

UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

## RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DE LA CUENCA DE SANTIAGO Y LOS DAÑOS OBSERVADOS EN EL TERREMOTO DEL 27 DE FEBRERO DEL 2010

## TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA, MENCION INGENIERIA GEOTÉCNICA MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERÍA CIVIL

# LORETO ANDREA VERGARA ZÚÑIGA

PROFESOR GUIA: RAMON VERDUGO ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISION: CESAR PASTÉN PUCHI CLAUDIO FONCEA NAVARRO PEDRO ACEVEDO MOYANO

> SANTIAGO DE CHILE 2015

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA, MENCIÓN INGENIERIA GEOTÉCNICA Y AL TITULO DE INGENIERA CIVIL POR: LORETO ANDREA VERGARA ZUÑIGA FECHA: NOVIEMBRE DE 2015 PROFESOR GUIA: Sr. RAMÓN VERDUGO A.

#### RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOLÓGICAS-GEOTÉCNICAS DE LA CUENCA DE SANTIAGO Y LOS DAÑOS OBSERVADOS EN EL TERREMOTO DEL 27 DE FEBRERO DEL 2010.

El terremoto del 27F de magnitud 8.8 tuvo un área de ruptura de aproximadamente 450 km de largo desde el norte de Pichilemu hasta la Península de Arauco. En la Región Metropolitana, se registraron intensidades sísmicas de hasta 8.5, cuyos daños se concentraron en viviendas antiguas, con número limitado de estructuras modernas afectadas.

Este estudio se ha centrado en analizar información geológica-geotécnica y geomorfológica que incide en el comportamiento sísmico de las estructuras, entre ellas la topografía superficial, la napa freática, profundidad y elevación del basamento rocoso, la geología superficial y la caracterización sísmica de la cuenca, de acuerdo al método de las razones espectrales H/V. Conjuntamente, se analizó la influencia de materiales sueltos y/o blandos ubicados próximos a antiguos cursos de agua, producto del transporte y depositación paulatina de sedimentos.

De manera de confrontar las variables mencionadas con los daños, se realizó la recopilación y georeferenciación de las obras que resultaron con daño estructural en la Provincia de Santiago, contabilizándose un total de 10705 viviendas dañadas (categoría A) y 560 estructuras de dimensión mayor (categoría B). Las comunas que resultaron con el mayor porcentaje de daños en estructuras de categoría A fueron Quinta Normal, seguido por Pedro Aguirre Cerda y Cerro Navia. Respecto a las estructuras de categoría B, las con mayor daño fueron Pedro Aguirre Cerda, seguida por Providencia y Ñuñoa. Por el contrario, las comunas que registraron los menores daños, tanto en categoría A y B, fueron La Pintana, Vitacura y La Granja.

Se confirma la influencia de la rigidez de los suelos en los daños reportados. Adicionalmente, los resultados indican que los daños más importantes se pueden asociar a una condición geológica singular correspondiente al final de una lengüeta de material aluvional (unidad geológica IIIa) que se introduce en la grava de Santiago, desde la comuna de Macul hasta Pedro Aguirre Cerda. La lengüeta está caracterizada por la gradación a lo largo del eje desde depósitos de material grueso hasta sedimentos finos con alto contenido arcilloso, lugar donde se concentraron los daños.

Al comparar los mapas de intensidades sísmicas del terremoto del 27F y del 3 de Marzo de 1985, se advierte que el terremoto de 1985 provocó mayores daños. Esto podría deberse a que después del terremoto del 85 muchas de las viviendas de adobe colapsaron y las que no, fueron mejoradas estructuralmente por los dueños, por lo tanto tendrían una mejora en su respuesta sísmica. A su vez, se identificó una importante diferencia de daños al este y oeste de la falla Infiernillo-Cerro Renca – Portezuelo de Chada, que podría explicarse en una diferencia de rigidez entre las formaciones de la roca ubicada al este y oeste de la mencionada falla.

A mi madre por todo el esfuerzo que puso en criar a cuatro hijos A Pablo por todo el apoyo y amor que me ha entregado incondicionalmente A mi niña el regalo más hermoso y preciado que tengo

#### AGRADECIMIENTOS

Quiero primero agradecer a mi mamá que tanto sacrificio puso en criar a cuatro hijos sola, pasamos muchas penurias, pero logramos salir adelante. Sin tu apoyo y esfuerzo no habría logrado ser quien soy ahora.

A Pablo mi amigo, mi apoyo y mi gran amor, gracias por tu paciencia, por tus consejos y por esas sonrisas que me das todos los días.

A mi niña hermosa, Emilia, que llegó a alegrarme la vida y llenarme de orgullo cada vez que aprende algo nuevo. Lo mejor del día es ver su carita sonriente cada mañana.

A mis hermanos, Esteban, Pamela y Nicolás, siempre tan divertidos, gracias por todos los lindos momentos.

Agradecer al Profesor Ramón Verdugo por orientarme en todo el proceso de la tesis y responderme pacientemente cada una de mis preguntas.

A mis amigos de la U: Danilo, Nelson y Joaquín, gracias por su amistad y hacer más divertida mi estadía en la pensión.

A mis amigas Javi y Vivi, juntas pasamos las dificultades del Magister, fue bueno saber que alguien me entendía en este proceso.

A los que ya no están. Mi tata gracias por tu amor y todo lo que me enseñaste, siempre fuiste un caballero, una persona generosa y amorosa, te extrañaré siempre. A mi mami siempre divertida, me enseñaste a tejer que tanto me relaja. A mi abuela espero que estés con los que te quieren y tanto extrañabas. A mis tíos, Gonzalo y Lucho se fueron tan jóvenes, siempre pienso en ustedes.

Quiero agradecer también a las 32 municipalidades de la Provincia de Santiago por entregarme información de los daños registrados en el 27F y a la Biblioteca Nacional por facilitarme los antiguos mapas de Santiago, sin su ayuda este trabajo no habría sido posible.

# TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Cuerpo Tesis	1
CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Marco Sismotectónico	3
2.1.1 Actividad Sísmica de Chile	3
2.1.1.1 Tipos de Sismos	4
2.1.2 Intensidad Sísmica	5
2.1.3 Descripción de Terremotos en estudio	6
2.1.3.1 Terremoto 3 de Marzo de 1985	6
2.1.3.2 Terremoto 27 de Febrero de 2010	8
2.2 Respuesta Sísmica de Depósitos de Suelos	13
2.2.1 Efecto Sitio	13
2.2.2 Métodos de las Razones Espectrales H/V	13
2.2.3 Caracterización Sismica en la Cuenca de Santiago	15
CAPITULO 3 - INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOMOREOLÓGICA E HIDROLÓGICA DE	IΔ
CUENCA DE SANTIAGO	21
3.1 - Generalidades	
3.2 Marco Morfoestructural	23
3.3 Basamento Rocoso	25
3.4 Características Hidrológicas	29
3.4.1 Aguas Superficiales	29
3.4.1.1 Cauces que atraviesan el área urbana	29
3.4.1.2 Cauces Precordilleranos	30
3.4.2 Aguas Subterráneas	32
3.5 Marco Geológico	36
3.5.1 Unidades Geológicas	36
3.5.2 Fallas Geológicas en la zona de estudio	39
3.6 Perfiles con Información Integrada	42
3.7 Cursos de aguas superficiales descritos en mapas históricos de la Región Metropolitana	a 47
3.7.1 Antiguos cursos de aguas de la Region Metropolitana	47
3.7.2 Analisis de los cursos de agua	53
CAPITULO 4 - RESPUESTA SÍSMICA DE LA CUENCA DE SANTIAGO	55
4.1 Análisis de Razones Espectrales	55
4.2 Análisis de Registros Sísmicos	64
4.3 Análisis de la direccionalidad de las ondas sísmicas	85
CAPITULO 5 DAÑOS GENERADOS POR EL TERREMOTO DEL 27F	88
5.1 Introducción	88
5.2 Superficie, población y viviendas en la Provincia de Santiago	88
5.3 Catastro de estructuras dañadas	91
5.3.1 Categoría A	92
5.3.2 Categoría B	98

CAPITULO 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	109
6.1 Introducción	109
6.2 Análisis de intensidades sísmicas en la Provincia de Santiago	109
6.2.1 Terremoto del 27 de Febrero del 2010	109
6.2.2 Comparación registro de daños con evento de 1985	111
6.3 Análisis de antiguos cursos de agua	113
6.4 Topografía superficial	117
6.5 Basamento Rocoso	120
6.5.1 Profundidad Basamento Rocoso	120
6.5.2 Elevación del Basamento Rocoso	120
6.6 Aguas Subterráneas	125
6.6.1 Profundidad del Nivel Freático	125
6.6.2 Elevación del Nivel Freático	125
6.7 Marco Geológico	130
6.7.1 Geología Superficial de la cuenca de Santiago	130
6.7.1.1 Macul	134
6.7.1.2 San Joaquín	136
6.7.1.3 San Miguel	138
6.7.2 Fallas Geológicas	140
6.8 Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago.	143
6 8 1 - Razones espectrales	144
6 8 2 - Registros sísmicos	148
6 9 - Análisis de Perfiles de relleno sedimentario	153
	100
CAPITULO 7 RESUMEN DE RESULTADOS	161
71 - Comunas con mayores daños	161
7.2 - Comunas con menores daños	163
	100
CAPITULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	165
81 - Conclusiones	165
82 - Recomendaciones	167
	107
CAPITULO 9 BIBLIOGRAFÍA	168
ANEXO A ESCALAS DE INTENSIDAD SÍSMICA	172
A.1 Escala MSK-64	172
A.2 Escala EMS-98	177
ANEXO B NIVELES ESTÁTICOS AGUA SUBTERRÁNEA	182
_	
ANEXO C DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS	189
ANEXO C DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS C.1 Pozos perfil NS	189 189
ANEXO C DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS C.1 Pozos perfil NS C.2 Pozos perfil EW	189 189 203
ANEXO C DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS C.1 Pozos perfil NS C.2 Pozos perfil EW C.3 Pozos perfil XY	189 189 203 212
ANEXO C DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS C.1 Pozos perfil NS C.2 Pozos perfil EW C.3 Pozos perfil XY	189 189 203 212
ANEXO C DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS C.1 Pozos perfil NS C.2 Pozos perfil EW C.3 Pozos perfil XY ANEXO D REGISTROS SÍSMICOS	189 189 203 212 215
ANEXO C DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS C.1 Pozos perfil NS C.2 Pozos perfil EW C.3 Pozos perfil XY ANEXO D REGISTROS SÍSMICOS	189 189 203 212 215

# INDICE DE TABLAS

Tabla 2	1 Número do rezonas espectroles por Tipo
	Trumero de fazories espectrales por ripo
Tabla 3	1 Coordenadas en WGS84 de pozos profundos 42
Tabla 3	<b>2</b> Listado de canales artificiales del Plano de la Sociedad del Canal de Maipo
Tabla 4	.1 Estaciones sismológicas utilizadas
Tabla 4	2 Aceleraciones máximas obtenidas para el terremoto del 27F
Tabla 4	<b>3</b> Periodo asociado a la máxima aceleración espectral
Tabla 4	4 Comparación entre frecuencia preponderante y frecuencia fundamental
Tabla 4	5 Aceleraciones máximas registradas en la componente horizontal para el 27F 85
Tabla 5	1 Datos de superficie, población y viviendas por comuna (INE)
Tabla 5	2 Número y porcentaje de estructuras de categoría A dañadas
Tabla 5	3 Atributos de la Vivienda (INE y CELADE, 2002)
Tabla 5	4 Estructuras de categoría B dañadas por comuna
Tabla 5	5 Distribución del número de estructuras dañadas por clase
Tabla 5	.6 Descripción de los Grados de daños102
Tabla 5	7 Distribución de grado de daño para estructuras de categoría B 103
Tabla 5	8 Descripción de estructuras que presentaron Grado de daño 3 105
Tabla 6	135 Modelo Estratigráfico sector Edificio Don Manuel Sánchez
Tabla 6	2 Descripción estratigráfica calicata N°1136
Tabla 6	<b>.3</b> Descripción estratigráfica calicata N°2
Tabla 6	4 Descripción estratigráfica calicata N°3137
Tabla 6	<b>5</b> Descripción estratigráfica calicata 4137
Tabla 6	.6 Modelo Estratigráfico Edificio Décima Avenida 1178 139
Tabla 6	7 Comparación registro de daños y aceleraciones máximas registradas
Tabla 6	<b>8</b> Comparación espectros de respuesta y registro de daños

# INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1 Velocidad de convergencia relativa entre placas (Barrientos, 2010)	3
Figura 2.2 Sismicidad zona Central de Chile (Modificado Leyton et al., 2010)	4
Figura 2.3 Isosistas en roca y epicentro terremoto de 1985 (Menéndez, 1991), obten	ida de
Fernández (2001)	7
<b>Figura 2.4</b> Intensidades sísmicas terremoto de 1985 (Menéndez, 1991), modificado (2011)	Molina 8
<b>Figura 2.5</b> Epicentro del terremoto del 27 de Febrero del 2010 (Barrientos, 2010)	9
<b>Figura 2.6</b> Mapa de isosistas terremoto del 27 de Febrero (Astroza et al. 2012)	10
<b>Figura 2.7</b> Intensidad sísmica considerando movilidad de vulnerabilidad (Molina, 2011),	12
Figura 2.8 Cálculo de la razón espectral (Pastén, 2007)	16
<b>Figura 2.9</b> Tipos de razones espectrales (Pastén, 2007)	17
Figura 2.10 Frecuencia fundamental Tipo 1 y primer peak Tipo 2 (modificado de Pastén,	2007)
	18
Figura 2.11 Frecuencia fundamental segundo peak Tipo 2 y Tipo 3 (modificado de P	astén,
2007)	19
Figura 2.12 Ubicación de razones espectrales Tipo 4 (modificado de Pastén, 2007)	20
Figura 3.1 Zona de estudio	22
Figura 3.2 Morfoestructuras principales de la segmentación andina (Fock, 2005)	23
Figura 3.3 Elevación topográfica de la cuenca de Santiago.	24
Figura 3.4 Profundidad del basamento rocoso (modificado Araneda et al., 2000)	26
Figura 3.5 Profundidad del basamento rocoso y red vial de la zona de estudio.	27
Figura 3.6 Elevación del basamento rocoso en m.s.n.m.	28
Figura 3.7 Modelo de elevación de la zona de estudio	29
Figura 3.8 Principales cursos de agua superficiales de la cuenca de Santiago	31
Figura 3.9 Profundidad Napa Freatica, primer semestre 1998 (CONAMA, 1999)	33
Figura 3.10 Protundidad de la Napa Freatica en metros	34
Figura 3.11 Elevacion del Nivel Freatico y el Basamento Rocoso	35
<b>Figura 3.12</b> Geologia supericial y comunas de la Region Metropolitana (modificado de l	Leyion
El al., 2010)	37
Figura 3.13 Distribución ignimibrita (extratuo de montoso, 2012)	39
Figura 3.14 Fallas geológicas zona de estudio. (Modificado de Mufioz-Saez et al., 2014).	40
Figura 3.15 Mapa geologico de los certos Nenca y Colorado. (Genes, 1999)	41
Figura 3.17 Ubicación de perfiles	+ 1 14
Figura 3.18 Cortes de elevación de los perfiles NS WE v XY	44
Figura 3.19 Perfiles de suelo en la cuenca de Santiago	46
Figura 3.20 Plano de Santiago de 1831 realizado por Claudio Gay.	48
Figura 3.21 Plano de Santiago de 1875 realizado por Ernesto Ansa	49
Figura 3.22 Plano de Santiago de 1895 realizado por Nicanor Boloña	50
Figura 3.23 Plano confeccionado por la sociedad canal de Maipo	51
Figura 3.24 Canales artificiales y naturales	54
Figura 4.1 Ubicación de Tipos de Razones Espectrales	56
Figura 4.2 Frecuencia fundamental Tipo 1, 2 y 4	57
Figura 4.3 Frecuencia fundamental, profundidad de la roca y geología superficial	59
Figura 4.4 Amplitud de Razón Espectral	60
Figura 4.5 Razones Espectrales sobre perfil XY	61
Figura 4.6 Razones Espectrales sobre perfil WE	62
Figura 4.7 Razones Espectrales sobre perfil NS	63
Figura 4.8 Estaciones sismológicas y geología superficial	66
Figura 4.9 Perfil estratigráfico estación ANDA	67
Figura 4.10 Perfil estratigráfico estación FCFM	68

Elauro A	11 Darfil astrotigráfica astroján LACH	60
Figura 4.	10 Derfil estratigráfico estación LELOD	. 09
Figura 4.		. 70
Figura 4.	13 Perfil estratigratico estación PENA	. 71
Figura 4.	14 Perfil estratigratico estacion MAIP	. 72
Figura 4.	<b>15</b> Estaciones sismológicas y frecuencias fundamentales	. 73
Figura 4.	16 Espectros de respuesta estación ANDA	. 74
Figura 4.	17 Espectros de respuesta estación ANTU	. 75
Figura 4.	18 Espectros de respuesta estación LACH	. 76
Figura 4.	19 Espectros de respuesta estación FCFM	. 77
Figura 4.	20 Espectros de respuesta estación LFLOR	. 78
Figura 4.	21 Espectros de respuesta estación MAIP	79
Figura 4	22 Espectros de respuesta estación PEÑA	80
Figura 4	23 Espectros de respuesta estación PAI TO	. 00 . 81
Figura 4.	20 Espectios de respuesta estacion n'AETO	86
Figura 4.	25 Applación Estaciónes sistilológicas	. 00
Figura 4.	23 Aceleración de comunas de la Drevincia de Continues NO y EVV	. 07
Figura 5.	1 Ubicación de comunas de la Provincia de Santiago	. 89
Figura 5.	2 Ubicación geografica de las viviendas danadas.	. 93
Figura 5.	3 Porcentaje de viviendas danadas	. 94
Figura 5.	4 Porcentaje del material de muros portantes por comuna	. 96
Figura 5.	5 Daños en estructuras de categoría A	. 97
Figura 5.	6 Ubicación de estructuras de categoría B	101
Figura 5.	7 Distribución de Grado de daño por comuna	102
Figura 5.	8 Distribución geográfica de las estructuras por Grado de daños	104
Figura 5.	9 Fotografías estructuras con Grado de daño 3	107
Figura 6	1 Registro de daños emplazado sobre las intensidades sísmicas obtenidas para	a el
terremoto	del 27F	110
Figura 6		••••
	2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para	a el
terremoto	2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985	a el 112
terremoto	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114
Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el 112 114 115
Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el 112 114 115 116
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el 112 114 115 116
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 119
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 119 121
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 119 121 122
terremoto Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 121 122 123
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 121 122 123 124
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 117 121 122 123 124 126
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 116 117 118 121 121 122 123 124 126 127
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 121 121 122 123 124 126 127 128
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el al el 112 114 115 116 116 117 118 117 121 122 123 124 126 127 128 129
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 117 121 122 123 124 127 128 127 128 129 131
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li> <li>3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 117 121 122 123 124 126 127 128 129 131
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 117 121 122 123 124 126 127 128 129 131 132
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 119 121 122 123 124 129 131 132 133
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 117 118 121 122 123 124 127 128 129 131 132 133 133
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 117 118 119 121 122 123 124 127 128 129 131 132 133 133 134 134
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 117 118 117 121 122 123 124 127 128 129 131 132 133 134 134
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 117 118 117 121 122 123 124 126 127 128 129 131 132 133 134 134 134
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 116 117 118 119 121 122 123 124 126 127 128 131 132 133 134 134 136 138 138 138 138 138 138 138 138
terremoto Figura 6. Figura 6.	<ul> <li>2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para de 1985</li></ul>	a el 112 114 115 116 117 118 119 121 122 123 124 129 131 132 133 134 134 134 134 134 134 134

Figura	6.28 Falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada y daños Categoría B	142
Figura	6.29 Reinterpretación Falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada	143
Figura	6.30 Daños estructuras categoría A y frecuencia fundamental Tipo 1, 2 y 4	145
Figura	6.31 Daños estructuras categoría B y frecuencia fundamental Tipo 1, 2 y 4	146
Figura	6.32 Daños en estructuras de categoría A y B y amplitud de razones espectrales	147
Figura	6.33 Estaciones sismológicas y daños en estructuras categoría A	149
Figura	6.34 Estaciones sismológicas y daños en estructuras categoría B	150
Figura	6.35 Daños en estructuras de categoría A y perfiles en estudio.	154
Figura	6.36 Daños en estructuras de categoría B y perfiles en estudio.	155
Figura	6.37 Información del Perfil XY	156
Figura	6.38 Información del Perfil EW	157
Figura	6.39 Información del Perfil NS	158

## CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN

## 1.1.- Motivación

El mega terremoto del 27 de Febrero de magnitud Mw=8.8, afectó a una extensa área del país y dejó una cifra estimada de más de 2 millones de damnificados. A raíz de ello, y considerando que Chile se encuentra en un ambiente tectónico en permanente actividad, diversos grupos disciplinarios han realizado estudios de los distintos factores causantes de los daños, entre los cuales se distingue el comportamiento sísmico de los suelos.

En el marco anterior y considerando que la cuenca de Santiago representa aproximadamente el 40 de la población nacional (INE, 2015), es de vital importancia el reconocimiento y análisis de los factores que influyeron en su comportamiento sísmico.

Por consiguiente, en el presente documento se analizan los daños observados en la zona, a través de un catastro realizado a las obras que presentaron daño estructural en la provincia de Santiago, correspondiente a 32 comunas de la Región Metropolitana.

En paralelo, se realizó la caracterización de las condiciones geológicas-geotécnicas de la cuenca de Santiago, que en definitiva permitan explicar las concentraciones de daños observados en ciertos sectores. Los parámetros estudiados para la caracterización son los siguientes: basamento rocoso, napa subterránea, frecuencia fundamental de los depósitos de suelos, perfiles estratigráficos, marco geológico, registros acelerográficos y cursos de aguas superficiales.

Conjuntamente, se analizó como posible causa de los daños, antiguos cursos de agua que podrían haber sido rellenados con materiales sueltos y/o blandos de forma antrópica, o producto del transporte y depositación paulatina de sedimentos en el transcurso de los años. Para ello se compararon las antiguas vías de aguas con las actuales, utilizando mapas históricos de la Región Metropolitana.

## 1.2.- Objetivos

El objetivo de este trabajo es relacionar las variables geológicas y geotécnicas de la cuenca de Santiago con la respuesta sísmica del sector.

Utilizando el registro de daños producidos por el terremoto del 27 de Febrero, y sumando información de intensidades sísmicas obtenidas para el terremoto de 1985, se identificarán condiciones locales y características propias de la cuenca que permitan explicar dichos daños y reconocer en el futuro sectores con mayor susceptibilidad frente amenazas sísmicas.

## 1.3.- Cuerpo Tesis

El presente documento está conformado por 9 capítulos, además de una sección de anexos. La descripción de cada uno de los capítulos es la siguiente:

En el **capítulo 2** se presenta una revisión bibliográfica de los aspectos teóricos considerados en este informe, correspondiente al marco sismotectónico de la zona y la respuesta sísmica de la cuenca de Santiago.

En particular, en el marco sismotectónico se explica el concepto de intensidad sísmica y se detallan los antecedentes sismológicos de dos terremotos significativos ocurridos en la región, el terremoto del 3 de Marzo de 1985 y el terremoto del 27 de Febrero del 2010. Por su parte, en el análisis de la respuesta sísmica se describe el método de Nakamura, el cual evalúa la respuesta sísmica en superficie.

En el **capítulo 3** se presenta la información geológica, geomorfológica e hidrológica de la cuenca de Santiago. Adicionalmente, se analizan antiguos mapas de la Región Metropolitana con el fin de comparar antiguos y actuales cursos de agua, de manera de localizar sectores que pudieron ser rellenados con materiales sueltos y/o blandos.

En el **capítulo 4** se estudia la respuesta sísmica de la cuenca, mediante el análisis de las razones espectrales y el estudio de los registros sísmicos obtenidos para el terremoto del 27F.

En el **capítulo 5** se detalla la división político-administrativa de la Provincia de Santiago y se presenta el catastro de las obras que presentaron daño estructural producto del terremoto del 27F.

En el **capítulo 6** se presentan los resultados, comparando los factores geológicos y geotécnicos de la cuenca con la ubicación de los daños sufridos por el terremoto del 27F.

En el **capítulo 7** se analizan los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

En el **capítulo 8** se desarrollan las conclusiones finales de este trabajo y sugerencias para estudios venideros.

Por último, en el **capítulo 9** se detallan las referencias utilizadas como complemento para la realización del presente informe.

## CAPITULO 2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 2.1.- Marco Sismotectónico

## 2.1.1.- Actividad Sísmica de Chile

Chile corresponde a uno de los países con mayor actividad sísmica del planeta, registrando más de 10 eventos de magnitud mayor o igual a 8 durante el siglo XX. Entre éstos, el terremoto de Valdivia de 1960 corresponde al mayor sismo registrado desde el comienzo de la instrumentación sismológica (Barrientos, 2007).

Esta gran actividad sísmica es producto del régimen de subducción en que se encuentra inmerso el país, fruto del acoplamiento y la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, entre las que se ha medido una velocidad de convergencia que varía aproximadamente entre 6.5 a 7.0 cm/año (Barrientos, 2010). En la Figura 2.1 se grafica el régimen de convergencia entre las placas.



Figura 2.1 Velocidad de convergencia relativa entre placas (Barrientos, 2010).

Por otra parte, el margen convergente en las costas de Chile puede ser dividido en tres zonas principales: desde los 15 a 26°S, la placa de Nazca subducta bajo la corteza continental con un ángulo entre 25° a 30°; entre los 26° y 33°S, en la zona de los valles transversales, la placa de Nazca subducta bajo la Cordillera de los Andes y Argentina con un ángulo cercano a los 10° de inclinación, formando lo que se conoce como "flat slab"; y finalmente, en la región comprometida desde los 33°S (donde se concentra el presente estudio), la placa desciende con un ángulo de 30° de inclinación, sin embargo, la sismicidad en este sector no ha registrado epicentros mayores a los 200 km de profundidad (Madariaga, 1998).

## 2.1.1.1.- Tipos de Sismos

Producto de la geometría de la placa que subducta, en Chile es posible identificar cuatro fuentes sismogénicas, las cuales son: sismos interplaca, sismos intraplaca de profundidad intermedia, sismos superficiales y sismos outer-rise. En la Figura 2.2 se presenta un perfil E-W, a los 33.5°S de latitud, que ilustra la sismicidad y las 4 fuentes mencionadas.



Figura 2.2 Sismicidad zona Central de Chile (Modificado Leyton et al., 2010)

Las características de cada una de las fuentes sismogénicas mencionadas se detallan a continuación:

#### Sismos Interplaca

Se producen en la zona de contacto entre las placas Sudamericana y de Nazca, cuando las fuerzas acumuladas superan el roce entre las placas. Generalmente son del tipo compresional, extendiéndose hasta los 50 a 60 km de profundidad. (Figura 2.2a).

#### Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia

Los sismos intraplaca de profundidad intermedia comprenden aquella actividad que ocurre dentro de la placa de Nazca, como resultado de esfuerzos tensionales producidos por el peso de la parte más profunda de la placa. Se extienden desde los 60 hasta los 200 km de profundidad. (Figura 2.2b).

#### Sismos Superficiales

Son aquellos cuyo epicentro se ubica al interior de la placa Sudamericana, principalmente en los sectores precordilleranos y cordilleranos, ubicándose a una profundidad menor de 40 km. Sus mecanismos de ruptura corresponden a fallas inversas y/o transcurrentes. (Figura 2.2c)

#### Sismos Intraplaca Oceánica u Outer-rise

Los sismos outer-rise se producen por la flexión de la placa de Nazca en aquellos sectores al oeste del borde de subducción, en el exterior de la fosa Perú-Chile. Sus mecanismos pueden ser compresionales o tensionales y se caracterizan por generar eventos de magnitud moderada, sin embargo, se estima que bajo ciertas condiciones pueden generar maremotos altamente destructivos. (Figura 2.2d).

#### 2.1.2.- Intensidad Sísmica

La intensidad sísmica es una medida de los daños asociados a un terremoto, considerando los efectos observados en personas, objetos de uso habitual y estructuras. Debido a que este concepto está relacionado con la fuerza en que se perciben las ondas en la superficie, es función también de la distancia y de las características del sitio.

De este modo, la intensidad sísmica describe de manera subjetiva, pues depende del observador, el potencial destructivo de los sismos sobre un número de objetos utilizados en el ambiente cotidiano. La ventaja de su uso radica en que es una herramienta que no requiere de instrumentos para ser medida.

A lo largo de la historia se han desarrollado múltiples escalas de intensidad sísmica, siendo la primera la realizada por Rossi y Forel a finales del siglo XIX, en la cual se reagruparon los efectos de los terremotos en 10 grados de intensidad. Posteriormente, Mercalli introdujo una nueva escala de 10 grados, siendo ésta incrementada a 12 por Cancani en 1902. Luego Sieberg publica una escala aún más detallada en base a lo desarrollado por Mercalli y Cancani denominada la escala Mercalli-Cancani-Sieberg (M.C.S.). Esta última, fue modificada en 1931 por Word y Neumann conocida como la escala de Mercalli-Wood-Neumann (M.W.N.), la cual fue mejorada por Charles Richter, siendo conocida como la escala de Intensidad de Mercalli Modificada (I.M.M.).

Asimismo, en 1964, tres sismólogos europeos llamados Medvedev, Spoonheuer y Karnik, definieron una nueva escala, denominada MSK-1964, la cual consta de 12 grados manteniendo las descripciones de la escala I.M.M. referentes a efectos en las personas y sólo modificando la descripción de los efectos en los edificios (Medvedev et al., 1964). Esta escala es utilizada en algunos países de Europa y también ha sido aplicada para determinar las intensidades sísmicas de los terremotos en Chile, la cual, a partir del terremoto del 3 de Marzo de 1985, fue adaptada a las características de las construcciones Chilenas (Monge y Astroza, 1989).

Por otra parte, en la unión Europea, la base para la evaluación de la intensidad sísmica es la escala Macrosísmica Europea (European Macroseismic Scale, EMS-98), publicada en 1998 como actualización de la versión anterior realizada en 1992. Dicha escala considera construcciones más modernas con diseño sismorresistente.

Ambas escalas, MSK-64 y EMS-98, clasifican el daño y el tipo de construcción de la estructura en base a tablas definidas, permitiendo reducir la subjetividad en la medición de los daños.

En el Anexo A del presente documento se presentan las metodologías para determinar la intensidad sísmica en las escalas MSK-64 y EMS-98 para construcciones Chilenas, de acuerdo a lo ilustrado por Molina (2011).

#### 2.1.3.- Descripción de Terremotos en estudio

Para el desarrollo de este informe se consideraron dos eventos sísmicos de importancia, los cuales son: el terremoto del 3 de Marzo de 1985 de magnitud Ms=7.8 y el terremoto del 27 de Febrero de 2010 de magnitud Mw=8.8. Ambos terremotos son analizados debido a tres razones principales: la proximidad de sus epicentros a la zona de estudio, fueron de magnitud importante y, debido a que son relativamente recientes, se encuentran bien documentados.

Cabe mencionar que para el terremoto de 1985, se había dispuesto de una red de acelerógrafos, lo que permitió un análisis bastante detallado de la ruptura y de las intensidades sísmicas en el país.

A continuación se detallan los principales antecedentes de los terremotos en estudio.

#### 2.1.3.1.- Terremoto 3 de Marzo de 1985

El domingo 3 de marzo de 1985 a las 19 horas 47 minutos (hora local), ocurrió un terremoto de magnitud Ms=7.8, cuyo epicentro se ubicó en el mar entre Valparaíso y Algarrobo, a unos 20 km de la costa y aproximadamente a 15 km de profundidad (Saragoni, 1986). El área de la zona de ruptura se estimó en 170 km de longitud y 100 km de ancho (Comte et al., 1986). El terremoto correspondió a un sismo outer-rise y el mecanismo de ruptura fue una falla inversa de bajo ángulo.

Las deformaciones permanentes experimentadas por la superficie, especialmente en el fondo marino, produjeron 5 minutos después del terremoto un pequeño maremoto con un aumento inicial del nivel del mar de 20 cm y una amplitud máxima de 1.15 m (Lagos, 2003).

La interpretación de los registros sísmicos obtenidos permitió determinar que el evento consistió en 2 terremotos: el primero de magnitud Ms=5.3 con epicentro en el mar frente a Algarrobo y de duración de movimiento fuerte de 10 segundos; y el segundo evento, registrado 10 segundos después, de magnitud Ms=7.8, cuyo epicentro estuvo ubicado en el mar frente a San Antonio, con una duración de movimiento fuerte de 30 segundos. La duración total de ambos terremotos alcanzó aproximadamente los 120 segundos (Saragoni et al., 1986).

Los daños generados por el terremoto se concentraron principalmente en el sector habitacional con un total de 75.724 viviendas destruidas y 142.498 dañadas, mayoritariamente de adobe, las cuales se extendieron desde Illapel a Cauquenes, generando un total de 177 víctimas fatales y 2.575 heridos (ONEMI, 2009).

En la Figura 2.3 se presentan las isosistas de intensidad sísmica en roca, realizada por Menéndez (1991) en la zona central, mediante la escala MSK-64 propuesta por Monge y Astroza (1989). Se desprende que las mayores intensidades sísmicas se registraron a lo largo de la costa, debido a que el evento se ubicó en la fosa marina, con intensidades sísmicas mayores a los VII grados en localidades como Valparaíso, Llolleo y San Antonio.



Figura 2.3 Isosistas en roca y epicentro terremoto de 1985 (Menéndez, 1991), obtenida de Fernández (2001)

En la Figura 2.4 se presentan las intensidades sísmicas registradas por Menéndez (1991) en la Región Metropolitana. Se observa que las zonas con mayor intensidad (> VIII) se concentraron en cinco sectores de la Región: al noroeste, en las comunas de Quinta Normal, Cerro Navia, Pudahuel, Renca y Lo Prado; al suroeste, en Maipú; al este del cerro San Cristóbal en Providencia; al sureste en la comuna de Macul y al sur en Puente Alto. Por su parte, las comunas que presentaron las menores intensidades sísmicas (VI), fueron Vitacura y Las Condes.



Figura 2.4 Intensidades sísmicas terremoto de 1985 (Menéndez, 1991), modificado Molina (2011)

## 2.1.3.2.- Terremoto 27 de Febrero de 2010

El terremoto del 27 de Febrero del 2010 ocurrió a las 3:34 horas (hora local) y alcanzó una magnitud Mw=8.8. El evento se originó en un área que se extiende desde el norte de Pichilemu hasta la Península de Arauco por el sur, cubriendo 450 km de longitud norte-sur y 150 km de ancho (Barrientos, 2010). La zona de contacto entre placas se ubicó en la fosa marina a unos 130 km al oeste de la costa, a una profundidad estimada de 30 km.

Debido a la ubicación de la zona de ruptura, al igual que el terremoto de 1985, gran parte de los daños se concentraron en las zonas costeras del país. En consecuencia, bajo estas circunstancias y sumado a otros factores, el terremoto generó un maremoto con olas de hasta 10 m de amplitud, las cuales provocaron daños en las localidades costeras desde Tirúa a Llolleo.

En la Figura 2.5 se presenta en detalle el epicentro del terremoto (estrella color rojo) y la ubicación de sus réplicas con magnitud > 4.7 (color violeta las correspondientes al primer día y azules las posteriores). A la izquierda se muestra el inicio del sismo corresponde a la estrella de color rojo y en azul las réplicas con magnitud > 4.7. En el panel derecho de la figura se muestran las réplicas del evento en función del tiempo en días después del evento principal.



Con respecto a los daños, éstos se concentraron principalmente en el sector vivienda, hospitalario, educacional, vial y portuario. En el sector habitacional los daños se centraron mayoritariamente en las viviendas de adobe de uno a dos pisos. A su vez, aproximadamente un 25% de los hospitales presentaron daño severo y se estima que cerca del 44% de la infraestructura portuaria perdió operatividad (Molina, 2011).

En la Figura 2.6 se presentan las curvas isosistas de intensidad sísmica, obtenidas a partir de la escala MSK-64 para los daños producidos en viviendas de uno y dos pisos. Se desprende que la zona costera alcanzó valores mayores a VIII. Es importante señalar que este mapa no considera el efecto del suelo, es decir, solo incorpora información de suelos duros. En consecuencia, representa principalmente los efectos de la fuente sísmica.



Figura 2.6 Mapa de isosistas terremoto del 27 de Febrero (Astroza et al., 2012)

En la Región Metropolitana, los daños más graves se centraron en las viviendas antiguas ubicadas en el casco histórico de la Región, sin embargo, también se presentaron daños importantes en construcciones más modernas.

En la Figura 2.7 se presentan las intensidades sísmicas obtenidas por Molina (2011) para el terremoto del 27F en las 34 comunas del Gran Santiago. Los datos fueron obtenidos de viviendas encuestadas considerando como escala de intensidad una adaptación de las escalas MSK-64 y EMS-9.

El estudio consideró la inspección de 125 sectores del Gran Santiago, contabilizando 6180 viviendas encuestadas. Adicionalmente, Molina clasificó las construcciones de acuerdo al tipo de construcción o clase de vulnerabilidad, definiendo 4 clases (A, B, C y D), donde A, B y C corresponden a las clases propuestas en la escala MSK-64 (ver Tabla A.1 del Anexo A) y la clase D a la definida en la escala EMS-98 (ver Tabla A.6 del Anexo A).

Por otro lado, Molina observó que algunas de las construcciones de adobe y de albañilería simple que sobrevivieron al terremoto de 1985 fueron intervenidas por sus propietarios mejorando su respuesta ante futuros eventos. De esta forma, Molina analizó el efecto de la movilidad de la Clase de Vulnerabilidad, en donde, una vivienda de adobe podría comportarse como una estructura de Clase B en vez de A, y una vivienda de albañilería simple como una estructura de Clase C en vez de B.

De acuerdo a la Figura 2.7 las mayores intensidades sísmicas (> VIII) se concentraron en el sector noroeste de la Región Metropolitana en las comunas de Quinta Normal, Renca, Cerro Navia y Estación Central, y al sur en la comuna de San Bernardo.

Al comparar los sectores de alta intensidad sísmica con lo reportado para el terremoto de 1985, se desprende que en ambos eventos la zona noroeste de la cuenca fue la que sufrió el daño más severo. Del mismo modo, en ambos terremotos las menores intensidades se registraron en las comunas de Las Condes y Vitacura. En consecuencia, es importante señalar que no sería incorrecto sospechar que esta situación podría estar influenciada por la diferencia socio-económica de los sectores.



Figura 2.7 Intensidad sísmica considerando movilidad de vulnerabilidad (Molina, 2011).

## 2.2.- Respuesta Sísmica de Depósitos de Suelos

### 2.2.1.- Efecto Sitio

El fenómeno denominado *Efecto Sitio* corresponde a la modificación de la señal sísmica al llegar a la superficie debido a las condiciones geotécnicas del sector. Numerosos estudios han observado que la modificación, dependiendo del tipo de suelo, puede resultar en una amplificación de la señal y en una alteración del contenido de frecuencias.

Conocido es el caso del terremoto del 19 de Septiembre de 1985 en Michoacán, México, donde el evento causó daño moderado en la vecindad del epicentro, no obstante en la Ciudad de México, ubicada a 350 km del epicentro, el terremoto generó daños excesivos en las estructuras emplazadas sobre suelos blandos y daños despreciables en estructuras ubicadas sobre suelos gruesos.

Por otra parte, diversos análisis han concluido que, además de la influencia de los tipos depósitos de suelos, también existen factores como la topografía superficial y la geometría de la cuenca que pueden alterar la señal sísmica en superficie.

## 2.2.2.- Métodos de las Razones Espectrales H/V

Los depósitos de suelos están normalmente expuestos a vibraciones producidas por fuerzas naturales, como mareas y vientos, y fuerzas artificiales como maquinaria industrial, automóviles, trenes, etc. La suma de ambas fuerzas se denomina vibraciones ambientales, las cuales producen una solicitación dinámica aleatoria en el suelo (Nakamura, 1989).

Es importante señalar que las fuerzas artificiales tienden a excitar capas de suelo más superficiales, las que responden a frecuencias relativamente más altas, por lo tanto tendrían un contenido de frecuencias distorsionado, mientras que las fuerzas naturales permiten que un depósito de suelos tienda a vibrar preponderantemente de acuerdo a su frecuencia fundamental (Pastén, 2007).

El uso del espectro de las microvibraciones corresponde a uno de los métodos experimentales ampliamente empleados para estimar la respuesta dinámica de los suelos, debido a su simplicidad y bajos costos. Sin embargo, su principal desventaja es la variación del espectro en el transcurso del día, pues además de reflejar la respuesta del suelo, también refleja la fuente que los produce, como la actividad humana.

Una de las metodologías que remueve el efecto de la fuente externa es el método de la razón espectral H/V en superficie, conocido comúnmente como método de Nakamura (Nakamura, 1989), el cual utiliza el cociente de los espectros horizontales y verticales medidos en superficie, permitiendo estimar la frecuencia fundamental de un depósito en particular.

Cabe mencionar, que a pesar que el método de Nakamura posee detractores, es cuantiosamente utilizado pues permite obtener la función de transferencia completa del suelo en frecuencia y en amplificación. Sin embargo, se ha comprobado empíricamente que su principal utilidad está en la determinación de la frecuencia fundamental del suelo, considerando frecuencia fundamental como aquella donde la razón espectral H/V es máxima. A continuación se detallan los fundamentos teóricos del método de Nakamura.

El método de Nakamura propone estimar el factor de amplificación sísmica de un depósito de suelos a partir de la medición de vibraciones ambientales verticales y horizontales en superficie. En base a ello, el método asume que la componente horizontal del movimiento es amplificada por la multi reflexión de las ondas S, mientras que la componente vertical es amplificada por la multi reflexión de las ondas P. Además, considera que las fuentes artificiales prevalecen mayoritariamente en la componente vertical del movimiento, las cuales tienden a inducir ondas Rayleigh, que pueden ser cuantificadas determinando el radio entre la componente vertical del movimiento en superficie y en la base del depósito.

A continuación se define la función de transferencia  $S_T$  de un depósito de suelos como:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \tag{2.1}$$

Donde  $S_{HS}$  y  $S_{HB}$  corresponden a los espectros horizontales en la superficie y en la base del depósito de suelos. Cabe señalar que debido a que  $S_{HS}$  es afectado por las ondas superficiales, podría estar afectado por las ondas Rayleigh.

Asimismo, el efecto de las ondas Rayleigh puede ser incluido en el espectro vertical en superficie  $S_{VS}$ , pero no incluido en el espectro vertical en la base del depósito  $S_{VB}$ .

Asumiendo que la componente vertical del movimiento no es amplificada por las capas de suelo, se define  $E_s$  como la medición del efecto de las ondas Rayleigh en la componente vertical del movimiento. En ese contexto, el factor  $E_s$  es igual a 1 cuando no existe efecto de las ondas Rayleigh.

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \tag{2.2}$$

Por otro lado, asumiendo que el efecto de las ondas Rayleigh es igual en la componente vertical y horizontal del movimiento, se define una nueva función de transferencia,  $S_{TT}$ , que elimina el efecto de las ondas Rayleigh:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} \tag{2.3}$$

Por su parte, definiendo las siguientes relaciones:

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \tag{2.4}$$

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} \tag{2.5}$$

Además, considerando que en la base del depósito el espectro de la componente horizontal y vertical son aproximadamente iguales,  $R_B$  alcanza valores en torno a la unidad, y por consiguiente la función de transferencia  $S_{TT}$  queda definida como:

$$S_{TT} \approx R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \tag{2.6}$$

En consecuencia, se deduce que la función de transferencia puede ser estimada utilizando sólo los movimientos medidos en la superficie del depósito.

#### 2.2.3.- Caracterización Sísmica en la Cuenca de Santiago

Para este análisis se utilizó el análisis de la respuesta sísmica de la cuenca de Santiago desarrollado por Pastén (2007) mediante el método de Nakamura.

Pastén analizó más de 250 medidas de vibraciones ambientales de 15 minutos de duración en diferentes sitios de la cuenca. Los registros de vibraciones ambientales consistieron en dos registros en la componente horizontal y uno en la componente vertical, los cuales fueron corregidos por línea base, para posteriormente definir la señal horizontal en superficie como la combinación cuadrática de las dos componentes mencionadas.

El procesamiento de datos se dividió en dos etapas. La primera correspondió a la selección de partes de la señal, denominadas ventanas, que contienen la mayor cantidad de vibraciones naturales descartando las partes de la señal que incluyeran vibraciones artificiales, que alteran el contenido de frecuencias. La segunda correspondió a la evaluación de la razón espectral a partir de las ventanas de la señal seleccionadas, mediante el cálculo y suavizado del espectro de Fourier, con el fin de obtener en cada ventana del espectro, la razón espectral H/V.

En la Figura 2.8 se describe esquemáticamente la metodología utilizada por Pastén para el cálculo de razones espectrales.

Se obtuvo un total de 277 razones espectrales distribuidas en la zona de estudio, las cuales se les agrupan en 4 tipos, detallados a continuación:

**Tipo 1**. Razones espectrales en donde se puede identificar claramente la frecuencia predominante,  $f_0$ 

**Tipo 2**. Razones espectrales en donde se identifican al menos dos frecuencias predominantes,  $f_0 \neq f_1$ .

**Tipo 3**. Razones espectrales en donde es difícil identificar la frecuencia predominante, a pesar de tener amplitudes mayores a uno, pero que en algunos casos se pueden identificar peaks a mayores frecuencias ( $f_1$ ).

Tipo 4. Razones espectrales de baja amplitud cercana a uno, sin frecuencias predominantes.

En la Figura 2.9 se presentan, a modo de ejemplo, los 4 tipos de razones espectrales y en la Tabla 2.1 se muestra el número de razones espectrales obtenidas por tipo.





Figura 2.8 Cálculo de la razón espectral (Pastén, 2007)

Razón Espectral	N°
Tipo 1	108
Tipo 2	81
Tipo 3	51
Tipo 4	37

Tabla 2.1 Número de razones espectrales por Tipo



Figura 2.9 Tipos de razones espectrales (Pastén, 2007)

En la Figura 2.10 se presentan las frecuencias fundamentales de la razón espectral de Tipo 1 y del primer peak de la razón espectral Tipo 2. Se aprecian tres zonas de bajas frecuencias (< 0.5 Hz); en el sector noroeste en comunas como Pudahuel, Maipú, Quilicura y Renca, en la zona este en comunas como Ñuñoa, Peñalolén y en la zona sur en Calera de Tango. A su vez, se presentan zonas de altas frecuencias, entre 2 a 10 Hz, alrededor del cerro San Cristóbal y en las comunas de Quilicura, Las Condes y Lo Barnechea.

Por su parte, en la Figura 2.11 se presenta las frecuencias asociadas al segundo peak de las razones espectrales Tipo 2 y al peak a altas frecuencias de las razones espectrales Tipo 3. Se desprende que los sectores con menores frecuencias, bajo los 2 Hz, se presentan en el sector noroeste, en comunas como Quilicura, Pudahuel y Renca, en la zona centro en comunas como Santiago y Ñuñoa, y al suroeste del cerro Chena.

Es importante señalar que, al comparar la Figura 2.10 y Figura 2.11 los sectores de bajas frecuencias (< 2 Hz) coinciden, sin embargo, es difícil interpretar las frecuencias obtenidas en la Figura 2.11, pues de acuerdo a lo concluido por Pastén (2007), los peaks a altas frecuencias probablemente están asociados a modos superiores de vibración en depósitos de suelos que cumplen ciertas condiciones de configuración de sedimentos.

Finalmente, en la Figura 2.12 se presenta, en cuadros negros, la ubicación de las razones espectrales Tipo 4. Se observa una alta concentración en la zona este de la cuenca, en sectores donde las frecuencias fundamentales son mayores 0.5 Hz (al compararlo con el mapa de la Figura 2.10).



Figura 2.10 Frecuencia fundamental Tipo 1 y primer peak Tipo 2 (modificado de Pastén, 2007)



Figura 2.11 Frecuencia fundamental segundo peak Tipo 2 y Tipo 3 (modificado de Pastén, 2007)



Figura 2.12 Ubicación de razones espectrales Tipo 4 (modificado de Pastén, 2007)

## CAPITULO 3.- INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DE SANTIAGO

## 3.1.- Generalidades

La cuenca de Santiago es una depresión tectónica rellena de sedimentos, que se habría formado sobre un basamento rocoso constituido por rocas estratificadas (sedimentarias y volcánicas) y rocas intrusivas (Brantt, 2011). A su vez, Varela (1993), Wall et al. (1999) y Sellés y Gana (2001), describieron que su colmatación ha tomado forma, principalmente por "depósitos aluviales, fluviales, lacustres y volcánicos, que representan una serie de facies depositacionales, a partir de los datos de descripciones e interpretaciones geológicas y geomorfológicas de depósitos sedimentarios" (extraído de Rauld, 2011).

La cuenca se ubica en la Región Metropolitana, en los estribos occidentales de los Andes Centrales de Chile, cerrándose por el Norte en los cerros de Chacabuco y por el sur en Angostura. Posee una longitud aproximada de 90 km y un ancho máximo de 36 km (Karzulovic, 1958).

En particular, la zona de estudio considerada en este informe, comprende un sector de la cuenca de Santiago, de aproximadamente 60 km de largo en donde yace la Provincia de Santiago, incluyendo los cordones montañosos que la rodean, extendiéndose en coordenadas UTM 320.000 a 360.000 Este, y 6.270.000 a 6.330.000 Norte. El sistema de coordenadas utilizado en este informe es WGS84. En la Figura 3.1 se presenta en detalle la zona de estudio, en donde se delimitan en amarillo, los afloramientos rocosos que rodean a la cuenca y los cerros presentes en su interior.

Cabe mencionar que para el análisis de las características geológicas, geomorfológicas, e hídricas de la zona de estudio se desarrollaron modelos de elevación en metros sobre el nivel del mar (en adelante m.s.n.m.), con el propósito de conocer y analizar tridimensionalmente el sector. Los factores considerados en el análisis tridimensional son: basamento rocoso, napa subterránea y topografía superficial.

Los modelos de elevación mencionados se basan en el mapa topográfico digital generado por el sensor ASTER GDEM (ASTER Global Digital Model) correspondiente al satélite ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), perteneciente a la agencia espacial norteamericana NASA (National Aeronautics and Space Agency) y al Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón (METI). El sensor posee una resolución de 30 metros, y acepta un error vertical de hasta 20 metros.



Figura 3.1 Zona de estudio

## 3.2.- Marco Morfoestructural

La zona central de Chile, particularmente el segmento andino comprendido entre los 32° y 35°S, presenta cinco unidades morfoestructurales dispuestas en franjas orientadas de norte-sur, las cuales de oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y la Precordillera (Fock, 2005).

De las unidades mencionadas, tres se encuentran presentes en la zona de estudio: la Cordillera de la Costa, que está compuesta por cerros que no sobrepasan los 2000 m.s.n.m.; la Depresión Central, correspondiente a la cuenca de Santiago, de pendientes muy suaves, de donde sobresalen tres cumbres importantes en forma de "cerros isla" que no sobrepasan los 1000 m.s.n.m., conocidos como el cerro Renca, cerro San Cristóbal y el cerro Chena; y la Cordillera Principal, que se encuentra formada principalmente por rocas Cenozoicas y Mesozoicas (Fock, 2005), que delimitan a la Depresión Central en forma abrupta y marcada con alturas que superan en algunos casos los 5000 m.s.n.m. (volcán San José). Cabe mencionar que en la zona de estudio la Cordillera Principal alcanza aproximadamente los 2450 m.s.n.m.

En la Figura 3.2 se presentan las unidades morfoestructurales del segmento andino y en rojo se demarca aproximadamente la zona de estudio.





Por su parte, en la Figura 3.3 se presenta la elevación topográfica de la zona de estudio, de donde se observan cambios de pendientes muy suaves, con elevaciones que descienden de este a oeste en franjas orientadas de norte a sur, desde los 1200 a 300 m.s.n.m. Siendo los sectores de menor elevación los ubicados en las comunas de Peñaflor y Talagante.

Cabe mencionar que esta suave topografía es producto de la colmatación paulatina de sedimentos de origen fluvial, aluvial, lacustres y volcánicos provenientes principalmente del borde oriental de la cuenca.



Figura 3.3 Elevación topográfica de la cuenca de Santiago.

## 3.3.- Basamento Rocoso

La morfología del basamento rocoso se basa en el modelo tridimensional realizado por Araneda et al. (2000) en la cuenca de Santiago. En dicho estudio se recopiló información de distintos informes realizados entre los años 1974 y 1999, equivalentes a aproximadamente 2100 estaciones de gravedad. Para la modelación del residual gravimétrico, se utilizó el método de los planos, el cual utiliza el máximo de afloramientos de roca existentes en la zona.

El banco de datos utilizado fue considerado homogéneo, debido a que todas las medidas de gravedad se obtuvieron a través del mismo instrumento, LaCoste Romberg, modelo G. Las estaciones se ubicaron a lo largo de caminos, cruce de calles o puntos singulares con intervalos de 500 a 1000 metros de distancia.

En la Figura 3.4 se presenta el mapa de profundidades del basamento rocoso y en la Figura 3.5 se agrega información referente a las comunas (azul) y la red vial (rojo) de la zona de estudio, permitiendo identificar claramente los sectores donde la roca se encuentra más profunda.

Del modelo se observa la gran irregularidad que presenta la morfología del basamento rocoso, en donde se muestran aleatoriamente grandes depresiones de más de 500 m, en sectores como, Rinconada Lo Aguirre, Pudahuel, Américo Vespucio-Bilbao, La Pintana, entre los cerros Chena y Lonquén, Isla de Maipo e intersección carretera Panamericana con camino a Lampa. Estas depresiones están asociadas a su vez, a una serie de altos en el basamento de aproximadamente 50 a 150 metros de profundidad.

Con el fin de obtener una representación tridimensional del basamento rocoso, se confeccionó un modelo de elevación en m.s.n.m. de la zona de estudio (ver Figura 3.6). El modelo se realizó considerando dos situaciones: en la cuenca, la elevación se obtuvo de la resta de la profundidad del basamento rocoso (Figura 3.4) a la elevación topográfica presentada en la Figura 3.3; y en los cordones montañosos y cerros islas, que corresponden a afloramientos del basamento en superficie, la elevación se obtiene directamente de la elevación de la topografía superficial. En la Figura 3.6 se presenta el modelo de elevación del basamento y en negro se demarca la división comunal de la Región Metropolitana.

De acuerdo a la Figura 3.6, se desprende que existe una gran irregularidad en el basamento rocoso. Los cordones montañosos que rodean a la cuenca la delimitan de forma abrupta con elevaciones que van aproximadamente desde los 600 a los 2450 m.s.n.m., siendo el sector más elevado el ubicado al noreste de la zona de estudio, en las comunas de Lo Barnechea y Colina.

A su vez, se distinguen cuatro grandes depresiones con elevaciones menores a los 200 m.s.n.m., las cuales se ubican en el sector norte entre las comunas de Colina y Lampa, al noroeste en la intersección de las comunas de Pudahuel, Quilicura, Maipú, Estación Central, Lo Prado, Quinta Normal, Cerro Navia y Renca, al este en las comunas de Ñuñoa, La Reina, Peñalolén y Macul, y por último al suroeste en las comunas de Calera de Tango, Padre Hurtado, Peñaflor y Talagante.



Figura 3.4 Profundidad del basamento rocoso (modificado Araneda et al., 2000)


Figura 3.5 Profundidad del basamento rocoso y red vial de la zona de estudio.



Figura 3.6 Elevación del basamento rocoso en m.s.n.m.

A continuación se presenta una vista en tres dimensiones de los afloramientos rocosos y de la topografía del relleno sedimentario. Las elevaciones corresponden a las presentadas en la Figura 3.3 y Figura 3.6.



Figura 3.7 Modelo de elevación de la zona de estudio

# 3.4.- Características Hidrológicas

A continuación se detallan los principales antecedentes de las aguas superficiales y subterráneas de la zona de estudio.

### 3.4.1.- Aguas Superficiales

La cuenca de Santiago cuenta con importantes sistemas fluviales, siendo los de rasgos mayores, el río Maipo y su principal tributario, el río Mapocho, el cual cruza la zona urbana de la Región Metropolitana de oriente a poniente, para luego virar en dirección sur hacia el río Maipo. Cabe mencionar que el desagüe final de todas las aguas superficiales de la cuenca de Santiago es el río Maipo, cuya desembocadura se encuentra a la altura de Llolleo y las Rocas de Santo Domingo.

El análisis de los cursos de agua de la cuenca se basó en el estudio realizado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2001), denominado "Plan Maestro de evacuación y drenaje de Aguas Lluvias del gran Santiago". En este estudio se dividen los principales cauces del Gran Santiago en dos grupos: los grandes cursos naturales que atraviesan el área urbana; y las quebradas precordilleranas que ingresan con un cauce definido a la cuenca. Ambos grupos se describen a continuación:

#### 3.4.1.1.- Cauces que atraviesan el área urbana

<u>*Río Maipo.*</u> Da origen a la principal hoya hidrográfica de la Región Metropolitana. Tiene su nacimiento en los alrededores del Paso Cordillerano y desemboca en el Océano Pacifico, en las inmediaciones de la localidad de Llolleo y las Rocas de Santo Domingo. Sus aguas provienen de precipitaciones invernales, deshielos cordilleranos, y de varios afluentes, incluyendo el río Mapocho.

<u>Río Mapocho.</u> Posee una extensa red de drenaje hasta la confluencia con el río Maipo en la localidad de El Monte. Se origina de la confluencia de los ríos San Francisco y Molina en la comuna de Lo Barnechea. En la zona de Las Condes, el Mapocho abandona el ámbito cordillerano poco antes de abrirse sobre la llanura aluvial. En la comuna de Providencia tributa el Canal San Carlos, que enturbia sus aguas por la gran cantidad de sedimentos que arrastra. Al occidente de la capital, recibe desde el norte el estero Lampa y desde el este el Zanjón de la Aguada. La dirección de escorrentía del río Mapocho se origina desde el este, hacia el suroeste, siendo este buzamiento hacia el sur, producto de la barrera natural formada por los cordones montañosos de la Cordillera de la Costa.

Zanjón de la Aguada. Recibe el caudal de la quebrada de Macul y es el cauce receptor de aguas lluvias de toda la zona centro del Gran Santiago. El zanjón posee aproximadamente 27 km de recorrido y tributa sus aguas en el río Mapocho. Cabe mencionar que, originalmente el Zanjón era un cauce natural, sin embargo, su régimen de escurrimiento actual es discordante pues se encuentra canalizado en todo su recorrido.

<u>Estero Lampa.</u> Nace al norte de la comuna de Lampa, de la confluencia de los esteros Polpaico y Chacabuco, atravesando la ciudad de Lampa en dirección sureste. En la comuna de Pudahuel se le unen como tributarios el estero Colina y el Estero Las Cruces, para finalmente tributar sus aguas al río Mapocho.

<u>Estero Las Cruces.</u> La cuenca del estero Las Cruces pertenece a la hoya del estero Lampa, el cual drena el sector ubicado inmediatamente al norte de la ciudad de Santiago. Nace en la comuna de Huechuraba en el sector de Puente Verde de la carretera General San Martín, en la confluencia de los canales Los Choros y Huechuraba. En un primer tramo, entre la carretera General San Martín y la línea ferroviaria, el estero Las Cruces recorre sectores industriales de la comuna de Quilicura, para luego continuar hacia el surponiente por áreas rurales de Quilicura y Pudahuel, hasta su confluencia con el estero Lampa.

<u>Estero Colina.</u> Nace de la confluencia de esteros cordilleranos, aguas abajo cruza la ciudad de Colina, para finalmente desembocar en el Estero Lampa. Cabe mencionar que las aguas del estero son desviadas hacia canales de regadío, por lo tanto, su cauce se presenta seco la mayor parte del año.

#### 3.4.1.2.- Cauces Precordilleranos

<u>Quebrada Las Vizcachas.</u> Nace en la precordillera en la comuna de Puente Alto, al llegar a la zona urbana se encuentra canalizado y en su tramo final abovedado descargando su caudal en el río Maipo

<u>Quebrada de Macul.</u> Nace en la precordillera entre las comunas de Peñalolén y La Florida, siendo su cauce canalizado en el Zanjón de La Aguada.

<u>Quebrada de San Ramón.</u> Nace en el valle de los Quillayes en la comuna de Las Condes y termina en el piedemonte de la Sierra de Ramón en la comuna de La Reina, donde se convierte en el Canal San Ramón.

<u>Quebrada de Apoquindo.</u> Se ubica en la comuna de Las Condes, tiene un cauce definido hasta la esquina de las calles Colón y Paul Harris, punto a partir del cual ingresa a un ducto tipo cajón, para posteriormente descargar en un colector de aguas lluvias.

<u>Quebrada Nido de Águilas.</u> Se localiza en la parte alta de la comuna de Peñalolén y escurre de oriente a poniente. El cauce ingresa al sector urbano al poniente de la calle Álvaro Casanova y escurre paralelamente entre las calles Las Vertientes y Av. José Arrieta hasta el canal San Carlos.

En la Figura 3.8 se presenta el mapa con la ubicación de los cursos de aguas superficiales. Al comparar estos cursos con la elevación topográfica (ver Figura 3.3) se observa que la morfología del terreno es determinante en la dirección de escurrimiento de los cauces, pues éstos fluyen desde sectores de mayor elevación hacia zonas más bajas, bordeando los afloramientos rocosos de la Cordillera de la Costa y desembocando finalmente en el río Maipo.



Figura 3.8 Principales cursos de agua superficiales de la cuenca de Santiago

Cabe mencionar que el aumento progresivo de la demanda de los recursos hídricos de la cuenca, ha conducido al uso total o parcial de sus cursos naturales, mediante obras que son destinadas al riego, usos industriales o al consumo de agua potable. Por consiguiente, los cursos de agua actuales distan mucho de los cursos conocidos por nuestros antepasados.

#### 3.4.2.- Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas de la cuenca de Santiago poseen cotas variables, oscilando desde niveles casi superficiales, en comunas como Pudahuel y Renca, a zonas con profundidades que sobrepasan los 150 m, en comunas como La Pintana. A su vez, el nivel freático no permanece constante en el tiempo, pues varía según las estaciones del año y disminuye paulatinamente, debido a la explotación humana.

Para la realización del mapa de aguas subterráneas en la zona de estudio, se consideró el mapa de profundidades realizado por CONAMA (1999) en la cuenca de Santiago (ver Figura 3.9). Adicionalmente, se utilizó información más actualizada obtenida de pozos de monitoreo ubicados en la región Metropolitana, los cuales se detallan a continuación:

- Datos de niveles estáticos de pozos de monitoreo presentados por la Dirección General de Agua en el informe "Bases para la formulación de un plan director para la gestión de los Recursos Hídricos cuenca del rio Maipo" (DGA, 2007), en el cual se recopilan los expedientes de derechos de aguas subterráneas hasta el año 2006 en toda la Región Metropolitana. Los registros se presentan en la Tabla B.1 del Anexo B.
- Niveles estáticos en pozos ubicados en la Región Metropolitana, pertenecientes al Banco Nacional de Aguas (BNA). Los registros se presentan en la Tabla B.2 del Anexo B.

Ahora bien, para la confección del mapa de isoprofundidades se asumió como condición de borde, la inexistencia de agua subterránea bajo los afloramientos rocosos presentes en la zona. Cabe señalar que según Karzulovic (1958), los afloramientos de roca fundamental en la cuenca, son densos e impermeables, por lo tanto, existiría la posibilidad de encontrar caudales subterráneos únicamente donde se tengan fracturas de origen tectónico o desarrolladas a través de procesos de meteorización. A raíz de ello, para simplificar este aspecto, se consideró que la red de drenaje subterránea bordea y no infiltra bajo los cordones montañosos y cerros "isla" ubicados en la zona de estudio.

En la Figura 3.10 se presenta el mapa de profundidades del nivel freático, donde queda en evidencia la alta irregularidad que presentan las aguas subterráneas en la zona de estudio. Por un lado, los sectores con niveles freáticos más profundos se ubican al sureste de la cuenca con profundidades máximas entorno a los 150 metros, en comunas como La Florida y La Pintana. No obstante, en el mismo sector existe una zona donde el nivel freático aumenta en la comuna de Pirque.

Por su parte, las aguas subterráneas más superficiales se sitúan en la zona este, con profundidades mínimas entre 0 a 5 m ubicadas alrededor de los cerros de Lo Aguirre, en la comuna de Padre Hurtado y al noroeste de la cuenca en las comunas de Lampa, Colina y Pudahuel.



Figura 3.9 Profundidad Napa Freática, primer semestre 1998 (CONAMA, 1999)



Figura 3.10 Profundidad de la Napa Freática en metros

Cabe mencionar que debido a que las profundidades del nivel freático son medidas con respecto a la altitud de las estaciones de monitoreo y considerando que la topografía de la cuenca no es plana, se confeccionó un modelo de elevación en m.s.n.m. de las aguas subterráneas, el cual proporciona una vista tridimensional del nivel freático en la zona de estudio. En la Figura 3.11 se muestra el modelo de elevación de las aguas subterráneas junto al modelo de elevación del basamento rocoso presentado en la Figura 3.6.



Figura 3.11 Elevación del Nivel Freático y el Basamento Rocoso

De acuerdo a lo presentado en la Figura 3.11, se desprende que las aguas subterráneas en la zona de estudio presentan un gradiente que desciende de este a oeste, con un leve buzamiento hacia el sur, similar a la red de drenaje observada en las aguas superficiales (ver Figura 3.8)

# 3.5.- Marco Geológico

#### 3.5.1.- Unidades Geológicas

Leyton et al. (2010) definen 10 unidades geológicas que conforman el relleno de la cuenca de Santiago. Estas unidades fueron definidas utilizando la información obtenida de pozos y de los estudios desarrollados por Valenzuela (1978), Wall et al. (1999), Milovic (2000), Fernández (2001, 2003), Sellés y Gana (2001), Rauld (2002) y Fock (2005).

Es importante mencionar que las unidades en cuestión, corresponden a la geología superficial de la cuenca, ya que fueron definidas considerando las principales características granulométricas de los primeros 30 metros de profundidad. A continuación de detalla la descripción de cada unidad:

<u>Unidad I.</u> Roca. Aflora en las cadenas montañosas alrededor de la cuenca de Santiago y en cerros aislados como el Chena, Santa Lucia y Renca, entre otros.

<u>Unidad II.</u> Gravas fluviales. Unidad constituida por material grueso, principalmente gravas arenosas de densidad media a alta. Estos depósitos se encuentran en la zona centro y sur de la zona de estudio.

<u>Unidad IIIa.</u> Depósitos aluviales. Constituidos por bloques y gravas subangulares en una matriz soportante areno arcillosa con intercalaciones de arena, limo y arcilla. Se ubican a los pies de los cerros que rodean la cuenca.

<u>Unidad IIIb.</u> Depósitos aluviales antiguos. Constituido por gravas y bloques en una matriz areno arcillosa. Correspondiente a viejos abanicos aluviales ubicados en el sector oriental de la cuenca.

<u>Unidad IV.</u> Depósitos de gravas y bloques en una matriz arcillo arenosa correspondiente al depósito generado por un antiguo deslizamiento ubicado al noreste y este de la cuenca.

<u>Unidad Va.</u> Depósitos aluviales. Constituido por gravas en una matriz arcillo arenosa con abundantes intercalaciones de arena, limo y arcilla, además de una gruesa capa de suelo arcillo limoso. Estos depósitos están asociados al curso de los esteros Colina y Arrayán.

<u>Unidad Vb.</u> Depósitos aluviales. Constituidos por arenas finas a gruesas mezcladas con una cantidad variable de limos y arcillas. Estos depósitos están asociados al curso del estero Lampa.

<u>Unidad VI.</u> Depósitos de ceniza volcánica de más de 20 m de espesor con líticos y pumicita, e intercalaciones de arenas, limos y gravas. Corresponde a la unidad denominada Ignimbrita Pudahuel ubicada en el sector oeste y sureste de la cuenca.

<u>Unidad VII.</u> Depósitos de suelos finos. Constituido por limos y arcillas con intercalaciones de gravas, arenas y cenizas volcánicas. Estos depósitos se ubican en la zona norte de la cuenca.

<u>Unidad VIII.</u> Depósitos fluviales recientes. Presentan una granulometría variable, desde gravas a limos. Estos depósitos rodean los cursos de agua del río Mapocho, Maipo y otros ubicados en la zona norte de la cuenca.

En la Figura 3.12 se presenta el mapa geológico y se delimitan las comunas de la Región Metropolitana.



Figura 3.12 Geología superficial y comunas de la Región Metropolitana (modificado de Leyton *et al.,* 2010).

Considerando los estudios realizados por diversos autores respecto a la geología de la cuenca de Santiago, se destacan los siguientes puntos:

- En el sector norte de la cuenca de Santiago predominan los aportes de gravas fluviales de los esteros Lampa y Colina, que progresivamente se van haciendo más finos hacia el suroeste, conformando depósitos lacustres (unidad VII) en su parte más distal (Varela, 1993; Wall et al., 1999; Fernández, 2001).
- En la parte central y sur de la cuenca, los depósitos provienen de los ríos Maipo y Mapocho (unidad VIII) y, en menor medida de quebradas ubicadas en el frente cordillerano, de estas quebradas las que realizan aportes más importantes son la Quebrada San Ramón y la Quebrada de Macul (Rauld, 2002).
- Respecto a los depósitos aluviales presentes en el sector este de la cuenca (en especial la unidad IIIa), Nichols (2009) detalla que la gradación a lo largo del eje de un abanico aluvial tiene relación con la pérdida de energía del flujo a lo largo de su recorrido. Los depósitos de material grueso con escaso contenido de finos se relacionan con flujos de alta energía, característicos del ápice del abanico. En la zona media se encuentran depósitos de gravas y arenas, y en la parte distal del abanico se encuentran depósitos de sedimentos finos con un alto contenido arcilloso en zonas de baja pendiente donde se pueden asociar a flujos de menor energía. Lo anterior concuerda con la presencia de niveles de suelos finos (superficiales) encontrados al final de la lengüeta de la unidad IIIa, este punto es analizado en capítulos posteriores del presente documento.
- Por su parte, la unidad VI, correspondiente a depósitos de flujo piroclástico, está asociada al colapso de la Caldera Diamante (Polanski, 1962). Afloramientos de este depósito han sido reconocidos tanto en Chile como en Argentina. En Chile pueden ser trazados en la zona sur de la cuenca de Santiago, además de los valles de los ríos Puangue, Rapel, Cachapoal y Codegua. En la Figura 3.13 se presenta la distribución original de la unidad VI, en el territorio nacional, inferida a partir de los afloramientos actuales. De acuerdo a esta figura se observa que la ignimbrita actualmente está cubierta y ha sido erosionada por depósitos fluviales del estero Lampa, el río Mapocho y el río Maipo.



Figura 3.13 Distribución Ignimbrita (extraído de Troncoso, 2012)

#### 3.5.2.- Fallas Geológicas en la zona de estudio

En la Figura 3.14 se presentan las principales fallas geológicas emplazadas en la zona de estudio, correspondiente a la Falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada ubicada en la zona oeste de la cuenca y la Falla San Ramón ubicada en la zona este. Ambas estructuras corresponden a fallas inicialmente de movimiento normal las que habrían controlado el desarrollo de la cuenca extensional, y que fueron posteriormente invertidas (Fock, 2005).

En particular, respecto a la falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada es posible destacar las siguientes características: La falla Infiernillo se proyectaría hacia el sur con manifestaciones en el Cerro Renca y sería correlacionable con la falla del Portezuelo de Chada al sur. Esta falla de vergencia oeste, pone en contacto a las rocas mesozoicas de la Formación Lo Valle con las rocas cenozoicas de la Formación Abanico, las que están cubiertas por los depósitos cuaternarios de la Depresión Central.

Esta estructura fue descrita por Sellés (1999) como una falla normal posteriormente invertida, y correspondería al límite occidental de la cuenca donde fue depositada la Formación Abanico (Fock, 2005). A continuación se detallan las principales características de las formaciones Lo Valle y Abanico:

**Formación Lo Valle:** Corresponde a un conjunto de rocas mesozoicas que afloran en la Cordillera de la Costa. Están constituidas por una secuencia de tobas de composición andesítica a riolítica (flujos piroclásticos y depósitos de caída de ceniza, principalmente) con intercalaciones de lavas y rocas sedimentarias continentales fluviales y lacustres con restos de troncos fósiles.

**<u>Formación Abanico</u>**: Corresponde a una secuencia de rocas mesozoicas y cenozoicas que se reconoce en la Cordillera Principal. Se encuentra constituida por lavas, rocas piroclásticas e intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres).



**Figura 3.14** Fallas geológicas zona de estudio. (Modificado de Muñoz-Sáez et al., 2014). Nota: 1. Depósitos aluviales recientes; 2. Volcanismo reciente; 3. Depósitos sedimentarios del Mioceno reciente; 4. Intrusivos del Mioceno Superior; 5. Intrusivos del Mioceno Medio Superior; 6. Formación Farellones; 7. Formación Abanico; 8. Intrusivos Hipoabisales del Eoceno-Oligoceno; 9. Intrusivos Mesozoicos; 10. Formación Lo Valle; 11. Paleozoico metamórfico y rocas intrusivas; 12. Fallas Inversas; 13. Anticlinal y sinclinal.

En particular, en la Figura 3.15 se presenta el análisis litológico desarrollado por Sellés (1999) en el cerro Renca, el cual está conformado por el Cerro Colorado al oeste, Puntilla Lo Ruiz al noreste y el Cerro de Renca en la zona este.

De acuerdo a Sellés (1999) las litologías que afloran en uno y otro flanco de los cerros Renca y Colorado son distintas: sedimentitas y volcanoclásticas al oeste asociadas a la Formación Lo Valle y lavas andesiticas al este asociadas a la Unidad de Conchalí (Formación Abanico). Esta estructura indica un contacto angular entre unidades diferentes. La naturaleza de esta angularidad no ha sido determinada, aunque la existencia de rocas fuertemente fracturadas cerca del portezuelo sugiere, según Sellés (1999), un contacto por falla.



Figura 3.15 Mapa geológico de los cerros Renca y Colorado. (Sellés, 1999).

Nota: 1. Conglomerados y tobas de la Unidad Renca; 2. Lavas y lavas brechosas (Unidad Conchalí); 3. Intrusivos andesíticos de piroxeno y/o anfíbola; 4. Filón manto afanítico; 5. Depósitos cuaternarios indeferenciados; 7 Falla inversa indicando dirección del manteo.

En la Figura 3.16 se presenta el perfil A-A' entre los Cerros Renca y Colorado, donde se observa que el manteo noroeste de las capas del Cerro Renca, podría tener su origen en una deformación por arrastre asociado a la actividad de la falla.



Figura 3.16 Perfil estructural A-A' entre los cerros Colorado y Renca.

# 3.6.- Perfiles con Información Integrada

Para un estudio más detallado de la cuenca de Santiago, se analizaron tres perfiles de suelos en el área de estudio. Dos de los perfiles corresponden a las secciones definidas por Pastén (2007), denominados perfil NS, de orientación NW-SE cruzando desde la comuna de Quilicura hasta la comuna de La Pintana, y el perfil WE que se ubica desde Pudahuel, cruzando el cerro Renca, hasta Las Condes. Asimismo, se estableció un tercer perfil llamado perfil XY de orientación SW-NE, que abarca desde la comuna de Maipú hasta Peñalolén.

Adicionalmente, se agregó a los perfiles información de los tipos de suelos mediante pozos profundos realizados en sus cercanías, pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) y Aguas Andinas. En la Tabla 3.1 se presentan las coordenadas geográficas de los pozos y, desde la Figura C.1 hasta la Figura C.50 del Anexo C se presentan las descripciones de los pozos en cuestión. Por su parte, en la Figura 3.17 se presenta la disposición de los tres perfiles en la zona de estudio y la ubicación de los pozos.

		Coordenadas	
Perfil	Código	Norte (m)	Este (m)
Х-Ү	XY-1	6290911	335420
	XY-6	6294895	351532
	XY-7	6290000	332000
	XY-129	6294641	349611
	XY-156	6292941	346524
	EW-73	6304838	327888
	EW-74	6304672	328499
	EW-75	6304522	329123
	EW-81	6304407	331850
	EW-88	6304757	334821
	EW-135	6304407	331711
	EW-179	6304789	344277
	EW-192	6304619	346486
Este-Oeste	EW-193	6304667	346349
	EW-382	6304505	351440
	EW-427	6304831	356928
	EW-451	6304726	353815
	EW-480	6304635	349086
	EW-487	6304609	347890
	EW-564	6304851	342247
	EW-606	6304326	332873
	EW-2145	6304943	356159

 Tabla 3.1 Coordenadas en WGS84 de pozos profundos

		Coordenadas	
Perfil	Código	Norte (m)	Este (m)
	NS-90	6307911	340714
	NS-92	6303508	341542
	NS-116	6313592	339253
	NS-118	6311728	339804
	NS-119	6311145	340060
	NS-120	6310210	339682
	NS-122	6309627	339986
	NS-144	6302695	341761
	NS-155	6291353	344231
	NS-173	6291168	344276
	NS-178	6302432	341894
	NS-190	6290170	344477
	NS-194	6300838	341664
Norte Cur	NS-243	6302567	341836
None-Sur	NS-347	6282651	346495
	NS-488	6316754	338465
	NS-489	6316474	338615
	NS-490	6316214	338745
	NS-491	6315934	338875
	NS-492	6315524	339105
	NS-512	6319040	337225
	NS-514	6321195	337879
	NS-518	6321918	337921
	NS-522	6320150	338399
	NS-533	6316823	338348
	NS-591	6306905	340877
	NS-1158	6301674	341390
	NS-1224	6290079	344452



Figura 3.17 Ubicación de perfiles

En la Figura 3.18 se presentan las secciones en estudio con la ubicación de los pozos, incluyendo información de la elevación del basamento rocoso, el nivel freático y la topografía superficial. Se observa que la topografía superficial presenta pendientes suaves, que descienden de este a oeste y aumentan levemente de norte a sur. A su vez, se distinguen las grandes depresiones presentes en el basamento rocoso, siendo las mayores, de aproximadamente 500 metros de profundidad, en el perfil EW y perfil XY. Asimismo, se destacan dos afloramientos rocosos correspondientes al cerro Renca, Colorado y San Cristóbal.

Con respecto al nivel freático, su elevación disminuye de este a oeste y desciende levemente de norte a sur. Al comparar la elevación del nivel freático con la topografía superficial, se observa que los sectores norte y oeste de los perfiles presentan un nivel casi superficial de las aguas, al contrario de la zona este y sur donde las aguas se hacen más profundas.



Figura 3.18 Cortes de elevación de los perfiles NS, WE y XY.

Considerando que en el perfil XY existe un número menor de pozos, se incluyó información de la geología superficial (Figura 3.12), un sondaje realizado por IDIEM en la comuna de Maipú (Boroschek et al., 2012), otro sondaje realizado en el edificio Don Manuel Sánchez de la comuna de Macul (GEOFUN, 2005), cuatro calicatas ejecutadas en San Joaquín y por último, un informe de mecánica de suelos realizado por la empresa Áridos MAIPÚ S.A (2000) en el camino de Rinconada de Maipú. Mayor información de estas prospecciones se presenta en el acápite 6.7 del presente documento.

En la Figura 3.19 se presentan los perfiles presentados en la Figura 3.18 incluyendo información de los depósitos de suelos en profundidad. Es importante señalar que la información geotécnica aportada por los pozos profundos es bastante limitada, pues son pozos hechos para captar agua y solo proporcionan una simple descripción del tipo de suelo perforado.



De acuerdo a la Figura 3.19 se desprende la existencia de suelos finos con intercalaciones de arenas y gravas al noroeste del cerro Renca y entre los cerros Renca y San Cristóbal. A su vez, al oeste del cerro Renca se observa la presencia de cenizas volcánicas sumergidas en una matriz soportante de suelos finos.

Por otro lado, al sur del cerro Renca los depósitos clasifican como suelos gruesos con intercalaciones de suelos finos a mayor profundidad, que van de norte a sur desde arenas a gravas y bolones.

Finalmente en el perfil XY, los depósitos ubicados al oeste corresponden a gravas con intercalaciones de suelos finos y arenas con Pumicita, y en el sector centro y este del perfil los depósitos están constituidos por suelos gruesos de arenas, gravas y bolones, con una importante intercalación de suelos finos superficiales.

## 3.7.- Cursos de aguas superficiales descritos en mapas históricos de la Región Metropolitana

El depósito paulatino de suelos finos a través del transporte de material en suspensión, proveniente de ríos y esteros, puede generar un relleno de materiales sueltos en sus planicies adyacentes. Igualmente, cauces naturales y artificiales frente a fenómenos estacionales, como lluvias y derretimientos de nieves (escenarios que aumentan la carga en suspensión de los cursos de agua), transportan sedimentos finos que son depositados próximos a sus cursos.

Por otra parte, es sabido que la existencia de depósitos de suelos finos genera mayores solicitaciones sísmicas. En este contexto, con el objetivo de establecer si la presencia de estos sedimentos sueltos, fueron un factor influyente en los daños provocados por el terremoto del 27F, a continuación se analizan las antiguas sendas de los cauces naturales y artificiales de la Región Metropolitana y se comparan con los cursos actuales, mayoritariamente encauzados, de manera de delimitar las zonas donde se pudieron depositar gradualmente los sedimentos.

#### 3.7.1.- Antiguos cursos de aguas de la Región Metropolitana

Los mapas históricos considerados en este análisis corresponden a tres planos de la ciudad de Santiago del siglo XIX, los cuales fueron realizados por: Claudio Gay en 1831 (ver Figura 3.20), Ernesto Ansa en 1875 (ver Figura 3.21) y Nicanor Boloña en 1895 (ver Figura 3.22).

Igualmente, se incorporó un mapa más extenso de comienzos del siglo XX, que cubre parte de la región Metropolitana. Este mapa fue realizado por la Sociedad del Canal de Maipo en 1901 e incluye los principales cursos de aguas naturales de la región y los canales artificiales que solían ser propiedad de la Sociedad (ver Figura 3.23).

Los mapas anteriormente mencionados son gentileza de la Biblioteca Nacional de Chile.



Figura 3.20 Plano de Santiago de 1831 realizado por Claudio Gay.

En la Figura 3.20 se observa el Santiago Colonial emplazado junto al río Mapocho, el cual presentaba un brazo de cauce minoritario que comenzaba en la actual Plaza Italia y continuaba hacia el suroeste por la llamada avenida La Cañada, conocida hoy como la avenida Libertador Bernardo O'Higgins. A su vez, en el plano se aprecian las obras de defensa creadas para encauzar el lecho del río Mapocho frente a sus constantes crecidas estacionales.



Figura 3.21 Plano de Santiago de 1875 realizado por Ernesto Ansa

En la Figura 3.21 se observan las divisiones políticas y administrativas de la ciudad, además de los principales establecimientos de servicio y religiosos de la época. En el mapa además se incluyó el curso que tendría el río Mapocho canalizado.



Figura 3.22 Plano de Santiago de 1895 realizado por Nicanor Boloña

En la Figura 3.22 se observa el río Mapocho ya canalizado y por el sur el Zanjón de La Aguada. Además, se presenta la ciudad sectorizada en 10 comunas y se indica los edificios públicos, comisarias e iglesias de la ciudad.



Figura 3.23 Plano confeccionado por la sociedad canal de Maipo

De acuerdo a la Figura 3.23 se observa un plano mucho más extenso y detallado de la zona, el cual abarca desde el norte el estero de Lampa hasta el sur el río Maipo. Además, se presentan una serie de canales artificiales pertenecientes a la Sociedad del Canal Maipo, desde donde arrancaban las principales acequias que conducían los regadores de sus principales accionistas.

En la Tabla 3.2 se presentan los canales artificiales, indicando el curso de inicio y de término.

Nombre	Punto Inicio	Punto Término
Canal San Carlos	Río Maipo	Río Mapocho
Canal Las Perdices	Canal San Carlos	Río Mapocho
Canal Pinto	Canal Tronco San Bernardo	-
Canal San José	Canal Tronco San Bernardo	Canal Tronco San Francisco
Canal San Miguel	Canal San Carlos	-
Canal Yungay	Río Mapocho	-
Canal Zapata	Canal Yungay	-
Canal del Carmen	Río Mapocho	-
Canal de La Pólvora	Río Mapocho	-
Canal Solar	Río Mapocho	-
Canal de La Punta	Río Mapocho	Estero Las Cruces
Canal San Joaquín	Canal Tronco San Francisco	-
Canal Tronco San Francisco	Canal San Carlos	Bifurca al Canal San Joaquín y Rama San Francisco
Canal Tronco San Bernardo	Canal San Carlos	Bifurca al Canal Pinto y Ramal San Bernardo
Rama San Francisco	Canal Tronco San Francisco	Bifurca a las acequias Cisternas y Valledor
Ramal San Pedro	Tronco San Pedro	-
Ramal San Bernardo	Canal Tronco San Bernardo	-
Tronco San Pedro	Ramal San Bernardo	Bifurca a la acequia San Diego y al Ramal San Pedro
Comunicación Vieja	Canal San Carlos	Canal Tronco San Bernardo
Comunicación de La Vega	Canal Tronco San Bernardo	Cruza el Canal Tronco San Francisco y desemboca en el Canal San Carlos
San Diego	Tronco San Pedro	-
Cisternas	Rama San Francisco	-
Valledor	Rama San Francisco	-

**Tabla 3.2** Listado de canales artificiales del Plano de la Sociedad del Canal de Maipo

#### 3.7.2.- Análisis de los cursos de agua

En base a los mapas históricos presentados en el acápite anterior, se confeccionó un plano para el análisis de los posibles sectores donde se podrían haber depositado suelos finos, blandos o arenosos sueltos. Cabe mencionar que los cursos de agua históricos, presentan un error asociado a la propia inexactitud de sus mapas.

En la Figura 3.24 se presenta el mapa con los cursos de agua naturales y artificiales. Los cursos artificiales son trazados en color rojo, mientras que los antiguos cursos naturales en color negro y los cursos naturales actuales en azul.

De acuerdo a lo presentado en la figura, los antiguos canales artificiales se concentraban en tres sectores de la cuenca de Santiago: en la zona sur aprovechando las aguas del río Maipo, en la zona norte aprovechando principalmente las aguas del río Mapocho y del estero Lampa; y en la zona este, desde donde tomaban las aguas del río Maipo y las descargaban en el río Mapocho. Cabe mencionar que algunos de estos canales todavía están en uso, como es el caso del canal San Carlos y el canal Las Perdices.

Adicionalmente, en la figura se muestran las diferencias en los trazados de los cursos de agua naturales, siendo las más considerables, los presentados en la zona norte en los esteros Lampa, Colina y Las Cruces, lo que podría deberse a la migración de los cauces en el tiempo, o a un error asociado a la confección de los mapas antiguos.

Asimismo, se observa el curso del río Mapocho antes y después de ser canalizado, y el Zanjón de la Aguada que presentaba un desvío importante en la comuna de Macul, al bordear una chacra llamada chacarilla de San Luis.



Figura 3.24 Canales artificiales y naturales

# CAPITULO 4.- RESPUESTA SÍSMICA DE LA CUENCA DE SANTIAGO

En el presente capítulo se analiza el comportamiento sísmico de la cuenca de Santiago, mediante el estudio de los registros sísmicos del 27F y las mediciones de las razones espectrales H/V en superficie.

### 4.1.- Análisis de Razones Espectrales

De acuerdo a los resultados de razones espectrales entregados por Pastén (detallado en el acápite 2.2.3), en la Figura 4.1 se presenta la ubicación de los tipos de razones espectrales en la cuenca de Santiago.

Se observa que las razones espectrales Tipo 1 se distribuyen en toda la cuenca, no obstante existe una mayor concentración en la zona norte y noroeste. Por su parte, las razones espectrales Tipo 2 se ubican principalmente al noroeste y al sur de la cuenca de Santiago.

Respecto a la razón espectral Tipo 3, éstas se emplazan principalmente en el sector central y en algunos sectores aislados de la zona sur. Cabe mencionar que en este tipo de razón espectral no es posible identificar una frecuencia predominante pues posee una banda con predominio de bajas frecuencias. Finalmente, las razones espectrales Tipo 4 se concentran en la zona este y sur de la cuenca de Santiago.

En el marco anterior, Bonnefoy-Claudet et al. (2008) plantearon que el tipo de razón espectral representa una estimación fiable de las características subterráneas del suelo, pues provee una estimación gruesa del contraste de impedancias. En peaks claros existe un fuerte contraste de impedancia en profundidad, mientras que para peaks de baja amplitud o curvas planas existe un leve contraste. Asimismo, en el estudio se concluye que el método de Nakamura permite obtener un estimado confiable de la frecuencia fundamental en los casos donde existen razones espectrales con peaks claros. En consecuencia, las razones espectrales ubicadas sobre suelos rígidos o de bajo contraste de impedancias no entregarían resultados fidedignos.

Por tanto, considerando los resultados presentados para la cuenca de Santiago, se concluye que las razones espectrales Tipo 1 y 2, ubicadas principalmente en la zona noroeste, indicarían depósitos de suelos con un fuerte contraste de impedancias, mientras que razones espectrales Tipo 3 y 4, ubicadas principalmente en la zona este y sur de la cuenca, indicarían depósitos con un leve contraste.

Por otro lado, analizando las frecuencias fundamentales obtenidas de las razones espectrales, en la Figura 4.2 se presentan las frecuencias de la razón espectral Tipo 1, la frecuencia del primer peak de la razón espectral Tipo 2 y una frecuencia igual a 10 Hz para los sectores donde se presentan razones espectrales Tipo 4.

Cabe destacar que la frecuencia de 10 Hz asociada a la razón espectral Tipo 4, sólo proporciona una indicación de los sectores donde no existe un claro contraste de impedancias entre los estratos.



Figura 4.1 Ubicación de Tipos de Razones Espectrales



Figura 4.2 Frecuencia fundamental Tipo 1, 2 y 4

De acuerdo a la Figura 4.2, las zonas de bajas frecuencias (menores a 0.5 Hz), se presentan en tres sectores de la cuenca: en la zona norte alrededor del cerro Renca en comunas como Pudahuel, Cerro Navia, Quinta Normal, Renca, entre otras; al este de la cuenca en las comunas de Ñuñoa, La Reina y Peñalolén; y al sur del cerro Chena. Por su parte, las frecuencias entre 0.5 a 2 Hz se distribuyen a lo largo de toda la cuenca, mientras que las frecuencias entre 2 a 5 Hz se ubican al noreste en las comunas de Huechuraba, Lo Barnechea y Las Condes. Por último, las zonas de mayores frecuencias, entre 5 a 10 Hz, se centran en la zona este de la línea imaginaria que une el cerro Renca y Chena.

Cabe destacar que acorde al modelo de propagación unidimensional de ondas de corte, la respuesta sísmica de los suelos depende de la densidad de masa ( $\rho$ ), el espesor (H), la rigidez (G) y la razón de amortiguamiento (D) de los estratos de suelo. No obstante, considerando depósitos de suelos con amortiguamiento nulo, el análisis se simplifica bastante, quedando demostrado que la amplificación es máxima cuando la frecuencia es igual a f<sub>0</sub> =  $V_s/4H$ . Por consiguiente, para depósitos con amortiguamiento nulo, la frecuencia fundamental de un depósito depende de la rigidez y del espesor del estrato.

En base a esto, y considerando a modo de análisis un amortiguamiento nulo, en la Figura 4.3 se presentan las frecuencias fundamentales presentadas en la Figura 4.2 emplazadas sobre la geología superficial de la cuenca y la profundidad del basamento rocoso. De acuerdo a la figura se desprende que en la zona noroeste de la cuenca, constituida por suelos finos y cenizas volcánicas, se registran frecuencias fundamentales menores a 2 Hz, y consistentemente, de esa zona, los sectores donde el basamento rocoso es más profundo, la frecuencias registradas fueron las menores (0.5 Hz).

Por su parte, a pesar de que en las zonas con sedimentos más rígidos (unidad II correspondiente a gravas fluviales) se registraron frecuencias altas, también se presentaron frecuencias bajas, incluyendo los sectores donde las rocas no son tan profundas. Lo anterior indicaría que existen depósitos de suelos que no son considerados en la geología superficial de la cuenca, o que existe una configuración de sedimentos (contraste de impedancias) en profundidad tal que, el método de Nakamura no entregó resultados confiables.

Analizando las amplitudes de las razones espectrales, en la Figura 4.4 se presenta el mapa de amplitud de las razones Tipo 1 y el primer peak de la razón espectral Tipo 2, emplazado sobre la geología superficial y la profundidad del basamento rocoso De la figura se observa que las mayores amplitudes (> 2) se registran en la zona noroeste de la cuenca de Santiago, en los sectores constituidos por suelos finos o cenizas volcánicas. Asimismo, se registran amplitudes menores a 3 en los depósitos constituidos por suelos más competentes.

Es importante recalcar que según varios estudios, el método de Nakamura no es una herramienta confiable para el análisis de la amplificación sísmica (amplitud), sin embargo, la Figura 4.5 entregaría una visión general cualitativa de los sectores donde se registra una mayor amplificación.

En consecuencia, se concluye que la zona noroeste de la cuenca, constituida por suelos finos y cenizas volcánicas, respondería a un sismo con una mayor amplificación, que las zonas constituidas por suelos gruesos.



Figura 4.3 Frecuencia fundamental, profundidad de la roca y geología superficial.



Figura 4.4 Amplitud de Razón Espectral

Finalmente, en la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7 se presentan las razones espectrales más cercanas ubicadas alrededor de los tres perfiles de suelos mostrados en la Figura 3.19.



Figura 4.5 Razones Espectrales sobre perfil XY



Figura 4.6 Razones Espectrales sobre perfil WE


De acuerdo a lo presentado en los tres perfiles, en general, las frecuencias fundamentales más bajas (< 2.0 Hz) se presentan sobre depósitos compuestos por suelos finos. Sin embargo, se registraron dos excepciones en el perfil NS, correspondiente a las razones espectrales "Lo Espejo 2" y "La Pintana 14", las cuales registraron frecuencias iguales a 0.88 y 0.98 Hz, respectivamente, a pesar de emplazarse sobre suelos gruesos y con profundidades del basamento rocoso no tan altas.

Asimismo, se observa que los sectores constituidos por suelos gruesos presentan, en general, razones espectrales Tipo 4, es decir, registran amplitudes cercanas a 1.0. A excepción de la razón espectral "San Miguel 1" (perfil XY), la cual presenta una razón Tipo 4 a pesar de emplazarse sobre un depósito superficial de suelos finos. En ese mismo contexto, se observa una incongruencia en las razones espectrales "La Pintana 14" y "Lo Espejo 2", las cuales están constituidos por suelos gruesos pero presentan razones espectrales Tipo 1 y Tipo 2.

Respecto a las amplitudes de las razones espectrales, los sectores compuestos por depósitos de suelos finos registran las mayores amplitudes ( $\geq$  2.0), a excepción de la razón espectral "San Miguel 1" del perfil XY, la cual registra una amplitud cercana a 1.

Es importante señalar que las incongruencias mencionadas anteriormente, podrían deberse a un error en la ejecución del método de Nakamura, o a la existencia de lentes de suelos finos o ceniza volcánica que no fueron incorporados en el perfil de suelos.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos, en general, concuerdan con las conclusiones propuestas por Pastén (2007), donde señaló que la forma y amplitud de las razones espectrales está relacionada con los tipos de sedimentos presentes. Sobre suelos blandos, las razones espectrales tienen amplitudes mayores a 2 y se pueden identificar fácilmente una o más frecuencias predominantes y sobre sedimentos rígidos las amplitudes son menores y es difícil encontrar frecuencias predominantes.

#### 4.2.- Análisis de Registros Sísmicos

Para el análisis de registros sísmicos se utilizaron los acelerogramas del terremoto del 27F obtenidos de 8 estaciones sismológicas ubicadas en la cuenca de Santiago. Las estaciones pertenecen a la Red de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (RENADIC) y a la Red Sismológica del Servicio Sismológico Nacional (SSN). En la Tabla 4.1 se presentan las estaciones utilizadas, con su respectivo código y en las Figuras D.1 a D.8 del Anexo D se presentan los registros sísmicos obtenidos para cada una de las estaciones.

Facilitado por	Estación	Código
	Antumapu	ANTU
SSN	Colegio Las Américas	LACH
	Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas	FCFM
RENADIC	Andalucía	ANDA
	La Florida	LFLOR
	Maipú	MAIP
	Peñalolén	PEÑA
	Puente Alto	PALTO

Tabla 4.1 Estaciones sismológicas utilizada	as
---	----

Es importante destacar que las 8 estaciones sismológicas presentadas en la Tabla 4.1, están emplazadas sobre depósitos de suelos y no en afloramientos rocosos.

En la Tabla 4.2 se presentan el resumen de las aceleraciones máximas registradas en cada estación. Se desprende que la máxima aceleración registrada en la componente NS se midió en la estación MAIP con 0.56g seguida por la estación LACH con 0.31g, la aceleración máxima en la componente EW ocurrió en la estación MAIP con 0.49g, seguida por la estación ANDA con 0.31g. Por último, la máxima aceleración en la componente vertical se midió en la estación PEÑA con 0.28g seguida por la estación MAIP con 0.24g.

La menor aceleración máxima registrada en la componente NS pertenece a la estación FCFM con 0.16g. Esta aceleración corresponde a un 29% de la máxima aceleración registrada en dicha componente (estación MAIP 0.56g). Por su parte, las menores aceleraciones máximas registradas en las componentes EW y V corresponden a la estación LFLOR, asociadas a un 27% y 36% de la máxima aceleración registrada en la estación MAIP y PEÑA, respectivamente.

Código	Componente	Aceleración Máxima PGA (g)	
	NS	0.18	
ANDA	EW	0.31	
	V	0.22	
	NS	0.23	
ANTU	EW	0.27	
	V	0.16	
	NS	0.31	
LACH	EW	0.23	
	V	0.16	
	NS	0.16	
FCFM	EW	0.16	
	V	0.14	
	NS	0.19	
LFLOR	EW	0.13	
	V	0.10	
	NS	0.56	
MAIP	EW	0.49	
	V	0.24	
	NS	0.30	
PEÑA	EW	0.29	
	V	0.28	
	NS	0.27	
PALTO	EW	0.27	
	V	0.13	

Tabla 4.2 Aceleraciones máximas obtenidas para el terremoto del 27F.

Por otra parte, en la Figura 4.8 se muestra la ubicación de las estaciones sismológicas sobre el marco geológico de la cuenca de Santiago. Se observa que las máximas aceleraciones registradas se ubicaron sobre la unidad geológica VI (cenizas volcánicas) en el caso de la estación MAIP y sobre la unidad IIIa (depósitos aluviales), para el caso de las estaciones LACH y PEÑA. Es importante tener presente que no existen estaciones sismológicas sobre depósitos de suelos finos como la unidad VII, por lo tanto, no se conoce los niveles de aceleración que se habrían alcanzado en depósitos menos competentes.

Las estaciones donde se registraron las menores aceleraciones (FCFM y LFLOR) se ubican sobre la unidad geológica II, correspondiente a gravas fluviales.



Figura 4.8 Estaciones sismológicas y geología superficial

Respecto a la estación ANDA, que registró la segunda mayor aceleración en la componente EW, se observa una discordancia, debido a que se encuentra cercana y sobre la misma unidad geológica que la estación FCFM, que registró las menores aceleraciones. Este comportamiento podría deberse a que bajo esta estación existen depósitos de suelos que no son considerados en el mapa geológico y que pudieron haber influenciado en su respuesta sísmica. Por esta razón, a continuación se presenta información de sondajes realizados en las cercanías de las estaciones en donde se registraron las mayores y menores aceleraciones máximas.

#### ESTACIÓN ANDALUCÍA

Para esta estación se consideró el perfil estratigráfico realizado por Godoy (2013), quien se basó en la información entregada por dos sondajes ubicados entre 1 a 3 km de distancia (Petrus, 2010; Valenzuela, 1978) y de mediciones de velocidad de onda de corte mediante análisis de ondas superficiales (Sáez, 2012) de alrededor de 1 km de distancia. En la Figura 4.9 se presenta el perfil en cuestión, de donde se observa que el suelo está constituido por un estrato superficial de 4 m de arcilla bajo el cual subyacen estratos de arenas y gravas. Cabe destacar que la profundidad del basamento rocoso fue estimada por Godoy (2013) a partir del modelo gravimétrico realizado por Araneda et al. (2000).

-	0	VIIXIII
-		1111111
-		
L .		1
-	10	
-		
-		0000
-		0 0 0
-		000
-	20	0 0
F .		0 0
H- 11		0 0
-		00 0
-		puo
-	30	h n n 0
H .		P
-		0000
F .		0
H		000
-	40	0
F .		0 0 0
-		0
-		h 0 . 00
-		000
-	50	0000
-		0 0 0
F .		0.0
-		0 0 0
-	22	0.0
-	60	0 0
-		00 0
		puo
-		0000
-	70	Γ° ο
_	70	000
		0
		0000
		0
<u> </u>	0.0	0 0 0
	00	- A
		00,00
		00 0
_		00
	90	0 0 0
-		0 0
		0 0 0
-		0 0
-		0 0
	100	000
-		
-		
F .		
-	640	* * * *
1.00	110	

Estrato	Profune	didad (m)	Descrinción estrationáfica		
LSIIdlo	Inferior Superior		Descripcion estratigranca		
I	0	4	Arcilla		
II	4	12	Arena		
III	III 12 100		Grava		
IV	100	110	Roca		



# ESTACIÓN FCFM

Para esta estación se consideró la información entregada por el informe de mecánica de suelos realizado por la empresa Petrus (2010) para el proyecto Beauchef Poniente.

En la Figura 4.10 se presenta la descripción estratigráfica, en donde se observa que el suelo está constituido mayoritariamente por la llamada Grava de Santiago, presentando además dos lentes intercalados de limo arenoso de aproximadamente 1 m de espesor.

<u> </u>	0	00
<b>H</b>	U.	V V A O 1
L		N ~ 1
L		0
<b>—</b>		1 0 0
H		0 0
-	2	0.0
L		V V A O 1
<b>—</b>		0 -
-		0
L		V 0 0
		0 0 1
<b>-</b>	0.22	0
-	4	
L		0 0
L		0 0
-		0 0
-		
H		0 0
	8	
	0	P ~ 0
-		h
H		0009
L20		
1.00		
-		0 0 0 4
-	8	0
L		
<b>F</b>		0 0 0 0
-		0 0 0 - 1
H		- V -
L		
C	10	00.0
_	10	00
H		
L		0 0
<b>F</b>		- U _ V
-		0
-		0
_	12	~ 0 01
_	14	V . V
E		0 0 1
-		V V
L		
E		
H	1000	
_	14	0
L	1. Carlos 1. Car	h h h d
		0 0 0 9
-		
H-11		
L		
<b></b>	40	0
-	16	A 4
L	1.000000	0 0 0 1
L		0 0 0 0
<b>F</b>		
-		0
L		0 - 0
_	19	0 ~ 1
	10	- A
-		h 0 0 d
<u>–                                    </u>		n 0 . v 0
L		P 0 7
<b></b>		0.0
- C	-	000
-	20	0.0
L	40.00	0
1.0		0 0
-		V 0 V
100		11111144111111
H		unun Vunun
-	22	in the second second
_	66	- A Manual And
-		0000
H		00
L		0
<b>E</b>		0 0
-		N/ 0 1
-	24	
L	-	
C		0 01
-		
H		0 0
L		
L	00	
_	20	1111111111111111
H .	10.00	A A A A A A A A A A A A A A A A A A A
L		contraction of the second
<b>F</b>		VIIIIIIIIIIIIIIIII
-		- A A A A A A A A A A A A A A A A A A A
E.		0000
-	28	00
	20	0
-		VII 0
H		
L		0
<b></b>	0.0	
	30	0 01
	00	V *

Estrato	Profund	didad (m)	Descrinción estrationáfica			
Estrato	Inferior	Superior	Descripcion estratigranca			
I	0	1.8	Relleno de grava			
II	1.8	9.5	Segunda depositación del río Mapocho			
Ш	9.5	21.0	Primera depositación del río Mapocho			
IV	21.0	22.1	Limo arenoso muy consistente			
V	22.1	25.9	Primera depositación del río Mapocho			
VI	25.9	27.2	Limo arenoso muy consistente			
VII	27.2	30.0	Primera depositación del río Mapocho			

Figura 4.10 Perfil estratigráfico estación FCFM

# ESTACIÓN COLEGIO LAS AMÉRICAS

Para la estación LACH se utilizó la descripción estratigráfica del sondaje realizado en el Aeródromo Eulogio Sánchez (Ampuero & Van Sint Jan, 2004) ubicado aproximadamente a 1.5 km de distancia.

En la Figura 4.11 se presenta la descripción estratigráfica del perfil, donde se observa que el suelo está constituido por un estrato superficial de arcilla arenosa de aproximadamente 9 m de espesor y bajo esta subyacen estratos de gravas, arenas y arcillas.



Estrato	Profund	didad (m)	Descripción estratigráfica	
-511 010	Inferior	Superior		
I	0	8.8	Arcillas arenosas con gravas	
	8.8	12.0	Grava y arena con arcilla	
	12.0	20.6 Arcilla arenosa		
IV	20.6	21.6	Arena fina con grava	
V	21.6	23.0	Arcilla arenosa con grava	
VI	23.0	24.1	Grava y arena fina arcillosa	
VII	24.1	26.2	Arcilla arenosa con gravas	
VIII	26.2 27.3		Arena fina con grava	

Figura 4.11 Perfil estratigráfico estación LACH

# ESTACIÓN LA FLORIDA

Para la descripción estratigráfica de la estación LFLOR se utilizó la información de un pozo ubicado a aproximadamente 1 km de distancia (Pastén, 2007).

En la Figura 4.12 se presenta la información entregada por el pozo, donde se observa que el suelo está constituido superficialmente por estratos de bolones con grava, arcilla y arena y bajo esta subyacen estratos de grava arenosa.



Estrato	Profund	didad (m)	Deseringión estrationática	
ESITALO	Inferior	Superior	Descripcion estratigranca	
I	0	11	Bolones con grava y arcilla	
II	11	26	Bolones con grava y arena	
III	26	77	Bolones con grava, arena y arcilla	
IV	77	122	Grava arenosa con bolones y arcilla	
V	122	134	Grava arenosa	

Figura 4.12 Perfil estratigráfico estación LFLOR

# ESTACIÓN PEÑALOLÉN

La estación PEÑA cuenta con la información de un sondaje de 31 m de profundidad (Boroschek et al., 2012).

En la Figura 4.13 se presenta el sondaje en cuestión, donde se desprende que el suelo está constituido principalmente por un estrato de arcilla de baja plasticidad bajo el cual subyacen estratos de gravas, arcillas y arena limosa (pumicita).

E º	VIIIIA	Estrato	Profund	didad (m)	Deseringián estrationática
E 2		ESITALO	Inferior	Superior	Descripcion estratigranca
4 6 8		I	0	23.95	Arcilla color café, consistencia media a alta, humedad media y plasticidad baja. Presencia variable de gravas de cantos angulares y subangulares, tamaño máximo 1 1/2"
10 12 12		II	23.95	26	Grava de cantos angulares y subangulares, tamaño máximo 2", sin recuperación de matriz. Se observa arena gruesa color negro en el retorno de agua
16		111	26	27.45	Arcilla color café, consistencia media, humedad media y plasticidad baja. Presencia variable de gravas de cantos angulares y subangulares, tamaño máximo 1/2"
20		IV	27.45	28.45	Arena limosa color rosado, compacidad alta, humedad media y plasticidad nula
24		V	28.45	31	Grava de cantos angulares y subangulares, tamaño máximo 2", sin recuperación de matriz. Se observa arena gruesa color negro en el retorno de agua y un lente de arcilla al comienzo del estrato
E 30	0.00				

Figura 4.13 Perfil estratigráfico estación PEÑA

## <u>ESTACIÓN MAIPÚ</u>

28

30

IV

Al igual que la estación PEÑA, en la estación MAIP se realizó un sondaje de 30.5 m de profundidad (Boroschek et al., 2012).

En la Figura 4.14 se presenta la descripción del sondaje, en éste se observa que el suelo está constituido principalmente por un estrato de gravas de 7.5 m de espesor, seguido por depósitos de arenas limosas (pumicita) hasta los 30.45 m.

0		Fotrata	Profundidad (m)		Descrinción estrationáfica	
2	000	Estrato	Inferior	Superior	Descripcion estratigratica	
Ξ.,	0000	I	0	0.9	Suelo orgánico	
6 8 10		II	0.9	8.4	Grava pobremente graduada de tamaño máximo 3", cantos redondeados y subredondeados, sin recuperación de matriz. Se observa una arena arcillosa en el retorno de agua	
12 14		111	8.4	27.4	Arena limosa (Pumicita) color café, humedad media, consistencia media a alta y plasticidad baja a nula	
16 18		IV	27.4	30.45	Arena limosa (Pumicita) color café claro, humedad alta, consistencia alta y plasticidad nula	
20 22 24 26						



De acuerdo a la información entregada por los perfiles estratigráficos se desprende que en las estaciones en donde se registraron las máximas aceleraciones (ANDA, LACH, MAIP y PEÑA) los suelos están constituidos por estratos de arcilla o pumicita, y para las estaciones en donde se registraron las menores aceleraciones (FCFM y LFLOR) los suelos están constituidos por gravas o bolones. Asimismo, se observa que la discordancia observada en la estación ANDA se debe a que ésta se encuentra emplazada sobre un estrato de arcilla de 4 m de espesor.

Por otra parte, en la Figura 4.15 se presenta el mapa de frecuencias tipo 1, 2 y 4 (ver Figura 4.2) y la ubicación de las estaciones sismológica. Se observa que las estaciones donde se registraron las máximas aceleraciones (MAIP, LACH, ANDA y PEÑA), se emplazan cercanas a frecuencias menores a 2 Hz.

Ahora bien, considerando las estaciones donde se midieron las menores aceleraciones máximas, se observa que LFLOR se emplaza sobre frecuencias más altas entre 1 a 10 Hz y FCFM sobre frecuencias entre 0.5 a 2 Hz. No obstante, tal como fue mencionado anteriormente estas estaciones se emplazan sobre suelos rígidos, por lo tanto, los resultados entregados por el método de Nakamura no serían del todo confiables.



Figura 4.15 Estaciones sismológicas y frecuencias fundamentales

En las Figuras 4.16 a 4.23 se presentan los espectros de respuesta obtenidos al someter un oscilador de 1 grado de libertad a los registros sísmicos del 27F considerando un factor de amortiguamiento igual a 5%.



74







igura 4.19 Espectros de respuesta estación i ori



Figura 4.20 Espectros de respuesta estación LFLOR







En la Tabla 4.3 se presenta, de acuerdo a lo obtenido en las Figuras 4.16 a 4.23, la máxima aceleración espectral ( $S_a$ ), la aceleración espectral normalizada ( $S_a/a_{máx}$ ), donde  $a_{máx}$  corresponde a la aceleración máxima registrada en terreno (ver Tabla 4.2), y el periodo predominante. Donde el periodo predominante ( $T_p$ ) se define como el periodo asociado a la máxima aceleración espectral ( $S_a$ ).

Estación	Componente	$S_{a}\left(g ight)$	$S_a/a_{m \pm x}$	Periodo T <sub>p</sub> (s)
	NS	0.70	3.87	0.14
ANDA	EW	1.25	4.07	0.44
	V	0.77	3.51	0.19
	NS	0.87	3.83	0.40
ANTU	EW	0.80	2.95	0.20
	V	0.64	3.87	0.23
	NS	1.14	3.69	0.43
LACH	EW	0.81	3.49	0.28
	V	0.65	3.98	0.33
	NS	0.56	3.37	0.29
FCFM	EW	0.49	3.01	0.19
	V	0.54	3.89	0.04
	NS	0.51	2.76	0.28
LFLOR	EW	0.51	3.86	0.23
	V	0.36	3.54	0.14
	NS	1.98	3.53	0.46
MAIP	EW	2.06	4.23	0.52
	V	0.96	3.94	0.16
	NS	1.23	4.11	0.36
PEÑA	EW	1.02	3.52	0.28
	V	1.22	4.36	0.26
	NS	0.92	3.45	0.28
PALTO	EW	0.80	3.00	0.27
	V	0.41	3.13	0.20

 Tabla 4.3 Periodo asociado a la máxima aceleración espectral

De acuerdo a los valores presentados en la Tabla 4.3 se observa lo siguiente:

- Las mayores aceleraciones espectrales se registran para las componentes NS y EW en la estación MAIP, y en la componente V en la estación PEÑA. Por su parte, las menores aceleraciones en la componente NS y V se registraron en la estación LFLOR, y en la componente EW en la estación FCFM.
- Con respecto a la aceleración espectral normalizada, los mayores valores en la componente NS y V se midieron en la estación PEÑA y en la componente EW en la estación MAIP. Respecto a los menores valores, éstos se presentaron en la componente NS en la estación LFLOR, en la componente EW en la estación ANTU y en la componente V en la estación PALTO.

 Los mayores periodos en la componente NS y EW se registraron en la estación MAIP, y en la componente V en la estación LACH. Por su parte, el menor periodo se registró, en la componente NS, en la estación ANDA y en las componentes EW y V en la estación FCFM.

De acuerdo a las observaciones de la Tabla 4.3 y considerando los perfiles estratigráficos de las distintas estaciones sismológicas y el mapa de geología superficial, se desprende que en las estaciones emplazadas sobre suelos gruesos como es el caso de LFLOR, FCFM, ANTU y PALTO se midieron los menores valores de aceleración espectral, aceleración espectral normalizada y periodo predominante ( $T_p$ ). Por el contrario, en las estaciones ubicadas sobre suelos finos y ceniza volcánica, como MAIP, PEÑA y LACH, se registraron los mayores valores de  $S_a$ ,  $S_a/a_{máx}$  y  $T_p$ . A excepción de lo presentado en la estación ANDA constituida por un estrato superficial de 4 m de espesor de arcilla, el cual registró el menor periodo predominante en la componente NS igual 0.14 s.

En la Tabla 4.4 se presentan los periodos preponderantes ( $T_p$ ), y el periodo fundamental obtenido de las razones espectrales mediante al método de Nakamura ( $T_f = 1/f_0$ ). Cabe mencionar que se consideraron los periodos fundamentales más próximos a las estaciones sismológicas, de acuerdo a lo presentado en la Figura 4.15, no obstante, en estaciones como PEÑA, la frecuencia fundamental más cercana se ubica aproximadamente a 2.5 km de distancia.

De acuerdo a la Tabla 4.4 se observa que cuantitativamente los periodos no son similares, no obstante se advierte que las estaciones emplazadas sobre suelos gruesos, como LFLOR, ANTU y PALTO, presentan los periodos preponderantes más bajos, menores a 0.4 s y los periodos fundamentales más bajos (< 1.0 s). Por el contrario, las estaciones ubicadas sobre ceniza volcánica y suelos finos, como MAIP, PEÑA y LACH, presentan periodos preponderantes en promedio mayores a 0.3 s y periodos fundamentales mayores a 1.0 s.

Es importante destacar que la diferencia entre el periodo predominante y periodo fundamental en suelos gruesos se debe a que, como se mencionó anteriormente, el método de Nakamura no entrega resultados confiables sobre depósitos de suelos rígidos.

En ese contexto, sobre suelos menos competentes no debería existir una mayor diferencia, no obstante, esto podría deberse a que los sectores donde se obtuvieron los periodos predominantes y fundamentales se encuentran alejados o a que, en particular las estaciones PEÑA y LACH, a pesar de tener suelos finos superficiales se encuentran cercanos a suelos rígidos (lo cual se ve reflejado en las razones espectrales Tipo 4 presentados en esta zona de la cuenca), entregando valores de frecuencias fundamentales distorsionados. Lo mismo podría ocurrir en la estación ANDA emplazada sobre un estrato superficial de 4 m de espesor de arcilla, la cual se encuentra aproximadamente a 1.5 km de la estación FCFM emplazada sobre suelos gruesos.

Estación	Componente	$T_p$ (s)	<i>T</i> <sub>0</sub> (s)	
	NS	0.14		
ANDA	EW	EW 0.44		
	V 0.19			
	NS	0.40		
ANTU	EW	0.20	0.1 – 0.2	
	V	0.23		
	NS	0.43		
LACH	EW	0.28	> 1.0	
	V	0.33		
	NS	0.29		
FCFM	EW 0.19		0.5 – 2.0	
	V	0.04		
	NS	0.28		
LFLOR	EW 0.23		0.1 – 1.0	
	V	0.14		
	NS	0.46	1.0 – 2.0	
MAIP	EW	0.52		
	V	0.16		
	NS	0.36		
PEÑA	EW	EW 0.28		
	V	0.26		
	NS	0.28		
PALTO	EW	EW 0.27 0.		
	V	0.20		

 Tabla 4.4 Comparación entre frecuencia preponderante y frecuencia fundamental

### 4.3.- Análisis de la direccionalidad de las ondas sísmicas

En la Tabla 4.5 se presentan los valores de aceleración máxima (PGA) en las componentes NS y EW registradas en 23 estaciones sismológicas ubicadas a lo largo de Chile (Saragoni y Ruiz, 2012).

N°	Ciudad	PGA (g)		
Estación	Ciddad	NS	EW	
1	Angol	0.93	0.69	
2	Casablanca	0.29	0.33	
3	Concepción San Pedro	0.65	0.61	
4	Copiapó	0.02	0.03	
5	Curicó	0.41	0.47	
6	El Roble	0.19	0.14	
7	Los Vilos	0.03	0.03	
8	Melipilla	0.57	0.78	
9	Olmué	0.35	0.25	
10	Santiago Andalucía	0.18	0.31	
11	Santiago Antumapu	0.23	0.27	
12	Santiago FCFM	0.16	0.16	
13	Santiago La Florida	0.19	0.13	
14	Santiago Las Américas	0.31	0.23	
15	Santiago Maipú	0.56	0.49	
16	Santiago Peñalolén	0.30	0.29	
17	Santiago Puente Alto	0.27	0.27	
18	Santiago San José De Maipo	0.47	0.48	
19	Santiago Santa Lucía	0.24	0.34	
20	Valdivia	0.09	0.14	
21	Vallenar	0.02	0.02	
22	Viña Del Mar Centro	0.22	0.33	
23	Viña Del Mar Marga Marga	0.35	0.34	

Tabla 4.5 Aceleraciones máximas registradas en la componente horizontal para el 27F

Se observa que la máxima aceleración horizontal se ubicó en la estación Angol en la componente NS con 0.93g y la menor aceleración se registró en la estación Vallenar con 0.02g. En la Figura 4.24 se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones sismológicas y el epicentro del terremoto del 27F.

Es importante señalar que una de las limitaciones de la interpretación de los registros sísmicos presentados en la Tabla 4.5 es que se desconoce, en la mayoría de las estaciones, las características geotécnicas de los suelos en profundidad.



Figura 4.24 Ubicación Estaciones sismológicas

En la Figura 4.25 se grafican las aceleraciones máximas registradas en la componente NS versus la aceleraciones máximas en la componente EW. Se observa que las aceleraciones no presentan una predisposición en una componente. En consecuencia, para el terremoto del 27F, la direccionalidad de las ondas no influyó en el comportamiento sísmico del terreno.



## CAPITULO 5.- DAÑOS GENERADOS POR EL TERREMOTO DEL 27F

#### 5.1.- Introducción

Con el fin de identificar los factores geológicos y geotécnicos que influyeron en los daños generados por el terremoto del 27F, se realizó un catastro de todas las construcciones que sufrieron daño estructural en la provincia de Santiago. En base a este registro, se realizó una georeferenciación de las estructuras de manera de reconocer los sectores que presentaron una mayor y menor densidad de daños.

#### 5.2.- Superficie, población y viviendas en la Provincia de Santiago

La Provincia de Santiago es una de las seis provincias de la Región Metropolitana, representando 32 de las 37 comunas que conforman el Gran Santiago. De acuerdo a los datos entregados por el Precenso realizado el 2011, la Provincia de Santiago dispone de aproximadamente el 76% de las viviendas particulares de la Región Metropolitana y es la provincia más densamente poblada de la región.

En la Figura 5.1 se presenta la ubicación de las comunas de la Provincia de Santiago emplazadas sobre la zona de estudio. A su vez, en la Tabla 5.1 se entregan los datos demográficos y estadísticos de dichas comunas, según la información entregada por el Censo 2002 (INE y CELADE).

Cabe mencionar que el número de viviendas por comuna fue obtenido de los datos entregados por el precenso (INE, 2011). El Precenso corresponde a un levantamiento, previo al Censo de 2012, cuyo objetivo fue actualizar la base de datos con la cantidad de manzanas, edificaciones y viviendas del país.

De acuerdo a los datos entregados por la Tabla 5.1, la comuna con mayor cantidad de habitantes es Maipú, siendo la más densamente poblada Lo Espejo con 15667 habitantes/km<sup>2</sup>, seguida por la comuna de Lo Prado con 15570 habitantes/km<sup>2</sup>. En cambio, la comuna con mayor densidad de viviendas es Santiago con 6413 viviendas/km<sup>2</sup>, seguida por Ñuñoa con 4527 viviendas/km<sup>2</sup> y Providencia con 4450 viviendas/km<sup>2</sup>.



Figura 5.1 Ubicación de comunas de la Provincia de Santiago

Comuna	Comuna Superficie Población (km²)		Viviendas	Densidad Población (hbtes./km²)	Densidad Viviendas (viviendas/km²)	
Cerrillos	21.0	71906	21765	3424	1036	
Cerro Navia	11.1	148312	36449	13361	3284	
Conchalí	10.7	133256	34025	12454	3180	
El Bosque	14.1	175594	44568	12453	3161	
Estación Central	14.1	130394	36382	9248	2580	
Huechuraba	44.8	74070	21716	1653	485	
Independencia	7.4	65479	23360	8849	3157	
La Cisterna	10.0	85118	27145	8512	2715	
La Florida	70.8	365674	109050	5165	1540	
La Granja	10.1	132520	34267	13121	3393	
La Pintana	30.6	190085	47388	6212	1549	
La Reina	23.4	96762	27659	4135	1182	
Las Condes	99.4	249893	103794	2514	1044	
Lo Barnechea	1023.7	74749	25670	73	25	
Lo Espejo	7.2	112800	24992	15667	3471	
Lo Prado	6.7	104316	26856	15570	4008	
Macul	12.9	112535	35264	8724	2734	
Maipú	133.0	468390	151208	3522	1137	
Ñuñoa	16.9	163511	76513	9675	4527	
Pedro Aguirre Cerda	9.7	114560	28780	11810	2967	
Peñalolén	54.2	216060	62596	3986	1155	
Providencia	14.4	120874	64073	8394	4450	
Pudahuel	197.4	195653	63266	991	320	
Quilicura	57.5	126518	56415	2200	981	
Quinta Normal	12.4	104012	30701	8388	2476	
Recoleta	16.2	148220	44647	9149	2756	
Renca	24.2	133518	39498	5517	1632	
San Joaquín	9.7	97625	25612	10064	2640	
San Miguel	9.5	78872	31094	8302	3273	
San Ramón	6.5	94906	23116	14601	3556	
Santiago	22.4	200792	143649	8964	6413	
Vitacura	28.3	81499	29358	2880	1037	

Tabla 5.1 Datos de superficie, población y viviendas por comuna (INE)

## 5.3.- Catastro de estructuras dañadas

El catastro de daños fue obtenido de los registros pertenecientes a las 32 municipalidades de la Provincia de Santiago. La mayoría de los municipios realizó catastros a nivel comunal de todos los daños, sin embargo, algunas comunas sólo poseen un registro de las estructuras que fueron informados por particulares al solicitar certificados de daños, certificados de inhabitabilidad, o al postular a subsidios de reparación y/o reconstrucción. Cabe mencionar, que incluso existieron comunas en donde se extraviaron parte de los registros de daños.

Por consiguiente, el catastro de daños presentado en este informe, no representa el cien por ciento de las estructuras dañadas, no obstante constituye una aproximación muy cercana a la totalidad de los daños.

En el catastro de daños se consideraron sólo las estructuras con daños del tipo estructural en los siguientes elementos estructurales:

- Cimientos o sobrecimientos
- Radieres
- Muros
- Antepechos
- Cadenas
- Vigas
- Pilares
- Losas
- Entramados horizontales
- Estructura techumbre
- Frontones
- Antetechos
- Subterráneo/estacionamiento en el caso de edificios

Por su parte, el catastro de daños se dividió en dos categorías de acuerdo a su tipo de edificación; llamadas categoría A y categoría B, las cuales se definen a continuación:

Categoría A: correspondiente a todas las viviendas de uno y dos pisos.

*Categoría B:* correspondiente a todas la estructuras que no clasifiquen como categoría A, es decir, edificios, blocks habitacionales, hospitales, establecimientos educacionales, edificios patrimoniales, galpones, etc.

A continuación se detallan los registros obtenidos de acuerdo a las dos categorías mencionadas.

## 5.3.1.- Categoría A

Se contabilizaron 10705 viviendas dañadas estructuralmente. En la Tabla 5.2 se presenta el número de viviendas dañadas y el porcentaje de viviendas dañadas respecto al número total de viviendas por comuna.

Comuna	Número viviendas dañadas	Porcentaje viviendas dañadas (%)		
Cerrillos	80	0.4		
Cerro Navia	1370	3.8		
Conchalí	279	0.8		
El Bosque	153	0.3		
Estación Central	658	1.8		
Huechuraba	118	0.5		
Independencia	111	0.5		
La Cisterna	123	0.5		
La Florida	91	0.1		
La Granja	33	0.1		
La Pintana	0	0.0		
La Reina	54	0.2		
Las Condes	105	0.1		
Lo Barnechea	114	0.4		
Lo Espejo	137	0.5		
Lo Prado	82	0.3		
Macul	321	0.9		
Maipú	77	0.1		
Ñuñoa	94	0.1		
Pedro Aguirre Cerda	1315	4.6		
Peñalolén	200	0.3		
Providencia	73	0.1		
Pudahuel	306	0.5		
Quilicura	213	0.4		
Quinta Normal	1810	5.9		
Recoleta	228	0.5		
Renca	552	1.4		
San Joaquín	238	0.9		
San Miguel	434	1.4		
San Ramón	276	1.2		
Santiago	1060	0.7		
Vitacura	0	0.0		
TOTAL	10705			

 Tabla 5.2 Número y porcentaje de estructuras de categoría A dañadas

En la Figura 5.2 se presenta con puntos negros la ubicación geográfica de las viviendas dañadas y en la Figura 5.3 se presenta el porcentaje de viviendas dañadas por comuna.



Figura 5.2 Ubicación geográfica de las viviendas dañadas.



Figura 5.3 Porcentaje de viviendas dañadas.

Los mapas presentados en la Figura 5.2 y Figura 5.3, muestran que mayoritariamente el daño en viviendas se concentró en la zona central de la Provincia de Santiago, siendo las comunas con mayor daño Quinta Normal con un 5.9% de sus viviendas dañadas, seguido por Pedro Aguirre Cerda con un 4.6% y Cerro Navia con un 3.8%. Cabe mencionar que estas comunas representan algunas de las comunas más antiguas y con menores recursos de la Provincia de Santiago. Por el contrario, las comunas que no presentaron viviendas con daño estructural fueron La Pintana y Vitacura.

Los daños en estructuras, dependen entre otros factores, del tipo de material de construcción, sin embargo, la mayoría de los catastros realizados por las municipalidades no registraron el material de la obra, por lo tanto no fue posible relacionar directamente los daños en las viviendas con el tipo material.

No obstante, para conocer la tendencia en la zona de estudio, en la Tabla 5.3 se presentan los materiales utilizados para la construcción de los muros portantes, según los datos entregados por el Censo 2002 (INE y CELADE).

Comuna	Clase A (%)	Clase B (%)	Clase C (%)	Clase D (%)	Clase E (%)	Clase F (%)	Clase G (%)
Cerrillos	12.6	58.3	5.3	21.3	1.2	0.9	0.4
Cerro Navia	4.5	58.8	2.1	32.0	1.4	0.9	0.3
Conchalí	10.6	61.5	2.7	22.5	1.1	1.3	0.4
El Bosque	5.0	64.5	4.0	24.0	1.1	1.0	0.3
Estación Central	25.0	48.6	8.3	9.6	2.1	6.0	0.4
Huechuraba	13.6	52.5	3.2	24.1	5.9	0.3	0.2
Independencia	27.6	45.0	2.7	5.7	0.3	18.4	0.4
La Cisterna	12.3	58.3	2.7	19.7	1.3	5.0	0.7
La Florida	8.0	79.6	1.4	9.6	0.9	0.3	0.2
La Granja	6.1	68.6	3.2	20.5	0.8	0.6	0.3
La Pintana	3.8	74.1	3.8	16.0	2.0	0.2	0.2
La Reina	36.9	52.0	3.1	6.9	0.5	0.4	0.3
Las Condes	69.3	26.9	2.0	1.3	0.3	0.0	0.1
Lo Barnechea	39.4	41.5	2.0	15.4	0.6	0.8	0.3
Lo Espejo	8.3	62.4	7.8	17.6	3.2	0.4	0.3
Lo Prado	10.6	66.1	4.0	16.6	1.7	0.7	0.3
Macul	20.5	68.2	1.8	8.5	0.7	0.2	0.2
Maipú	5.3	86.6	1.5	5.4	0.9	0.2	0.1
Ñuñoa	61.5	33.2	2.2	1.2	0.1	1.7	0.2
Pedro Aguirre Cerda	15.8	56.6	11.1	14.0	0.8	1.3	0.4
Peñalolén	12.3	56.9	4.0	24.2	1.9	0.5	0.2
Providencia	84.3	12.5	0.8	0.4	0.03	1.8	0.2
Pudahuel	6.2	73.7	4.3	13.4	1.5	0.7	0.2
Quilicura	7.2	72.8	13.0	6.0	0.6	0.2	0.1
Quinta Normal	8.9	55.9	3.5	18.4	0.9	11.8	0.6
Recoleta	12.7	54.6	3.3	19.8	1.5	7.7	0.4
Renca	6.3	64.5	2.8	23.4	1.4	1.3	0.3
San Joaquín	17.2	56.9	10.4	11.8	0.6	2.6	0.4
San Miguel	30.9	49.7	1.7	10.5	0.6	5.9	0.6
San Ramón	6.8	60.4	1.5	28.1	1.1	1.9	0.4
Santiago	52.3	22.7	1.8	2.6	0.1	19.8	0.6
Vitacura	65.7	32.4	0.8	0.8	0.1	0.02	0.1

Tabla 5.3 Atributos de la Vivienda (INE y CELADE, 2002)

En donde cada clase de material corresponde a:

Clase A: Muros de hormigón armado.

Clase B: Muros de albañilería.

Clase C: Muros de paneles estructurados o bloque (prefabricado).

Clase D: Muros de madera o tabique forrado.

Clase E: Muros de internit.

Clase F: Muros de adobe o barro empajado.

Clase G: Muros construidos con desechos como latas, cartones, plástico, etc.

En la Figura 5.4 se presenta un mapa descriptivo con los porcentajes de clase de material presentados para cada comuna.



Figura 5.4 Porcentaje del material de muros portantes por comuna.

De la Figura 5.4 se desprende que mayoritariamente las viviendas en la provincia de Santiago son fabricadas de hormigón armado o albañilería, siendo al oeste principalmente de albañilería y hacia el este de hormigón armado. Se destaca que las comunas fabricadas con materiales de menor calidad, como las clases F, se encuentran en la zona centro de la Provincia de Santiago, en comunas como Santiago, Independencia y Quinta Normal.

En la Figura 5.5 se muestran fotografías de algunos de los daños presentados en viviendas de la Provincia de Santiago.



Figura 5.5 Daños en estructuras de categoría A

## 5.3.2.- Categoría B

En el catastro se enumeraron 560 estructuras de categoría B con daños del tipo estructural. En la Tabla 5.4 se presenta el número de estructuras dañadas por comuna.

Comuna	Estructuras
Cerrillos	2
Cerro Navia	16
Conchalí	7
El Bosque	7
Estación Central	23
Huechuraba	22
Independencia	10
La Cisterna	22
La Florida	33
La Granja	1
La Pintana	2
La Reina	6
Las Condes	32
Lo Barnechea	9
Lo Espejo	1
Lo Prado	5
Macul	24
Maipú	25
Ñuñoa	43
Pedro Aguirre Cerda	86
Peñalolén	7
Providencia	57
Pudahuel	6
Quilicura	15
Quinta Normal	17
Recoleta	2
Renca	13
San Joaquín	8
San Miguel	24
San Ramón	5
Santiago	21
Vitacura	9
TOTAL	560

Tabla	a 5.4 Estructuras de categ	joría B	dañadas por	comuna
De acuerdo a la Tabla 5.4 se presentó una gran cantidad de daños en la comuna de Pedro Aguirre Cerda, seguido por Providencia y Ñuñoa. Cabe mencionar que, en el caso de Providencia y Ñuñoa no se evidenció un gran daño en viviendas, lo que podría indicar que los daños se debieron a factores constructivos y no a factores geológicos o geotécnicos del terreno.

Para facilitar el análisis y considerando que existe una gran variedad de estructuras que clasifican como categoría B, se dividió el registro a su vez en 6 clases, las cuales se detallan a continuación:

*Edificio:* corresponde a estructuras de 4 o más pisos de altura.

Silo: construcciones de almacenamiento.

Copa de Agua: utilizadas como suministro de agua en terrazas de edificios.

*Estructuras de gran área:* corresponden a estructuras de grandes áreas y bajas alturas como centros comerciales y galpones.

*Patrimonio:* estructuras de gran importancia cultural, como Iglesias y Museos.

**Otros:** corresponden a todas las estructuras que no pertenezcan a alguna de las clases anteriores, por ejemplo, establecimientos educacionales, block habitacionales de 3 pisos, edificios de servicio público, estadios, locales comerciales, etc.

En la Tabla 5.5 se clasifica el número de estructuras de categoría B dañadas de acuerdo a su clase y en la Figura 5.6 se presenta su ubicación.

De acuerdo a la Figura 5.6 se observa que la comuna de Pedro Aguirre Cerda presentó una gran cantidad de daños en la clase "edificio", los cuales corresponden mayoritariamente a blocks habitacionales de 4 pisos. Lo mismo sucede con Ñuñoa que sufrió una gran cantidad de daños en blocks ubicados en poblaciones como la Villa Frei, Villa Olímpica y Villa Salvador Cruz Gana. Asimismo, se presentó una gran cantidad de daños en edificios de Providencia.

Con respecto a la clase "otros", se registró una gran cantidad de daños en Santiago y Maipú, correspondiente mayoritariamente a establecimientos educacionales. En Huechuraba el daño se dividió entre escuelas y edificios de servicio público, y en La Florida los daños se dividieron en block habitacionales de 3 pisos y escuelas.

Dentro de la categoría "Silo", sólo hubo una estructura con daño estructural en Huechuraba, la cual debió ser demolida debido a los daños.

Respecto a la clase "copa de agua", se presentó una gran cantidad de casos en Providencia, los cuales presentaron daños en los pilares que los sustentan, con desprendimiento de hormigón y enfierradura expuesta.

Entre las estructuras correspondientes a "estructuras gran área", se observaron daños en dos centros comerciales de Huechuraba, un centro comercial en Lo Barnechea y una empresa logística en Pudahuel.

Por su parte, las estructuras "Patrimonio" se presentaron mayoritariamente en Providencia y Santiago, siendo principalmente Iglesias construidas en el siglo XIX.

Comuna	Edificios	Otros	Silo	Copa de Agua	Estructuras gran área	Patrimonio
Cerrillos		2				
Cerro Navia	5	10				1
Conchalí	3	4				
El Bosque	6	1				
Estación Central	17	5				1
Huechuraba	8	11	1		2	
Independencia	9			1		
La Cisterna	13	8		1		
La Florida	7	25				1
La Granja	1	0				
La Pintana		2				
La Reina	3	2				1
Las Condes	26	3		3		
Lo Barnechea	5	2		1	1	
Lo Espejo		1				
Lo Prado	4	1				
Macul	22			2		
Maipú	14	11				
Ñuñoa	36	3		3		1
Pedro Aguirre Cerda	85	1				
Peñalolén	4	3				
Providencia	36	1		17		3
Pudahuel	3	2			1	
Quilicura	13	2				
Quinta Normal	9	7				1
Recoleta		1				1
Renca	8	5				
San Joaquín	6	2				
San Miguel	19	5				
San Ramón	5					
Santiago	4	14				3
Vitacura	9					
Sub Total	380	134	1	28	4	13
TOTAL	560					

Tabla 5.5 Distribución del número de estructuras dañadas por clase



Figura 5.6 Ubicación de estructuras de categoría B.

Es importante notar que los daños estructurales observados en las estructuras de categoría B fueron muy variables, partiendo desde daños locales a daños irreparables, es por este motivo que se realizó una distinción de los daños según 3 grados, los cuales se definen en la Tabla 5.6.

Grado	Descripción
1	<u>Habitable:</u> Aquellas edificaciones que no presentaron daños estructurales de consideración o con daños estructurales localizados, los cuales pudieron presentar riesgos en sectores específicos y no en el total de la edificación, por lo tanto se pudo continuar con el uso total o parcial del inmueble
2	Habitable sólo después de reparaciones y refuerzo estructural: Aquellas edificaciones que presentaron daños estructurales con riesgos para sus usuarios, los cuales debieron ser habitados sólo después de las reparaciones atingentes.
3	<u>No habitable, no es posible rehabilitar el edificio:</u> Aquellas edificaciones donde no fue posible efectuar reparaciones o refuerzos que proveyeran una condición estructural aceptable para la estructura. Estas estructuras fueron declaradas inhabitables y decretadas su demolición.

#### Tabla 5.6 Descripción de los Grados de daños

En la Figura 5.7 y Tabla 5.7 se presenta la distribución de las estructuras según el grado de daño por comuna. Asimismo, en el Anexo E del presente documento se detalla la distribución de grado de daño por clase de estructura.



Figura 5.7 Distribución de Grado de daño por comuna

Comuna	Número de Estructuras				
	Grado 1 Grado 2		Grado 3		
Cerrillos	2	0	0		
Cerro Navia	3	12	1		
Conchalí	6	1	0		
El Bosque	7	0	0		
Estación Central	20	3	0		
Huechuraba	5	15	2		
Independencia	7	3	0		
La Cisterna	17	5	0		
La Florida	31	2	0		
La Granja	1	0	0		
La Pintana	2	0	0		
La Reina	5	1	0		
Las Condes	30	1	1		
Lo Barnechea	6	3	0		
Lo Espejo	1	0	0		
Lo Prado	3	2	0		
Macul	19	3	2		
Maipú	19	2	4		
Ñuñoa	28	15	0		
Pedro Aguirre Cerda	83	3	0		
Peñalolén	6	1	0		
Providencia	53	2	2		
Pudahuel	6	0	0		
Quilicura	3	12	0		
Quinta Normal	15	2	0		
Recoleta	2	0	0		
Renca	13	0	0		
San Joaquín	4	0	4		
San Miguel	19	3	2		
San Ramón	5	0	0		
Santiago	17	4	0		
Vitacura	9	0	0		
Sub Total	447	95	18		

Tabla 5.7 Distribución de grado de daño para estructuras de categoría B

De acuerdo a la Tabla 5.7 un 80% del total de estructuras dañadas presentaron daños grado 1, un 17% presentó daño grado 2 y sólo un 3% presentó daño grado 3. Del Anexo E se advierte que las estructuras que presentaron daños irreparables (grado 3), corresponden a 10 estructuras clase "edificio", 5 clase "otros", 1 "silo" y 2 "copas de agua".

En la Figura 5.8 se presenta la distribución geográfica de los daños, donde los iconos corresponden a las clases de estructuras presentadas en la Figura 5.6.



Figura 5.8 Distribución geográfica de las estructuras por Grado de daños.

De acuerdo a la Figura 5.8 los daños grado 1 se distribuyeron en toda la Provincia de Santiago, siendo las comunas con mayor cantidad Pedro Aguirre Cerda, seguido por Providencia y La Florida. Respecto a las estructuras con daño grado 2, se advierte una mayor densidad en la zona centro y norte de la Provincia de Santiago, en comunas como Ñuñoa, Huechuraba y Quilicura. Por otro lado, los daños grado 3 se presentaron en 8 comunas, mayoritariamente en la zona sur, siendo las de mayor cantidad las comunas de Maipú y San Joaquín con 4 estructuras, seguido por 2 estructuras en las comunas de San Miguel, Macul, Providencia y Huechuraba.

Por último, en la Tabla 5.8 se presenta una breve descripción de las estructuras con daños grado 3 y en la Figura 5.9 se presentan fotografías de algunos de los daños.

Clase Estructura	Comuna	Dirección	Nombre	Observaciones	
Edificio	Cerro Navia	La Hondonada 8301		Demolición del block producto de los daños	
Silo	Huechuraba	Santa Elena de Huechuraba 1502		Decreto de demolición producto de los daños	
Otros	Huechuraba	Premio Nobel 5555	Municipalidad de Huechuraba, Alcaldía	Estructura presenta daños estructurales. Se decreta la demolición del inmueble	
Otros	Las Condes	Francisco Bilbao 8080	Torres de Bilbao (Losa estacionamiento)	Colapso total de losa estacionamiento, destrucción de 68 vehículos	
Edificio	Macul	Macul 2301	Sol Oriente I	Edificios de 18 pisos. Presentan	
Edificio	Macul	Exequiel Fernández 2302	Sol Oriente II	que se solicita su demolición	
Otros	Maipú	Alberto Llona 1806	SMAPA	SMPA Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado. Daños estructurales en edificio, se decretó su demolición	
Edificio	Maipú	Luis Gandarillas 360	Don Luis Gandarillas 360	2 torres de 4 pisos. Colapso de machones en subterráneo lo que provocó el colapso del lado norte del edificio. Decretada su demolición	
Edificio	Maipú	Tristán Valdés 216	Condominio Don Tristán Valdés	2 torres de 4 pisos. Inclinación pronunciada y torsión del edificio debido al desplomo de las columnas del poniente, desprendimiento de hormigón en elementos estructurales.	
Edificio	Maipú	Hermanos Carrera 2727	Condominio calle Hermanos Carrera	Torres de 5 pisos. Bloque poniente presenta fisuras aisladas diagonales en muros. Bloque oriente presenta deformación de losas, alto nivel de grietas en elementos estructurales. Decretada su demolición	
Copa de Agua	Providencia	Rafael Cañas 76		Estructura de soporte copa de agua colapsada. Decretada su demolición	
Copa de Agua	Providencia	Carlos Antúnez 2425		Pilares que sustentan la copa de agua con hormigón colapsado y enfierradura a la vista. Decretada su Demolición	

 Tabla 5.8 Descripción de estructuras que presentaron Grado de daño 3

Clase Estructura	Comuna	Dirección	Nombre	Observaciones	
Edificio	San Joaquín	José Mosqueira 3238	Conjunto habitacional Villa Brasil	Block con daños estructurales de consideración. Decretada su demolición	
Edificio	San Joaquín	Rio Palena 3670	Conjunto habitacional Villa El Pinar	Block con daños estructurales de consideración. Decretada su demolición	
Edificio	San Joaquín	Liszt 3346	Conjunto habitacional Villa Liszt	Block con daños estructurales de consideración. Decretada su demolición	
Otros	San Joaquín	Liszt 3079		Daños estructurales de consideración en block. Decretada su demolición	
Edificio	San Miguel	Pasaje Blanco 5570		Se decreta demolición producto de los daños	
Otros	San Miguel	Gran Avenida 4836		Local Comercial. Agrietamiento interior del 2° piso, coronación superior del edificio con riesgo de derrumbe hacia la vereda. Recomendada su demolición	



Muro y pilar subterráneo del Condominio Sol Oriente, Macul



Losa y balcones del Edificio Luis Gandarillas 360, Maipú



Fachada e interior de departamento del Condominio Don Tristán Valdés, Maipú Figura 5.9 Fotografías estructuras con Grado de daño 3



Muros conjunto habitacional Villa El Pinar y Villa Brasil, San Joaquín Figura 5.9 Fotografías con estructuras Grado de daño 3 (cont.)

# CAPITULO 6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

# 6.1.- Introducción

En el presente capitulo se presentan los resultados obtenidos al comparar el registro de daños de estructuras de categoría A y B (presentado en el acápite anterior), con las características geológicas-geotécnicas, la respuesta sísmica y con los antiguos cursos de agua de la cuenca de Santiago.

A su vez, el catastro de daños estructurales se confronta con las intensidades sísmicas obtenidas para los terremotos del 27F y del 3 de Marzo de 1985. Este último evento se compara, de manera de verificar si las zonas que presentaron mayores daños son coincidentes para ambos eventos.

# 6.2.- Análisis de intensidades sísmicas en la Provincia de Santiago

### 6.2.1.- Terremoto del 27 de Febrero del 2010

En la Figura 6.1 se presenta el registro de daños de las estructuras de categoría A y B (puntos azules), sobre las intensidades sísmicas obtenidas por Molina (2011) para el terremoto del 27F (ver Figura 2.7). De acuerdo a lo obtenido por Molina, los sectores de mayor intensidad sísmica (entre VIII y VIII 1/2), dentro de la Provincia de Santiago, se ubicaron en las comunas de Renca, Quinta Normal, Estación Central y Cerro Navia. Comparando estas comunas con el catastro de daños se observa que efectivamente sufrieron un alto porcentaje de viviendas dañadas (entre un 1 a 6%).

No obstante, la comuna de Pedro Aguirre Cerda, que sufrió entre 4 a 5% de sus viviendas dañadas, presenta según Molina (2011) intensidades sísmicas bajas (<VII).

Esta subestimación de la intensidad sísmica, podría deberse al criterio de selección de las zonas encuestadas, donde se debe disponer de muestras estadísticas significativas de por lo menos 20 observaciones para un mismo tipo de construcción, considerando sólo viviendas unifamiliares de uno o dos pisos y no de estructuras de mayor dimensión.

Por consiguiente, es posible que las zonas encuestadas para el análisis de la intensidad sísmica, no evidenciaron la real magnitud de los daños registrados en dicha comuna. Se postula que para esta comuna las intensidades sísmicas debieran ser mayores o iguales a VIII. Esta hipótesis debe ser corroborada.

Por otro lado, las comunas que presentaron menor cantidad de daños, según los registros, fueron La Pintana y Vitacura, las cuales, congruentemente presentaron bajas intensidades sísmicas (< VII).



Figura 6.1 Registro de daños emplazado sobre las intensidades sísmicas obtenidas para el terremoto del 27F.

#### 6.2.2.- Comparación registro de daños con evento de 1985

En la Figura 6.2 se presentan los daños en estructuras de categoría A y B (puntos azules), sobre las intensidades sísmicas obtenidas por Menéndez (1991) para el terremoto de 1985 (ver Figura 2.4).

De la figura se desprende que los sectores con mayor intensidad sísmica (entre VIII y VIII 1/2) se presentaron en una zona mucho más extensa que lo manifestado en el terremoto del 27F, no obstante, en ambos terremotos los mayores daños se ubicaron en el sector noroeste de la cuenca de Santiago, lo que indicaría que la respuesta sísmica de la Provincia de Santiago depende, entre otros, de las características geológicas y geotécnicas del sitio.

En particular se destaca que las comunas de Pudahuel, Maipú, Macul y al este del cerro San Cristóbal presentaron una intensidad sísmica alta en el terremoto de 1985, contrario a la baja cantidad de daños sufridos en el 27F. Asimismo, la comuna Pedro Aguirre Cerda que sufrió importantes daños en el terremoto del 2010, sólo alcanzó intensidades sísmicas menores a VII 1/2 en el evento de 1985.

Con respecto a las comunas con menores daños en el terremoto del 27F, como La Pintana y Vitacura, éstas congruentemente presentaron intensidades bajas para el evento de 1985 (entre VII a VII 1/2 en La Pintana y VI para Vitacura).

La disminución de las zonas más afectadas en el terremoto del 27F concuerda con lo estudiado por Astroza et al. (2012), donde se concluyó que el terremoto del 3 de Marzo de 1985 produjo mayores daños considerando las viviendas de uno y dos pisos en la Región Metropolitana. Una de las razones para justificar las diferencias en la cantidad y ubicación de los daños, es que posterior al terremoto de 1985 muchos de los propietarios de las viviendas que sobrevivieron al evento mejoraron las estructuras, generando una mejor respuesta frente a los terremotos venideros.

Asimismo, se debe considerar que el terremoto de 1985, a pesar de tener una magnitud menor que el evento del 27F, su zona epicentral fue más cercana a la Región Metropolitana.



Figura 6.2 Daños obtenidos en el registro sobre las intensidades sísmicas obtenidas para el terremoto de 1985.

### 6.3.- Análisis de antiguos cursos de agua

En la Figura 6.3 se presentan los daños en estructuras de categoría A y los cursos de agua naturales y artificiales presentados en el acápite 3.7.2 del presente informe. Se desprende que los daños en viviendas se concentraron principalmente en dos sectores alrededor de los cursos de agua, denominados Zona A y B. La Zona A corresponde al sector comprendido entre el río Mapocho y el canal Zapata, en las comunas de Cerro Navia y Quinta Normal. La Zona B corresponde al sector sur del Zanjón de La Aguada y el último tramo del canal San Joaquín, en las comunas Pedro Aguirre Cerda, San Miguel, San Joaquín y Macul.

Por su parte, en la Figura 6.4 se presentan los cursos de aguas naturales y artificiales y los daños en estructuras de Categoría B, los cuales se distinguen según símbolo de clase de edificación y color del grado de daño. De acuerdo a la figura los daños en estructuras de categoría B se concentraron en tres sectores, denominados Zona 1, 2 y 3. La Zona 1 corresponde a la Zona A identificada para el caso de los daños en viviendas. La Zona 2 corresponde al mismo sector de la Zona B, pero abarcando por el sureste hasta la comuna de La Florida. Por último, la Zona 3 se ubica alrededor del río Mapocho en la comuna de Providencia, Las Condes y Vitacura.

Es importante destacar que a pesar de que se observa una concentración de daños en las zonas mencionadas, existe un factor de escala que ocasiona que las estructuras se vean más cercanas a los cursos de agua. Por consiguiente, en las Figuras 6.5 a 6.7 se presenta un acercamiento de las Zonas 1 (abarca la Zona A), 2 (abarca la Zona B) y 3.

De acuerdo a la Figura 6.5 se observa que no existe una concentración de daños en la Zona A y 1, sólo emplazamientos aislados. Con respecto a la Figura 6.6, si existen concentraciones de daños alrededor del Zanjón de La Aguada y el canal San Joaquín, sin embargo, estas podrían estar asociadas a otros parámetros como la geología de los depósitos de suelo. Este escenario es discutido posteriormente. Finalmente, de acuerdo a la Zona 3 (Figura 6.7) se desprende que no existe una concentración de daños alrededor del río Mapocho.

Por tanto, se concluye que el depósito paulatino de suelos finos proveniente de los cursos de agua no habría influenciado en los daños sufridos en las estructuras producto del 27F en la cuenca de Santiago.



Figura 6.3 Daños estructuras categoría A y cursos de agua naturales y artificiales.



Figura 6.4 Daños estructuras categoría B y cursos de agua naturales y artificiales.



Figura 6.5 Daños alrededor de la Zona A y 1



Figura 6.6 Daños alrededor de la Zona B y 2



Figura 6.7 Daños alrededor de la Zona 3

# 6.4.- Topografía superficial

En la Figura 6.8 y Figura 6.9 se presentan los daños en estructuras de categoría A y B, respectivamente, emplazadas sobre la elevación topográfica de la cuenca de Santiago (presentada en la Figura 3.3 del capítulo 3).

De acuerdo a la Figura 6.8 los deterioros en estructuras de categoría A se ubicaron en elevaciones entre los 400 a 800 m.s.n.m.

Por otro lado, en la Figura 6.9 se observa que los daños en estructuras de categoría B se distribuyeron también en elevaciones entre los 400 a 800 m.s.n.m., siendo las comunas con mayor densidad de daños Pedro Aguirre Cerda y Providencia con elevaciones entre los 500 a 700 m.s.n.m. A su vez, se muestra que las estructuras con daños grado 3 se distribuyeron en distintas elevaciones topográficas y no poseen un patrón de elevación determinado.

Se concluye, la morfología superficial de la cuenca de Santiago no tuvo incidencia en los daños producidos por el 27F, debido a que no existe una concentración de daños a una elevación determinada.



Figura 6.8 Daños estructuras categoría A y elevación topográfica



Figura 6.9 Daños estructuras categoría B y elevación topográfica

# 6.5.- Basamento Rocoso

A continuación se analiza la relación entre la morfología del basamento rocoso, en términos de profundidad y elevación, con los daños provocados por el terremoto del 27F.

### 6.5.1.- Profundidad Basamento Rocoso

En la Figura 6.10 y Figura 6.11 se muestran los daños presentados en estructuras de categoría A y B, respectivamente, emplazadas sobre el mapa de isoprofundidades del basamento rocoso (presentado en la Figura 3.4 del capítulo 3). De acuerdo a ambas figuras se destaca lo siguiente:

- Para las estructuras de categoría A la principal concentración de daños se ubicó en las comunas de Quinta Normal, Pedro Aguirre Cerda y Cerro Navia con profundidades variables entre 150 a 500 m. A su vez, se observa un sector con una alta concentración de daños en la comuna de Pudahuel, justo donde la roca se encuentra más profunda entre 450 a 500 m.
- Con respecto a las estructuras de categoría B, los daños se emplazaron en todas las profundidades. En particular, en Pedro Aguirre Cerda, Providencia y Ñuñoa, correspondiente a las comunas con más daño, los deteriores se ubicaron en profundidades variables entre 50 a 500 m.
- Asimismo, se observa una alta concentración de estructuras con daño grado 3 en las comunas de San Miguel, San Joaquín, Maipú y Macul en donde la roca se encuentra a profundidad variable entre 50 a 450 m.

#### 6.5.2.- Elevación del Basamento Rocoso

En la Figura 6.12 y Figura 6.13 se muestran los daños generados en estructuras de categoría A y B, respectivamente, emplazadas sobre el mapa de elevaciones del basamento rocoso (presentado en la Figura 3.6 del capítulo 3). De acuerdo a ambas figuras se destaca lo siguiente:

- Respecto a las estructuras de categoría A las comunas con mayor porcentaje de daños como Quinta Normal, Pedro Aguirre Cerda y Cerro Navia presentan elevaciones del basamento variables desde los -25 a 400 m.s.n.m. Por otra parte, las comunas sin daño estructural como La Pintana y Vitacura presentan elevaciones desde los 200 a 1200 m.s.n.m.
- En particular, se advierte que en la comuna de Pudahuel se generó una importante concentración de daños en viviendas en el sector donde el basamento se encuentra menos elevado (desde -25 a 0 m.s.n.m.).
- Respecto a los daños en estructuras de categoría B estos se generaron en elevaciones del basamento rocoso desde los -25 a 900 m.s.n.m. En particular las comunas más dañadas como Pedro Aguirre Cerda, Providencia y Ñuñoa presentan elevaciones variables desde los 200 a 600 m.s.n.m.

 En las comunas con mayor cantidad de daños irreparables (Grado 3), como Maipú, San Miguel, San Joaquín, Huechuraba y Macul, el basamento rocoso se encuentra entre los 0 a 600 m.s.n.m.

Cabe mencionar que existen diversos estudios donde se analiza el efecto tridimensional del basamento en la respuesta sísmica de un depósito de suelos. No obstante, a excepción de la alta concentración de daños en la comuna de Pudahuel, justo donde la roca se encuentra más profunda (entre 450 a 500 m), en la cueca de Santiago no se observa una concentración de daños en profundidades o elevaciones específicas del basamento rocoso. Por tanto, la morfología del basamento no fue un factor detonante en los daños ocurridos por el 27F.



Figura 6.10 Estructuras categoría A y profundidades del basamento rocoso



Figura 6.11 Estructuras categoría B y profundidades del basamento rocoso



Figura 6.12 Estructuras de categoría A y elevación del basamento rocoso



Figura 6.13 Estructuras categoría B y elevación del basamento rocoso

## 6.6.- Aguas Subterráneas

A continuación se compara el nivel de las aguas subterráneas en la zona de estudio, en términos de profundidad y elevación, con los daños presentados en estructuras de categoría A y B producto del terremoto del 27F.

#### 6.6.1.- Profundidad del Nivel Freático

En la Figura 6.14 y Figura 6.15 se presenta el mapa de profundidad del nivel freático (presentado en la Figura 3.10 del capítulo 3) y los daños presentados en las estructuras de Categoría A y categoría B, respectivamente. De acuerdo a ambas figuras se desprende lo siguiente:

- Las viviendas dañadas se ubicaron mayoritariamente en profundidades variables desde 15 a 110 m. Por su parte, en el caso de las comunas sin daño como La Pintana y Vitacura la napa freática se encuentra entre los 15 a 150 m de profundidad.
- Respecto a los daños en estructuras de categoría B, éstos se concentraron en profundidades variables entre 50 a 130 m.

### 6.6.2.- Elevación del Nivel Freático

En la Figura 6.16 y Figura 6.17 se presenta el modelo de elevación de las aguas subterráneas y la ubicación de los daños en estructuras de categoría A y categoría B, respectivamente. De acuerdo a ambas figuras se desprende lo siguiente:

- Los daños en viviendas se concentraron en sectores con elevaciones del nivel freático variables desde los 400 a 500 m.s.n.m. Por su parte, las comunas sin daño como La Pintana y Vitacura presentan elevaciones desde los 450 a 750 m.s.n.m.
- Respecto a las estructuras de categoría B, se observa que los daños se concentraron en elevaciones del nivel freático desde los 400 a 600 m.s.n.m.
- Las estructuras con daños irreparables (Grado 3) no presentan un patrón de elevación determinado.

En consecuencia, se concluye que no existe concentración de daños a una profundidad o elevación determinada de las aguas subterráneas.



Figura 6.14 Estructuras categoría A y profundidades del nivel freático



Figura 6.15 Estructuras categoría B y profundidades del nivel freático



Figura 6.16 Estructuras categoría A y mapa de elevaciones del nivel freático



Figura 6.17 Estructuras categoría B y mapa de elevaciones del nivel freático

## 6.7.- Marco Geológico

### 6.7.1.- Geología Superficial de la cuenca de Santiago

En la Figura 6.18 y Figura 6.19 se presentan los daños en las estructuras de categoría A y B, respectivamente, emplazadas sobre las 10 unidades geológicas de la cuenca de Santiago (presentadas en la Figura 3.12 del capítulo 3). De acuerdo a ambas figuras se desprende lo siguiente:

- Los daños en viviendas se concentraron principalmente en las unidades IIIa (depósitos aluviales), VI (ceniza volcánica) y VII (suelos finos). Esto queda de manifiesto al analizar las comunas con mayor densidad de daños, donde la comuna de Quinta Normal se emplaza sobre la unidad VI y VII, Pedro Aguirre Cerda se ubica sobre la unidad II y IIIa, Cerro Navia se ubica sobre las unidades VI y VII, y Renca se emplaza principalmente sobre la unidad VII.
- Se observa que en el caso de la comuna Pedro Aguirre Cerda, la mayor densidad de daños en viviendas se concentró al final de la lengüeta de la unidad Illa.
- Con respecto a las estructuras de categoría B los daños se ubicaron en distintas unidades geológicas, sin ningún patrón determinado. No obstante, los daños más severos (grado 3) se ubicaron principalmente en la zona sur de la Provincia, mayoritariamente alrededor de la lengüeta IIIa, correspondiente a depósitos aluviales.

En el marco anterior, en la Figura 6.20 se presenta en detalle el sector donde se concentró mayoritariamente los daños irreparables, correspondiente a las comunas de Macul, San Joaquín, San Miguel y Maipú. De éstos, los daños ubicados próximos a la lengüeta de la unidad Illa corresponden a las obras ubicadas en las comunas de Macul, San Joaquín y San Miguel.



Figura 6.18 Estructuras categoría A dañadas sobre marco Geológico



Figura 6.19 Estructuras categoría B dañadas sobre marco Geológico



Figura 6.20 Sector con mayor concentración de daños irreparables

De acuerdo a lo detallado por Nichols (2009) la gradación a lo largo del eje de un abanico aluvial (unidad IIIa) tiene relación con la pérdida de energía del flujo a lo largo de su recorrido. Por lo tanto, en el ápice del abanico se encontrarían depósitos de material grueso (flujos de alta energía), en la zona media se encontrarían depósitos de gravas y arenas, y en la parte distal del abanico se presentarían depósitos de sedimentos finos con un alto contenido arcilloso (flujos de baja energía, es decir de baja pendiente). En consecuencia, al final de la lengüeta de la unidad IIIa podrían existir niveles de suelos finos (superficiales) que explicarían el pobre comportamiento de estas zonas durante el 27F.

En la Figura 6.21 se presenta la ubicación de la lengüeta de la unidad IIIa sobre la elevación topográfica de la cuenca y en la Figura 6.22 se presenta el perfil de elevación AB. Se observa que hasta los primeros 10 km la topografía presenta una pendiente de aproximadamente 0.8% y desde los 10 km hasta los 15.6 km, la topografía aumenta casi 9 veces con una pendiente igual a 7%.

En consecuencia, en los primeros 10 km de la lengüeta podrían existir depósitos de suelos finos superficiales, la cual podría ubicarse más al sur de lo detallado en el mapa geológico, lo que explicaría los daños grado 3 al sur de la unidad Illa.



Figura 6.21 Ubicación lengüeta unidad IIIa sobre la topografía superficial



A continuación se presentan las características geotécnicas de las tres comunas donde se ubicaron los daños irreparables (Macul, San Joaquín y San Miguel) alrededor de la unidad Illa, de manera de corroborar si existe información de los depósitos de suelos superficiales en dichos sectores. Es importante señalar que esta información pertenece a las municipalidades de cada comuna, las cuales poseen sólo una leve descripción de la mecánica de suelos del sector.

#### 6.7.1.1.- <u>Macul</u>

La comuna de Macul registró dos estructuras con daños Grado 3, correspondiente a los dos edificios del Condominio Sol Oriente, los cuales fueron declarados inhabitables el 3 de Marzo del 2010 mediante el decreto alcaldicio N°329 de la Municipalidad de Macul.

Lamentablemente la Municipalidad no cuenta con el informe de mecánica de Suelo de dichas estructuras, sin embargo posee información del Edificio Don Manuel Sánchez, ubicado aproximadamente a 300 m, el cual registró daños Grado 2 producto del terremoto (ver Figura 6.23).



Figura 6.23 Estructuras Categoría B en Macul

A continuación se detalla la mecánica de suelos realizada para el edificio Don Manuel Sánchez de manera de conocer mejor el suelo de fundación del sector.
#### Edificio Don Manuel Sánchez

La empresa Geotecnia e Ingeniería de Fundaciones (GEOFUN, 2005) realizó un informe de socalzado para el edificio Don Manuel Sánchez en donde se analizó el proyecto de socalzado y/o entibación discontinua de la obra. De acuerdo a lo presentado en dicho informe, las propiedades del suelo de fundación presentan las siguientes características:

Antecedentes Geológicos: El subsuelo del sitio corresponde a la unidad denominada "conos de deyección" en su parte terminal, que se interdigita con la grava de Santiago. Estos depósitos están constituidos por materiales arrastrados por flujos ocasionales de agua de las quebradas cordilleranas y depositados por acción gravitacional. La parte terminal de dichos conos son materiales limosos o arcillosos con cierto contenido de arena, ocasionalmente presentan una estratificación horizontal debido al mecanismo de depositación. En algunos sectores estos suelos presentan ciertas características colapsibles al saturarse, debido a su estructura tipo migajón.

*Estratigrafía:* En la Tabla 6.1 se presenta la descripción estratigráfica presentada por GEOFUN (2005) de acuerdo a la exploración realizada.

Horizonte	Prof. (m)	Descripción						
H-1	0.0 – 0.9	Relleno artificial heterogéneo						
H-2	0.9 – 3.3	Arcilla de color café, humedad media, consistencia dura, plasticidad baja, estructura migosa - migajón						
H-3	3.3 – 4.7	Grava arenosa de color gris, humedad media, compacidad alta, de cantos redondeados y subredondeados, tamaño máximo 4"						
H-4	4.7 – 12.0	Arcilla algo limosa color café, humedad media, consistencia dura, plasticidad baja, estructura migosa- migajón						

Tabla 6.1 Modelo Estratigráfico sector Edificio Don Manuel Sánchez

GEOFUN destaca que no se detectó nivel freático en el interior del pozo, lo que concuerda con lo presentado en el mapa de la Figura 3.10 en donde se muestra que la napa se encuentra a más de 50 m de profundidad.

**Propiedades Mecánicas:** A continuación se detalla la caracterización geotécnica realizada por GEOFUN para el horizonte H-4, correspondiente a una arcilla limosa de baja plasticidad.

Angulo de fricción ( $\phi$ ) = 25° Cohesión (c) = 3 ( $t/m^2$ ) Peso unitario ( $\gamma_t$ ) = 2 ( $t/m^2$ ) Módulo de deformación (E): = 600 + 600z ( $t/m^2$ ), donde z es la profundidad en metros Razón de Poisson (v) = 0.4

De acuerdo a la modelación estratigráfica y la caracterización geotécnica del horizonte H-4, se concluye que el suelo de fundación está constituido superficialmente por un relleno artificial y una arcilla de baja plasticidad hasta los 3.3 m de profundidad, bajo la cual se presenta un estrato de aproximadamente 1.5 m de grava arenosa, el cual sobreyace sobre una arcilla limosa de plasticidad baja, con un ángulo de fricción de 25° y una cohesión de 3 ( $t/m^2$ ).

Lo anterior condice con el mapa de geología superficial presentado en el capítulo 3, el cual se presenta más detalladamente en la Figura 6.23, en donde se observa que el Edificio Don Manuel Sánchez se ubica en un sector donde se interdigitan depósitos aluviales (unidad IIIa) y gravas fluviales (unidad II), lo que explicaría el estrato de grava arenosa inmersa en un depósito de suelos finos.

## 6.7.1.2.- <u>San Joaquín</u>

La comuna de San Joaquín registró 4 estructuras con daños Grado 3, 3 de las cuales corresponden a la clase "Edificio" y 1 perteneciente a la clase "Otros". Entre estas estructuras destacan los blocks de la Villa El Pinar, los cuales presentaron fallas principalmente en el mortero de pega de sus elementos de albañilería. En la Figura 6.24 se presenta la ubicación de la Villa en cuestión y en las Tablas 6.2 a 6.5 se detalla la información de 4 calicatas excavadas hasta los 6 m de profundidad en la Villa El Pinar (Esta información fue proporcionada por la Dirección de Obras de la Municipalidad de San Joaquín).



Figura 6.24 Estructuras Categoría B en San Joaquín

Horizonte	Prof. (m)	Descripción Visual						
1	0.0 – 0.2	Cobertura vegetal						
2	0.2 – 1.2	Relleno compuesto por arcilla de plasticidad media, humedad baja y color café. Suelo de estructura migajón, de porosidad baja y consistencia media, con aproximadamente 5% de arena y 5% de grava. No se observan características expansivas. Según USCS clasifica como CL.						
3	1.2 – 1.8	Grava de origen fluvial en matriz areno arcillosa, humedad baja y color gris. Estrato con cementación baja y compacidad suelta. Presencia de clastos sanos sub-redondeados con tamaño máximo 4". Según USCS clasifica como GP-GC.						
4	1.8 – 6.0	Grava de origen fluvial en matriz arenosa, humedad alta y color gris. Estrato de suelo no cementado y de compacidad suelta. Contiene clastos sanos sub-redondeados con tamaño máximo 4". Según USCS clasifica como GP.						

Tabla 6.2 Descripción estratigráfica calicata N°1

Horizonte	Prof. (m)	Descripción Visual				
1	0.0 - 0.8	Relleno compuesto por arcilla de plasticidad baja, humedad media y color café. Suelo sin estructura, de porosidad baja, y consistencia media, con aproximadamente 5% de arena y 10% de grava. Según USCS clasifica como CL.				
2	0.8 – 2.2	Grava de origen fluvial en matriz areno arcillosa, humedad baja y color café. Estrato no cementado y compacidad media. Presencia de clastos sanos sub-redondeados con tamaño máximo 4". Según USCS clasifica como GP-GC.				
3	2.2 - 6.0	Grava de origen fluvial en matriz areno arcillosa, humedad media y color gris. Estrato de suelo no cementado y de compacidad media. Contiene clastos sanos sub-redondeados con tamaño máximo 4". Según USCS clasifica como GP-GC.				

### Tabla 6.3 Descripción estratigráfica calicata N°2

	1 5								
Horizonte	Prof. (m)	Descripción Visual							
	0.0 – 0.4	Relleno compuesto de grava de origen fluvial en matriz arenosa,							
1		humedad baja y color gris. Estrato con cementación baja y							
I		compacidad suelta. Contiene clastos sub-redondeados de tamaño							
		máximo 2". Según USCS clasifica como GP.							
	0.4 – 2.0	Relleno compuesto por grava de origen fluvial en matriz areno							
		arcillosa, humedad baja y color café grisáceo. Estrato con							
2		cementación media y compacidad media. Presencia de clastos							
		sanos sub-redondeados con tamaño máximo 3". Según USCS							
		clasifica como GP-GC.							
	2.0 - 6.0	Grava de origen fluvial en matriz arenosa, humedad baja y color							
3		gris. Estrato de suelo con cementación baja y de compacidad							
		media. Contiene clastos sanos subredondeados con tamaño							

#### Tabla 6.4 Descripción estratigráfica calicata N°3

## Tabla 6.5 Descripción estratigráfica calicata 4

máximo 4". Según USCS clasifica como GP.

Horizonte	Prof.(m)	Descripción Visual					
	0.0 - 0.8	Relleno compuesto por arcilla plasticidad media, humedad media y					
1		color café. Suelo sin estructura, porosidad baja y consistencia					
		media, aprox. 5% de arena y 5% de grava. No se observan					
		características expansivas. Según USCS clasifica como CL.					
	0.8 – 1.6	Grava de origen fluvial en matriz areno arcillosa, humedad media y					
2		color café. Cementación baja y compacidad media. Presencia de					
2		clastos sanos sub-redondeados con tamaño máximo 4". Según					
		USCS clasifica como GP-GC.					
3	1.6 – 4.0	Grava de origen fluvial en matriz arenosa, humedad media y color					
		gris. Estrato de suelo no cementado y de compacidad media.					
		Contiene clastos sanos sub-redondeados con tamaño máximo 4".					
		Según USCS clasifica como GP.					

Cabe destacar que según lo detallado en la exploración geotécnica, la napa freática no fue detectada en ninguna calicata, lo que concuerda con el mapa de profundidad de las aguas subterráneas presentado en el capítulo 3, en donde se muestra que las aguas se encuentran entre los 50 a 150 m de profundidad.

Por otro lado, de acuerdo a lo presentado en la descripción visual se concluye que en la Villa El Pinar el suelo de fundación está constituido superficialmente por un relleno de arcilla de plasticidad media a baja de 1.2 m de espesor, el cual sobreyace sobre estratos de grava de origen fluvial en una matriz areno arcillosa o arenosa de compacidad suelta a media.

No obstante, al ubicar la villa sobre el mapa de geología superficial presentado en la Figura 6.24, se observa que esta se emplazaría sobre la unidad II correspondiente a la grava de Santiago. Lo anterior indicaría que la Villa El Pinar se ubica en un sector donde se interdigitan los depósitos de suelos finos de la unidad IIIa y las gravas fluviales de la unidad II. En consecuencia, la unidad IIIa se podría extender más al sur de lo presentado en el mapa geológico (ver líneas punteadas de la Figura 6.24).

#### 6.7.1.3.- San Miguel

En San Miguel se presentaron 2 estructuras con daños irreparables, correspondiente a una clase "Edificio" y una clase "Otros". Lamentablemente, de acuerdo a lo manifestado por la Dirección de Obras de la Municipalidad, ninguna de las estructuras cuenta con un informe geotécnico. No obstante, la municipalidad facilitó el informe de Mecánica de Suelos desarrollado por GEOFUN en 2013 para un edificio de 22 pisos y 1 subterráneo ubicado en la calle Decima Avenida 1178 (GEOFUN, 2013). En la Figura 6.25 se presenta en un círculo azul la ubicación del edificio mencionado.



Figura 6.25 Estructuras Categoría B en San Miguel

De acuerdo a lo presentado en la Figura 6.25, el Edificio de calle Décima Avenida se encuentra alejado de las estructuras que sufrieron daño irreparable, aproximadamente a 1.5 km. Sin embargo, para obtener una visión de la zona sur de la comuna, a continuación se presenta los antecedentes geológicos y la descripción estratigráfica presentado por GEOFUN en su informe de Mecánica de Suelos.

**Antecedentes geológicos:** El subsuelo del sitio estudiado corresponde al denominado ripio de Santiago. Es un depósito fluvial gravoso con algo de arcilla y/o limo en la parte superior, que ha sido acarreado por los ríos Mapocho y Maipo. En el lugar estudiado, el estrato de grava tiene varias decenas de metros de espesor y el nivel freático se encuentra aproximadamente a una profundidad de 50 m. El fluvial se caracteriza por poseer una compacidad alta y forma de partículas redondeadas y sub-redondeados y es relativamente bien graduado.

**Modelación Estratigráfica:** En la Tabla 6.6 se presenta la descripción estratigráfica presentada por GEOFUN de acuerdo a la exploración realizada.

Horizonte	Prof. (m)	Descripción Visual
1	0.0 – 1.0	Relleno artificial de matriz de arcilla con gravas, color café, algunas basuras.
2	1.0 – 2.5	Grava arcillo arenosa, color café, humedad baja, compacidad alta, tamaño máximo 4", cantos redondeados y sub-redondeados, finos de plasticidad baja.
3	2.5 – 9.0	Grava arenosa, color café, humedad baja a media, compacidad alta, tamaño máximo 8", cantos redondeados y sub-redondeados, finos de plasticidad baja.

Tabla 6.6 Modelo Estratigráfico Edificio Décima Avenida 1178

Según lo informado por GEOFUN, no se detectó napa freática durante la exploración, lo cual condice con lo presentado en la Figura 3.10, en donde se observa que en San Miguel la napa se encuentra entre 50 a 150 m de profundidad.

Por su parte, de acuerdo a la Figura 6.25 se observa que al igual a lo expuesto por GEOFUN, la estructura se emplaza sobre la unidad II correspondiente a la Grava de Santiago, en donde se advierte un depósito gravoso con algo de arcilla o limo.

En consecuencia, se postula que al igual a lo planteado en la comuna de San Joaquín, la zona donde se ubicaron las estructuras con daños irreparables (grado 3) podrían situarse sobre depósitos de suelos finos pertenecientes a la unidad Illa. Lo anterior indicaría que dicha unidad se extendería más hacia el oeste que lo detallado en el mapa de unidades geológicas. En la Figura 6.26 se presenta con líneas punteadas la extensión que podría tener la lengüeta de la unidad Illa. Esta hipótesis deberá ser corroborada.



Figura 6.26 Estructuras Categoría B sobre mapa de unidades geológicas.

#### 6.7.2.- Fallas Geológicas

De acuerdo al análisis realizado en el acápite 3.5.2 del presente documento, sobre la cuenca de Santiago existen dos fallas geológicas principales, correspondiente a la Falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada ubicada en la zona oeste de la cuenca y la falla San Ramón ubicada en la zona este. En particular, la falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada representa mayor interés pues cruza la cuenca de Santiago de Norte a Sur en toda su extensión, poniendo en contacto a las rocas mesozoicas de la Formación Lo Valle con las rocas cenozoicas de la Formación Abanico, es decir, posee la particularidad de empalmar rocas de distintas edades y en definitiva distinta rigidez.

En la Figura 6.27 y 6.28 se presenta la falla en cuestión y los daños en estructuras de Categoría A y B, respectivamente. Se desprende que en el caso de las estructuras de Categoría B la traza de la falla no incidiría en la ubicación de los daños, no obstante, para el caso de las viviendas, en una primera aproximación, se podría señalar que los daños fueron menores al suroeste de la falla, donde las rocas son más antiguas.

Considerando que la traza de la falla en cuestión ha sido inferida uniendo la falla Infiernillo al norte con el cerro Renca y con la falla de Portezuelo de Chada al sur, su trazado podría ser el presentado en línea punteada azul en la Figura 6.29, lo que explicaría la diferencia de daños entre el lado oeste y este de la senda. Estos daños se deberían a una diferencia de rigidez entre las rocas.

Adicionalmente, se advierte que en la zona noroeste de la falla se observa una importante cantidad de daños, no obstante esto podría deberse a que dichas estructuras se emplazan sobre la unidad VI y VII. El resto de los daños, como los observados en la unidad II, obedecerían a otros factores no sólo a la geología del sector.

Es importante señalar que la reinterpretación de la falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada debe ser investigada en mayor profundidad.



Figura 6.27 Falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada y daños Categoría A



Figura 6.28 Falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada y daños Categoría B



Figura 6.29 Reinterpretación Falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada

# 6.8.- Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago

En este acápite se comparan los daños generados por el terremoto del 27F con las mediciones de frecuencias predominantes presentados por Pasten (2007) y con los registros de aceleración del 27F en la zona de estudio.

#### 6.8.1.- Razones espectrales

En la Figura 6.30 y Figura 6.31 se muestran los daños en estructuras de categoría A y B, respectivamente, emplazados sobre las frecuencias fundamentales tipo 1, 2 y 4 presentadas en la Figura 4.2 del capítulo 4. Para el caso de las estructuras de categoría B, los daños Grado 1 se presentan en café, en celeste los daños Grado 2 y en rosado los daños irreparables (Grado 3). De acuerdo a lo presentado en la Figura 6.30 y Figura 6.31 se desprende lo siguiente:

- <u>Estructuras de Categoría A:</u> Considerando las comunas mayormente afectadas (Quinta Normal, Pedro Aguirre Cerda y Cerro Navia), los daños se emplazan próximos a frecuencias fundamentales menores a 2 Hz. Por su parte, las comunas menos dañadas como Vitacura y La Pintana se emplazan próximos a frecuencias que varían entre 0.5 a 10 Hz.
- <u>Estructuras de Categoría B:</u> De acuerdo a las comunas más dañadas (Pedro Aguirre Cerda, Providencia y Ñuñoa), los daños se ubicaron próximos a frecuencias fundamentales variables entre 0 a 10 Hz. Por su parte, considerando las estructuras con daños irreparables, las frecuencias fueron variables entre 1 a 10 Hz.

Por su parte, en la Figura 6.32 se presenta el mapa de unidades geológicas, los daños en estructuras de categoría A y B (puntos rojos), y las amplitudes registradas en las razones espectrales. Se desprende que las comunas con mayor densidad de daños se ubican, en general, próximas a amplitudes mayores a 2, sobre las unidades IIIa, VI y VII, a excepción de un sector de la comuna de Quinta Normal, con amplitudes menores a 2. No obstante, esto podría deberse a que dicho sector se encuentra próximo a suelos más rígidos (unidad II), por lo tanto la configuración sedimentos podría haber afectado los resultados entregados por el método de Nakamura.

Se debe recordar que el método de Nakamura no entrega resultados confiables en la medición de la amplificación sísmica, no obstante permite tener una interpretación cualitativa de los sectores con mayor amplificación, los cuales de acuerdo a la Figura 6.32 se registraron sobre la unidad VI, VII y alrededor de la lengüeta IIIa.

Por otra parte, las altas amplitudes registradas sobre suelos gruesos (unidad II) no serían confiables ya que el método de Nakamura no entrega resultados fiables sobre ensayos realizados en este tipo de suelos.



Figura 6.30 Daños estructuras categoría A y frecuencia fundamental Tipo 1, 2 y 4.



Figura 6.31 Daños estructuras categoría B y frecuencia fundamental Tipo 1, 2 y 4.



Figura 6.32 Daños en estructuras de categoría A y B y amplitud de razones espectrales

#### 6.8.2.- Registros sísmicos

De acuerdo al catastro de daños registrado en la Provincia de Santiago (presentado en el capítulo 5), las comunas con mayor porcentaje de daños en estructuras de Categoría A fueron: Quinta Normal, Pedro Aguirre Cerda y Cerro Navia y en obras de Categoría B fueron: Pedro Aguirre Cerda, Providencia y Ñuñoa. No obstante, en dichas comunas no existen estaciones sismológicas, tal como se muestra en la Figura 6.33 y Figura 6.34.

Por esta razón, sólo es posible analizar la relación entre los daños y los registros de aceleración en las comunas que poseen estaciones sismológicas. En la Tabla 6.7 se presentan las máximas aceleraciones registradas por componente durante el 27F y el número de daños registrado por comuna. De acuerdo a la Tabla 6.7 se desprende lo siguiente:

- Las estaciones donde se midieron las mayores aceleraciones (MAIP, LACH, ANDA y PEÑA), registraron menos de un 1% de las viviendas dañadas. En el caso de las estructuras de categoría B, la comuna de Maipú presentó 25 estructuras dañadas, 4 de ellas con daño irreparable, la comuna de La Reina presentó 6 estructuras dañadas, ninguna con daño irreparable, Santiago registró 21 estructuras dañadas, ninguna irreparable y Peñalolén 7 estructuras dañadas ninguna con daño irreparable.
- Las estaciones que registraron las menores aceleraciones fueron: FCFM y LFLOR, en estas comunas sólo registraron menos de un 1% de las viviendas dañadas y menos de 33 estructuras de categoría B dañadas, ninguna con daño irreparable.
- Es importante destacar que la estación PALTO no es analizada en el presente estudio debido a que Puente Alto no corresponde a una comuna de la Provincia de Santiago y por lo tanto, su catastro de daños no es analizado.



Figura 6.33 Estaciones sismológicas y daños en estructuras categoría A.



Figura 6.34 Estaciones sismológicas y daños en estructuras categoría B.

Comuna	Estación Sismológica	Componente	a <sub>máx</sub> (g)	% Daños	N° Daños Categoría B	N° Daños Grado 3
	Sisiliologica	NS	0.18	Calegona A	21	0
Santiago			0.10	05 10		
	ANDA		0.31	0.5 - 1.0		
		V	0.22			
		NS	0.23			0
La Pintana	ANTU	EW	0.27	< 0.5	2	
		V	0.16			
		NS	0.31		6	0
La Reina	LACH	EW	0.23	< 0.5		
		V	0.16			
	FCFM	NS	0.16		21	0
Santiago		EW	0.16	0.5 - 1.0		
		V	0.14			
	LFLOR	NS	0.19		33	0
La Florida		EW	0.13	< 0.5		
		V	0.10			
	MAIP	NS	0.56		25	4
Maipú		EW	0.49	< 0.5		
		V	0.24			
		NS	0.30			0
Peñalolén	PEÑA	EW	0.29	< 0.5	7	
		V	0.28			

Tabla 6.7 Comparación registro de daños y aceleraciones máximas registradas.

Por otra parte, en la Tabla 6.8 se presentan los resultados de los espectros de respuesta y el registro de daños por comuna. De acuerdo a la Tabla 6.8 se desprende lo siguiente:

- Las comunas donde se registraron las mayores aceleraciones espectrales normalizadas (PEÑA y MAIP) presentaron menos de 0.5% de las viviendas dañadas. Adicionalmente, se observa que en la comuna de Peñalolén sólo se registraron 7 estructuras de categoría B con daño, ninguna irreparable y en la comuna de Maipú se registraron 25 estructuras de categoría B dañadas, 4 de ellas irreparables.
- Con respecto a las estaciones donde se midieron las menores aceleraciones espectral normalizada (LFLOR y ANTU), éstas registraron menos de un 0.5% de las viviendas dañadas. En la Florida se registraron 33 estructuras de categoría B con daño, ninguna irreparable y en La Pintana, 2 estructuras de categoría B resultaron con daño, ninguno irreparable.
- Por su parte, los mayores periodos preponderantes se registraron en las estaciones MAIP y LACH, las cuales registraron menos de un 0.5% de las viviendas dañadas. La comuna de Maipú registró 25 estructuras de categoría B dañadas 4 de ellas irreparables y LACH registró 6 estructuras de categoría B dañadas ninguna irreparable.

 Los menores periodos preponderantes se registraron en la estación ANDA y FCFM ubicadas en la comuna de Santiago donde se presentaron entre 0.5 a 1% de las viviendas dañadas y 21 estructuras de categoría B dañadas ninguna con daño Grado 3.

Comuna	Estación Sismológica	Componente	% Daños Categoría A	N° Daños Categoría B	N° Daños Grado 3	$S_a/a_{m \perp x}$	Periodo $T_p$ (s)
Santiago	ANDA	NS	0.5 - 1.0	21	0	3.87	0.14
		EW				4.07	0.44
		V				3.51	0.19
		NS	< 0.5	2	0	3.83	0.40
La Pintana	ANTU	EW				2.95	0.20
		V				3.87	0.23
		NS	< 0.5	6	0	3.69	0.43
La Reina	LACH	EW				3.49	0.28
		V				3.98	0.33
	FCFM	NS	0.5 - 1.0	21	0	3.37	0.29
Santiago		EW				3.01	0.19
		V				3.89	0.04
La Florida	LFLOR	NS	< 0.5	33	0	2.76	0.28
		EW				3.86	0.23
		V				3.54	0.14
	MAIP	NS	< 0.5	25	4	3.53	0.46
Maipú		EW				4.23	0.52
		V				3.94	0.16
Peñalolén	PEÑA	NS	< 0.5	7	0	4.11	0.36
		EW				3.52	0.28
		V				4.36	0.26

 Tabla 6.8 Comparación espectros de respuesta y registro de daños

En consecuencia, no es posible asociar un aumento de la aceleración máxima en las comunas con mayor daño, debido a que éstas no cuentan con estaciones sismológicas.

No obstante, considerando las comunas que si cuentan con estaciones sismológicas no es posible concluir una tendencia directa entre las aceleraciones registradas (aceleración máxima y aceleración espectral normalizada), el periodo preponderante y los daños registrados, debido a que independiente del análisis de los parámetros en todas estas comunas se registraron menos de 1% de las viviendas dañadas. Asimismo, sucede con las estructuras de categoría B en donde no existe una relación entre los parámetros y la cantidad de estructuras con daños.

Esto se debería a que independiente de que los daños dependen de las condiciones geológicas y geotécnicas de los depósitos de suelos, también dependen de la calidad de la construcción de las obras.

### 6.9.- Análisis de Perfiles de relleno sedimentario

A continuación se analizan los daños en estructuras de categoría A y B, utilizando la información de los tres perfiles presentados en el capítulo 3. En la Figura 6.35 y Figura 6.36 se presenta la ubicación de los tres perfiles sobre el mapa de estructuras dañadas (categoría A y B, respectivamente). De acuerdo a ambas figuras se destaca lo siguiente:

<u>Perfil XY:</u> Recorre los daños de las comunas de Maipú, Cerrillos, Pedro Aguirre Cerda, San Miguel, San Joaquín, Macul y Peñalolén. Adicionalmente, este perfil se ubica sobre el sector con mayor cantidad de estructuras con daños grado 3.

<u>Perfil EW:</u> Se emplaza sobre los daños de las comunas de Renca, Conchalí, Recoleta, Huechuraba, Vitacura y Las Condes.

<u>Perfil NS:</u> Recorre los daños de las comunas de Quilicura, Renca, Quinta Normal, Estación Central, Pedro Aguirre Cerda, Lo Espejo, La Cisterna, El Bosque y La Pintana.

Por otra parte, desde la Figura 6.37 a la Figura 6.39 se presentan los perfiles con la ubicación de las estructuras dañadas. En rojo se muestran las estructuras de categoría A y en verde las estructuras de categoría B. Cabe mencionar que para el análisis de los daños, se consideraron las estructuras de categoría A y B ubicadas en un radio de hasta 200 m alrededor de cada perfil



Figura 6.35 Daños en estructuras de categoría A y perfiles en estudio.



Figura 6.36 Daños en estructuras de categoría B y perfiles en estudio.



Figura 6.37 Información del Perfil XY



Figura 6.38 Información del Perfil EW



Figura 6.39 Información del Perfil NS

**<u>Perfil XY</u>**: De acuerdo a lo presentado en el perfil XY (Figura 6.37), es posible destacar lo siguientes puntos:

- Los daños en estructuras de categoría A y B se concentraron principalmente en la zona central y este del perfil en las comunas de Pedro Aguirre Cerda, San Joaquín, Macul y Peñalolén.
- En Pedro Aguirre Cerda, ubicado desde los 19 a 22 Km del perfil, los daños se presentaron sobre suelo fino, arenas y bolones, el basamento rocoso se encuentra entre 150 a 200 m de profundidad y el nivel freático se ubica a 70 m de profundidad. Asimismo, se presenta una razón espectral Tipo 1 (PAC 1) con amplitudes mayor a 2 y una frecuencia igual a 1.04 Hz.
- En San Joaquín, ubicado desde los 23 a 25 Km del perfil, los daños se presentaron sobre suelos finos y gravas, el basamento rocoso se encuentra entre 200 a 250 m de profundidad y el nivel freático se ubica a 70 m de profundidad, en este sector no hay razones espectrales, sin embargo, dada la cercanía y la similitud con los depósitos de suelos, se puede considerar la razón espectral "Ñuñoa 5" de Tipo 1 que registra una frecuencia igual a 0.6 Hz con amplitudes máxima igual a 2.
- En Macul ubicado desde los 27 a 30 Km del perfil, los daños se presentaron sobre suelos finos, arenas y gravas, el basamento rocoso se encuentra entre 350 a 500 m de profundidad y el nivel freático se ubica desde los 90 a 110 m de profundidad, en el sector se presenta la razón espectral "Ñuñoa" de Tipo 1 con una frecuencia igual a 0.6 Hz y amplitudes cercanas a 2.
- Por su parte, en Peñalolén ubicado desde los 30 a 33 Km del perfil, los daños se presentaron sobre arenas y gravas, el basamento rocoso se encuentra entre 350 a 500 m de profundidad y el nivel freático se ubica desde los 90 a 110 m de profundidad, en el sector se presenta la razón espectral "Peñalolén 8" de Tipo 4.

**<u>Perfil EW</u>**: Con respecto a lo presentado en el perfil EW (Figura 6.38), se desprenden las siguientes características:

- Se distinguen dos sectores en donde se ubicaron los daños; entre los cerros Renca y San Cristóbal, y al este del cerro San Cristóbal.
- En el sector ubicado entre los cerros Renca y San Cristóbal (km 19 a 27 aproximadamente), el basamento rocoso se encuentra a profundidades entre 50 a 200m, la napa freática se encuentra entre los 50 a 80 m de profundidad y los suelos clasifican como finos. En el sector hay tres razones espectrales (Conchalí 1, Conchalí 6 y Huechuraba 4), con razones espectrales Tipo 1 y Tipo 2 y frecuencias fundamentales entre 0.52 y 1.00 Hz. Las amplitudes de las razones espectrales son aproximadamente 4 para Conchalí 1 y Conchalí 6 y aproximadamente 8 para Huechuraba 4.
- Los daños ubicados al este del cerro San Cristóbal (km 34 a 35) se emplazan sobre suelos gruesos, en donde la profundidad del basamento rocoso varía entre los 50 a 100 m, el nivel freático se encuentra entre los 20 a 50m de profundidad y existe un una razón espectral Tipo 4.

<u>Perfil NS</u>: De acuerdo a lo presentado en el perfil NS (Figura 6.39) se puede nombrar lo siguiente:

- Los daños en estructuras de categoría A y B se dividen en dos sectores: al norte y al sur del cerro Renca.
- Los daños ubicados al norte del cerro Renca entre el km 15 a 16, se emplazan sobre suelos finos, en donde el basamento rocoso se encuentra a profundidades de 100 a 200m, la napa freática se encuentra desde los 10 a 30 m de profundidad, asimismo la razón espectral más cercana a los daños corresponde a la razón espectral "Quilicura 2" de Tipo 2 con una frecuencia fundamental igual a 0.64Hz y con una amplitud de aproximadamente 5.
- El sector sur del cerro Renca entre el km 19 a 39, los daños se emplazan sobre arenas con finos, gravas y bolones, el basamento rocoso alcanza profundidades de 150 a 450 m, la napa freática se encuentra desde los 20 a 200 m de profundidad, y las razones espectrales en el sector varían entre los Tipos 1, 2 y 4 con frecuencias fundamentales desde los 0.52 a 0.98 Hz. Se advierte que la zona donde se encuentran lentes de suelos finos la razón espectral varía aproximadamente entre 3 y 5, y en las zonas donde sólo existen suelos gruesos la razón espectral es menor o igual a 2.

En consecuencia, de acuerdo a lo observado en los tres perfiles se concluye que los daños ubicados sobre suelos finos y ceniza volcánica presentan razones espectrales tipo 1 y 2 con frecuencias menores a 2 Hz y amplitudes mayores a 2. Por el contrario, los daños ubicados sobre suelos gruesos presentan razones espectrales Tipo 4, es decir, no existe frecuencia fundamental y las amplitudes son iguales a 1.

## **CAPITULO 7.- RESUMEN DE RESULTADOS**

### 7.1.- Comunas con mayores daños

Considerando las comunas con mayor porcentaje de daños en estructuras de Categoría A se destaca lo siguiente.

 <u>Quinta Normal:</u> Corresponde a la comuna con mayor porcentaje de viviendas dañadas (entre un 5 a 6%). Adicionalmente, presentó 17 estructuras de categoría B con daño estructural (15 de Grado 1 y 2 de Grado 2).

La comuna se emplaza sobre las unidades geológicas VI y VII, correspondientes a suelos finos y cenizas volcánicas. Lo anterior concuerda con lo expuesto por Sepúlveda *et al.* (2012), en donde se afirma que los suelos blandos de granulometría fina presentan un pobre comportamiento sísmico, y que los suelos volcánicos presentan una respuesta sísmica mala a regular. Con respecto al basamento rocoso, la comuna presenta profundidades desde los 250 a 400m.

La baja rigidez de los depósitos junto con la alta profundidad del basamento rocoso, concuerda con los bajos valores de frecuencia fundamental encontrados (< 2 Hz), asimismo se observan amplitudes en general mayores a 2.

<u>Pedro Aguirre Cerda</u>: Corresponde a la segunda comuna con mayor porcentaje de viviendas dañadas (entre un 4 a 5%), además presenta la mayor cantidad de daños en estructuras de categoría B, 86 estructuras con daño reparable (83 de Grado 1 y 3 de Grado 2).

Los daños en la comuna se ubican sobre el final de la lengüeta de la unidad Illa característica en su parte distal por depósitos de suelos finos superficiales. La profundidad del basamento rocoso es aproximadamente 150 m.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Pastén (2007), los daños se presentan próximos a frecuencias fundamentales entre los 0.5 a 2 Hz y amplitudes mayores a 2.

<u>Cerro Navia</u>: Representa la tercera comuna con mayor porcentaje de daños en viviendas (entre un 3 a 4%). Presenta 16 estructuras de categoría B, 13 de ellas con daños mayores (12 de Grado 2 y 1 de Grado 3).

La comuna se ubica, al igual que Quinta Normal, sobre las unidades geológicas VI, VII y VIII y presenta profundidades del basamento rocoso desde los 250 a 500 m. Las frecuencias fundamentales en el sector son menores a los 2 Hz y las amplitudes son mayores a 2. El análisis de esta comuna corresponde al mismo descrito para la comuna de Quinta Normal.

Respecto a las comunas con mayor cantidad de estructuras de categoría B dañadas, se desprende lo siguiente:

 <u>Providencia</u>: Corresponde a la segunda comuna con mayor cantidad de daños en estructuras de categoría B (la primera comuna corresponde a Pedro Aguirre Cerda), con un total de 57 estructuras dañadas (2 de Grado 2 y 2 de Grado 3) y sólo un 0.1% de las viviendas con daño estructural. Esta comuna se ubica sobre las unidades geológicas II y VIII, y presenta profundidades del basamento rocoso desde los 50 a los 350 m. Predominan en la comuna frecuencias fundamentales altas que van desde los 2 hasta los 10 Hz y amplitudes menores a 2.

Las zonas de altas frecuencias concuerdan con los sectores de mayor rigidez y con los valores de la profundidad del basamento rocoso. Asimismo es coherente con el hecho de que existe una gran cantidad de razones espectrales Tipo 4, que se traducen en la inexistencia de un claro contraste de impedancias entre los depósitos de suelos y la roca. Por su parte, el sector de bajas frecuencias ubicado en la zona suroeste de la comuna, podría indicar una zona de suelos menos rígidos.

<u>Nuñoa:</u> Representa la tercera comuna con mayor cantidad de daños en estructuras de categoría B, con un total de 43 (28 de Grado 1 y 15 de Grado 2), los cuales se centraron principalmente en blocks habitacionales de 4 pisos ubicados en las villas Frei, Olímpica y Salvador Cruz Gana. Por otro lado, la comuna presentó sólo un 0.1% de las viviendas dañadas.

Se emplaza sobre la unidad geológica II, correspondiente a gravas fluviales y el basamento rocoso se encuentra desde los 150 a 500 m de profundidad. Respecto a la frecuencia fundamental, la comuna presenta frecuencias variables menores a 10Hz. Esta variabilidad concuerda con la variación de la profundidad del basamento rocoso. Por su parte, las amplitudes registradas en la comuna son menores a 2.

 <u>Huechuraba</u>: Esta comuna no presentó un importante porcentaje de viviendas dañadas (0.5%), ni tampoco una gran cantidad de estructuras de categoría B dañadas. Sin embargo, fue la comuna con más estructuras con daños mayores (15 de Grado 2 y 2 de Grado 3).

La comuna se emplaza mayoritariamente sobre la unidad VII (suelos finos). Respecto al basamento rocoso, este se encuentra a profundidades desde 50 a 150m. Las frecuencias fundamentales varían desde 0.5 a 5 Hz. La zona de baja frecuencia concuerda con el sector en donde se emplazan los suelos finos y las mayores profundidades del basamento rocoso, y a su vez, la zona de frecuencias más altas se encuentra sobre los suelos más rígidos y roca basal menos profunda. Las amplitudes de las razones espectrales son mayores a 3.

Cabe mencionar que lamentablemente por motivos administrativos esta comuna no cuenta con toda la información de las viviendas dañadas, por lo tanto, no se sabe a ciencia cierta si los daños en las estructuras de categoría B se replicaron en los daños en las viviendas. Sin embargo, dada la baja competencia sísmica de los depósitos de suelos, los daños presentados tendrían relación con las características del sitio.

<u>Maipú</u>: A pesar de que esta comuna no presentó una gran cantidad de estructuras de categoría A y B dañadas, junto con la comuna de San Joaquín fueron las que presentaron la mayor cantidad de daños irreparables (4 estructuras de Grado 3), correspondientes a 3 estructuras de clase "Edificio" y 1 estructura de clase "Otros". Además solo presentó un 0.1% de las viviendas con daño estructural.

La comuna se emplaza sobre las unidades geológicas II, VI, VII y VII. Sin embargo, los daños en ambas categorías (A y B) se ubicaron sobre las unidades II y VI. El basamento

rocoso se encuentra principalmente entre los 100 a 350 m de profundidad y la frecuencia fundamental donde se ubican los daños es menor a 1.0 Hz. Los bajos valores de frecuencia concuerdan con la baja rigidez de la unidad VI (ceniza volcánica) y con la profundidad del basamento rocoso. Sin embargo, para el caso de la unidad II la frecuencia fundamental no se relaciona con la alta rigidez de los suelos.

Esta discrepancia fue analizada por Leyton *et al.* (2010), en donde se observó que en la comuna de Maipú, ubicada al suroeste del depósito de ceniza (VI), se encontraron intensidades de VIII sobre depósitos de grava (II). De acuerdo a esto se postuló que la alta intensidad se debe a que existirían intercalaciones de cenizas volcánicas en profundidad.

Por su parte, los daños se presentaron próximos a razones espectrales mayores a 2.

<u>San Joaquín</u>: La comuna presentó un 0.9% de las viviendas dañadas y sólo 8 estructuras de categoría B dañadas, entre las cuales 4 presentaron daño estructural irreparable (Grado 3), correspondientes a 3 estructuras de clase "Edificio" y 1 estructura de clase "Otros".

Se emplaza sobre las unidades geológicas II y IIIa, la roca basal se encuentra entre los 150 a 250 m de profundidad y las frecuencias fundamentales varían desde los 1 a 10 Hz con amplitudes mayores a 2. Cabe mencionar que de acuerdo a la Figura 6.26 se postula que la unidad de depósitos aluviales (IIIa) abarcaría toda la zona sur donde se presentaron estos daños. En consecuencia, los daños se emplazarían sobre los depósitos de suelos finos de la unidad IIIa

Cabe mencionar que de acuerdo a la información entregada por los perfiles de suelos y las calicatas efectuadas en los blocks de la Villa El Pinar, las estructuras con daño grado 3 se emplazan sobre estratos superficiales de suelos finos (arcillas), con frecuencias menores a 2 Hz y amplitudes mayores a 2.

#### 7.2.- Comunas con menores daños

Por otro lado, analizando las comunas con menor cantidad de daños en estructuras de categoría A y B, se desprende lo siguiente:

 <u>La Pintana</u>: De acuerdo a los registros manejados por la municipalidad, no existieron viviendas con daño estructural y sólo se registraron 2 estructuras de categoría B dañadas, ambas de Grado 1 correspondientes a la clase de estructuras "Otros".

La comuna se ubica sobre la unidad geológica II y el basamento rocoso se encuentra entre los 150 a 350 m de profundidad, no obstante, en el sector donde se ubicaron los daños, la roca basal se encuentra entre los 200 a 300 m de profundidad. La frecuencia fundamental varía entre los 5 a 10 Hz, valores que concuerdan con la alta rigidez del suelo y con la baja profundidad del basamento rocoso. Asimismo, las altas frecuencias fundamentales concuerdan con el hecho de que en la zona se encontró una gran cantidad de razones espectrales Tipo 4.

Por su parte, se registran amplitudes de razones espectrales menores a 3, lo cual es alto considerando la rigidez de los depósitos de suelos. Esto indicaría que el método de Nakamura no entregó un resultado confiable en términos de amplitud considerando la competencia del suelo.

 <u>Vitacura</u>: Al igual que la comuna de La Pintana, Vitacura no registró daños estructurales en viviendas, y sólo registró 9 estructuras de categoría B dañadas, todas de Grado 1.

La comuna se sitúa sobre las unidades geológicas II, IIIa, IV y VIII, aunque los daños se emplazaron principalmente sobre la unidad II y sólo una estructura sobre la unidad VIII. La roca basal aflora en superficie en el cerro San Cristóbal y profundiza hasta los 200 m. Por otro lado, la frecuencia fundamental varía entre los 0.5 a 10 Hz.

Al analizar la frecuencia fundamental con la profundidad de la roca basal, se observa una discrepancia, puesto que la zona con menor profundidad del basamento presenta las menores frecuencias fundamentales. Esto podría deberse a que en el sector de bajas frecuencias existe una acumulación de sedimentos menos rígidos, considerando además que la unidad VIII presenta una granulometría variable desde gravas a limos.

Con respecto a las amplitudes de las razones espectrales están varían entre 1 a 5, donde las mayores amplitudes se ubican en la unidad VIII. Esta incongruencia puede deberse a que el método de Nakamura no entrega resultados confiables en sectores caracterizados por suelos rígidos.

 <u>La Granja</u>: Esta comuna presentó un 0.1% de sus viviendas dañadas y sólo 1 estructura de categoría B con daño estructural (Grado 1).

La comuna se emplaza sobre la unidad geológica II y el basamento rocoso se encuentra aproximadamente a 150 m de profundidad. Con respecto a la frecuencia fundamental, esta varía desde los 0.5 a 10 Hz, no obstante, los daños se presentaron principalmente sobre frecuencias menores a los 2 Hz. La alta rigidez de los depósitos, seguido por un basamento rocoso no tan profundo, no concuerda con la baja frecuencia encontrada en el sector. Esta particularidad fue transmitida por Pastén (2010), donde menciona que existe una zona al sur de la cuenca en donde no existe una correlación entre la profundidad del basamento y la frecuencia fundamental. Por lo tanto, se infiere que posiblemente no existe un claro contraste de impedancia entre los espesores, con lo cual el método de Nakamura no sería sensible a las variaciones de los espesores de los sedimentos.

## CAPITULO 8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1.- Conclusiones

El terremoto del 27 de Febrero del 2010 afectó la zona Centro-Sur del país, dejando más de 2 millones de damnificados. En la Provincia de Santiago los daños se registraron en distintos tipos de estructuras, desde viviendas a edificios de gran altura. A raíz de ello, para el presente estudio se realizó un catastro de los daños en estructuras basado en los reportes obtenidos de las 32 municipalidades de la Provincia de Santiago. Esta información permitió obtener una visión general de la ubicación de los daños, para distintos tipos de estructuras, la que pudo ser contrarrestada con las características geológicas y geotécnicas de la zona de estudio. En consecuencia, se pudo identificar los principales factores que influyeron en los daños producidos en el 27F.

En ese contexto, el registro de daños fue dividido en dos categorías dependiendo básicamente del tipo de edificación: se estableció la **Categoría A** para las viviendas de uno o dos pisos con daño estructural y la **Categoría B** para todas las estructura con daño estructural que no clasifiquen como categoría A, es decir, edificios, blocks habitacionales, hospitales, establecimientos educacionales, edificios patrimoniales, galpones, etc. Se contabilizaron un total de 10705 viviendas en Categoría A y 560 estructuras de dimensión mayor en Categoría B.

Adicionalmente, se subdividieron las estructuras de Categoría B de acuerdo al nivel de daño presentado, estableciéndose 3 grados de daños: *Grado 1* estructuras habitables o usables, *Grado 2* estructuras habitables, o usables, sólo después de reparaciones y refuerzo estructural y *Grado 3* las obras que son consideradas no habitables, o no usables, es decir, irreparables. De acuerdo al catastro de daños se contabilizaron 17 estructuras con daños Grado 3 en la Provincia de Santiago, mayoritariamente ubicadas en la zona sur de la cuenca. Es importante señalar que al término de este estudio, algunas de estas estructuras han presentado propuestas de reforzamiento estructural, con lo cual se ha levantado su decreto de demolición por parte de las respectivas Municipalidades.

Por otra parte, de acuerdo a la información disponible, las comunas con mayor porcentaje de viviendas con daño estructural fueron Quinta Normal, con un 5 a 6%, seguido por Pedro Aguirre Cerda, con un 4 a 5% y Cerro Navia, con 3 a 4%. Estas tres comunas también presentaron una importante cantidad de daños en estructuras de categoría B.

Respecto a las estructuras de categoría B, las comunas con mayor daño fueron Pedro Aguirre Cerda, con 86 estructuras, seguida por Providencia, con 57 estructuras y Ñuñoa con 43 estructuras. No obstante, referido al total de edificaciones, en Providencia y Ñuñoa sólo un 0.1% de las viviendas sufrieron daños estructurales. Por el contrario, las comunas que registraron los menores daños, tanto en categoría A y B, fueron La Pintana, Vitacura y La Granja.

Es importante destacar que el registro de daños no cuenta con información del material de construcción de las viviendas, por lo tanto no es posible atribuir los daños a algún tipo de material. No obstante, analizando los sectores con mayores daños se desprende que éstos se ubicaron en la zona noroeste de la Región Metropolitana, correspondiente al casco antiguo de la ciudad, lo que también se vio reflejado en el terremoto de 1985. Esto podría ser un factor que incidió en el aumento de viviendas dañadas. Sin embargo, después del terremoto de 1985 muchas de las viviendas de adobe colapsaron y las que no, fueron mejoradas estructuralmente por los dueños, por lo tanto, es posible esperar una mejora en su respuesta sísmica. En consecuencia, en el caso de las comunas con mayor densidad de viviendas dañadas no se puede atribuir como único factor preponderante la materialidad y calidad de las obras.

Por su parte, al comparar el registro de daños con el marco geológico de la cuenca de Santiago se observa que, los mayores daños se ubicaron sobre depósitos de suelos finos (unidad VII) y ceniza volcánica (unidad VI). Adicionalmente, en el mapa geológico de la cuenca se identificó una lengüeta de depósitos aluviales denominada IIIa, la que se caracteriza en su tramo final, de acuerdo a la información de prospecciones, por depósitos de suelos finos superficiales. Alrededor de la lengüeta en cuestión se concentró una importante cantidad de daños en viviendas, particularmente en la comuna de Pedro Aguirre Cerda y daños de grado de irreparables (Categoría B, Grado 3).

El procesamiento de la información permite proponer que la unidad Illa abarcaría una extensión mayor hacia el sur de la cuenca.

En el marco anterior, se concluye que los depósitos de suelos finos y ceniza volcánica generaron una amplificación sísmica, con una mayor demanda a las estructuras y por consiguiente, provocaron un mayor daño.

Adicionalmente, se investigaron otras características geológicas y geotécnicas de la cuenca de Santiago, las cuales fueron: profundidad del nivel freático, topografía superficial, distribución de frecuencias preponderantes, profundidad del basamento rocoso y antiguos cursos de agua. Los resultados mostraron que ninguna de ellas por si sola se correlaciona directamente con el registro de daños en la zona de estudio. No obstante, se observó una mayor concentración de daños en una subcuenca de 450 a 500 m de profundidad ubicada en la comuna de Pudahuel. Adicionalmente, algún grado de correlación se observa entre la concentración de daños y algunos cauces de aguas superficiales como el Zanjón de La Aguada y el Canal San Joaquín. No obstante, esto podría deberse a los depósitos de suelos ubicados en este sector (extensión de la lengüeta Illa).

En conclusión el factor geológico-geotécnico que tuvo la mayor incidencia en los daños provocados por el 27F fueron los suelos finos y ceniza volcánica, los cuales incrementaron las demandas sísmicas a edificaciones que estructuralmente no contaban con la capacidad de soportar dichas solicitaciones. En consecuencia, la amplificación sísmica sumada a la pobre calidad de algunas construcciones produjeron los importantes daños observados tanto en viviendas como edificios.

## 8.2.- Recomendaciones

Considerando los variados formatos de catastro de daños de las municipalidades, es recomendable para futuros eventos sísmicos un único formato de registro, el cual incluya por lo menos la materialidad de las viviendas y la distinción entre daños del tipo estructurales y de terminaciones, en cada uno de los elementos estructurales considerados en este informe.

Asimismo, es necesaria la implementación de una mayor cantidad de estaciones sismológicas en la cuenca de Santiago, de manera de reconocer su comportamiento de manera local de acuerdo al tipo de suelos y/o singularidades topográficas frente a un evento sísmico.

Por otra parte, la ubicación e implicancia sísmica de la falla Infiernillo-Cerro Renca-Portezuelo de Chada, son elementos que se recomienda fuertemente sean investigados.

# CAPITULO 9.- BIBLIOGRAFÍA

Ampuero, A y Van Sint Jan, M. 2004. Velocidades de onda medidas en Santiago con el ensayo de refracción sísmica. V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Santiago, Chile.

Araneda, M., Avendaño, M. y Merlo, C. 2000. Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago, etapa III final. IX Congreso Geológico de Chile, Puerto Varas, Chile, 2, 404-408.

Áridos Maipú S.A. 2000. Modificación de la Etapa de Abandono del Proyecto de Recuperación y Mejoramiento de suelos mediante la Actividad de Extracción y Procesamiento de Áridos. Declaración de Impacto Ambiental. Camino Rinconada de Maipú.

Astroza, M., Ruiz, S., Astroza, R. y Molina, J. 2012. Mw = 8.8 Terremoto en Chile, 27 de Febrero 2010. Capítulo 5 "Intensidades sísmicas".

Barrientos, S. 2007. Earthquakes in Chile. The Geology of Chile. Chapter 10. The Geology Society, London.

Barrientos, S. 2010. Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010. Informe Técnico, Servicio Sismológico, Universidad de Chile.

BNA. Banco Nacional de Aguas. Solicitud Información Niveles estáticos en pozos. Dirección General de Aguas (DGA). Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH).

Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L.F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J. Volant, P., y Verdugo, R. 2008. Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. Geophysical Journal International.

Boroschek, R., Yáñez, F., Bejarano, I., Molnar, S. y Torres A. 2012. Resumen caracterización geotécnica estaciones de acelerógrafos de la Universidad de Chile. Universidad de Chile.

Brantt, C.2011. Microzonificación sísmica del sector sur poniente de Santiago, comunas Buin y Paine. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.

Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. 1993. European Macroseismic Scale 1992 (up-dated MSK-Scale). Volumen 7, Editor G. Grunthal, Luxemburg.

Comte, D., Eisenberg, A., Lorca, E., Pardo, M., Ponce, L., Saragoni, R., Singh, S.K. y Suárez, G. 1986. The 1985 Central Chile Earthquake: A Repeat of Previous Great Earthquakes in the Region?. Science, New Series. Vol. 233. No. 4762, pp. 449 – 453.

CONAMA. Comisión Nacional del Medio Ambiente. 1999. Análisis de la contaminación de las aguas subterráneas en la Región Metropolitana, por aguas servidas. A.C. Ing. Consultores. 187p.

DGA. Dirección General de Aguas. 2007. Bases para la formulación de un plan director para la gestión de los Recursos Hídricos cuenca del rio Maipo. Departamento de Estudios y Planificación. Conif BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda.

Fernández, J.C. 2001. Estudio geológico-ambiental para la planificación territorial del sector Tiltil - Santiago. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.

Fernández, J.C. 2003. Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental N°1.

Fock, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34° S. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias mención Geología y Memoria de Titulo. Departamento de Geología. Universidad de Chile. GEOFUN, 2005. Informe de socalzado Edifico Manuel Sánchez. Macul. Santiago. Chile.

GEOFUN, 2013. Informe de Mecánica de Suelos. Edificio de 22 pisos y 1 subterráneo en calle Décima Avenida N°1178 AL N°1180 comuna de San Miguel. Región Metropolitana.

Godoy, C. 2013. Estudio de la respuesta de sitio en Santiago mediante el Método Lineal Equivalente. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

González, G. 1998. Simulación de un escenario sísmico en función de la intensidad y del tipo de construcción. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

INE Y CELADE. División de Población de la CEPAL e Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE). "CHILE Censo de Población y Vivienda 2002" [en línea], http://espino.ine.cl/cgibin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL2KCO M&MAIN=WebServerMain.inl

INE. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile. Resultados Precenso 2011. Viviendas particulares por región y comuna [en línea]. http://www.ine.cl/filenews/files/2011/diciembre/pdf/cifras-precenso.pdf

INE. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile. 2014. Población País y Regiones. Actualización 2002 – 2012 – Proyección 2013 – 2020. www.ine.cl

Kárnik, V., Schenková, Z. y Schenk, V. 1984. Vulnerability and the MSK Scale. Engineering Geology. Vol: 20, N°:1/2, pp. 161-168.

Karzulovic, J. 1958. Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la cuenca de Santiago. Universidad de Chile, Instituto de Geología.

Lagos, J. 2003. Ignimbrita Pudahuel: caracterización geológico-geotécnica orientada a su respuesta sísmica. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.

Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Rebolledo, S., González, L., Ruiz, R., Foncea, C., Herrera, M. y Lavado, J. 2010. Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago. 10mo Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica.

Leyton, F., Ruiz, S. y Sepúlveda, S. 2010. Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile Central. Andean Geology formerly Revista Geológica de Chile.

Madariaga, R 1998. Sismicidad de Chile. Física de la Tierra, 10, 221-258.

Medvedev, S., Sponheur, W. y Karnik, V. 1964. Neu Seismische Skala. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Heft 77. Akademie Verlag.

Menéndez, P. 1991. Atenuación de las intensidades del sismo del 3 de Marzo de 1985 en función de la distancia a la zona de ruptura y del tipo de suelo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

Milovic, J.J. 2000. Estudio geológico-ambiental para el ordenamiento territorial de la mitad sur de la cuenca de Santiago. Memoria de Título. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra, 199 p.

Molina J. 2011. Intensidades Sísmicas del terremoto del 27 de Febrero del 2010 en las 34 comunas del Gran Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

Monge, J. y Astroza, M. 1989. Metodología para determinar el grado de intensidad a partir de los daños. V Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Vol. 1, pp. 483-49.

MOP. Ministerio de Obras Públicas. 2001. Plan Maestro de evacuación y drenaje de Aguas Lluvias del gran Santiago. Dirección de Obras Hidráulicas.

Muñoz-Sáez, C., Pinto, L., Charrier, R. y Nalpas, T. 2014. Influencia de la carga de los depósitos en la generación de fallas de atajo durante la inversión de una cuenca extensional: El caso de la cuenca de Abanico (Eoceno-Oligoceno), Andes de Chile central (33°-35°S). Andean geology. AndGeo vol.41 no.1 Santiago.

Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute, 30, 25-33.

Nichols, G. (2009). Sedimentology and Stratigraphy. Second Edition. Wiley - Blackwel, Oxford.

ONEMI. Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior. 2009. Sismo destructivo del 3 de Marzo 1985. Unidad Riesgos de Origen Natural. División de Protección Civil. Gobierno de Chile.

Pasten, C., 2007. Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Petrus, 2010. Informe de mecánica de suelos para el proyecto Beauchef Poniente. Providencia. Santiago. Chile.

Polanski, J. 1962. Estratigrafía, neotectónica y geomorfología del Pleistoceno pedemontano entre los ríos Diamante y Mendoza. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 27(3-4): 127–149, 1962.

Rauld, R. 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano Santiago Oriente, entre el río Mapocho y quebrada de Macul. Memoria de Titulo. Universidad de Chile. Departamento de Geología.

Rauld, R. 2011. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S). Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Mención Geología. Universidad de Chile. Departamento de Geología.
Sáez, E. 2012. Mediciones de velocidad de onda de corte y períodos fundamentales sin publicar.

Saragoni, G. 1986. Introducción. En El sismo del 3 de marzo 1985 – Chile. Acero Comercial S.A. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Saragoni, G., González, P. y Fresard, M. 1986. Análisis de los acelerogramas del terremoto del 3 de marzo, 1985. En El sismo del 3 de marzo de 1985 – Chile. Acero Comercial S.A. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Saragoni, R. y Ruiz, S. 2012. Mw = 8.8 Terremoto en Chile, 27 de Febrero 2010. Capítulo 6 "Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto del 2010".

Sellés, D., 1999. La Formación Abanico en el Cuadrángulo Santiago (33° 15'-33° 30'S; 70°30'-70°45'O), Chile Central. Estratigrafía y geoquímica. Tesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

Sellés, D. y Gana, P. 2001. Geología del área de Talagante-San Francisco de Mostazal, regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geológica Básica, N°74, 30 p.

Sepúlveda, S., Rebolledo, S., Farias, M., Vargas, G. y Arriagada, C. 2012. Mw = 8.8 Terremoto en Chile, 27 de Febrero 2010. Capítulo 3 "Efectos geológicos".

Troncoso, C. 2012. Estudio estratigráfico y de volcanología física de la Ignimbrita de Pudahuel. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile. Departamento de Geología.

Valenzuela, G. 1978. Suelo de Fundación de Santiago. Instituto de Investigaciones Geológicas. Boletín N°33, 21 p.

Varela, J. 1993. Mapa Geológico - geomorfológico de los rellenos cuaternarios de la cuenca de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería - Universidad de Chile.

Wall, R. Sellés, D. y Gana, P. 1999. Área Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos N°11.

## ANEXO A.- ESCALAS DE INTENSIDAD SÍSMICA

#### A.1.- Escala MSK-64

La escala de intensidad sísmica MSK-64 clasifica las construcciones en tres clases, de acuerdo a su material de construcción, con el fin de dividir las estructuras respecto a su vulnerabilidad frente a un sismo. En la Tabla A.1 se presentan las clases de vulnerabilidad de acuerdo a una adaptación realizada a construcciones chilenas (Monge y Astroza ,1989).

			,,	
Tipo do ostructu		Clases o	le Vulner	abilidad
ripo de estructu	la	Α	В	С
Mampostería de	piedra unida con barro	0		
Adobe		0	—1	
Albañilería Simpl	e		0	
Mampostería de	piedra unida con mortero de cemento	-·-·-·	0	
Albañilería reforz	ada con pilares y cadenas de hormigón armado			0
0	Clase de vulnerabilidad más probable			
	Rango probable			
	Rango de casos menos probables, excepcionales			

|--|

Además de esta distinción, la escala realiza una diferenciación de los tipos de daños generados por el terremoto, que pueden ser desde fisuras en estucos hasta el colapso total de la estructura. En la Tabla A.2 se presenta la definición de los grados de daños, de acuerdo a una adaptación realizada tras los daños observados por el terremoto del 3 de Marzo de 1985.

Grado Daño	Nivel	Adaptaciones
0	Sin daño	
1	Daños menores	<ul><li>Daños menores en estucos.</li><li>Caída de panderetas.</li></ul>
2	Daños moderados	<ul> <li>Grietas horizontales en antetechos, tímpanos y chimeneas.</li> <li>Grietas verticales en encuentro de muro, sin separación.</li> <li>Grietas finas en muros bajo en nivel de cielo.</li> </ul>
3	Daños graves	<ul> <li>Caída de antetechos, tímpanos o parte de chimeneas.</li> <li>Grietas verticales en encuentro de muros con separación, desaplomo.</li> <li>Grietas diagonales en muros bajo el nivel de cielo.</li> </ul>
4	Destrucción parcial o daño severo	<ul> <li>Caída de un muro o parte de un muro bajo el nivel de cielo.</li> </ul>
5	Daño total o colapso	- Caída de más de un muro.

Tabla A.2 Grados de daños en estructuras (extraído de Molina 2011).

A su vez, se realiza una distribución estadística de los daños en estructuras con igual clase de vulnerabilidad. Kárnik *et al.* (1984) proponen valores porcentuales en la distribución de daños

para representar los conceptos de "pocos", "muchos" y "la mayoría". En la Tabla A.3 se presentan los porcentajes que definen los términos de cantidad mencionados.

Término de cantidad	Valores Porcentuales (%)
Pocos	5
Muchos	50
La Mayoría	75

Tabla A.3 Términos de cantidad según escala MSK-64 (extraído Molina 2011)

En la Tabla A.4 se presenta la distribución de daño para los distintos tipos de construcción, de acuerdo a la distribución estadística de los daños.

Tabla A.4 Distribución de daños, según escala MSK-64 (extraído Molina 2011)

Grado de		Tipo A		Tipo B	Tipo C		
intensidad	%	Grado de daño	%	Grado de daño	%	Grado de daño	
v	5	1					
v	95	0					
	5	2	5	1			
VI	50	1	95	0			
	45	0					
	5	4	5	3	5	2	
VII	50	3	50	2	(50)	1	
vii (	(35)	2	(35)	1	(45)	0	
	(10)	1	(10)	0			
	5	5	5	4	5	3	
VIII	50	4	50	3	50	2	
VIII	(35)	3	(35)	2	(35)	1	
	(10)	2	(10)	1	(35) 1 (10) 0		
	50	5	5	5	5	4	
IX	(35)	4	50	4	50	3	
1	(15)	3	(35)	3	(35)	2	
			(10)	2	(10)	1	
	75	5	50	5	5	5	
~	(25)	4	(35)	4	50	4	
^			(15)	3	(35)	3	
					(10)	2	
¥I.	100	5	75	5	50	5	
			(25)	4	50	4	
XII	100	5	100	5	100	5	

Finalmente en la Tabla A.5 se presenta la descripción de los grados de intensidad de la escala MSK-64.

Grado Intensidad Sísmica	Observaciones
I	<ul> <li>La sacudida no es percibida por los sentidos humanos, siendo detectada y registrada solamente por los sismógrafos.</li> </ul>
II	- La sacudida es perceptible solamente por algunas personas en reposo, en particular en los pisos superiores de los edificios.
111	<ul> <li>La sacudida es percibida por algunas personas en el interior de los edificios y solo en circunstancias muy favorables en el exterior de los mismos.</li> <li>La vibración percibida es semejante a la causada por el paso de un camión ligero.</li> <li>Observadores muy atentos pueden notar ligeros balanceos de objetos colgados, más acentuados e los pisos altos de los edificios.</li> </ul>
IV	<ul> <li>El sismo es percibido por personas en el interior de los edificios y por algunas en el exterior.</li> <li>Algunas personas se despiertan, pero nadie se atemoriza.</li> <li>La vibración es comparable a la producida por el paso de un camión pesado con carga.</li> <li>Las ventanas, puertas y vajillas vibran.</li> <li>Los pisos y muros producen chasquidos.</li> <li>El mobiliario comienza a moverse.</li> <li>Los líquidos contenidos en recipientes abiertos se agitan ligeramente.</li> </ul>
V	<ul> <li>El sismo es percibido en el interior de los edificios por la mayoría de las personas y por muchas en el exterior.</li> <li>Muchas personas que duermen se despiertan y algunas huyen.</li> <li>Los animales se ponen nerviosos.</li> <li>Las construcciones se agitan con una vibración general.</li> <li>Los objetos colgados se balancean ampliamente.</li> <li>Los cuadros golpean sobre los muros o son lanzados fuera de su emplazamiento.</li> <li>En algunos casos los relojes de péndulo se paran.</li> <li>Los objetos ligeros se desplazan o vuelcan.</li> <li>Las puertas o ventanas abiertas baten con violencia.</li> <li>Se vierten en pequeña cantidad los líquidos contenidos en recipientes abiertos y llenos.</li> <li>La vibración se siente en la construcción como la producida por un objeto pesado arrastrándose.</li> <li>En las construcciones de tipo A son posibles ligeros daños (clase 1).</li> <li>En ciertos casos modifica el caudal de los manantiales</li> </ul>
VI	<ul> <li>Lo siente la mayoría de las personas, tanto dentro como fuera de los edificios.</li> <li>Muchas personas salen a la calle atemorizadas.</li> <li>Algunas personas llegan a perder el equilibrio.</li> <li>Los animales domésticos huyen de los establos.</li> <li>En algunas ocasiones, la vajilla y la cristalería se rompen, los libros caen de sus estantes, los cuadros se mueven y los objetos inestables vuelcan.</li> <li>Los muebles pesados pueden llegar a moverse.</li> <li>Las campanas pequeñas de torres y campanarios pueden sonar.</li> <li>Se producen daños moderados (clase 2) en algunas construcciones del tipo A.</li> <li>Se producen daños ligeros (clase 1) en algunas construcciones de tipo B y en muchas del tipo A.</li> </ul>

Tabla A.5 Grado de intensidad sísmica, según escala MSK-64 (extraído Molina 2011)

	<ul> <li>La mayoría de las personas se aterroriza y corre a la calle.</li> </ul>
	<ul> <li>Muchas tienen dificultad para mantenerse en pie.</li> </ul>
	<ul> <li>Las vibraciones son sentidas por personas que conducen automóviles.</li> </ul>
	- Suenan las campanas grandes.
	- Muchas construcciones del tipo A sufren daños graves (clase 3) y algunas incluso
	destrucción (clase 4)
	- Muchas construcciones del tipo B sufren daños moderados (clase 2)
	- Algunas construcciones del tipo C experimentan daños ligeros (clase 1)
VII	- Algunas construcciones del tipo C experimentari danos ligeros (clase 1).
	- En algunos casos, se producen desizamientos en las caneteras que transcurren sobre
	laderas con pendientes acusadas; se producen danos en las juntas de las
	canalizaciones y aparecen fisuras en muros de piedra.
	- Se aprecia oleaje en las lagunas y el agua se enturbia por remoción del fango.
	- Cambia el nivel de agua de los pozos y el caudal de los manantiales. En algunos
	casos, vuelven a manar manantiales que estaban secos y se secan otros que
	manaban.
	- En ciertos casos se producen derrames en taludes de arena o de grava.
	<ul> <li>Miedo y pánico general, incluso en las personas que conducen automóviles.</li> </ul>
	<ul> <li>En algunos casos se desgajan las ramas de los árboles.</li> </ul>
	<ul> <li>Los muebles, incluso los pesados, se desplazan o vuelcan.</li> </ul>
	<ul> <li>Las lámparas colgadas sufren daños parciales.</li> </ul>
	- Muchas construcciones de tipo A sufren destrucción (clase 4) y algunos colapso (clase
	5).
	- Muchas construcciones de tipo B sufren daños graves (clase 3) y algunas destrucción
	(clase 4).
	- Muchas construcciones de tipo C sufren daños moderados (clase 2) y algunas graves
	(clase 3).
VIII	- En ocasiones, se produce la rotura de algunas juntas de canalizaciones. Las estatuas y
	monumentos se mueven v giran.
	- Se derrumban muros de piedra.
	- Pequeños deslizamientos en las laderas de los barrancos y en las trincheras y
	terraplenes con pendientes pronunciadas
	- Grietas en el suelo de varios centímetros de ancho
	- Se enturbia el aqua de los lagos
	- Aparecen puevos manantiales
	- Vuelven a tener agua nozos secos v se secan nozos existentes
	- En muchos casos cambia el caudal y el nivel de aqua de los manantiales y nozos
	- En muchos casos cambia el caudal y el niver de agua de los manantiales y pozos.
	- Daños considerables en el mobiliario
	Los animalos corren confusamente y emiten sus senidos neguliaros
	- Los animales correir confusamente y enfiren sus sonidos peculiares.
	- Muchas construcciones del tipo A sulten colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo D sufren destrucción (clase 5).
	- Muchas construcciones de tipo B surren destrucción (clase 4) y algunas colapso (clase
	5). Mada e se stransiense del time O a francheñe e server (dans 0) a desta se i francis
IX	- Muchas construcciones del tipo C sutren danos graves (clase 3) y algunas destruccion
	(clase 4).
	- Caen monumentos y columnas.
	- Danos considerables en depositos de líquidos.
	- Se rompen parcialmente las canalizaciones subterráneas.
	- En algunos casos, los carriles del ferrocarril se curvan y las carreteras quedan fuera de
	servicio.
	- Se observa con frecuencia que se producen extrusiones de agua, arena y fango en los

	terrenos saturados.
	- Se abren grietas en el terreno de hasta 10 centímetros de ancho y de más de 10
	centímetros en las laderas y en las márgenes de los ríos.
	- Aparecen además, numerosas grietas pequeñas en el suelo.
	- Desprendimientos de rocas y aludes.
	<ul> <li>Muchos deslizamientos de tierras.</li> </ul>
	<ul> <li>Grandes olas en lagos y embalses.</li> </ul>
	- Se renuevan pozos secos y se secan otros existentes.
	- La mayoría de las construcciones del tipo A sufren colapso (clase 5) y muchas
	construcciones de tipo B sufren colapso (clase 5).
	- Muchas construcciones de tipo C sufren destrucción (clase 4) y algunos colapso (clase
	5).
	- Daños peligrosos en presas: daños serios en puentes.
	<ul> <li>Los carriles de las vías férreas se desvían y a veces se ondulan.</li> </ul>
	<ul> <li>Las canalizaciones subterráneas son retorcidas o rotas.</li> </ul>
	- El pavimento de las calles y el asfalto forman grandes ondulaciones.
x	- Grietas en el suelo de algunos decímetros de ancho que pueden llegar a un metro
	- Se producen anchas grietas paralelamente a los cursos de los ríos
	<ul> <li>Deslizamientos de tierras sueltas en las laderas con fuertes pendientes</li> </ul>
	- En los ribazos de los ríos y en las laderas escarnadas se producen considerables
	deslizamientos
	- Desplazamientos de arenas y fanços en las zonas litorales
	- Cambio del nivel de aqua en los nozos
	<ul> <li>El agua de capales y ríos es lanzada fuera de su cauce normal</li> </ul>
	- El agua de canales y nos es lanzada ruela de su cadce normal.
	- Daños importantes en construcciones incluso en las bien realizadas, en puentes
	presas y líneas de ferrocarril
	- Las carreteras importantes quedan fuera de servicio
	- Las canalizaciones subterráneas quedan destruidas
XI	- El terreno queda considerablemente deformado tanto nor desplazamientos de terrenos
	y caídas de rocas
	- Para determinar la intensidad de las sacudidas sísmicas se precisan investigaciones
	especiales
	- Prácticamente se destruyen o guedan gravemente dañadas todas las estructuras.
	incluso las subterráneas.
	- La topografía cambia
	- Grandes grietas en el terreno con importantes desplazamientos horizontales y
ХII	verticales
	- Caída de rocas y hundimientos en los escarnes de los valles, producidas en vastas
	extensiones
	- Se cierran valles v se transforman en lagos
	- Anarecen cascadas y se desvían los ríos
1	$\sim$ $\Delta \mu a$ revent vascavas y se vestian ius nus.

## A.2.- Escala EMS-98

Al igual que la escala MSK-64, la escala EMS-98 clasifica las estructuras de acuerdo a su clase vulnerabilidad, sin embargo, la escala EMS-98 agrega además 3 clases que incluyen los edificios construidos con diseño sismo resistente (Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 1993). En la Tabla A.6 se presentan las clases de vulnerabilidad y su movilidad con los rangos más y menos probables.

Tipo de estructura			Clases de vulnerabilidad								
про	hpo de estructura		В	С	D	E	F				
	Piedra suelta o canto rodado	0									
	Adobe (ladrillos de tierra)	0	-1								
ería	Piedra simple	+	·-0								
ũ	Piedra maciza		-·-··	·-0	<u> </u>						
Alba	Sin armar, de ladrillos o bloques		-0-	$\square$							
	Sin armar, con pisos de hormigón reforzado		+	·- 0-	<u> </u>						
	Armada o confinada			<u></u>	0	Η					
9	Marcos sin diseño sismorresistente (DSR)	+	- ·	-0-							
mag	Marcos con un nivel moderado de DSR		+	· ·	0	Η					
l ar	Marcos con un alto nivel de DSR			+		o —					
igór	Muros sin DSR		+	-0 —							
E	Muros con un nivel moderado de DSR			+	· - O	-1					
보	Muros con un alto nivel de DSR				·-·-·	- 0	-1				
Acero	Estructuras de acero			ŀ		-0-	_				
Madera	Estructuras de madera		-		-0-	$\square$					
	O Clase de vulnerabilidad más probable										
	Rango probable										
	Rango de casos menos probables, excepcionales										

 Tabla A.6 Clasificación de clases de vulnerabilidad (extraído de Molina 2011).

La escala EMS-98 considera también el grado de daños en las construcciones, pero realiza una distinción entre el tipo de material de la estructura dañada. En la Tabla A.7 y Tabla A.8 se presentan los grados de daños para estructuras de adobe y albañilería, y estructuras de hormigón armado.

Tabla A.7 Grados de daños estructuras adobe y albañilería (extraído de Molina 2011)

Grado 1: Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros)	<ul> <li>Fisuras en muy pocos muros</li> <li>Caída sólo de pequeños trozos de revestimiento</li> <li>Caída de piedras sueltas de las partes altas de los edificios en muy pocos casos.</li> </ul>
Grado 2: Daños moderados (daños estructurales ligeros, daños no- estructurales moderados)	<ul> <li>Grietas en muchos muros</li> <li>Caída de trozos bastante grandes de revestimiento.</li> <li>Colapso parcial de chimeneas.</li> </ul>
Grado 3: Daños de importantes a graves (daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves)	<ul> <li>Grietas grandes y generalizadas en la mayoría de los muros.</li> <li>Se sueltan tejas del tejado.</li> <li>Rotura de chimeneas por la línea del tejado</li> <li>Se dañan elementos individuales no-estructurales (tabiques, hastiales y tejados)</li> </ul>
Grado 4: Daños muy graves (daños estructurales graves, daños no- estructurales muy graves)	<ul> <li>Se dañan seriamente los muros</li> <li>Se dañan parcialmente los tejados y forjados</li> </ul>
Grado 5: Destrucción (daños estructurales muy graves)	- Colapso total o casi total

	<b>č</b> (
Grado 1: Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros)	<ul> <li>Fisuras en el revestimiento de pórticos o en la base de los muros.</li> <li>Fisuras en tabiques y particiones</li> </ul>
Grado 2: Daños moderados (daños estructurales ligeros, daños no- estructurales moderados)	<ul> <li>Grietas en vigas y pilares de pórticos y en muros estructurales.</li> <li>Grietas en tabiques y particiones</li> <li>Caída de enlucidos y revestimientos frágiles.</li> <li>Caída de mortero de las juntas de paneles prefabricados.</li> </ul>
Grado 3: Daños de importantes a graves (daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves)	<ul> <li>Grietas en pilares y en juntas viga/pilar en la base de los pórticos y en las juntas de los muros acoplados.</li> <li>Desprendimiento de revocos de hormigón, pandeo de la armadura de refuerzo.</li> <li>Grandes grietas en tabiques y particiones, se dañan paneles de particiones aislados.</li> </ul>
Grado 4: Daños muy graves (daños estructurales graves, daños no- estructurales muy graves)	<ul> <li>Grandes grietas en elementos estructurales con daños en el hormigón por compresión y rotura de armaduras; fallos en la trabazón de la armadura de las vigas, ladeo de pilares</li> <li>Colapso de algunos pilares o de una planta alta.</li> </ul>
Grado 5: Destrucción (daños estructurales muy graves)	<ul> <li>Colapso de la planta baja o de partes (por ejemplo alas) del edificio.</li> </ul>

#### Tabla A.8 Grados de daños estructuras hormigón armado (extraído de Molina 2011)

A su vez, considerando también la distribución estadística de los daños para estructuras con la misma clase de vulnerabilidad, se obtiene el grado de intensidad sísmica (González, 1998). En la Tabla A.9 se indica el grado de intensidad sísmica de acuerdo a la distribución de daños, el grado de daños y la clase de vulnerabilidad.

	Tipo A		Tipo B		Tipo C		Tipo D		Tipo E		Tipo F	
Grado de intensidad	%	Grado de daño										
v	5	1	5	1								
v	(95)	0	(95)	0								
	5	2	5	2	5	1						
VI	50	1	50	1	(95)	0						
	(45)	0	(45)	0								
	5	4	5	3	5	2	5	1				
MI	50	3	50	2	(50)	1	(95)	0				
VII	(35)	2	(35)	1	(45)	0						
	(10)	1	(10)	0								
	5	5	5	4	5	3	5	2				
VIII	50	4	50	3	50	2	(50)	1				
VIII	(35)	3	(35)	2	(35)	1	(45)	0				
	(10)	2	(10)	1	(10)	0						
	50	5	5	5	5	4	5	3	5	2		
IV.	(35)	4	50	4	50	3	50	2	(50)	1		
IX	(15)	3	(35)	3	(35)	2	(35)	1	(45)	0		
			(10)	2	(10)	1	(10)	0				
	75	5	50	5	5	5	5	4	5	3	5	2
v	(25)	4	(35)	4	50	4	50	3	50	2	(50)	1
^			(15)	3	(35)	3	(35)	2	(35)	1	(45)	0
					(10)	2	(10)	1	(10)	0		
XI	100	5	75	5	50	5	5	5	5	4	5	3
			(25)	4	50	4	50	4	50	3	50	2
							(35)	3	(35)	2	(35)	1
							(10)	2	(10)	1	(10)	0
×II	100	5	100	5	100	5	75	5	75	5	75	5
XII							(25)	4	(25)	4	(25)	4

Tabla A.9 Grado de daño escala EMS-98 (extraído de Molina 2011)

Finalmente en la Tabla A.10 se presentan las descripciones originales de las intensidades según la escala EMS-98

Grado		Efectos
	Personas	- No sentido, ni en las condiciones más favorables.
l No sentido	Efectos Naturaleza	- Ningún efecto
	Edificios	- Ningún daño
	Personas	<ul> <li>El temblor es sentido sólo en casos aislados (&lt; 1%) de individuos en reposo y en posiciones especialmente receptivas dentro de edificios.</li> </ul>
II Apenas sentido	Efectos Naturaleza	- Ningún efecto
	Edificios	- Ningún daño
	Personas	<ul><li>El terremoto es sentido por algunos dentro de edificios.</li><li>Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor</li></ul>
Débil	Efectos en contenidos	- Los objetos colgados oscilan levemente
	Edificios	- Ningún daño
IV Ampliamente	Personas	<ul> <li>El terremoto es sentido dentro de los edificios por muchos y sólo por muy pocos en el exterior</li> <li>Se despiertan algunas personas</li> <li>El nivel de vibración no asusta</li> <li>La vibración es moderada</li> <li>Los observadores sienten un leve temblor o cimbreo del edificio, la habitación o de la cama, la silla, etc.</li> </ul>
observado	Efectos en contenidos	<ul> <li>Golpeteo de vajillas, cristalerías, ventanas y puertas</li> <li>Los objetos colgados oscilan</li> <li>En algunos casos los muebles ligeros tiemblan visiblemente</li> <li>En algunos casos chasquidos de la carpintería</li> </ul>
	Edificios	- Ningún daño
	Personas	<ul> <li>El terremoto es sentido dentro de los edificios por la mayoría y por algunos en el exterior.</li> <li>Algunas personas se asustan y corren al exterior</li> <li>Se despiertan muchas de las personas que duermen</li> <li>Los observadores sienten una fuerte sacudida o bamboleo de todo el edificio, la habitación o el mobiliario.</li> </ul>
V Fuerte	Efectos en contenidos	<ul> <li>Los objetos colgados oscilan considerablemente</li> <li>Las vajillas y cristalerías chocan entre sí</li> <li>Los objetos pequeños, inestables y/o mal apoyados pueden desplazarse o caer.</li> <li>Las puertas y ventanas se abren o cierran de pronto</li> <li>En algunos casos se rompen los cristales de las ventanas</li> <li>Los líquidos oscilan y pueden derramarse de recipientes totalmente llenos.</li> <li>Los animales dentro de edificios se pueden inquietar</li> </ul>
	Edificios	- Daños de grado 1 en algunos edificios de clases de vulnerabilidad A y B.
	Personas	<ul> <li>Sentido por la mayoría dentro de los edificios y por muchos en el exterior</li> <li>Algunas personas pierden el equilibrio</li> <li>Muchos se asustan y corren al exterior</li> </ul>
VI Levemente dañino	Efectos en contenidos	<ul> <li>Pueden caerse pequenos objetos de estabilidad ordinaria y los muebles se pueden desplazar.</li> <li>En algunos casos se pueden romper platos y vasos.</li> <li>Se pueden asustar los animales domésticos (incluso en el exterior)</li> </ul>
	Edificios	<ul> <li>Se presentan daños de grado 1 en muchos edificios de clases de vulnerabilidad A y B; algunos de clases A y B sufren daños de grado 2,</li> </ul>

 Tabla A.10 Grado de intensidad sísmica, según escala MSK-64 (extraído Molina 2011)

		algunos de clase C sufren daño grado 1.
	Personas	<ul> <li>La mayoría de las personas se asusta e intenta correr fuera de los edificios</li> <li>Para muchos es difícil mantenerse de pie, especialmente en plantas superiores.</li> </ul>
VII Dañino	Efectos en contenidos	<ul> <li>Se desplazan los muebles y pueden volcarse los que sean inestables.</li> <li>Caída de gran número de objetos de las estanterías.</li> <li>Salpica el agua de los recipientes, depósitos y estanques.</li> </ul>
	Edificios	<ul> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 3, algunos de grado 4.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 2, algunos de grado 3.</li> <li>Algunos edificios de clase de vulnerabilidad C presentan daños de grado 2.</li> <li>Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 1.</li> </ul>
	Personas	<ul> <li>Para muchas personas es difícil mantenerse de pie, incluso fuera de los edificios.</li> </ul>
VIII	Efectos en naturaleza y en contenidos	<ul> <li>Se pueden volcar los muebles. Caen al suelo objetos como televisores, máquinas de escribir, etc.</li> <li>Ocasionalmente las lápidas se pueden desplazar, girar o volcar.</li> <li>En suelo muy blando se pueden ver ondulaciones.</li> </ul>
Gravemente dañino	Edificios	<ul> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 4, algunos de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 3, algunos de grado 4.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C presentan daños de grado 2, algunos de grado 3.</li> <li>Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 2.</li> </ul>
	Personas	<ul> <li>Pánico general</li> <li>Las personas pueden ser lanzadas bruscamente al suelo</li> </ul>
IX Destructor	Efectos en naturaleza	<ul> <li>Muchos monumentos y columnas se caen o giran</li> <li>En suelo blando se ven ondulaciones.</li> </ul>
	Edificios	<ul> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A presentan daños de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 4, algunos de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 3, algunos de grado 4.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 2, algunos de grado 3.</li> <li>Algunos edificios de clase de vulnerabilidad E presentan daños de grado 2.</li> </ul>
X Muy destructor	Edificios	<ul> <li>La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad A presentan daños de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4, algunos de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 3, algunos de grado 4.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E presentan daños de grado 2, algunos de grado 3.</li> <li>Algunos edificios de clase de vulnerabilidad F presentan daños grado 2.</li> </ul>
XI Devastador	Edificios	<ul> <li>La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad B presentan daños de grado 5.</li> <li>La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4, muchos de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 4,</li> </ul>

		<ul> <li>algunos de grado 5.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 3, algunos de grado 4.</li> <li>Muchos edificios de clase de vulnerabilidad F sufren daños de grado 2, algunos de grado 3.</li> </ul>
XII Completamente devastador	Edificios	<ul> <li>Se destruyen todos los edificios de clases de vulnerabilidad A, B y prácticamente todos los de clase C.</li> <li>Se destruyen la mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad D, E y F. Los efectos del terremoto alcanzan los efectos máximos concebibles.</li> </ul>

# ANEXO B.- NIVELES ESTÁTICOS AGUA SUBTERRÁNEA

En la Tabla B.1 y Tabla B.2 se presentan las profundidades de los niveles estáticos obtenidos de pozos ubicados en la Región Metropolitana correspondientes a la DGA y BNA, respectivamente.

	Altura	Coordenadas		Profundidad
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)
Los Talaveras	692	6345960	341230	27.0
Hacienda Chacabuco	728	6345170	343110	12.5
Los Guayacanes	625	6343360	338590	25.0
As. Chacabuco	645	6341670	340780	40.0
Cera Unión Huechun	599	6388500	337100	39.0
Fdo. Los Tahuretes	668	6344320	340640	18.0
Fdo. Santa Ana	547	6333100	331400	32.2
H. Fam. Cerro Blanco	562	6331580	332770	42.0
Chilectra Polpaico	550	6334440	329770	35.0
Rincón Los Molinos	579	6339165	320340	4.0
Fca. Polpaico	535	6330000	328910	14.6
Reserva Fdo. Polpaico	531	6330950	327240	23.2
Parcela 5 Polpaico	534	6331790	326650	23.7
Escuela 293 Polpaico	526	6330600	323100	18.0
Fundo San Manuel	528	6329970	323060	19.0
Fdo. La Laguna	482	6324650	328500	14.3
As. La Laguna	487	6326200	329600	1.9
Fdo. La Cadellada	491	6324567	333719	0.9
Fdo. Santa Rosa de Lampa	497	6320250	335300	1.8
Entel Batuco	485	6321100	331500	0.3
Fdo. Reina Sur	581	6325322	343312	53.0
Lo Arcaya	541	6321600	342000	25.0
Fdo. Reina Sur	562	6325700	341600	47.0
As. El Taqueral	488	6316110	335700	32.0
Fdo. La Montaña	489	6313550	339370	3.5
Av. Kennedy 6774	703	6304230	354900	45.1
Manizales 1980	692	6305050	353810	57.0
Country Club	658	6300200	355370	95.9
Aeropuerto Pudahuel (2)	477	6304050	335400	6.5
Panamericana Norte 3225	505	6304400	343200	20.0
Lazo De Vega 4859	504	6302100	342090	28.0
Consejo Nacional Menores	478	6298075	334575	27.8
Hijuela El Olivo	469	6295290	335545	18.8
As. Santa Elena	481	6294700	338500	12.8

|--|

	Altura Coorder		nadas	Profundidad
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)
Pajaritos 6340	492	6296100	340250	26.7
Parcela 62 Noviciado	491	6303390	324535	23.0
El Cruceral	641	6275600	350600	91.4
Fdo. San Alberto	448	6286452	332704	22.7
Estadio San Jorge	766	6304640	357500	16.3
As. Santa Emilia	164	6294306	304663	4.0
Fdo. Santa Rita	169	6294279	308357	9.0
A.P. Santa Rosa	466	6284698	334365	46.1
Misión Corazón de María	340	6273250	321855	9.5
Casas de San Luis	366	6274970	323980	11.4
As. Malloco	413	6282310	329365	5.3
Fdo. San Patricio	188	6281985	306905	6.0
A.P. Bollenal	151	6283910	294930	9.0
Matadero Pollos	140	6273000	284050	2.0
Fdo. Cachantun	403	6258685	346745	32.8
La Caperana	396	6264490	330760	38.0
Escuela 22 Viluco	397	6261480	333240	27.1
Colonia Paine	385	6257590	337160	7.4
As. Las Vertientes	362	6256945	332425	2.4
Fdo. Santa Inés	331	6266020	323030	5.0
A.P. Isla de Maipo	337	6263660	324720	3.0
Fdo. Santa Marta	430	6252060	348540	15.3
A.P. Huelquen	431	6254105	348885	11.4
AS. Águila Sur	403	6246630	339930	15.0
Parcela 7 Los Cañones	235	6269460	309040	3.0
As. San Carlos Cholqui	185	6260845	304090	5.0
Industria Bata	174	6271710	297590	2.3
As. Popeta	110	6250680	290770	8.0
As. San Miguel de Popeta	118	6248350	291800	13.0
As. San Miguel de Popeta (2)	116	6249740	291610	11.0
As. Tantehue	138	6248730	295180	16.0
As. Ignacio Serrano	140	6249500	292600	14.0
A.P. La Punta	535	6236945	347830	27.1
Matadero La Cartuja	479	6237910	342970	2.7
A.P. San Francisco de Mostazal	474	6238455	343040	4.3
Aguas Cordillera San Francisco N°6	787	6306823	358616	38.5
Aguas Cordillera Lo Matta N°5	743	6305392	356441	24.6
Aguas Cordillera Vespucio Riesco	654	6302689	352575	38.0
Aguas Cordillera San Rafael N°1	823	6308624	357378	34.5
Aguas Cordillera San Enrique Nº1	870	6307876	362429	10.1

	Altura	Coordenadas		Profundidad
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)
Aguas Cordillera Pedro Canisio	664	6303716	353228	54.0
Aguas Cordillera Parque Hermoso N°3	836	6309817	356610	10.7
Aguas Cordillera Kennedy Tranqueras	681	6305850	352950	55.5
Aguas Cordillera El Gabino	826	6308780	359151	71.3
LD01 A.P. Manquehue Est. Las Hualtatas	877	6311490	356330	37.0
SM9 A.P. Manquehue Av. Agua del Palo 172	682	6306190	352900	53.9
Fundo Lo Prado	223	6293010	316450	10.5
Fundo Lolenco	186	6299388	310625	8.2
Aeropuerto Pudahuel (3)	477	6306695	332333	0.0
Fundo Santa Mónica	272	6315515	302970	6.3
Criadero Curacaví	244	6310402	301837	10.6
Fdo. Curacaví	282	6305260	304419	15.0
Fdo. Alhue	231	6308612	301480	5.4
Hacienda Curacaví	213	6304633	299111	2.5
Hacienda Curacaví (2)	198	6301916	299400	5.6
Calle Lo Águila con Rosas	188	6301614	302243	0.5
Parcela N°17	221	6307258	301255	14.2
Chayaco	205	6300407	300510	19.8
V.T.R	217	6300165	299189	21.7
A.P.R Cerrillos N°1	184	6297900	311498	1.2
Fdo. El Sauce	176	6296370	311572	1.5
A.P.R Miraflores	177	6300260	309270	3.8
Parcela 22 El Ajial	178	6291880	310900	3.2
Fundo Monterrey	216	6301906	297028	14.5
Parcela 76 La Pataguilla	217	6290640	315980	8.0
Central Carena	280	6289140	318120	33.4
Fundo Malalhue	178	6293834	299254	10.0
Hijuela 8 Santa Isabel	158	6291550	304160	1.0
A.P.R. La Palma	183	6295850	287670	3.0
Cabilolen Hijuela 2	209	6297650	285860	3.0
El Guindo	185	6293500	293590	16.5
Parcela 47A Las Mercedes	156	6290810	294750	6.4
Fundo Santa Teresa	215	6282320	313290	3.0
Las Hijuelas N°6	206	6273190	303690	1.5
Hijuela 3-5 Pangalillo	252	6279680	311020	15.0
A.P.R San José	155	6278630	292740	1.3
A.P.R Santa Beatriz	153	6281680	293250	5.5
Fundo Esmeralda	149	6274290	291990	3.0
Fundo Santa Rosa	241	6256340	308070	2.5
La Veguita, Parcela 14	158	6268290	296980	30.0

	Altura	Coordenadas		Profundidad
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)
Asentamiento El Pabellón	152	6263870	296300	15.0
Parque San Manuel	131	6262220	290170	2.7
A.P.R. Codigua	119	6262440	284920	7.0
Parcela 213, Popeta	91	6256550	288360	1.5
A.P.R. San Valentín	71	6260750	282100	0.6
HIJ. Norte Santa María de Tantehue	167	6252510	297120	18.0
Camino a Melipilla/Santa Marta	481	6288920	336730	35.4
Fundo Primavera	423	6286108	330235	10.0
Apua Universidad de Chile	443	6291235	330790	4.0
Reserva Fundo Chena	518	6286300	339510	150.0
Camino Lo Sierra 01411	515	6289200	340540	76.0
Comunidad Agrícola San Pedro	481	6276366	334715	55.0
Loteo Vista Hermosa	422	6274700	330400	41.0
Frutexport S.A.	494	6278260	336150	85.0
Industria Carozzi	559	6275960	341770	108.0
Avícola Santa Luz	544	6280240	340250	20.0
Departamental 390	565	6291590	348730	94.5
Mariscal 1590	609	6280440	346590	122.0
Santa Rosa 02050	625	6276850	348640	84.0
Rinconada El Peñón	808	6282700	359270	100.0
Fundo El Carmelo	455	6266085	336885	74.0
Envases Impresos S.A.	484	6266640	340110	83.0
Viña Carmen	532	6269270	344520	108.0
Parcela 37, Fundo La Cervera	424	6262400	336585	48.0
Fundo Santa Rosa	385	6256055	342895	5.0
Viña Montt Gras	446	6262370	340825	63.0
Planta David del Curto	410	6259700	338525	32.0
Planta A.P. Lo Arcaya	660	6272475	353020	20.0
Haras de Pirque	683	6269240	352055	16.0
Agrícola Chorombo S.A.	672	6270800	353865	8.0
Fundo La Rinconada	416	6256575	349650	14.0
Esmeralda	679	6327971	346716	33.0
Condominio Algarrobo 3	549	6317972	345024	33.0
Quebrada A. Arriba CH03	552	6315910	346280	33.5
Camino Guay Guay, Sitio 48	622	6318530	348360	98.6
Cerámica Santiago	483	6322420	331180	0.7
Fundo La Parva, Sociedad Agrícola Saplums	501	6325233	335336	12.4
Parcela Los Ciruelos	502	6323269	335781	3.5
Condominio Cobijo	584	6327455	340660	48.0
Reina Norte	602	6326695	343790	74.4

	Altura	Coordenadas		Profundidad
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)
Fundo Santa Isabel	548	6321040	344227	8.5
Santa Eliana	530	6322820	338770	16.8
Parcela N°5, Fundo Cerrillos	475	6311500	331820	6.0
Parcela N°2, sector Los Espinos	485	6316850	333485	1.3
Curtiembre Versalles CORFO	495	6315956	338965	0.8
Sitio 4	518	6317558	342326	6.2
Condominio Inmaculada Concepción	518	6314099	342819	4.5
Parcela N°49	500	6320250	322430	14.0
Parcela 6, Chicauma	508	6325040	322910	4.0
Fundo Polpaico	511	6326940	325220	14.0
Parcela N°63	504	6322240	321540	6.4
Endesa	523	6325860	327270	21.8
Fundo El Cardal	520	6328040	324750	16.0
Parcela N°14, De Lipange	479	6311880	327975	33.0
Parcela 57	489	6310810	324310	25.0
Parcela N°23, Central Lo Vargas	489	6317250	327800	21.0
Fundo Larapinta	487	6314310	324960	16.5

## Tabla B.2 Niveles estáticos en estaciones de la Región Metropolitana (BNA)

	Altura	Coorde	Coordenadas		
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática	
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)	
El Cruceral	643	6275555	350851	90.6	
Fundo Cachantun	402	6258665	346613	0.0	
Escuela 22 Viluco	386	6261267	332753	25.4	
La Caperana	395	6264124	330489	35.9	
A.P. San Francisco de Mostazal	474	6238331	342962	2.4	
A.P. La Punta	520	6237195	348884	23.0	
A.P. La Punta 2	520	6237260	349140	7.0	
Matadero La Cartuja	478	6238084	342966	0.0	
Fundo Santa Marta Culitri	418	6251669	348422	16.3	
A.P. Huelquen	426	6253688	349444	0.0	
Asentamiento Las Vertientes	374	6257580	333357	2.9	
Colonia de Paine	387	6257400	337193	8.0	
Asentamiento Águila Sur	403	6246965	339684	14.5	
San Francisco Acúleo	374	6246319	324074	4.9	
Cooperativa Pintue	374	6247173	337420	0.0	
A.P. Isla de Maipo	325	6263651	324783	3.4	
Vigna Santa Inés	331	6265602	327013	3.9	
Curamavida 729	800	6305128	358715	36.0	

	Altura	Coordenadas		Profundidad
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)
Estadio San Jorge	756	6304907	360476	18.7
Rivera/Grumete Bustos	544	6300156	345871	55.4
Consejo Nacional de Menores	480	6298271	334380	31.3
Hijuela El Olivo	468	6295459	335668	20.3
Asentamiento Santa Elena	480	6294860	342237	12.6
Country Club	660	6299899	355123	96.7
Colegio San Ignacio	616	6294738	354116	121.1
AP. Cerrillos	514	6281499	344828	51.0
Molina 704	527	6296938	345018	67.2
Camino a Melipilla 10803	492	6290081	338340	48.7
Portugal 125	594	6298649	347961	67.1
Amunategui 42	569	6298591	346257	78.9
Fundo Las Talaveras	696	6345986	341147	30.2
Hacienda Chacabuco	716	6344626	342778	13.0
Fundo Los Tahuretes	657	6343791	340663	22.5
Los Guayacanes	623	6341166	338423	31.4
Asentamiento Chacabuco	645	6341667	340749	51.7
Cera Unión Huechun	599	6347423	344291	50.3
Chilectra Polpaico	548	6334489	329847	0.0
Reserva Fundo Polpaico	530	6330715	328979	30.8
Parcela 5 Polpaico	532	6331969	326702	33.5
Fundo Santa Ana	695	6333187	331165	39.2
Huerto Fam. Cerro Blanco	561	6332419	333071	45.7
Fabrica Polpaico	532	6330159	328885	18.1
Rincón de Los Molinos	584	6339430	320084	6.0
Escuela 293 Polpaico	525	6330899	323688	0.0
R. Fundo San Manuel	528	6330266	322792	23.6
Fundo La Cadellada	489	6435206	331835	0.8
Fundo Santa Rosa de Lampa	496	6320162	335197	1.9
Entel Batuco	485	6321157	332124	0.0
Asentamiento Laguna	487	6326161	329344	1.2
Fundo El Almendral	429	6328943	344584	8.9
Asentamiento El Valle	496	6320236	321939	0.0
Lo Arcaya	542	6321019	342328	29.9
La Copa	521	6319368	318330	0.0
Fundo La Montaña	494	6312541	340138	2.5
Aeropuerto Pudahuel	478	6303901	335679	9.4
Parcela 62 Noviciado	485	6303403	324832	21.9
Fundo El Peral	476	6303966	332266	8.3
Chacra Andalucía	426	6281391	329409	21.5

	Altura	Coorde	nadas	Profundidad
Estación	Estación	Norte	Este	Napa Freática
	(m.s.n.m.)	(m)	(m)	(m)
Asentamiento Malloco	413	6282038	329398	7.0
Casas de San Luis	366	6274911	323803	11.4
A.P. El Monte	396	6272065	316615	0.0
Misión Corazón de María	338	6273202	316465	8.4
Parcela 7 Chiñihue	221	6269367	307935	2.7
Industria Bata	173	6272016	298862	2.5
Asentamiento Santa Emilia	164	6293834	304707	5.7
Fundo Santa Rita	167	6294275	308263	3.1
Fundo Lolenco	187	6299684	310636	5.6
Fundo El Parrón	166	6294038	251898	2.6
Fundo San Patricio	192	6291433	314206	6.0
A.P. Bollenal	140	6283958	295129	9.7
Matadero Pollos (Puangue)	190	6272919	283688	0.0
AS. San Miguel Popeta (2)	106	6249512	291495	13.6
AS. Ignacio Serrano	140	6248848	292152	14.3

# ANEXO C.- DESCRIPCIÓN DE POZOS PROFUNDOS

#### C.1.- Pozos perfil NS



Figura C.2 Pozo NS-92



Figura C.4 Pozo NS-118

190



Figura C.6 Pozo NS-120





Figura C.8 Pozo NS-144



Figura C.10 Pozo NS-173

193



Figura C.12 Pozo NS-190



Figura C.14 Pozo NS-243



Figura C.16 Pozo NS-488







Figura C.18 Pozo NS-490



Figura C.19 Pozo NS-491



Figura C.20 Pozo NS-492



Figura C.22 Pozo NS-514



Figura C.24 Pozo NS-522



Figura C.26 Pozo NS-591



Figura C.28 Pozo NS-1224

## C.2.- Pozos perfil EW





E °	199 D 14	Figure collectors and according to be low on			
-		<ul> <li>Ceniza voicanica con arena y boiones</li> </ul>	0	mininini,	Lima andilloca con arona
<b>T</b>	4 - B - 7	/ Arena con ceniza volcánica	- ×	4//////////////////////////////////////	Limo arcilioso con arena
	A . A			111111111111111	7.61
F	A P A P			1111111111111111	
- 20	- A V V .	Ceniza volcánica con grava, arena v holones		11111111111111111	Limo con arena y grava
-	0 0 0 0 0	Ceniza volcanica con grava, arena y bolones	- 10	12	
+	▼ 7 32			D . A LIF	- One of the second states and
	39	Limo con arena	-	0 0 0 15	Grava areno limosa
- 40	VIIIIIIIIII AA	Limo arcilloso con arena	-	18	Arena limo arcillosa
-		Linto arcinoso con arena		A	-
	53	Limo arcilloso	- 20	~ Ø Ø  22	Ceniza volcánica con arena v limo
	777777777 57	Arcilla	-	Q	
60	111111111111111		-	0000	Conversion Conversion
_ 00	W/////////////////////////////////////	Linio con arena y grava	-	0 . 0 . 129	Grava areno limosa
	VIIIIIA		-	V 0 0 20	
	VIIIIA	Arailla limora ono capiza volcópica	- 30	30	Arena gravo limosa
- 80	X//////X	Arona infosa con ceniza voicanica	and the second second	the second second	
- 00	86		-		
	4 7 P 92	Ceniza volcánica con arcilla v arena	-		Arena limo arcillosa
	211111111		-		Firefield infine distance de
F 400	VIIIIIA	Arcilla limosa	- 40	41	
100	104		- 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	111111111111111111111111111111111111111	Limo arcilloso con arena
-	107	Ceniza volcánica con limo	-	0 0 0 0 000	
	22222222222	/ Arena	-	0 0 0 40.5	Grava arcillo limosa con arena
-	118	- Arcilla limosa	_	48	Limo arcilloso con arena
- 120	121	/ Grave arenosa	- 50	111111111111111111111111111111111111111	Crawa arallaga
-	innin innin inni	Orava arendaa	_ 00	40.0	/ Grava arcinosa
-	134	Limo arcilloso con ceniza voicánica	_	1111111111111111111	I loss suslitions can support
-	138	Arcilla limosa con arena y ceniza volcánica			Limo arcilioso con arena
- 140	144	Arona limo arcilloga	_		Armon lines and lines
-	777777777777777777777777777777777777777	Aleria linio al ciliosa	- 60	61	Arena ilmo arciliosa
-	VIIIIIA		L 00	0 . 0 . 625	Crews areasan
-	VIIIIIA		100	11111111111111002.3	/ Grava arenosa
- 160	X//////X	Arcilla		111111111111111	
-	VIIIIA			1111111111111111	
	170		70		# 1000 2001#0000 000 2000 000
L .	172	/ Grava arenosa	10	1111111111111111	Limo arcilioso con arena
180	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,		12.6	111111111111111111111111111111111	
100	[		100	///////////////////////////////////////	
	·····	1		79	Arena limo arcillosa
	11111111111111111	Limo arcilioso	80		- riteria inno areinoba
200	<i></i>		00		
200	204		120		
100	207	Ceniza volcánica con arcilla y arena			
	210	/, Grava arenosa	<b>C</b>		
F	213	/ Limo arcilloso	E 00		Limo arcilloso con arena
- 220	222	Arcilla limosa	- 50		
-	227	/ Grava		~~~~~	
-				~~~~~	
F	·····		100	00	
- 240	245	Limo con arena y ceniza volcanica	100	unninn as	
-			100	- HEREIGER ST.	Arena limosa
-	255	Arena	1.1	104	Fildita infload
- 10 March 10	11111111	and the second s			Line amiltere con areas
- 260	////// 265	Arcilla		108	Limo arcilloso con arena
F	205	Arona arayona	140	leisisisisisisi	Amer limour
-	277777777777777777777777777777777777777	Arolla	110	1112	Arena Imosa
-	215	AIGHE		///////////////////////////////////////	Limo arcilloso con arena
- 280	00000			11111111111111111 A4E	Amer lime amillene
H	.0 .0 .0	Grava areno limosa con ceniza volcánica		115	/, Arena limo arciliosa
-	0 0 292		100	1	/ Limo arcilloso con arena
-	4 4 4		120	102	Arena
- 300	A D A A D			1	Al GIRA
-	4 4 4 4				
H-	4 4 4		E		
-	P P		130		
320	A A A A	Ceniza volcánica con bolones, grava, arena	30. 1900A.0		
0.0	PARAD	y roca meteorizada		Eigura C 22	$P_{070} = N/91$
-	A 9 A			riguia 0.32	
E	0 V N			-	
E					
E	A A A A A				
340	A A A A A A				
- 340					
- 340					

Figura C.31 Pozo EW-75



Figura C.33 Pozo EW-88





Figura C.34 Pozo EW-135




Figura C.38 Pozo EW-382

208



Figura C.39 Pozo EW-427



Figura C.40 Pozo EW-451







Figura C.44 Pozo EW-606



Figura C.45 Pozo EW-2145

C.3.- Pozos perfil XY



212





## **ANEXO D.- REGISTROS SÍSMICOS**

A continuación se presentan los registros acelerográficos del terremoto del 27Fen las componentes NS, EW y V, para cada una de las estaciones sismológicas estudiadas:















Tim e (sec)





Figura D.8 Registro sísmico estación PALTO

## ANEXO E.- GRADO DE DAÑO POR CLASE ESTRUCTURA

A continuación se presenta la distribución de grado de daños según la clase de estructura de categoría B:

Comuna	Edificio			Total
Contana	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Total
Cerrillos				0
Cerro Navia	2	2	1	5
Conchalí	2	1		3
El Bosque	6			6
Estación Central	14	3		17
Huechuraba		8		8
Independencia	7	2		9
La Cisterna	10	3		13
La Florida	7			7
La Granja	1			1
La Pintana				0
La Reina	3			3
Las Condes	25	1		26
Lo Barnechea	5			5
Lo Espejo				0
Lo Prado	2	2		4
Macul	17	3	2	22
Maipú	9	2	3	14
Ñuñoa	22	14		36
Pedro Aguirre Cerda	82	3		85
Peñalolén	3	1		4
Providencia	35	1		36
Pudahuel	3			3
Quilicura	1	12		13
Quinta Normal	9			9
Recoleta				0
Renca	8			8
San Joaquín	3		3	6
San Miguel	17	1	1	19
San Ramón	5			5
Santiago	2	2		4
Vitacura	9			9

**Tabla E.1** Distribución de grado de daño según clase Edificio

			Ū.	
Comuna	Otros			Total
Contuna	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Total
Cerrillos	2			2
Cerro Navia	1	9		10
Conchalí	4			4
El Bosque	1			1
Estación Central	5			5
Huechuraba	5	5	1	11
Independencia				0
La Cisterna	7	1		8
La Florida	23	2		25
La Granja				0
La Pintana	2			2
La Reina	2			2
Las Condes	2		1	3
Lo Barnechea	1	1		2
Lo Espejo	1			1
Lo Prado	1			1
Macul				0
Maipú	10		1	11
Ñuñoa	3			3
Pedro Aguirre Cerda	1			1
Peñalolén	3			3
Providencia	1			1
Pudahuel	2			2
Quilicura	2			2
Quinta Normal	6	1		7
Recoleta	1			1
Renca	5			5
San Joaquín	1		1	2
San Miguel	2	2	1	5
San Ramón				0
Santiago	14			14
Vitacura				0

 Tabla E.2 Distribución de grado de daño según clase Otros

Comuna	Silo			Tatal
Contuna	Grado 1	Grado 2	Grado 3	TOLAI
Cerrillos				0
Cerro Navia				0
Conchalí				0
El Bosque				0
Estación Central				0
Huechuraba			1	1
Independencia				0
La Cisterna				0
La Florida				0
La Granja				0
La Pintana				0
La Reina				0
Las Condes				0
Lo Barnechea				0
Lo Espejo				0
Lo Prado				0
Macul				0
Maipú				0
Ñuñoa				0
Pedro Aguirre Cerda				0
Peñalolén				0
Providencia				0
Pudahuel				0
Quilicura				0
Quinta Normal				0
Recoleta				0
Renca				0
San Joaquín				0
San Miguel				0
San Ramón				0
Santiago				0
Vitacura				0

Tabla E.3 Distribución de grado de daño según clase Silo

Comuna	(	Total		
Contana	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Total
Cerrillos				0
Cerro Navia				0
Conchalí				0
El Bosque				0
Estación Central				0
Huechuraba				0
Independencia		1		1
La Cisterna		1		1
La Florida				0
La Granja				0
La Pintana				0
La Reina				0
Las Condes	3			3
Lo Barnechea		1		1
Lo Espejo				0
Lo Prado				0
Macul	2			2
Maipú				0
Ñuñoa	3			3
Pedro Aguirre Cerda				0
Peñalolén				0
Providencia	14	1	2	17
Pudahuel				0
Quilicura				0
Quinta Normal				0
Recoleta				0
Renca				0
San Joaquín				0
San Miguel				0
San Ramón				0
Santiago				0
Vitacura				0

 Tabla E.4 Distribución de grado de daño según clase Copa de Agua

Comuna	Estructuras gran área			Total
Comuna	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Total
Cerrillos				0
Cerro Navia				0
Conchalí				0
El Bosque				0
Estación Central				0
Huechuraba		2		2
Independencia				0
La Cisterna				0
La Florida				0
La Granja				0
La Pintana				0
La Reina				0
Las Condes				0
Lo Barnechea		1		1
Lo Espejo				0
Lo Prado				0
Macul				0
Maipú				0
Ñuñoa				0
Pedro Aguirre Cerda				0
Peñalolén				0
Providencia				0
Pudahuel	1			1
Quilicura				0
Quinta Normal				0
Recoleta				0
Renca				0
San Joaquín				0
San Miguel				0
San Ramón				0
Santiago				0
Vitacura				0

 Tabla E.5 Distribución de grado de daño según clase Estructura gran área

Comuna	Patrimonio			Total
	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Total
Cerrillos				0
Cerro Navia		1		1
Conchalí				0
El Bosque				0
Estación Central	1			1
Huechuraba				0
Independencia				0
La Cisterna				0
La Florida	1			1
La Granja				0
La Pintana				0
La Reina		1		1
Las Condes				0
Lo Barnechea				0
Lo Espejo				0
Lo Prado				0
Macul				0
Maipú				0
Ñuñoa		1		1
Pedro Aguirre Cerda				0
Peñalolén				0
Providencia	3			3
Pudahuel				0
Quilicura				0
Quinta Normal		1		1
Recoleta	1			1
Renca				0
San Joaquín				0
San Miguel				0
San Ramón				0
Santiago	1	2		3
Vitacura				0

 Tabla E.6 Distribución de grado de daño según clase Patrimonio