

Simulación preliminar de estabilidad de taludes utilizando el método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), para la zona de Hualpén, Región del Biobío, Chile.

F. Sotomayor Chavarría¹, A. Muñoz Jensen², J. M. Montenegro Cooper³

RESUMEN

El método análisis Multicanal de ondas superficiales o por sus siglas en inglés MASW, es realizado por la comunidad geofísica y adoptado por la comunidad geotécnica-geológica con la finalidad de categorizar el suelo en un área específica mediante el estudio y la obtención del valor de la onda de corte sobre los 30 metros de profundidad V_{s30} . Este método además es uno de los más comunes y utilizados en Chile y en el mundo, debido a su bajo costo y al no ser invasivo. En el presente trabajo se estudia desde un punto de vista geofísico y geotécnico el método, con el fin de establecer una relación entre los resultados obtenidos al aplicar el método análisis Multicanal de ondas superficiales y el comportamiento de un talud. Para el análisis geofísico, los resultados obtenidos establecerán, la caracterización del suelo. En el estudio geotécnico, se analiza los resultados en diferentes suelos, como también la influencia de estos.

Los resultados obtenidos del ensayo MASW muestran que el suelo presente en la zona, categorizado según el decreto Supremo N°61, corresponde a un suelo medianamente denso o firme, mientras que los resultados del análisis de estabilidad de taludes para alturas de un talud, 3, 4 y 5 metros respectivamente, nos muestran que en el caso de un talud de 45°, existe una baja probabilidad de falla de un talud de 3 metros, lo cual varía para taludes de 5 metros que presentan una alta probabilidad de falla.

PALABRAS CLAVES: MASW, Clasificación sísmica, Estabilidad de taludes

ABSTRACT

The Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method is performed by the geophysical community and adopted by the geotechnical-geological community in order to categorize the soil in a specific area by studying and obtaining the value of the shear wave over 30 meters depth V_{s30} . This method is also one of the most common in Chile and around the world, due to its low cost and non-invasiveness. In the present work, the method is studied from a geophysical and geotechnical point of view, in order to establish a relationship between the results obtained by applying the Multichannel Analysis of Surface Waves method and the behavior of a slope. For the geophysical analysis, the results obtained will establish the characterization of the soil. In the geotechnical study, the results are analyzed in different soils, as well as their influence.

The results obtained from the MASW test show that the soil present in the area, categorized according to Supreme Decree N°61, corresponds to a medium dense or firm soil, while the results of the slope stability analysis for slope heights of 3, 4 and 5 meters respectively, show that in the case of a 45° slope, there is a low probability of failure of a 3 meter slope, which varies for 5 meter slopes that present a high probability of failure.

KEYWORDS: MASW, Seismic classification, Stability of slopes.

¹Felipe Sotomayor, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fsotomayor@ing.ucsc.cl

²Alejandra Muñoz, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, andrea.munoz@ucsc.cl

³José Miguel Montenegro, Departamento Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ing.ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

A comienzos de 1980 se desarrolló un método que estudia la propagación de las ondas superficiales, por medio de la utilización de 2 geófonos, este método fue desarrollado por **(Nazarian et al., 1983)**, al cual lo denominó análisis espectral de las ondas superficiales o SASW, dependiendo de la ubicación y disposición de los geófonos se puede estudiar las diferentes longitudes de ondas deseadas.

Debido a que el método SASW (Spectral Analysis of Superficial Waves, en inglés), tiene limitantes, como por ejemplo que la resolución disminuye cuando aumenta la profundidad o la pérdida de algunos estratos delgados **(Stokoe y Santamarina, 2000, como se citó en Peredo, 2011)** se introdujo **(Park et al., 1999)**, el método análisis multicanal de ondas superficiales MASW (Multichannel Analysis of Superficial Waves, en inglés). La normativa chilena vigente utiliza este método en el diseño de estructuras sísmicas para categorizar el suelo, mediante el análisis de resultado de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 m. de profundidad (V_{S30}) (Decreto Supremo N°61 y Nch. 433) (Fig. 1).

Debido a su amplia utilización e importancia en la clasificación del suelo es necesario evaluar la mejor técnica geofísica que se utilizará en cada sitio la cual se basa en las limitaciones específicas de cada sitio, las condiciones geológicas y geotécnicas, además de los requisitos del proyecto y principios geofísicos. Estas técnicas abarcan una gran extensión de terreno **(Ahsraf et al., 2018)**, por lo cual es necesario evaluar y categorizar que parámetros son los que más afectan en el resultado de este método, con la finalidad de la incertidumbre que puede presentar y en consecuencia reducir los riesgos en la construcción de obras civiles.

Debido a la heterogeneidad del suelo, los valores del V_{S30} de un lugar cercano a otro pueden variar drásticamente. En Chile tras el terremoto del 27 de febrero del 2010, más específicamente el 13 de diciembre del 2011, la normativa se actualizó para satisfacer los nuevos desafíos, en este decreto, podemos encontrar distintos métodos geofísicos, tales como la sonda de suspensión, los ensayos *cross-hole*, *down-hole*, y aquellos basados en mediciones de ondas superficiales, como el análisis espectral de ondas superficiales y el análisis multicanal de ondas superficiales. Si en dicho ensayo no se muestran los valores reales del V_{S30} , o bien hay variantes en el espesor de los estratos, esto podría provocar grandes problemas al momento de hacer la fundación, en la obra civil que se busque construir, ya sea encareciendo el proyecto o bien provocando su inviabilidad.

El uso del valor del V_{S30} , puede utilizarse para estimar las propiedades de un talud, y por ende su comportamiento frente a distintos factores que puedan afectar a su estabilidad, como por ejemplo cómo se comportará este en una temporada intensa de lluvia, puede ayudar a municipalidades, ONEMI, para mejorar los mapas de riesgos, con la finalidad tener una mejor visión, en qué lugares focalizarse en casos de emergencia.

El objetivo de modelar el comportamiento de los taludes, radica en el hecho de determinar la variación en la estabilidad, como por ejemplo cómo esta última varía con respecto a la temporada de lluvia o con respecto a las propiedades geomecánicas del suelo, en función de la variación de la altura (h). Para ello se modelaron taludes con alturas, utilizando una inclinación de 45°, debido a que en **Mardones (2010)**, nos dice que, en la Región del Biobío, los taludes más afectados por los procesos de remoción en masa (PRM), por el terremoto del 2010, son las que varían entre los 42° y los 60°.

Suelo Tipo		V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	(N_1) (golpes/pie)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E	Suelo de compactidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Figura 1. Caracterización del suelo según el Decreto Supremo N°61.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Ondas Sísmicas

Ondas P: Al igual que las ondas de sonido en el aire, estas ondas alternan comprimiendo y dilatando la roca, esta onda siempre viaja en dirección del movimiento (Fig. 1). (Kayal, 2006)

En un medio homogéneo lineal y continuo, la velocidad de la onda P, se puede estimar según la Ec.1:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \text{ Ec. (1)}$$

λ : constante de Lamé
 μ : módulo de rigidez
 ρ : densidad del medio

Ondas S: O también conocidas como ondas de corte, estas cortan a la roca de manera lateral en un ángulo recto con respecto a la dirección de propagación (Fig. 2), estas ondas tienen un componente vertical S_v y un componente horizontal $-S_h$. Como un líquido no posee resistencia al corte estas ondas no pueden propagarse por este medio. Se supone que la parte exterior del núcleo de la Tierra es líquida ya que no transmite ondas de corte cuando ocurren los terremotos. El movimiento de las partículas de la onda S es perpendicular (transversal) a la propagación. (Kayal, 2006) y su velocidad se puede calcular según la Ec.2:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \text{ Ec. (2)}$$

Ondas superficiales: Las ondas superficiales existen solo en medios con una superficie libre, y se propagan en un estrato limitado cerca de la superficie, la capa que tiene un espesor que es aproximadamente igual a una longitud de onda. (Socco and Strobbia, 2004)

Ondas Rayleigh: Son ondas superficiales, que se propagan cerca de la superficie (Fig. 3), afectando hasta una profundidad limitada dependiendo de la longitud de onda. Esta relación profundidad - longitud de onda, en un medio vertical heterogéneo no es lineal (Socco and Strobbia et al., 2004). En 1885, Rayleigh demostró que se la condición de los valores de contorno, se satisfacen cerca de la superficie, dando lugar a la existencia de la una onda P-Sv “acoplada” y “atrapada” que viaja a lo largo de esta. Dado que las ondas de Rayleigh se generan a partir de ondas P y SV acopladas, el movimiento de las partículas es siempre en un plano vertical y, debido al cambio de fase entre P y SV, el movimiento de las partículas es elíptico y retrógrado (en sentido contrario a las agujas del reloj) con respecto a la dirección de propagación. (Kayal, 2006) Su velocidad se relaciona con la V_s a través de la Ec.3:

$$V_R = 0,92V_s, \text{ Ec. (3)}$$

Ondas Love: Estas ondas se propagan por múltiples reflejos entre el techo y la base del estrato de la capa que tiene menor velocidad cerca de la superficie. Se mueven de igual manera que las ondas S, pero estas presentan desplazamiento horizontal. (Kayal, 2006)

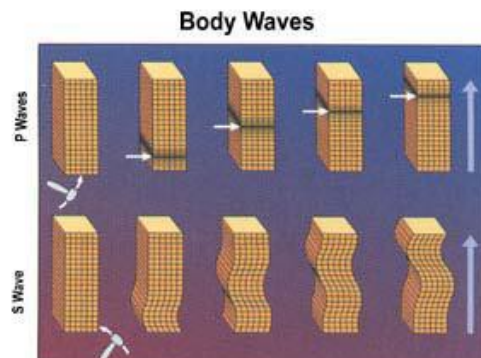


Figura 2. Propagación ondas de cuerpo P (arriba), Propagación ondas de cuerpo S (abajo). Obtenido de (Kayal, 2006)

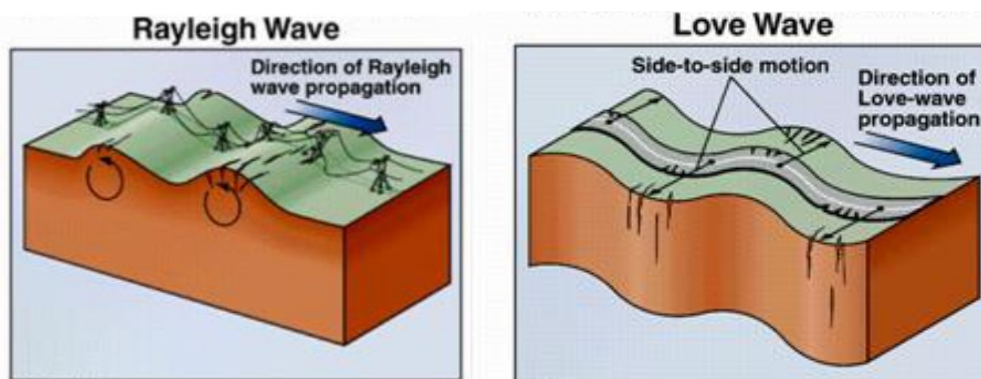


Figura 3. Propagación ondas de Rayleigh (izquierda), Propagación ondas de Love(derecha). Obtenido de (Kayal, 2006)

Debido a que los métodos geofísicos, como el método MASW, tienen como principal objetivo el de determinar la velocidad de fase de la onda, la cual corresponde a la velocidad de propagación de una onda determinada por un único valor de la frecuencia (Peredo, 2011), tanto el SASW como el MASW se apoyan en la dispersión de las ondas Rayleigh para la obtención de perfiles de velocidad de onda de corte del suelo, dado que éste es un medio estratificado de variadas rigideces y, por ende, velocidades. (Rivas, 2016), por lo que en este proyecto sólo nos enfocaremos en estas ondas para estimar el cálculo del V_{s30} .

2.2 Fenómeno de Dispersión

Se puede explicar el fenómeno de la dispersión (Fig. 4) de la siguiente manera según (Socco and Strobbia, 2004), si las ondas viajan en el mismo medio, las longitudes de ondas afectan en diferentes profundidades, si el medio no es homogéneo ellas se propagan en diferentes velocidades y en diferentes atenuaciones según el material. En general entre mayor profundidad mayor es la velocidad de onda de corte, en los casos que esto no ocurre se le denomina dispersión inversa. (Fig. 5)

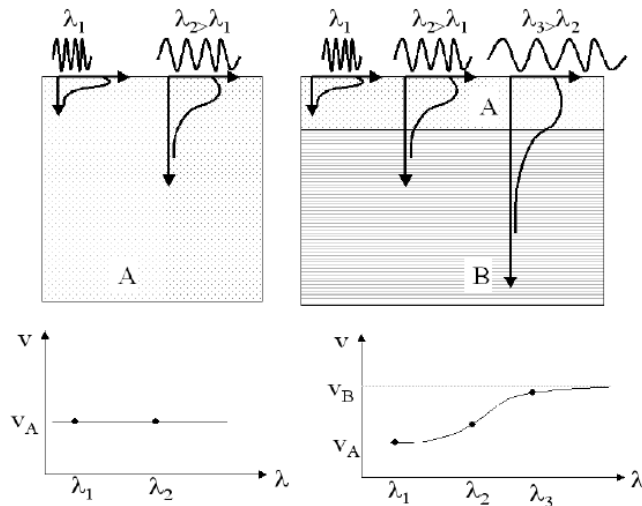


Figura 4. En un medio homogéneo (izquierda), con igual longitud de onda en el mismo material, la velocidad de onda es constante. Cuando las propiedades cambian con la profundidad (derecha), la velocidad de onda depende de la longitud de onda. (Strobbia, 2003)

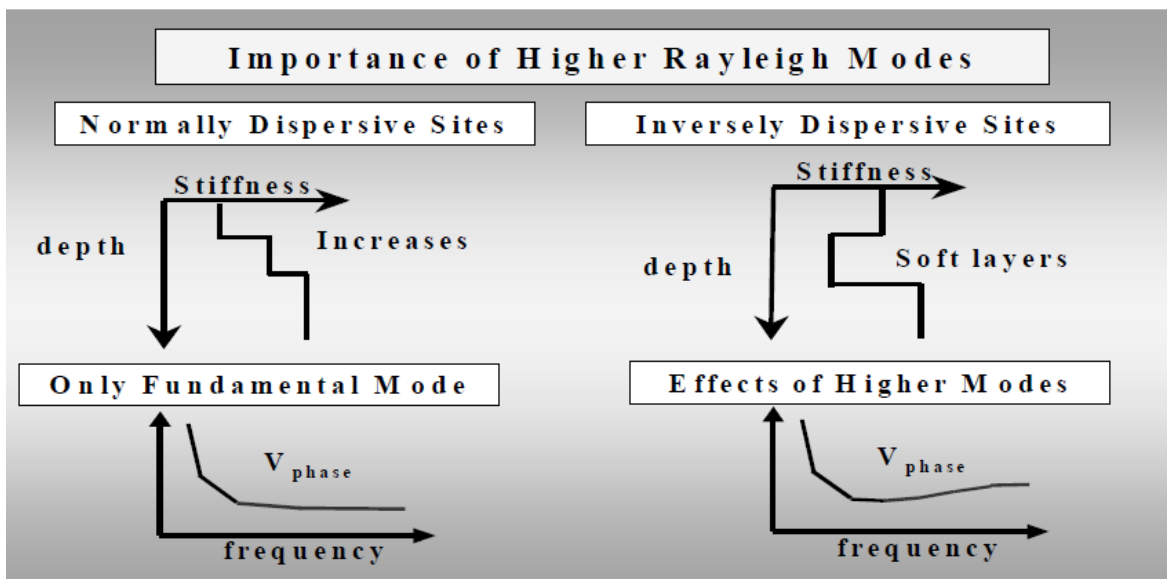


Figura 5. Relación de dispersión geométrica de las ondas Rayleigh. Obtenido de (Roma, Rix, Lai, Hebel, 2002)

2.3 Proceso de Inversión

Al momento de aplicarlo para estudiar el subsuelo, el método MASW es dividido en adquisición de datos pasivo y activo. El método activo puede utilizar tanto ondas Love como ondas Rayleigh, pero la mayoría utilizan esta última, mientras que el método pasivo se usa para obtener el ruido ambiental asumido también como ondas Rayleigh, pero originadas en fuentes lejanas -de baja frecuencia, luego combinando ambos resultados tanto del método pasivo como con el del método activo se obtienen los valores de V_s del área de estudio a través de la inversión de los datos. Ambos métodos utilizan principalmente las ondas Rayleigh, pero se diferencian en el rango de frecuencias (Ahsraf, 2018). Básicamente, para el método activo, se produce una perturbación en el terreno, en la mayoría de los casos es un martillazo, luego con la ayuda de 24 geófonos posicionados generalmente en una línea recta en la superficie del terreno con espaciamiento entre ellos de 1.5 – 3 m. y con una distancia desde el primer geófono hacia origen de 5, 10 y 15 m, se puede detectar el tiempo de llegada de las ondas superficiales a estos. Fig. (6)

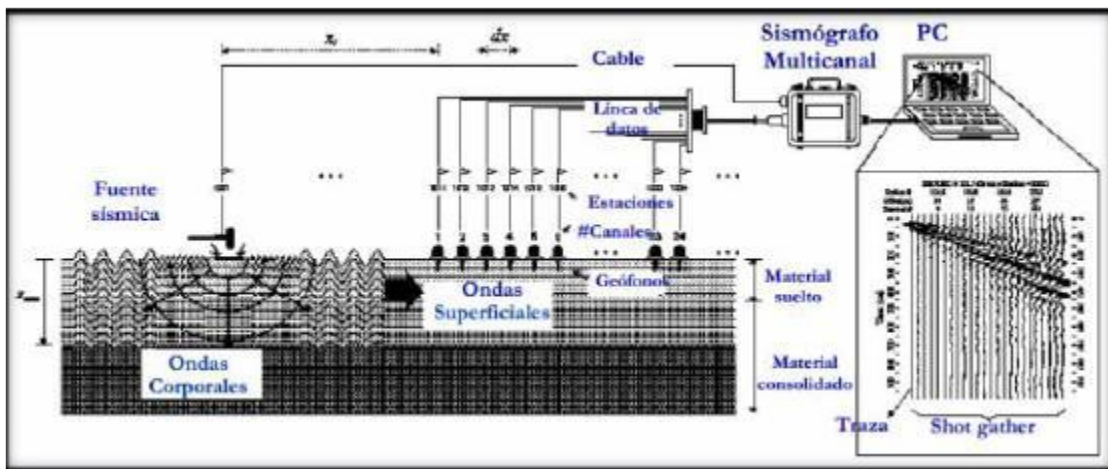


Figura 6. Esquema método MASW. Obtenido de (Rivas, 2016)

Los datos obtenidos MASW son procesados e interpretados por medio del programa especializado para ello, con la finalidad de determinar la velocidad de onda de corte, mediante la creación de la curva de dispersión. Para la creación de esta curva se siguen los siguientes pasos Fig. (7):

- Filtrar los valores obtenidos para un rango de frecuencia analizable.
- Desarrollar la curva de dispersión de la velocidad de onda de corte.
- Obtener la inversión de la curva de dispersión de la velocidad de onda de corte.

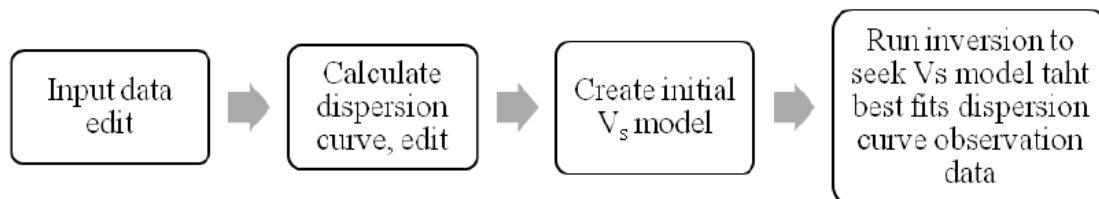


Figura 6. Flujo de procesos de datos del método MASW. Obtenido de (Ahsraf, 2018)

Con la curva de dispersión ya obtenida, el problema ahora es que hacer cuando lo que conoce en lo que entrega es la solución al problema y no los parámetros que da origen a este, con lo que el nuevo problema yace en identificar los parámetros que le dan solución al problema, para esto se utiliza la inversión (Strobbia, 2003). (Fig 8)



Figura 8. Figura del modelo inverso. Obtenido de (Strobbia, 2003)

Con la curva de dispersión una vez optimizada se puede estimar la más probable rigidez del perfil del subsuelo.

2.4 Cálculo del V_{S30}

La construcción de obras civiles en Chile está regulada por lo que dicta el Decreto Supremo N°61, para ello en su artículo 6°, categoriza el suelo, según la clasificación sísmica de este, esta clasificación varía entre los más resistentes a de mejor comportamiento (Roca: Suelo Tipo A) al de mayor exigencia sísmica (Suelo Tipo E: Suelo de compacidad o consistencia mediana), mientras que los suelos Tipo F, son casos especiales que presentan singularidad en su comportamiento mecánico y por tanto requieren estudios geotécnicos especiales. Con esta finalidad de estudiar dicho comportamiento, uno de los parámetros que se utiliza es el V_{S30} (el cual varía según los diferentes tipos de suelos como se muestra en la Tabla (1), debido a esto en su artículo 4°, define el V_{S30} , como la velocidad de onda de corte equivalente de los 30 metros superiores del terreno y lo calcula para suelos estratificados, mediante la fórmula Ec.4:

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S-i}}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Con:

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.

Tabla 1. Valores del V_{S30} , de los diferentes suelos, según su clasificación sísmica. (Decreto Supremo N°61)

Suelo Tipo		V_{S30} (m/s)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500
C	Suelo denso o firme	≥ 350
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180
F	Suelos Especiales	.

2.5 Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en la región del Biobío, provincia de Concepción, Chile, las cual queda representadas en las Fig. (9) y Fig. (10). Para la el estudio geológico se ha decidido por 4 lugares de interés Fig. (11), debido a las diferentes formaciones presentes en el lugar, Fig. (11) podemos encontrar la formación Quiriquina, la cual se depositó en el cretácico y está formada por areniscas amarillas y lentes conglomeráticos (Stinnesbeck, 2003), una zona de depósitos fluviales del neógeno, que se formó por acción de los ríos y por la serie occidental, del cenozoico, la cual corresponde a un complejo metamórfico, la cual esta suavemente plegada, además de una falla inversa en lugar, mientras que en los demás puntos se encuentran principalmente rocas sedimentarias, de distinto origen, ya sean depósitos fluviales como depósitos marinos, esto es validado. Esto nos dará la posibilidad de estudiar el comportamiento del método MASW, en distintas estratigrafías con las diferentes potencias de estos.

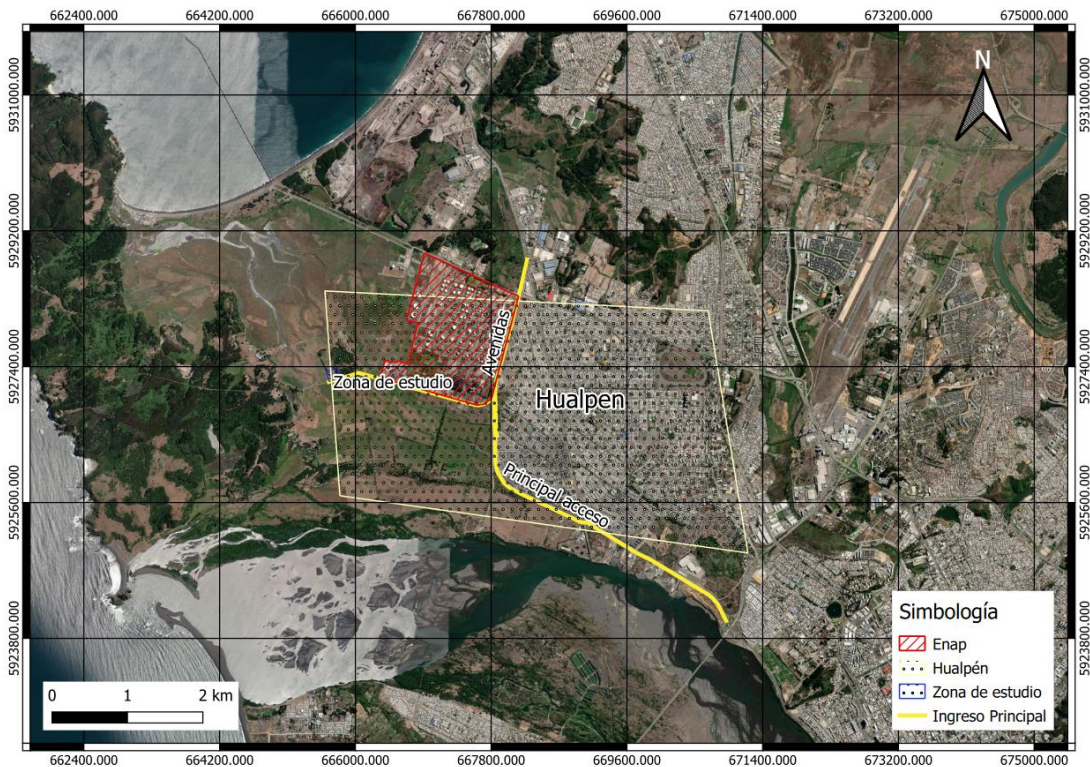
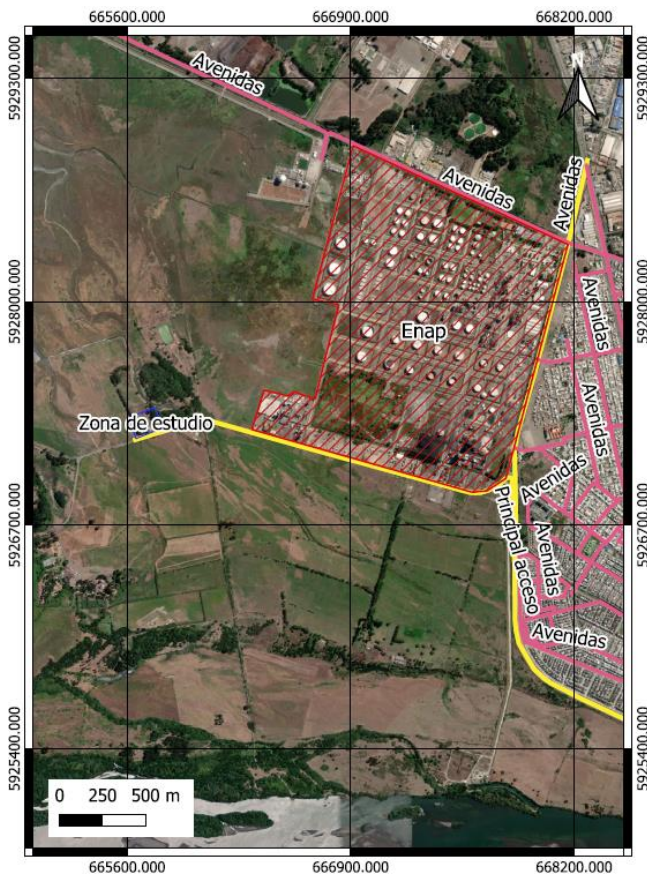


Figura 9. Zona de estudio ubicada en la región Biobío, comuna de Hualpén. (Elaboración propia)

a)



b)

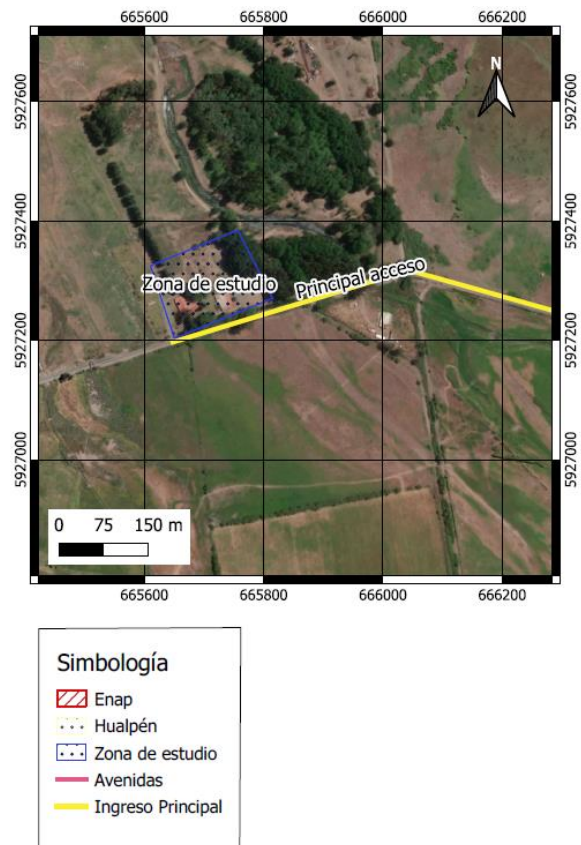


Figura 10. a) Zonas de estudio en la comuna de Hualpén b) zona específica de estudio. Elaboración propia

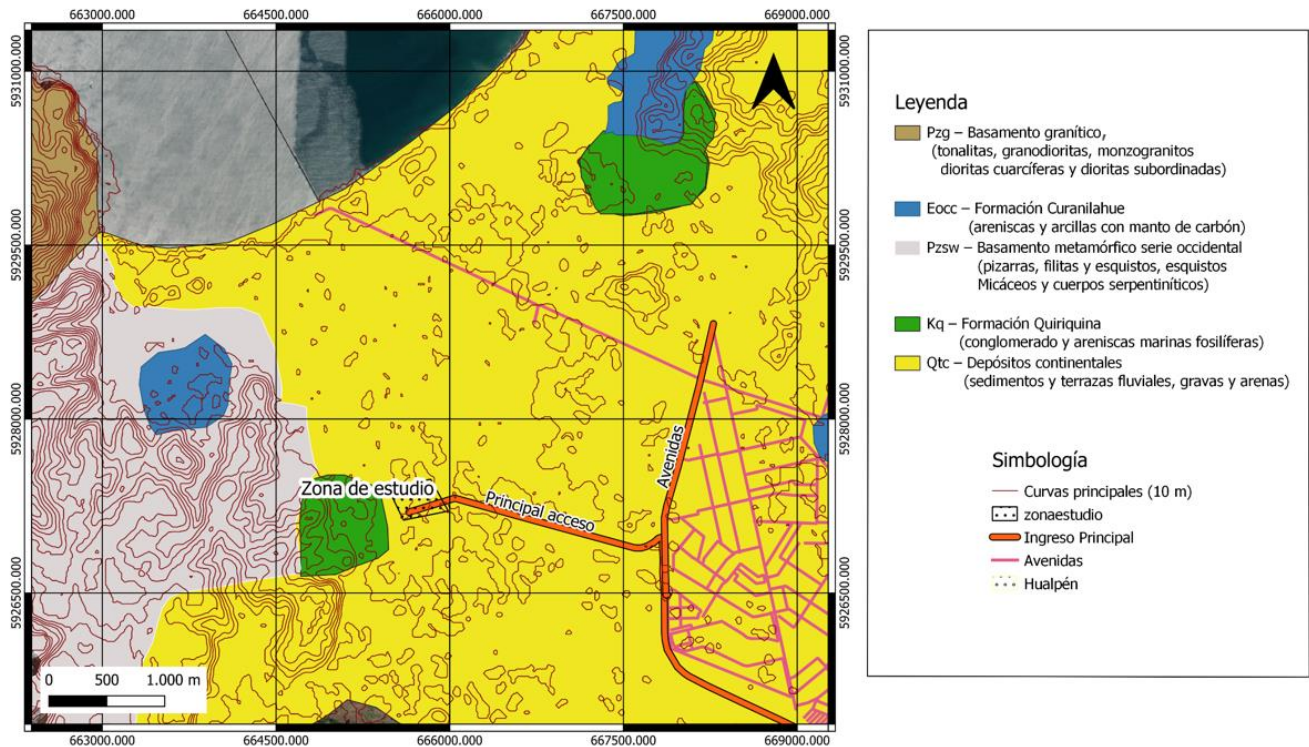
Geología


Figura 11. Zonas de estudio representada en un mapa geológico, con curvas de nivel cada 10 metros. QGIS 3.16.15

En nuestra zona de estudio podemos encontrar desde rocas metamórficas, hasta rocas sedimentarias, ya sea como la formación Quiriquina o una zona de depósitos fluviales, debido a esto y como se muestra en la Fig. (12), por lo que por ejemplo, se espera encontrar velocidades de onda de corte de más 1000 m/s, en el caso donde se pueda encontrar la formación occidental, mientras que en los demás puntos de interés, por ser zonas con sólo presencia de rocas sedimentarias, ya sean como conglomerados o como la formación curanilahue, que está formada por lutitas, arenisca, entre otros componentes, se espera encontrar valores entre 200-600 m/s, como muestra la Fig. (13). (Stinnesbeck, 2003)

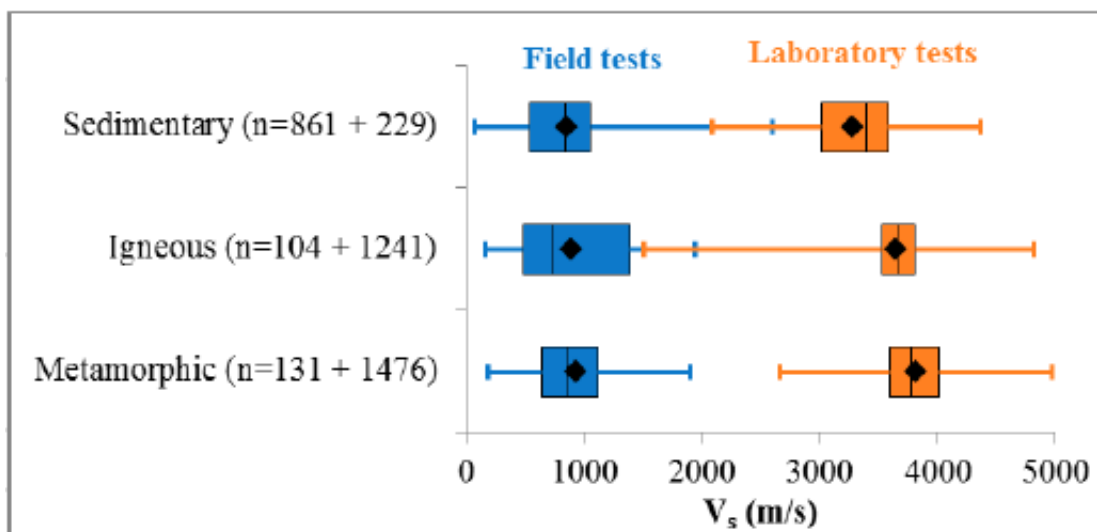


Figura 12. Comparación de los resultados del Vs30 según el tipo de rico, entre el terreno y el laboratorio. Obtenido de (Campbell, 2014)

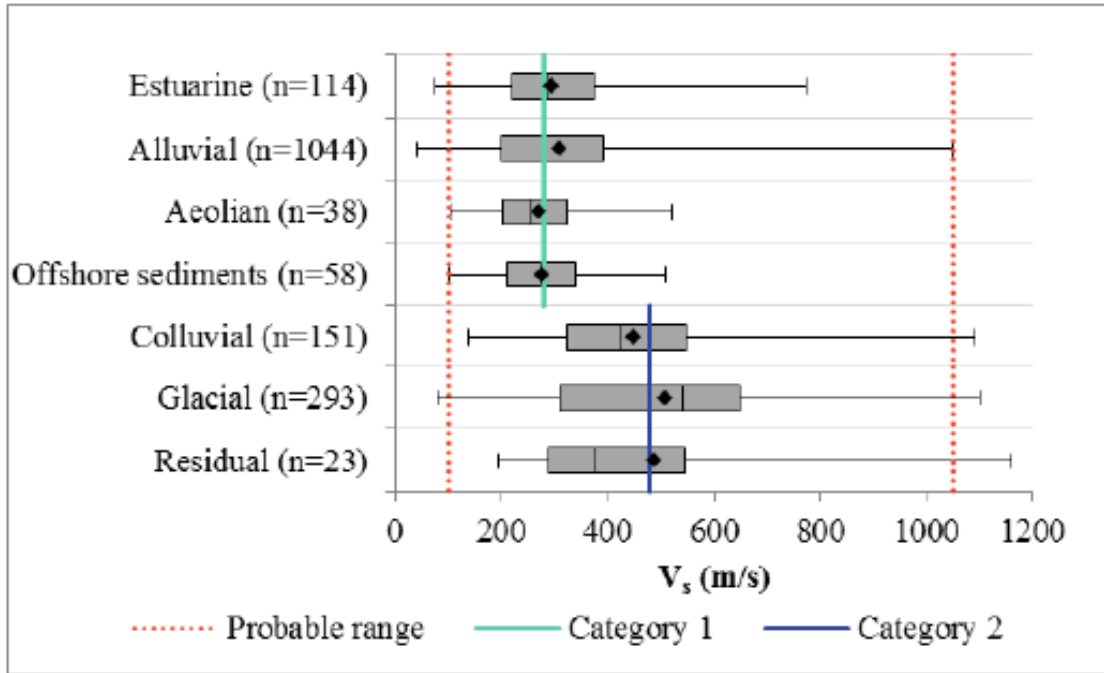


Figura 13. Resultados del Vs30 para suelos según su ambiente de formación. **Obtenido de (Campbell, 2014)**

2.6 Propiedades geomecánicas del suelo

Para caracterizar los suelos no granulares, se realizan ensayos de corte directo, granulometría, cálculos del límite líquido (LL), límite plástico (LP) e Índice de plasticidad (IP), según las normativas ASTM D 3080.0f 03, ASTM D2487-06 y ASTM D4318 respectivamente. Las propiedades de suelos arcillosos, dependen de gran manera de la humedad y son complejos mineralógicamente más complejos que los suelos granulares. Las propiedades de suelos arcillosos, dependen de gran manera de la humedad y son complejos mineralógicamente más complejos que los suelos granulares, por lo que el rango de valores es mayor, que el de los suelos granulares, dichas propiedades dependen de las características de origen, como también a las condiciones climáticas (Price, 2009). Estas variaciones de valores quedan evidenciadas en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Terminología para densidad relativa y propiedades en común para suelos granulares como la arena limo y grava. (Price, 2009)

Densidad relativa (%)	Peso unitario seco	Φ (°)	Valor N del SPT
0 - 15	<14	< 28	0 - 4
15 - 35	14 - 16	28 - 30	4 - 10
35 - 65		30 - 36	10 - 30
65 - 85	16 - 17.5	36 - 41	30 - 50
85 - 100		>41	>50

Tabla 3. Algunas propiedades de suelos limosos y arcillosos. (Price, 2009)

Propiedad	Limo	Arcilla
Gravedad específica	2,63 - 2,67	2,55 - 2,76
Densidad (kN m^{-3})	17, 65 - 21 ,2	14,5 - 21,2
Índice de vacío	0.34 - 0.82	0,42 - 0,95
Límite líquido (%)	24 - 36	>25
Límite plástico (%)	14 - 25	>20
Cohesión (kN m^{-2})	<70	15 - 200
Ángulo de fricción (°)	25 - 35	4 - 17

2.7 Métodos de estabilidad de taludes

El método de Fellenius (Ec.5), tiene como requisito considerar una sección transversal representativa del talud, en donde el suelo que se encuentra dentro de la superficie de rotura dividida en dovelas como se muestra en la Fig. (14). Este método considera una falla circular y supone que las fuerzas entre las dovelas se anulan entre si.

Tanto el método de Bishop (Ec.6) como el de Janbú (Ec.7) son exclusivos para suelos cohesivos-friccionantes drenados, por lo que si se estudia otro suelo se tendrá que implementar otro método. Ambos métodos se basan en la fuerza horizontal entre las dovelas, pero el método de Janbú no considera la fuerza de corte, además de que las superficies potenciales de falla (SPF), no necesariamente es circular. (Sanhueza, 2013)

Para los taludes el factor de seguridad (FS) varía entre los 1,1 hasta los 1,5 dependiendo del tipo de obra, si son una obras temporales o permanentes, En el caso de laderas inestables de grandes dimensiones, exigir un factor de seguridad de 1,5 puede suponer que la ejecución de las medidas de estabilización sea muy costosa provocando la inviabilidad del proyecto, por lo que el factor de seguridad, dependerá de caso nos encontramos en base al problema que se está afrontando. No olvides que, cuando hablamos de normativa, normalmente nos referimos al caso de taludes de una escala limitada, usuales de obras lineales como carreteras o vías de ferrocarril. En nuestro caso utilizaremos como factor de seguridad crítico el valor de 1,5.

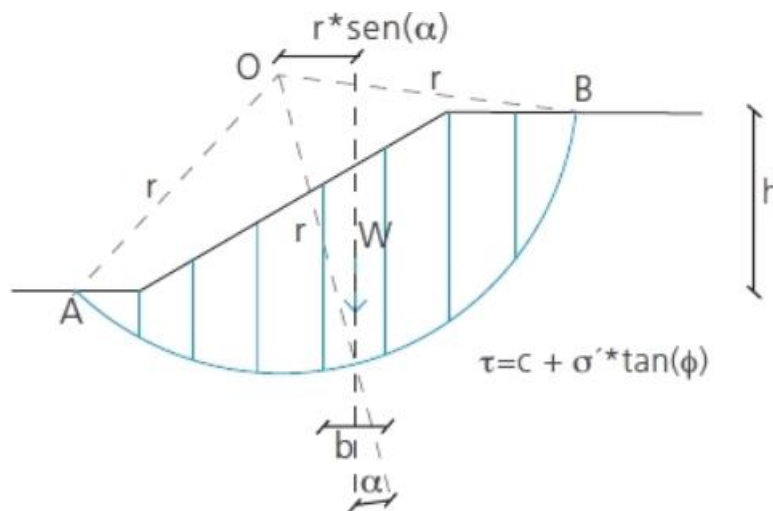


Figura 14. Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius. **Obtenido de (Sanhueza, 2013)**

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c \Delta l + W_n \cos(\alpha_n) \tan \phi]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin(\alpha_n)} \text{ Ec. (5)}$$

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [cb + W_n \tan(\phi)] \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} [W_n \sin \alpha_n]} \text{ Ec. (6)}$$

$$FS = \frac{f_0 \sum \left\{ [cb + W \tan \phi] \frac{1}{\cos(\alpha) m \alpha} \right\}}{\sum W \tan(\alpha)} \text{ Ec. (7)}$$

3. METODOLOGÍA

Para el trabajo de campo se utilizó el equipo marca Geode Es-3000. Primero se utilizarán sensores de 4.1 Hz de frecuencia separados de 3 m. y 5m. entre ellos los que serán ubicados en líneas rectas de 72 m. y 118 m. respectivamente Fig. (15), estas son llamadas líneas de refracción, luego se medirá perpendicular a esta última. Para ello se realizarán tres perturbaciones de 3 golpes cada una en las líneas de refracción, primero a una distancia de 3 m. del punto inicial, luego en el punto medio y el tercero a 3 m. del último punto. Para ello se utilizó:

- Fuentes de impacto: martillo. La energía transmitida al suelo por este tipo de fuente no es muy grande, por lo que se apilarán 4 golpes para modelar mejor las llegadas y suprimir el ruido.
- Unidad de apilamiento y digitalización: Corresponde a la unidad donde se adquiere, digitaliza y procesan los datos, esta tiene puertos especializados para recibir las señales enviadas por los geófonos; las señales son filtradas y digitalizadas.
- Cables sísmicos: se usan dos cables para conectar los geófonos. Cada cable contiene a su vez cableado para llevar la señal de cada geófono a la unidad de adquisición.
- “Trigger”: Cable conectado apropiadamente a la fuente sísmica, de tal manera que en el instante en que se golpea el suelo con el martillo, el sistema de registro empieza a grabar.

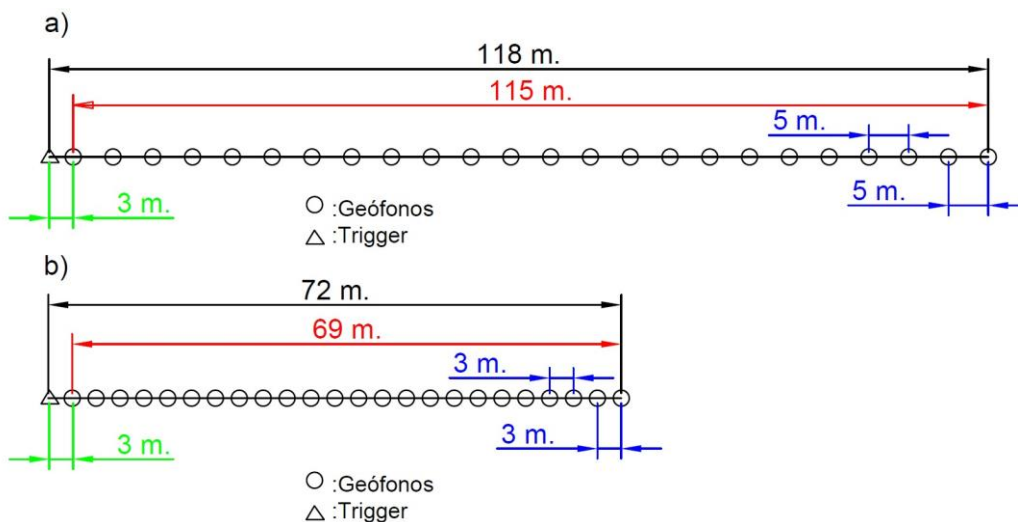


Figura 15. Disposición de arreglos lineales usados a) línea con espaciamiento de 5 m.
 b) línea de espaciamiento de 3 m. (AutoCAD 2023)

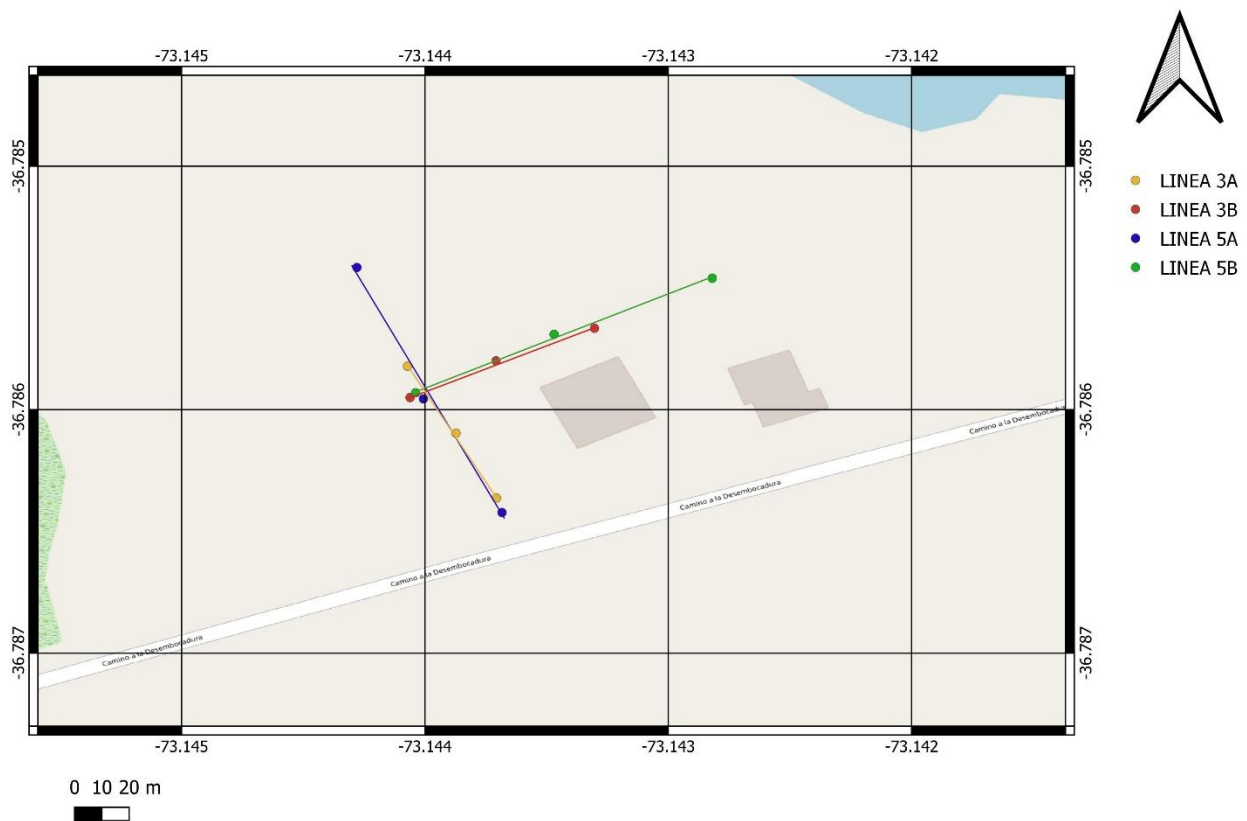
Una vez se obtuvo el resultado del sitio, se realizó un estudio geofísico-geotécnico, del área de estudio, mediante el software SeisImager/SW, con el objetivo de obtener el valor real del V_{S30} en el sector.

3.1 Ubicación del muestreo de datos

La ubicación de los shot sísmicos realizados se muestra en la Tabla 4, coordenadas UTM huso WGS 84/ zona 18S, los cuales se ven representados en la Fig. (16).

Tabla 4. Ubicación toma de resultados.

Puntos	Este	Norte
3A-1	665635	5927219
3A-2	665620	5927249
3A-3	665603	5927280
3B-1	665604	5927266
3B-2	665636	5927282
3B-3	665672	5927296
5A-1	665585	5927325
5A-2	665609	5927265
5A-3	665636	5927213
5B-1	665606	5927268
5B-2	665658	5927284
5B-3	665716	5927318


Figura 16. Ubicación representativa de las líneas realizadas. QGIS 3.16.15

3.2 Modelación de un talud

Con los resultados ya obtenidos del ensayo MASW, se caracterizará el suelo, mediante el Decreto Supremo N°61, mientras la modelación del comportamiento de la estabilidad del talud, se realizó a través de la utilización del programa Slide 6.0, aplicando los métodos de Bishop simplificado, Janbú y Fellenius (Fig. 17). Para validar los resultados obtenidos, se asumen una serie de condiciones iniciales, las cuales guardan directa relación con lo constatado, tanto en datos bibliográficos como también vistos en terreno. Las consideraciones iniciales de la modelación geotécnica son las siguientes:

- El material se considera homogéneo
- Condiciones drenadas.
- No se incluye la presencia de cargas sísmicas, puntuales ni distribuidas.
- Humedad del 20 %
- La altura del nivel freático para el caso sin agua es 0

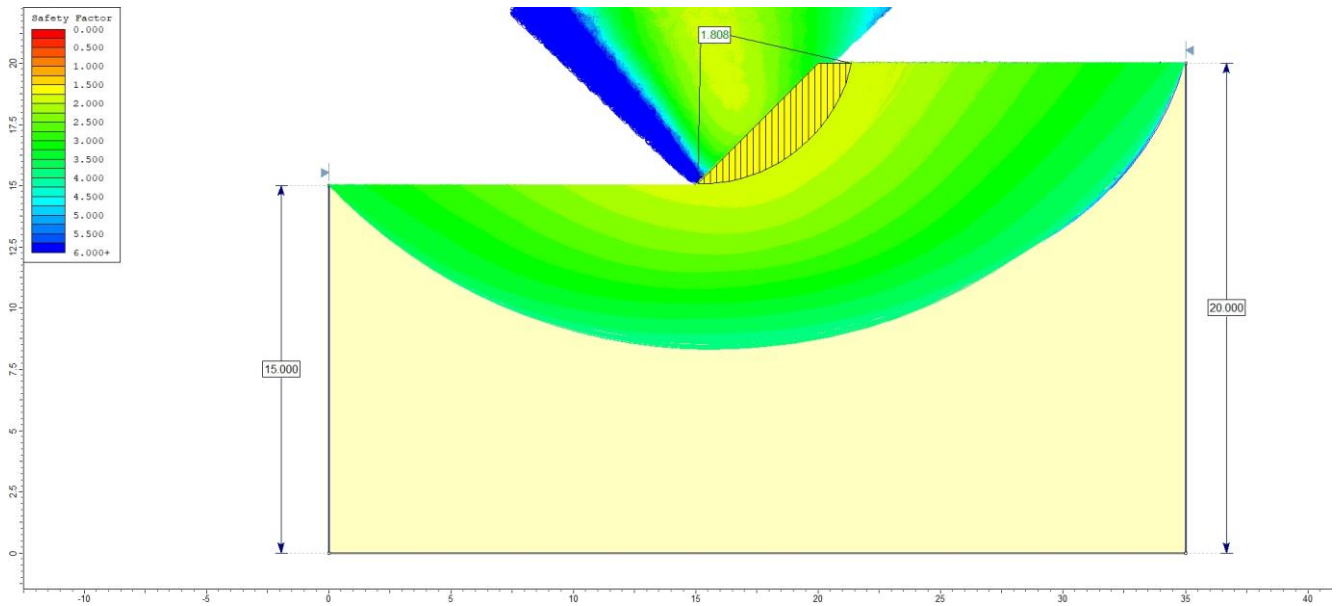


Figura 17. Análisis de la estabilidad de un talud, según el método de Fellenius ($h=5$ metros; $\phi=45^\circ$). Slide 6.0

4. RESULTADOS E INTERPRETACIONES

4.1 Resultados del ensayo MASW

A continuación, se presentan los resultados del ensayo MASW representado en el valor promedio del V_{S30} (Tabla 5), por ejemplo, en el caso de la línea A-3m corresponde a 243 m/s y para la línea B-3m de 235 m/s (Fig. 18 y Fig. 19 respectivamente), en el caso de las líneas A-5m y B-5m (Fig. 20 y Fig. 21 respectivamente) presentan valores de V_{S30} mayor al de 180 m/s y menor a 350 m/s, durante toda su extensión, lo que categoriza al suelo en el peor de los casos como tipo D o C.

Tabla 5. Tabla resumen de V_{S30} obtenidos

Líneas	Valor del V_{S30} (m/s)
A-3m	243
A-5m	237
B-3m	235
B-5m	240

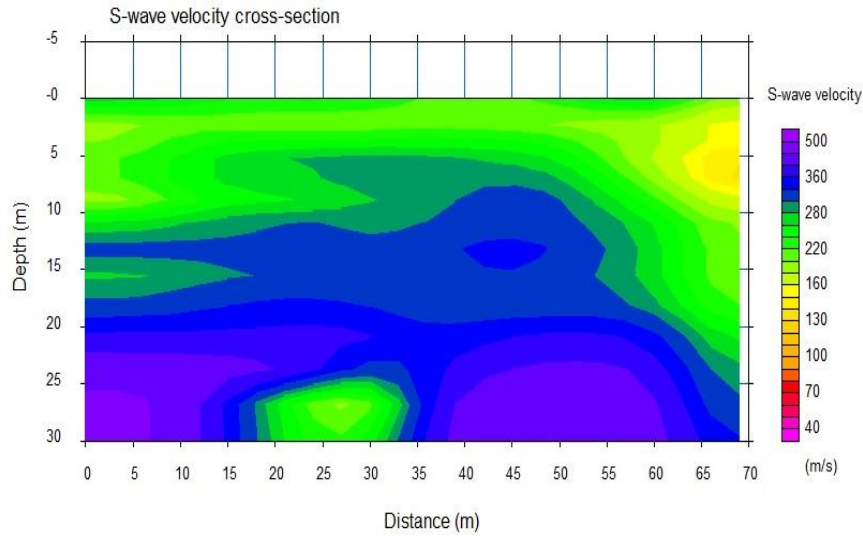


Figura 18. Vs30 obtenidos línea A-3m. Seismager

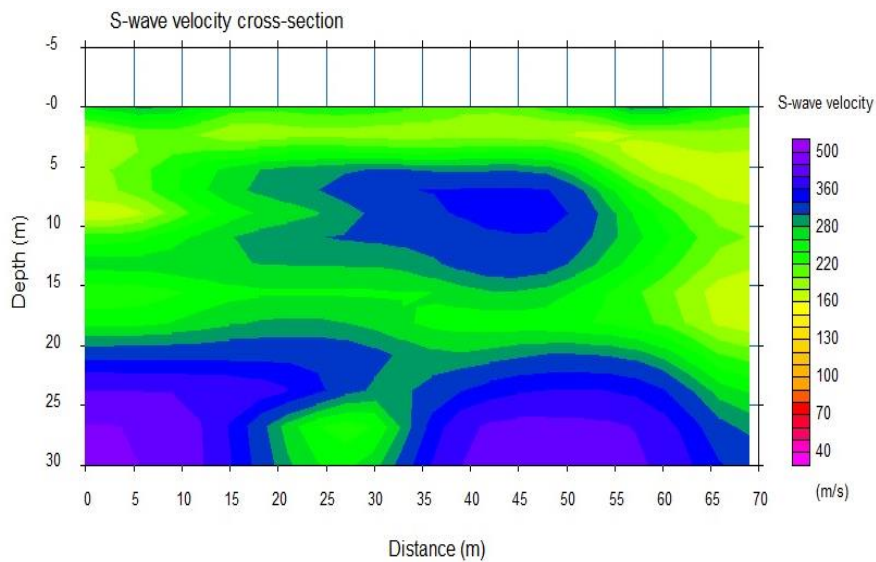


Figura 19. Vs30 obtenidos línea B-3m. Seismager

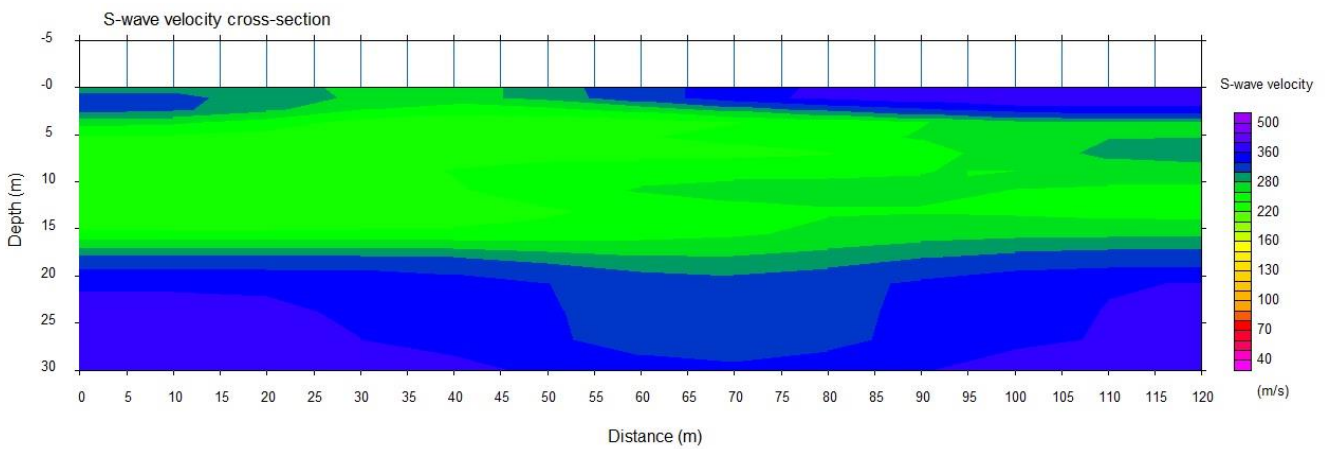


Figura 20. Vs30 obtenidos línea A-5m. Seismager

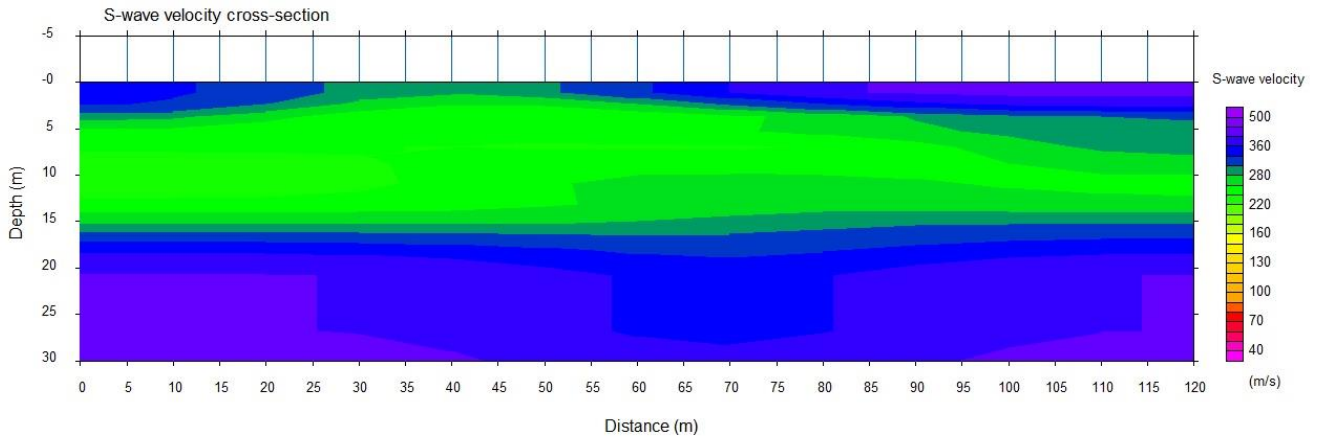


Figura 21. Vs30 obtenidos línea B-5m. Seismager

Debido a que los valores de Vs30, son menores o igual a 500 m/s a lo largo de todo el perfil, podemos decir, que en la zona donde se realizó el método MASW, no había presencia de la serie oriental, la cual está principalmente conformada por rocas metamórficas, esto se aprecia debido a que el valor del Vs30, deberían ser mayores a los obtenidos y que, en dicho sector, se encuentran rocas sedimentarias, como pueden ser la formación Quiriquina o la formación Curanilahue, o en su defecto una zona de depósitos continentales.

4.2 Resultados del análisis de la estabilidad de taludes.

Los resultados arrojados por los diferentes métodos de estabilidad (Bishop, Janbú y Fellenius), no presentan grandes diferencias en el valor del FS, para un talud sin presencia de agua de pendiente de 45° (Tabla 6.). Los métodos de Bishop y Fellenius, son quienes poseen los valores más conservadores. A diferencia, el método de Janbú (Fig. 22), el cual en general presenta una sobrestimación de la estabilidad entorno al 3%, respecto a los resultados obtenidos en los dos métodos restantes.

Tabla 6. Tabla resumen de los FS para un talud de pendiente de 45°, con respecto a la altura (m), nivel freático en el talud (u), según los métodos de Bishop simplificado, Janbú simplificado y Fellenius.

Cohesión (kN/m ²)	ϕ (°)	Altura (m)	Agua	Bishop S.	Janbú S.	Fellenius
10	25	3	No	1,913	1,854	1,862
			Si	1,615	1,514	1,619
		4	No	1,622	1,564	1,565
			Si	1,338	1,276	1,344
		5	No	1,412	1,384	1,393
			Si	1,180	1,113	1,179
14	29	3	No	2,505	2,445	2,444
			Si	2,148	2,057	2,148
		4	No	2,094	2,027	2,034
			Si	1,763	1,687	1,771
		5	No	1,867	1,794	1,808
			Si	1,180	1,113	1,179
22	33	3	No	3,537	3,460	3,454
			Si	3,104	2,977	3,102
		4	No	2,912	2,836	2,840
			Si	2,512	2,418	2,525
		5	No	2,564	2,481	2,495
			Si	2,169	2,077	2,175

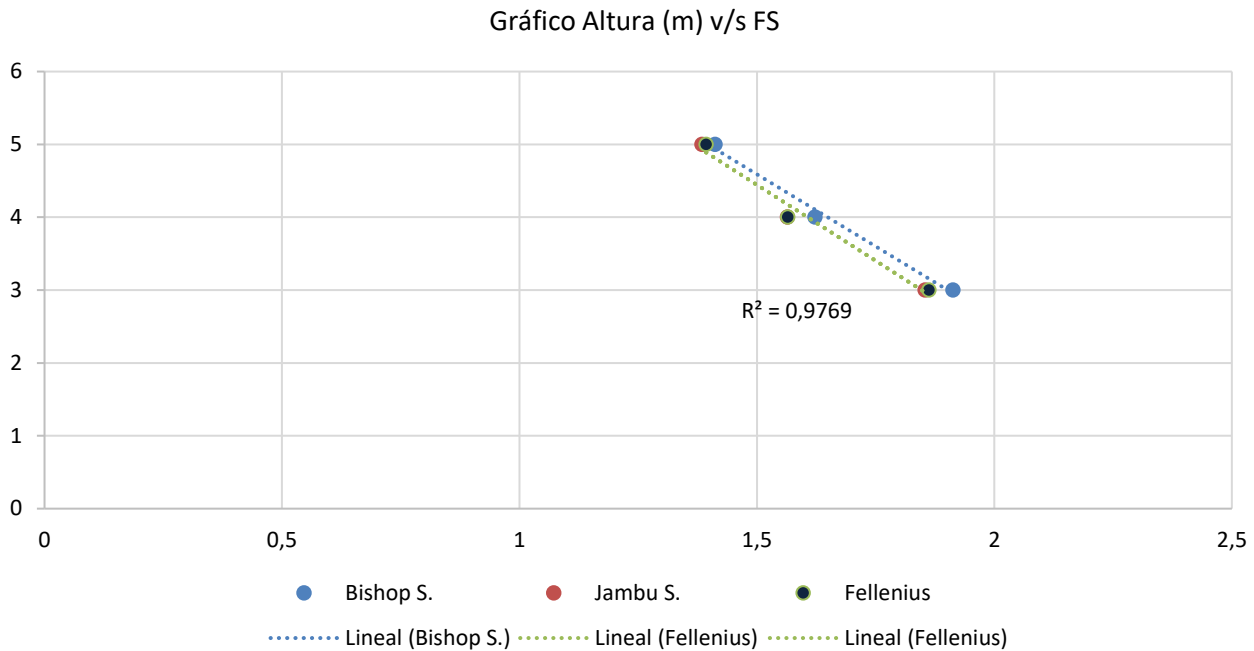


Figura 22. Gráfico altura (m) v/s FS, según los métodos de Bishop simplificado, Janbu simplificado y Fellenius.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados del método análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y de la estabilidad de talud, indican lo siguiente:

- En la zona de estudio los valores del V_{S30} , varían desde los 180 m/s hasta los 500 m/s, de esta manera está el suelo puede ser catalogado, según el decreto supremo N°61, como un suelo medianamente denso firme o un suelo tipo D, si se realiza un estudio de mecánica de suelos en algunos sectores, incluso puede ser catalogado como suelo tipo C.
- Muestran que en donde se realizó, el método MASW, puede ser categorizado mediante el V_{S30} , en 3 zonas, esto puede ser debido a la compactación natural en el suelo, o bien en la zona existen diferentes tipos de material.
- Si el suelo es categorizado como de tipo D o inferior, en caso de temporada normal de lluvia un talud de una altura menor a 3 metros y una pendiente de 45° , el valor del FS, es cercano o superior a 2, lo que implica una muy baja probabilidad de falla, mientras que, para una temporada muy intensa de lluvia, en donde la altura de la napa freática alcance valores cercanos a la corona del talud, no es concluyente ya que va a depender de las propiedades geomecánicas del suelo que conforma el talud.
- Si el suelo es categorizado como de tipo D o inferior, en caso de lluvia intensa un talud de una altura de 4 metros y una pendiente de 45° , no es concluyente, debido a que los valores son cercanos al FS crítico, por lo que deberá realizarse un estudio de mecánica de suelo, para conocer los valores reales de c y ϕ , y hacer los cálculos de estabilidad de un talud.
- Si el suelo es categorizado como de tipo D o inferior, en caso de una temporada de lluvia un talud de una altura 5 metros o mayor y una pendiente de 45° , el valor del FS en algunos casos son menores a 1, por lo que, deberá realizarse un estudio de mecánica de suelo, para conocer los valores reales de c y ϕ , y hacer los cálculos de estabilidad de un talud.
- Utilizar el valor del V_{S30} , para estimar las propiedades de un talud y por ende su comportamiento frente a distintos factores que puedan afectar a su estabilidad, como por ejemplo el efecto de una temporada intensa de lluvia, puede ayudar a municipalidades, ONEMI, para mejorar los mapas de riesgos, con la finalidad tener una mejor visión, en qué lugares focalizarse en casos de emergencia.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM D3080–03: “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”.
2. ASTM D2487-06: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
3. ASTM D4318: Standard Method of Test for Liquid Limit of Soils
4. Ashraf, M., Kumar, N., Yusoh, R., Hazreek, Z. and Aziman, M., 2018. Site Classification using Multichannel Channel Analysis of Surface Wave (MASW) method on Soft and Hard Ground. *Journal of Physics: Conference Series*, 995, p.012108.
5. Campbell, N., Fenton C., Tallett-Williams S., 2014. An investigation into the effects of material properties on shear wave velocity in rocks and soils. Imperial College London, United Kingdom.
6. Humire, F., Saéz, E., Leyton F., 2015. Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30. Instituto de construcción.
7. Kayal, J.R., 2006. Seismic Waves and Earthquakes Location. Geological Survey India. <http://www.wescweb.wr.usgs.gov/Share/money/SriII2.pdf>.
8. Mardones Flores, M., 2010. Procesos de remoción en masa asociados al sismo de 8.8 mw del 27/F 2010 en el litoral de Concepción, Chile. *Sociedad Hoy*, (19), 11-32.
9. Nazarian, S., Stokoe, K. H., II, and Hudson, W. R., 1983. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: Transport. Res. Record, 930, 38-45.
10. Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64 (3), 800–808.
11. Peredo, V., 2011. Aplicación del método SASW en suelos. Extracto de Memoria para optar al título de Ingeniera Civil, facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile, Santiago.
12. Price, D., 2009. Engineering Geology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
13. Quezada J., 1996. Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. Extracto de Memoria para optar al título de Geólogo, facultad de ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Concepción.
14. Rivas, R., 2016. Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo placa. Extracto de proyecto para Extracto de Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, facultad de Ingeniería, departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad del Bío-Bío, Concepción.
15. Roma, V., Rix G., Lai C., Hebel, G., 2002. Geotechnical Soil Characterization Using Fundamental and Higher Rayleigh Modes Propagation in Layered Media. London.
16. Sanhueza, C., Rodríguez L., 2013. Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales, revista de la Construcción vol.12 no.1 Santiago abr. 2013
17. Socco, L. and Strobbia, C., 2004. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 2(4), pp.165-185.
18. Strobbia C., 2003. Surface wave methods: acquisition, processing and inversion. PhD dissertation Politecnico di Torino.
19. Stinnesbeck, W., 2003. Formación Quiriquina en su localidad tipo, Isla Quiriquina. Excursión intracongreso E.IC. 4. Concepción, VIII Región del Bío-Bío, Chile.
20. Stokoe, K.H., II and Santamarina, J.C., 2000. “Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering”. Plenary Paper, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000, Melbourne, Australia, pp. 1490-1536.