

Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Punta Arenas, Chile

Seismic microzonation proposal for the city of Punta Arenas, Chile

Pablo Villarroel, Francisco Nocera & Ramón Carrasco

Geotecnia Patagonia Ltda, Chile. pvillarroel@geotecniapatagonia.cl, fnocera@geotecniapatagonia.cl, rcarrasco@geotecniapatagonia.cl

RESUMEN: La evidencia sísmica indica que la ciudad de Punta Arenas ha experimentado dos grandes eventos sísmicos en su historia, ocurridos en los años 1879 y 1949, y asociados a deformaciones corticales de la Falla Magallanes-Fagnano, ubicada al sur de Chile. Este último terremoto, provocó grandes deslizamientos de tierra en los canales australes, tsunamis locales en distintas bahías del Estrecho de Magallanes y serios problemas de infraestructura en la ciudad. Este trabajo, presenta una propuesta de zonificación sísmica para la ciudad de Punta Arenas, ubicada en la Patagonia Chilena. Para ello, se utilizaron los resultados de más de 200 mediciones geofísicas para la obtención del perfil de velocidad de onda de corte y más de 200 ensayos de Nakamura para la obtención del período fundamental del suelo, complementados con antecedentes geológicos y resultados de sondajes geotécnicos. Se entregan mapas de interpolación para ambas variables, y un mapa de clasificación sísmica preliminar del terreno de fundación, según la norma sísmica chilena. Finalmente, se pudo identificar aquellas zonas que serían más susceptibles a efectos adversos ante una sollicitación dinámica, predominando entre otros, los efectos probables de licuación en las unidades arenosas que conforman una gran extensión de la ciudad.

PALABRAS CLAVE: Microzonificación Sísmica, Clasificación Sísmica, Punta Arenas, Falla Magallanes-Fagnano. Licuación.

ABSTRACT: Seismic evidence indicates that the city of Punta Arenas has experienced two major seismic events in its history, which occurred in the years 1879 and 1949, and associated with cortical deformations of the Magallanes-Fagnano Fault, located in southern Chile. This last earthquake caused large landslides in the southern channels, local tsunamis in different bays of the Strait of Magellan and serious infrastructure problems in the city. This paper presents a seismic microzonation proposal for the city of Punta Arenas, located in Chilean Patagonia. For this, the results of more than 200 geophysical measurements were used to obtain the shear wave velocity profile and more than 200 Nakamura tests to obtain the fundamental period of the soil, complemented with geological background and results of geotechnical drilling. Interpolation maps are provided for both variables, and a preliminary seismic classification map of the foundation soil, according to the Chilean seismic standard. Finally, it was possible to identify those areas that would be most susceptible to adverse effects due to seismic solicitations, predominating among others, the probable effects of liquefaction in the sandy units that make up a large area of the city.

KEYWORDS: Seismic Microzonation, Seismic Classification, Punta Arenas, Magallanes-Fagnano Fault, Liquefaction of soils.

1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Punta Arenas, ubicada en el Estrecho de Magallanes, presenta una compleja conformación de sus suelos, donde tal como su nombre lo indica, predominan las formaciones arenosas, aunque también se encuentran otras unidades compuestas por matrices de suelo fino, suelo orgánico y hasta evidencia de afloramientos de roca sedimentaria de tipo Arenisca. Esta coexistencia de distintos tipos de suelos ha sido abordada en distintos trabajos de investigación que buscan acotar y definir las unidades geotécnicas de la ciudad. En este trabajo se abordan principalmente las variables que definen la clasificación sísmica del suelo según la normativa chilena.

Históricamente se conocen 2 grandes eventos sísmicos que han afectado la ciudad, que ocurrieron en los años 1879 y 1949, y ambos de una magnitud cercana a los $M=7.5$ a 7.8 (Lomnitz, 1970). El primero de ellos presenta escasos reportes, donde la ciudad tenía apenas 30 años de existencia, mientras que el segundo resulta de mayor interés, pues existió evidencia de daños en edificaciones del casco histórico de la ciudad, por ejemplo: la torre campanario del Santuario María Auxiliadora; edificio del Club Dálmatas de Socorros Mutuos; Edificio Surco; entre otros. En reportes de diarios locales se presentan testimonios de pobladores del sector de

Caleta María en Tierra del Fuego, que reportaron “*hundimientos de terrenos y presencia de agua que salía a borbotones desde las grietas*”, a su vez, también se menciona que, tras el evento sísmico, diversas calles de Punta Arenas quedaron cubiertas de arena (La Prensa Austral, 1949).

Estos antecedentes resultan particularmente interesantes, pues abre la interrogante si las consecuencias antes descritas, pudieran tratarse derechamente de licuación de suelos, fenómeno que si bien ya había sido reportado cerca del año 1920 (Hazen, 1920) no fue hasta el año 1964, tras los terremotos de Alaska y Niigata que despertó un mayor interés en la comunidad geotécnica internacional. Especialmente en Chile, recién tras el terremoto del 27-F del año 2010, y ante las múltiples evidencias de licuación observadas en distintos puntos del país (González, 2015), es que el fenómeno toma gran relevancia, lo que derivó incluso en el cambio de la normativa chilena para la clasificación sísmica de los suelos, incorporando por primera vez parámetros asociados a la rigidez del suelo como lo es la velocidad de onda de corte V_{s30} , mediante la publicación D.S.61 del año 2011, que modificó la norma NCh 433 del año 1996.

Desde 1949 a la fecha, la ciudad de Punta Arenas ha crecido en aproximadamente 3 veces su superficie, por lo tanto, resulta evidente que una buena proporción de la ciudad no ha

experimentado ningún evento sísmico de importancia. Además, gran parte de la infraestructura crítica de la ciudad se ubica sobre unidades que pudieran concentrar el mayor riesgo sísmico, siendo las matrices de gas natural que abastecen a la ciudad; tendidos de energía eléctrica; colectores y plantas de aguas servidas; entre otros, los que pudieran desencadenar las mayores consecuencias en la ciudad.

Este estudio nace de la necesidad de poder contar con información más precisa respecto a las distintas unidades geotécnicas que conforman la ciudad, clasificándolas según su comportamiento sísmico, e identificando aquellas zonas que presentan un mayor potencial de susceptibilidad a daños, permitiendo ser una herramienta útil para la implementación de medidas o planes de acción ante eventos de esta naturaleza.

Para dicho objetivo se han considerado más de 206 mediciones de velocidad de onda de corte V_{s30} ; 213 mediciones de período predominante (T_g) mediante la técnica de Nakamura o H/V (Nakamura, 1989); e información de más de 30 sondeos realizados en zonas potencialmente licuables. La conjunción de todas estas variables permite clasificar las unidades geotécnicas de la ciudad de acuerdo a la nueva propuesta de clasificación Sísmica de la Norma NCh 433 de Diseño Sísmico de Edificios (prNCh 433, 2023) y ya adoptada en la Norma NCh 2369 de Diseño Sísmico de instalaciones industriales, las que incluyen el período fundamental como criterio de clasificación sísmica del suelo.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO Y SÍSMICO

2.1 Unidades geológicas

La ciudad de Punta Arenas y la cuenca del Estrecho de Magallanes presentan principalmente rocas sedimentarias, tanto de origen marino como continental. La unidad geológica más antigua que aflora en el sector es denominada Formación Loreto, la cual corresponde a una secuencia de areniscas y arcillolitas de aproximadamente 800 m de espesor, de edad Eoceno Tardío (Otero et al., 2012). Sobre este basamento rocoso fundamental, sobreyacen sedimentos no consolidados constituidos por depósitos cuaternarios, de orígenes aluviales, coluviales y de remoción de masa, y en menor proporción, fluvioglaciales, delataicos, litorales o indiferenciados (SERNAGEOMIN, 2003). Estos sedimentos forman una unidad estratigráfica, conformando el área sobre la cual se asienta la ciudad de Punta Arenas (Prieto, 1992).

Ahora bien, en el sector costero de la ciudad, se registran sedimentos glaciolacustres al sur, y avanzando por el borde costero hacia el norte, es posible evidenciar formaciones conformadas por depósitos de sedimentos deltaicos de diferentes cursos de aguas proveniente del sector poniente de la ciudad. Ya hacia el sector norte, se registran terrazas de sedimentos retrabajados por el oleaje, producto de transgresiones y regresiones marinas, presentando en su mayoría, sedimentos granulares, constituidos por arenas limpias uniformes y en menor cantidad gravas, que al ser geoforras recientes, incluyen substratos de compacidades bajas y saturados (Uribe, 1982).

Al alejarnos del sector costero, hacia el poniente de la ciudad, comienza a aflorar el basamento rocoso fundamental de la zona, denominado Formación Loreto, principalmente localizado hacia el sector sur de la zona urbana. En gran proporción se registran depósitos morrénicos, y en los sectores aledaños a los cursos de agua superficial, importantes depósitos de fluviales, conformados principalmente por bancos de arenas, predominando siempre el

afloramiento del basamento rocoso hacia el cerro, y la aparición de sedimentos de transición marinos fluviales hacia el sector costero. Ya hacia el norponiente de la ciudad de Punta Arenas, se registran diferentes formaciones, predominando los depósitos morrénicos, sedimentos glaciolacustres, fluviales y en menor proporción coluviales, con la aparición de importantes extensiones de depósitos orgánicos, en lo que se logran visualizar zonas de turbales. En la Figura 1 se observa la geología correspondiente a la ciudad de Punta Arenas y sus alrededores.

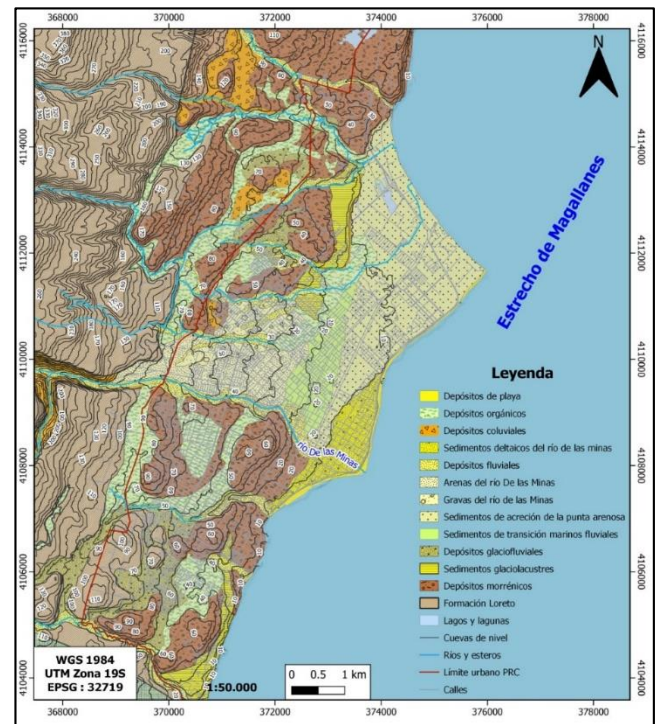


Figura 1. Mapa geológico de la ciudad de Punta Arenas y sus alrededores.

2.2 Antecedentes sísmicos

A diferencia de la tradicional falla de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, responsable de la mayoría de los eventos sísmicos de Chile, la zona austral del país se encuentra inmersa en un ambiente tectónico diferentes, en el cual se presenta la interacción de tres placas tectónicas, la Antártica, Sudamericana y Escocia.

La placa Antártica subducta por debajo de las otras 2 placas a tasas de desplazamiento relativo que fluctúa entre 1.9 cm/año para la Sudamericana y 1.3 cm/año para la placa Escocia (Cisterna, 2008). Por su parte, las placas Sudamericana y Escocia presentan un tipo de falla transformante, la cual es conocida como Falla Magallanes-Fagnano, con una tasa de desplazamiento relativo de 0.6-0.7 cm/año (Cisternas & Vera, 2008). Sin embargo, estudios recientes establecen que el desplazamiento relativo entre placas es en promedio 1.05 cm/año, correspondiente a un aumento de un 50% aproximadamente de lo estimado (Sandoval et al, 2020), por lo que, la ocurrencia de un evento sísmico asociado a este tipo de mecanismo de falla podría presentarse antes de lo presupuestado. Aun así, continúa siendo una tasa de movimiento entre placas relativamente bajo, a comparación, por ejemplo, de la falla de

subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, responsable de la mayoría de los eventos sísmicos ocurridos en Chile, con una tasa de desplazamiento relativo del orden de 10 cm/año (Cisternas & Vera, 2008).

Este complejo sistema de fallas, es una estructura activa con un régimen de movimiento transcurrente sinistral, con una pequeña componente de compresión, y el desplazamiento relativo entre bloques tendría una importante componente vertical. La longitud total de este sistema de fallas es relativo a cada uno de los segmentos que la conforman, con una longitud total aproximada de 600 km, desde el Océano Pacífico hacia el Atlántico.

En la Figura 2 se presenta un mapa tectónico simplificado de la zona austral de Chile, en la cual se logra apreciar el movimiento relativo entre placas. Los vectores con números muestran el movimiento relativo entre placas en cm/año (Cisternas & Vera, 2008), y el círculo negro cerca de la salida del Estrecho de Magallanes hacia el Océano Pacífico, un punto triple que queda definido por las tres placas y donde culmina la Falla Magallanes-Fagnano.

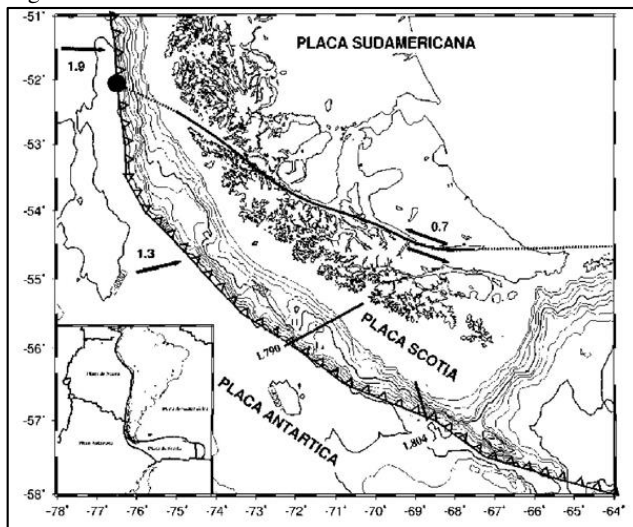


Figure 2. Mapa tectónico simplificado de la zona austral de Chile (Cisterna, 2008).

En general, la Región de Magallanes es percibida como una zona asísmica, comparada con el resto del territorio nacional. La baja tasa de movimiento entre las placas Sudamericana y Escocia, tiene directa relación con la baja sismicidad a lo largo de la falla transformante Magallanes-Fagnano (Cisterna, 2008). Ahora bien, pese a este antecedente, se tiene registro de la ocurrencia de grandes eventos sísmicos en la zona, asociado a esta falla. Históricamente, se reportan 2 grandes terremotos los cuales han presentado una intensidad de importancia en la ciudad de Punta Arenas, ocurridos en los años 1879 y 1949.

Con fecha 02 de Febrero de 1879, cerca de las 03.30 horas de la mañana, se genera el primer terremoto del que exista registro en la Región de Magallanes, ubicando su epicentro probablemente en la Falla de Magallanes-Fagnano, al sur de la ciudad de Punta Arenas. Poco se sabe acerca de este evento sísmico, ya que, en aquel entonces, la población en la región era escasa, las construcciones correspondían principalmente a viviendas menores, y no se contaba con los medios para generar los registros necesarios para el posterior análisis. A pesar de esta situación, se ha logrado

establecer una magnitud estimada entre $M_s=7-7.5$ (Medina et., al, 2016), con valores de intensidades de grado igual a VII en la ciudad de Punta Arenas y VIII en la Isla de Tierra del Fuego (Lomnitz, 2004) en la escala de Mercalli.

Luego de una laguna sísmica de 70 años, 2 grandes terremotos, ocurridos con un par de horas de diferencia causaron estragos en la ciudad de Punta Arenas y, principalmente, en la Isla de Tierra del Fuego. El 17 de Diciembre de 1949, siendo las 02.55 horas, un primer movimiento telúrico se generaba en la región de Magallanes, con una magnitud de $M_w=7.7$. Unas cuantas horas después, siendo las 15.07 horas, un segundo evento era registrado con una magnitud $M_w=7.6$, ambos con su epicentro a unos 120 km al Suroeste de la ciudad de Punta Arenas y a unos 10 km de profundidad (USGS, 2023). Los sismógrafos de Huancayo (Perú) mostraron que el segundo evento produjo mayores amplitudes de ondas superficiales, lo cual se tradujo en mayores intensidades y con ello, mayores daños asociados (Medina et., al, 2016). Entre ellos, se pueden destacar los cortes de ruta al este del Lago Fagnano, deslizamientos horizontales estimados en 5 m, los cuales provocaron la muerte de 03 trabajadores en la Estancia San Nicolás, a unos 150 km al Suroeste de Punta Arenas (Lomnitz, 2004), y algunos registros de licuación de suelos en la llanura aluvial de Río Grande (Argentina) (Medina et., al, 2016), ubicado aproximadamente a unos 100 km al norte de la Falla Transformante Magallanes-Fagnano. Mientras que, en la ciudad de Punta Arenas, se registraron daños en diferentes estructuras del casco histórico de la ciudad, como también, la evidencia de posibles licuaciones de suelos en diferentes sectores de la ciudad y en el sector de Caleta María, en tierra del Fuego.

Otros eventos sísmicos han sido registrados en fechas posteriores, los que han tenido su epicentro en diferentes ubicaciones a lo largo de la falla Magallanes-Fagnano, los cuales, debido a su baja magnitud y la distancia, no han tenido relevancia en la ciudad de Punta Arenas. La Figura 3 (Perucca L., et al, 2016) muestra la ubicación epicentral de los terremotos registrados en Diciembre de 1949, numerados como (1) y (2), mientras que el (3) representa una réplica ocurrida el 30 de Enero de 1950, el cual registro una magnitud de $M_w = 6.8$ (USGS). Los círculos corresponden a la sismicidad reportada por el USGS (USA) reportada para la zona, y en los extremos de la falla, dos eventos moderados ocurrido en 1970 y 1972 (Forsyth, 1975).

2.3 Peligro Sísmico

Como ha sido mencionado, la principal fuente sismogénica corresponde a la falla transformante Magallanes-Fagnano, mientras que los grandes eventos sísmicos registrados han presentado profundidades menores, del orden de 10 km aproximadamente. La mayoría de las fallas corticales en Chile se deforman muy lentamente, por lo que, la influencia de estas fallas en la amenaza sísmica de una zona es menor, siendo una excepción la falla Magallanes-Fagnano, con periodos de retorno promedio de 1.000 años, mientras que las tasas anuales promedio para eventos característicos de las fallas corticales son del orden de 10^{-4} , es decir, periodos de retorno de 10.000 años (Medina y Harmsen, 2017).

Debido a los diferentes tipos de suelos y sus respectivas características, en el tiempo se han desarrollado diferentes estudios de peligro sísmico en la zona, los cuales mediante análisis probabilísticos de peligro sísmico (PSHA), han determinado demandas con valores máximos de aceleración del suelo (PGA) del

orden de 0.26 g a 0.28 g, asociados a una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, equivalente a un periodo de retorno de 475 años. Por su parte, estudios de amenaza sísmica en el extremo sur de Chile (Medina et al., 2016), han establecido valores de PGA que fluctúan entre 0.20 g a 0.25 g, para una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, correspondiente a un periodo de retorno de 2475 años. Estos valores se ajustan de forma adecuada con la aceleración efectiva máxima (A_0) de 0.3 g establecidos en las normas sísmicas Chilenas NCh433 y NCh2369, correspondiente a la zona sísmica N°2, a la cual pertenece la ciudad de Punta Arenas.

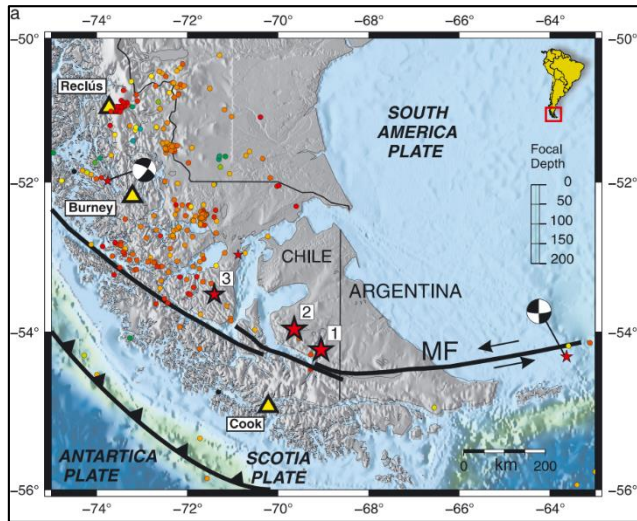


Figure 3. Ubicación epicentral de los terremotos más importantes asociados a la Falla Magallanes-Fagnano (Perucca et al, 2016).

3 METODOLOGÍA

3.1 Microzonificación Sísmica

El estudio para la propuesta de microzonificación sísmica de la ciudad de Punta Arenas, considera las recomendaciones del proyecto SESAME (SESAME, 2004), en el cual se realizó un completo estudio sobre la confiabilidad del método de Nakamura para la obtención del período fundamental, junto con información sobre perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad mediante metodologías ReMi.

A nivel mundial existen múltiples estudios y propuestas de microzonificación sísmica considerando metodologías directas como indirectas. La primera de ellas se considera la más compleja, puesto que requiere de un análisis muy detallado del comportamiento del subsuelo desde la zona de la ruptura hasta el lugar de interés, siendo necesario la obtención de señales sísmicas representativas, perfil de velocidad de onda de corte hasta la roca, curvas de degradación de los estratos, análisis de efectos 2D y 3D de propagación de ondas, entre otros. Por otro lado, la metodología indirecta busca obtener propiedades geotécnicas-dinámicas de los estratos mediante la aplicación de ensayos más sencillos y económicos, y que entreguen variables que permitan relacionar el comportamiento del subsuelo o bien inferir una mayor o menor amplificación de las ondas sísmica (Errázuriz, 2012).

Para dar contexto a los estudios de microzonificación sísmica realizados a nivel local, en la Tabla 1, se muestran algunos estudios

similares desarrollados para distintas ciudades del país, los cuales en general buscan identificar aquellas zonas que podrían presentar una mayor o menor demanda sísmica. Se observa que gran parte de los trabajos encontrados fueron desarrollados posterior a grandes eventos sísmicos, ya sea, al terremoto Mw 8.8 del Maule en el 2010, al Terremoto Mw. 8.2 de Iquique el 2014, y al Mw 8.3 de Illapel el 2015, todos con una dinámica de subducción. A su vez, también se observa que la mayoría de los trabajos utilizan solamente el parámetro T_g , esto debido a que es un ensayo que, en comparación a los ensayos para determinación de V_s30 , presenta mayor rapidez en su ejecución, es económico, y también permite correlacionar con otros parámetros sísmicos. Todos estos estudios presentan un análisis de las unidades geológicas que conforman la ciudad para una mejor interpretación de los datos obtenidos.

Tabla 1. Estudios de microzonificación sísmica en Chile.

Autor	Ciudad	Parámetros utilizados
Vivallos et al (2010)	Concepción	T_g (H/V)
Leyton et al (2011)	Santiago	V_s30 (estimado) y T_g (H/V)
Brantt, C. (2011)	Santiago: Buin y Paine	T_g (H/V)
Baquadano et al (2012)	Viña del Mar y Valparaíso	T_g (H/V)
Galvez, C (2012)	Lampa y Batuco	T_g (H/V)
Leyton et al (2012)	Concepción	T_g (H/V)
Alvarado, D (2012)	Valdivia	T_g (H/V)
Leyton et al (2013)	Talca y Curicó	T_g (H/V)
Becerra et al (2014)	Arica e Iquique	V_s30 y T_g (H/V)
Rauld et al (2015)	Viña del Mar	V_s30 (estimado)
Sepúlveda et al (2015)	San Antonio y Llolleo	V_s30 y T_g (H/V)
Aguirre et al (2021)	Reñaca y Concón.	T_g (H/V)

Tras el terremoto Mw 8.8 del Maule del año 2010, se modificó la norma NCh 433 mediante el DS61 del año 2011, incorporando por primera vez parámetros asociados a la rigidez: la velocidad de onda de corte de los primeros 30 m, V_s30 . Sin embargo, a los pocos años surgieron los primeros estudios que indicaban que la inclusión de este parámetro resultaba insuficiente y no presentaba por sí solo una adecuada correlación con otros parámetros de respuesta sísmica (Pinilla, 2012). A su vez, diversos estudios indicaban que la inclusión del período fundamental del suelo como complemento al V_s30 entregaba una mejor representación de las propiedades dinámicas del suelo y se correlacionaban mejor con las distintas medidas de daño instrumental. Es así que se pudo establecer que el parámetro V_s30 conjunto al T_g , permite relacionar de buena manera otras medidas sísmicas como la Intensidad de Arias (IA), el PGA y factor de amplificación promedio. A su vez, el T_g por sí solo muestra una buena correlación con la intensidad de cruces por cero y el desplazamiento máximo en superficie. (Errázuriz, 2012) (Godoy et al, 2015).

En cuanto a la obtención del período fundamental, en general está mayormente aceptado que la técnica H/V aplicada a registros de ruido ambiental propuesta por Nakamura entrega una buena estimación. De acuerdo a los registros utilizados para el proyecto SESAME, se observa que la razón de amplificación H/V obtenida a ruido ambiental presenta en general una sub-estimación respecto a la misma relación obtenida directamente de registros de sismos reales (SESAME, 2004).

Ante los múltiples estudios relativos a este método, resulta importante destacar que la amplitud de la relación H/V obtenida mediante método Nakamura aplicado a ruido ambiental, no deben ser utilizados para la interpretación de daños observados debido a sismos o terremotos, dado a que esta simplicidad de análisis deja de lado variables sobre la vulnerabilidad de las estructuras e información más detallada del subsuelo. Las razones espectrales H/V obtenidas de ruido ambiental usualmente son confiables cuando muestran una amplificación importante, sin embargo, razones menores o ausencia de amplificación no necesariamente indica la inexistencia de efectos de sitio. (Chávez-García & Montalva, 2014). Además, algunos estudios han demostrado una variación temporal importante de la razón H/V, particularmente si se trata de períodos fundamentales cercanos o sobre 1 segundo (Bonney-Claudet, 2004); según la franja horaria en la que se realice el análisis (Pasten, 2015); y, variaciones producto de fluctuaciones de niveles freáticos de acuíferos subterráneos según la estación del año (Rigo et al, 2021). Por todas las razones anteriormente descritas, en el presente trabajo sólo se analizan los valores de período fundamental obtenidos mediante la técnica HVSR propuesta por Nakamura, y no se obtienen conclusiones sobre la razón H/V.

Por último, dado que el propósito del presente trabajo consistió también en el estudio de la clasificación sísmica de los suelos de Punta Arenas, la metodología desarrollada se basó en primer lugar, en la recolección de información de ensayos geofísicos desarrollados por Geotecnia Patagonia Ltda durante los últimos 12 años para el caso de mediciones de velocidad de onda de corte Vs30, y durante los últimos 5 años en el caso de mediciones de período fundamental mediante la técnica de Nakamura. De manera complementaria, y con el fin de robustecer la información existente, se procedió a la búsqueda de información en portales públicos, ya sea en el portal Mercado Público (Mercado Público, 2023), como también en el portal del Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA, 2023).

Tabla 2. Detalle de origen de datos utilizados.

Origen de datos	Vs30	Tg
Geotecnia Patagonia	185	209
Mercado Público	20	4
Servicio Evaluación Impacto Ambiental	1	0

De la información recopilada y teniendo en cuenta la ubicación geográfica de los ensayos, se definieron aquellas zonas con vacíos de información para ambas variables, tras lo cual se realizó una campaña geofísica exclusiva para complementar la información, la que fue ejecutada durante los meses de Abril a Diciembre del año 2023. El detalle del origen de los datos que se utilizaron en el presente trabajo se muestran en la Tabla 2.

El polígono analizado comprende aproximadamente 3150 Há, por lo que, en términos generales, se tiene un punto de medición de Vs30 cada 15.7 Há, o bien cada 400x400 m, y un punto de medición de Tg cada 14.7 Há, o bien cada 380x380 m. Este espaciamiento promedio cumple con la grilla mínima recomendada para estudios de microzonificación sísmica, que es de 500x500 m (SESAME, 2004). En la Figura 4 se presenta gráficamente los puntos con información de Vs30 y Tg utilizados para el presente trabajo.



Figure 4. Plano ubicación datos Vs30 y Tg, Punta Arenas.

3.2 Suelos potencialmente licuables

De acuerdo a los criterios de clasificación sísmica del suelo expuestas en las normas NCh 433(DS61) y NCh2369:2023, quedan fuera del alcance de estas aquellos suelos que posean propiedades geotécnicas singulares que no permiten ser categorizados por los parámetros que la misma norma dispone, tales como los suelos potencialmente licuables y suelos orgánicos, los cuales deben clasificarse como Suelo Tipo F, en donde deben realizarse estudios especiales que definan el espectro de diseño del sitio.

Según el contexto geológico expuesto anteriormente, existen extensas zonas donde predominan formaciones de composición principalmente arenosas ubicadas en la zona norte (Sedimentos de acreción de la Punta Arenosa) y en el sector de la desembocadura del Río de Las Minas (Sedimentos deltaicos del Río de Las Minas), cuyas depositaciones son de origen reciente, y que por lo tanto su baja compacidad permite inferir que puedan definirse como potencialmente licuables. A su vez, también se definen otras zonas más acotadas con presencia de suelos principalmente orgánicos, ubicadas principalmente en las proximidades de los esteros el sector norte de la ciudad.

En este contexto, estudios anteriores permitieron comprobar la existencia de suelos potencialmente licuables en el sector de Punta Arenosa (Peredo & Carrasco, 2018) y posteriormente en una zona más amplia del sector norte de la ciudad (Villaruel & Carrasco, 2021). Además, estos estudios permitieron establecer correlaciones y criterios para la interpretación de ensayos de cono dinámico DPSH-Grizzly® en este tipo de suelos, en base a una comparación con resultados de sondajes con ensayos SPT.

Para este trabajo en particular se consideró la información de 38 sondajes con resultados de ensayos SPT y 119 ensayos de cono dinámico DPSH- Grizzly, realizados en las formaciones de composición principalmente arenosas definidas anteriormente. Para el estudio del potencial de licuación de los ensayos SPT se consideró el método simplificado propuesto por (Seed et al, 1971)

actualizado posteriormente por (Youd et al, 2001); mientras para el estudio de potencial de licuación de ensayos DPSH-Grizzly® se utilizó el valor umbral de resistencia por punta definida por (Peredo & Carrasco, 2018) y la correlación de Susceptibilidad de licuación definida por (Villaruel & Carrasco, 2021). Además, se consideraron 5 sondajes con ensayos SPT y 45 ensayos de cono dinámico DPSH-Grizzly para zonas con evidencia de suelo orgánico.

En la Figura 5 se muestra la ubicación de sondajes y ensayos DPSH grizzly® cuyos resultados presentan indicios de la existencia de suelos potencialmente licuables y/o con presencia de suelos orgánicos. A modo referencial en la Tabla 3 se presentan los valores de resistencia por punta promedio obtenido en estas unidades, observando que estas se encuentran bastante por debajo del valor umbral de 7.5 MPa definido en estudios anteriores por los autores, y en los que se podría tener una buena correlación con el índice de susceptibilidad de licuación LPI.



Figura 5. Plano ubicación sondajes y DPSH Grizzly® en unidades especiales.

Tabla 3. Promedio de Resistencia por punta unidades especiales

Unidad	Cantidad ensayos	qd [MPa]	Desv. Est [MPa]	CV (%)
Arenas	119	5.7	2.45	42%
Suelo orgánico	45	3.9	1.46	37%

3.3 Relación T_g y profundidad roca.

Debido a la simplicidad y bajo costo del método para la obtención del período fundamental del suelo (o frecuencia fundamental), es que diversas investigaciones han estudiado establecer una relación de este parámetro con la profundidad del basamento rocoso para distintas formaciones sedimentarias.

Es importante mencionar que el método para la obtención del período fundamental del suelo tiene su mayor confiabilidad cuando existen geometrías planas o de baja pendiente de los depósitos sedimentarios, es decir, donde resulta válido aplicar la teoría de la propagación unidimensional de ondas. Si al aplicar la técnica H/V resultan peaks anchos o mesetas de máximos bajos, esto podría indicar la existencia de variación lateral subterránea del espesor del relleno sedimentario, y en donde podrían ocurrir otros fenómenos de ondas más complejos como la difracción de ondas superficiales,

y que, por lo tanto, no deberían considerarse si el propósito es el estudio del espesor del relleno sedimentario (Guillier et al, 2006).

Al asumir como válida la teoría de la propagación unidimensional de las ondas es posible aplicar la relación expuesta en las pautas del proyecto SESAME, donde se relacionan la velocidad de onda de corte (V_s), profundidad de la roca (H) y frecuencia (f) (Ecuación 1). (Bard et al, 2004). Si además, se asume implícitamente que la velocidad de onda de corte para un estrato sedimentario es relativamente uniforme en la extensión de la formación, y además que esta incrementa con la presión de confinamiento o profundidad, se puede obtener una relación entre la frecuencia fundamental del suelo (f) y el espesor del relleno sedimentario (H) según la Ecuación 2.

$$H = \frac{V_s}{4f} \quad (1)$$

$$H = \alpha f^\beta \quad (2)$$

De acuerdo a lo anterior, diversos estudios en distintas partes del mundo han establecido relaciones entre espesor de relleno sedimentario y frecuencia fundamental, las que resultan representativas para cada formación sedimentaria en particular. En la Tabla 4, se muestran algunas de las relaciones obtenidas por distintos autores para formaciones de origen principalmente aluvial y/o fluvial.

Tabla 4. Comparación de relaciones obtenidas entre f y H .
 Modificada de (Serafini, 2017)

Parámetro	Ibs von Seht 1999	Delgado et al. (2000)	Parolai et al 2002	Serafini et al 2017
α	96	55.11	108	102
β	-1.388	-1.256	-1.551	-1.296
Ubicación geográfica	Río Rhine, Alemania	Río Segura, España	Colonia, Alemania	Viña del Mar, Chile

Para la obtención de la relación entre la frecuencia fundamental del suelo y el espesor del relleno sedimentario, se realizaron ensayos mediante la técnica H/V en 17 puntos específicos donde se conocía la profundidad de la roca sedimentaria, que en este caso corresponden a areniscas cuya profundidad varía entre los 18 y 65 m. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, este análisis sólo se realizó para las unidades de rellenos sedimentarios aluviales y/o fluviales de composición principalmente arenosos y que presentan una topografía relativamente plana.

4 RESULTADOS

4.1 Microzonificación sísmica

4.1.1 Velocidad de onda de corte, V_{s30} (m/s)

En la Figura 6, se muestra el resultado para la estimación de valores de V_{s30} de la ciudad, utilizando una escala de isovalores para su interpretación. Se observa que las velocidades más altas se ubican en el sector sur de la ciudad, consistente con afloramientos superficiales de la formación Loreto (Areniscas) con velocidades superiores a los 600 m/s, seguido de los depósitos morrénicos, con velocidades superiores a los 400 m/s. Por otro lado, las velocidades más bajas, del orden de 150 m/s, se ubican sobre las unidades de

depósitos orgánicos asociados a los esteros del sector norte, seguido de las unidades arenosas de la Punta Arenosa y del Río de las Minas, con velocidades entre 180 y 250 m/s, siendo estas unidades las que concentran el potencial de licuación según los resultados de exploraciones geotécnicas expuestos anteriormente.

los períodos más altos se ubican en el sector de Punta Arenosa y en la desembocadura del Río de las Minas. También se observan algunas zonas locales donde se rompe la tendencia de crecimiento hacia el cerro en los cuales los valores aumentan, tales como las zonas de suelo orgánico (calles Kuzma Slavic o Calle Hornillas), la zona del Cerro de la Cruz, y la zona al sur del parque María Behety (Calle Manuel Rodríguez).



Figura 6. Estimación de valores de Vs30 para la ciudad de Punta Arenas.



Figura 7. Estimación de valores de Tg para la ciudad de Punta Arenas.

4.1.2 Período fundamental del suelo, T_g (s)

En la Figura 7, se muestra el resultado para la estimación de valores de T_g (s), utilizando también isovalores para su interpretación. De forma similar al análisis anterior, se observan los períodos más bajos en el sector sur y hacia el oriente de la ciudad, mientras que

En general, se observa una relación inversa entre los valores de Vs30 y de T_g , es decir, en las zonas donde se observan las mayores velocidades se observan a su vez los menores valores de período fundamental, y viceversa. Considerando lo expuesto anteriormente, las zonas de las formaciones arenosas de la ciudad

al tener un período alto, son las que podrían presentar la mayor demanda sísmica, ya sea en desplazamientos máximos como en términos de aceleración máxima.

4.1.3 Clasificación Sísmica

Se ha considerado la clasificación sísmica de suelos según la nueva propuesta de la Norma NCh 433 (prNCh 433, 2023) y que se expone en la Tabla 5. Al respecto, dado que se tiene un mapa de interpolación para las variables de Vs30 y Tg para todo el polígono analizado, es posible para cualquier punto de interés, establecer una probable clasificación sísmica del suelo según dichos parámetros. Esta clasificación debe considerarse como preliminar y además se debe contrastar con los resultados de las prospecciones mínimas que determina la normativa vigente.

Tabla 5. Clasificación Sísmica de suelos (prNCh 433, 2023)

Tipo de Suelo	Vs30 (m/s)	Tg (s)
A	≥ 900	< 0.15 s, o H/V Plano
B	≥ 500	< 0.30 s, o H/V Plano
C	≥ 350	< 0.4 s, o H/V Plano
D	≥ 180	< 1 s
E	< 180	-

Cabe mencionar que de acuerdo a lo expuesto en la Figura 5, existe una amplia zona donde existen antecedentes de presencia de suelos potencialmente licuables y de unidades con presencia de suelos orgánicos, por lo que eventualmente, quedarían fuera del rango de clasificación sísmica según la Tabla 5, y deberían clasificarse como suelo tipo F. En estos casos la clasificación de Suelo Tipo E, quedaría inmersa en la clasificación tipo F, pues prácticamente las únicas zonas con velocidades menores a 180 m/s, corresponden a las unidades con presencia de suelos orgánicos o bien de manera acotada a alguna zona de las unidades arenosas. A su vez, las zonas con períodos mayor a 1 segundo, corresponden a la zona de Punta Arenosa, por lo tanto, en ambos casos su categorización correspondería a Suelo Tipo F.

4.2 Relación Vs30 y Tg

Tal como se expuso anteriormente, existe una relación entre la velocidad de onda de corte, el periodo (o frecuencia) y el espesor del estrato sedimentario sobre la roca según la Ecuación 1. Sin embargo, es necesario notar que el parámetro de velocidad de onda de corte asociado a esta relación, corresponde al promedio de velocidad sobre el estrato de roca asociado, el que está asociado a un espesor determinado H, que puede ser mayor o menor que 30 m, profundidad utilizada para la determinación del Vs30.

A pesar de lo anterior, se realizó un análisis para establecer si existe concordancia entre los resultados obtenidos para las variables que definen la clasificación sísmica del suelo, Vs30 y Tg para la ciudad de Punta Arenas. Considerando que los puntos de medición de ambas variables no son coincidentes en la gran mayoría de los datos, se ha considerado una discretización de toda la malla de los resultados de interpolación de Vs30 y Tg, en cuadrantes de 100x100 m, evitando también la sobre-representación o sub-representación de la información existente en algunas zonas puntuales. Es así, que se obtuvo para un total de 3170 puntos geográficos equiespaciados, el par de datos Vs30 y Tg, los que se presentan en la Figura 9.

Del análisis se observa que se obtiene una buena correlación entre las variables de Vs30 y Tg para los suelos de la ciudad de Punta Arenas, con un coeficiente $R^2=0.84$ y un error porcentual para la estimación de Vs30 del orden de 11% en promedio. Los valores encerrados en el círculo corresponden a la zona geográfica del Cerro de La Cruz, los que poseen una tendencia distinta al tener un período más elevado que la tendencia del resto de la ciudad. Esto se debe a que dicho sector si bien presenta unidades compactas con velocidades sobre los 350 m/s, la roca sedimentaria se encuentra más profunda, probablemente cercana a los 40 m. Estadísticamente esta zona particular representa el 1.2% del total de datos analizados.

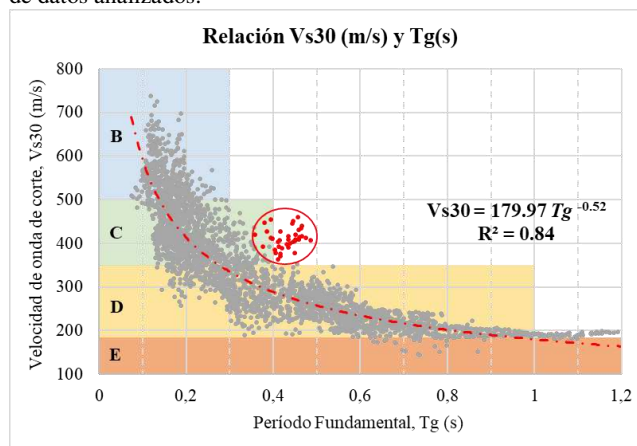


Figura 9. Relación Vs30 y Tg para la ciudad de Punta Arenas.

En la Figura 9 también se incorpora la nueva propuesta de clasificación sísmica de suelos, donde se observa que gran parte de los datos se ajusta de buena manera a dichos límites, existiendo dos zonas donde eventualmente se deberá degradar en un grado la clasificación al no cumplir estrictamente con los valores del período fundamental, estas zonas son: el ya mencionado Cerro de la Cruz, y por otro lado el sector de Punta Arenosa que posee períodos mayores a 1 seg, según lo observado en la Figura 7. Estas zonas donde eventualmente debiera realizarse esta degradación corresponden a aproximadamente el 2.8% de la superficie total de la ciudad analizada.

4.3 Relación Tg y profundidad roca.

Al realizar la comparación gráfica entre el espesor del relleno sedimentario y la frecuencia fundamental del suelo (Figura 10) se obtiene una buena correlación entre las variables, presentando un $R^2=0.94$ y un error de estimación de la profundidad de la roca por medio de la frecuencia fundamental del orden de 7% en promedio.

La correlación obtenida, demuestra que la velocidad de onda de corte o bien el estado de compactación, es relativamente uniforme en las unidades fluviales/aluviales consideradas, teniendo algunas variaciones menores hacia el lado de las frecuencias más altas debido a la presencia de algunos mantos gravosos acotados de mayor compactación, o bien, variaciones menores hacia frecuencias más bajas, debido a la existencia de estratos con un mayor contenido de material orgánico. Estas singularidades ya habían sido expuestas en estudios anteriores mediante la comparación gráfica de ensayos DPSH en la zona norte de Punta Arenas (Villarroel & Carrasco, 2021).

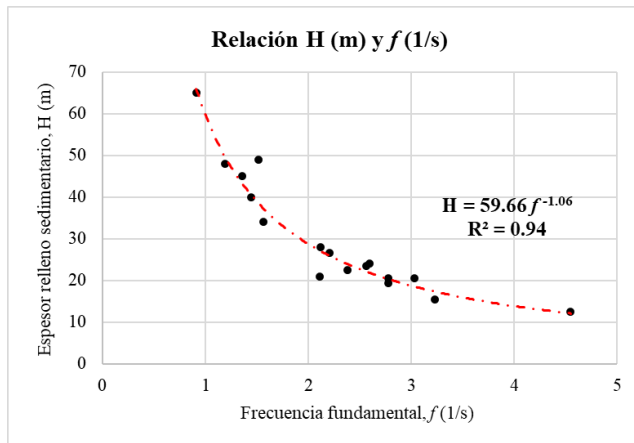


Figure 10. Relación Frecuencia Fundamental y profundidad roca.

5 CONCLUSIONES

El presente artículo presenta los resultados de análisis de una gran cantidad de datos geotécnicos de la ciudad de Punta Arenas, que se dejan a disposición de la comunidad geotécnica y por cierto de la comunidad local. Con respecto a los resultados es posible concluir lo siguiente:

- El mapeo de unidades geológicas muestran una heterogeneidad de formaciones, lo que indica que en Punta Arenas, es posible encontrar desde suelos orgánicos o finos, hasta gravas compactas e incluso formaciones rocosas. Esto es consistente con los mapeos de isoperíodos e iso-velocidades presentados, que evidencian en muchas zonas grandes contrastes en dichos parámetros. Al respecto se observan bajas velocidades en sectores costeros y en zonas con presencia de suelos orgánicos, por el contrario se observan altas velocidades hacia el sector poniente y sur de la ciudad, donde la roca sedimentaria se encuentra más próxima a superficie e incluso presenta afloramientos superficiales. Por último, existen algunos sectores como las calles Kuzma Slavic o Rómulo Correa/Frei donde se observan altos contrastes de valores de V_{s30} , con una data más limitada, y por tanto podría ser una zona donde a futuro se pueda lograr una mayor cantidad de ensayos.

- Con respecto a la nueva propuesta de clasificación sísmica, la degradación de la clasificación debido al no cumplimiento del período fundamental afectaría eventualmente a 2.8% de la superficie de la ciudad, por lo tanto, se desprende que existe buena correlación entre los valores de V_{s30} y T_g , adaptándose en términos generales a los límites de clasificación sísmica. Se observa también valores asintóticos del orden de 200 m/s en la medida que el periodo aumenta, evidenciando cierta homogeneidad del sector de punta arenosa en los 30 m superiores.

- Las unidades de suelos orgánicos ubicados en el sector norte; unidades arenosas del borde costero; y, por último, el sector del cerro de La Cruz podrían presentar los mayores valores de demanda sísmica al poseer altos valores de período fundamental y altos valores del producto entre el periodo y la velocidad más alto de la ciudad. Por el contrario, las zonas con eventual menor

demanda sísmica se ubican hacia el sur y hacia el poniente de la ciudad.

- Se observan que existe una gran cantidad de antecedentes que evidencian una amplia zona que pudiera definirse como potencialmente licuable. Es importante señalar, que esto debe considerarse como información referencial y debe comprobarse con los ensayos y prospecciones que la normativa vigente dispone. A pesar de aquello, es necesario evaluar la existencia de algunas zonas que pudieran tener una mayor resistencia en superficie u otros estratos más compactos en profundidad que permitirán reducir, mitigar o incluso anular la manifestación de eventual licuación de suelos hacia la superficie, incorporando por ejemplo el índice LPI de Ishihara (Maurer, 2015).

- Las zonas con potencial de licuación ubicadas en la zona norte, requiere poner mayor atención a los efectos que se podrían desencadenar sobre los distintos servicios en la ciudad, debido a que el sector involucrado presenta único acceso vial por el sector norte, planta de tratamiento de aguas servidas, matrices de gas y tendido de alta tensión, por lo tanto, cualquier efecto adverso en esta zona pudiera desencadenar en una pérdida de conectividad y/o en problemas con el suministro de servicios básicos

6 AGRADECIMIENTOS

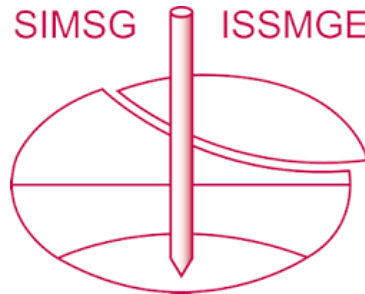
Los autores desean agradecer los antecedentes y conocimientos expuestos por don Hector Szigethi Campos. A la Dirección de Obras Portuarias de la Región de Magallanes por disponer de información relevante para el proceso de estudio de las unidades costeras (vía Portal Transparencia). Por último, al personal de Geotecnia Patagonia Ltda, por la constante cooperación para lograr una data robusta para el análisis.

7 REFERENCIAS

- Aguirre, G. Raddatz, D., Taiba, O. (2021). Propuesta de microzonificación sísmica de las localidades de Reñaca y Concón, a partir de mediciones espectrales H/V Nakamura. XI Congreso Chileno de Geotecnia SOCHIGE. Talca, Chile.
- Baquedano, F., Leyton, F., Sepúlveda, S. (2012). Frecuencia predominante de los suelos de Valparaíso-Viña del Mar y propuesta de microzonificación preliminar. VII Congreso Chileno de Geotecnia. Concepción, Chile.
- Bard, P., Duval, A., Koehler, A., Rao, S. (2004). Guidelines for the Implementation of the H / V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation. 169(December):1-62.
- Becerra, A., Podestá, L., Monetta, R., Saéz, E., Leyton, F., Yáñez, G. (2014). Microzonificación sísmica de las ciudades de Arica e Iquique, Chile. VIII Congreso Chileno de Geotecnia. Santiago, Chile.
- Brant, C. (2011). Microzonificación sísmica del sector sur poniente de Santiago, Comunas de Buin y Paine. Memoria para Geólogo, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Cáceres, D., Ramírez, P. (2012). Microzonificación sísmica y los fenómenos de licuefacción por efectos del sismo del 27 de febrero en la comuna de San Pedro de la Paz. SERNAGEOMIN, Santiago, Chile pág. 880-882
- Carrasco, R. (1997). Zonificación geotécnica en algunos sectores de Punta Arenas y soluciones particulares para mejoramiento y fundaciones.

- Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
- Cisternas, A., & Vera, E. (2008). Sismos históricos y recientes en Magallanes. Magallania, 36(1).
- Delgado, J., Casado, C. L., Estevez, A., Giner, J., Cuenca, A., & Molina, S. Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool. Journal of Applied Geophysics, 45 (1), 19-32.
- Errázuriz, J.T. (2012). Microzonificaciones Sísmicas En Ciudades Del Mundo y Discusión Sobre La Aplicabilidad En La Ciudad De Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile. 2012.
- Forsyth, D. W. (1975). Fault plane solutions and tectonics of the South Atlantic and Scotia Sea. Journal of Geophysical Research, 80(11), 1429-1443.
- Godoy, C., González, L., Sáez, E. (2015). Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago. Obras y Proyectos 17, 61-67
- Guillier, B., Cornou, C., Kristek, J., Moczo, P., Bonnefoy-Claudet, S., Bard, P. Y., & Fäh, D. (2006). Simulation of seismic ambient vibrations: does the H/V provide quantitative information in 2D-3D structures. In Third international symposium on the effects of surface geology on seismic motion Grenoble, France (Vol. 30).
- Hazen, A. (1920). "Hydraulic-Fill dams". ASCE Transactions, Vol. 83, pp 1713-1745
- Ibs-von Seht, M., & Wohlenberg, J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bulletin of the Seismological Society of America, 89(1), 250-259.
- La Prensa Austral (1949). Ediciones de 17, 18 y 19 de Diciembre de 1949.
- Leyton, F., Montalva, G., Ramírez, P. (2012). A preliminary study of seismic microzonation of Concepción based on microtremors, geology and damages patterns. Obras y Proyectos 11, 40-46
- Leyton, F., Sepúlveda S., Astroza, M., Rebolledo, S., Acevedo, P., Ruiz, S., Gonzalez, L., Foncea, C. (2011). Seismic Zonation of the Santiago Basin, Chile. 5th International conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Santiago, Chile.
- Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S., Contreras, J., Rebolledo, S., Astroza, M. (2013). Microtremors HVSR and its correlation with Surface geology and damaged observed after the 2010 Maule Earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó, Central Chile. Engineering Geology 161 (2013) 26-33.
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: a Historical Survey, 1535-1960 Seismological Research Letters 75 (3), 368-378.
- Maurer, B., Green, R., Taylor, O-D. (2015). Moving towards an improved index for assessing liquefaction hazard: Lessons from Historical data. Soils and Foundations 2015: 55 (4): 778-787.
- Medina, F., Harmsen, S. C., & Barrientos, S. E. (2016). Proyecto Mapa de Riesgo Sísmico de Chile. Módulo 2A: Amenaza Sísmica, informe para Asociación de Aseguradores de Chile, FME Engineering, San Francisco, California, USA.
- Medina, F., Harmsen, S. C., & Barrientos, S. E. (2017). Probabilistic seismic hazard analysis for Chile. In 16th World Conf. on Earthquake Engineering.
- Nakamura, Y. (1989). A method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface; Geotechnical Eng. And Disaster Prevention Laboratory, QR of RTRI, Vol 30, No 1, 25-33.
- Otero, R. A., Torres, T., Le Roux, J. P., Hervé, F., Fanning, C. M., Yury-Yáñez, R. E., & Rubilar-Rogers, D. (2012). A Late Eocene age proposal for the Loreto Formation (Brunswick Peninsula, southernmost Chile), based on fossil cartilaginous fishes, paleobotany and radiometric evidence. *Andean Geology*, 39(1), 180-200.
- Pasten, C., Lezana, F., Leyton, F., Ruiz, S. (2015). Razones espectrales H/V de una red temporal de estaciones sísmológicas en la cuenca de Santiago – Resultados preliminares. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015. Santiago, Chile.
- Peredo, V. & Carrasco, R. (2018). Correlación entre el ensayo penetrómetro dinámico Grizzly (DPSH) y SPT en arenas potencialmente licuables del sector Punta Arenosa en la ciudad de Punta Arenas. X Congreso Chileno de Geotecnia. Valparaíso, Chile, artículo 1661
- Perucca, L., Alvarado, P., & Sáez, M. (2016). Neotectónica y sismicidad en la Patagonia austral. Revista Geológica, 51(4), 545-559.
- Pinilla, C. (2012). Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuesta en suelos. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Prieto, X., & Winsolow, M. (1992). El Cuaternario del Estrecho de Magallanes I: sector Punta Arenas-Primera Angostura. In Anales del Instituto de la Patagonia.
- prNCh433 (2023). Propuesta de norma "Diseño sísmico de Edificios". Instituto Nacional de Normalización.
- Rauld, R., Medina, F., Leyton, F., Ruiz, S. (2015). Mapa de microzonificación sísmo-geológica para Chile. XIV Congreso geológico chileno. La Serena, Chile.
- Rigo, A., Sokos, E., Lefils, V., Briole, P. (2021). Seasonal variations in amplitudes and resonance frequencies of the HVSR amplification peaks linked to groundwater. Geophysical Journal International, 2021, 226, pp.1 - 13.
- Sandoval, F. B., & De Pascale, G. P. (2020). Slip rates along the narrow Magallanes fault System, tierra Del fuego Region, patagonia. Scientific reports, 10(1), 1-13.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division 97(9), 1249-1273.
- Sepúlveda, N.; Gálvez C.; Pantoja, G.; Morales, D. (2019). Respuesta sísmica del área urbana de San Antonio-Llolleo, región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-19-73: 53 p., 1 mapa escala 1:20.000. Santiago.
- Serafini, F. (2017). Aportes para una nueva zonificación geotécnica de Viña del Mar: Estimación de la profundidad del basamento rocoso en la cuenca del Marga-Marga a partir de mediciones espectrales H/V. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- SERNAGEOMIN, S. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital*, (4).
- SESAME (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. European Commission.
- U.S. Geological Survey. 2023, Earthquake Lists, Maps, and Statistics, accessed December 10, 2023 at URL <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/lists-maps-and-statistics>
- Uribe, P (1982). Geología y consideraciones geotécnicas del suelo de fundación de Punta Arenas.
- Villaruel, P., & Carrasco, R. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos a datos de ensayos de cono dinámico DPSH Grizzly® realizados en suelos potencialmente licuables en el sector norte de la ciudad de Punta Arenas. Obras y Proyectos [online]. 2022, n.31, pp.45-51. ISSN 0718-2813
- Vivallos, J. Ramírez, P., Fonseca, A. (2010). Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción, Región del Bio-Bio. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 12.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Liam Finn, W.D., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe II, K.H. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/ NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127(10), 817-833

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.