

MANUAL DE APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS BASADAS EN ONDAS DE SUPERFICIE PARA LA DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO V_{S30}

AUTORES:

FRANCISCO HUMIRE GUARACHI

ESTEBAN SÁEZ ROBERT

FELIPE LEYTON FLÓREZ



Instituto de la Construcción

31/03/2015

Contenido

Presentación	6
Prólogo	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Motivación	8
1.2. Objetivos generales	8
2. REFERENCIAS	9
3. TERMINOLOGÍA usada en el manual	11
4. ASPECTOS GENERALES	12
4.1. Propagación de ondas de Rayleigh en un medio estratificado	12
4.2. Métodos basados en ondas superficiales (MOS) para estimar el perfil de Vs	13
4.3. Determinación de la curva de dispersión (CD)	13
4.4. Estimación del perfil de Vs (inversión)	15
4.5. Resumen	15
5. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS PARA EL DESARROLLO DE LA EXPLORACIÓN EN TERRENO	17
5.1. Equipos	17
5.1.1. Sistemas de adquisición	17
5.1.2. Geófonos	17
5.1.3. Fuente activa	18
5.2. Características del sitio estudiado	19
5.2.1. Ruido ambiental	19
5.2.2. Ensayos sobre superficies rígidas	20
5.2.3. Pendiente y sinuosidad del terreno	21
5.2.4. Estructuras cercanas	22
5.3. Arreglos	22
5.3.1. Arreglos lineales	22
5.3.2. Arreglos bidimensionales	23
5.4. Procedimiento en terreno	24
6. MÉTODOS BASADOS EN FUENTES ACTIVAS	25
6.1. Consideraciones según el tipo de fuente	25
6.1.1. Fuentes de baja energía	25
6.1.2. Fuentes de gran energía	25
6.2. Análisis de ensayos activos	25
6.2.1. Stacking	26
6.2.2. Selección de trazas y tiempo de registro a considerar en el análisis	28
6.2.3. Normalización de las trazas	29

7. MÉTODOS BASADOS EN MICROVIBRACIONES (PASIVOS)	31
7.1. Tiempo de registro y filtros	31
7.2. Procedimientos para obtener la curva de dispersión	31
7.2.1. Métodos de amplitud	32
7.2.1.1. Límites teóricos de los arreglos	32
7.2.1.2. Concentraciones de energía	33
7.2.1.3. Curva de dispersión	34
7.2.2. Métodos de fase	35
7.2.2.1. Curvas de autocorrelación	35
7.2.2.2. Estimación de la curva de dispersión	37
8. ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN GLOBAL E INVERSIÓN	39
8.1. Curva de dispersión global	39
8.1.1. Combinación de métodos	39
8.1.2. Incorporación de múltiples modos de la curva de dispersión	41
9. INVERSIÓN	43
9.1. Procedimiento según el algoritmo de búsqueda	43
9.1.1. Métodos iterativos	43
9.1.1.1. Algoritmo de búsqueda global	43
9.1.2. Parámetros del perfil de V_s	44
9.1.3. Resultados del proceso de inversión	44
9.2. Evaluación del parámetro V_{s30}	46
10. ERRORES FRECUENTES	47
10.1. Errores de terreno	47
Uso deficiente del espacio disponible en terreno para realizar los ensayos	47
Reiteración de golpes de fuente activa por ubicación	47
Desalinear el disparo en los ensayos activos	48
Omitir ensayos pasivos	48
Duración del registro pasivo o interrupción durante la medición e inducción de fuentes de campo cercano	48
Pendiente y sinuosidad del terreno	49
Estructuras cercanas	49
10.2. Errores de procesamiento de datos e interpretación	49
Diferenciación entre modos superiores e inversión de curva de dispersión/autocorrelación	49
<i>Stacking</i> de diagramas de dispersión y no de curvas de dispersión	51
Uso de parámetros iniciales para inversión de curva de dispersión	51
11. CONTENIDOS MÍNIMOS DEL INFORME	53
ANEXOS	

Presentación

Desde su fundación el Instituto de la Construcción ha aportado en distintos ámbitos del sector, especialmente en los tres ejes que conforman su Plan de Acción: Ingeniería Estructural, Construcción Sustentable y Mejoramiento de la Productividad.

Con el tsunami y terremoto de magnitud 8.8 (Mw) del 27 de febrero de 2010, las oportunidades de mejoramiento en el área normativa han sido diversas. Es así como en estos cinco años posteriores hemos acogido en nuestra institución a más de 300 especialistas, que han trabajado en la elaboración de los anteproyectos de los Decretos Supremos DS 60 “Requisitos de diseño y cálculo para el Hormigón Armado” y DS 61 “Diseño sísmico de edificios” y en los anteproyectos de diversas normas del área de la ingeniería estructural, entre los cuales se encuentran: NCh 2745 “Análisis y Diseño Sísmico de Edificios con Aislación Sísmica”; NCh 3332 “Estructuras-Intervención de construcciones patrimoniales de tierra cruda”; NCh 1508 “Estudio de Mecánica de Suelos”; NCh 3362 “Requisitos mínimos de diseño, instalación y operación para ascensores electromecánicos frente a sismos”, ex NTM 6; NCh 3359 “Requisitos para edificaciones estratégicas y de servicio comunitario”, ex NTM 3; NCh 3363 “Diseño Estructural – Edificaciones en áreas de riesgo de inundación por tsunami o seiche”, ex NTM 7; NCh 3357 “Diseño sísmico de componentes y sistemas no estructurales”, ex NTM 1; NCh 3364 Geotecnia - Ensayo de Penetración Estándar, y el anteproyecto de norma “Estudio o proyecto de ingeniería estructural”.

Siguiendo con la difusión de material que sin duda será un real aporte al sector, este año nos es grato presentar el “Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro V_{s30} ”, realizado bajo el alero del Comité Mecánica de Suelos que sesiona en el Instituto de la Construcción –presidido por el ingeniero Miguel Ángel Jaramillo- y cuya autoría corresponde al profesor de la Pontificia Universidad Católica de Chile Esteban Sáez Robert; al investigador del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile, Felipe Leyton Flórez, al exalumno de ambos, Francisco Humire Guarachi.

Esperamos que este Manual sea de utilidad para todos los profesionales y empresas que trabajan en esta importante área de la ingeniería, que es un tema de investigación activo en el mundo.

Una vez más agradecemos el trabajo de todos quienes hicieron posible la elaboración de este Manual, y en especial a los integrantes del Comité de Mecánica de Suelos, por su importante y generoso aporte.

*Bernardo Echeverría
Presidente
Instituto de la Construcción*



Prólogo

Luego del terremoto del Maule de 2010, surgió la necesidad de revisar el sistema de clasificación sísmica de suelos vigente en Chile. En dicha revisión, se incorporó la medición del promedio de velocidades de onda de corte en los 30 m superficiales (V_{s30}) al sistema de clasificación existente. Este requerimiento marcó el inicio de un rápido aumento de profesionales y empresas que ofrecen el servicio de estimación de dicho parámetro. Sin embargo, pronto comenzaron las dudas debido a la variabilidad de las técnicas empleadas, dispersión de resultados y justificaciones de dichos resultados.

En virtud de esta realidad, el Comité Mecánica de Suelos, que funciona bajo el alero del Instituto de la Construcción desde 2010, evaluó trabajar en un documento para normar la ejecución de ensayos de geofísica para la determinación del parámetro V_{s30} .

Antes de elaborar una norma, los profesionales participantes del Comité Mecánica de Suelos coincidieron en el desarrollo de un manual de procedimientos y recomendaciones, en lugar de un documento normativo, puesto que los métodos basados en la dispersión de ondas de superficie (MOS) continúa siendo hasta la actualidad un tema de investigación activo a nivel mundial. Prueba de ello es que año tras año aparecen nuevas técnicas, interpretaciones o métodos de estimación de errores en la literatura especializada. Adicionalmente, los especialistas opinaron que no existe hasta ahora ninguna técnica que sea completamente infalible y que asegure un resultado satisfactorio y razonablemente confiable para la diversidad de casos encontrados en la práctica.

En ese sentido, el presente documento tiene el propósito de presentar en forma sintética la experiencia de los autores empleando los MOS para la determinación del parámetro V_{s30} en varias regiones y condiciones geológicas del país. El documento sintetiza las recomendaciones de ejecución de las mediciones en terreno y del posterior análisis de datos de más de 600 estudios de este tipo en los que han participado los autores en distintas localidades de Chile.

El énfasis del manual radica en separar el estudio claramente en dos etapas: registro de datos en terreno y su posterior análisis en gabinete, así como insistir en que la mejor estrategia para asegurar resultados satisfactorios es la combinación de técnicas complementarias. El documento presenta las convicciones personales de los autores, en cuanto a las estrategias a seguir en cada una de estas fases, de forma que tienen el sesgo natural de los resultados obtenidos con equipos y herramientas de análisis propios. Es más, el presente manual, en ningún caso pretende imponer como única estrategia de medición o análisis las recomendaciones presentadas, pues con toda seguridad existen formas alternativas de conducir estudios que aseguren resultados igualmente satisfactorios.

Deseamos manifestar nuestro muy especial agradecimiento a Francisco Humire, nuestro exalumno, hoy colega y amigo, sin él este documento jamás hubiera sido posible de elaborar. Adicionalmente agradecemos el apoyo para la elaboración de algunas secciones de Alix Becerra y la labor de coordinación de Claudia Fuentes, secretaria técnica del Comité Mecánica de Suelos del Instituto de la Construcción

Finalmente deseamos agradecer el invaluable aporte de las empresas R&V Ingenieros y CMGI, las que permitieron sacar adelante este documento en un plazo razonable. Finalmente, deseamos agradecer a todas los colegas que asistieron a las reuniones de discusión en el Comité Mecánica de Suelos, plantearon sus propias experiencias y dudas, las que ciertamente contribuyeron a que este documento sea lo más claro posible.

Esteban Sáez y Felipe Leyton

1.1. Motivación

Las condiciones locales del suelo pueden variar entre sitios cercanos, modificando y, en muchos casos, amplificando el movimiento percibido en superficie producto de un sismo. Esta amplificación depende fundamentalmente de las propiedades dinámicas de los suelos que conforman un sitio, tales como las velocidades de propagación de ondas de corte.

Tras el terremoto del 27 de febrero de 2010, surgió la necesidad de modificar los estándares y aspectos a considerar en el diseño sísmico de edificios, entre ellos, la clasificación sísmica de suelos. El 13 de diciembre de 2011 se aprueba el Decreto Supremo 61 (D.S. 61) que modifica la norma NCh433, y establece que para toda edificación de cinco o más pisos sobre el terreno natural, edificios categoría III o IV mayores a 500 m² construidos, sean superior a dos niveles y presenten una altura total mayor a ocho metros, y conjuntos de viviendas de más de 8.000 m², se deba realizar un estudio sísmico que permita inferir el perfil de velocidades de ondas de corte, y el promedio armónico de estas velocidades para los primeros 30 m de profundidad.

Entre los métodos aceptados por el nuevo decreto, se encuentran los ensayos *cross-hole*, *down-hole*, sonda de suspensión y aquellos basados en mediciones de ondas superficiales, como el análisis espectral de ondas superficiales y el análisis multi-canal de ondas superficiales.

1.2. Objetivos generales

- El presente documento establece procedimientos y recomendaciones para la determinación del promedio armónico de la velocidad de propagación de onda de corte en los primeros metros bajo la superficie, mediante técnicas basadas en la dispersión de ondas de superficie, con énfasis en los primeros 30 metros (V_{s30}).
- Si bien estos procedimientos involucran la estimación de la curva de dispersión y del perfil de velocidades de ondas de corte, el énfasis de este manual está en la determinación del valor de V_{s30} y en la detección de la existencia de inversiones de velocidades.
- Discutir errores usuales asociados a la aplicación de las técnicas basadas en la dispersión de ondas de superficie.

2. REFERENCIAS

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415–456.
- Asten, M., & Henstridge, J. (1984). Array estimator and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics*, 49(11), 1828–1837.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79, 205–227.
- Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57, 1408–1418.
- Chávez-García, F. J., Rodríguez, M., & Stephenson, W. R. (2005). An Alternative Approach to the SPAC Analysis of Microtremors: Exploiting Stationarity of Noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 277–293.
- Chávez-García, F. J., Rodríguez, M., & Stephenson, W. R. (2006). Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 729–736.
- Comina, C., Foti, S., Boiero, D., & L.V., S. (2011). Reliability of V_{s30} Evaluation from Surface-Wave Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, 579–586.
- Foti, S. (2000). *Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves*. Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- Gabriels, P., Snieder, R., & Nolet, G. (1987). In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode rayleigh waves. *Geophysical Prospecting*, 35, 187–196.
- Hayashi K. (2008). Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations. Ph.D Dissertation, Kyoto University, 2008.
- Humire, F. (2013). Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelo: aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Humire, S., Sáez, E., Leyton, F., Yañez, G. (2014). Combining active and passive multi-channel analysis of surface waves to improve reliability of V_{s30} estimation using standard equipment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, doi: 10.1007/s10518-014-9662-5.
- Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. (1993). *Array signal processing*. Prentice-Hall: Upple Saddle River (N. J.).
- Lacoss, R., Kelly, E., & Toksöz, M. (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, 34, 21–38.
- Lai, C. (2005). Surface Waves in Dissipative Media: Forward and Inverse Modelling. En C. Lai, & K. Wilmanski, *Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks*, CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer Wien New York.
- Louie, J. (2001). Faster, better: Shear-Wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 347–364.
- McMechan, G., & Yedlin, M. (1981). Analysis of dispersive waves by wave-field transformation. *Geophysics*, 46(6), 869–874.
- Nazarian, S., & K.H. Stokoe II. (1984). In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves. *Proc. 8th Conf. on Earthquake Eng.* (págs. 31–38). San Francisco: Prentice-Hall.
- Okada, H. (2003). *The Microtremor Survey Method*, *Geophysical Monographs Series*, no.12. Published by Society of Exploration Geophysicists.
- Park, C., & Miller, R. (2008). Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 13, 1–11.
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64 (3), 800–808.
- Rix, G. (2005). Near-surface site characterization using surface waves. En C. Lai, & K. Wilmanski, *Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks*, CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer Wien New York.
- Rix, G., & Leipski, E. (1991). Accuracy and Resolution of Surface Wave Inversion. *Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics* (págs. 17–32). American Society of Civil Engineers.

- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with neighborhood algorithm - I. Searching the parameter space. *Geophysical Journal International*, 138, 479-494.
- Sambridge, M. (2001). Finding acceptable models in nonlinear inverse problems using a neighbourhood algorithm. *Inverse Problems*, 17, 387–403.
- Sambridge, M., & Mosegaard, K. (2002). Monte Carlo methods in geophysical inverse problems. *Reviews of Geophysics*, 40,3.
- Socco, L., & Strobbia, C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 165-185.
- Stokoe, K. H., Rathje, E. M., Wilson, C. R., Rosenblad, B. L., & Menq, F. Y. (2004). Development of the NEES Large-Scale Mobile Shakers and Associated Instrumentation for In Situ Evaluation of Nonlinear Characteristics and Liquefaction Resistance of Soils. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada, August.
- Strobbia, C. (2003). *Surface Wave Methods: Acquisition, processing and inversion*. Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- Tokimatsu, K. (1992). Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), 1529-1543.
- Tokimatsu, K. (1997). Geotechnical site characterization using surface waves. En Ishihara (Ed.), *Proc. 1st Intl. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*, 3, págs. 1333–1368. Balkema.
- Wathelet, M. (2005). *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*. Ph.D. thesis, Université de Liège, Liège, Belgium.
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35, L09301, doi:10.1029/2008GL033256.
- Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64, 691-700.
- Xia, J., Miller, R., Park, C., & Tian, G. (2003). Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *Journal of Applied Geophysics*, 52, 45–57.

3. TERMINOLOGÍA usada en el manual

- Apertura de un arreglo (D): se define como el largo de la distancia máxima entre dos geófonos del arreglo.
- Campo cercano: efectos en las señales sísmicas producidos a poca distancia de la fuente.
- Campo lejano: señales sísmicas en las cuales no predomina el campo cercano y las ondas superficiales se han desarrollado.
- Curva de dispersión (CD): curva que describe la variación de la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh (velocidad de fase) en función de la frecuencia (o longitud de onda).
- Frecuencia (f): Frecuencia de una onda de Rayleigh.
- Longitud de onda (λ): Largo característico de una onda de Rayleigh para una determinada frecuencia.
- MOS: Métodos basados en dispersión de Ondas de Superficie.
- Perfil de Vs: Secuencia de capas horizontales de suelos de extensión lateral infinita definidas por su espesor y su velocidad de propagación de onda de corte Vs que caracterizan el sitio explorado.
- Vs: velocidad de propagación de ondas de corte u ondas S.
- V_{s30} : Promedio armónico de velocidad de propagación de onda de corte en los primeros 30 metros bajo el nivel de instalación de los geófonos.
- Velocidad de fase (c): Velocidad de fase de una onda de Rayleigh para una determinada frecuencia ($c = \lambda \cdot f$).

4. ASPECTOS GENERALES

4.1. Propagación de ondas de Rayleigh en un medio estratificado

En un semi espacio homogéneo, la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas de Rayleigh será la misma siempre, mientras que en un medio heterogéneo (por ejemplo, estratificado horizontalmente) la velocidad de fase es dependiente de la frecuencia o longitud de onda (figura 4.1). Esta propiedad se conoce como dispersión, mientras que el gráfico que muestra la variación de la velocidad de fase con la frecuencia, se conoce como curva de dispersión.

Los métodos geofísicos basados en el análisis de ondas superficiales recurren a esta característica dispersiva para caracterizar los suelos (Tokimatsu, 1997), pues esta propiedad depende de la estratigrafía del sitio y, en particular, del perfil de velocidades de ondas de corte. Dado que las ondas de Rayleigh movilizan al suelo hasta una profundidad dependiente de su longitud de onda (figura 4.1), cuando la longitud de onda es pequeña, la velocidad de fase dependerá de las propiedades de la(s) capa(s) superficial(es), mientras que si la longitud de onda es mayor, la velocidad también dependerá de estratos más profundos (Strobbia, 2003).

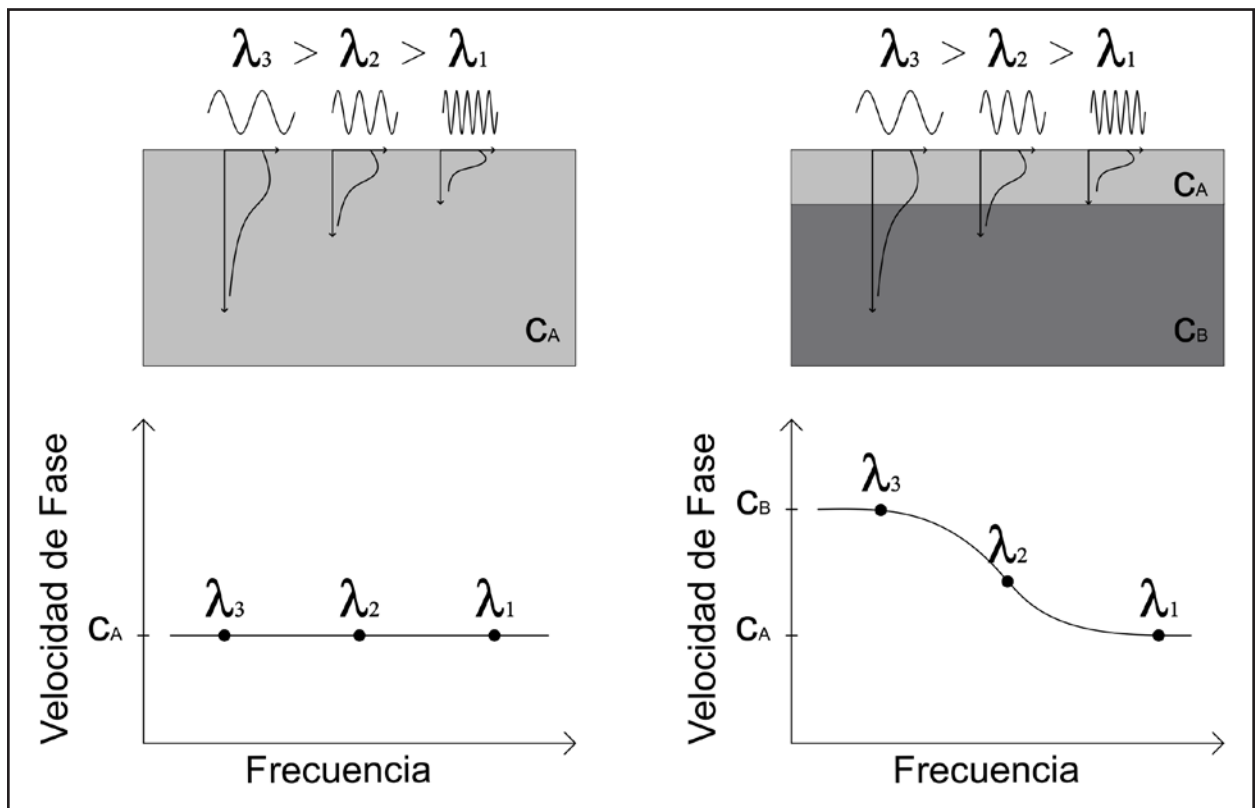


Figura 4.1: Velocidad de fase (V) para distintas longitudes de ondas (λ) en un semi espacio homogéneo (izquierda) y en un medio estratificado (derecha). Adaptado de Strobbia (2003).

Tal como se indica en la figura 4.2a, existen múltiples modos superiores de la curva de dispersión, las cuales están asociadas a los diferentes modos de vibración de Rayleigh del suelo (figura 4.3b). Por ejemplo, en la figura 4.2a, para una frecuencia de 5 Hz, se identifican tres modos (o velocidades de fase), mientras que a una frecuencia de 20 Hz se observan hasta 11 modos. Uno de los problemas más recurrentes en la determinación de la curva de dispersión es la identificación correcta del modo fundamental de la curva de dispersión (o modo 0), de forma de no confundirlo con modos superiores.

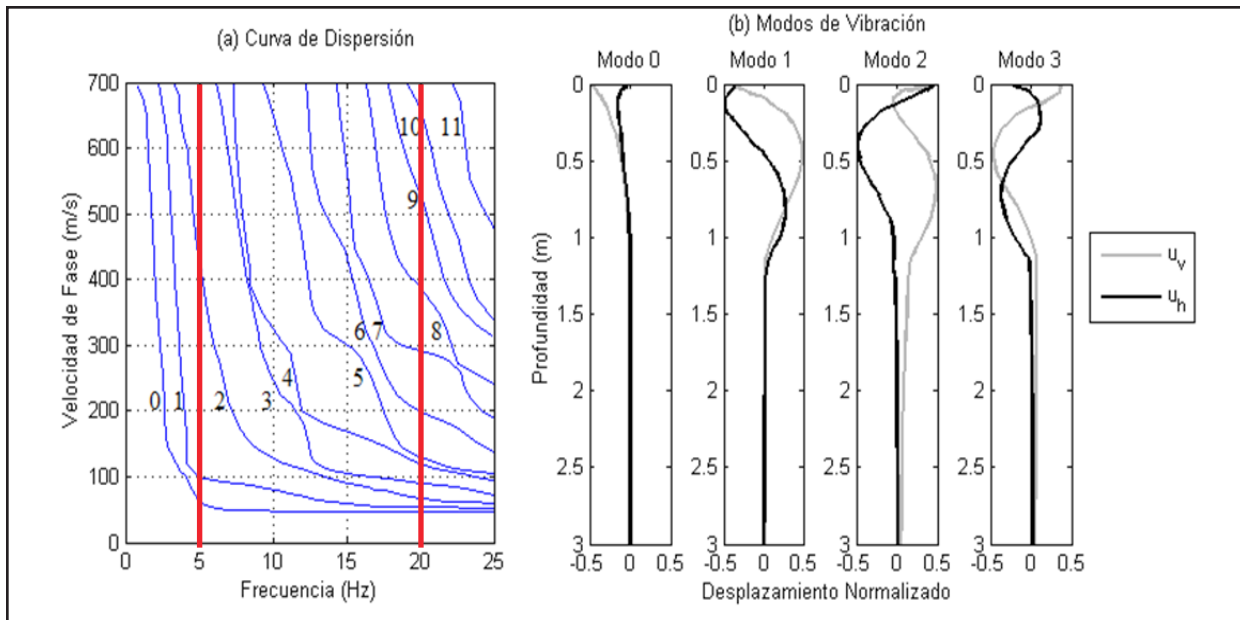


Figura 4.2: Curvas de dispersión en sus distintos modos obtenidas para un modelo de cuatro capas ($h_1 = 5$ m, $V_{S,1} = 50$ m/s, $h_2 = 10$ m, $V_{S,2} = 200$ m/s, $h_3 = 20$ m, $V_{S,3} = 500$ m/s, $h_4 = \infty$, $V_{S,4} = 800$ m/s), y desplazamientos verticales (u_v) y horizontales (u_h) obtenidos para los primeros cuatro modos de vibración a una frecuencia de 15 Hz (Adaptado de Lai, 2005).

4.2. Métodos basados en ondas superficiales (MOS) para estimar el perfil de Vs

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

Por su parte, los métodos pasivos se basan en la medición de vibraciones ambientales. Las vibraciones con una frecuencia superior a 1 Hz tienen su origen en la actividad humana (tráfico, maquinaria, etc.) y se conocen como microtemblores (Bonney-Claudet et al., 2006). Por otro lado, las vibraciones de menor frecuencia están asociadas a fuentes naturales, tales como el oleaje, ciclones o corrientes de viento (Asten y Hendrige, 1984) y son conocidas como microsismos. El supuesto fundamental de los métodos pasivos es considerar las vibraciones ambientales como una superposición de ondas superficiales que se propagan con una distribución aleatoria uniformemente distribuida en todas las direcciones (Tokimatsu, 1997).

4.3. Determinación de la curva de dispersión (CD)

Para la determinación de las características dispersivas de un sitio existen distintos enfoques, los cuales varían en función del tipo de fuente (activa o pasiva) y el número de receptores utilizados. Por ejemplo, el Análisis Espectral de Ondas Superficiales o SASW (Nazarian y Stokoe, 1984), permite el análisis de ensayos realizados con una fuente activa alineada con dos receptores. La ejecución de ensayos con múltiples receptores permite reducir el número de golpes y mediciones que se deben realizar en los ensayos activos, optimizando los tiempos de trabajo. Además, permiten diferenciar

las ondas de Rayleigh de otros tipos de ondas sísmicas que viajan en superficie (Park et al., 1999). Estos métodos hacen posible un análisis simultáneo de los registros en distintos receptores, a través de la transformación de los datos del dominio del tiempo y el espacio, a un dominio diferente que permita identificar peaks y, por ende, las características dispersivas del sitio estudiado sean reconocibles con facilidad (Foti, 2000). Entre los enfoques más utilizados para este propósito se encuentran: el análisis frecuencia-número de onda o f-k (Lacoss et al. 1969), el análisis en el dominio de la frecuencia y lentitud o τ -p (McMechan y Yedlin, 1981), y la transformada propuesta por Park et al. (1999), conocida comunmente como MASW.

A través del uso de arreglos bidimensionales de geófonos, es posible utilizar las vibraciones ambientales para la determinación de las características dispersivas de un sitio, a través de los análisis f-k y MASW. A ellos se deben sumar otros métodos, como el análisis f-k de alta resolución (Capon, 1969) y el método de autocorrelación espacial (Aki, 1957). Este último se basa en el cálculo del coeficiente de autocorrelación espacial, los cuales permiten determinar curvas de autocorrelación para distintos espaciamientos entre geófonos. A través de estas curvas, es posible inferir la curva de dispersión.

Por último, investigaciones en las últimas décadas han demostrado que es posible la ejecución de ensayos con fuente pasiva, utilizando arreglos lineales de geófonos. Esto permite una implementación en terreno más sencilla, siendo muy práctico en zonas urbanas. Dentro de estos métodos, se encuentran la refracción de microtemblores o ReMi (Louie, 2001) y una variante del método MASW, conocida como Roadside MASW (Park y Miller, 2008). Además, de acuerdo a las investigaciones de Chávez-García et al. (2005, 2006), es posible utilizar el método SPAC sobre arreglos lineales. También destacan los trabajos de Hayashi (2008), con el denominado método SPAC extendido o ESPAC.

Sobre el método ReMi, se debe tener precaución con la orientación del arreglo utilizado, ya que la hipótesis fundamental de este método es que la dirección de propagación de los frentes de ondas es paralela al arreglo (figura 4.3a). Sin embargo, cuando los frentes de onda se propagan con una dirección distinta (figura 4.3b), el método interpreta que la distancia recorrida por el frente de ondas, es igual a la separación entre los receptores (d), siendo que la distancia efectiva es distinta (d^*), lo que provoca que la velocidad inferida sea mayor a la real. Si bien existen métodos que intentan corregir este efecto mediante criterios conservadores en la identificación de la curva de dispersión, siempre es recomendable complementar la medición con un arreglo bidimensional.

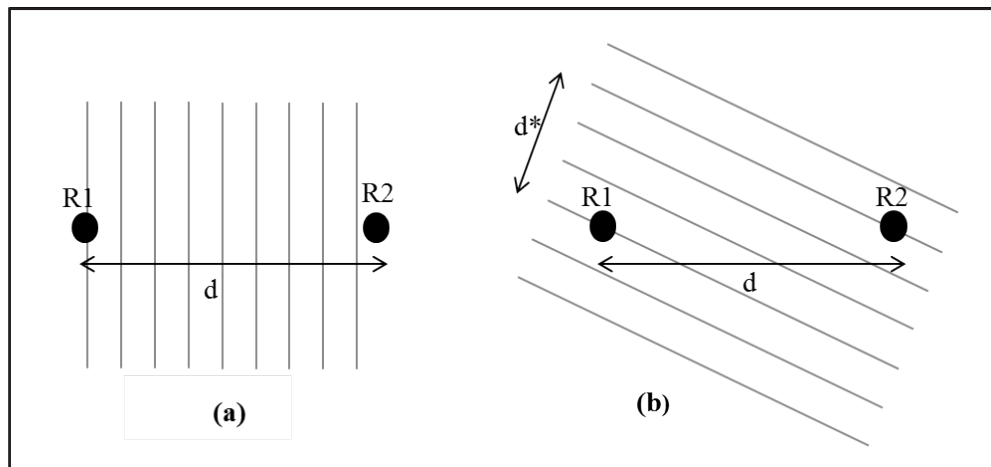


Figura 4.3: Propagación de un frente de ondas plano entre dos receptores (R1 y R2) que forman parte de un arreglo lineal, cuyo espaciamiento es constante e igual a d : (a) Hipótesis respecto a

la dirección de propagación bajo la cual funciona el método ReMi, y (b) Error cometido al no considerar direcciones de propagación distintas a la orientación.

4.4. Estimación del perfil de Vs (inversión)

Para obtener el perfil de Vs se utiliza un proceso de inversión de las características dispersivas del sitio. El objetivo del proceso de inversión es generar un modelo de suelo estratificado horizontalmente, y de propiedades elásticas compatibles con las observaciones de terreno y reflejadas a través de la curvas de dispersión. De acuerdo a lo planteado por diversos autores (Gabriels et al., 1987; Tokimatsu, 1997; Wathelet, 2005), estas curvas dependen principalmente de la velocidad de ondas de corte y son prácticamente insensibles a variaciones de la densidad y velocidades de ondas de compresión con la profundidad. Además, la inversión no es un proceso trivial, ya que la solución no es única, es decir, existen muchos modelos estratigráficos que pueden explicar el comportamiento observado (Foti, 2000; Sambridge, 2001).

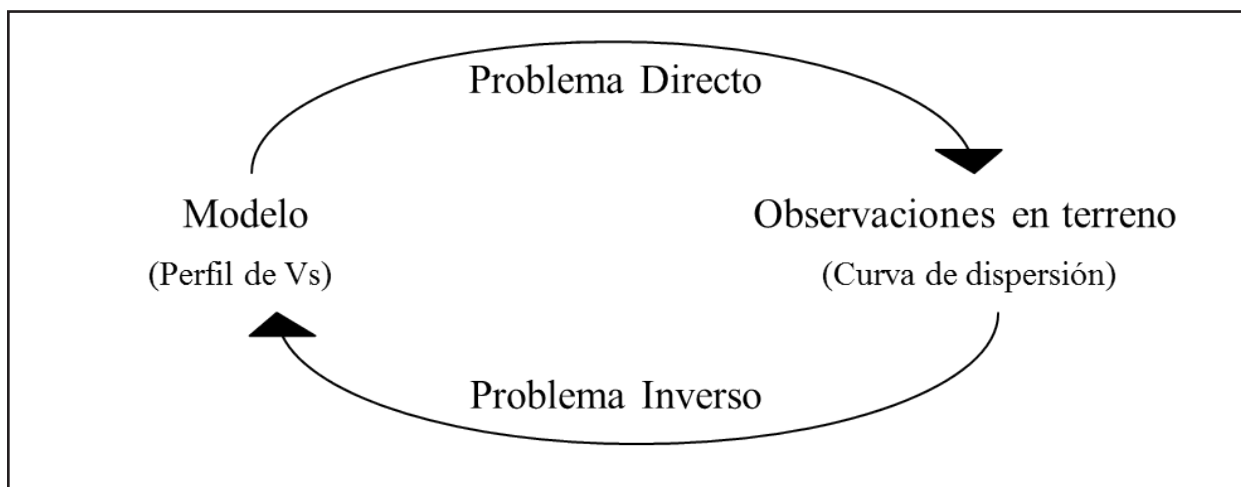


Figura 4.4: Esquema del problema inverso (Modificado de Wathelet, 2005).

Tal como se indica en la figura 4.4, la idea general de la inversión es calcular las curvas de dispersión asociadas a modelos de estratos horizontales de suelo (problema directo), y utilizando algún algoritmo de búsqueda, encontrar el modelo que tenga el mayor ajuste con las observaciones de terreno (problema inverso). Existen dos grandes enfoques para enfrentar el problema inverso: los métodos iterativos o de búsqueda local, y los métodos de búsqueda global.

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

4.5. Resumen

La determinación de perfil de Vs y el resultante promedio armónico, V_{s30} que caracteriza a un sitio, se puede resumir en dos etapas:

- Etapa de adquisición de datos en terreno: Involucra la definición de la geometría de los arreglos de geófonos, del tipo de geófonos, de la fuente a considerar y de la duración de los registros (cantidad de ensayos según terreno).
- Etapa de análisis de datos: Involucra el análisis de los datos adquiridos en terreno mediante algún MOS apropiado para la estimación de la curva de dispersión.
- Proceso de Inversión: Una vez obtenida la curva de dispersión se procede a la inversión para determinar un perfil de velocidades apropiado y calcular el parámetro V_{s30} .

5. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS PARA EL DESARROLLO DE LA EXPLORACIÓN EN TERRENO

5.1. Equipos

5.1.1. Sistemas de adquisición

Los equipos que se pueden utilizar para la ejecución de los MOS pueden clasificarse en:

- **Sismógrafos tradicionales:** Equipo comúnmente usado en ensayos de refracción sísmica (figura 5.1), el cual se compone de un sismógrafo conectado mediante cables a los geófonos que registran las ondas de superficie.
- **Equipos inalámbricos:** Conjunto de geófonos independientes, que pueden ser sincronizados de manera inalámbrica o usar marca de tiempo GPS, para poder combinar los registros simultáneos.

Los sismógrafos tradicionales deben cumplir con las especificaciones detalladas en la norma ASTM D 5777. Al usar equipos inalámbricos, se debe adjuntar las especificaciones técnicas de este equipo, poniendo especial énfasis en que garanticen su aplicación para mediciones de ondas superficiales indicando el error posible de sincronización.

5.1.2. Geófonos

Se recomienda el uso de geófonos que puedan ser fijados al suelo (figura 5.2). En situaciones donde esto no fuese posible, se debe revisar cuidadosamente la instalación de cada geófono, verificando que haya un acople efectivo entre la superficie de apoyo y el geófono. Si el acople superficie-geófono no es eficiente, lo registrado no reflejará fielmente el movimiento del suelo subyacente. En ambientes urbanos, es especialmente importante evitar el apoyo en superficies que puedan tener algún tipo de movimiento, tales como tapas de cámaras de servicios.

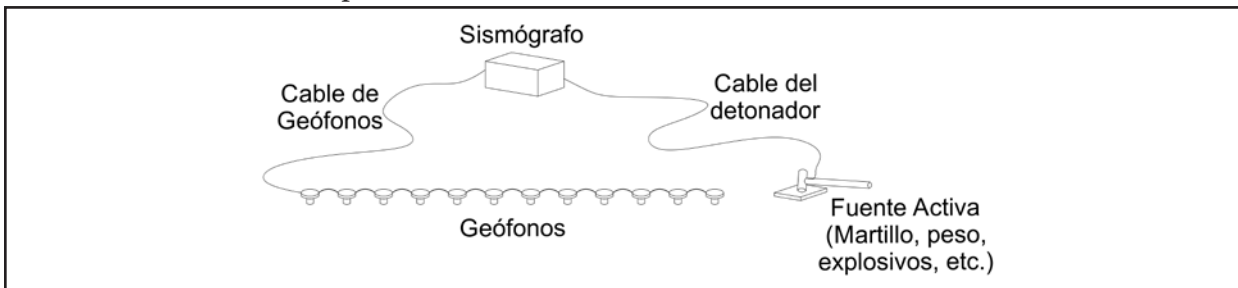


Figura 5.1: Disposición en terreno de un sismógrafo tradicional.



Figura 5.2: Geófonos que pueden ser fijados al suelo (izquierda), o que pueden ser apoyados sobre el suelo o alguna superficie rígida (derecha).

La frecuencia natural de los geófonos debe ser de 4.5 Hz o menor. En casos de suelos blandos, se recomienda utilizar geófonos de frecuencias naturales menores, que garanticen la evaluación hasta los 30 metros de profundidad, es decir, permitan la evaluación de la curva de dispersión hasta una longitud de onda de 90 metros.

Teóricamente, se requiere de un mínimo de dos geófonos para ensayos activos y un mínimo de tres para ensayos pasivos. Sin embargo, distintas investigaciones muestran que el uso de mayor número de geófonos puede incrementar la calidad de los resultados. En el informe correspondiente, se debe reportar el número de geófonos utilizados y la frecuencia natural de cada uno de ellos.

Los geófonos no deben ser movidos durante las mediciones; en caso contrario, si ocurre un movimiento accidental mientras el equipo se encuentre registrando, la medición debe ser descartada.

5.1.3. Fuente activa

Las fuentes activas más típicas son: martillos o mazos, caída libre o guiada de pesos, proyectiles, o explosivos. La selección de alguna de estas fuentes dependerá de la profundidad de exploración que se requiera. En ese sentido, se puede clasificar las fuentes activas en:

- **Fuentes de baja energía.** Fuentes que permiten explorar sólo las capas más superficiales del suelo. Dentro de esta categoría, las fuentes de baja energía más utilizadas son golpes con mazos (figura 5.3a). Se requiere el uso de una placa que reciba el impacto del mazo y distribuya homogéneamente el golpe en la superficie del suelo.
- **Fuentes de gran energía.** Fuentes que garantizan una exploración satisfactoria de los primeros 30 metros o más (ver ejemplo en figura 5.3b). Para ello, deben indicar un espectro de potencia (amplitudes de Fourier), en que se muestre claramente que la energía del golpe excede el ruido ambiental dentro del rango de frecuencias de interés (figura 5.4).



(a)

(b)

Figura 5.3: Ejemplos de fuentes sísmicas: (a) golpes con martillo, y (b) caída libre de peso.

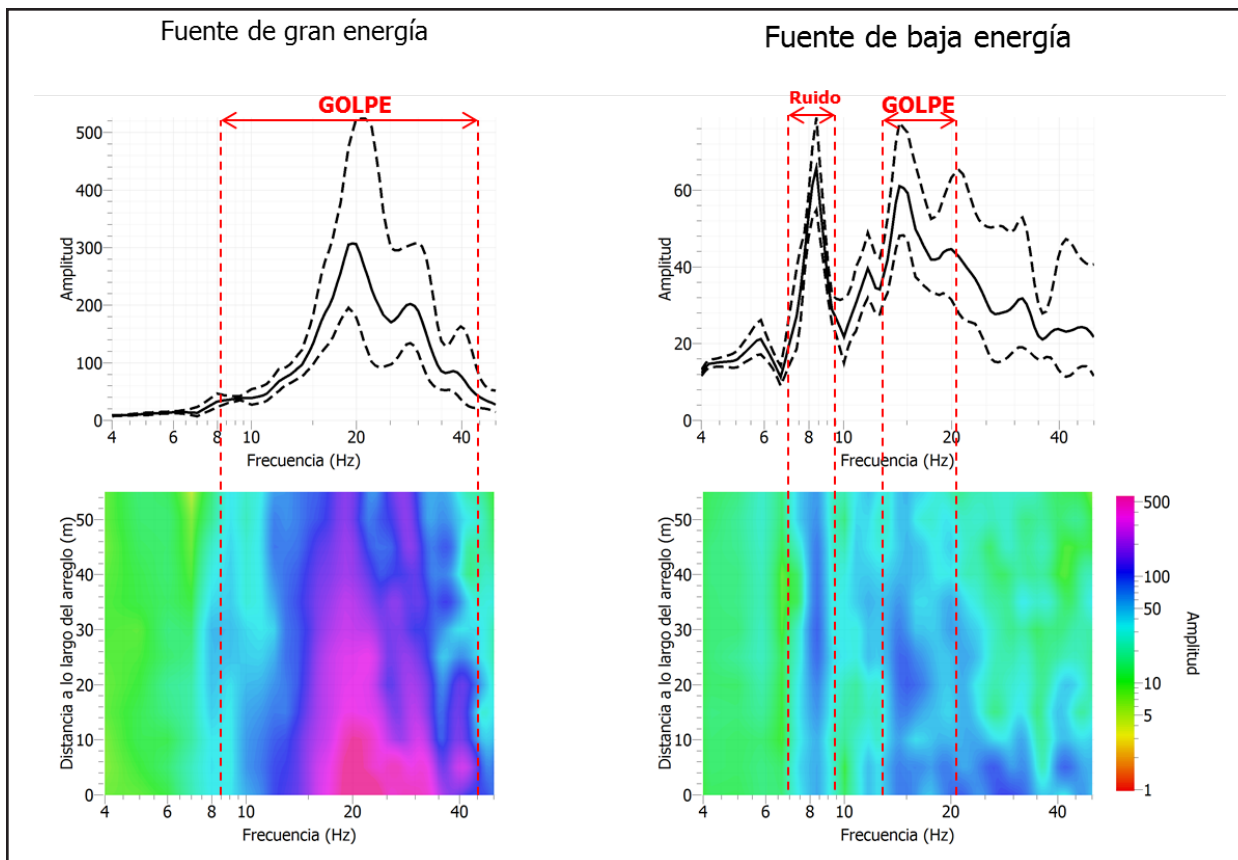


Figura 5.4: Espectro de potencia obtenidos para un mismo sitio con fuentes activas de alta y baja energía. Notar que la energía del golpe se extiende desde 9 Hz hasta sobre los 40 Hz (figura inferior izquierda); mientras que la energía producida por el mazo posee un rango de frecuencias mucho más acotado: sobre 10 Hz hasta 20 Hz.

5.2. Características del sitio estudiado

5.2.1 . Ruido ambiental

El ruido ambiental es fundamental en los ensayos pasivos; sin embargo, en situaciones de alto ruido ambiental, y en particular, aquellos ensayos realizados en calles o calzadas, pueden existir fuentes predominantes en ciertos rangos de frecuencia muy importantes que dificulten la adecuada exploración hasta 30 m de profundidad. En función del ruido ambiental presente se consideran tres situaciones:

- **Ruido ambiental elevado:** permanente circulación de vehículos y personas muy cerca de los arreglos de geófonos o presencia de maquinaria o equipos que generan perturbaciones constantes. Estas situaciones son típicas en los barrios comerciales e industriales y cerca de construcciones.
- **Ruido ambiental bajo o moderado:** baja circulación de vehículos o personas. Esta situación se presenta en zonas residenciales o en zonas rurales cercanas a carreteras o avenidas importantes.
- **Escaso ruido ambiental:** circulación de vehículos o personas muy excepcional o nula. Situación usual en zonas rurales alejadas de calles con tráfico vehicular constante.

Una manera de determinar si se encuentra frente a una situación de ruido ambiental elevado o bajo, se recomienda el uso del espectro de potencia, tal como se presenta en la figura 5.4, de manera de comparar dichos niveles.

En zonas de alto ruido ambiental, se recomienda realizar los ensayos en horarios donde el tráfico sea menor (fines de semana, muy temprano o tarde en la noche), con el objetivo de evitar fuentes de campo cercano. Asimismo, se recomienda alejarse al menos tres metros de las calles aledañas. Las calles ubicadas a menos de 100 metros de los arreglos, deben ser reportados en el informe (ver figura 5.5).

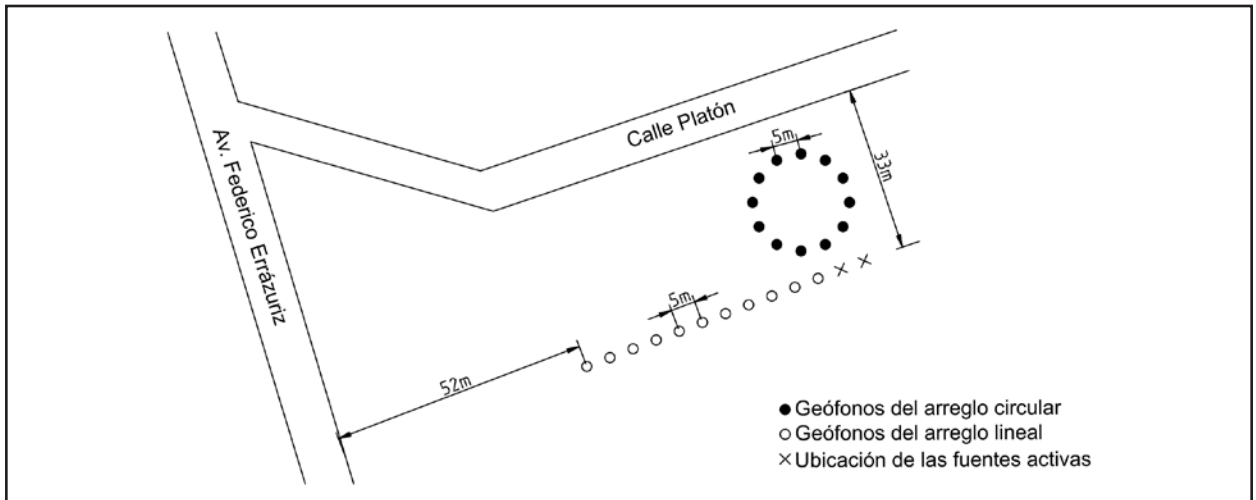


Figura 5.5: Ubicación de los arreglos utilizados. Se incluyen las calles aledañas ubicadas a menos de 100 metros de los arreglos.

En el caso de ensayos activos, se recomienda realizarlo cuando no haya autos circulando muy cerca (menos de 10 metros), o bien optar por horarios de bajo tránsito. Además, se debe evitar la ejecución de ensayos activos, cerca de fuentes que generen ruido constante (como máquinas vibratorias, maquinaria de construcción, etc.). Si no es posible alejarse, se recomienda alinear el arreglo lineal con esta fuente cuya presencia debe ser reportada en el informe final.

5.2.2. Ensayos sobre superficies rígidas

Tal como se indicó en 5.1.2, el acople superficie-geófono es fundamental para registrar ondas superficiales; esto es particularmente complicado en superficies rígidas como pavimentos. En estas situaciones se suelen utilizar geófonos con base plana o apoyos rígidos (“plato” y/o “patas”), así como elementos complementarios que permitan aumentar el acople superficie-geófono (e.g. agregar peso al geófono).

Algunos ejemplos se muestran en la figura 5.6. También es importante chequear que la superficie donde se apoyan los geófonos sea solidaria al suelo subyacente, de forma que se debe evitar el apoyo en cualquier superficie con potencial movimiento (tapas de servicios) o demasiado flexibles (entablados, plataformas, etc.). Además, se debe revisar que efectivamente exista suelo por debajo de la superficie de instalación de los geófonos, de forma de evitar subterráneos o cámaras enterradas de cualquier tipo.

En situaciones de ruido ambiental nulo a moderado, basta verificar con que el apoyo del geófono sea solidario y no vibre fácilmente, por ejemplo, al caminar a un costado. Para ello, es importante verificar que la superficie sea plana o tenga la rugosidad necesaria para permitir este acople.

En situaciones de alto ruido ambiental, el acople superficie-geófono, así como el registro de ondas superficiales, se vuelve más complejo, por ello se recomienda no realizar el ensayo bajo estas condiciones.



Figura 5.6: Mediciones con geófonos sobre superficies rígidas: usando bases planas (izquierda) y enterrados en maceteros (derecha).

5.2.3. Pendiente y sinuosidad del terreno

Cuando los arreglos son montados en una superficie con pendiente, las distancias entre geófonos deben ser medidas en la proyección horizontal, tal como se indica en la figura 5.7. Por otro lado, en terrenos sinuosos, se debe cumplir que la diferencia de cotas (d) sea menor al 10% de la apertura máxima del arreglo (D), tal como se indica en la figura 5.8.

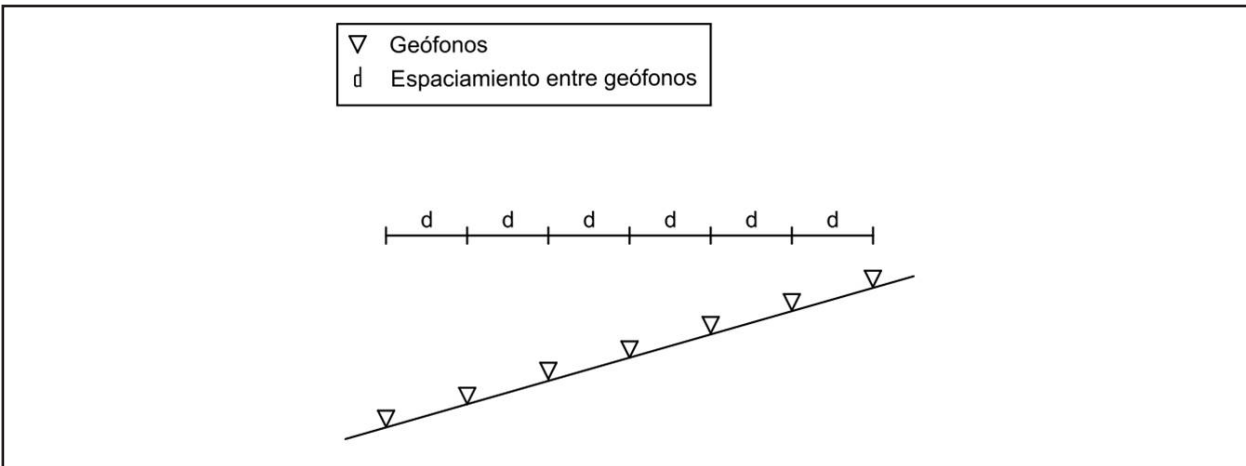


Figura 5.7: Disposición de geófonos en terrenos con pendientes.

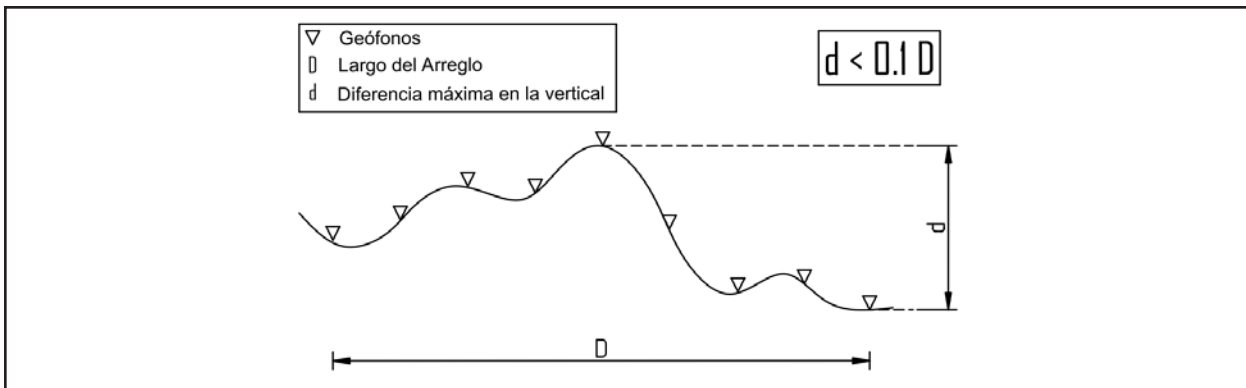


Figura 5.8: Disposición de geófonos en terrenos sinuosos (modificado de www.masw.com).

Es importante mencionar que la mayor parte de los software de análisis comerciales no disponen de la opción para incorporar los desniveles de los geófonos al análisis. Si existe dicha restricción, es fundamental que el arreglo en terreno sea prácticamente horizontal. En la experiencia de los autores, este punto es especialmente crítico en el caso de arreglos bidimensionales con registros pasivos.

5.2.4. Estructuras cercanas

Se debe evitar realizar ensayos sobre estructuras enterradas, aun cuando sean de dimensiones pequeñas. En dicho caso, las dimensiones de estas obras son comparables a las longitudes de ondas correspondientes a las frecuencias más altas, de forma que este tipo de elementos podría afectar especialmente a los resultados de los ensayos activos. Asimismo, se recomienda no realizar análisis pasivos de vibraciones en perfiles aledaños a cortes o cambios abruptos de la topografía del terreno, debido a que las ondas superficiales se ven influenciadas y perturbadas por estas singularidades. Se recomienda alejarse al menos tres metros de canales, pozos y otras estructuras aledañas. Si alguno de estos elementos está presente a menos de 10 m de los arreglos montados, deberá ser reportado en el informe y discutida su posible influencia en los resultados.

5.3. Arreglos

Si bien el D.S. 61 estipula la ejecución de ensayos con arreglos lineales perpendiculares entre sí, cuando la exploración considera ensayos pasivos, es altamente recomendable agregar el uso de un arreglo bidimensional pues ambas orientaciones lineales podrían ser oblicuas a un frente de onda incidente predominante, lo que entregaría resultados erróneos (y no conservadores) en el rango de frecuencias en que dicha fuente predomina.

5.3.1. Arreglos lineales

Al realizar ensayos en zonas de tráfico bajo a alto, los arreglos deben tener una orientación paralela y/o perpendicular a las calles aledañas. La figura 5.9 muestra la disposición que debería tener uno de estos arreglos.

Para ensayos activos, la fuente debe estar ubicada cerca de la fuente de ruido ambiental (calle), de forma que la señal que llega más atenuada desde la fuente activa tenga la menor contaminación posible del ruido ambiente. Esta ubicación permite maximizar la razón entre la fuente y ruido, lo que favorece la calidad de la exploración.

El arreglo lineal utilizado en el ensayo activo debe tener un mínimo de 45 metros de largo (D). Además, el mismo arreglo debe tener un espaciamiento entre geófonos máximo de cinco metros (d). En el caso que se dispongan menos de 10 geófonos, se puede montar un arreglo de al menos 45 metros y un segundo arreglo menor a 45 metros, pero que cumpla el requerimiento de espaciamiento de cinco metros mínimo entre geófonos (d).

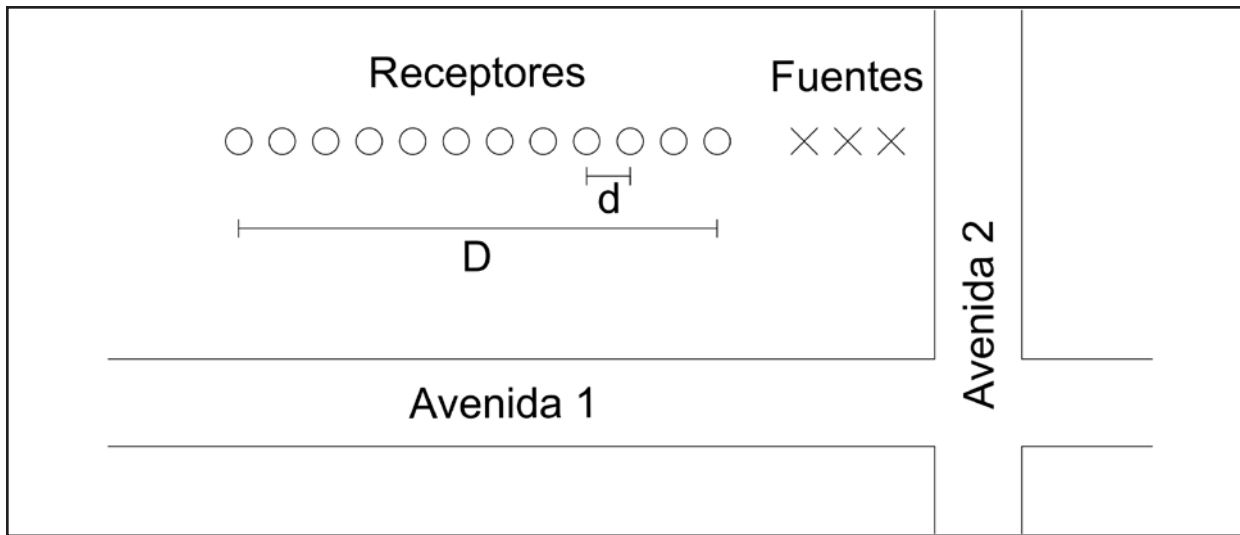


Figura 5.9: Disposición de arreglos lineales con calles aledañas.

5.3.2. Arreglos bidimensionales

La ubicación de los geófonos debe ser medida prolijamente en terreno. En el caso de arreglos bidimensionales, esto implica un mayor cuidado, en particular en zonas donde existan muchos obstáculos presentes (árboles, etc.).

El arreglo bidimensional utilizado en los ensayos pasivos puede tener cualquier geometría, pero debido a que no debiera existir una dirección de muestreo privilegiada para la propagación de los frentes de ondas, se recomienda que el arreglo sea simétrico para los distintos ángulos de incidencia del frente de ondas (Asten y Henstridge, 1984). Esto hace que los arreglos circulares sean, probablemente, los más apropiados (Wathelet, 2005). En el caso de arreglos circulares, éste debe tener una apertura (D) mínima de 20 metros, siempre que en el análisis se utilice el método SPAC (Humire et al., 2014). De todos modos, en suelos rígidos o con contrastes fuertes en profundidad, se recomienda usar arreglos mayores a 30 metros. En el caso de usar arreglos distintos a los circulares (figura 5.10), se recomienda que sean mayores a 30 metros (triángulos, L-shape, etc.).

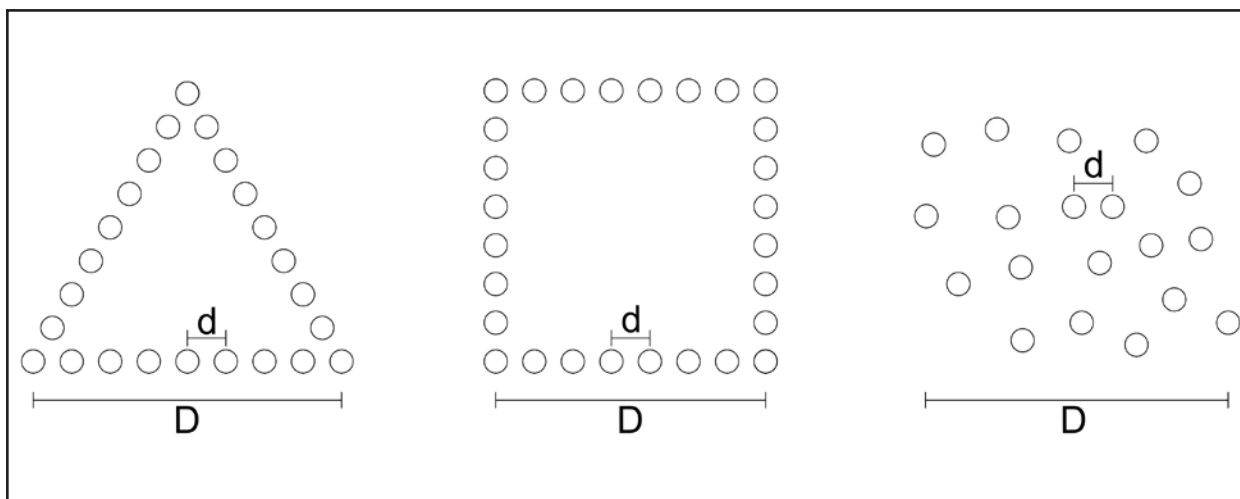


Figura 5.10: Ejemplos de arreglos bidimensionales.

5.4. Procedimiento en terreno

En resumen, se plantean dos metodologías que permiten estimar el perfil de Vs con métodos basados en ondas superficiales:

- Uso de fuentes activas de gran energía que garanticen la exploración satisfactoria de los primeros 30 metros de profundidad.
- Combinación de técnicas activas y pasivas, utilizando arreglos lineales y bidimensionales.

Consideraciones adicionales particulares para ensayos activos y pasivos, se detallan en las siguientes secciones.

6. MÉTODOS BASADOS EN FUENTES ACTIVAS

6.1. Consideraciones según el tipo de fuente

Tal como se indica en la sección §5.1.3, las fuentes sísmicas pueden clasificarse en fuentes de baja energía (e. g. golpes de mazo) y fuentes de alta energía (e. g. caída libre de grandes pesos, explosivos). En este documento, se consideran como fuentes de alta energía aquellas que permitan explorar los primeros 30 metros de profundidad, sin la necesidad recurrir a métodos pasivos.

6.1.1. Fuentes de baja energía

Se recomienda ejecutar disparos entre cinco y 20 metros desde el geófono más cercano, considerando al menos tres distintas distancias de disparo. En situaciones de alto ruido ambiental, se recomienda efectuar al menos cinco disparos en cada distancia. En casos de nulo o bajo ruido ambiental, se podrían considerar menos disparos. En suelos blandos, se aconseja ejecutar disparos adicionales a menos de cinco metros desde el geófono más cercano, mientras que en suelos rígidos se recomiendan disparos adicionales a distancias mayores a 20 metros siempre y cuando el ruido predominante no contamine demasiado las señales en los geófonos más alejados de la fuente.

En general, se recomiendan arreglos con un mínimo de 45 metros de largo; sólo en casos de escaso ruido ambiental, realizando un ensayo con fuentes de baja energía se podría explorar los primeros 30 metros únicamente con el ensayo activo. Si el arreglo y la fuente de gran energía permiten describir la curva de dispersión en el rango establecido en 7.2.1.1, el sólo uso de esta fuente es suficiente para la exploración.

6.1.2. Fuentes de gran energía

Para evitar la saturación de los geófonos más cercanos a la fuente, se aconseja efectuar los golpes entre 10 y 30 metros de distancia desde el geófono más cercano. Si sólo se utilizan ensayos activos para evaluar la curva de dispersión el arreglo debe tener como mínimo 60 metros de largo.

6.2. Análisis de ensayos activos

En terreno, lo recomendable es realizar un análisis preliminar de los ensayos activos efectuados, evaluando la curva de dispersión y la longitud de onda máxima explorada.

En caso de utilizar fuentes de alta energía, la curva de dispersión debe alcanzar los 90 metros de longitud de onda como mínimo para garantizar la exploración de los 30 m. Si este requisito no se cumple, se deberán ejecutar ensayos con fuente pasiva, ya sea sólo con arreglos bidimensionales, o bien con arreglos lineales y bidimensionales. Si se usan fuentes activas de baja energía, se debe verificar que las curvas de dispersión alcancen al menos 30 metros de longitud de onda en situaciones de alto ruido ambiental, y al menos 45 metros en situaciones de escaso a moderado ruido ambiental y, nuevamente, deben ser complementadas con mediciones con fuente pasiva.

En situaciones de alto ruido ambiental, el análisis de ensayos activos se vuelve particularmente complejo. Para reducir la contribución del ruido ambiental en el análisis, y de esa forma incrementar la calidad de los resultados, se recomienda utilizar las siguientes herramientas:

1. Combinación de señales para reducción del ruido ambiental (apilamiento (*stacking*)).
2. Selección de trazas y tiempo de registro a considerar para el análisis.

6.2.1. Stacking

Las señales registradas en ensayos activos suelen estar alteradas por la presencia de vibraciones ambientales (ruido). Para mejorar la calidad de los resultados obtenidos, se pueden combinar las señales obtenidas en distintos ensayos para una misma fuente activa (técnica conocida como apilamiento (*stacking*)), lo que permite reducir el ruido presente en la señal (ver figura 6.1). El apilamiento (*stacking*) puede efectuarse tanto en el dominio del tiempo (figura 6.2) como en el dominio de las frecuencias (ver figura 6.3).

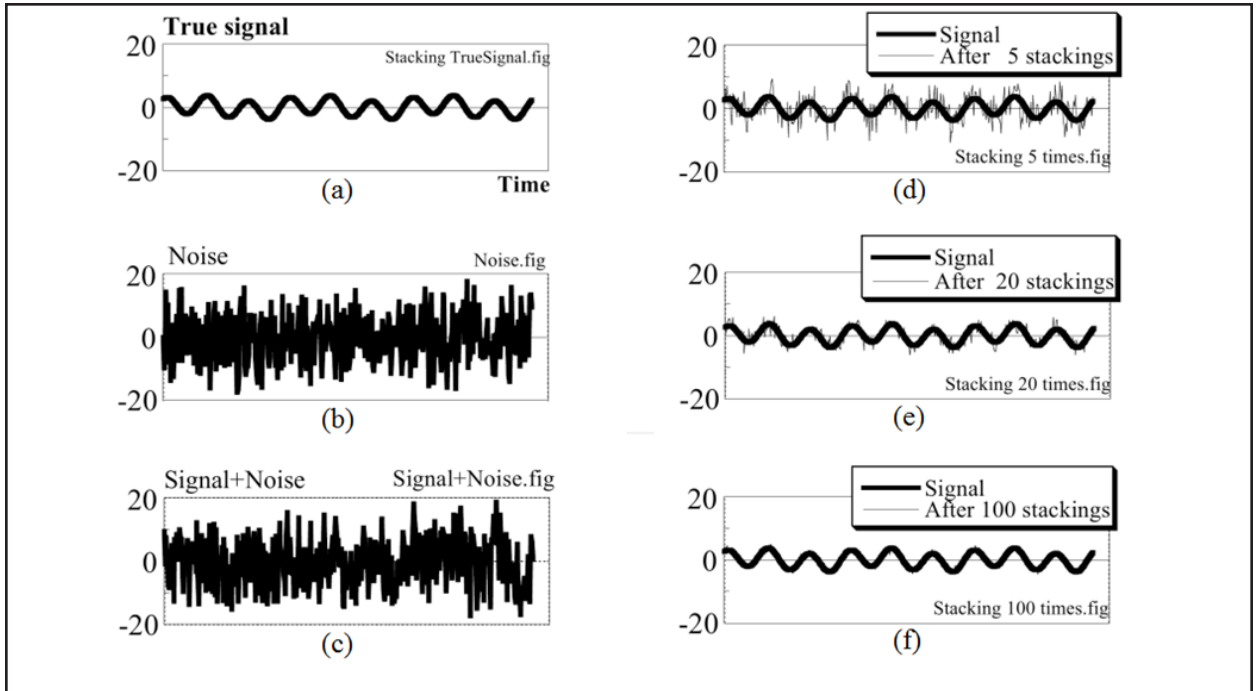


Figura 6.1: Esquema que resume el proceso de apilamiento (*stacking*) (Towhata, 2008).

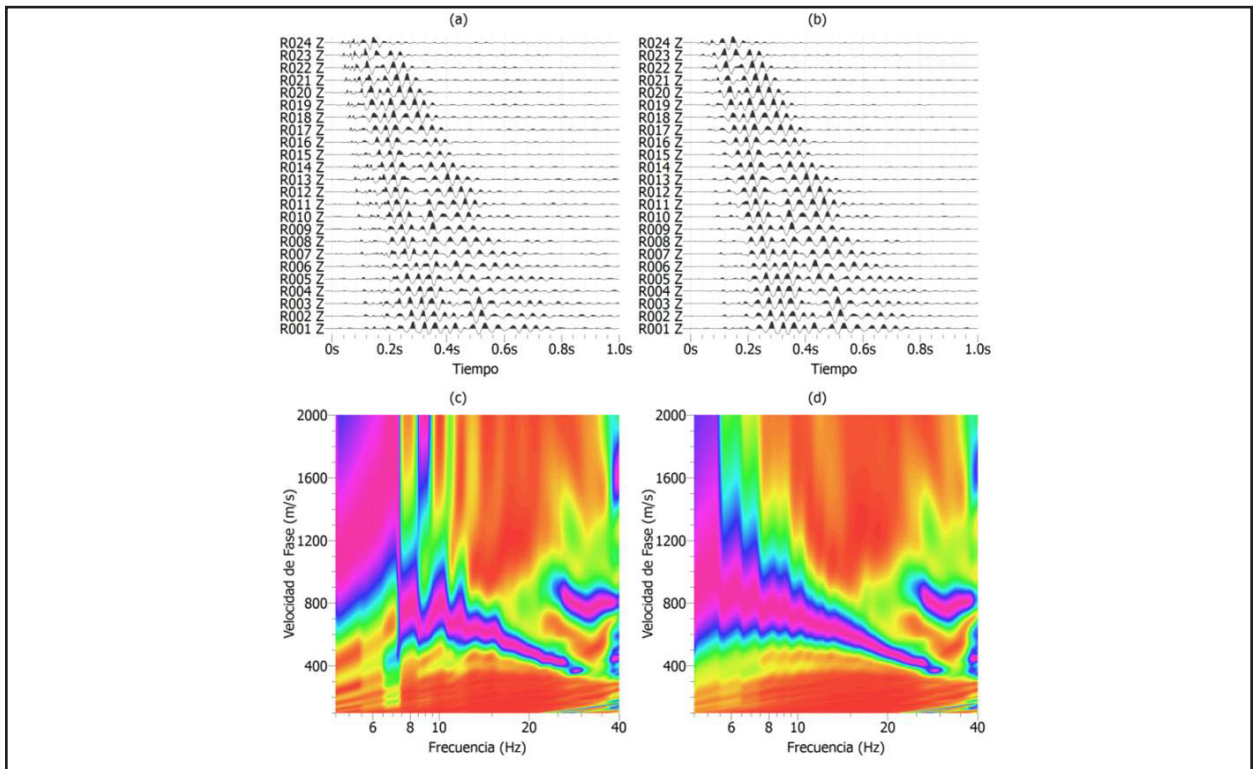


Figura 6.2: Efecto del apilamiento (*stacking*) en tiempo. (a) Trazas obtenidas para un ensayo activo

en una zona urbana, (b) trazas obtenidas tras la combinación de 10 señales registradas en la misma zona y la misma fuente, (c) diagrama de dispersión obtenido con la señal sin apilamiento (*stacking*), (d) diagrama de dispersión obtenido con la señal con apilamiento (*stacking*).

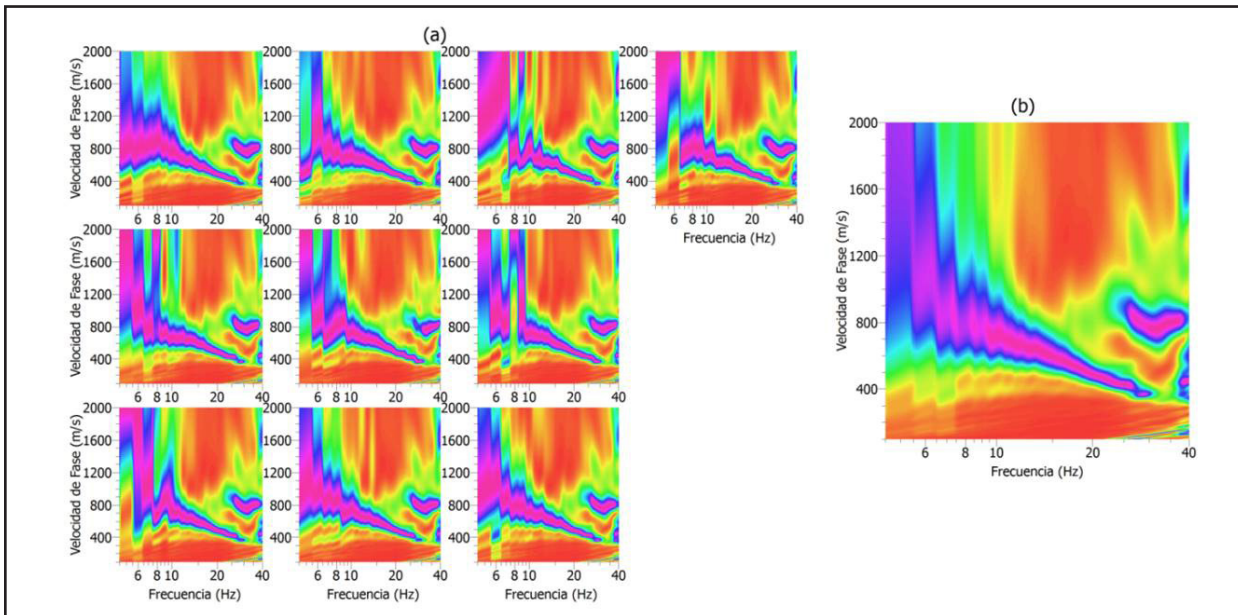


Figura 6.3: Efecto del apilamiento (*stacking*) en frecuencia. (a) Diagramas de dispersión asociados a 10 diferentes disparos, (b) Resultado del apilamiento (*stacking*) en frecuencias de los 10 diagramas de dispersión indicados en (a).

Para el apilamiento (*stacking*) en el dominio del tiempo, es necesario contar un gatillo o *trigger* que inicie el registro del ensayo activo en terreno; de lo contrario, la combinación de las señales no será coherente. Si bien la forma tradicional del apilamiento (*stacking*) en tiempo requiere que la fuente esté ubicada a la misma distancia para todas las señales combinadas, es posible realizar una combinación como la indicada en la figura 6.4.

Por otro lado, el apilamiento (*stacking*) en frecuencias permite combinar ensayos con fuentes a distintas distancias, directamente desde el diagrama de dispersión. El uso de un gatillo es fuertemente aconsejable. Sólo en el caso de condiciones de fuerza mayor (falta del gatillo) y en condiciones de bajo ruido ambiental es aceptable omitir el uso de dicho implemento. En dicho caso, se debe tener extremo cuidado de editar las trazas de forma de no incluir el ruido ambiental previo a la llegada de la señal inducida por el golpe. Esta edición manual en fase de análisis es muy delicada conforme la relación señal/ruido decae.

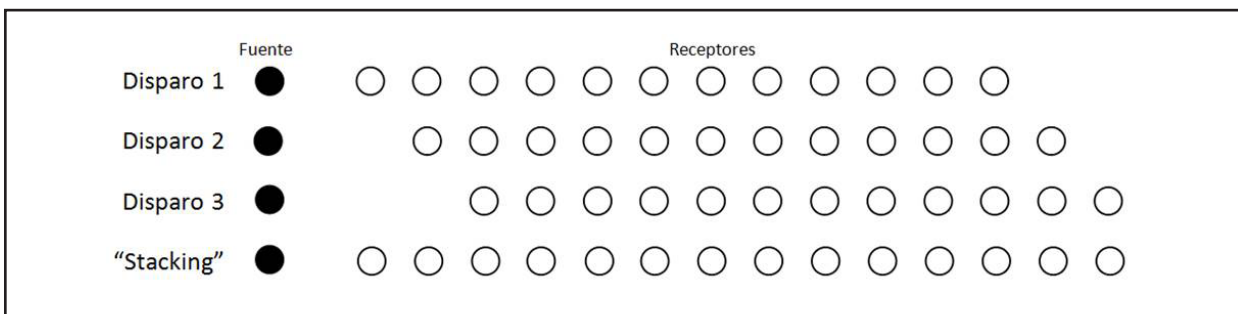


Figura 6.4: Esquema del proceso de apilamiento (*stacking*) en tiempo para señales con distintas distancias fuente-receptor.

6.2.2. Selección de trazas y tiempo de registro a considerar en el análisis

En situaciones de alto ruido ambiental, es probable que la razón señal/ruido en los receptores más alejados de la fuente sea muy baja, ya sea debido al ruido ambiental presente, o por la poca cantidad de energía introducida por la fuente.

Por ejemplo, en la figura 6.5 se indica el registro de un ensayo activo en una zona urbana con bastante ruido ambiental. En esta figura, cada traza ha sido normalizada por el máximo registrado en cada canal de forma de resaltar la forma del golpe por sobre el ruido ambiente. En los últimos cuatro receptores, no es posible identificar el disparo con claridad, ya que la razón señal/ruido es muy baja. Al incorporar estas últimas cuatro trazas en el análisis, no es posible observar concentraciones de energía que permitan identificar la curva de dispersión (figura 6.6a). Por otro lado, al no considerar estas trazas en el análisis, es posible identificar la curva de dispersión entre 16 y 28 Hz (figura 6.6b).

Además, para el análisis de los ensayos activos, sólo se debe considerar el intervalo de tiempo para el cual se identifica el impacto de la fuente activa. En la figura 6.5, se observa que de los 2 s registrados en el ensayo activo, sólo se debería considerar 1 s del registro en el análisis de forma de evitar introducir ruido ambiente. En la figura 6.5 se indica en fondo verde la porción útil para el análisis de todo el registro del ensayo activo.

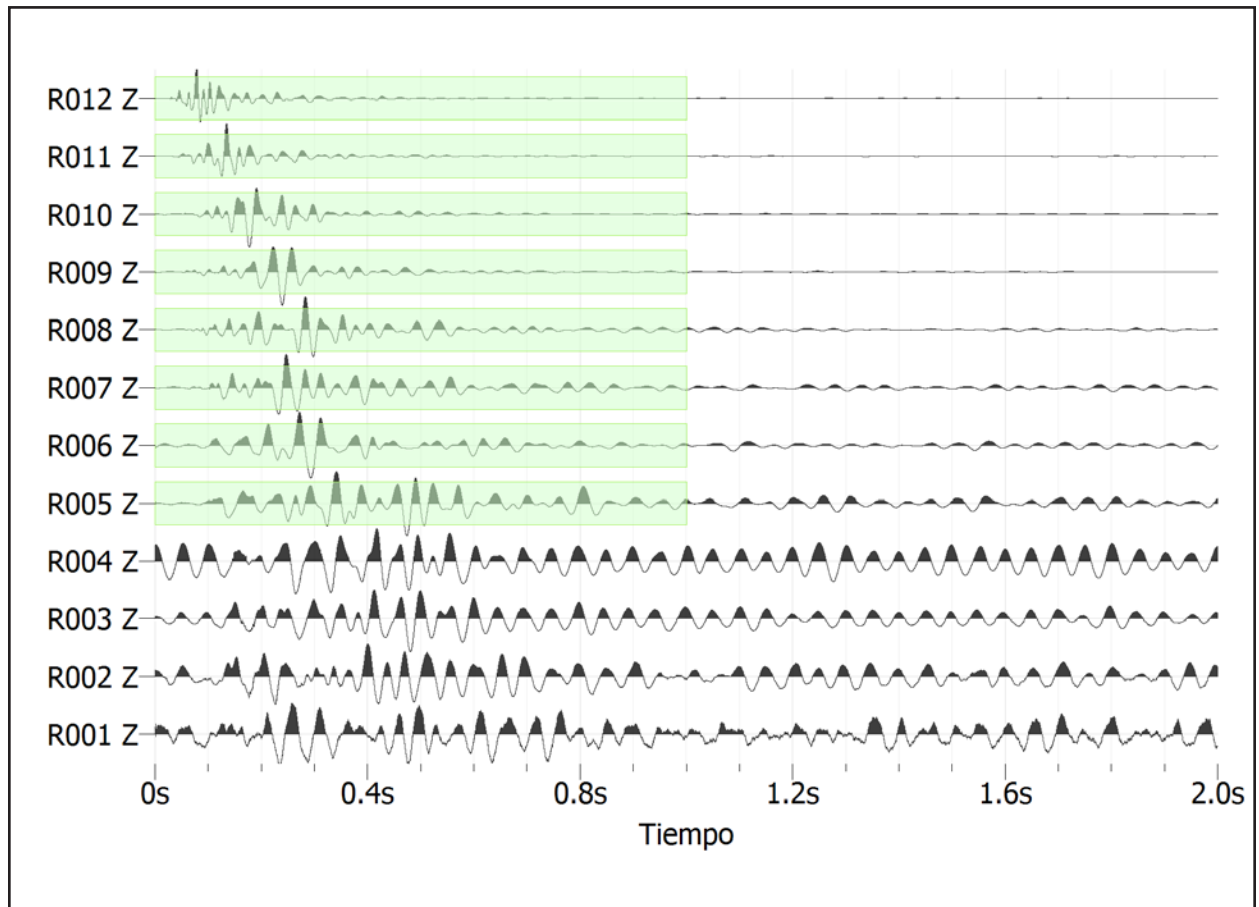


Figura 6.5: Selección de intervalos de tiempo de los registros de un ensayo activo. Las ventanas de tiempo destacadas con color verde corresponden a los intervalos seleccionados para el análisis.

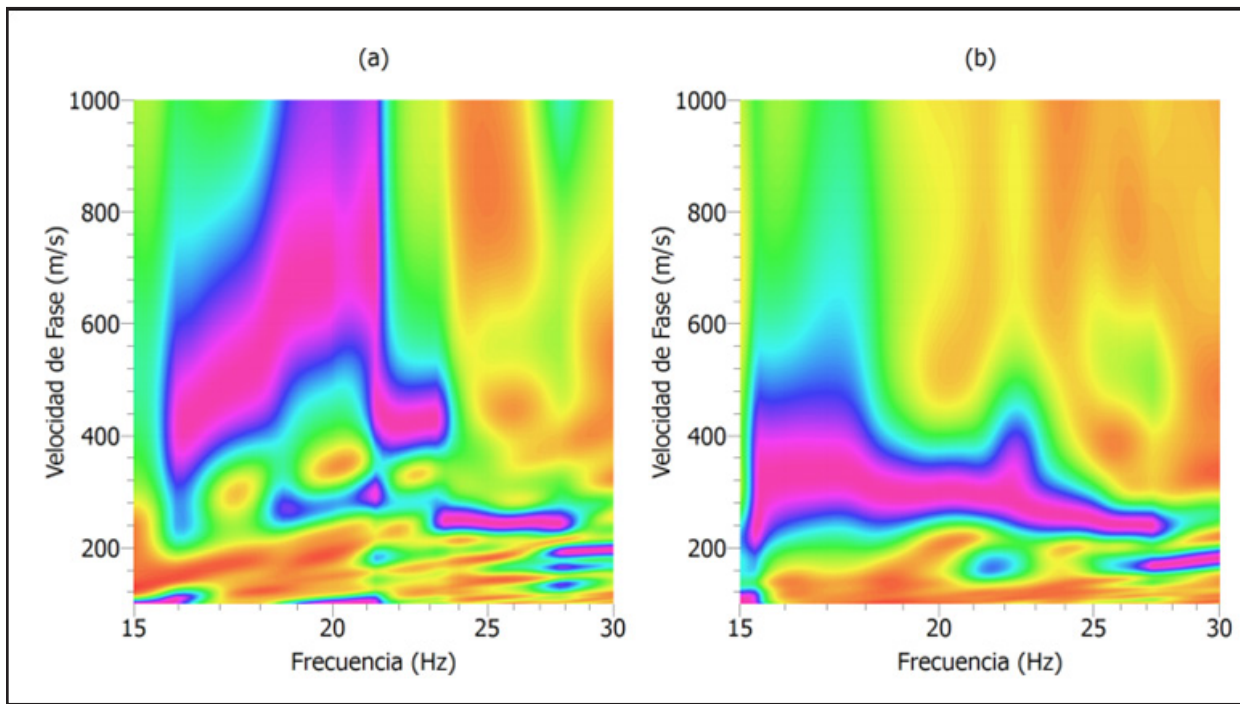


Figura 6.6: Efecto de incorporar receptores lejanos a la fuente que no registran el golpe con claridad.

6.2.3. Normalización de las trazas

De acuerdo a Wathelet (2013), la normalización de señales producto de la atenuación es muy útil para reducir la contribución de los primeros receptores, cuando sus trazas tienen amplitudes muy altas en comparación con las otras. En los diferentes software, la atenuación es incorporada como un factor por distancia (dividiendo cada señal por la raíz cuadrada de la distancia de cada receptor a la fuente) o a través de la normalización de cada señal por su contenido de energía (normalizando por la máxima amplitud registrada en las trazas, o por la máxima amplitud en el espectro de Fourier de cada señal). Wathelet (2012) recomienda el uso de este último enfoque para incorporar la atenuación geométrica.

A modo de ejemplo, en la figura 6.7 se compara un diagrama de dispersión obtenido con el factor de atenuación por distancia, con el obtenido a partir de la normalización según su contenido de energía y el obtenido sin normalización. En este caso, el diagrama obtenido incorporando la normalización por distancia es prácticamente el mismo al obtenido sin normalización, mientras que el normalizado en función de la energía presenta pequeñas diferencias en las frecuencias exploradas más bajas. Si el software utilizado lo permite, se recomienda probar las diferentes normalizaciones, al momento de analizar el ensayo activo.

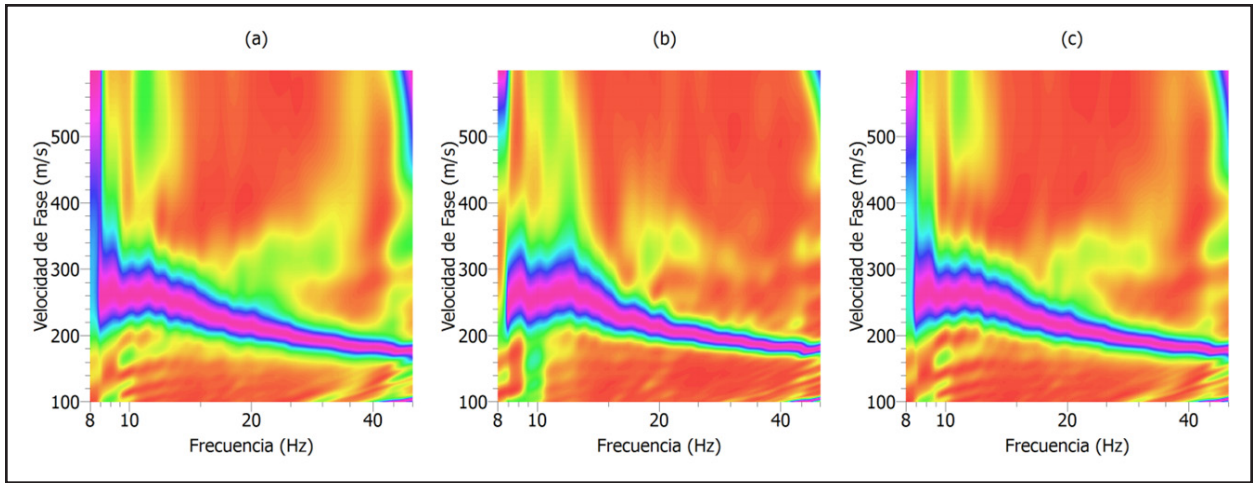


Figura 6.7: Efecto del enfoque usado para incorporar la atenuación sobre el diagrama de dispersión: (a) normalización geométrica, (b) normalización en función del contenido de energía, (c) sin normalización.

7. MÉTODOS BASADOS EN MICROVIBRACIONES (PASIVOS)

7.1. Tiempo de registro y filtros

En los ensayos pasivos, es necesaria la redundancia de las mediciones, para lo cual se requieren registros de tiempo largos. El tiempo que se debe registrar depende de la apertura máxima del arreglo utilizado. Esto se debe a que con arreglos más grandes se busca registrar periodos más largos (longitudes de ondas mayores o frecuencias menores), siendo necesario un tiempo de registro mayor. En general, se recomienda registrar 20 minutos como mínimo, para arreglos cuya apertura máxima es menor a 30 metros y más de 30 minutos para arreglos de mayor tamaño.

En el análisis de ensayos pasivos, las señales registradas son divididas en ventanas de tiempo, tal como se indica en la figura 7.1. En lo posible, y de acuerdo a las opciones presentadas por el software utilizado, se recomienda utilizar ventanas de tiempo iguales 10 veces el recíproco de la frecuencia evaluada (periodo).

Además, las señales pueden ser filtradas, para no considerar aquellas partes del registro que se vean afectadas por frentes de ondas de campo cercano que no correspondan a vibraciones ambientales, así como distorsiones en la grabación. La aplicación de estos filtros dependerá de las opciones del software utilizado. En particular, se recomienda utilizar estos filtros para el análisis SPAC, cuyo supuesto es considerar las vibraciones ambientales son un proceso estacionario en el tiempo y en el espacio.

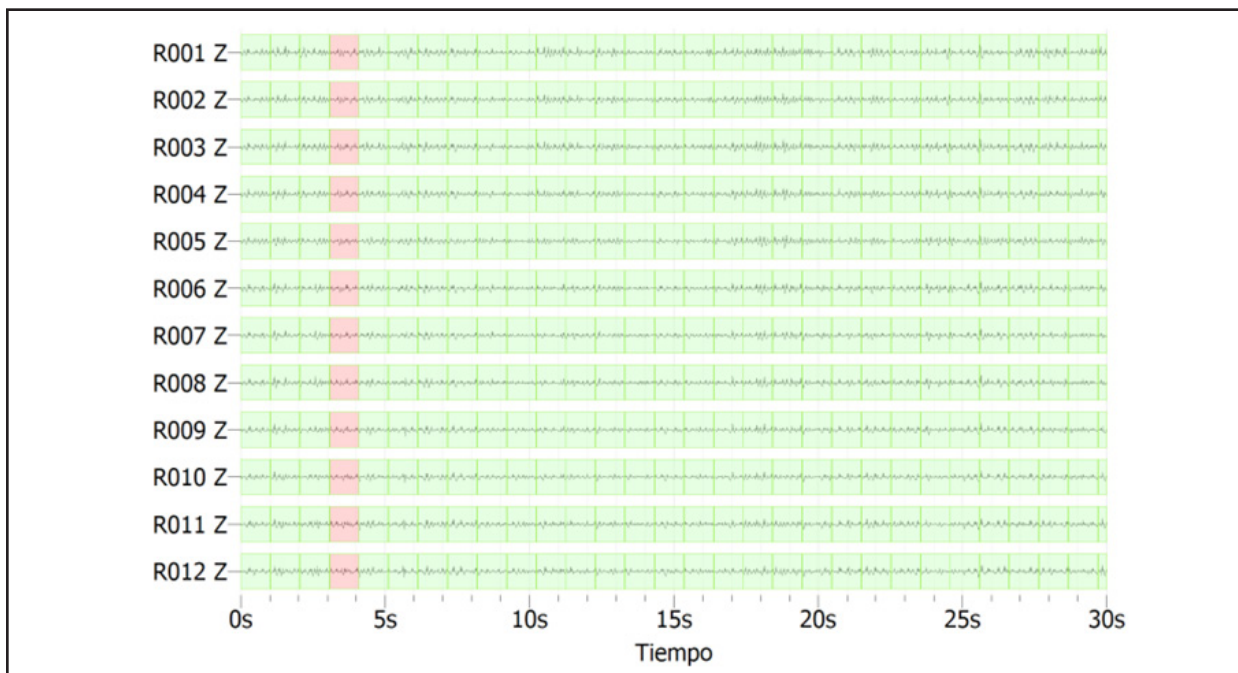


Figura 7.1: Registro de vibraciones ambientales analizado con ventanas de tiempo de 1 segundo para el análisis de la frecuencia de 10 Hz.

7.2. Procedimientos para obtener la curva de dispersión

La determinación de la curva de dispersión dependerá del enfoque de análisis utilizado (descritos en la sección §4.3). En la presente sección, en particular, se definirá el procedimiento para los

métodos de amplitud (f-k, f-k de alta resolución, MASW o ReMi), y el procedimiento para los métodos de fase (ESAC o SPAC).

7.2.1. Métodos de amplitud

El resultado de los métodos de amplitud se representa como un gráfico de velocidad (de fase) en función de la frecuencia, donde se grafican concentraciones de energía que permiten identificar la curva de dispersión (figura 7.2). En resumen, este gráfico (llamado de ahora en adelante, gráfico de dispersión) debe incluir:

- **Límites teóricos de la curva dispersión**, definidos por las características del arreglo de geófonos utilizado. La curva de dispersión sólo puede encontrarse dentro de estos límites teóricos.
- **Concentraciones de energía**, expresadas a través de una escala de colores.
- **Curva de dispersión**, donde se define las velocidades de fase asociadas para un cantidad finita de frecuencias.

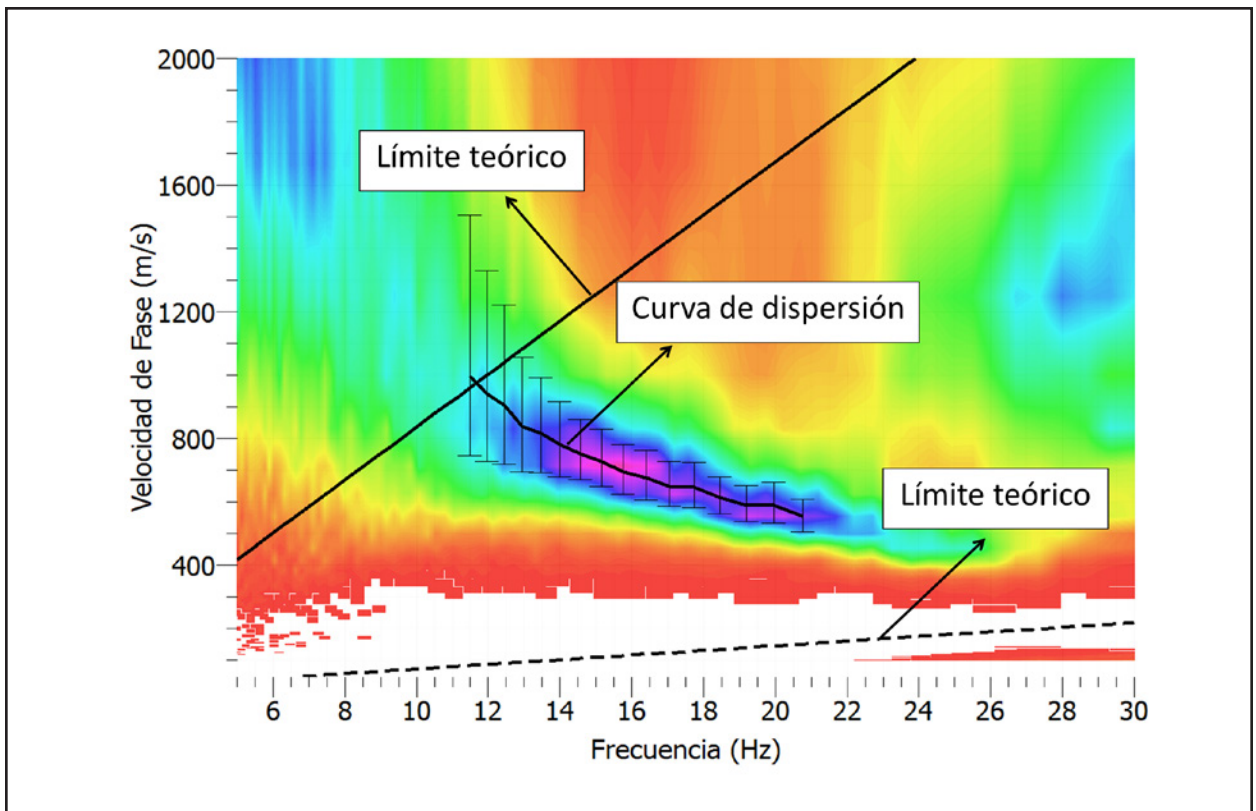


Figura 7.2: Gráfico de dispersión resultante de los métodos de amplitud.

7.2.1.1. Límites teóricos de los arreglos

El tamaño del arreglo y el espaciamiento entre geófonos determina entre qué rango de longitudes de ondas se puede obtener la curva de dispersión. Por esta razón, en cada gráfico de dispersión, se debe indicar cuales son los límites teóricos asociado al arreglo utilizado.

En la figura 7.2 se observan líneas continuas, las cuales definen los límites teóricos entre los cuales la información obtenida por un arreglo es confiable. Estos límites dependen del espaciamiento máximo (D_{max}) y mínimo (d_{min}) entre geófonos, los que definen la longitud de onda máxima (λ_{max}) y mínima (λ_{min}) que se puede explorar. Es importante destacar que D_{max} define la apertura

del arreglo y controlará las frecuencias menores (o longitudes de ondas mayores) que el arreglo será capaz de muestrear.

El cálculo de estos límites no es trivial y se basa en criterios recomendados por diversos autores (por ejemplo, Tokimatsu, 1999; Wathelet, 2004; etc.). En general, los software calculan y entregan límites a partir de las dimensiones (o coordenadas) de cada arreglo (figura 7.3).

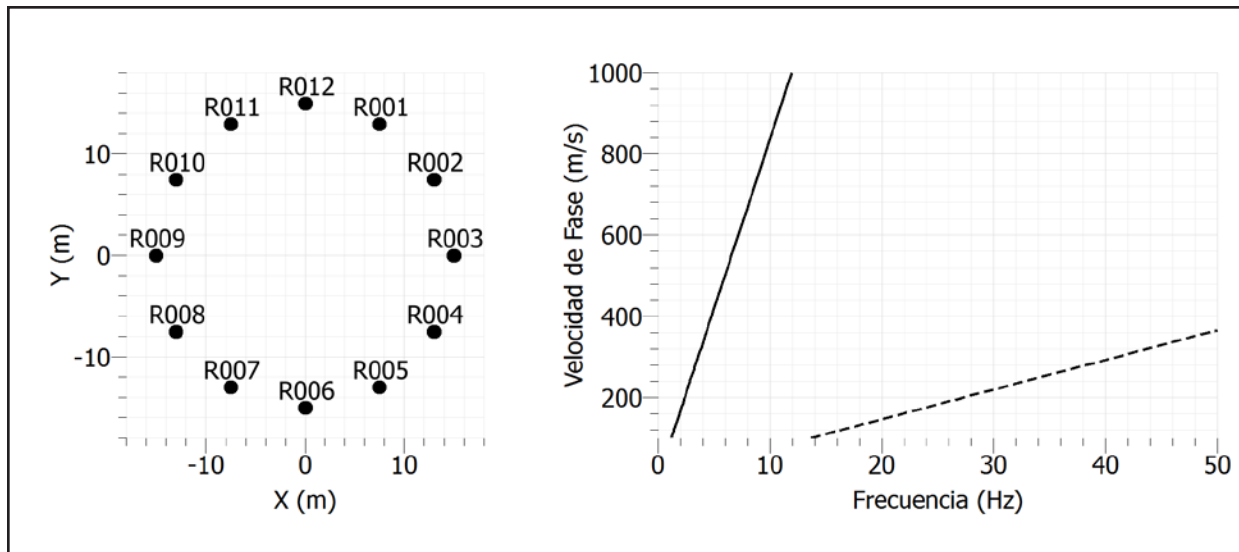


Figura 7.3: Coordenadas de una arreglo bidimensional (izquierda) y límites teóricos impuesto por cada arreglo (derecha).

Park (1999) propone una simplificación para arreglos lineales:

$$\lambda_{min} = 2 d_{min}$$

$$\lambda_{max} = 2 D_{max}$$

En caso de que el software utilizado no entregue estos límites, se pueden utilizar estos límites para arreglos bidimensionales, ya que se trataría de una simplificación conservadora ¹. Todos los gráficos de dispersión obtenidos con métodos de amplitud deben mostrar estos límites en sus representaciones.

7.2.1.2. Concentraciones de energía

Los métodos de amplitud entregan como resultado un gráfico con concentraciones de energía, las cuales permiten identificar la curva de dispersión. En el gráfico de dispersión, y en muchas ocasiones dentro de los límites teóricos, se pueden diferenciar tres zonas (figura 7.4):

- Baja resolución: donde no se pueden identificar zonas de concentración energía.
- Buena resolución: donde hay concentraciones de energía claras, que permiten identificar la curva de dispersión con claridad.
- *Aliasing*: para una frecuencia en particular, se identifican varios peaks de energía. (no confundir con presencia de modos superiores)

¹ Existe una herramienta gratuita, llamada WarranGPS que calcula estos límites a partir de las coordenadas del arreglo, basado en los criterios de Wathelet (2004). Sólo funciona para arreglos 2D.

En el informe se debe indicar, para cada ensayo realizado, la longitud de onda mínima y máxima explorada con buena resolución. Si bien en el gráfico de dispersión es posible observar concentraciones de energía con una aparente buena resolución a la izquierda del límite teórico (figuras 7.4 y 7.5), no se debe considerar esa información, ya que generalmente entregan velocidades sobreestimadas de la curva de dispersión.

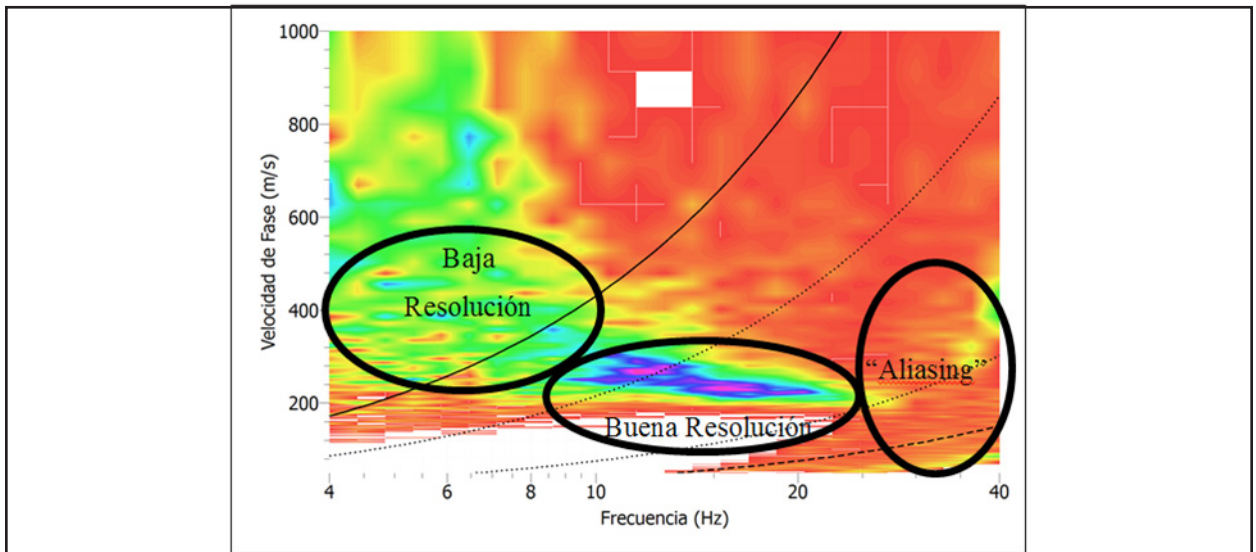


Figura 7.4: Zonas de baja y alta resolución en un gráfico de energía resultante del análisis f-k para un ensayo pasivo con arreglo bidimensional.

7.2.1.3. Curva de dispersión

En general, los software entregan una curva de dispersión calculada estadísticamente (figura 7.5, izquierda), siendo recurrente que ajusten una distribución normal a los resultados obtenidos para distintas ventanas de tiempo (figura 7.5, derecha). En la figura 7.6 se indica la distribución normal ajustada a dicho ejemplo, para una frecuencia de 15 Hz. El promedio y la desviación estándar de esta distribución corresponden a la lentitud (o velocidad de fase) promedio y la desviación estándar de la curva de dispersión para la frecuencia indicada.

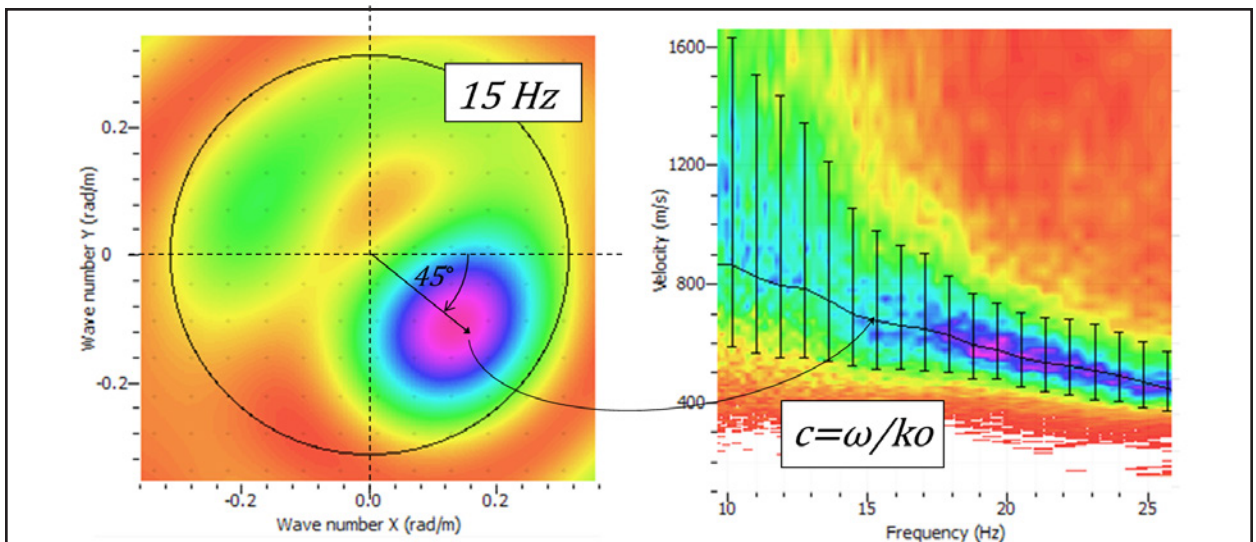


Figura 7.5: Ejemplo del análisis f-k sobre una ventana de tiempo y una frecuencia de 15 Hz (izquierda) para el cálculo de la curva de dispersión (derecha).

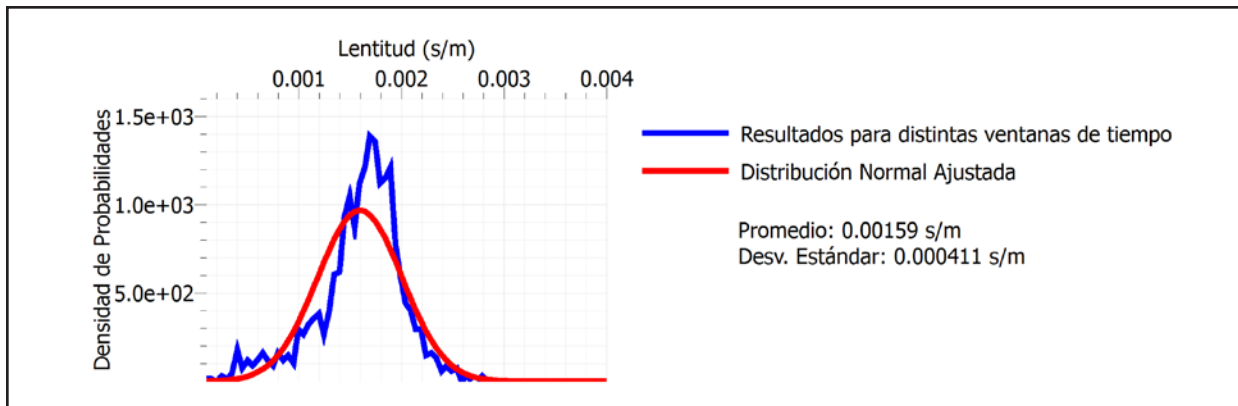


Figura 7.6: Distribución normal ajustada a los resultados obtenidos para distintas ventanas de tiempo.

En el caso de la figura 7.6 se observa que a 15 Hz, el campo incidente viene claramente en una orientación aproximada de -45° con respecto al eje horizontal. Usualmente esta dirección de incidencia cambia en función de la frecuencia (o longitud de onda) analizada y/o el instante de análisis, ello es la razón principal para preferir arreglos bidimensionales por sobre los lineales que sólo muestrean correctamente una única dirección de incidencia.

En general, se recomienda utilizar la curva entregada por el software; sin embargo, es importante ser conservador en la selección de la curva, debido a que los criterios estadísticos no consideran la presencia de modos superiores (bi-modalidades). En dichos casos, se recomienda seleccionar manualmente la zona donde pasa la curva de dispersión. En el informe se debe indicar si la curva de dispersión fue calculada con criterios estadísticos del software, o si fue identificada manualmente.

7.2.2. Métodos de fase

En el presente documento, el análisis se centrará en el método de autocorrelación (SPAC), existiendo otros tales como SASW o de correlación en el tiempo.

7.2.2.1. Curvas de autocorrelación

El supuesto fundamental del método SPAC es que el campo de ondas que componen las vibraciones ambientales es un proceso estocástico y estacionario, tanto en el tiempo como en el espacio. Bajo este supuesto, es posible correlacionar el movimiento observado en los receptores del arreglo que estén separados a una distancia r , a través de un coeficiente de autorrelación ρ (Aki, 1957; Okada, 2003):

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

Donde el coeficiente ρ tiene asociada las propiedades dispersivas (c : velocidad de fase y f : frecuencia) de la estructura del suelo debajo del arreglo de receptores, a través de la función de Bessel de primera especie y orden cero (J_0). Al graficar el coeficiente ρ para todas las frecuencias y un valor conocido de r se obtiene la curva de autocorrelación.

A modo de ejemplo, en la figura 7.7 se indica un arreglo circular de 19.2 m de diámetro, compuesto por 12 geófonos espaciados a 5 m entre ellos. En este arreglo se pueden agrupar 12 pares de geófonos que se encuentren espaciados a 5 m, y para ellos calcular una curva de autocorrelación característica. Del mismo modo, se pueden agrupar seis pares de geófonos con un espaciamiento

de 19.2 m, y calcular la curva de autocorrelación correspondiente.

Ya que las curvas de autocorrelación están asociadas a las características dispersivas del sitio, pueden ser incluidas directamente en el proceso de inversión (sección §8).

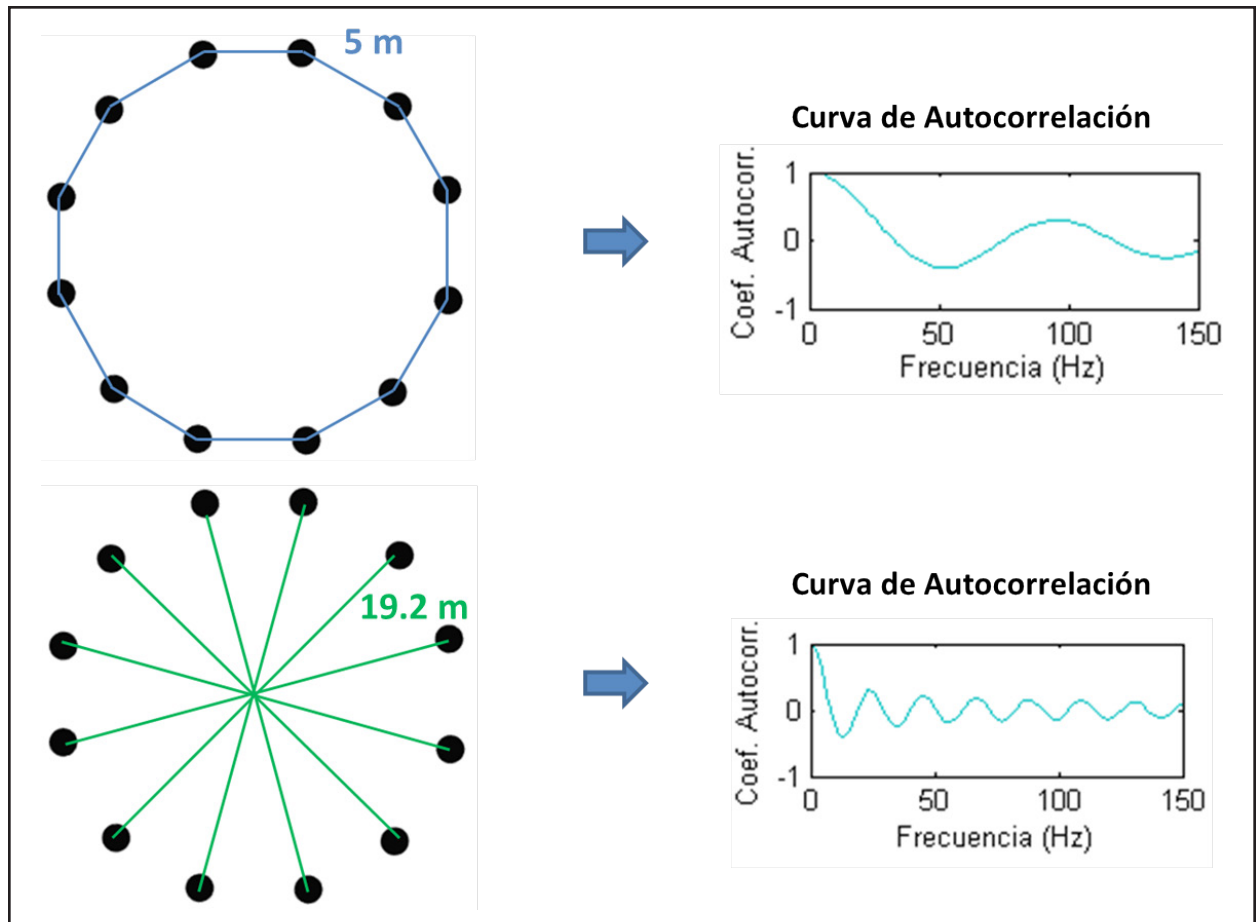


Figura 7.7: Ejemplos de curvas de autocorrelación asociadas a un arreglo circular de 19.2 m de diámetro y 12 geófonos.

En forma análoga a las curvas de dispersión (sección §7.2.1.2), las curvas de autocorrelación empíricas presentan zonas que no deben ser consideradas en el proceso de inversión. En la figura 7.8, se destaca con color negro el tramo de la curva que debe ser incluido en la inversión. Los tramos en color gris no deben ser incluidos por las siguientes razones:

- **Problemas de baja resolución y/o energía:** Para bajas frecuencias se puede identificar un tramo de la curva de autocorrelación con el coeficiente de autocorrelación constante. Esto refleja los problemas de resolución para ese tramo de frecuencias. Además, para frecuencias más bajas puede observarse un descenso en el valor del coeficiente de autocorrelación, lo que está asociado a una escasez de energía de los frentes de ondas registrados para esas frecuencias.
- **Problemas de no unicidad:** Para frecuencias más altas, se suele identificar una curva de autocorrelación irregular, y que no sigue la forma esperada de una función de Bessel.

En términos prácticos, es más simple reconocer estas zonas al observar el gráfico de dispersión asociado a las curvas de autocorrelación, como se ve en la siguiente sección.

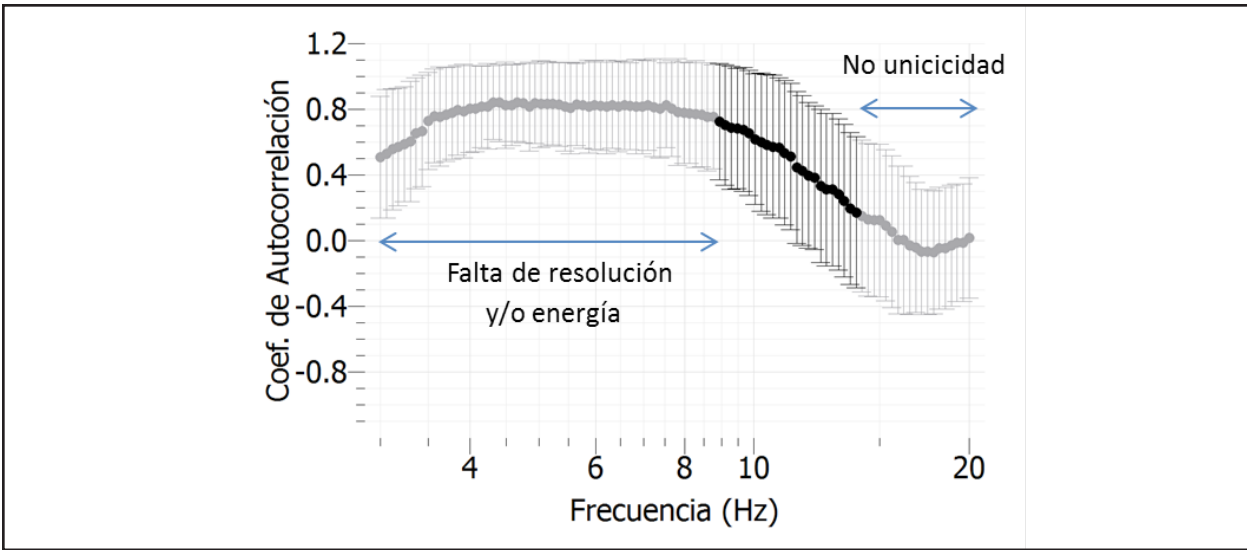


Figura 7.8: Ejemplo de una curva de autocorrelación empírica.

7.2.2.2. Estimación de la curva de dispersión

Para poder comparar los resultados obtenidos con el método SPAC con los resultados de los métodos de fase, es necesario obtener el gráfico de dispersión asociado a las curvas de autocorrelación. A modo de ejemplo, en la figura 7.9 se indican las curvas de autocorrelación obtenidas empíricamente con un arreglo circular de 12 geófonos de 19.2 m de diámetro, mientras que en la figura 7.10 se indica el gráfico de dispersión asociado.

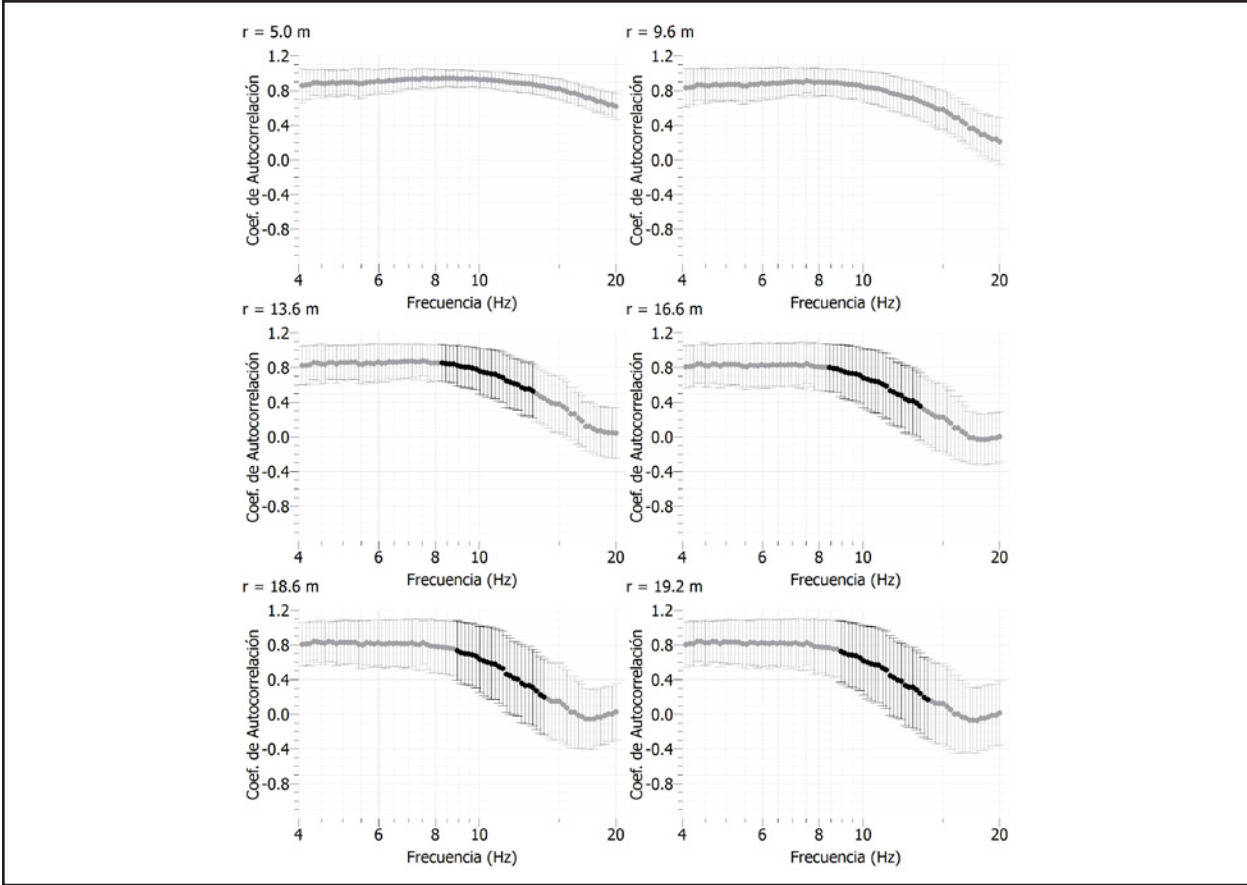


Figura 7.9: Curvas de autocorrelación obtenidas mediante el método SPAC.

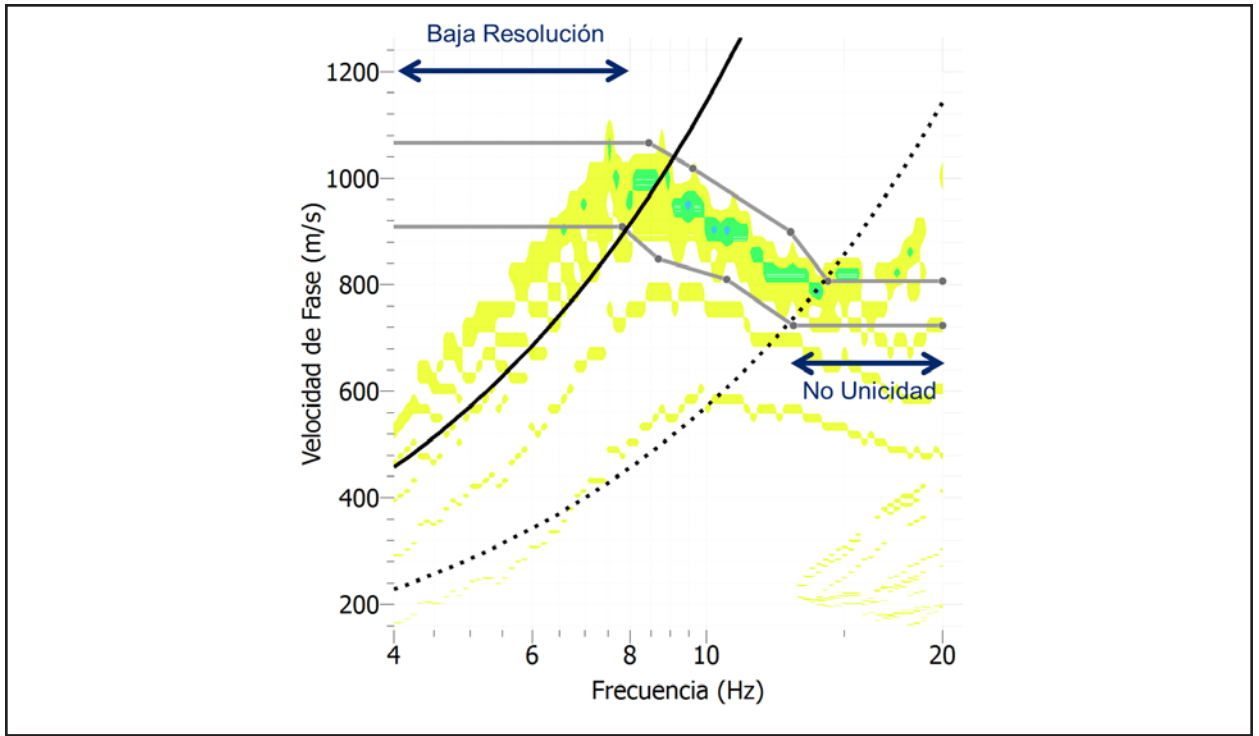


Figura 7.10: Gráfico de dispersión asociado a las curvas de autocorrelación de la figura 7.9.

Las zonas de baja resolución y no unicidad definidas en §7.2.2.1, pueden ser identificadas en la figura 7.10. La primera se refleja en un descenso de la velocidad de fase a medida que se disminuye la frecuencia, mientras la segunda, se refleja en la dificultad para encontrar una única solución que corresponda a la curva de dispersión. Finalmente, la zona encerrada entre dos líneas grises continuas, una línea negra continua y una línea negra segmentada, corresponde a la zona que define la curva de dispersión buscada. Estas dos últimas líneas están dadas por el número de onda máximo y mínimo donde los resultados SPAC definen la curva de dispersión, y no tienen relación con los límites definidos para los métodos de amplitud (sección §7.2.1.1). Los tramos de las curvas de autocorrelación asociados a esta zona encerrada deben ser utilizados en el proceso de inversión (destacados con color negro en la figura 7.9).

Lamentablemente, algunos software no trabajan con las curvas de autocorrelación, y trazan directamente la curva de dispersión sobre los gráficos de dispersión. En este caso, se recomienda tener las mismas precauciones que al trazar la curva de dispersión para los métodos de amplitud (sección §7.2.1.3). En particular, se debe indicar si la curva fue calculada en base a criterios estadísticos del software, o si fue identificada manualmente.

8. ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN GLOBAL E INVERSIÓN

8.1. Curva de dispersión global

8.1.1. Combinación de métodos

En general, se suele combinar las curvas de dispersión obtenidas con distintas técnicas (activas y pasivas), y con distintas herramientas de análisis (f-k, SPAC, etc.) para así aumentar el ancho de banda de las frecuencias exploradas, y con ello la profundidad de exploración. A modo de ejemplo, en la figura 8.1 se indican las curvas de dispersión obtenidas con ensayos activos y pasivos para un mismo sitio. En este caso, los ensayos pasivos se utilizaron arreglos lineales (ESPAC) y circulares (f-k y SPAC).

En el informe se debe reportar el rango de frecuencias explorado con buena resolución por cada una de las curvas de dispersión obtenidas con los diferentes métodos, así como el rango de frecuencias explorado por la combinación de ellas. Además, se debe informar si existen discrepancias entre las curvas de dispersión obtenidas con los diferentes métodos, es decir, si el empalme entre las curvas de dispersión obtenidas con distintas técnicas no fuera satisfactorio. Algunas situaciones que explican eventuales discrepancias entre las curvas de dispersión se resumen en la tabla 8.1; en la misma tabla, se indican acciones correctivas para las situaciones indicadas.

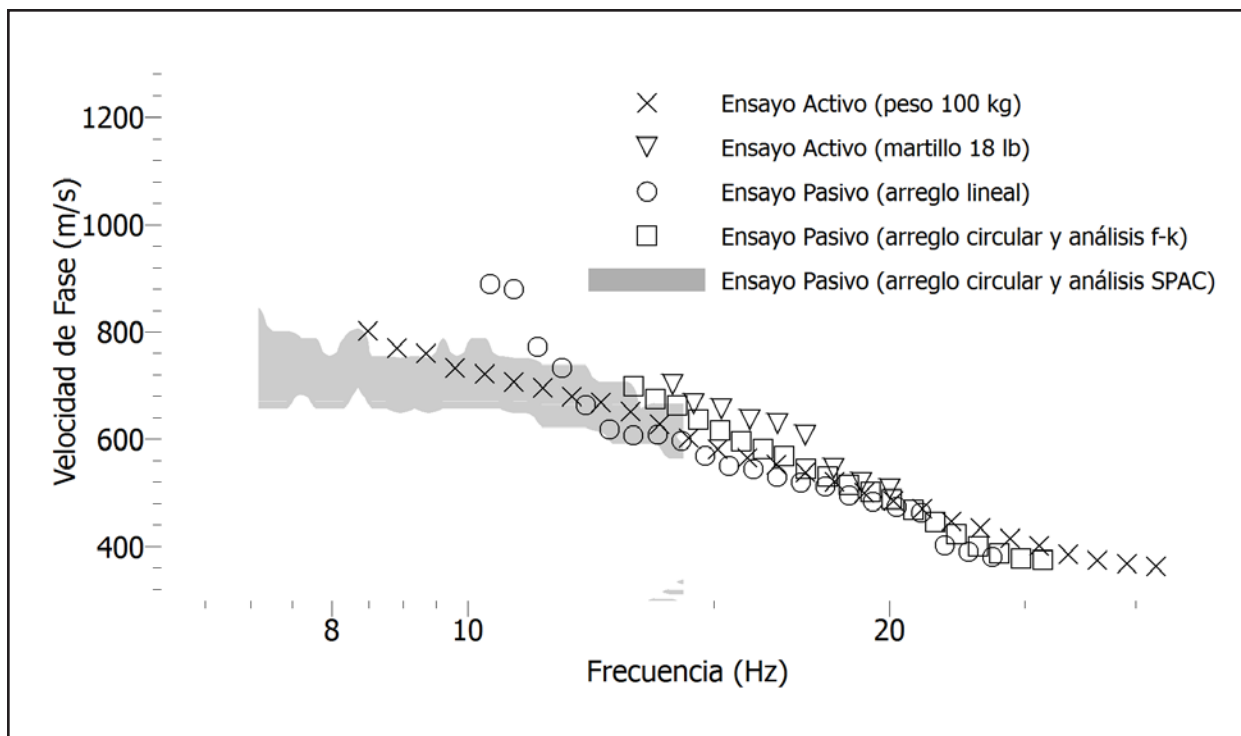


Figura 8.1: Curvas de dispersión obtenidas con diferentes métodos para un mismo sitio.

Tabla 8.1: Situaciones en que pueden existir discrepancias en las curvas de dispersión obtenidas con diferentes métodos y/o arreglos para un mismo sitio.

Situación	Acciones correctivas
Sobreestimación de velocidades de fase en frecuencias bajas. Esto es recurrente en los ensayos pasivos con arreglos lineales.	No considerar en el proceso de inversión, el tramo de la(s) curva(s) de dispersión donde las velocidades de fase son sobreestimadas. Complementar la curva con arreglos bidimensionales para ampliar el rango de frecuencias muestreado.
Variación lateral de las propiedades del suelo, lo que se refleja en diferencias entre arreglos lineales con orientaciones diferentes.	Realizar procesos de inversión independientes para los diferentes arreglos. Las curvas de los arreglos bidimensionales se deben agrupar con las curvas del arreglo lineal con el que presente mayor concordancia.
Presencia de fuentes pasivas muy cercanas a los arreglos. Con ello los frentes de ondas no cumplen con el supuesto de ondas planas, que es fundamental para algunos de los métodos de análisis (f-k, SPAC, etc.).	Se sugiere el uso de filtros para los registros de ensayos pasivos.
Terrenos con topografía irregular.	Se debe medir cuidadosamente las dimensiones de los arreglos, siguiendo lo indicado en la sección §5.2.3. Si es posible, se sugiere incluir las coordenadas de la elevación de los geófonos en el análisis y emplear un software que permita la inclusión directa de esta información.

La curva de dispersión global es el conjunto o el promedio de curvas de dispersión que se utilizarán finalmente en el o los procesos de inversión. No se deben considerar aquellos tramos de las curvas de dispersión que no estén bien definidos, así como aquellos tramos que sobreestimen la velocidad de fase. Si se observan diferencias significativas entre los diferentes arreglos, se deben realizar procesos de inversión independientes para cada arreglo.

La curva de dispersión global debe abarcar, como mínimo, un rango entre 10 y 90 metros de longitud de onda (figura 8.2). Asimismo, no se debe considerar la información obtenida bajo la frecuencia natural de los geófonos. En la figura 8.3, se muestra a modo de ejemplo, casos donde la curva de dispersión global cumple o no los límites teóricos. Si las características del terreno o los resultados de las mediciones no permiten satisfacer este rango de longitud de onda, se recomienda evaluar el uso de exploraciones invasivas (por ejemplo Down-Hole).

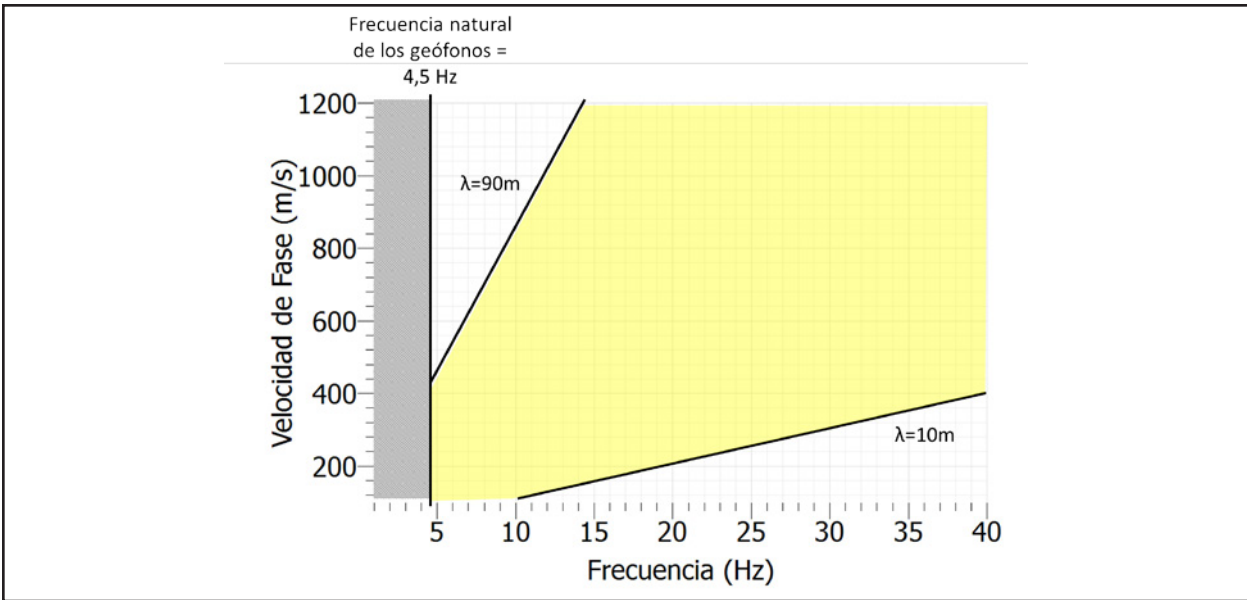


Figura 8.2: Rango mínimo de longitudes de onda que debe ser abarcado por la curva de dispersión global (entre 10 y 90 m de longitudes de onda). Con color amarillo se destaca la zona mínima que debe estar correctamente muestreada. La zona gris corresponde al límite impuesto por la frecuencia natural de los geófonos. La información dentro de esa zona no es confiable.

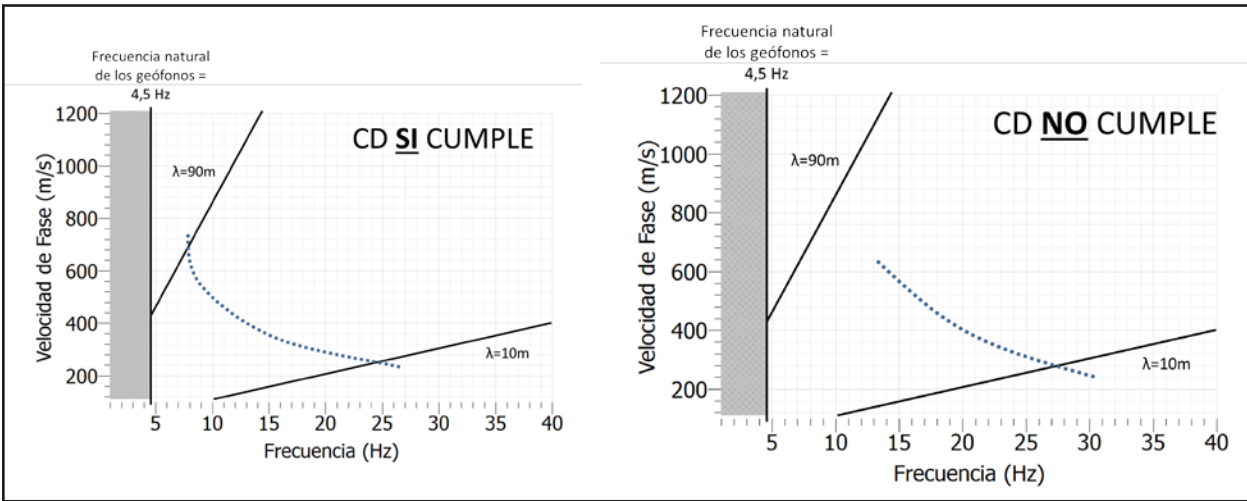


Figura 8.3: Ejemplos donde la CD global cumple (izquierda) o no (derecha) los límites sugeridos en el presente documento.

8.1.2. Incorporación de múltiples modos de la curva de dispersión

En algunas situaciones, es posible identificar modos superiores de la curva de dispersión, los cuales pueden ser incluidos en el proceso de inversión. Esto puede favorecer a una estimación más precisa de los perfiles de Vs. A modo de ejemplo, en la figura 8.4a se indica un caso donde además del modo fundamental (modo 0), se puede identificar con claridad tres modos superiores (modos 1, 2 y 3).

Si los modos superiores no son lo suficientemente claros, es mejor no incluirlos en el análisis. Por ejemplo, en la figura 8.4b se observan concentraciones de energía, que corresponden a un modo superior. Sin embargo, este modo no tiene la resolución suficiente como para ser incluido en el análisis.

Por último, un error recurrente es confundir modos superiores con el modo fundamental. Esto puede traer graves consecuencias en la estimación del perfil de Vs. Este error se analizará en detalle en el Capítulo 9.

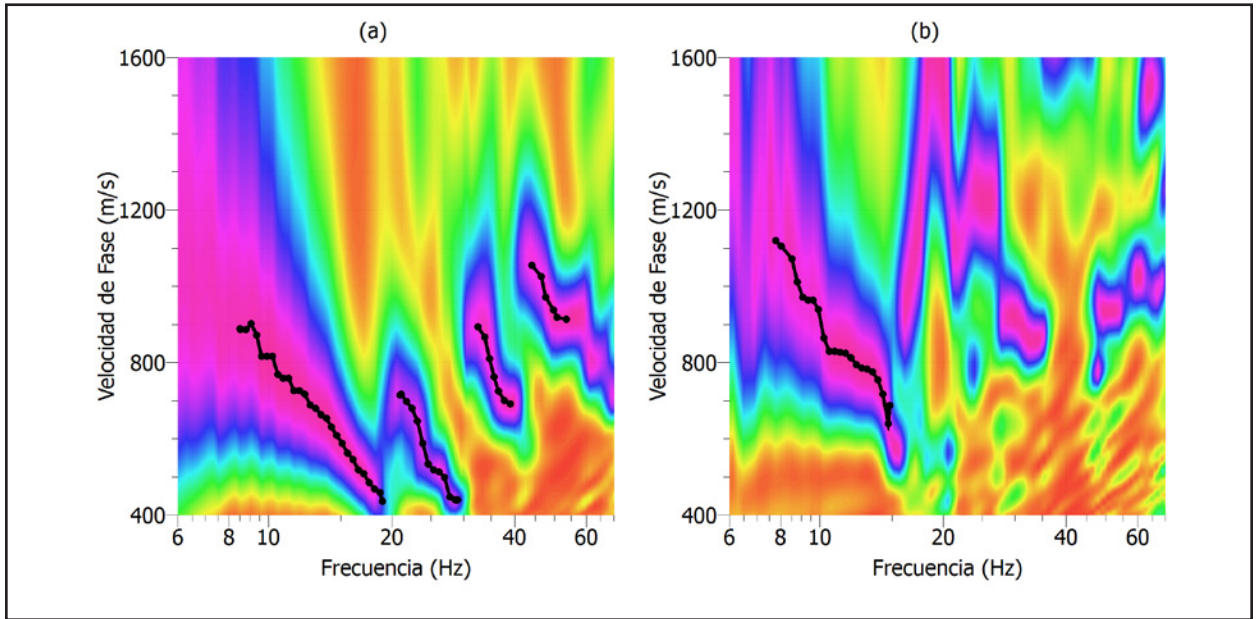


Figura 8.4: Diagramas de dispersión con múltiples modos de la curva de dispersión: (a) con buena resolución de 3 modos superiores, (b) mala resolución del primer modo superior.

Es recomendable usar diferentes normalizaciones al momento de observar la CD y reportarlas, de manera de procurar determinación la presencia de modos superiores, o utilizar otras metodologías que permitan su apropiada identificación.

9.1. Procedimiento según el algoritmo de búsqueda

Existen diferentes algoritmos para efectuar el proceso de inversión y obtener el perfil de Vs buscado. En particular, existen dos grandes enfoques para enfrentar el problema inverso: los métodos iterativos o de búsqueda local, y los métodos de búsqueda global. En el informe se debe reportar explícitamente el algoritmo utilizado. En el caso de emplear algoritmos iterativos, se debe indicar el perfil inicial ya que éste puede condicionar fuertemente el resultado del proceso de inversión.

9.1.1. Métodos iterativos

Los métodos iterativos se basan en la linealización del problema de inversión y utilizan un modelo tentativo inicial compuesto por un número finito de capas de suelo, a partir del cual se comienza un proceso iterativo para encontrar un modelo que se ajuste a las observaciones de terreno. Entre los métodos iterativos comúnmente utilizados, se encuentran el algoritmo de Newton-Raphson, el criterio de los mínimos cuadrados o los métodos basados en gradientes.

Si el problema inverso a resolver es muy complejo y, en particular, si se trata de un problema no-lineal con múltiples mínimos locales, es posible que los métodos iterativos identifiquen un mínimo local como el mínimo global buscado. En otras palabras, el perfil Vs obtenido puede estar sesgado por el modelo tentativo inicial, y no necesariamente corresponda a una buena aproximación del perfil de Vs real. En particular, se recomienda tener cuidado en situaciones donde existan contrastes fuertes de rigidez en profundidad y cuando hay capas de suelos rígidas sobre otras de menor rigidez.

En este tipo de métodos se debe informar el número de iteraciones efectuadas y probar al menos dos perfiles iniciales que eviten la detección de un mínimo local.

9.1.1.1. Algoritmo de búsqueda global

Por otro lado, existen los métodos de búsqueda global que permiten una mayor exploración del espacio de los parámetros del modelo que se ajusta. Estos métodos, a diferencia de los métodos iterativos, no recurren a supuestos de linealidad al resolver el problema ni tampoco utilizan un modelo inicial. Esto les permite diferenciar mínimos locales del mínimo global en problemas con no-linealidad severa. De esta forma, siempre convergen a una solución, pudiendo tener un mayor costo computacional en función de la irregularidad y tamaño del problema.

Asimismo, estos métodos introducen aleatoriedad en la generación de muestras en el espacio de los parámetros. Los principales métodos de búsqueda global son los métodos Monte-Carlo y los métodos de búsqueda aleatoria orientada. Estos últimos permiten un mayor control en la exploración de los parámetros del modelo, así como la identificación de zonas donde haya una mayor probabilidad de encontrar modelos que se ajusten a las observaciones de terreno. Dentro de los métodos más utilizados se encuentran: el método de Reconocimiento Simulado (*Simulated Annealing*), Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*) y el Algoritmo del Vecindario (*Neighbourhood Algorithm*).

Para este tipo de algoritmos se debe informar el número de modelos explorados o visitados y los rangos asignados a cada variable, tal como se discute en la siguiente sección.

9.1.2. Parámetros del perfil de Vs

Los parámetros más importantes para el ajuste de la curva de dispersión a un modelo de capas horizontales de suelo, son las velocidades de propagación de ondas de corte (V_s) y el espesor (H) de las capas.

Se debe informar cuáles son los valores de V_s y H , entre los cuales se exploró para cada una de las capas. Se sugiere explorar para cada capa en un rango de V_s entre un valor muy bajo (por ejemplo, 100 m/s) y un valor muy alto (por ejemplo, 2000 m/s). Estos valores son referenciales, ya que en suelos muy blandos el límite mínimo puede ser menor, mientras que en presencia de roca el V_s máximo puede superar los 2000 m/s.

Se recomienda un mínimo de tres capas para los perfiles de V_s . De todas formas, se sugiere realizar múltiples procesos de inversión, considerando distintos números de capas (entre tres y 15), seleccionando finalmente el que presente el mejor ajuste.

Si existen indicios de capas más rígidas sobre otras de menor rigidez, el proceso de inversión debe incorporar la opción de que los valores de V_s puedan ser decrecientes en profundidad. De todas formas, la parametrización inicial debe ser lo más general posible e ir incluyendo restricciones adicionales sólo si se ven mejoras claras de la curva de dispersión ajustada frente a la empírica. Se sugiere visitar como mínimo 5.000 modelos por parametrización e ir incrementando la cantidad de parámetros gradualmente, comenzando por modelos muy sencillos (tres capas) hasta modelos más completos sólo si ven mejoras significativas del ajuste con respecto a la curva de dispersión de los ensayos.

9.1.3. Resultados del proceso de inversión

El principal resultado del proceso de inversión es el perfil de V_s . Entre los perfiles que se ajusten razonablemente a los datos de terreno, se sugiere elegir aquel que entregue el menor valor de V_{s30} , en conformidad a lo estipulado en el D.S. 61. Además, este resultado debe ser acompañado de la máxima profundidad explorada, que se debe indicar explícitamente y que debe ser mayor a los 30 metros requeridos, así como algún parámetro que cuantifique el ajuste logrado entre las observaciones de terreno y el perfil de V_s obtenido.

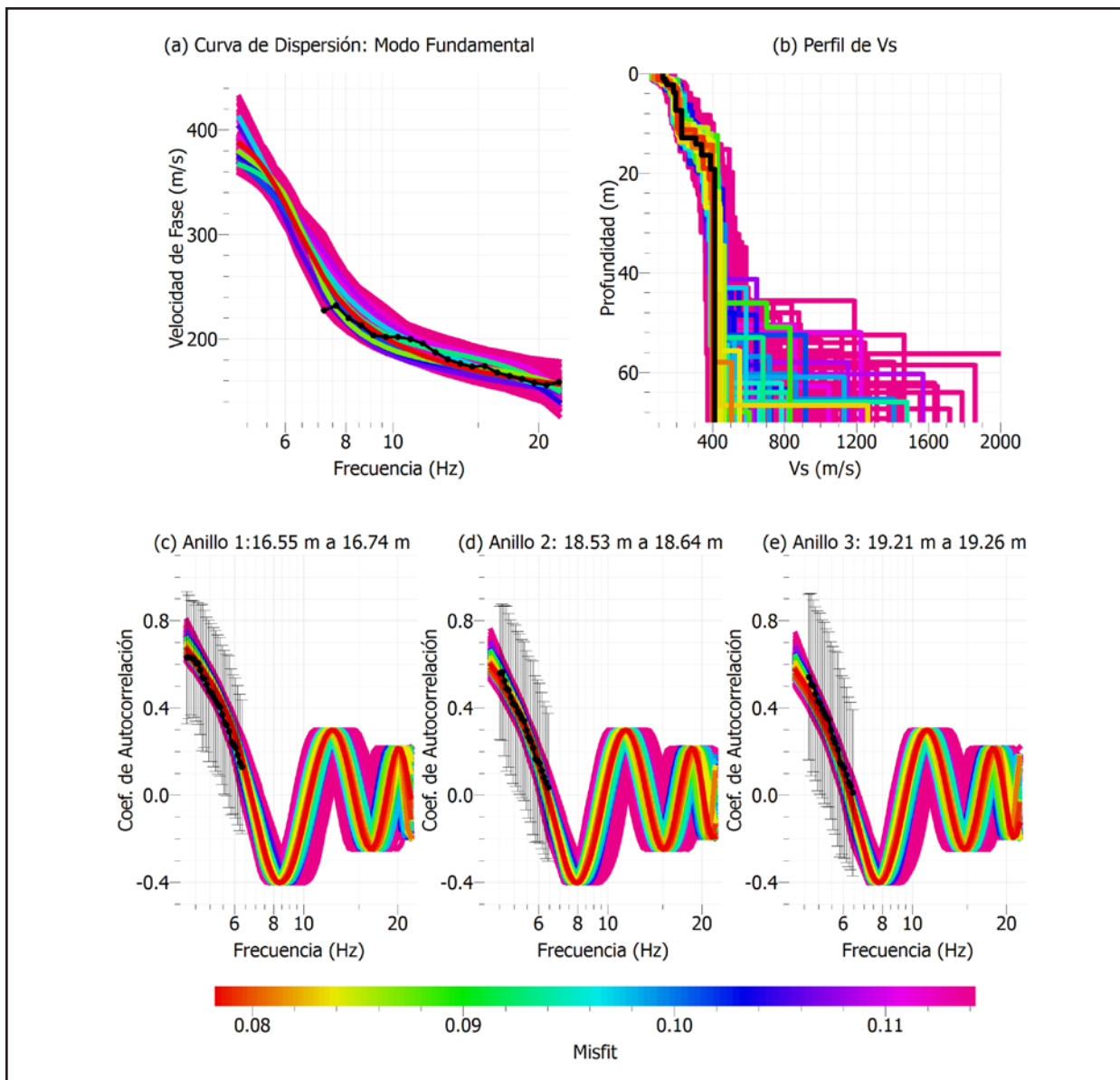


Figura 8.5: (a) Curvas de dispersión obtenidas en el proceso de inversión (curvas de colores), y las curvas de dispersión empíricas (curvas negras), (b) mejores perfiles obtenidos en el proceso de inversión y se destaca con color negro el perfil con el menor desajuste, (c) curvas de autocorrelación obtenidas con el método SPAC, y en negro se indican las curvas de autocorrelación empíricas.

En la figura 8.5, se indican los resultados para un proceso de inversión efectuado con un algoritmo de búsqueda global (Algoritmo del Vecindario). En las figuras 8.5a y 8.5c se observa el ajuste entre las curvas de dispersión y autocorrelación empíricas (curvas negras), con las curvas obtenidas en el proceso de inversión (curvas de colores). Los perfiles de Vs obtenidos se indican en la figura 8.5b, donde se destaca en color negro el perfil con el mejor ajuste a los datos empíricos. A los 45 metros de profundidad aproximadamente, se observa que perfiles con un ajuste similar a los datos experimentales presentan una gran variabilidad entre ellos. Esta profundidad corresponde a la máxima profundidad de exploración. La profundidad máxima explorada es dependiente del perfil de suelo y por lo tanto es un producto natural del proceso de inversión. En otras palabras, exactamente la misma geometría de arreglos con el mismo equipo producirá profundidades de exploración distintas en sitios distintos.

9.2. Evaluación del parámetro V_{s30}

La reglamentación vigente en Chile establece que la clasificación sísmica se realiza utilizando el promedio armónico de las velocidades de ondas de corte para los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}) y un parámetro estático adicional (generalmente el número de golpes corregido en un ensayo SPT). El parámetro V_{s30} se obtiene con la siguiente fórmula:

$$V_{s,30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

Donde h_i y $V_{s,i}$ corresponde al espesor y el V_s de cada capa i , del perfil de V_s con el mejor ajuste a los datos experimentales. En situaciones donde la roca se encuentre dentro de los primeros 30 metros, y no sea posible identificar su V_s , se deberá calcular el promedio armónico de todas las capas que se encuentren sobre ella:

$$V_{s,roca} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

Para efectos de clasificación, el valor de $V_{s,roca}$ es equivalente al V_{s30} . Esto es muy conservador, por lo que se sugiere ejecutar arreglos de mayor apertura que los ya efectuados, para poder acceder al valor de V_s del material más rígido que eventualmente pueda tratarse de roca.

En términos generales, la obtención precisa del valor de V_s de la roca es un proceso complejo que requiere de registros excepcionalmente largos, arreglos con dimensiones muy grandes y bastante experiencia con métodos basados en dispersión de ondas de superficie. Por lo mismo, es preferible reportar el valor de V_s promedio hasta donde haya un claro aumento de velocidad que sugiera la existencia de roca en lugar de calcular el valor de V_{s30} sobre la base de un valor de V_s en roca que puede ser muy poco certero, influenciando fuertemente el promedio sobre los primeros 30 m.

En general, se recomienda un muestreo logarítmico de la curva de dispersión, de manera de que el proceso de minimización ajuste las bajas frecuencias de igual manera que las altas. En todo caso, de acuerdo a la experiencia de los autores, del proceso de inversión en general se obtiene una estimación bastante robusta del V_{s30} ; no así para el perfil de velocidades de ondas de corte, el cual puede variar considerablemente.

10. Errores Frecuentes

Las distintas etapas involucradas en la obtención del perfil de velocidad de ondas de corte están sometidas a una serie de decisiones que pueden afectar radicalmente el resultado final de los ensayos de exploración basados en MOS. Existen varios errores usuales que se pueden cometer a lo largo del proceso, los que se pueden dividir según la etapa de desarrollo en la que se encuentre el estudio. Existen, por lo tanto, errores frecuentes de terreno, así como de procesamiento de datos y de interpretación.

10.1. Errores de terreno

Uso deficiente del espacio disponible en terreno para realizar los ensayos

Los requerimientos actuales (D.S. 61) exigen la realización de la exploración en dos líneas preferentemente ortogonales, con el objetivo de seleccionar el perfil que defina el valor de V_{s30} menor para la clasificación sísmica del sitio. A modo de maximizar la calidad de la exploración, se sugiere **maximizar el largo de las líneas independientes** en el caso de terrenos irregulares de forma de aumentar la longitud de onda máxima que se pueda explorar. A modo de ejemplo, la figura 10.1 muestra el caso de un terreno rectangular, para el cual es una mejor decisión de terreno optimizar el espacio haciendo dos líneas diagonales en vez de líneas perpendiculares.

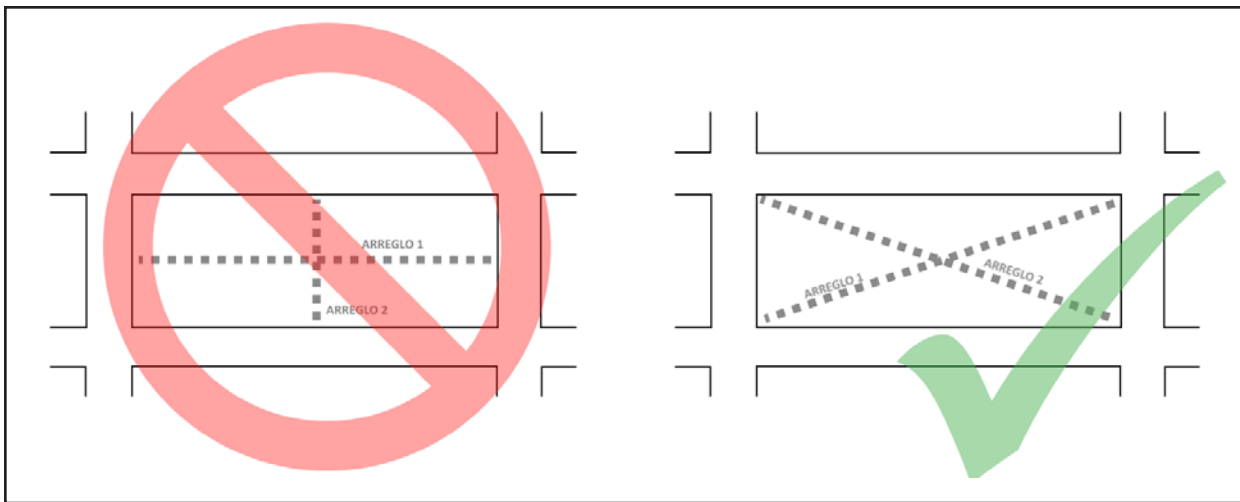


Figura 10.1. Maximización del espacio disponible en terreno, para un espacio rectangular.

Reiteración de golpes de fuente activa por ubicación

Según la fuente de energía y longitud del arreglo, los ensayos activos requieren impulsos (disparos o golpes) a distintas distancias de uno de los extremos del arreglo. Un error común es disparar una o pocas veces en cada ubicación. Sin embargo, se recomienda hacer un mínimo de **cinco disparos por cada ubicación de la fuente**, para buscar que al menos un disparo entregue una curva de dispersión baja en ruido y/o con una buena resolución, además de permitir la aplicación de alguna técnica de apilamiento (*stacking*) (en tiempo y/o en frecuencia), que permita mejorar la relación calidad de la señal frente al ruido ambiental. Este punto es especialmente importante en el caso de ensayos activos en zonas urbanas de alto tráfico. También es importante que el personal de terreno tenga una instrucción mínima que le permita efectuar en terreno análisis preliminar de este tipo de ensayos. De esta forma, se pueden de inmediato descartar y repetir golpes que no entregan información relevante.

Desalinearse el disparo en los ensayos activos

Es importante **verificar la correcta alineación del disparo (posición de la fuente)** con respecto a los geófonos. Si se usa una huincha de medir para definir la ubicación del golpe, se sugiere medir desde el segundo o tercer receptor para asegurar que la ubicación se encuentre en la misma recta que la línea de geófonos, tal como se ilustra en la figura 10.2.

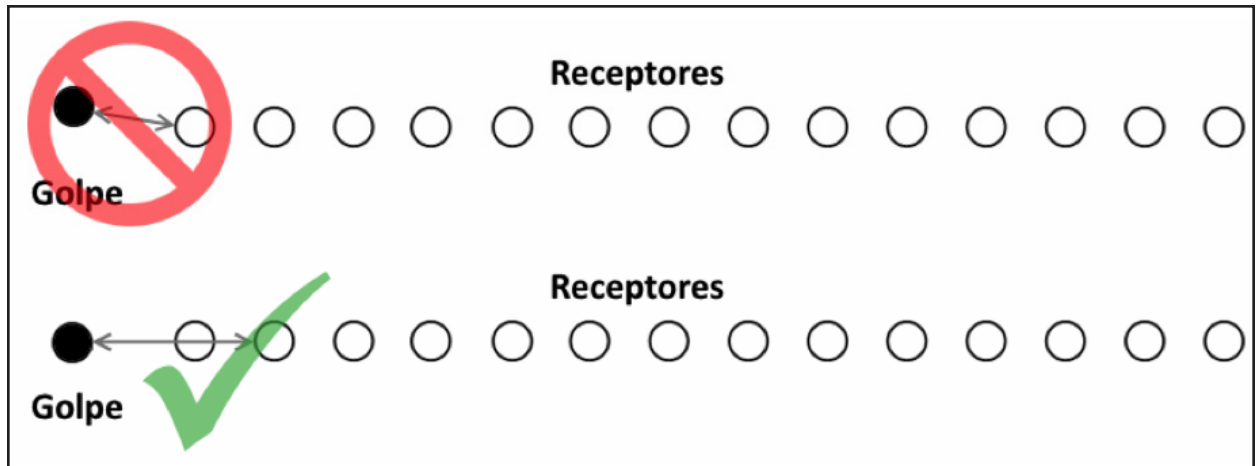


Figura 10.2. Forma de alinear el golpe con respecto a los receptores.

Omitir ensayos pasivos

Según la fuente de energía que se utilice, los ensayos activos pueden ser en principio suficientes para explorar los primeros 30 metros de profundidad de forma confiable, por lo que ensayos pasivos podrían no ser necesarios. Sin embargo, en suelos rígidos o bien donde haya mucho ruido ambiental, los ensayos activos pueden tener poca resolución a bajas frecuencias o bien proporcionar valores de velocidad de fase muy erráticos. Es recomendable **siempre hacer ensayos pasivos** en el terreno de estudio para comprobar la curva de dispersión de los ensayos activos en la zona de frecuencias más bajas. Es siempre útil verificar el empalme y/o superposición de las curvas de dispersión definidas por ambos métodos, de forma de detectar cualquier error que se haya podido cometer en la aplicación de la técnica.

Duración del registro pasivo o interrupción durante la medición e inducción de fuentes de campo cercano

Los ensayos pasivos requieren de un tiempo de medición considerable para identificar longitudes de onda mayores (frecuencias menores). Medir por muy poco tiempo puede resultar en curvas de dispersión inconsistentes con el resto los datos o de muy poca resolución. Se sugiere medir por un **tiempo mínimo de 20 minutos**. Es importante también minimizar las interrupciones a lo largo del ensayo, por ejemplo, pausar la medición por algún motivo, pasar a llevar un geófono, etc. La ocurrencia de alguno de estos eventos significa pérdida de coherencia del registro, por lo que se sugiere recomenzar el ensayo y medir al menos 20 minutos adicionales.

Los métodos pasivos abordados por el presente documento se basan en la hipótesis de que los arreglos son atravesados por frentes de ondas planas. Por lo tanto, los movimientos introducirán vibraciones que violan esta hipótesis. Si la implementación del método no considera filtros para remover este tipo de fuentes, los resultados podrían verse fuertemente afectado por efectos de campo cercano. Un error frecuente es ejecutar las mediciones geofísicas el mismo día que se ejecuta

la exploración mediante calicatas/sondajes. En dicho caso, es recomendable que toda excavación se detenga durante el proceso de registro de ruido ambiental.

En la experiencia de los autores, en muchas ocasiones y sobre todo en zonas rurales, 20 minutos de registro podrían ser insuficientes. Esto ocurre usualmente cuando el ruido ambiental predominante se concentra en un rango de frecuencias inferior a lo que es capaz de registrar el arreglo. En dicho caso, se recomienda efectuar análisis preliminares en terreno de forma de definir si el tiempo de registro ha sido suficiente para definir adecuadamente las propiedades de dispersión del sitio en estudio. Si luego de una hora de registro, no es posible reconocer claramente alguna curva de dispersión en baja frecuencia, se sugiere incrementar la energía de la fuente activa y concentrarse en alcanzar los límites de exploración sugeridos en la figura 8.2 por dicho medio.

Mediciones cercanas al mar

El mar es una fuente extremadamente importante al momento de realizar mediciones de ondas superficiales. Se sugiere realizarlas en forma perpendicular a la costa, es decir, alinear el arreglo de geófonos apuntando hacia el mar, de manera que utilicen la energía proveniente de éste.

Pendiente y sinuosidad del terreno

Tal como se mencionó en las secciones anteriores, cuando los arreglos son montados en una superficie con pendiente, las distancias entre geófonos deben ser medidas en la proyección horizontal, de acuerdo a como se indicó en la figura 5.7. Por otro lado, en terrenos sinuosos, se debe cumplir que la diferencia de cotas (d) sea menor al 10% de la apertura máxima del arreglo (D), según se precisó en la figura 5.8.

Es importante recalcar que la mayor parte de los software de análisis comerciales no disponen de la opción para incorporar los desniveles de los geófonos al análisis. Si existe dicha restricción, es fundamental que el arreglo en terreno sea prácticamente horizontal. En la experiencia de los autores, este punto es especialmente crítico en el caso de arreglos bidimensionales con registros pasivos.

Estructuras cercanas

Al igual como se menciona en las secciones anteriores, se debe evitar realizar ensayos sobre estructuras enterradas, aun cuando sean de dimensiones pequeñas. En dicho caso, las dimensiones de estas obras son comparables a las longitudes de ondas correspondientes a las frecuencias más altas, de forma que este tipo de elementos podría afectar especialmente a los resultados de los ensayos activos. Además, se recomienda alejarse al menos tres metros de canales, pozos y otras estructuras aledañas. Si alguno de estos elementos está presente a menos de 10 m de los arreglos montados, deberá ser reportado en el informe y discutida su posible influencia en los resultados.

10.2. Errores de procesamiento de datos e interpretación

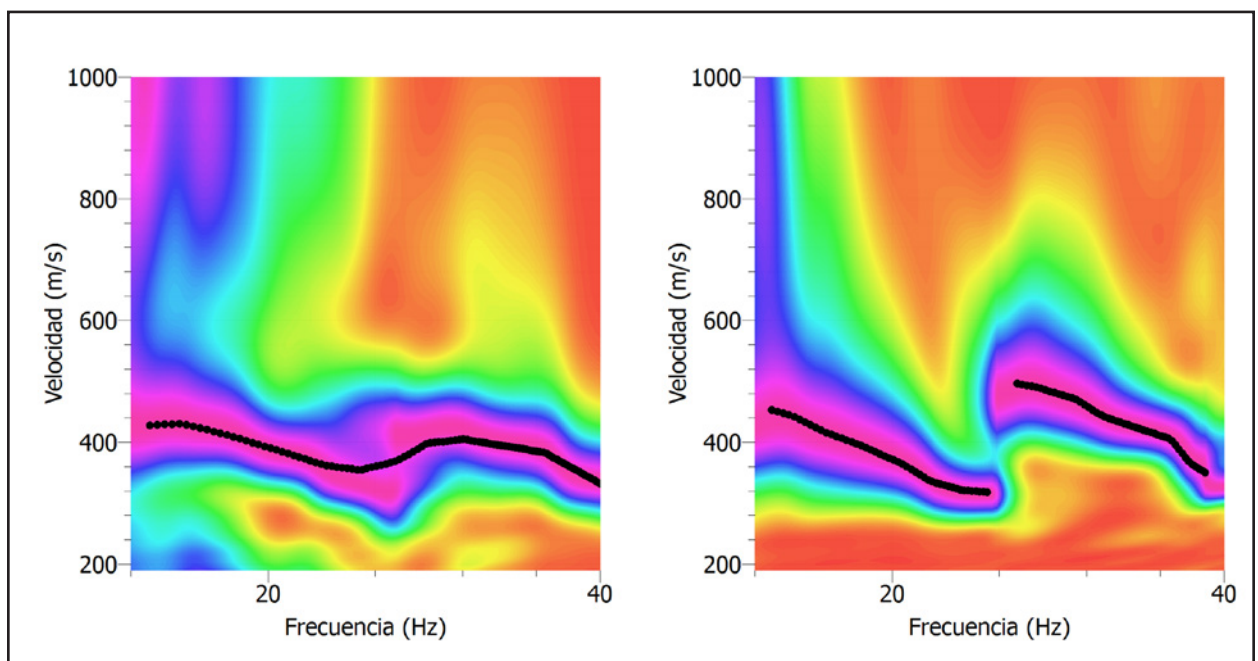
Diferenciación entre modos superiores e inversión de curva de dispersión/autocorrelación

Una de las etapas más delicadas del proceso de obtención del perfil de velocidades de onda de corte es la interpretación del diagrama de dispersión. Esto requiere evaluar las distintas formas de estimación del diagrama, en especial la normalización utilizada. En algunos casos, puede ocurrir la inversión

“aparente” de la curva, que se suele reflejar en una zona concentrada (a frecuencias medias), donde la curva de velocidades de fase aumenta. También pueden aparecer modos superiores de vibración (sección 8.2.1). Estos dos últimos eventos se pueden confundir fácilmente, lo que conforma uno de los errores más comunes de interpretación. Una de las formas de remediar esta situación es **evaluar el diagrama de dispersión utilizando diferentes normalizaciones**, de forma tal de interpretar los gráficos con aquella normalización que evidencie resultados más nítidos y aclare lo que ocurre en la zona de aparente inversión.

La figura 10.3 exhibe dos diagramas de dispersión para el mismo ensayo activo con diferentes normalizaciones, la primera normaliza con respecto al inverso de la distancia al golpe, mientras que la segunda lo hace con respecto a la máxima amplitud del registro. Se observa que el primer caso la curva aparece como continua y se podría interpretar como la inversión de la curva de dispersión, mientras que en el segundo caso se observa con mayor nitidez la presencia de un segundo modo. Por otro lado, la figura 10.4 muestra la correcta interpretación de un diagrama con presencia de inversión de velocidades.

Estos ejemplos demuestran la importancia de la prolijidad al momento de invertir el registro de datos de los ensayos. Se recomienda siempre que el responsable del procesamiento esté familiarizado con este tipo de ensayos y pueda discriminar apropiadamente los resultados que entregan los registros. Si bien la aparición de modos superiores es más frecuente en ensayos activos, típicamente a frecuencias relativamente altas, el error descrito en esta sección también puede ocurrir durante el análisis de ensayos pasivos. Este hecho confirma la importancia de favorecer la redundancia de información, repitiendo golpes, combinando ensayos activos y pasivos, materializando arreglos lineales y bidimensionales.



(a)

(b)

Figura 10.3. Distintas normalizaciones del diagrama de dispersión. Normalizada (a) con respecto al inverso de la distancia y (b) de acuerdo a la máxima amplitud del registro. La Figura (a) muestra la posible confusión con una inversión de la curva.

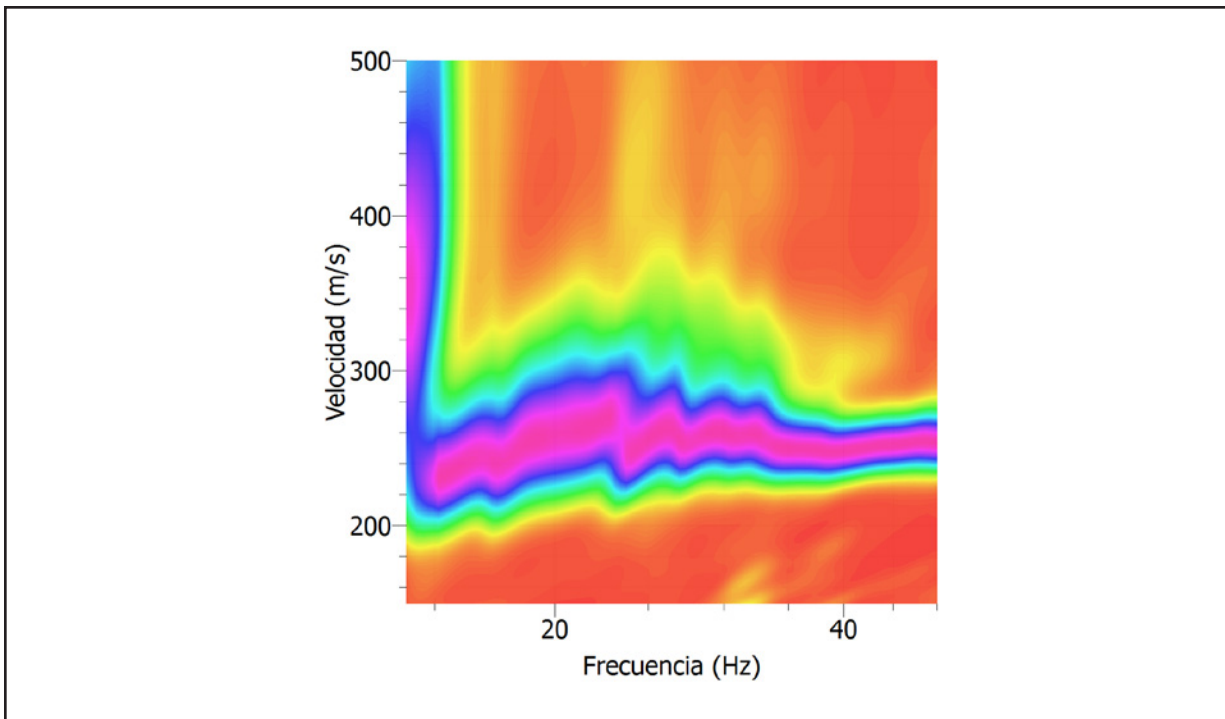


Figura 10.4. Curva de dispersión con real inversión del perfil de velocidades

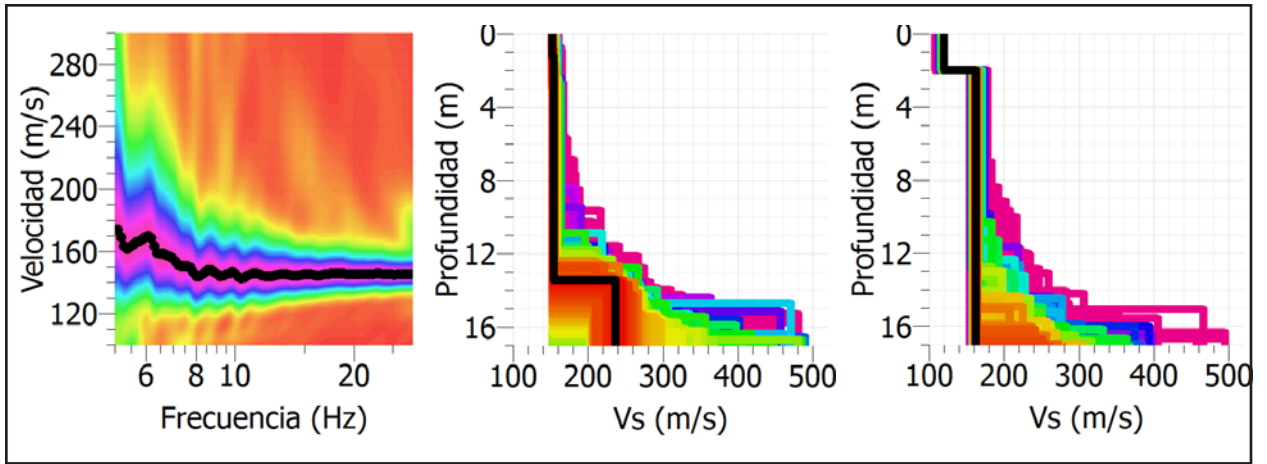
Stacking de diagramas de dispersión y no de curvas de dispersión

El proceso de apilamiento (*stacking*) corresponde a una etapa de suma importancia en la obtención de la curva de dispersión (ver sección §6.2.1.). En muchos casos, es posible observar información de buena calidad en el diagrama de dispersión sin la necesidad de este procedimiento; sin embargo, se recomienda **siempre hacer *stacking***, ya sea en tiempo o en frecuencia, para evaluar la consistencia de las curvas y obtener mayor precisión en las concentraciones de energía del diagrama de dispersión. Este apilamiento (*stacking*) debe efectuarse antes de identificar la curva de dispersión y no como un promedio de curvas individuales.

En el caso de combinar directamente varias curvas de dispersión (por ejemplo, provenientes de software distintos), se recomienda unificar el muestreo en frecuencias de todas las curvas antes de invertir el perfil de Vs. En general, los índices de error o *misfit* se calculan como una suma sobre todos los puntos de donde se dispone información empírica. Por lo tanto, si algún tramo de la curva posee en términos relativos más puntos, esta zona podría verse favorecida durante el proceso de inversión relegando otros rangos de frecuencias a un segundo plano. Por lo mismo, se sugiere usar un muestreo uniforme (usualmente en escala logarítmica) para todas las curvas ingresadas al proceso de inversión definido entre la frecuencia máxima y mínima explorada luego de la combinación de todas las curvas.

Uso de parámetros iniciales para inversión de curva de dispersión

Una vez que se ha obtenido la curva de dispersión para un terreno en particular, el proceso de inversión requiere cierta delicadeza al momento de elegir los parámetros iniciales con los que se comienza la iteración. Esto es de vital importancia en suelos con Vs muy bajo (< 180 m/s), dado que los *software* más comunes usan condiciones iniciales del orden de los 150 a 200 m/s, por lo que es posible que el perfil obtenido no represente apropiadamente las capas más superficiales del terreno.



(a) (b) (c)
Figura 10.5. (a) Curva de dispersión invertida en dos distintos perfiles distintos; (b) con los parámetros iniciales por defecto (V_s inicial de 150 m/s) y (c) con V_s inicial reducido (50 m/s).

En la figura 10.5(a) se observa un ejemplo donde el diagrama de dispersión sugiere velocidades de fase bastante bajas, en este caso es fundamental modificar las condiciones iniciales de la iteración para obtener las velocidades reales de los estratos superficiales, tomando siempre en cuenta las limitaciones asociadas a las longitudes de onda máxima y mínima que puede medir el arreglo. La figura 10.5(b) propone una inversión usando los parámetros iniciales por defecto mientras que en (c) se modifican los parámetros de manera tal de identificar las velocidades más bajas en los estratos más someros.

11. Contenidos Mínimos del Informe

Al momento de realizar un estudio empleando métodos de ondas superficiales se recomienda entregar, como mínimo, los siguientes elementos:

- Formas de ondas: Todos los registros de las formas de ondas utilizadas para la elaboración de la CD, ya sean de tipo pasivo o activo. Se debe especificar claramente el formato en el cual se han almacenado; en caso de tratarse de un formato particular no estándar, se deberán entregar una copia en archivo texto (ASCII).
- Metadata: Información de cada uno de los registros entregados, con la posición de los geófonos durante las mediciones, intervalo de tiempo utilizado y cualquier otro aspecto necesario para el proceso de los datos.
- Curvas de dispersión obtenidas: se deben entregar en modo gráfico como en una tabla velocidad versus periodo (o cualquier variante de ellos, como lentitud y frecuencia).
- Ajuste a las curvas de dispersión: se debe presentar gráficamente, el ajuste que el modelo seleccionado hace a los datos medidos en terreno a la CD.
- Modelo de velocidad de onda de corte: una tabla con el modelo de velocidad que mejor ajuste los datos medidos.
- En lo posible, entregar estimaciones de los errores con una explicación del método usado para su determinación.

12. ANEXOS

Un software que permite desarrollar estos métodos, desde el proceso de los datos de terreno a la curva de dispersión, para luego realizar la inversión no-lineal, es Geopsy, desarrollado por Marc Wathelet. Este ha sido empleado ampliamente utilizado durante el desarrollo del presente documento. Puede ser descargado en la siguiente dirección:

<http://www.geopsy.org/>



Ejemplo Hoja de Campo:

GENERAL			
Fecha	31/03/2015	Hora	12:05
Ubicación	Av. 18 de septiembre 2416, Arica		
Coordenadas	N 7955249	Referencia: Coordenadas medidas en el centro del arreglo circular. Zona 19H.	
	E 363627		
ARREGLO LINEAL 1 - ENSAYO ACTIVO			
Sampleo	0.125 ms	Tiempo (c/archivo)	2 s
N° Geófonos	24	Espaciamiento	5
Distancia	Archivos		
a 5m	141 142 143 144 145		
a 10m	146 147 148 149 150		
a 15m	151 152 153 154 155		
a 20m	156 157 158 159 160		
ARREGLO LINEAL 1 - ENSAYO PASIVO 1D			
Sampleo	16ms	Tiempo (c/archivo)	240s
N° Geófonos	12	Espaciamiento	8
Archivos	161 162 163 164 165 166		
ARREGLO LINEAL 2 - ENSAYO ACTIVO			
Sampleo	0.125 ms	Tiempo (c/archivo)	2 s
N° Geófonos	24	Espaciamiento	5
Distancia	Archivos		
a 5m	167 168 169 170 171		
a 10m	172 173 174 175 176		
a 15m	177 178 179 180 181		
a 20m	182 183 184 185 186		
ARREGLO LINEAL 2 - ENSAYO PASIVO 1D			
Sampleo	16ms	Tiempo (c/archivo)	240s
N° Geófonos	12	Espaciamiento	8
Archivos	187 188 189 190 191 192		
ENSAYO PASIVO 2D			
Sampleo	16ms	Tiempo (c/archivo)	240s
Configuración	Círculo de 15.3m de diámetro		
N° Geófonos	12	Espaciamiento	8
Archivos	193 194 195 196 197 198		
OBSERVACIONES:			
El ensayo fue ejecutado al costado de una avenida de alto tráfico vehicular. El primer arreglo lineal fue perpendicular, mientras el segundo fue paralelo a esta calle.			

**MANUAL DE APLICACIÓN
DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS
BASADAS EN ONDAS DE
SUPERFICIE PARA LA
DETERMINACIÓN DEL
PARÁMETRO V_{S30}**



Instituto de la Construcción
www.iconstruccion.cl

La Concepción 322, of. 902, Providencia, Santiago, Chile
Tel: (562) 2235 0605 • Fax: (562) 2235 0848
E-mail: ic@iconstruccion.cl

www.iconstruccion.cl
www.certificacionsustentable.cl
www.normativaconstruccion.cl