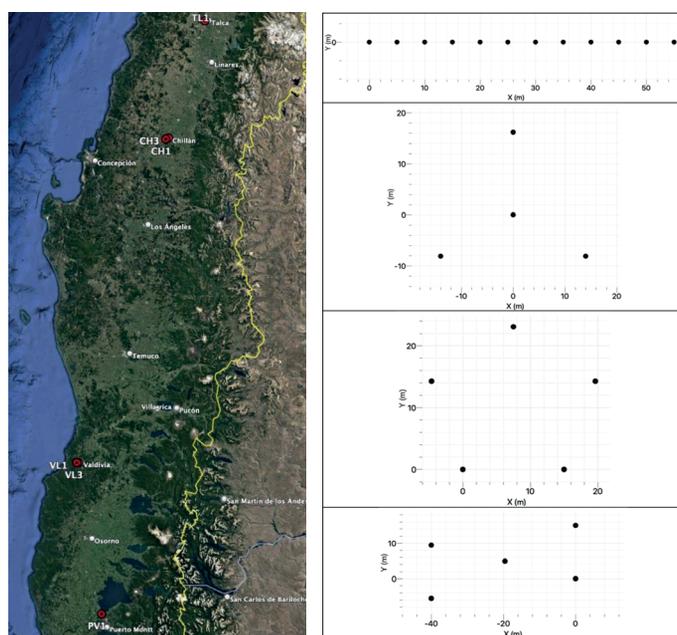
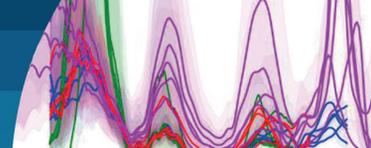


Figura 1: a) Foto aérea con los sitios analizados en este estudio; tomada de Google Earth, b) ejemplos de las geometrías utilizadas en este estudio; de arriba abajo: lineal con espaciamiento constante, triángulo equilátero con estación central, pentágono y cuadrilátero con estación central.

También, se combinaron la toma de datos con fuente pasiva o ruido sísmico, con fuentes activas, tales como golpes de mazo. Los tiempos de registros variaron desde unos pocos segundos (en el caso de Geometrics Geode), pasando por decenas de minutos hasta llegar a 1 hora (para los Tromino) y varias horas (sismómetros Guralp y Sara). Nuevamente, cada grupo definió la duración de los registros de manera independiente, buscando la mejor caracterización posible del sitio.



## Breve descripción metodológica

Para el análisis de los datos y obtención de las curvas de dispersión se utilizaron MOS basados en el análisis de ondas Rayleigh, tal como se ha hecho en estudios de este tipo (Humire *et al.*, 2015; Pastén *et al.*, 2016; Leyton *et al.*, 2018; Podestá *et al.*, 2019). En general, se usa la combinación de métodos pasivos y activos, para lograr cubrir un mayor rango de frecuencias en la curva de dispersión (Humire *et al.*, 2015; Leyton *et al.*, 2018; Podestá *et al.*, 2019; Tokimatsu, 1997).

Entre los métodos considerados, se utiliza SPAC (Aki, 1957; Asten y Henstridge, 1984), su generalización a geometrías más sencillas, ESAC (Chávez-García *et al.*, 2005, 2006; Hayashi, 2008) y su extensión a altas frecuencias (Ekström, 2014; Ekström *et al.*, 2009), FK (Horike, 1985; Kvaerna y Ringdahl, 1986), con datos pasivos y activos. Posteriormente, el perfil de  $V_s$  fue obtenido a partir de las curvas de dispersión mediante la inversión no lineal usando el Método del Vecindario (Sambridge, 1999), implementado por Wathelet (2008) para este propósito. Detalles de la aplicación de distintas metodologías pueden verse en Humire *et al.* (2015), Pastén *et al.* (2016), Leyton *et al.* (2018) y Becerra *et al.* (2015). Gran parte de estos cálculos usaron el software Geopsy (Wathelet *et al.*, 2020).

Por otro lado, la estimación del periodo predominante se obtuvo mediante la técnica de la razón espectral de la componente horizontal sobre la vertical (REHV) (Nakamura, 1989). Detalles de estos métodos pueden obtenerse de Leyton *et al.* (2011, 2012, 2013, 2018), Becerra *et al.* (2016), Fernández *et al.* (2017) y Podestá *et al.* (2019). En breve, la medición es dividida en ventanas de tiempo del orden de 1 min y procesadas de la misma forma. Se calcula la transformada de Fourier de cada una de las componentes, sumándose las componentes horizontales para luego dividirla por la vertical; ello se realiza tras el suavizamiento con el filtro Konno y Ohmachi (1998), usual en este tipo de estudios.

## Resultados

A continuación, se presentan los resultados centrados en 3 principales elementos: las curvas de dispersión, el perfil de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) en los primeros 50 m y las razones espectrales de la componente horizontal sobre

la vertical (REHV). En las siguientes figuras, cada color representa un grupo de trabajo, según la leyenda del borde superior; para facilitar su comparación, se ha mantenido la nomenclatura del color en todas las figuras.

La Figura 2 muestra las curvas de dispersión de cada uno de los grupos; en ellas, cada cruz representa el valor de la lentitud para cada frecuencia y la barra vertical el error. Es posible ver que, en general, existe una buena coincidencia entre todas las curvas entre 1 y 10 Hz. Ninguno de los grupos pudo obtener resultados confiables a frecuencias menores a 1 Hz, usual en este tipo de estudios (Humire *et al.*, 2015; Pastén *et al.*, 2016; Leyton *et al.*, 2018). Sin embargo, para frecuencias superiores a los 10 Hz, sí se observan diferencias entre los resultados de los distintos grupos. Las mayores diferencias se observan en el sitio CH3, llegando a casi un factor de 2.

En la Figura 3 se muestran los perfiles de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) en los primeros 50 m. Se observa, en general, una coincidencia en los perfiles, teniéndose velocidades similares en cada grupo para valores de profundidad similares. Cabe destacar que, en muchos casos, existen diferencias importantes en los modelos dado que algunos de ellos presentan inversiones de velocidad, siendo casos aislados más que la regla general. Por otro lado, la cantidad de capas de los perfiles varían considerablemente, lo que podría afectar las funciones de amplificación de cada modelo, hecho que escapa a los objetivos del presente trabajo.

A continuación, la Tabla 1 presenta los valores de  $V_{s30}$  obtenidos por cada grupo.

Tabla 1:  $V_{s30}$  de todos los sitios analizados en este estudio, por cada uno de los grupos. Se agrega el promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación en cada caso.

Grupo	$V_{s30}$ , m/s					
	TL1	CH1	CH3	VL1	VL3	PV1
1	445.9	332.5	475.3	216.3	173.8	275.5
2	449.2	345.6	514.4	216	183.2	284.6
3	461.5	340.1	421.2	-	205.3	281.9
4	470.8	371.3	398.2	229.1	247.6	284.8
Promedio	456.9	347.4	452.3	220.5	202.5	281.7
Desv. Est.	11.47	16.83	52.53	7.48	32.85	4.34
Coefficiente de variación, %	2.5	4.8	11.6	3.4	16.2	1.5

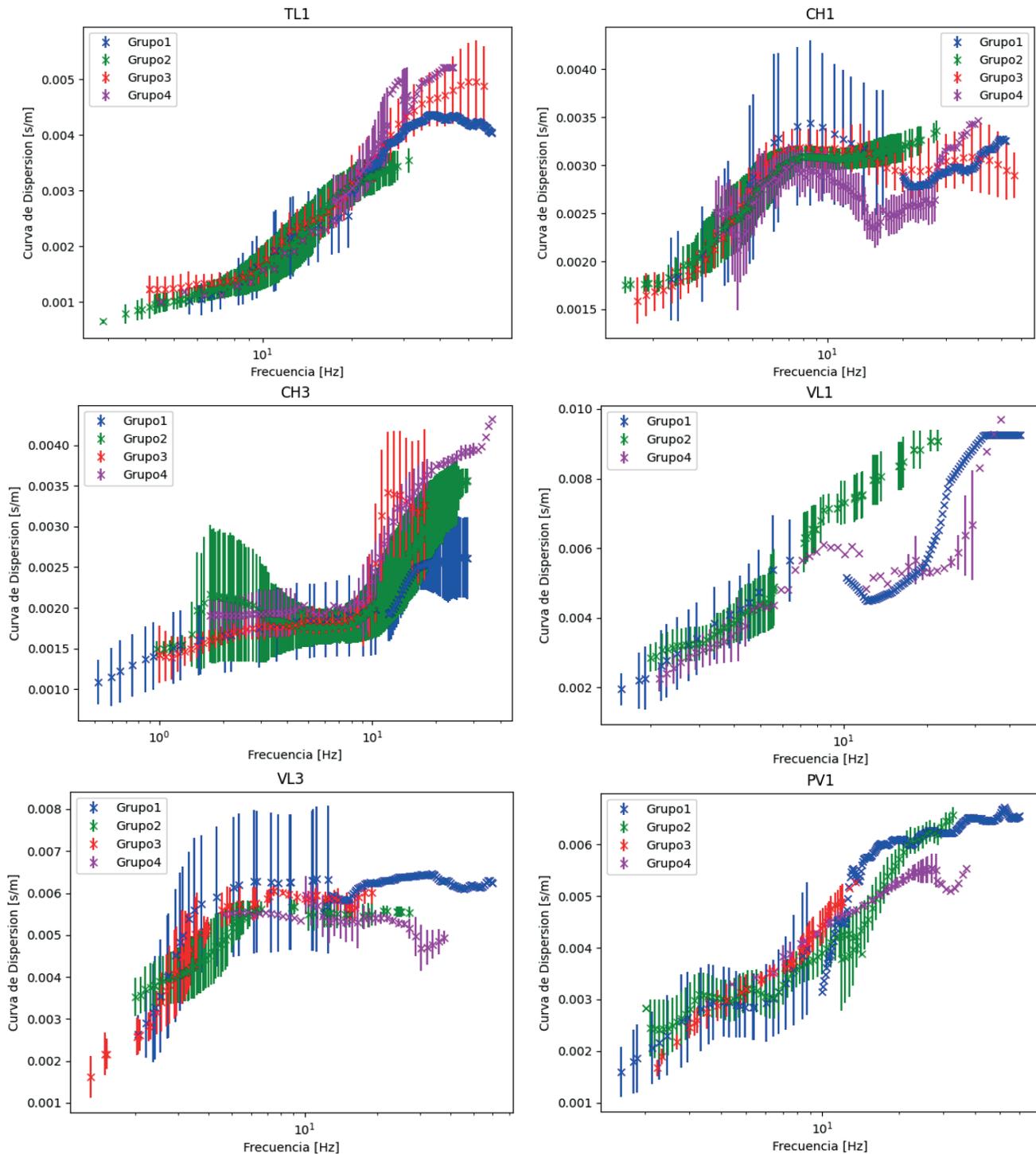
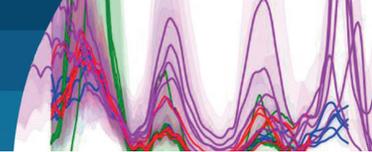


Figura 2: Comparación de las curvas de dispersión obtenidas, lentitud [s/m] en función de la frecuencia [Hz], por cada uno de los Grupos. Cada color representa un Grupo, siguiendo la leyenda de cada panel; el sitio es marcado por la etiqueta del borde superior de cada panel según el mapa de la Figura 1. Cada cruz representa el valor promedio y la barra vertical su respectivo error.

De los resultados presentados en la Tabla 1, es posible ver que CH3 es el sitio que presenta mayor variabilidad en los resultados de  $V_{s30}$ . Tal como se observó anteriormente, este sitio es el que presenta mayores diferencias en las curvas

de dispersión en altas frecuencias (mayores a 10 Hz), teniéndose un factor de casi 2.

Por otro lado, VL3 es otro sitio con una variabilidad importante en los resultados, principalmente debido a

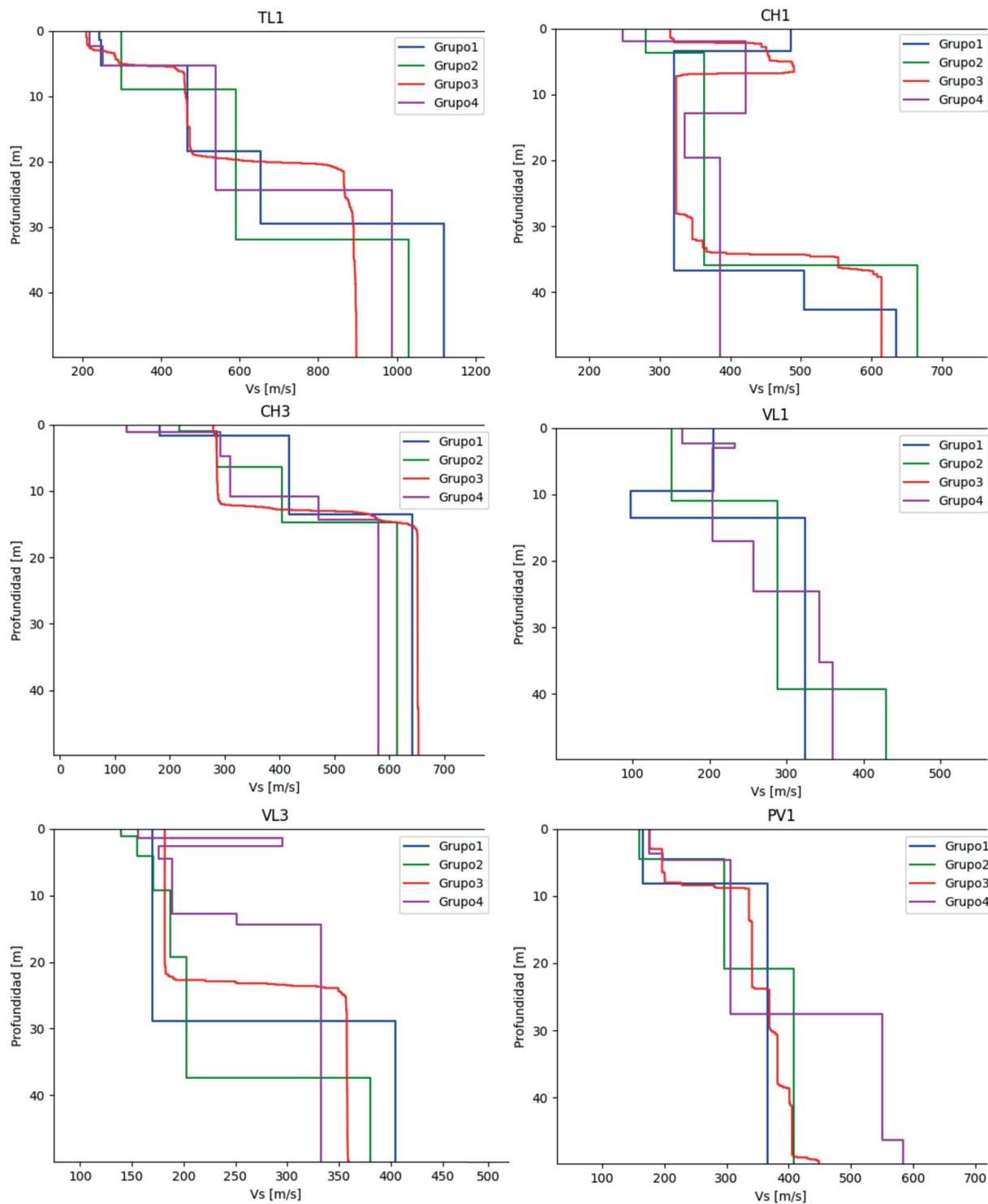
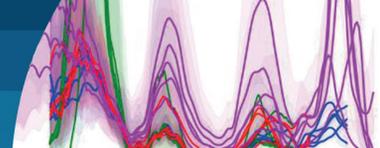


Figura 3: Comparación de los perfiles de  $V_s$  de cada uno de los grupos. Cada color representa un grupo, siguiendo la leyenda de cada panel; el sitio es marcado por la etiqueta del borde superior de cada panel según el mapa de la Figura 1.

lo obtenido por el grupo 4, estando 40 m/s sobre los resultados de los otros grupos. En la Figura 3 es posible ver que el grupo 4 define una inversión de velocidad en los primeros metros, la cual es seguida por un aumento rápido de  $V_s$ , mayor que lo observado en los otros grupos.

Es posible que esta última capa sea la responsable de la diferencia en el  $V_{s30}$  del grupo 4 con relación al resto.

Para los otros sitios, la variabilidad es baja, lo que se refleja en las similitudes de los perfiles de velocidad  $V_s$  y sus respectivas curvas de dispersión.

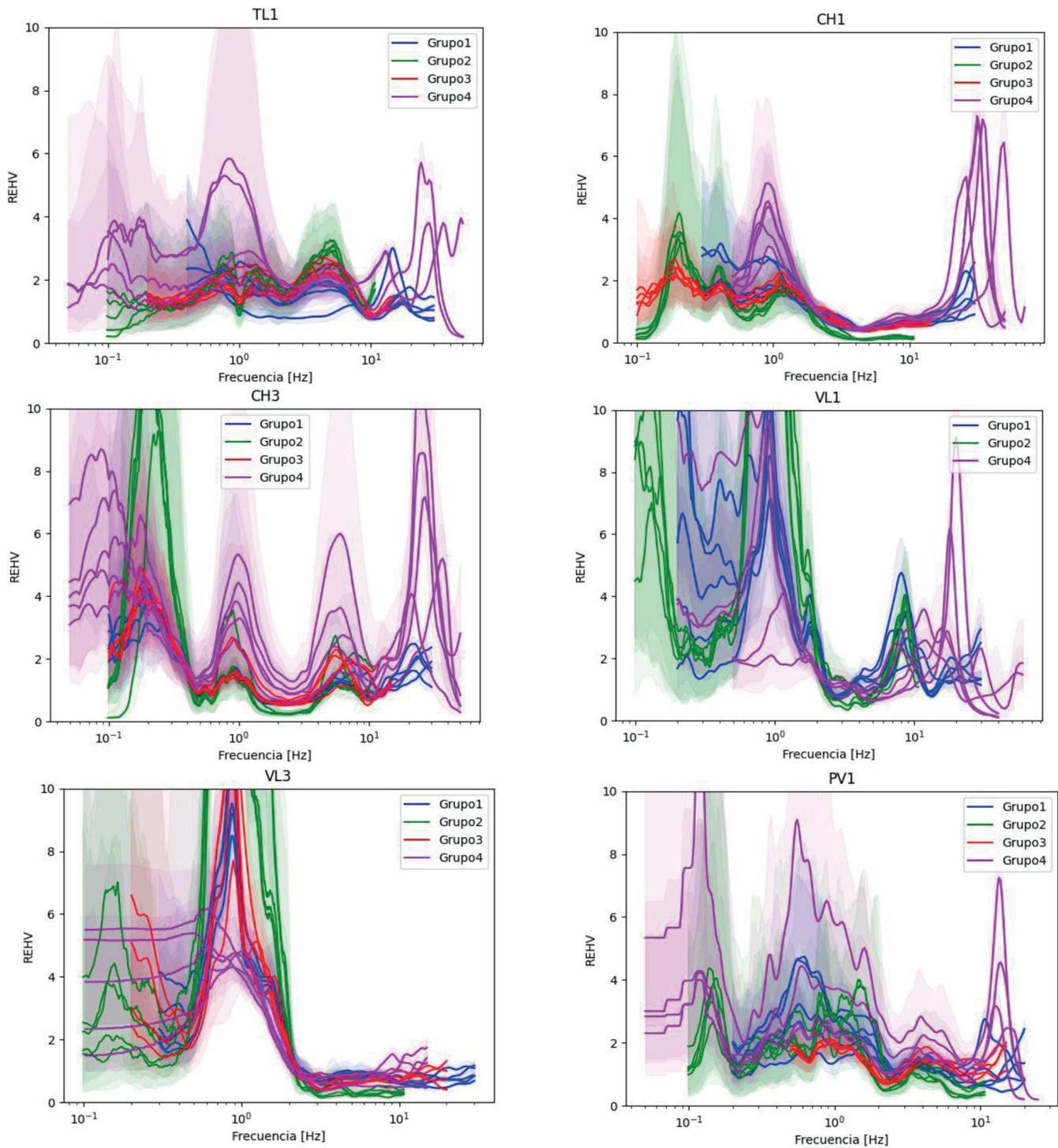
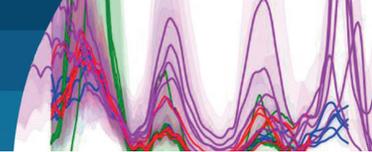
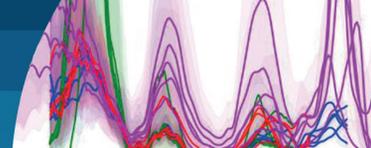


Figura 4: Comparación de los resultados de la razón espectral de la componente horizontal sobre la vertical (REHV) en función de la frecuencia [Hz], por cada uno de los Grupos. Cada color representa un Grupo, siguiendo la leyenda de cada panel; el sitio es marcado por la etiqueta del borde superior de cada panel según el mapa de la Figura 1.

La Figura 4 presenta los resultados de la razón espectral de la componente horizontal sobre la vertical (REHV) (líneas continuas) de cada grupo (ver leyenda en el borde superior); las áreas del mismo color representan la desviación estándar de cada una de las mediciones. Lo primero que es

posible ver es que las REHV son presentadas en diversos rangos de frecuencia, partiendo en valores como 0.05, 0.1 y 0.5 Hz; y terminando en 10, 30 y 50 Hz. Sin perjuicio de lo anterior, las curvas de REHV son bastante similares, teniéndose las mayores variaciones en las amplitudes de



los peaks observados, pero muy similares frecuencias predominantes. En términos generales, las mayores variaciones se observan en las bajas frecuencias (menores a 1 Hz), teniéndose resultados más consistentes en las altas frecuencias. Notar que la frecuencia mínima nominal no es idéntica en todos los sensores empleados, algunos constan de geófonos de 0.5 o 1.0 Hz, otros son de frecuencia 4.5 Hz, pero llevados mediante filtros electrónicos a un mínimo de 0.3 Hz de acuerdo con el fabricante, mientras que otros son banda ancha de 60 s. Luego, valores por debajo de 1 s están en un rango de observación donde el funcionamiento de cada equipo es distinto. Debe ser analizado más en detalle, pero escapa al objetivo del presente estudio.

De la Figura 4 es posible estimar el periodo predominante ( $T_g$ ) de cada sitio, lo cual se presenta en la Tabla 2. Al final de la Tabla 2, al igual que en la Tabla 1, se ha agregado el promedio y la desviación estándar para cada sitio, complementado con el coeficiente de variación (desviación estándar/promedio x 100) para poder normalizar la variabilidad. De esta Tabla 2 es posible ver que, en términos generales, existe coincidencia en los periodos predominantes estimados por los diversos grupos, reflejados en diferencias porcentuales menores al 20%. Se exceptúan 2 casos: TL1 y CH1; en ellos, los periodos predominantes estimados por el grupo 4 escapan a los observado por los otros grupos. Preliminarmente, se piensa que puede deberse a una diferencia en los equipos utilizados, lo cual se está explorando con pruebas más detalladas.

Tabla 2: Valores del periodo predominante ( $T_g$ ) para todos los sitios analizados en este estudio, por cada uno de los grupos. Se agrega el promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación para cada caso.

Grupo	$T_g$ , s					
	TL1	CH1	CH3	VL1	VL3	PV1
1	0.19	2.56	4.71	1.08	1.15	1.61
2	0.20	4.85	4.78	0.97	1.11	1.21
3	0.20	5.37	5.08	-	1.14	1.15
4	1.19	1.10	5.69	1.11	0.98	1.56
Promedio	0.44	3.47	5.07	1.05	1.09	1.38
Desv. Est.	0.49	2.00	0.45	0.07	0.08	0.24
Coeficiente de variación, %	111.46	57.58	8.88	6.87	7.36	17.09

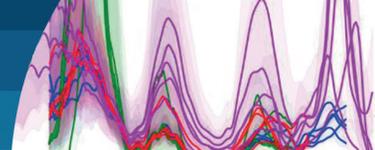
Es interesante notar que el rango del coeficiente de variación del valor de  $V_{s30}$  observado para los sitios de estudio es bastante menor al obtenido para la estimación del periodo predominante. Por un lado, estos datos confirman la percepción usual que el parámetro  $V_{s30}$  tiene a ser un estimador bastante robusto en términos de su estabilidad independientemente del método de estimación. Pero abre el desafío de comprender por qué se producen estas diferencias en la estimación del periodo predominante: ya sea por el uso de equipos distintos o por el proceso de medición e interpretación de la REHV; todo ello para obtener resultados más estables e independientes del equipo o responsables de la aplicación de la técnica.

## Conclusiones

En el presente trabajo se comparan resultados de métodos de ondas superficiales MOS, ampliamente utilizados hoy en día para la determinación de las propiedades dinámicas de sitios. Entre los resultados comparados, se presentan las curvas de dispersión, perfiles de  $V_s$  en los primeros 50 m y razones espectrales de la componente horizontal sobre la vertical (REHV). Ellos son complementados con parámetros derivados de los anteriores, como el promedio armónico de la velocidad de onda S en los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) y el periodo predominante del suelo ( $T_g$ ). Cabe destacar que estos son los parámetros que hoy en día se utilizan para la clasificación sísmica de suelos en las nuevas propuestas de normas sísmicas (NCh433, 2009; NCh2369, 2023).

Se observa, en general, una coincidencia en las curvas de dispersión entre 0.1 y 10 Hz; pudiendo variar hasta en un factor de 2 para frecuencias más altas. Además, en la mayoría de los casos, no se obtuvieron resultados confiables para frecuencias menores. De igual manera, los perfiles de velocidad de onda S en los 50 m superficiales muestran coherencia entre sí, pero se observan ciertos resultados que presentan inversión de velocidades. Se estima que ello redundará en modelos completamente distintos de respuesta sísmica, pero escapa a los objetivos del presente estudio y se propone analizar en trabajos futuros. Notar que en la nueva normativa se considera la ejecución de un sondeo para efectos de calibrar la estratigrafía obtenida mediante la aplicación de MOS en los primeros 30 m.

De los resultados de REHV, se observa coincidencia en la forma de las curvas, pero con posibles variaciones en



las amplitudes de ellas. Preliminarmente, se sospecha de 1 tipo de sensor utilizado, pues es sólo 1 grupo que presenta esta gran variabilidad; hecho que será analizado en mayor detalle en estudios posteriores.

De los resultados de  $V_{s30}$ , se observan desviaciones estándar menores a 30 m/s, siendo excedido sólo en 1 sitio (CH3). Cabe destacar que dicho sitio presenta un comportamiento complejo, por lo que se atribuye a esta complejidad la gran variabilidad en los resultados. Por otro lado, tal como se discutió anteriormente, un grupo presentó curvas de REHV con amplitudes distintas al resto. Estas diferencias son las que producen variaciones sobre el 20% en 2 casos (TL1 y CH1), siendo menores para todos los otros casos. Es por ello que se concluye que la estimación de  $T_g$  mediante REHV es robusta, con poca variabilidad, salvo en casos con periodos largos, sobre el periodo natural del sensor. Este aspecto debe ser analizado en mayor profundidad para mejorar el procedimiento de aplicación de REHV.

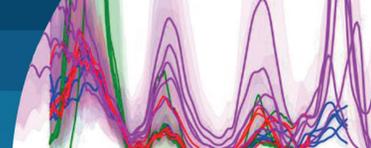
Se espera que estos resultados permitan arrojar luces sobre la confiabilidad de los MOS para la estimación del comportamiento dinámicos de los suelos; en particular, en su aplicación a la clasificación sísmica en la normativa chilena. Las comparaciones presentadas en este documento están siendo complementadas con nuevas mediciones en distintas ciudades del país. El objetivo es conseguir establecer tendencias más generales y contribuir a la elaboración de un Anteproyecto de Norma que establezca procedimientos estandarizados para la estimación de estos parámetros dinámicos de sitios.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el invaluable aporte de Rocío Vega, Diego Andrade y Felipe Hernández, de la P. Universidad Católica de Chile; Gaspar Rivas, Fabián Oliveras, Marco Chiorino y Bastián Garrido, de la Universidad de Chile; Margarita León, Vicente San Martín, Héctor Saldaña y Sebastián Núñez, de la Universidad de Concepción; y Rodrigo Guzmán de RyV Ingenieros, sin los cuales este estudio no se hubiese podido realizar. Este trabajo cuenta con el financiamiento del proyecto Fondef ID22110032 - Guía de caracterización dinámica de sitios y Anteproyecto de Norma “Obtención de parámetro  $V_s$  y  $T_0$  basado en técnicas de ondas de superficie para clasificación sísmica de sitios”, en el que se enmarca esta investigación.

## Referencias

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of Earthquake Research Institute* 35, 415–456
- Asten, M.W. and Henstridge, J.D. (1984). Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics* 49(11), 1828-1837
- Becerra, A., Sáez, E., Podestá, L. and Leyton, F. (2016). The 2014 earthquake in Iquique, Chile: Comparison between local soil conditions and observed damage in the cities of Iquique and Alto Hospicio. *Earthquake Spectra* 32(3), 1489-1505
- Becerra, A., Podestá, L., Monetta, R., Sáez, E., Leyton, F. and Yañez, G. (2015). Seismic microzoning of Arica and Iquique, Chile. *Natural Hazards* 79, 567-586
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M. and Stephenson, W.R. (2005). An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(1), 277-293
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M. and Stephenson, W.R. (2006). Subsoil structure using SPAC measurements along a line. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96(2), 729-736
- Ekström, G. (2014). Love and Rayleigh phase-velocity maps, 5–40 s, of the Western and Central USA from USArray data. *Earth and Planetary Science Letters* 402, 42-49
- Ekström, G., Abers, G.A. and Webb, S.C. (2009). Determination of surface-wave phase velocities across USArray from noise and Aki’s spectral formulation. *Geophysical Research Letters* 36(18), 5-9
- Fernández, J., Pastén, C., Ruiz, S. y Leyton, F. (2017). Estudio de efectos de sitio en la Región de Coquimbo durante el terremoto de Illapel Mw 8.3 de 2015. *Obras y Proyectos* 21, 20-28
- Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P.Y., Cornou, C., Cox, B.R., Ohrnberger, M., Sicilia, D., Asten, M., di Giulio, G., Forbriger, T., Guillier, B., Hayashi, K., Martin, A., Matsushima, S. Mercerat, D., Poggi, V. and Yamanaka, H. (2016a). InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 82, 222-240



- Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P.Y., Cornou, C., Cox, B.R., Dechamp, A., Ohrnberger, M., Perron, V., Sicilia, D., Teague, D. and Vergniault, C. (2016b). InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part II: Inter-comparison between surface-wave and borehole methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **82**, 241-254
- Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P.Y., Cornou, C., Cox, B.R., Dechamp, A., Ohrnberger, M., Sicilia, D. and Vergniault, C. (2017). Reliability and accuracy assessment of invasive and non-invasive seismic methods for site characterization: feedback from the InterPacific project. *16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering* 16WCEE, ACHISINA, paper 4938, Santiago, Chile
- Hayashi, K. (2008). *Development of the surface-wave methods and its application to site investigations*. PhD dissertation, Kyoto University, Japan.
- Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas. *Journal of Physics of the Earth* **33**(2), 59-96
- Humire, F., Sáez, E., Leyton, F. and Yáñez, G. (2015). Combining active and passive multi-channel analysis of surface waves to improve reliability of  $V_{s,30}$  estimation using standard equipment. *Bulletin of Earthquake Engineering* **13**, 1303-1321
- Konno, K. and Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America* **88**(1), 228-241
- Kvaerna, T. and Ringdahl, F. (1986). Stability of various f-k estimation techniques. Semi-annual Technical Summary, Norsar Scientific Report, 29-40
- Leyton, F., Leopold, A., Hurtado, G., Pastén, C., Ruiz, S., Montalva, G. and Saéz, E. (2018). Geophysical characterization of the Chilean seismological stations: First results. *Seismological Research Letters* **89**(2A), 519-525
- Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S.A., Contreras, J.P., Rebolledo, S. and Astroza, M. (2013). Microtremors' HVSr and its correlation with surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó, Central Chile. *Engineering Geology* **161**, 26-33
- Leyton, F., Montalva, G. and Ramírez, P. (2012). A preliminary study of seismic microzonation of Concepción based on microtremors, geology, and damages patterns. *Obras y Proyectos* **11**, 40-46
- Leyton, F., Sepúlveda, S.A., Astroza, M., Rebolledo, S., Acevedo, P., Ruiz, S., González, L. and Fonca, C. (2011). Seismic zonation of the Santiago basin, Chile. *5<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering* 5ICEGE, ISSMGE and SOCHIGE, R. Verdugo (ed.), session 5, paper SMSLF, Santiago, Chile
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro-tremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute* **30**, 25-33
- NCh433 (2009). Diseño sísmico de edificios. INN, Santiago, Chile
- NCh2369 (2023). Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. INN, Santiago, Chile
- Pastén, C., Sáez, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J. and Poli, P. (2016). Deep characterization of the Santiago Basin using HVSr and cross-correlation of ambient seismic noise. *Engineering Geology* **201**, 57-66
- Podestá, L., Sáez, E., Yáñez, G. and Leyton, F. (2019). Geophysical study and 3-D modeling of site effects in Viña del Mar, Chile. *Earthquake Spectra* **35**(3), 1329-1349
- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International* **138**(2), 479-494
- Tokimatsu, K. (1997). Geotechnical site characterization using surface waves. *1<sup>st</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering* 3, A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 1333-1368
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters* **35**, L09301.
- Wathelet, M., Chatelain, J.L., Cornou, C., Giulio, G.D., Guillier, B., Ohrnberger, M. and Savvaidis, A. (2020). Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing. *Seismological Research Letters* **91**(3), 1878-1889