

Efectos de sitio producto del Terremoto Megathrust Mw 9.5 de 1960 en la ciudad de Valdivia

F. Campos ⁽¹⁾, C. Pásten ⁽²⁾, F. Ochoa ⁽²⁾, S. Ruiz ⁽³⁾, G. Valdebenito ⁽⁴⁾, D. Alvarado ⁽⁴⁾, F. Leyton ⁽⁵⁾, R. Moffat ⁽⁶⁾

(1) Ingeniero civil, AMTC, felipe.campos.r7@gmail.com

(2) Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

(3) Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

(4) Núcleo de Investigación en Riesgos Naturales y Antropogénicos RiNA, Universidad Austral de Chile

(5) Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile

(6) Ingeniero civil, Universidad Adolfo Ibáñez

Resumen

El mega-terremoto de 1960 Mw 9.5 en Valdivia, con una longitud de ruptura de aproximadamente 1000 km en el centro-sur de Chile, es el terremoto más grande registrado en los tiempos modernos. La ciudad de Valdivia está localizada a unos 300 km al sur del límite norte de la ruptura, frente a una de las más grandes asperezas del terremoto. En este artículo, recopilamos datos del daño estructural provocado por el terremoto, la geología de la ciudad y combinamos esta información con los resultados de métodos geofísicos que podrían explicar el patrón del daño estructural. El conjunto de viviendas está compuesto por edificios de madera de uno y dos pisos, y unos pocos edificios de albañilería y concreto. A pesar de los grandes movimientos, las estructuras bien construidas y fundadas no sufrieron daños. La mayor parte del daño estructural se debe a un comportamiento deficiente a nivel de fundación de los suelos de relleno no controlado que experimentaron movimiento lateral. Los resultados de los métodos de ondas superficiales indican una velocidad de onda de corte de los 30 m superiores "Vs30" que varía entre los 150 y 300 m/s. El período predominante H/V de las relaciones espectrales H/V no se correlaciona con las áreas de mayor daño, ya que los edificios de uno y dos pisos no entran en resonancia en los períodos predominantes del suelo.

Palabras-Clave: *Efecto de sitio, Terremoto Valdivia*

Abstract

The 1960 Mw 9.5 Valdivia megathrust earthquake with a rupture length of about 1000 km in the Central-South Chile is the largest recorded earthquake in the modern times. The Valdivia city is located about 300 km south of the northern boundary of the rupture in front of one of the largest asperities of the earthquake. In this article, we compile data from structural earthquake-induced damage, the geology of the city and combine this information with results from geophysical methods that could explain the structural damage pattern. The housing stock consisted on one and two-story wooden buildings, and few masonry and concrete buildings. Despite the large shaking, well-constructed and founded structures were not damaged. Most of the structural damage is due to deficient foundation behavior over uncontrolled backfill soils that experienced lateral movement. Surface waves methods results indicate a shear wave velocity of the upper 30 m Vs30 that ranges from 150 to 300 m/s. The predominant period of the H/V spectral ratios does not correlate with the most damaged areas since the one and two-story buildings do not resonate at the soil predominant periods.

Keywords: *Site effects, Valdivia earthquake*

1 Introducción

El 22 de mayo de 1960 a las 19:11:17 (UTC) ocurrió el terremoto más grande jamás registrado, el cual generó una zona de ruptura de unos 1000 km en la costa central-sur de Chile [1-3] (Figura 1). El terremoto chileno interplaca Mw 9.5 de 1960 generó olas que llegaron a las costas de Japón, Hawai, Perú y Alaska [4] y provocó altas intensidades sísmicas a lo largo de la zona centro-sur de Chile [5, 6]. Los modelos de deslizamiento co-sísmico, obtenidos a partir de los levantamientos y hundimientos reportados por Plafker y Savage [7] y las inferencias de los tsunamis, indican que la ruptura del terremoto se desarrolló desde la península de Arauco al sur de la Isla de Chiloé [8-10]. Una de las ciudades más cercanas al terremoto principal fue Valdivia, ubicada en una cuenca compleja, atravesada por depósitos fluviales y caracterizada por intensidades sísmicas MSK entre VIII y IX [11, 12]. La ciudad de Valdivia, que tenía cerca de 57.000 habitantes al momento del terremoto, desarrolló el distrito comercial y el área residencial sobre la orilla sur del río Calle-Calle. La ribera norte del río, el sector de Las Animas, tenía algunas residencias y propiedades de importancia. Al lado este del río Calle-Calle en Isla Teja existían casas, fábricas y el campus universitario de la Universidad Austral. El resto del área fue utilizada para la agricultura.

A pesar del terremoto de gran magnitud y el complejo comportamiento del suelo de la cuenca de Valdivia, algunas estructuras no sufrieron daños, en contraste con otras estructuras que fueron completamente destruidas. En este trabajo estudiamos la geología local, la amplificación del suelo deducida por campañas de mediciones sísmicas de ruido ambiental, las propiedades del suelo de fundación y las características geotécnicas generales donde se fundó la ciudad para comprender las causas de los daños reportados en la ciudad de Valdivia durante el mega-terremoto de 1960. Este estudio proporciona información relevante para comprender el riesgo sísmico de las megaciudades costeras ubicadas en zonas de subducción donde pueden ocurrir gigantes mega-terremotos.

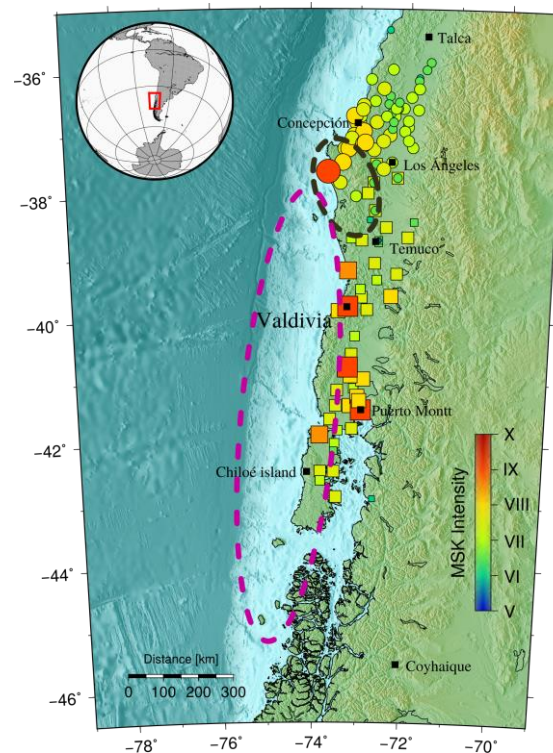


Fig. 1 – Área de ruptura aproximada del terremoto de Valdivia del 22 de mayo de 1960 9.5 Mw

2 Antecedentes Sismológicos

El terremoto Mw 9.5 de Valdivia del 22 de mayo de 1960 estuvo precedido por un gran evento de magnitud Mw 8.1 ocurrido el 21 de mayo a las 10:02:52 UTC, ubicado justo al norte de la zona de ruptura del evento Mw 9.5, cerca de la ciudad de la Concepción [13, 14]. Este evento tuvo una longitud de daño de norte-sur de casi 150 km con intensidades entre VII y VIII, más corto en comparación con la longitud de casi 800 km reportada por Astrosa y Lazo [12], quienes compilaron el daño reportado en trabajos de primera fuente y periódicos de este período al igual que Lástrico [15], Figura 1. La ciudad de Valdivia se vió fuertemente afectada por el tsunami en algunos lugares cercanos al río Calle-Calle, y varias casas fueron destruidas por el terremoto del 22 de mayo, mientras que otras estructuras civiles resultaron sin ningún daño. Valdivia no tuvo daños estructurales asociados al terremoto del 21 de mayo [12]. En el centro-sur de Chile, otros terremotos de gran magnitud precedieron al terremoto 9,5 Mw de Valdivia el año 1960; sin embargo, eventos de magnitud similar ocurrieron al menos 400 años antes [14, 16, 17]. Durante estos períodos más antiguos, la ciudad de Valdivia solo estaba formada por pocas casas, y no es posible hacer un análisis similar al que se hizo en este documento para el evento de 1960.

3 Marco geológico de la ciudad de Valdivia

La ciudad de Valdivia está ubicada en una cuenca que contiene los ríos Cruces y Calle-Calle. Esta cuenca está delimitada en el norte por una sucesión de colinas transversales que separan el río Tolten de las cuencas del río Valdivia. También está delimitada por una cadena de colinas costeras de unos 600 metros en altitud, que continúan hacia el sur hasta Altos del Mirador, a unos 300 metros sobre el nivel del mar. Esta cordillera está atravesada por el río Valdivia frente a la ciudad costera de Corral. Hacia el sureste de la ciudad de Valdivia, el cerro Huichahue (640 metros) se inclina hacia el valle del río Valdivia y define el curso de los ríos Futa y Angachilla.

La ciudad de Valdivia se desarrolló en una terraza entre 10 y 15 metros sobre el nivel medio del mar que ha sido cruzada por muchos canales antiguos, muchos de los cuales tienen forma de U, no están activos y se llenaron con material aluvial y relleno artificial. Casi todo el valle estuvo una vez cubierto por estas terrazas, como lo indican los restos en otras partes de la ciudad. La ciudad está atravesada por los ríos Calle-Calle, Valdivia, Cau-Cau y Cruces. Las principales unidades geológicas de la ciudad se describen a continuación.

a) Limo inorgánico

Este es el estrato menos profundo que se puede encontrar en el área. Corresponde a un suelo usado para la agricultura y tiene un espesor que varía entre los 0.5 a 3.5 m. El estrato consta de tres capas, la superior es de un material limoso de color negro a café con algo de materia orgánica, la intermedia tiene arena y arcilla y la inferior tiene un alto contenido de arcilla debido a la lixiviación de las capas superiores. Se cree que este es un depósito eólico [18]. No es un suelo de fundación adecuado debido a su alta compresibilidad [19]. Dado el espesor reducido del estrato, no se muestra en el mapa geológico de la Fig. 2.

b) Limo arcilloso con arena

Esta unidad consiste en arcillas, arenas, arenas arcillosas y sedimentos de color café oscuro a blanco [18]. Las arcillas limosas, varían de plástico a friable, y algunas están laminadas. Las arenas son en general de grano fino a medio. Parte de estas arenas están completamente cementadas y compuestas de fragmentos de rocas volcánicas y granitos, cementados por palagonita. La unidad tiene una

superficie erosionada irregularmente, el espesor varía entre 0,5 y 2 m, y la base de la unidad está entre 7 y 7,5 m, mientras que el techo está entre 8 y 9 m sobre el nivel del mar. Este material se conoce localmente como "Cancagua" y se encuentra principalmente en la parte central y este de la ciudad. Algunos autores definen a Cancagua como una arenisca de fina a muy fina. El nivel freático está generalmente debajo de esta unidad. La gran rigidez de esta unidad hace que sea un suelo de fundación adecuado para la construcción de casas y pequeños edificios [19].

c) Limo y arcilla

Esta unidad consiste en lentes de limo y arcilla que se alternan con lentes de arena limosa. La clasificación del material puede variar desde limo orgánico (OL), arcilla de plasticidad media (OH) y arena fina hasta limo grueso (SM). El color varía de gris claro a oscuro o negro. Algunas arcillas están finamente laminadas. Se puede encontrar en toda el área de estudio subyacente a otras unidades sedimentarias. El espesor puede alcanzar más de 10 m, pero la base es desconocida. Esta unidad tiene una baja permeabilidad y el nivel freático está generalmente a pocos metros por debajo de su techo, con la excepción de las zonas donde estratos de arcilla o arena y ripio bien graduados lo cubren. En estos casos, el nivel freático está por encima del techo. La alta preconsolidación de esta unidad, principalmente en la parte inferior, la hace rígida y un buen suelo de fundación [19].

d) Arena limosa

Esta unidad de sedimentos recientes se compone de arenas grises limosas medias a grises moderadas con granos rectangulares a suberrados y capas de materiales con alto contenido de materia orgánica. Los fragmentos corresponden a rocas basálticas andesíticas, esquisto micáceo, granos de cuarzo, feldespato y algo de vidrio. Se encuentra principalmente en los costados del curso actual del río Calle-Calle. Se desconoce su espesor máximo, pero se cree que es mayor a 30 m. Esta unidad se superpone a la unidad de arcilla. Tiene una permeabilidad relativamente alta y el nivel freático que presenta durante los veranos varía entre los 0,5 a 2 m por debajo de la superficie. Este material se ablanda al saturarse, lo que lo convierte en un material de fundación regular [19, 20].

e) Arcilla

Esta unidad asociada a sectores pantanosos y materiales fluviales recientes consiste en arcillas y sedimentos de alta humedad y materia orgánica, así como capas de arena intercaladas. Los materiales se clasifican desde limo arcilloso orgánico a arcilla orgánica de plasticidad media. Las arcillas van desde el color gris claro a marrón oscuro amarillento. Contiene varios fragmentos de conchas y madera. A profundidades superiores a 10 m, los poros de la unidad se llenan con gas de pantano altamente inflamable. Esta unidad aflora en el sudoeste de la ciudad en áreas expuestas a inundaciones, y se ha identificado en las perforaciones que se encuentran debajo de la unidad de arena limosa. El espesor de la unidad es desconocido, pero se cree que puede ser mayor a 30 m. La unidad tiene una baja permeabilidad y el nivel freático en verano está en la superficie o más arriba en algunas zonas pantanosas. Debido a su baja consistencia y alta humedad, generalmente mayor al límite líquido, el material es adecuado como suelo de fundación sólo para estructuras livianas o estructuras fundadas sobre pilotes [19].

f) Arena con grava y finos

Material fluvio-glacial que consiste en capas de arena fina a gruesa con un poco de grava y limos arcillosos. El material se clasifica como arena bien graduada con algo de grava, limo y arcilla. La fracción de grava representa menos del 10% y el tamaño máximo de partículas es de aproximadamente 7 cm de clastos subangulares de granito y rocas metamórficas [19]. Es un material

bien consolidado con las capas superiores ligeramente cementadas con limonita y erosionadas irregularmente entre los 6 y 12 metros sobre el nivel del mar. Se cree que el espesor es mayor a 30 m, según la información recolectada de las perforaciones estudiadas por Barozzi y Lemke [19]. Esta unidad tiene una permeabilidad moderada y su nivel freático varía entre 5 y 8 m por debajo de la superficie. Estos materiales son compactos y, por lo tanto, representan un suelo de fundación adecuado.

g) Relleno artificial

Esta unidad consiste en material aluvial reciente y relleno artificial de espesor y composición variables. La fracción de aluvión está compuesta por arcilla plástica de color gris a blanca, arenas color negro a blanco, intercaladas con limos amarillos y fragmentos de conchas marinas. Presenta varios tipos de relleno artificial, principalmente desechos, madera, grava y rocas [18]. La unidad cubre principalmente las partes bajas de la ciudad, tiene un alto contenido de agua y es altamente compresible debido a su baja compactación. El espesor varía desde unos pocos centímetros hasta 9 m en algunos sectores.

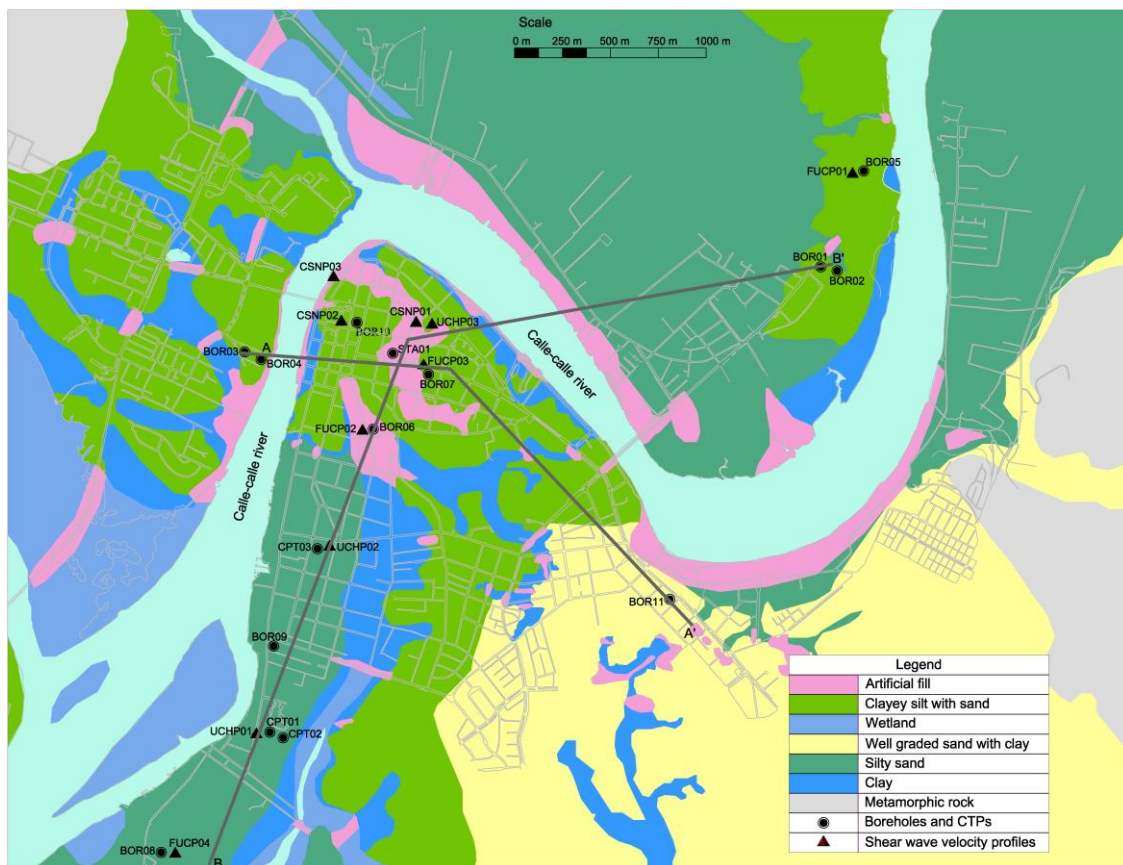


Fig. 2 – Superficie geológica de la ciudad de Valdivia.

Usando como base de la información obtenida de los mapas geológicos de distintos autores [19, 20] y de la información geotécnica, construimos dos secciones representativas de la ciudad de Valdivia que incluyen las principales unidades geológicas descritas anteriormente (Fig.3). De acuerdo a los antecedentes disponibles, el único pozo que ha alcanzado la roca en la ciudad a una profundidad de 130 m es BOR11 presentado en las Fig. 2 y 3 [18].

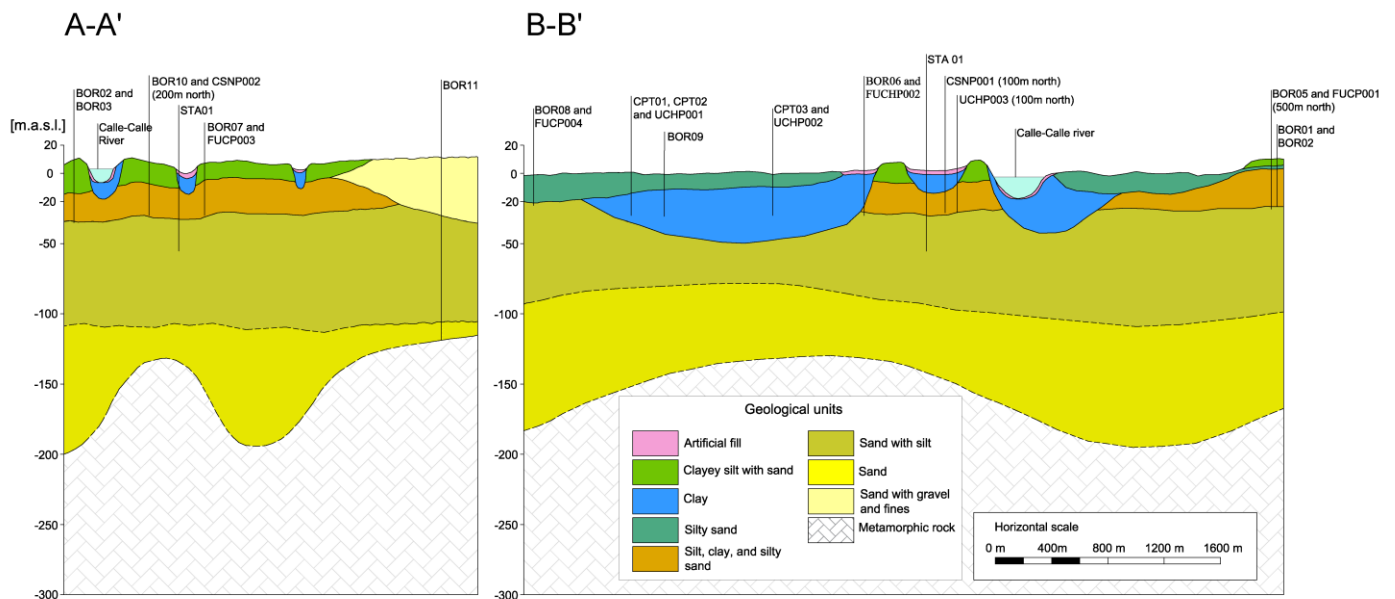


Fig. 3 – Secciones transversales en la ciudad de Valdivia.

3.2 Perfiles de velocidad de onda de corte en Valdivia

La Fig. 4 muestra los perfiles de velocidad de onda de corte que representan las principales unidades geológicas en la ciudad de Valdivia. Los perfiles se construyeron a partir de la técnica de correlación cruzada de ruido sísmico ambiental descrita en Pasten et. al. [21]. Se usó información adicional, como los resultados de las pruebas de penetración estándar (SPT) y de penetración de cono (CPT), para restringir el proceso de inversión.

El perfil UCHP01 sobre la unidad de arena limosa muestra una velocidad de onda de corte constante de 160 m/s para la arena limosa más superficial y la capa de arcilla subyacente. Este valor se confirmó con los resultados de las pruebas de penetración de cono sísmico realizadas hasta 30 m de profundidad. Además de una velocidad de onda de corte baja, la arcilla subyacente tiene una resistencia de punta muy baja (<2 MPa) de 20 a 30 m de profundidad, aproximadamente. De acuerdo con la norma chilena de clasificación sísmica de suelo [23], este suelo se clasifica como tipo de suelo E ($V_{s30} < 180$ m/s).

El perfil CSNP01 sobre el relleno artificial reconoce tres capas asociadas al relleno más superficial ($V_s = 80$ m/s), la arcilla ($V_s = 160$ m/s) y la unidad de limo-arcilla y arena limosa ($V_s = 280$ m/s). Este perfil de suelo clasifica como tipo de suelo D ($V_{s30} = 185$ m/s > 180 m/s).

El perfil CSNP02 reconoce dos capas, la primera asociada a la unidad de limo arcilloso con arena ($V_s = 180$ m/s) y la segunda asociada a la unidad de limo-arcilla y arena limosa ($V_s = 160$ m/s) y la unidad de limo, arcilla y arena limosa ($V_s = 280$ m/s). Este perfil de suelo se clasifica como tipo de suelo D ($V_{s30} = 240$ m/s > 180 m/s).

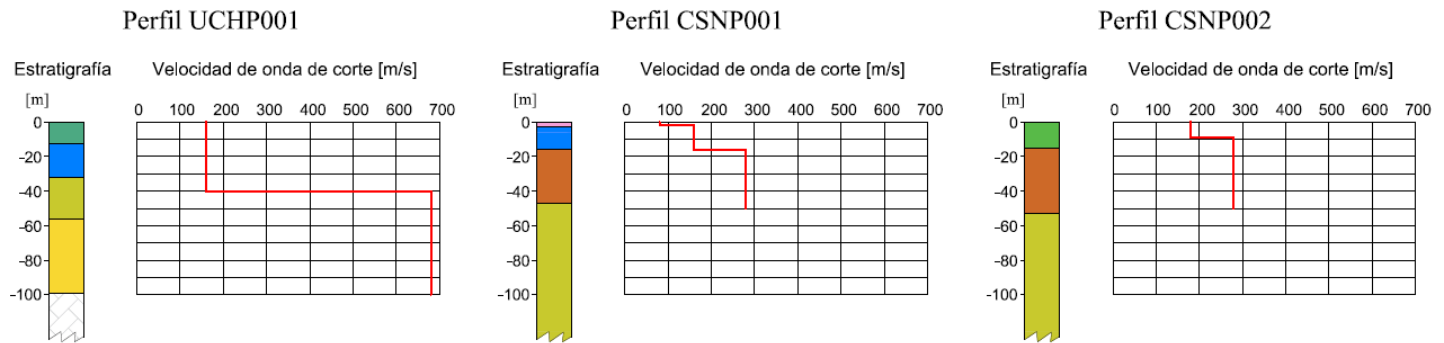


Fig. 4 – Perfiles de velocidad en la ciudad de Valdivia.

4 Daño estructural producto del terremoto del 22 de Mayo de 1960

El grupo de estructuras en la ciudad Valdivia en el momento del terremoto fue identificado por variados autores [15, 19, 23]. Los tipos más comunes de estructuras eran casas de madera de uno y dos pisos, seguidas de casas de albañilería no confinadas y confinadas de uno y dos pisos, y finalmente edificios de hormigón armado [24]. Los daños causados por el terremoto se compilaron a partir de los estudios de distintos autores [5, 24-27]. De acuerdo a lo anterior, se puede determinar que las causas de las fallas estructurales están asociadas a diversos factores.

Estructuras de hormigón armado, albañilería con columnas y vigas de hormigón armado (confinada) y bloques de hormigón hueco reforzado se desempeñaron satisfactoriamente cuando estaban construidos con los materiales adecuados y bien diseñados.

Muchos edificios de albañilería no reforzada sufrieron grandes daños, pero en los casos en los que estos edificios presentaban paredes transversales interiores atadas a la albañilería exterior no sufrieron grandes daños.

El daño en estructuras de hormigón armado, como el Hospital Regional, el Hospital Ortopédico y un tanque de agua elevado cerca del Hospital Regional, fue causado por problemas de diseño estructural y de construcción [24]. El Hospital Regional, un complejo de siete pisos y una de las estructuras más grandes de la ciudad, sufrió graves daños debido a la distribución de sus muros de forma irregular, los impactos entre subestructuras y algunos problemas durante la construcción.

La falla de gran parte de las estructuras de madera fue causada por problemas de calidad en la construcción, como la falta de clavos y el mantenimiento deficiente las fundaciones en ambientes de alta humedad.

Estructuras mixtas, como madera con hormigón ligeramente armado o albañilería no confinada utilizadas como tabiques interiores o paredes exteriores, se comportaron mal. Por ejemplo, los cortafuegos no reforzados de hormigón armado en los límites de las propiedades entre edificios de madera a menudo cayeron, destruyendo o dañando gravemente las casas de madera contiguas.

Las condiciones locales del sitio se correlacionan fuertemente con el daño estructural. La mayor parte del daño se concentró en las estructuras ubicadas sobre la unidad de relleno artificial: el 32% de las casas de albañilería de 2 pisos sobre el relleno fueron destruidas, junto con el 42% y el 32% de las casas de madera de uno y dos pisos, respectivamente. La unidad geológica que sigue en términos de daño fue la unidad de arcilla. En contraste, la unidad sobre la cual las estructuras experimentaron menores daños fue la de arena con grava y finos.

La Fig. 5 muestra la distribución de casas de madera, albañilería y hormigón en la ciudad indicando el estado de la estructura posterior al terremoto, clasificándola como sin daño, agrietada/inclinada o destruida. Este estudio considera 4.016 estructuras, de las cuales el 65% no sufrió daños, el 21% resultó inclinado o agrietado y el 14% fue destruido. La Tabla 1 muestra en detalle el número de estructuras por tipo sobre las diferentes unidades geológicas.

Tabla 1 – Número de estructuras analizadas en este estudio. Porcentaje con respecto al total por tipo son mostrados en paréntesis.

Tipo de estructura	Estado de las estructuras	Arcilla	Arena Limosa	Limo arcilloso con arena	Arena con grava y finos	Humedales	Relleno artificial	Total
Madera - 1 y 2 pisos	Sin daño	168 (4,7)	725 (20,5)	665 (18,8)	509 (14,4)	0 (0)	177 (5,0)	2244(63,4)
	Inclinado	118 (3,3)	333 (9,4)	207 (5,8)	5 (0,1)	0 (0)	120 (3,4)	783 (22,1)
	Destruído	88 (2,5)	65 (1,8)	124 (3,5)	13 (2,8)	46 (1,3)	176 (5,0)	512 (14,5)
Albañilería - 1 y 2 pisos	Sin daño	15 (3,3)	56 (12,2)	175 (38,0)	100 (21,7)	0 (0)	13 (2,8)	359 (78,0)
	Inclinado	6 (1,3)	6 (1,3)	42 (9,1)	1 (0,2)	0 (0)	9 (2,0)	64 (13,9)
	Destruído	10 (2,2)	4 (0,9)	15 (3,3)	2 (0,4)	0 (0)	6 (1,3)	37 (8,0)
Hormigón Armado	Sin daño	0 (0)	0 (0)	12 (70,6)	0 (0)	0 (0)	1 (5,9)	13 (76,5)
	Inclinado	0 (0)	0 (0)	1 (5,9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (5,9)
	Destruído	0 (0)	0 (0)	2 (11,8)	1 (5,9)	0 (0)	0 (0)	3 (17,6)

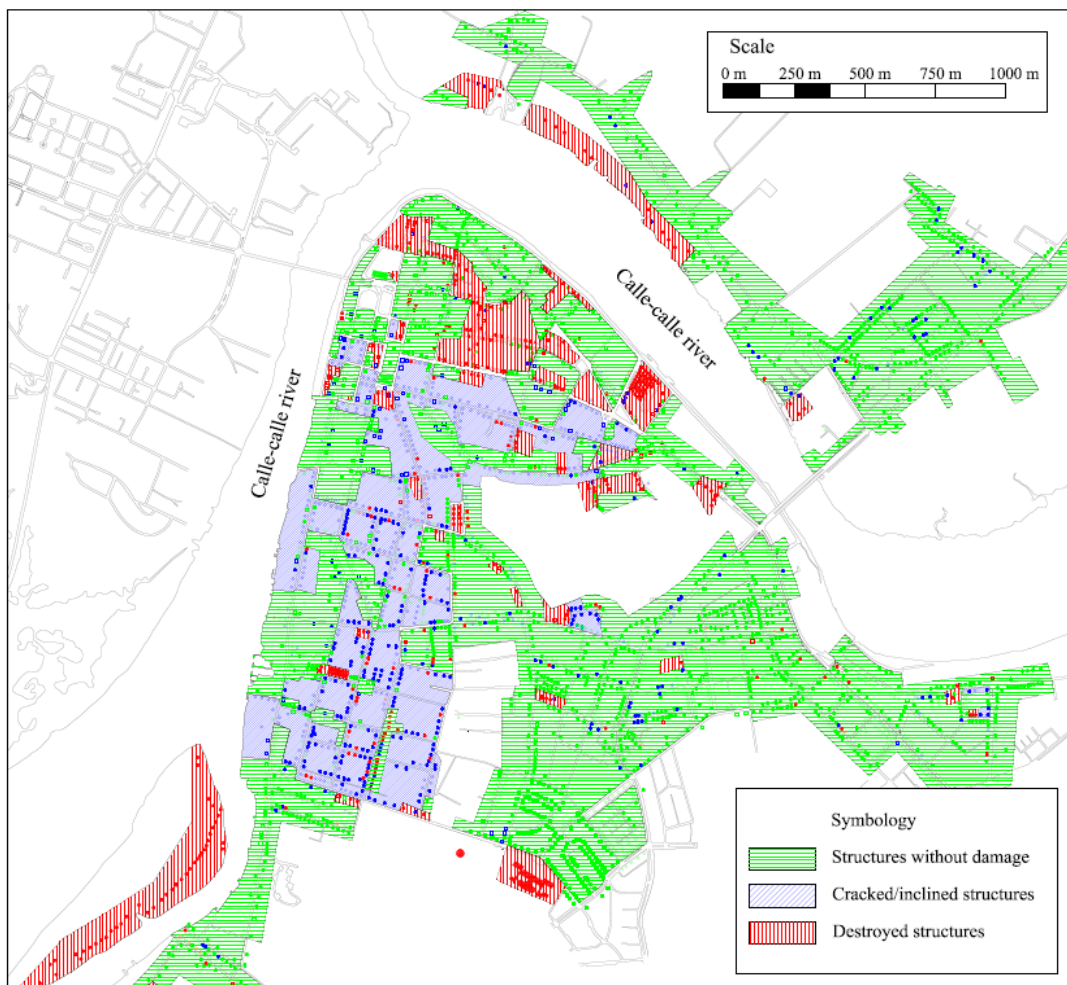


Fig. 5 – Daño estructural producto del terremoto de Valdivia de 1960.

Hay varios ejemplos sobresalientes de estructuras que no sufrieron daños durante el terremoto. Por ejemplo, el Hotel Pedro de Valdivia y el edificio Prales, ambos edificios de hormigón armado de seis pisos y ubicados en la unidad de limo arcilloso con arena [24]. Otros ejemplos de buen comportamiento sísmico son las 10 casas de madera construidas en estilo alemán a principios del siglo XX sobre la arena limosa cerca del río Calle-Calle [28].

5 Razones espectrales H/V

Mediciones de ruido sísmico ambiental se realizaron en varios lugares de la ciudad de Valdivia en campañas organizadas por la Universidad Austral [29] y la Universidad de Chile. Los sensores utilizados en estas campañas fueron sismómetros GeoSIG GVB-316 y Tromino con registros individuales que varían entre los 15 a 40 minutos de duración. El criterio adoptado para validar cada registro es que se seleccionaron al menos 20-30 ventanas cuando el criterio de la razón entre el “Short Term Average” dividido por “Long Term Average” (STA / LTA) oscila entre 0.2 y 2.5. El procesamiento de la señal se realizó con el software Geopsy.

En la mayoría de los H/V analizados, se identificó un peak asociable al período predominante de vibración (Fig. 6). Las grandes amplitudes de los peaks de los H/V indican un fuerte contraste de impedancia entre los estratos superiores y la roca metamórfica subyacente. Algunos H/V muestran dos peaks de amplitud claros, que pueden atribuirse a un contraste de impedancia adicional, además del que existe con la roca subyacente. La Fig. 6 muestra un mapa de iso-periodos que resume los períodos predominantes del sector central de la ciudad de Valdivia. La distribución de los períodos predominantes no se correlaciona con la geología de la superficie (Figs. 2 y 6).

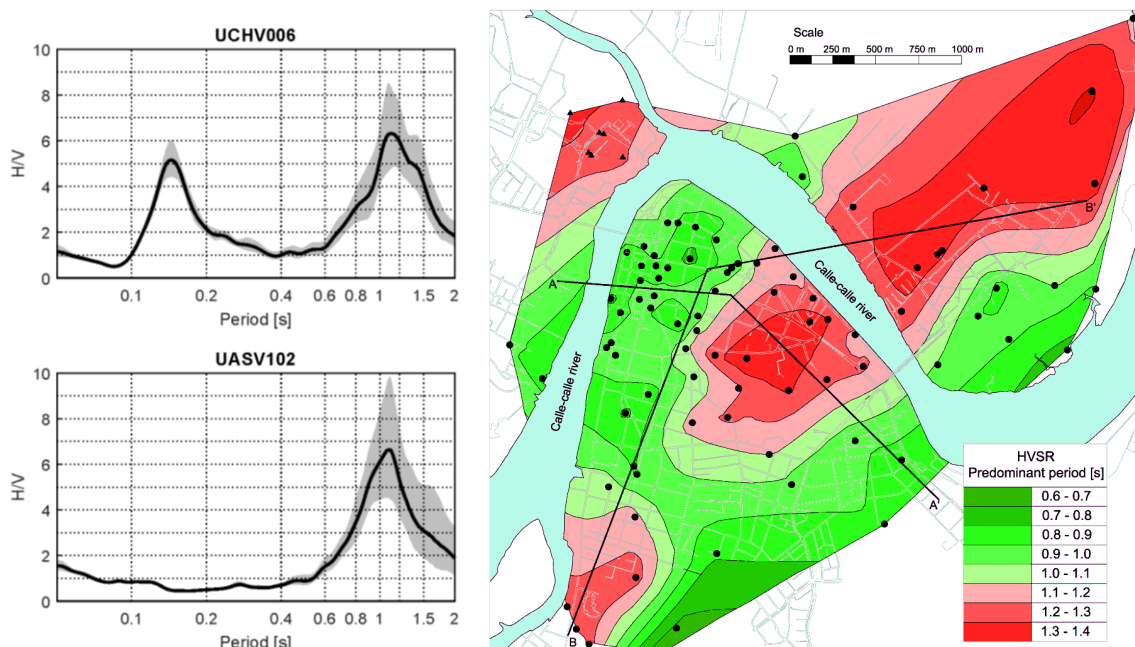


Fig. 6 – Períodos predominantes de vibración en la ciudad de Valdivia. Ejemplos de razones espectrales H/V e interpolación de períodos predominantes.

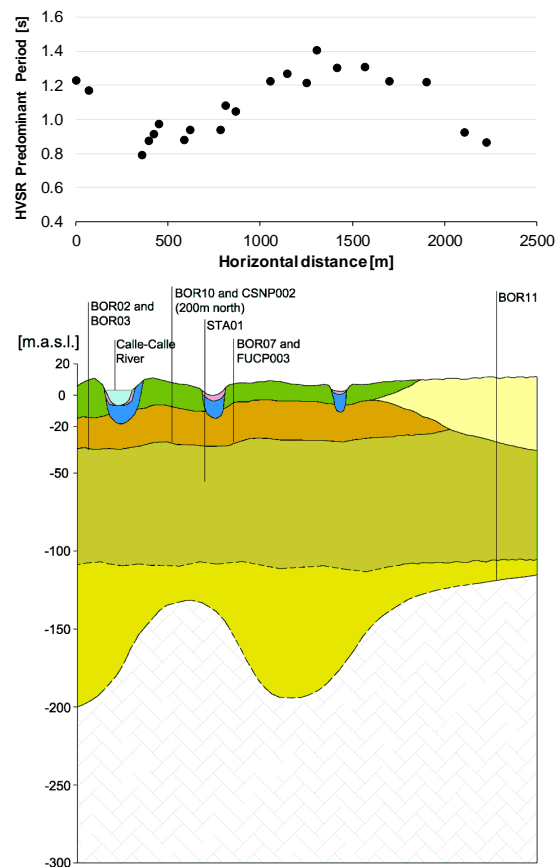


Fig. 7 – Relación entre el periodo predominante de vibración y la profundidad del basamento rocoso.

A partir del perfil transversal A-A' y los periodos predominantes obtenidos dentro de la ciudad de Valdivia, se estudió la relación entre la posición del basamento rocoso y el periodo predominante del suelo. La Fig. 7 muestra una relación inversa entre el periodo y la profundidad del basamento rocoso. Esta relación también fue verificada usando el método unidimensional de propagación de ondas en un medio multi-capa que considera estratos de suelo perfectamente horizontales. De acuerdo a esta relación ($H=T \cdot V_s/4$), la posición del basamento rocoso presenta una forma similar a la propuesta por Arenas et. al. [20] pero a una profundidad menor, lo que coincide con la información de uno de los sondajes presentados por Doyel et. al. [18] en ese mismo sector (BOR11 en Fig. 7) y que alcanza el basamento rocoso.

6 Conclusiones

A pesar de los grandes movimientos sísmicos, las estructuras estudiadas (principalmente estructuras de madera de uno y dos pisos, y unos pocos edificios de albañilería y hormigón armado) que fueron bien construidas y fundadas no sufrieron daños. La mayor parte del daño estructural correlaciona con la geología superficial y se debe a un comportamiento deficiente de los suelos de fundaciones de relleno no controlado que experimentaron movimiento lateral y grandes asentamientos diferenciales. Los períodos predominantes de vibración estimados mediante las razones espectrales H/V en el área de estudio oscilan entre 0,6 y 1,4 s, valores que están asociados a la profundidad del basamento rocoso, de acuerdo a las velocidades de onda de corte más superficiales medidas (V_{s30} que varía entre los 150 y 300 m/s) y las estimadas en profundidad. Sin embargo, los períodos no se correlacionan con las áreas más dañadas, ya que los edificios de uno y dos pisos no resonaron en los períodos

predominantes del suelo. Este documento demuestra que el daño inducido por un terremoto depende tanto de las características del depósito de suelo como del tipo de estructuras.

7 Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al equipo de investigación de la Universidad Austral, la Universidad de Chile y al Centro Sismológico Nacional por la información entregada y el continuo apoyo durante este trabajo.

8 Referencias

- [1] Press, F., Ben-Menahem, A. & Toksöz, M. N. (1961). Experimental determination of earthquake fault length and rupture velocity. *Journal of Geophysical Research*, 66(10): 3471-3485.
- [2] Kanamori, H. & Cipar, J. (1974). Focal process of the great Chilean earthquake May 22, 1960. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 9(2):128-136.
- [3] Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20): 2981-2987.
- [4] Abe, K. (1979). Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B4): 1561-1568.
- [5] Saint-Amand, P. (1961) Los terremotos de Mayo - Chile 1960. China Lake, California.
- [6] Alvarez, L. (1963). Studies made between Arauco and Valdivia with respect to the earthquakes of 21 and 22 May 1960. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(6): 1315 - 1330.
- [7] Plafker, G. & Savage, J. (1970). Mechanism of the Chilean earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geological Society of America Bulletin*, 81(4):1001-1030.
- [8] Barrientos, S. E. & Ward, S. N. (1990). The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation. *Geophysical Journal International*, 103(3): 589-598.
- [9] Moreno, M. S., Bolte, J., Klotz, J. & Melnick, D. (2009). Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, 36(16).
- [10] Fujii, Y. & Satake, K. (2013). Slip distribution and seismic moment of the 2010 and 1960 Chilean earthquakes inferred from tsunami waveforms and coastal geodetic data. *Pure and Applied Geophysics*, 170(9-10): 1493-1509.
- [11] Lazo, R., 2008. "Estudio de los daños de los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.
- [12] Astroza, M. & Lazo, R. (2010). Estudio de los daños de los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960. *Proceedings, X Jornadas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.
- [13] Cifuentes, I. (1989). The 1960 Chilean earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B1):665-680.

- [14] Ruiz, S., & Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37-56.
- [15] Lastrico, R. (1967). Relación entre los daños en los terremotos de 1960 y los suelos de fundación de Valdivia, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [16] Cisternas, M., Atwater, B. F., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., ... & Shishikura, M. (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 437(7057).
- [17] Cisternas, M., Carvajal, M., Wesson, R., Ely, L., & Gorigoitia, N. (2017). Exploring the historical earthquakes preceding the giant 1960 Chile earthquake in a time-dependent seismogenic zone exploring the historical earthquakes preceding the giant 1960 Chile earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6):2664–2675.
- [18] Doyel, W. W., Moraga, A. & Falcon, E. (1963). Relation between the geology of Valdivia, Chile, and the damage produced by the earthquake of 22 May 1960. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(6): 1331 - 1345.
- [19] Barozzi, R. & Lemke, R. (1966) El suelo de fundación de Valdivia, Estudios geotécnicos N°1. Santiago, Chile.
- [20] Arenas, M., Milovic, J., Pérez, Y., Troncoso, R., Behlau, J., Hanisch, J., Helms, F. (2005). Geología para el ordenamiento territorial: área de Valdivia, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, p.
- [21] Pastén, C., Saez, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J., and Poli, P. (2016). Deep characterization of the Santiago Basin using HVSr and cross-correlation of ambient seismic noise. *Engineering Geology*, 201, 57-66.
- [22] INN (2011). Diseño Sísmico de Edificios, NCh 433 of 96, Decreto Supremo 61, Instituto de Normalización, Santiago – Chile, noviembre 2011.
- [23] Weischet, W. (1963). The distribution of the damage caused by the earthquake in Valdivia in relation to the form of the terrain. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(6): 1259 - 1262.
- [24] Steinbrugge, K. V. & Flores, R. (1963). The Chilean earthquakes of May, 1960: A structural engineering viewpoint. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2): 225-307.
- [25] Watanabe, T. & Karzulovic, J. (1960). Los movimientos sísmicos del mes de mayo de 1960 en Chile. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 17(17): 41-87.
- [26] Cambiazo, C. (1961) Daños en las estructuras causados por el sismo del 22 de mayo de 1960 en las provincias de Valdivia, Osorno y Llanquihue. Santiago, Chile.
- [27] Duke, C. M. & J. Leeds, D. (1963). Response of soils, foundations, and earth structures to the Chilean earthquakes of 1960. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2): 309-357.
- [28] Campos, F. (2018). Evaluación de efectos de sitio en la ciudad de Valdivia producto del megaterremoto de 1960, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [29] Alvarado, D., (2012). "Microzonificación sísmica de la Ciudad de Valdivia. Etapa 1: Determinación del peligro uniforme y caracterización dinámica de los suelos empleando la técnica de la razón espectral de Nakamura.", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Austral de Chile, Valdivia.