

Caracterización del subsuelo mediante la aplicación de ensayo geofísico de refracción y MASW, en cerro afectado por movimientos en masa en Coliumo, Tomé, región del Biobío.

P. González Rebolledo ¹, A. Muñoz Jensen ², E. Núñez Castellanos ³

RESUMEN: Los fenómenos de remoción en masa en cerros han resultado en catástrofes devastadoras, especialmente cuando ocurren cerca de viviendas y/o carreteras, causando accidentes, destrucción de infraestructuras y riesgos para la población. Para abordar esta problemática, es crucial comprender en detalle las características y el comportamiento de los cerros. En esta línea, se realizan diversos ensayos con el fin de identificar riesgos potenciales y establecer medidas preventivas. Esta investigación se centra en un cerro ubicado en Coliumo, que ha experimentado movimientos que alertan a la comunidad. Con el propósito de entender y mitigar los riesgos de futuras remociones en masa, se empleará el método geofísico MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves). Este método es esencial para obtener datos detallados de las velocidades de ondas de corte (Vs) en el subsuelo, permitiendo una comprensión más profunda de las propiedades de este y, por ende, una evaluación más precisa de los riesgos asociados a movimientos en masa. Además, se incorporará el método de refracción sísmica como una herramienta complementaria. La refracción sísmica proporcionará datos adicionales sobre la velocidad de las ondas primarias sísmicas en diferentes capas geológicas, enriqueciendo la comprensión del subsuelo y mejorando la capacidad de evaluación de riesgos. La combinación de estos métodos geofísicos permitió caracterizar el subsuelo mediante la obtención de velocidades de onda, particularmente de ondas S, que dan a conocer la realidad del subsuelo. Adicionalmente, esta investigación permitió clasificar el suelo de acuerdo con la normativa sísmica vigente como “Medianamente denso o firme” y “Suelo denso o firme”.

PALABRAS CLAVE: MASW, ondas de corte, movimientos en masa.

ABSTRACT: Mass movement phenomena in hills have resulted in devastating catastrophes, especially when they occur near houses and/or roads, causing accidents, infrastructure destruction, and risks to the population. To address this issue, it is crucial to thoroughly understand the characteristics and behavior of hills. In this context, various tests are carried out to identify potential risks and establish preventive measures. This research focuses on a hill located in Coliumo, which has experienced movements that have alerted the community. In order to understand and mitigate the risks of future mass removals, the MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves) geophysical method will be employed. This method is essential to obtain detailed data on shear wave velocities (Vs) in the subsurface, allowing a deeper understanding of its properties and, consequently, a more accurate assessment of risks associated with mass movements. Additionally, seismic refraction will be incorporated as a complementary tool. Seismic refraction will provide additional data on the velocity of primary seismic waves in different geological layers, enriching the understanding of the subsurface and enhancing risk assessment capabilities. The combination of these geophysical methods allowed for the characterization of the subsurface by obtaining wave velocities, particularly S-waves, which reveal the reality of the subsurface. Furthermore, this research enabled the classification of the soil according to current seismic regulations as "Moderately dense or firm" and "Dense or firm soil".

1. *Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, pgonzalezr@ing.ucsc.cl*

2. *Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, andrea.munoz@ucsc.cl*

3. *Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, enunez@ucsc.cl*

1. INTRODUCCION

Los movimientos en masa, fenómenos naturales intrínsecamente ligados a las fuerzas gravitatorias que actúan sobre las formaciones geológicas, representan una constante preocupación global dada su capacidad para desencadenar desastres devastadores (Cruden, 1991). La interacción compleja de factores geológicos, morfológicos y climáticos ha convertido a estos eventos en una realidad preocupante con consecuencias catastróficas para las comunidades afectadas. A pesar de su impacto significativo, la comprensión completa y la atención anticipada a estos fenómenos a menudo se subestiman hasta que se manifiestan en tragedias humanas (Cruden & Varnes, 1996).

Marín, Neira, Garrido y Báez (2020) mencionaron que, en los últimos 90 años, Chile experimentó 68 eventos de remociones en masa, que se distribuyen a lo largo del territorio chileno. Estos eventos resultaron en un total de al menos 1.010 víctimas fatales, de las cuales 854 fueron fallecidos y 156 desaparecidos (Marín, Muñoz y Naranjo (2019). Es importante destacar que los factores desencadenantes de estas remociones se dividen principalmente en tres categorías: hidrometeorológico, sísmico y de intervención antrópica, siendo el primero el principal causante de estos eventos (Marín et al. 2020).

Coliumo y sus alrededores se caracterizan por su relieve escarpado y la creciente actividad constructiva y turística, lo que lo convierte en un escenario crítico para abordar la complejidad de los movimientos en masa (García, 2016). En el año 2019, un derrumbe en un cerro en el sector costero de Coliumo destruyó por completo una vivienda y cortó el único camino de acceso a la comunidad. El deslizamiento se produjo después de que una ladera del cerro cediera, provocando la caída de material y árboles de grandes dimensiones, lo que afectó el suministro eléctrico (Espinoza, 2019). Posteriormente, en 2023, tras el paso del sistema frontal de lluvias en la región del Biobío, se reportaron daños asociados a la emergencia en diferentes puntos de la comuna de Tomé. En primer lugar, como se observa en la imagen (Figura 1a), hubo un socavón en el interior de una casa en Coliumo, que dejó el piso base de la vivienda en el sótano. Luego, ocurrió un segundo derrumbe en el sector Cerro Alegre, en el acceso principal de la comuna, que destruyó una vivienda (Figura 1b) y dejó al menos otras cuatro con peligro de colapso; de esta manera, se procedió con la evacuación absoluta de los residentes (Espinoza, 2023)



Figura 1: Daño estructurales de viviendas en Tomé: **a.** Socavón al interior de una casa; **b.** Colapso de ladera y vivienda. (Modificado de Espinoza, 2023).

El método de refracción sísmica para es un método geofísico que se utiliza para estudiar la composición y las capas subterráneas de la Tierra. Se basa en el principio de que las ondas sísmicas se doblan o refractan cuando atraviesan diferentes capas de roca con propiedades mecánicas distintas. Este fenómeno permite a los geólogos y geofísicos obtener información sobre la estratigrafía y las propiedades de los materiales subsuperficiales (Catanzariti, 2020).

El ensayo geofísico MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - análisis multicanal de ondas superficiales) es una valiosa herramienta para obtener parámetros geotécnicos de manera no invasiva en el subsuelo. Este método, cuyo desarrollo se inició en el Servicio Geológico de Kansas en la década de 1990, se ha popularizado entre geofísicos e ingenieros geotécnicos desde la publicación de Park et al. en 1997. El MASW se basa en el análisis de la dispersión de ondas sísmicas superficiales, lo que permite obtener perfiles de velocidades de ondas S para cada estrato del subsuelo.

El Decreto Supremo 61 (DS 61) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011) es crucial para el diseño sísmico de estructuras y categoriza los terrenos de fundación según la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 metros superiores (V_{s30}), desde la letra A a la E. El Esto destaca la importancia de aplicar métodos geofísicos como el MASW y la refracción geofísica para obtener los parámetros necesarios en la caracterización de suelos y la toma de decisiones en el diseño de infraestructura en Coliumo.

El Levantamiento Geológico Costero e Interior de la Provincia de Concepción, publicado por Barrales et al. (2013) proporciona información geológica del área de estudio, lo que permite obtener una estimación inicial de las velocidades de ondas que se esperarían en la zona de estudio en Coliumo antes de llevar a cabo los ensayos.

El objetivo principal de la investigación es caracterizar el subsuelo en la zona de estudio en Coliumo. Esto se logrará mediante el uso del método de análisis multicanal de ondas superficiales MASW, junto con la refracción sísmica como herramienta complementaria.

La presente tesis se inicia con la construcción del marco teórico, una base conceptual que aborda las teorías fundamentales relevantes para la investigación. A continuación, se detallará la metodología, describiendo la ejecución de los ensayos y proporcionando la revisión de la geología, respaldada por la recopilación de antecedentes pertinentes. Los resultados y la discusión constituirán la fase central, donde se exhibirán los hallazgos derivados de la aplicación de software y se integrará información bibliográfica. Finalmente, la conclusión consolidará los descubrimientos, ofreciendo una síntesis de los resultados y destacando las implicaciones y posibles direcciones futuras que surgen de esta investigación.

2. MARCO TEÓRICO

Las ondas sísmicas, definidas como ondas mecánicas que requieren un medio para propagarse, desempeñan un papel fundamental en la geofísica y la exploración del subsuelo. En un medio homogéneo, como se considera teóricamente al subsuelo, estas ondas exhiben un comportamiento elástico (Catanzariti, 2020) y se dividen en dos categorías principales: ondas de cuerpo y ondas superficiales (Sánchez y Tovar, 2016).

2.1 Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo son ondas sísmicas que se desplazan por del interior de la tierra. Se clasifican en dos tipos principales: ondas P, que se propagan por cualquier medio, y ondas S que se desplazan a través de medios sólidos (Sellés-Martínez, 2005).



Ondas P (Primarias): También conocidas como ondas longitudinales, se generan por esfuerzos uniaxiales compresivos y se propagan paralelas a la dirección de movimiento de las partículas (Figura 2a). Tienen la capacidad de viajar a través de cualquier medio material, ya sea sólido o líquido, a una velocidad estimada de 1.73 veces más rápida que las ondas S. La velocidad típica de estas ondas es cerca de 1450 m/s en el agua y alrededor de 5000 m/s en el granito (Sánchez y Tovar, 2016). En la Tabla 1 se presentan valores orientativos de la velocidad de propagación de la onda primaria según la composición del subsuelo (Braja Das, 2008).

Tipo de suelo o roca	Velocidad de la onda primaria (V_p) en m/s
Suelo superficial erosionado	240-610
Grava o arena seca	450-915
Arena saturada	1.220-1830
Arenisca	2.000-4.000
Granito	4.500-6.000
Pizarra y esquisto	2.500-5.000
Caliza	5.000-10.000

Tabla 1: Velocidades orientativas de la onda P en base a la composición del subsuelo. Modificado de Braja Das, (2008); Sánchez y Tovar, (2016).

Ondas S (Secundarias): Las ondas S, también llamadas ondas transversales o de corte, generan un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación (Figura 2b). A diferencia de las ondas P, las ondas S sólo pueden propagarse en medios sólidos y su velocidad es menor que la de las ondas P (Sánchez y Tovar, 2016). Dentro de las ondas S se distinguen las ondas Sh , cuyas partículas oscilan en el plano horizontal y perpendicular a la dirección de propagación, y las ondas Sv , cuyas partículas oscilan en el plano vertical y de manera perpendicular a la dirección de propagación (Griem, 2020).

2.2 Ondas superficiales

Las ondas superficiales se caracterizan por viajar a través de la superficie terrestre y se desplazan a menos velocidad que las ondas de cuerpo. Dado su baja frecuencia provocan que las estructuras entren en resonancia con mayor probabilidad que las ondas de cuerpo, por ende, tienden a ser más destructivas. Se distinguen dos tipos de ondas superficiales, las ondas Love y Rayleigh (Sánchez y Tovar, 2016).

Ondas Love (L): Son ondas que producen un desplazamiento horizontal de las partículas, en dirección perpendicular a la trayectoria de la onda (Figura 2c) (Gutiérrez et al., 2005). La generación de las ondas Love se produce por una superposición de ondas Sh .

Ondas Rayleigh (R): Las ondas Rayleigh, nombradas en honor a Lord Rayleigh, se caracterizan por un movimiento de las partículas en una trayectoria elíptica retrógrada en sentido antihorario (Figura 2d). Estas ondas se generan por una combinación de ondas P y Sv , y tienen una velocidad relativamente baja pero una alta amplitud y baja frecuencia (Reynolds, 2011).

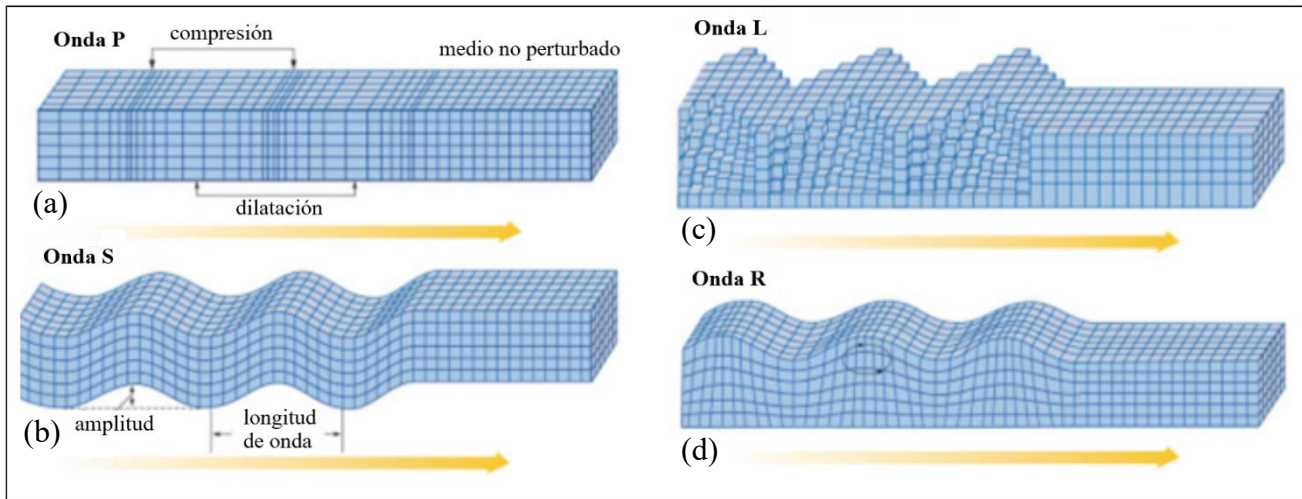


Figura 2: Esquema de la propagación de las ondas sísmicas, la flecha amarilla indica la dirección de propagación. Modificado de Catanzariti (2020).

2.3 Ensayo de refracción

En el campo de la geofísica, la sísmica de refracción emerge como un método de gran relevancia. Este se enfoca en medir el tiempo que toma para que las ondas elásticas viajen desde el punto de generación hasta múltiples puntos de interés mediante sensores estratégicamente ubicados a distancias conocidas, asumiendo un trazado de línea con refracciones críticas. La técnica se aplica con fines diversos, abarcando la medición de espesores de recubrimiento, la determinación de la profundidad del nivel freático, la prospección petrolera, y la realización de estudios hidrogeológicos. Además, permite localizar la profundidad del sustrato y caracterizar los suelos. Para llevar a cabo este método, se generan ondas sísmicas en un punto mediante la vibración del terreno con un martillo, estas ondas viajan por la interfase entre dos medios y son detectadas por los sensores, generando registros llamados sismogramas. El análisis de estos datos se centra en determinar el tiempo de llegada de las primeras ondas a cada sensor, que se refractan en diferentes interfaces del suelo (Osso, 2001). Es fundamental señalar que la restricción de este ensayo radica en que la velocidad de la onda debe incrementar a medida que la profundidad aumenta.

2.3.1 Ley de Snell

Esta ley establece que la multiplicación del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia es constante para cualquier onda que atraviese una superficie de separación entre dos medios con índices de refracción diferentes. Aunque originalmente se formuló para la refracción de la luz, se aplica a todo tipo de ondas, incluidas las sísmicas. La ley de Snell dicta que cuando una onda incide en una interfaz entre dos medios, parte de la energía se refleja (rayo reflejado) y parte entra en el segundo medio, resultando en un cambio en la dirección del rayo transmitido (refractado) en relación con la normal a la superficie de separación (Figura 3) (Osso, 2001).

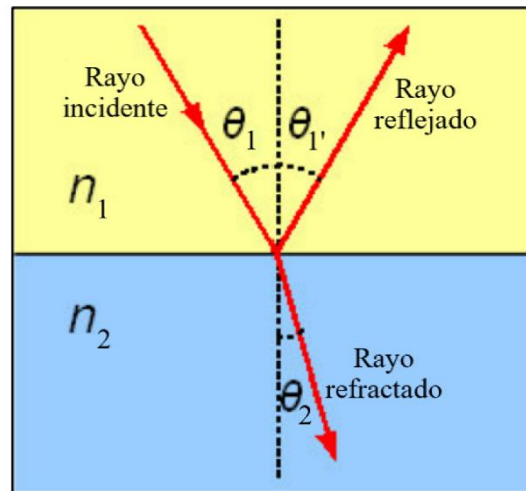


Figura 3: Ilustración de reflexión y refracción en un interplano entre dos medios distintos. Modificado de (Sánchez y Tovar, 2016).

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = n_{21} \quad (1)$$

Donde n_{21} es una constante, denominada índice de refracción del medio 2 con respecto al medio 1.

2.3.2 Refracción crítica

Cuando el ángulo de incidencia crece hasta cierto punto, se llega al llamado ángulo crítico, momento en el que toda la energía dirigida hacia el segundo medio se mueve a lo largo de la frontera entre ambos (interfaz). A esta onda se le llama onda refractada crítica, que luego retorna a la superficie (Figura 4). (Estrada, 2009).

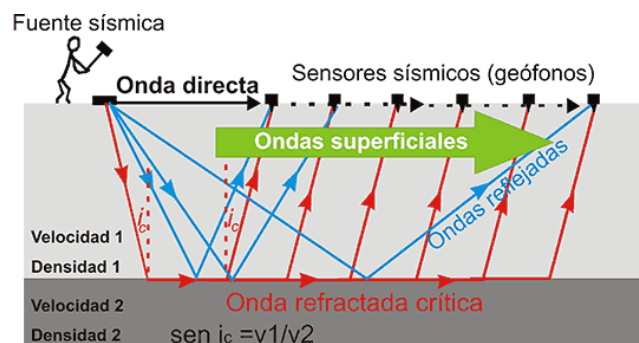


Figura 4: Ilustración de onda refractada crítica. Modificado de (Estrada, 2009).

2.4 Ensayo MASW

El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), introducido por Park et al. (1999), es una técnica sísmica utilizada en ingeniería geotécnica para evaluar la elasticidad del suelo. Este enfoque permite estimar la velocidad de onda de corte a diferentes profundidades (Park et al., 1999).

El procedimiento típico para llevar a cabo un estudio MASW comienza con la recopilación de datos de campo utilizando geófonos dispuestos en una configuración lineal (Park et al, 2001). Las curvas de dispersión se generan a partir de los datos recopilados, y la curva con la velocidad de fase más baja se conoce como el "modo fundamental" (Park, 1999).

Luego, se realiza la inversión (Figura 5) de los datos para obtener perfiles unidimensionales de la velocidad de corte (V_s) en profundidad.

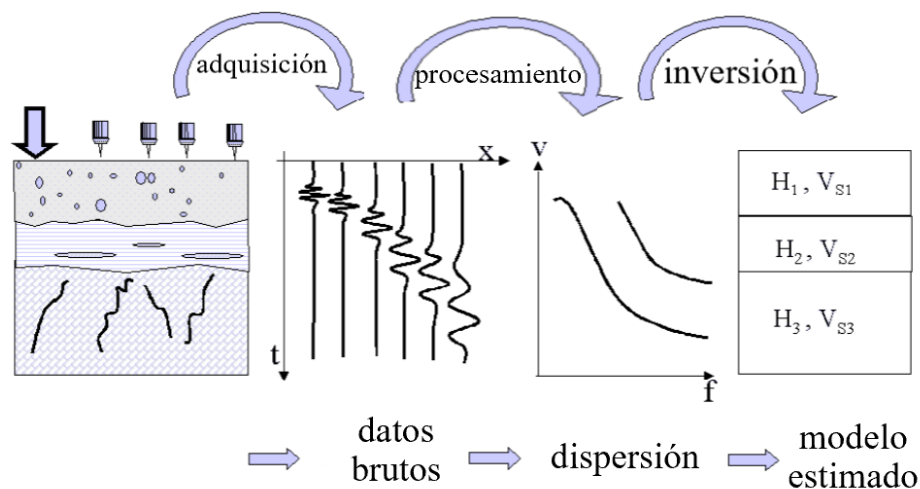


Figura 5: Esquema de los tres pasos del método MASW para la obtención del modelo estimado. Modificado de Strobbia (2003).

El MASW es un método no invasivo que se basa en la dispersión de las ondas Rayleigh para estimar perfiles de velocidad de ondas S o de corte (V_s) en función de la profundidad (Park et al., 1999). Dependiendo de la fuente utilizada, el ensayo puede ser activo o pasivo, con diferentes alcances de profundidad. Ambos tipos de ensayos involucran el uso de múltiples geófonos dispuestos linealmente.

2.4.1 Decreto Supremo N°61

El Decreto Supremo N°61 (DS 61) presenta una modificación en comparación con la normativa anterior NCh433. Mientras que esta última clasifica los tipos de suelo según la velocidad de onda de corte sin especificar profundidades, el DS 61 se enfoca en la velocidad promedio de la onda S en los primeros 30 metros del terreno o V_{s30} (Ecuación 2). La determinación de este parámetro se lleva a cabo a través de diversos ensayos, como Down-hole, Cross-hole, SASW, ReMi y, de manera destacada, el MASW, que se posiciona como uno de los métodos más solicitados para una evaluación precisa de la clasificación sísmica. (Rojas, 2012).

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}} \quad (2)$$

Donde:

V_{S30} : Velocidad de propagación de las ondas de corte en los primeros 30 metros del terreno, en m/s

V_{s-i} : Velocidad de ondas de corte del estrato i , en m/s

h_i : Espesor del estrato i , en metros

n : Número de estratos en los 30 metros superiores del terreno

A continuación, en la Tabla 2, se presenta la clasificación sísmica del terreno de fundación, incluyendo la velocidad de propagación de las ondas de corte V_{s30} . Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011).

Suelo Tipo	V_{S30} (m/s)	RQD	q_u (Mpa)	N1 (golpes/pie)	Su (Mpa)
A Roca, suelo cementado.	≥ 900	≥ 50	≥ 10 (equ $\leq 2\%$)		
B Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme.	≥ 500		$\geq 0,4$ (equ $\leq 2\%$)	≥ 50	
C Suelo denso o firme.	≥ 350		$\geq 0,3$ (equ $\leq 2\%$)	≥ 40	
D Suelo medianamente denso o firme.	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05e$
E Suelo de compacidad o consistencia mediana.	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F Suelo especial.	*	*	*	*	*

Tabla 2: Clasificación sísmica del suelo de fundación. Modificada de Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011).

3. METODOLOGÍA

3.1 Etapa de gabinete

En esta fase, se realizó una búsqueda de información bibliográfica de la geología de Coliumo, búsqueda y estudio de dos ensayos geofísicos: el análisis de ondas superficiales (MASW) y la refracción sísmica. El MASW, basado en la dispersión de ondas sísmicas superficiales, permite obtener perfiles de velocidades de ondas S para caracterizar el subsuelo. La refracción sísmica, centrada en el principio de refracción de ondas sísmicas en capas de roca, proporciona información detallada sobre la composición del subsuelo. Además, se recopilieron datos sobre velocidades sísmicas esperadas y se consideraron los lineamientos del Decreto Supremo N°61 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Este análisis bibliográfico sienta las bases teóricas necesarias para la ejecución de los ensayos geofísicos en terreno.

3.2 Trabajo en terreno

La ejecución del ensayo en terreno implicó desplazarse a la zona de estudio en Coliumo (Figura 6) con el equipo correspondiente, especialmente diseñado para el análisis de ondas superficiales (MASW). Durante esta etapa, se llevaron a cabo tres líneas sísmicas para la realización del ensayo (Figura 7). El equipo consistió en un mazo, una placa metálica, geófonos, cables de conexión, un computador portátil con software SeisImager, y una batería como fuente de poder.

Se implementó un arreglo lineal tipo T compuesto por las líneas A-A' y B-B', y uno rectilíneo C-C' debido a las limitaciones de espacio físico en la zona. Las mediciones incluyeron ondas pasivas generadas por el ruido ambiental y ondas activas generadas por una fuente controlada (martillo). Las coordenadas de los golpes en los arreglos son presentadas en la Tabla 3.



Figura 6: Área de estudio



Figura 7: Área de estudio con las tres líneas sísmicas: A-A', B-B' y C-C', Coliumo. Extraído de Google Earth.

Arreglo lineal	Golpe	Coordenada Norte (UTM)	Coordenada Este (UTM)	Altura (ms.n.m.)
A-A'	A1	0681802	5955492	103
	A2	0681767	5955525	103
	A3	0681730	5955557	103
B-B'	B1	0681715	5955504	103
	B2	0681742	5955539	103
	B3	0681774	5955577	103
C-C'	C1	0681572	5955601	39
	C2	0681618	5955615	44
	C3	0681658	5955637	47

Tabla 3: Coordenadas de golpes para los arreglos lineales.

3.3 Procesamiento de datos

Después de la recopilación de datos en terreno, se procedió al procesamiento utilizando herramientas especializadas. Se implementó el programa SeisImager para realizar el proceso de "Stacking", que consiste en la suma y promedio de los datos registrados en una misma posición para obtener trazas más representativas.

Posteriormente, se utilizó el software Pickwin para la observación gráfica y selección/corrección de las ondas primarias en el análisis de refracción. Para el ensayo MASW, se empleó el programa Surface Waves Analysis Wizard, que permitió establecer condiciones de borde y generar modelos iniciales a partir de las curvas de dispersión activas y pasivas.

Además, el módulo Geoplot se utilizó para visualizar en perfiles 2D la distribución de las velocidades de ondas resultantes de la inversión. Ajustes fueron realizados para homologar valores máximos y mínimos comunes en los perfiles generados.

4. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

La descripción geológica del área de estudio se realiza en base al Levantamiento Geológico del Sector Costero e Interior de la Provincia de Concepción (Barrales et al, 2013). De aquí se escriben las diferentes unidades geológicas presentes (Figura 7).

Pzr: Unidad Intrusiva Rafael (Carbonífero-Pérmico), subunidad tonalitas El Retamo. Constituidas por tonalitas de biotita de textura equigranular de grano medio. Se identifica un contacto por inconformidad con la Formación Curanilahue. Estas rocas tienen una variación de color en superficie fresca, que va desde gris blanquecino a gris pardusco y gris oscuro con tonos verdosos. En superficies alteradas, el color varía entre gris pardo y gris anaranjado. La textura predominante es fanerítica equigranular de grano medio. Las muestras muestran diferentes grados de alteración, desde muy alteradas formando maicillo hasta prácticamente inalteradas. Microscópicamente, se observa que las plagioclasas sufren alteración a arcillas y sericita, con un grado que va desde incipiente a moderado. Las biotitas se encuentran alteradas principalmente a cloritas, con intensidades que varían desde incipientes hasta pervasivas, y en menor cantidad a epidota y zoisita (Barrales et al, 2013).

KT: Formación Quiriquina (Maastrichtiano – Paleoceno). Se encuentra a lo largo de la costa del Pacífico (Salazar, 2004). Litológicamente, la Formación Quiriquina presenta cuatro niveles principales desde la base hasta el techo: un conglomerado basal, areniscas amarillas, niveles de coquinas intercalados con areniscas, y arenisca-limolita

con concreciones calcáreo-arenosas en menor cantidad. Su potencia máxima reconocida es de 47 metros aproximadamente (Biró, 1982).

Ein: Formación Curanilahue (Eoceno inferior). Secuencia siliciclástica continental compuesta por areniscas conglomeráticas, areniscas medias, fangolitas y arcillolitas asociadas al desarrollo de mantos de carbón (Pineda, 1983). El mismo autor distingue la Formación Curanilahue en tres grupos que, de base a techo son: Miembro Lota (continental), Miembro Intercalación (marino) y Miembro Cólico (continental). Además, se dispone en inconformidad sobre la Unidad Intrusiva Rafael en la Península de Coliumo, mismo lugar donde se reconoce la en discordancia planiangular la Formación Andalién y, en continuidad, la Formación Quiriquina (García, 2004).

El Miembro Cólico, presente en el área de estudio, contiene en mayor medida areniscas gruesas con capas de conglomerados y mantos de carbón. El tramo superior alcanza un espesor aproximado de 180 m y está compuesto mayormente por areniscas de grano medio a grueso. La descripción geológica concuerda con los informes de Muñoz-Cristi (1946, 1968).

PPIn: Formación Andalién (Plioceno-pleistoceno inferior). Compuesta por conglomerados matriz y clastosoportados mal seleccionados, con clastos disimétricos de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias (Barrales et al, 2013). Las areniscas y conglomerados que conforman la Formación son de matriz de arena tamaño medio a grueso, rocas graníticas y filitas (Galli, 1967). Quezada (1996) la describe como una secuencia de conglomerados, areniscas y limonitas meteorizadas de rocas graníticas, metamórficas y sedimentarias clásticas, con baja cohesión. También García (2004) la reconoce como conglomerados y areniscas gruesas a conglomeráticas, con clastos angulares a subredondeados. La Formación Andalién aflora en las costas de Colimo y alrededores, pudiendo reconocer un espesor de 7 m (Barrales et al, 2013).

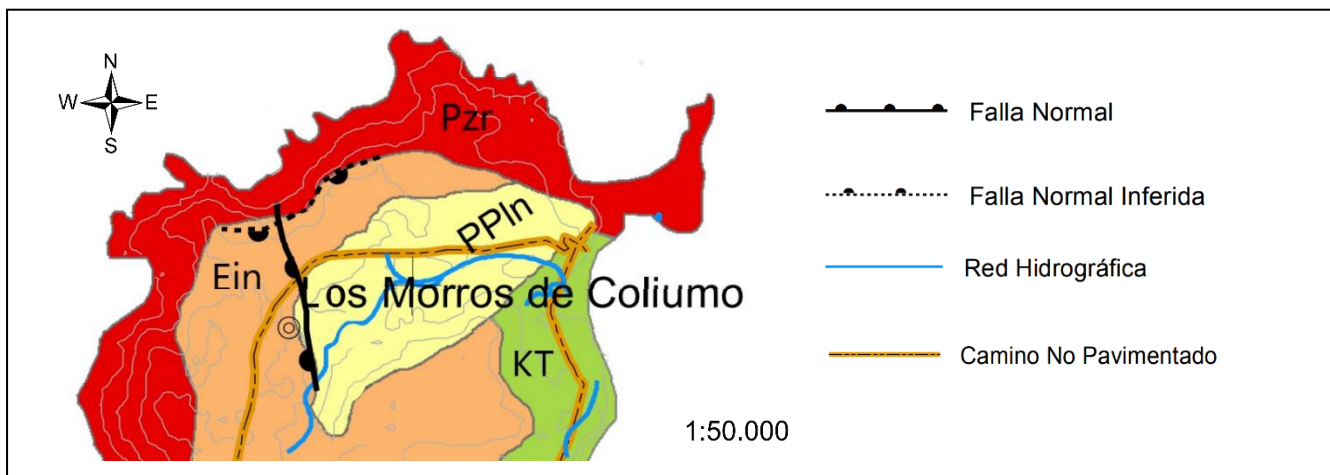


Figura 7: Geología de Los Morros de Coliumo. Modificado de Barrales et al, (2013).

Según el estudio de Barrales et al, (2013), en el área de estudio se observan un sistema de fallas, que afectan a diversas unidades geológicas, entre ellas se destacan la Unidad Intrusiva Rafael (Figura 7a) y, en menor grado, la Formación Curanilahue (Figura 7b). La primera presenta dos direcciones preferenciales: una NW – SE y la otra NE – SW, mientras que las fallas de la Formación Curanilahue se disponen principalmente en dirección WNW – ESE. Sin embargo, no se proporciona información detallada sobre las fallas, lo que limita el conocimiento del comportamiento tectónico del lugar.

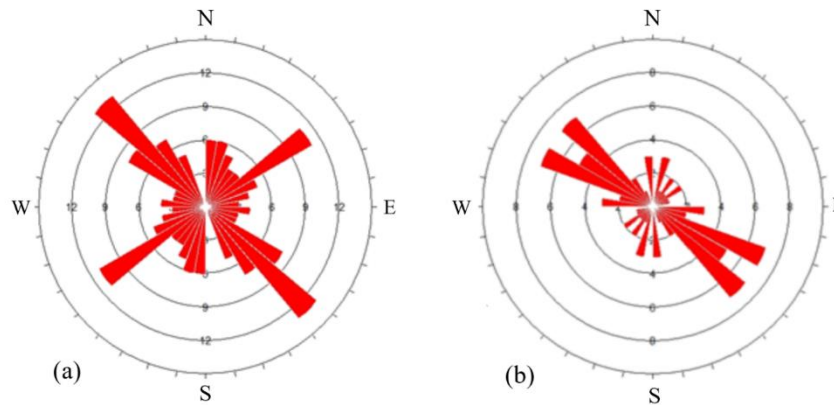


Figura 8: Rosetas de fallamiento normal para: a, Unidad Intrusiva Rafael; b, Formación Curanilahue y Quiriquina. Modificado de Barrales et al, (2013).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Refracción

Los resultados del ensayo de refracción fueron generados por el programa Geoplot después de realizar el picado en el programa Pickwin. El procesamiento de los datos se llevó a cabo en función de las velocidades de la onda P de entrada proporcionadas al programa, las cuales fueron identificadas en la Tabla 1 con apoyo de la información geológica de la zona de estudio, publicada por Barrales et al, (2013).

Los modelos de refracción de las líneas A-A', B-B' y C-C' se presentan en las Figuras 9, 10 y 11 respectivamente, ofreciendo una visión gráfica de la disposición de los materiales del área. Las primeras dos líneas que se disponen ortogonales entre si con un arreglo tipo T, muestran una distribución de capas sin grandes diferencias. En estas líneas se observa que velocidad de la onda P de la primera capa tiene un valor de 300 m/s, con un espesor máximo de 16 metros aproximadamente que disminuye hacia el centro del arreglo.

Se destaca la predominancia del estrato de arenisca con velocidades de 2000 y 4000 m/s, siendo la primera la mas abundante en la secuencia. Finalmente, se identifica una velocidad de 5500 m/s relacionada al basamento ígneo, cuyo espesor se asume considerablemente mayor en comparación a los materiales ubicados por encima.

Por otra parte, el modelo del arreglo lineal C-C' mostrado en la Figura 10, difiere notoriamente con respecto a los dos anteriores. Aquí se observa que la capa superficial de menor velocidad es ínfima en los bordes e inexistente entre los 30 y 50 metros de la línea. Aquí, la velocidad predominante entre los 7 y 17 metros de profundidad es de 4000 m/s, lo que sugiere un mayor grado de compactación de las areniscas. Geoplot entrega el modelo de la línea C-C' hasta los 25 metros de profundidad, sin embargo, no afecta el análisis de este, dado que la Unidad Intrusiva Rafael es asumida como extensa. Además, la diferencia de altura de los golpes C1, C2 y C3 no se considerará por efectos prácticos.

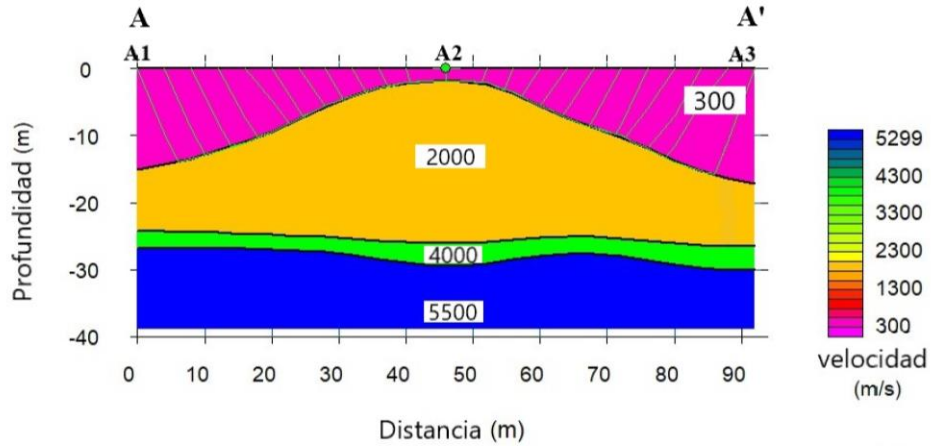


Figura 9: Modelo de refracción sísmica para el arreglo lineal A-A'

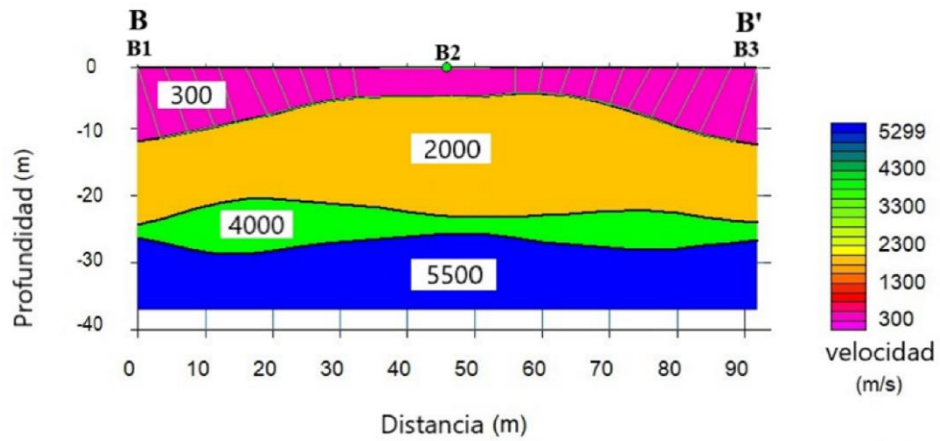


Figura 10: Modelo de refracción sísmica para el arreglo lineal B-B'

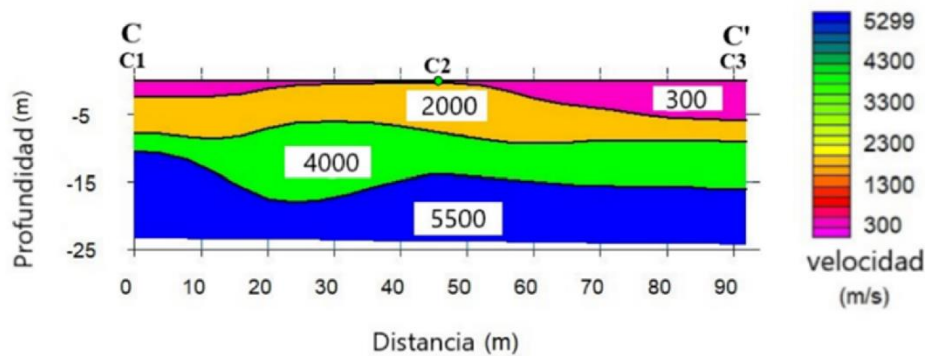


Figura 11: Modelo de refracción sísmica para el arreglo lineal C-C'

5.2 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales - MASW

Las Figuras 12, 13 y 14 muestran las curvas de dispersión de las líneas A-A', B-B' y C-C' en el mismo orden, que grafican la velocidad de fase de las ondas Rayleigh en función de su frecuencia. Posteriormente, el programa Wizard ejecuta la inversión en base a lo planteado por Park et al., (1999), para así, obtener el modelo estimado del terreno en conjunto con las velocidades de la onda S (Figuras 15, 16 y 17).

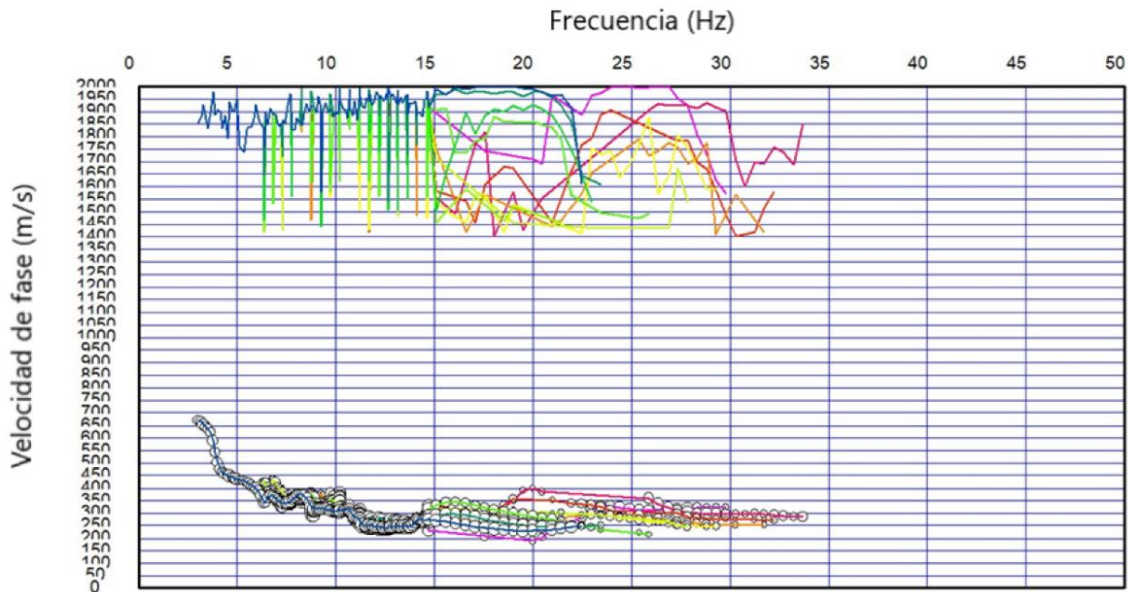


Figura 12: Curva de dispersión de la línea A-A'.

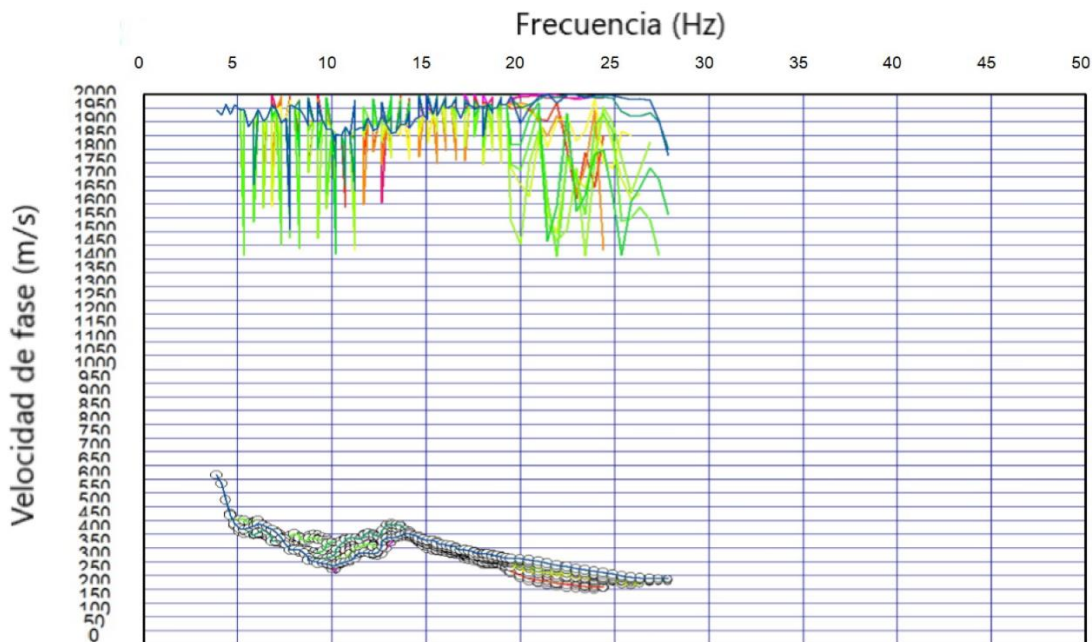


Figura 13: Curva de dispersión de la línea B-B'.

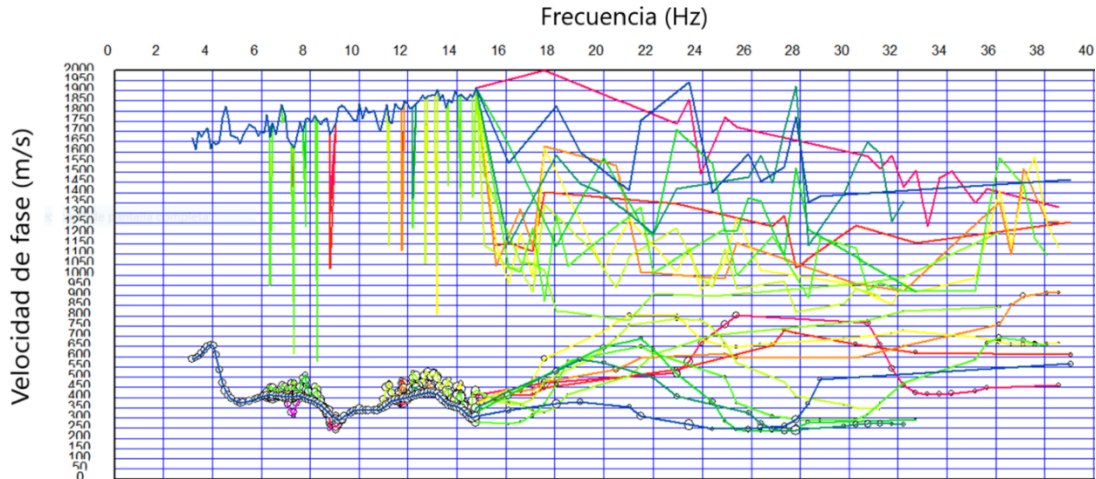


Figura 14: Curva de dispersión de la línea C-C'.

Las siguientes figuras muestran los resultados de los modelos obtenidos en GeoPlot, donde es posible observar la distribución de velocidades hasta los 40 metros de profundidad de los arreglos. En la Figura 15, se observan velocidades entre 200 y 293 m/s desde los 22 metros hasta el final del arreglo medidos horizontalmente, mientras que en los primeros 20 metros horizontales la velocidad alcanza los 359 m/s, lo que podría indicar que el terreno en esa zona podría estar más compactado debido al tránsito de vehículos por un camino pavimentado. Desde los 11 metros de profundidad, la velocidad aumenta paulatinamente conforme se aleja del nivel del terreno.

Por otra parte, la Figura 16 muestra que donde se ejecutó la medición del arreglo B-B', la distribución de las velocidades es más gradual que la de A-A', y no presenta variaciones de velocidad bruscas ni repentinas, con excepción a los 21 metros de profundidad en la distancia entre 0 y 30 metros horizontales. En ese lugar, la velocidad disminuye hasta los 340 m/s, indicando posiblemente la presencia de agua o de una capa menos compactada en esa zona. Arriba y abajo de ese sector, las velocidades alcanzan los 500 m/s aproximadamente.

El modelo de la línea C-C', ilustrada en la Figura 17, evidencia una variación notable con respecto a las líneas descritas anteriormente, con velocidades superficiales de hasta 810 m/s. Esto podría ser atribuible a una posible compactación del terreno causada por un camino de ripio que atraviesa la zona, por donde ocasionalmente transitan vehículos, aunque la significativa velocidad registrada plantea interrogantes sobre su origen. Entre los 3 y 5 metros de profundidad, en los extremos del arreglo, se observa una disminución considerable de la velocidad, la cual aumenta hacia el centro del arreglo en el mismo rango de profundidad, sugiriendo la posible presencia de una capa menos densa que la superior. Posteriormente, la velocidad aumenta hasta los 15 metros aproximadamente, con valores de 570 m/s. Desde los 16 hasta los 21 metros de profundidad, se distingue una disminución de la velocidad a lo largo de todo el arreglo, que alcanza los 270 m/s, indicando posiblemente la presencia de agua, materiales altamente meteorizados, o bien, unidades geológicas altamente fracturadas. Luego la velocidad vuelve a incrementar, alcanzando un máximo de 630 m/s aproximadamente.

El modelo tridimensional de la Figura 18 corresponde a la intersección tipo T de las líneas A-A' y B-B'. Aquí se observa que en los primeros 7 metros de profundidad, las velocidades de los modelos coinciden. Después, se evidencia una diferencia de aproximadamente 100 m/s entre los 7 y 13 metros de profundidad. Desde ese punto hasta la mayor profundidad, la diferencia de velocidades experimenta variaciones menores de hasta aproximadamente 45 m/s.

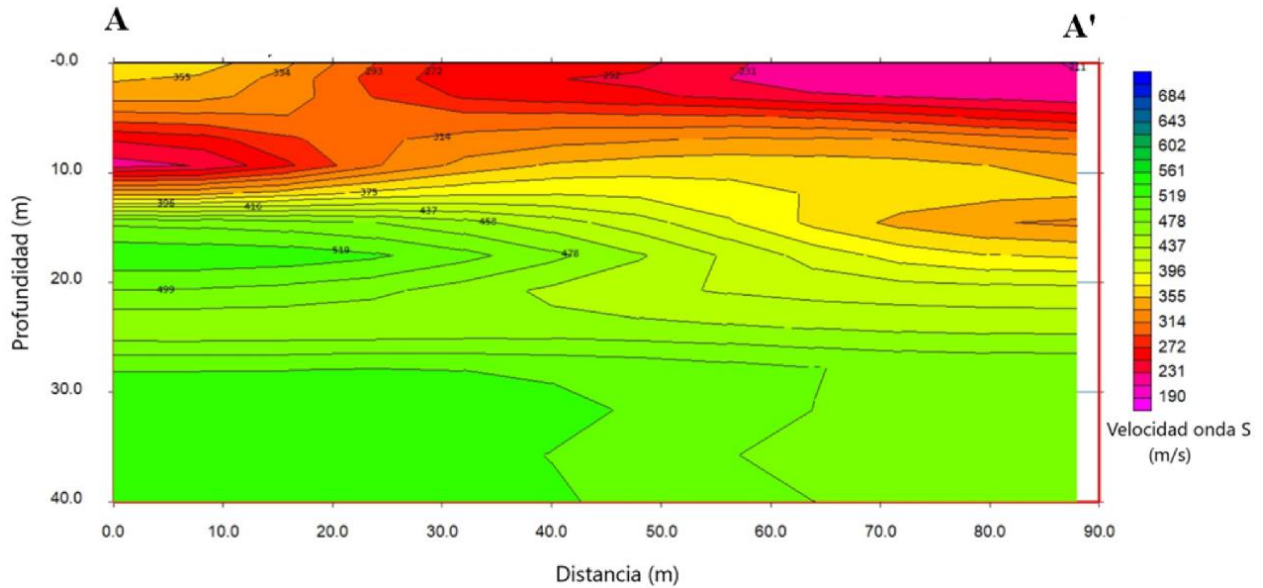


Figura 15: Modelo de V_s en profundidad de la línea A-A'.

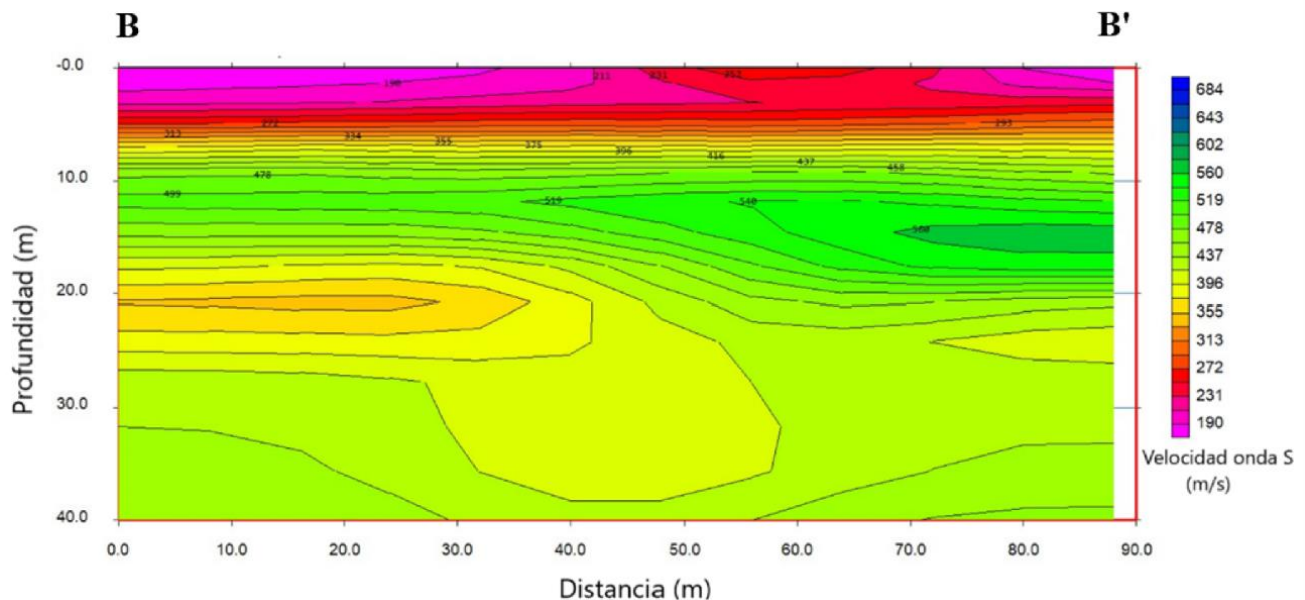


Figura 16: Modelo de V_s en profundidad de la línea B-B'.

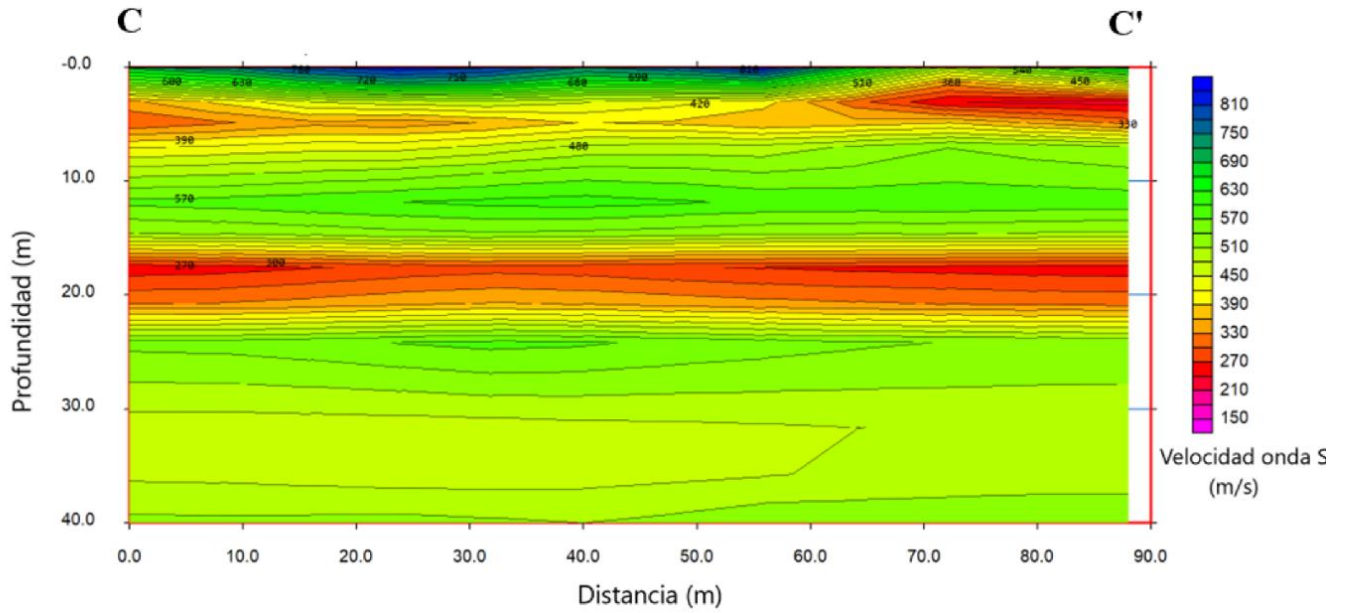


Figura 17: Modelo de V_s en profundidad de la línea C-C'.

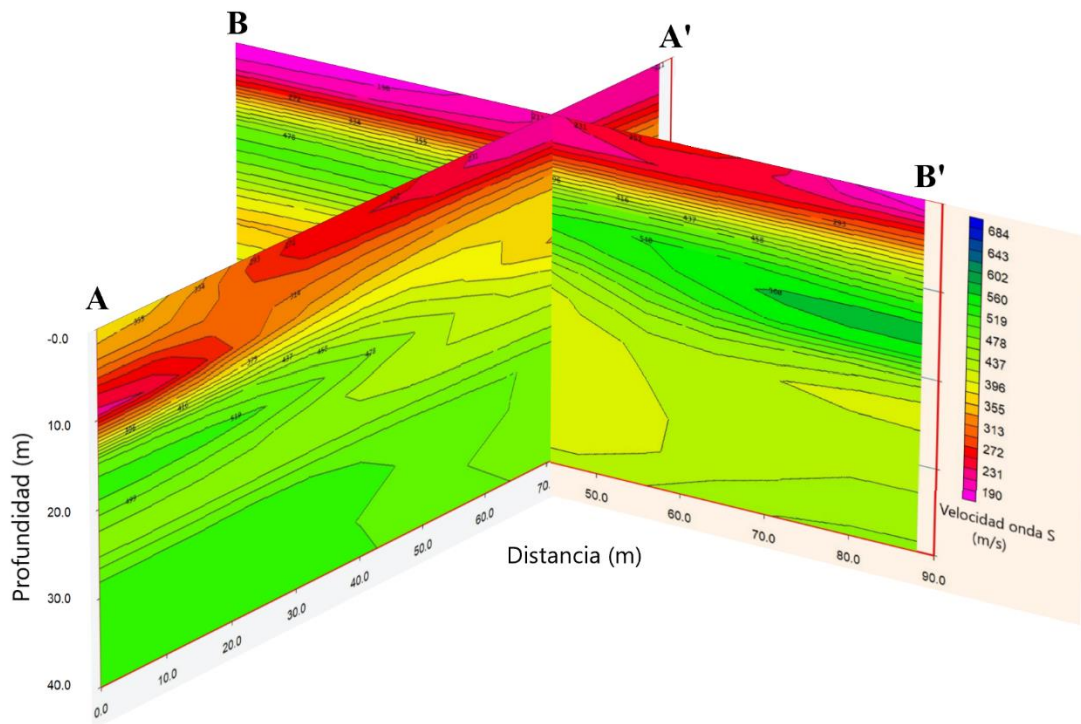


Figura 18: Modelo tridimensional de V_s de las líneas A-A' y B-B'.

Partiendo de la base que la velocidad de la onda S generalmente se aproxima a 2/3 de la velocidad de la onda P en medios sólidos, la comparación entre los resultados de refracción y MASW ofrece una perspectiva diferente. En términos de velocidades de onda P, la refracción indica valores que oscilan entre 300 m/s y 5500 m/s, mientras que el ensayo MASW revela una amplia gama de velocidades de onda S, desde 200 m/s hasta 810 m/s. De acuerdo con lo anterior, los resultados de refracción sísmica sugieren que las velocidades de onda S no deberían superar los 3600 m/s, un valor que no se alinea con las mediciones del MASW. Esta discrepancia podría indicar la presencia de humedad en el suelo, ya que las velocidades de la onda S tienden a reducirse en medios con presencia de agua. (Rivadeneira et al. 2007).

El ensayo MASW destaca al detectar la presencia de agua en el subsuelo, fenómeno que el método de refracción sísmica podría no evidenciar claramente. En muchos suelos y rocas, la presencia de agua reduce la velocidad de las ondas sísmicas de cizalle. A diferencia de la refracción, que presupone una tendencia lineal ascendente de velocidad con la profundidad, el MASW identifica estas variaciones y fluctuaciones en las velocidades, ofreciendo una visión más precisa de las condiciones subterráneas y la distribución de agua.

5.3 Clasificación Vs30

Como se mencionó en el apartado 2.4.1, el Decreto Supremo N°61 establece una clasificación enfocada en la velocidad promedio de la onda S en los primeros 30 metros del terreno (V_{s30}). Con la ecuación (2) se obtienen los valores de V_{s30} mostrados en las Tablas 4, 5 y 6, cuyos arreglos son el A-A', B-B' y C-C' en el mismo orden.

Estrato	Espesor (m)	Profundidad (m)	Vs
1	1,429	1,429	212,874
2	1,648	3,077	212,522
3	1,868	4,945	211,637
4	2,088	7,033	216,103
5	2,308	9,341	252,632
6	2,527	11,868	297,556
7	2,747	14,615	366,327
8	2,967	17,582	378,829
9	3,187	20,769	395,614
10	3,407	24,176	439,739
11	3,626	27,802	432,029
12	2,198	30	455,608
Vs30			316,003

Estrato	Espesor (m)	Profundidad (m)	Vs
1	1,429	1,429	391,744
2	1,648	3,077	396,274
3	1,868	4,945	391,139
4	2,088	7,033	358,463
5	2,308	9,341	317,624
6	2,527	11,868	303,828
7	2,747	14,615	263,044
8	2,967	17,582	320,583
9	3,187	20,769	394,645
10	3,407	24,176	425,137
11	3,626	27,802	427,413
12	2,198	30	439,336
Vs30			360,293

Tabla 4: Valor de V_{s30} en el arreglo A-A'.

Tabla 5: Valor de V_{s30} en el arreglo B-B'.

Estrato	Espesor (m)	Profundidad (m)	Vs
1	1,429	1,429	247,242
2	1,648	3,077	243,911
3	1,868	4,945	252,887
4	2,088	7,033	296,277
5	2,308	9,341	412,116
6	2,527	11,868	476,5
7	2,747	14,615	459,785
8	2,967	17,582	456,067
9	3,187	20,769	409,816
10	3,407	24,176	342,591
11	3,626	27,802	289,646
12	2,198	30	357,553
Vs30			345,854

Tabla 6: Valor de Vs30 en el arreglo C-C'.

En base a la clasificación sísmica del suelo de fundación establecida por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011) mostrada en la Tabla 2, el suelo es clasificado como “suelo medianamente denso o firme” (Tipo D) para los arreglos A-A' y C-C'. Mientras que, para el arreglo B-B', la clasificación del suelo es de Tipo C, es decir, “suelo denso o firme”.

6. CONCLUSIONES

Mediante el método de refracción sísmica, se generaron modelos bidimensionales para las líneas A-A', B-B', y C-C', cuyos parámetros de entrada se basaron principalmente en la información geológica del sector, extraída del levantamiento geológico de Barrales et al. (2013). Esta información facilitó al software la ejecución adecuada. A partir de ello, se identificó la profundidad y configuración de las capas hasta una profundidad de 40 metros bajo el nivel del terreno. Se observó que las líneas A-A' y B-B' presentan características similares, mientras que la línea C-C' mostró diferencias, especialmente en áreas superficiales donde se ausenta la capa vegetal y se detecta un terreno más compacto, reflejando velocidades de onda primaria más altas.

El ensayo MASW proporcionó un perfil detallado de velocidades de onda S hasta los 40 metros de profundidad. En las líneas A-A' y B-B', las velocidades mostraron valores máximos de 293 m/s hasta los 8 metros bajo el nivel del terreno, aumentando gradualmente posteriormente, con algunas variaciones en ciertas secciones del perfil. El modelo tridimensional presentado en la Figura 18 reveló variaciones en la propagación de velocidades en la intersección de las líneas.

Por otro lado, la línea C-C' mostró cambios significativos en comparación con las otras líneas, con velocidades que alcanzaron los 810 m/s, superiores a las de A-A' y B-B'. Estas diferencias podrían atribuirse a materiales rocosos locales o a la presencia de un camino de ripio en la zona, aunque las velocidades registradas generan interrogantes sobre su origen. Entre los 16 y 21 metros de profundidad, se observó una disminución en la velocidad a 270 m/s, sugiriendo la posible presencia de agua, materiales altamente meteorizados o unidades geológicas fracturadas debido al contacto geológico entre diferentes unidades o a la presencia de fallas geológicas en el área de estudio.

En contraste, el ensayo de refracción presenta limitaciones, ya que presupone un aumento constante de las velocidades con la profundidad, excluyendo la posibilidad de capas intermedias con velocidades menores. Esta limitación puede comprometer la precisión del método, especialmente cuando existen variaciones geotécnicas significativas a diferentes profundidades.

Las velocidades obtenidas mediante el ensayo MASW permitieron clasificar el terreno según el Decreto Supremo N°61 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011). Según las velocidades de la onda S en los primeros 30 metros (V_{s30}), los arreglos A-A' y C-C' se clasificaron como Tipo D “suelo medianamente denso o firme”, mientras que el arreglo B-B' se clasificó como “suelo denso o firme” o Tipo C.

Las características geológicas y estructurales del terreno desempeñan un papel crucial en la predisposición a los movimientos de remoción en masa. En este caso, las fallas normales y los contactos entre diferentes unidades geológicas pueden actuar como zonas de debilidad, facilitando rupturas y deslizamientos que atenten contra la vida humana.

En el contexto de esta investigación, se ha observado que las velocidades de la onda S, obtenidas mediante el ensayo MASW, presentan valores reducidos. Estas bajas velocidades sugieren posibles escenarios:

Presencia de agua: Las velocidades reducidas pueden ser indicativas de la presencia de agua en el subsuelo. El agua, al llenar los espacios entre los granos del suelo o roca, puede reducir significativamente la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de cizalle. Esto es relevante, ya que la saturación del suelo puede incrementar el peso del talud, aumentando las condiciones para deslizamientos o colapsos.

Suelos blandos: La presencia de un estrato con velocidades de la onda S bajas puede indicar la presencia de suelos blandos. Estos suelen tener una resistencia al corte más baja y, por lo tanto, velocidades de onda S inferiores en comparación con los estratos circundantes más rígidos.

Presencia de fracturas o fisuras: Las fracturas, fisuras o discontinuidades en el estrato puede influir en las velocidades de las ondas sísmicas. Estas actúan como zonas de debilidad en el estrato, lo que afecta la resistencia de los materiales, por consecuencia, las velocidades de la onda S en esa área tienden a ser mas bajas.

Dada la importancia de comprender las condiciones del terreno, se recomienda llevar a cabo ensayos tanto de laboratorio como in situ. Estos ensayos permitirán no solo caracterizar con precisión los parámetros resistentes del suelo, sino también determinar la ubicación y nivel freático. Además, la realización de ensayos adicionales podrá corroborar y validar la información obtenida mediante ensayos geofísicos de refracción y MASW, ofreciendo una visión integrada y robusta de las condiciones del subsuelo y el potencial riesgo asociado a movimientos de remoción en masa.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Barrales, V., Cid, G., García, F., Gutiérrez, V., Madariaga, P., Molina, P., Montecino, D., Rivera, R., Sedaghat, P., Vilches, Liz. (2013). Levantamiento Geológico del Sector Costero e Interior de la Provincia de Concepción, Entre los 36°22'30"S – 36°44'30"S y los 72°45'12" – 73°01'00", Región del Biobío, Chile.
- Biró, L. 1982. Revisión y Redefinición de los Estratos de Quiriquina, Campaniano-Maastrichtiano, en su Localidad Tipo, en la Isla Quiriquina a 36°27' Lat. Sur, Chile, Sudamérica, con su Perfil Complementario en Cocholgue. Congreso Geológico Chileno N°3. Vol. 1: 29-64. Concepción.
- Braja Das, (2008). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Tercera edición.
- Catanzariti, F. (2020). Refracción Sísmica en los Estudios Geofísicos.
- Cruden, D. (1991). "A Simple definition of landslides". Bulletin of the International Association of Engineering Geology, v 43,p.27-29.
- Cruden, D., Varnes, D. (1996). "Landslides types and processes". En Landslides. Investigation and Mitigation (Turner, A.K.; Schuster, R.L.; editores). Transportation Research Board, National Research Council. p 36-75. Washington.
- Espinoza, A. (2019). Derrumbe de Cerro Afectó a Vivienda y Cortó el Camino en Coliumo.
- Espinoza, C. (2023). Tomé: Derrumbe y socavón tras las lluvias. Radio Cooperativa.
- Estrada, L. (2009). Procesamiento de Datos Geofísicos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología Departamento de Geodesia y Topografía. Universidad Nacional de Tucuman.
- Galli, C. (1967). Geología Urbana y Suelo de Fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Informe Final del Proyecto de Investigación N° 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción: 248 pp. Concepción.
- García, F. (2016). Educación patrimonial: la transmisión y activación del patrimonio cultural en Tomé.
- García, Y. (2004). Aplicación de los métodos círculo de Mohr y programa Reactiva 2.4 en el análisis del stress en las estructuras mayores del área de la ciudad Concepción, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 119 pp. Concepción.
- Griem, W. (2020). Métodos geofísicos en la geología. Recuperado de : Apuntes Geología General: Métodos geofísicos, sismología (geovirtual2.cl).
- Gutiérrez, C., Quaas, R., Ordaz, M., Guevara, E., Muriá, D., Krishna, S. (2005). Sismos. México DF. Centro nacional de prevención de desastres.
- Marín, M., Muñoz, A., Naranjo, J. (2019) Víctimas Fatales Causadas por Remociones en Masa en Chile (1928-2017).
- Marín, M., Neira, H., Garrido, N., Báez, F. (2020). Visor Territorial De Fallecidos Por Remociones En Masa En Chile En Los Últimos 90 Años. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011), Decreto Supremo N°61. Diseño Sísmico de Edificios, Santiago, Chile.
- Muñoz-Cristi, J. (1946). Estado actual del conocimiento sobre la geología de la Provincia de Arauco. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Anales, Vol. 3: 105- 124. Santiago.

Muñoz-cristi, J. (1968). Contribución al conocimiento geológico de la región situada al Sur de Arauco y participación del material volcánico en los sedimentos eocenos. El Terciario de Chile, zona central. Cecioni, G. Editorial Andrés Bello: 198 pp. Santiago.

Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (2001).

Park, C., Miller, R., Xia, J., Ivanov, J. (2001). "Seismic characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surfaces Waves (MASW) method". Servicio geológico de Kansas, Estados Unidos.

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

Pineda, V. (1983). Evolución paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico superior-Terciario. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 268 pp. Santiago.

Quezada, J. (1996). Geología Urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 143 pp. Concepción.

Reynolds, J. (2011). "An introduction to applied and environmental geophysics, Second Edition". Nueva Deli, India. Willey-BlackWell.

Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S. y Yepes, H. Breves. (2007). Fundamentos Sobre los Terremotos en el Ecuador, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Rojas, J. (2012). Comparación de parámetros de respuesta sísmica y de diseño para elementos estructurales principales de edificios en altura de hormigón armado, frente a los requerimientos de los decretos supremos 60 y 61. Departamento de ingeniería civil, U. de Chile. Santiago, Chile.

Rojas, J. (2012). Comparación de parámetros de respuesta sísmica y de diseño para elementos estructurales principales de edificios en altura de hormigón armado, frente a los requerimientos de los decretos supremos 60 y 61. Departamento de ingeniería civil, U. de Chile. Santiago, Chile.

Salazar, C. (2004). Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina. VIII Región del Bío-Bío. Chile sistemática, Bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 155 pp. Concepción.

Sánchez, E., Tovar, C. (2016). Aplicación de la Técnica de Sísmica de Refracción (V_p) y Remi (V_s) en la Ingeniería de Cimentaciones. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá D.C.

Sellés-Martinez, J. (2005). ¿Qué nos cuentan las ondas sísmicas?, p. 25-30.

Strobbia, C. (2003). Surface Wave Methods Acquisition, processing and inversión. Politecnico Di Torino.