



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA PLANIFICACIÓN  
DE SISTEMAS DE EVACUACIÓN VERTICAL ANTE  
TSUNAMI. CASO APLICADO A LA CIUDAD DE  
VALPARAÍSO**

**Constanza Fernanda Flores Henríquez**

Junio de 2016

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE EVACUACIÓN VERTICAL ANTE TSUNAMI. CASO APLICADO A LA CIUDAD DE VALPARAÍSO**

CONSTANZA FERNANDA FLORES HENRÍQUEZ

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

MAURICIO REYES GALLARDO

Profesor guía

---

---

RAÚL OBERREUTER

Revisor

---

---

CRISTIAN ARAYA

Revisor

---

---

## **DECLARACIÓN**

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

---

Firma Alumno

---

Firma Profesor guía

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, por su apoyo en todos los ámbitos de mi vida, especialmente en esta tortuosa fase de elaboración de la memoria de título. A mi madre, quien con su amor infinito y enseñanzas, ha sabido inculcar en mí el valor del rigor, perseverancia, constancia, y por sobre todo, alcanzar la excelencia en cada meta propuesta y perseguir todos mis sueños. Agradecer a mi Constanza por su incondicionalidad en los momentos más difíciles que me ha tocado vivir, sin lugar a dudas, me considero afortunada de tenerla en mi vida. A mis amigas y amigos del colegio, liceo y universidad. A mi profesor guía Mauricio Reyes por su constante apoyo, confianza y amistad.

Agradecer a Daphne Vargas, Alex Lobos, Francisco Morales, Tania Ugalde, Anne Quaas, Michelle Gallardo, Stefani Martínez, Dangelá Pozo, Franco Villareal, Mauricio Reyes, Eduardo Sánchez, Marlene Berríos, Katherine Linzmayer, Adolfo Andaur, Daniela Villalobos, Francisca Quijada, Miguel Aquea y Jazmín Lues, por su colaboración en el desarrollo del ejercicio de evacuación realizado en la ciudad de Valparaíso, actividad que ha sido de invaluable utilidad en la elaboración de este proyecto de título. A Patricio Tapia de la oficina SIG de la Ilustre Municipalidad de Valparaíso por la información censal facilitada.

# **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	V
RESUMEN.....	XIV
1 INTRODUCCIÓN .....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 SITUACIÓN ACTUAL DEL MÉTODO .....	4
3.1 ESTUDIO DE AMENAZA.....	6
3.1.1 AMENAZA .....	6
3.1.2 GRANDES TERREMOTOS Y TSUNAMIS EN EL MUNDO .....	6
3.1.2.1 TERREMOTO DE ALASKA.....	7
3.1.2.2 TERREMOTO DE SUMATRA-ANDAMÁN, INDONESIA.....	9
3.1.2.3 TERREMOTO DE TOHOKU, JAPÓN .....	11
3.1.3 GRANDES TERREMOTOS Y TSUNAMIS EN CHILE .....	13
3.1.3.1 CONTEXTO TECTÓNICO .....	14
3.1.3.2 TERREMOTOS HISTÓRICOS.....	16
3.1.3.2.1 TERREMOTO DE VALDIVIA 1960 .....	18
3.1.3.2.2 TERREMOTO DEL MAULE 2010 .....	20
3.1.3.2.3 TERREMOTO DE ILLAPEL 2015 .....	22
3.1.4 AMENAZA DE TERREMOTO Y TSUNAMI EN VALPARAÍSO .....	24
3.1.4.1 17 DE MARZO DE 1575 .....	26
3.1.4.2 13 DE MAYO DE 1647.....	26
3.1.4.3 8 DE JULIO DE 1730 .....	27
3.1.4.4 19 DE NOVIEMBRE DE 1822 .....	32
3.1.4.5 16 DE AGOSTO DE 1906 .....	33
3.1.4.6 3 DE MARZO DE 1985 .....	33
3.1.4.7 AMENAZA SÍSMICA .....	37
3.1.4.7.1 RED SISMOLÓGICA .....	37
3.1.4.8 AMENAZA DE TSUNAMI.....	39
3.1.4.8.1 MARCO REGULATORIO EN CHILE .....	39
3.1.4.8.2 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE TSUNAMIS .....	42

3.1.4.9	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA .....	43
3.2	EVACUACIÓN HORIZONTAL .....	45
3.2.1	CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL .....	45
3.3	EVACUACIÓN VERTICAL .....	46
3.3.1	CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL.....	46
3.3.1.1	DEFINICIÓN DE OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL.....	47
3.3.1.2	CONCEPTO DE FRAGILIDAD.....	51
3.3.1.2.1	FRAGILIDAD SÍSMICA.....	52
3.3.1.2.2	CURVAS DE FRAGILIDAD ANTE TSUNAMI .....	53
3.3.1.2.3	CURVAS DE FRAGILIDAD ANTE TSUNAMI EN CHILE .....	57
3.3.1.3	NORMATIVA Y MÉTODOS DE DISEÑO .....	59
3.3.1.4	ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA OFERTA EXISTENTE .....	60
3.3.1.5	ASPECTOS CUANTITATIVOS Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	62
4	METODOLOGÍA .....	63
4.1	CONTEXTO Y CIUDAD OBJETIVO.....	63
4.2	ESTUDIO DE AMENAZA.....	64
4.2.1	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS.....	64
4.2.2	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA.....	65
4.3	ESTUDIO DE IMPACTOS .....	65
4.3.1	VULNERABILIDADES .....	65
4.3.2	ZONAS EXPUESTAS.....	68
4.4	EVACUACIÓN HORIZONTAL .....	69
4.4.1	CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA DEMANDA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL.....	69
4.4.2	CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LA DEMANDA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL.....	69
4.5	EVACUACIÓN VERTICAL.....	69
4.5.1	CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL.....	69
4.5.1.1	DEFINICIÓN DE OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL.....	70
4.5.1.1.1	DEFINICIÓN DE CRITERIOS.....	70
4.5.1.2	ASPECTOS CUANTITATIVOS Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	76
4.5.2	ZONIFICACIÓN PARA ESTUDIO.....	76
4.5.2.1	CRITERIOS DE UBICACIÓN.....	76
5	RECOPIACIÓN DE RESULTADOS .....	80

5.1 EVACUACIÓN HORIZONTAL (EH) .....	80
5.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EH .....	80
5.1.1.1 RESULTADOS EJERCICIO DE EVACUACIÓN POR TSUNAMI .....	80
5.1.1.2 RESULTADOS EVALUACIÓN VÍAS DE EVACUACIÓN HORIZONTAL .....	83
5.1.2 CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA DEMANDA DE EH .....	88
5.1.2.1 ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD POR TIEMPO DE EVACUACIÓN .....	88
5.1.2.2 ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD POR DENSIDAD DE PERSONAS .....	89
5.1.2.3 CODIFICACIÓN DE LA CIUDAD .....	94
5.1.3 CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LA DEMANDA DE EH .....	98
5.1.3.1 AJUSTE DE DENSIDAD HOMOGÉNEA DE PERSONAS .....	99
5.1.4 BALANCE OFERTA/ DEMANDA DE EH .....	102
5.2 EVACUACIÓN VERTICAL (EV).....	102
5.2.1 CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA DEMANDA DE EV .....	102
5.2.2 CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LA DEMANDA DE EV .....	103
5.2.3 CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA OFERTA DE EV.....	104
5.2.3.1 EVALUACIÓN VISUAL DE LA CIUDAD.....	105
5.2.3.1.1 EVALUACIÓN VISUAL USANDO GOOGLE EARTH FICHA A.....	105
5.2.3.1.2 EVALUACIÓN VISUAL USANDO GOOGLE STREET VIEW FICHA B.....	108
5.2.3.2 OFERTA DE EV.....	109
5.2.4 BALANCE OFERTA/ DEMANDA DE EV .....	112
6 GLOSARIO .....	113
7 DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114
7.1 ACERCA DE LA AMENAZA.....	114
7.2 ACERCA DE LA METODOLOGÍA .....	114
7.2.1 EVACUACIÓN HORIZONTAL .....	114
7.2.2 EVACUACIÓN VERTICAL.....	115
7.3 RECOMENDACIONES .....	115
8 CONCLUSIONES .....	117
8.1.1 OFERTA EVACUACIÓN HORIZONTAL.....	117
8.1.2 DEMANDA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL.....	118
8.1.3 BALANCE DE EVACUACIÓN HORIZONTAL.....	118
8.1.4 OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL .....	118
8.1.5 DEMANDA DE EVACUACIÓN VERTICAL .....	118
8.1.6 BALANCE DE EVACUACIÓN VERTICAL .....	119

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	120
10 ANEXO A TERREMOTOS Y TECTÓNICA DE PLACAS.....	128
10.1 TERREMOTOS .....	128
10.1.1 ONDAS SÍSMICAS.....	128
10.1.1.1 ONDAS DE CUERPO .....	128
10.1.1.2 ONDAS SUPERFICIALES .....	129
10.1.2 INTENSIDAD.....	130
10.1.3 MAGNITUD .....	131
10.1.4 SOLUCIÓN DEL MECANISMO FOCAL .....	133
10.2 TECTÓNICA DE PLACAS .....	136
10.2.1 BORDE DE PLACAS.....	138
11 ANEXO B DATOS DE CAMPO .....	140
11.1 ACTIVIDAD 1: SIMULACRO DE EVACUACIÓN ANTE TSUNAMI .....	140
11.2 ACTIVIDAD 2: EVALUACIÓN DE LAS VÍAS DE EVACUACIÓN ANTE TSUNAMI ...	140
11.3 RESULTADOS POR VÍAS DE EVACUACIÓN .....	141
11.3.1 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE ECUADOR .....	141
11.3.2 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE FRANCIA .....	142
11.3.3 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE URUGUAY .....	143
11.3.4 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE EDWARDS .....	144
11.3.5 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE RODRÍGUEZ .....	145
11.3.6 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE ECUADOR .....	146
11.3.7 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE FRANCIA .....	147
11.3.8 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE URUGUAY .....	148
11.3.9 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE EDWARDS.....	149
11.3.10 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE RODRÍGUEZ .....	150
12 ANEXO C FICHA DE REGISTRO CAMPAÑA DE TERRENO .....	151
13 ANEXO D EDIFICIOS EVALUADOS CON FICHAS DE REGISTRO.....	165
13.1 EDIFICIOS ANALIZADOS CON FICHA A.....	165
13.2 EDIFICIOS ANALIZADOS CON FICHA B.....	177

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de evaluación riesgo por tsunami. Adaptado de Reyes (2013).....	5
Figura 2 Terremoto de Alaska 1964, tectónica de placas. Adaptado de Brocher et al (2014).....	8
Figura 3 Epicentro, magnitud, altura de inundación y diagrama <i>beach ball</i> terremoto de Sumatra. Adaptado de Satake (2014).....	9
Figura 4 Zonas de subducción y placas tectónicas. Adaptado de McCaffrey (2007).....	11
Figura 5 Altura de inundación y altura máxima alcanzada en superficie (Runup), terremoto de Tohoku, Japón. Adaptada de Mori, Takahashi, Yasuda, & Yanagisawa (2011). .....	12
Figura 6 Daños a sectores residenciales, autos, camiones y escombros debido a la acción del tsunami en el sector de Kesenuma, Japón (Imamura & Anawat, 2012).....	13
Figura 7 Movimiento relativo de placas en Sudamérica. Adaptado de Rhea (2010).....	14
Figura 8 Zona de subducción Chile central (Cisternas, 2012).....	15
Figura 9 Terremotos históricos en Chile. Elaboración propia con datos de NGDC (2014). .....	17
Figura 10 Desplazamientos verticales terremoto 2010 y 1960. Adaptado de Fujii & Satake (2012) .....	19
Figura 11 Epicentros y réplicas terremoto de 2010 y 1960. Adaptado de Fujii & Satake (2012).....	21
Figura 12 Profundidades de flujo y runup tsunami 2010. Adaptada de Fritz et al (2011)..	22
Figura 13 Zona de ruptura terremoto Illapel 2015. Adaptada de USGS (2015). .....	23
Figura 14 Altura de tsunami y runup máximo terremoto de Illapel. Adaptado de Aránguiz et al (2015). .....	24
Figura 15 Área afectada por el terremoto de 1730. Adaptada de Carvajal, Cisternas, & Catalán (2014). En A y B sitios de estudio. En C distribución de población afectada. La sigla GN se refiere a los niveles de grilla utilizados en la modelación numérica.....	28
Figura 16 Modelos de ruptura y desplazamientos verticales asociados al terremoto 1730. En A la posición de las rupturas en la zona de acoplamiento sismogénico y los desplazamientos verticales. En B la ubicación de las sub rupturas presentadas en C (Carvajal et al., 2014).....	29
Figura 17 Planicies de inundación y runup perfiles topográficos (Carvajal et al., 2014). En A y B ubicación histórica de los reportes coloniales. En C el área de inundación generada por los modelos de ruptura ABC-6 y ABC-7. En D perfiles topográficos y el nivel inundación según reportes históricos.....	30
Figura 18 Modelos de ruptura terremoto 1730 (Quiroz et al., 2014). A la izquierda el modelo de ruptura plana y a la derecha el modelo de ruptura de tres segmentos.....	31
Figura 19 Área de inundación y altura tsunami 1730 modelo FFM-3 (Quiroz et al., 2014). .....	32
Figura 20 Área de influencia (líneas punteadas) terremotos de 1971, 1973, 1981 y 1985. (Barrientos, 1988) .....	34
Figura 21 Terremotos zona central de Chile. Adaptado de Yeck et al (2015).....	36
Figura 22 Red Sismológica operada por el CSN (CSN, 2015). .....	38
Figura 23 Carta de Inundación por Tsunami Región de Valparaíso (SHOA, 2012). .....	41
Figura 24 Mapa de Evacuación por Tsunami, ciudad de Valparaíso (ONEMI, 2014). .....	42
Figura 25 Diagrama de flujo probabilidad de ocurrencia de amenaza. Adaptado de Reyes (2013). .....	44
Figura 26 Vías de evacuación horizontal en Valparaíso. Adaptado de ONEMI (2014).....	45

Figura 27 Refugios de concreto reforzado Prefectura de Tokushima, Japón (FEMA, 2008). .....	47
Figura 28 Torre de Tasukaru y torre de Nishiki (FEMA, 2008). ....	48
Figura 29 Mapa de evacuación por Tsunami Waikiki, Hawai (FEMA, 2008). ....	48
Figura 30 Estructura de EV tipo torre-puente peatonal (Muhari, Imamura, & Koshimura, 2014). ....	49
Figura 31 Estructuras de EV en la ciudad de Kesenuma, Japón (Fraser et al., 2012). ...	50
Figura 32 Desplazamiento objetivo según estado de daño. Tabla 6, capítulo 7 Jorquera (2014). ....	52
Figura 33 Curvas de Fragilidad Set de Terremotos (Jorquera, 2014). ....	53
Figura 34 Curvas de fragilidad material mixto ciudad Ishinomaki, Japón. Adaptado de Suppasri et al (2013). ....	54
Figura 35 Curvas de fragilidad según materialidad y número de pisos. Adaptado de Suppasri et al (2013). ....	56
Figura 36 Imágenes satelitales Dichato 2010. Adaptado de Mas et al (2012). ....	57
Figura 37 Curvas de fragilidad ante tsunami en el mundo. Adaptado de Mas et al (2012). .....	58
Figura 38 Ubicación geográfica ciudad Valparaíso. Adaptado de <a href="http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region5">http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region5</a> y google earth. ....	63
Figura 39 Niveles de impacto desastre por tsunami. Adaptado de Reyes (2013). ....	66
Figura 40 Subcomponentes de vulnerabilidad asociadas al Sufrimiento Humano (HS). Adaptado de Reyes (2013). ....	66
Figura 41 Zona inundable plan de Valparaíso. Adaptado de SHOA (2010). ....	68
Figura 42 Potencial de socavación y clasificación tipo de suelo. Adaptado de FEMA (2008). ....	71
Figura 43 Ficha de registro A. Elaboración propia. ....	72
Figura 44 Ficha de registro B. Elaboración propia ....	73
Figura 45 Diagrama de flujo caracterización de oferta de EV en Valparaíso. Elaboración propia. ....	79
Figura 46 Trazado vías de evacuación analizadas en Valparaíso. Elaboración propia. ...	80
Figura 47 Tiempos de evacuación paso apresurado y reducido. Elaboración propia. ....	81
Figura 48 Estrechez y estado de la vía de evacuación horizontal, intersección calle Edwards con Av Colón en dirección sur. Elaboración propia. ....	82
Figura 49 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo de vías de EH en Valparaíso. Elaboración propia. ....	84
Figura 50 Impacto asociado a la confiabilidad de las vías de EH en Valparaíso. Elaboración propia. ....	86
Figura 51 Señalética de evacuación por tsunami. Intersección calle Edwards/Independencia. Elaboración propia. ....	87
Figura 52 Vía de EH intersección calle Rodríguez/Las Monjas. Recorrido en dirección N-S. Elaboración propia. ....	88
Figura 53 Zonificación por tiempo de evacuación a zona segura. Elaboración propia. ....	89
Figura 54 Escenario noche de fin de semana de verano. Elaboración propia. ....	92
Figura 55 Escenario día laboral. Elaboración propia. ....	93
Figura 56 Escenario noche de año nuevo. Elaboración propia. ....	94
Figura 57 Codificación calles analizadas. Elaboración propia. ....	95
Figura 58 Ejemplo de fotografía a mitad de cuadra. Elaboración propia. ....	96

Figura 59 A la izquierda, disminución ancho útil de vereda intersección calle Van Buren/Uruguay. A la derecha, disminución ancho útil calzada intersección calle Ramirez/Brasil. Elaboración propia.....	97
Figura 60 Comercio en veredas de tránsito peatonal, intersección Ecuador/Condell. Elaboración propia.....	97
Figura 61 Atochamiento vehicular calle Ecuador evacuación por tsunami 16/9/2015. Fuente: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=JGbpIwB0Hik">https://www.youtube.com/watch?v=JGbpIwB0Hik</a> .....	98
Figura 62 Disminución ancho de calzadas durante evacuación por tsunami 16/9/2015. Fuente: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=JGbpIwB0Hik">https://www.youtube.com/watch?v=JGbpIwB0Hik</a> .....	98
Figura 63 Manzanas censales habitantes zona de estudio. Elaboración propia con información entregada por unidad SIG Ilustre Municipalidad de Valparaíso.....	100
Figura 64 Ubicación teórica estructuras de evacuación vertical (EEV). Elaboración propia. ....	103
Figura 65 Oferta de EV. Intersección calle Francia con Brasil. Adaptado de Google Earth. LC: Línea de costa. REH: Ruta de evacuación horizontal.1, 2 y 3 tipo de estructuras presentes en el plan de Valparaíso.....	105
Figura 66 Primera fase de inspección visual de la ciudad. Elaboración propia.....	107
Figura 67 Evaluación EEV1 ficha A. Elaboración propia. ....	108
Figura 68 Evaluación EEV1 ficha B. Elaboración propia. ....	109
Figura 69 Área de azotea EEV 2.3. Fuente: <a href="http://checkinly.com/es/geopark-valparaiso,h.html#zoom-img-gallery[room151208501/0/">http://checkinly.com/es/geopark-valparaiso,h.html#zoom-img-gallery[room151208501/0/</a> .....	110
Figura 70 Variables de interés ante una inundación por tsunami. Adaptado de Cawley (2014). ....	113
Figura 71 Escala de Inamura e lida adaptada por Wiegel (Lagos, 2000). ....	113
Figura 72 Ondas de cuerpo P y S (Tarbuck & Lutgens, 2005). ....	129
Figura 73 Ondas de superficie. Adaptado de Tarbuck & Lutgens (2005). ....	129
Figura 74 Estados tensionales diagrama de pelota de playa (Cronin, 2004). ....	133
Figura 75 Representación gráfica estaciones sismográficas y planos nodales (Cronin, 2004). ....	134
Figura 76 Ángulos de deslizamientos plano de falla (CSN, 2015).....	134
Figura 77 Plano de falla normal y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015).....	135
Figura 78 Plano de falla inverso y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015).....	135
Figura 79 Plano de falla transformante y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015)...	135
Figura 80 Plano de falla oblicuo inverso y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015). ...	136
Figura 81 Placas y bordes tectónicos (Tarbuck & Lutgens, 2005).....	137
Figura 82 Tipos de zonas de subducción (Tarbuck & Lutgens, 2005). ....	139
Figura 83 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Ecuador. Elaboración propia. ....	141
Figura 84 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Francia. Elaboración propia. ....	142
Figura 85 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Uruguay. Elaboración propia. ....	143
Figura 86 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Edwards. Elaboración propia. ....	144
Figura 87 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Rodríguez. Elaboración propia. ....	145
Figura 88 Impacto asociado a la confiabilidad calle Ecuador. Elaboración propia. ....	146
Figura 89 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Francia. Elaboración propia. ....	147

Figura 90 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Uruguay. Elaboración propia. ....	148
Figura 91 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Edwards. Elaboración propia. ....	149
Figura 92 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Rodríguez. Elaboración propia. ....	150
Figura 93 Evaluación ficha A EEV2.1 Almirante Barroso #560. Elaboración propia. ....	165
Figura 94 Evaluación ficha A EEV2.2 Morris #776. Elaboración propia.....	166
Figura 95 Evaluación ficha A EEV2.3 Hontaneda #735. Elaboración propia. ....	167
Figura 96 Evaluación ficha A EEV3 Brasil #2274. Elaboración propia. ....	168
Figura 97 Evaluación ficha A EEV5 Rodríguez #99. Elaboración propia. ....	169
Figura 98 Evaluación ficha A EEV6.1 Blanco #1791. Elaboración propia.....	170
Figura 99 Evaluación ficha A EEV6.2 Blanco #1693. Elaboración propia.....	171
Figura 100 Evaluación ficha A EEV6.3 Blanco #1623. Elaboración propia.....	172
Figura 101 Evaluación ficha A EEV7.1 Blanco #1231. Elaboración propia.....	173
Figura 102 Evaluación ficha A EEV7.2 Blanco #1169. Elaboración propia.....	174
Figura 103 Evaluación ficha A EEV7.3 Bellavista #168. Elaboración propia. ....	175
Figura 104 Evaluación ficha A EEV7.4 Melgarejo #669. Elaboración propia. ....	176
Figura 105 Evaluación ficha B EEV2.1 Almirante Barroso #560. Elaboración propia. ....	177
Figura 106 Evaluación ficha B EEV2.2 Morris #776. Elaboración propia.....	178
Figura 107 Evaluación ficha B EEV2.3 Hontaneda #735. Elaboración propia. ....	179
Figura 108 Evaluación ficha B EEV3 Brasil #2274. Elaboración propia. ....	180
Figura 109 Evaluación ficha B EEV5 Rodríguez #99. Elaboración propia. ....	181
Figura 110 Evaluación ficha B EEV6.1 Blanco #1791. Elaboración propia.....	182
Figura 111 Evaluación ficha B EEV6.2 Blanco #1693. Elaboración propia.....	183
Figura 112 Evaluación ficha B EEV6.3 Blanco #1623. Elaboración propia.....	184
Figura 113 Evaluación ficha B EEV7.1 Blanco #1231. Elaboración propia.....	185
Figura 114 Evaluación ficha B EEV7.2 Blanco #1169. Elaboración propia.....	186
Figura 115 Evaluación ficha B EEV7.3 Bellavista #168. Elaboración propia. ....	187
Figura 116 Evaluación ficha B EEV7.4 Melgarejo #669. Elaboración propia. ....	188

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Grandes terremotos a nivel mundial.....	7
Tabla 2 Terremotos en Valparaíso.....	25
Tabla 3 Parámetros sísmicos utilizados en modelo numérico. ....	40
Tabla 4 Probabilidad y factor de probabilidad de ocurrencia de la amenaza. ....	44
Tabla 5 Nivel de daño, clasificación y descripción. ....	55
Tabla 6 Criterios cualitativos de la oferta existente. ....	61
Tabla 7 Escala cualitativa de impacto por susceptibilidad.....	67
Tabla 8 Escala cualitativa de impacto por confiabilidad. ....	67
Tabla 9 Resistencia ante impacto hormigón armado. Elaboración propia .....	75
Tabla 10 Resistencia ante impacto acero. Elaboración propia .....	75
Tabla 11 Resistencia ante impacto adobillo. Elaboración propia.....	76
Tabla 12 Criterios cualitativos oferta de EV en Valparaíso.....	78
Tabla 13 Tiempo de desplazamiento, distancia y velocidades. ....	81
Tabla 14 Valores de densidad de personas por unidad de superficie. ....	90

Tabla 15 Densidad de personas por unidad de superficie para cada escenario.....	90
Tabla 16 Código, Zona, Anchos de vereda, calzada y largo de calles. ....	95
Tabla 17 DEH en Valparaíso para cada escenario. ....	101
Tabla 18 DEH para cada escenario con densidad homogénea de personas. Elaboración propia. ....	101
Tabla 19 Demanda de EV para cada EEV .....	104
Tabla 20 Estructuras evaluadas con ficha de registro. ....	106
Tabla 21 Resumen criterios evaluados con fichas de registro edificios EEV2.2 y EEV2.3. ....	111
Tabla 22 Escala de intensidad de Mercalli modificada. ....	131
Tabla 23 Resumen criterios evaluados con fichas de registro edificios EEV1, EEV2.1, EEV3, EEV5, EEV6.1 y EEV6.2.....	189
Tabla 24 Resumen criterios evaluados con fichas de registro edificios EEV6.3, EEV7.1, EEV7.2, EEV7.3 y EEV7.4.....	190

## **RESUMEN**

En este estudio se desarrolla un análisis de las vulnerabilidades asociadas al arrastre de personas por un tsunami de campo cercano en la ciudad de Valparaíso, similar al ocurrido el 8 de Julio de 1730.

Se propone una metodología cualitativa y cuantitativa que incluye balances de oferta y demanda de evacuación horizontal y vertical, analizando la susceptibilidad de bloqueo y confiabilidad de las vías de evacuación horizontal. Asimismo, la oferta de evacuación vertical se estudia mediante un análisis simplificado de las características estructurales de los edificios.

El estudio se enfoca en las calles Uruguay, Francia, Rodríguez, Edwards y Ecuador, sensibilizando el análisis respecto a la población expuesta, tiempo y temporada de ocurrencia de la amenaza, y la vulnerabilidad de la infraestructura de evacuación.

Los escenarios analizados consideran un día laboral, noche de fin de semana de verano y noche de año nuevo. El estudio muestra que en general las vías de evacuación horizontal son confiables, aunque poseen algunas características insatisfactorias. Del mismo modo, se detectaron algunos aspectos de alta susceptibilidad de bloqueo. La demanda de evacuación horizontal fue estimada utilizando una densidad homogénea de personas en las calles y una distribución de velocidad de desplazamiento asumida con criterios conservadores. El balance de evacuación horizontal fue desarrollado cualitativamente y su resultado se considera positivo, a pesar de las vulnerabilidades encontradas en las vías de evacuación. Esto es, existe capacidad para absorber la demanda de evacuación horizontal. No obstante, la incerteza en el comportamiento de las personas durante la evacuación y los resultados de confiabilidad y susceptibilidad de las vías, entregan indicios de una demanda insatisfecha, por ello los valores de demanda de evacuación vertical se estimaron criteriosamente. Finalmente, se ha determinado que la oferta de evacuación vertical es nula, por lo tanto el balance de evacuación vertical es negativo.

# **1 INTRODUCCIÓN**

La extensa historia sísmica de Chile ha despertado gran interés en la comunidad científica internacional señalando al país como un observatorio natural de terremotos, siendo considerado uno de los países más sísmicos del mundo, incluyendo terremotos de subducción altamente destructivos con gran potencial tsunamigénico (Gusiakov, 2005). Esto debido a su emplazamiento en el borde occidental de Sudamérica sobre la zona de convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana.

La completa exposición al Océano Pacífico de las zonas costeras del país, juega un rol determinante al momento de gestionar el riesgo de desastres naturales asociados a terremotos y tsunamis. En este contexto, la necesidad de generar comunidades resilientes y la orientación de políticas para el manejo de desastres, resulta vital para lograr un desarrollo armónico entre las comunidades costeras y las amenazas de origen natural a las que están expuestas.

Indudablemente, la ciudad de Valparaíso al ser por excelencia la ciudad puerto más importante del país (Sánchez & Jiménez, 2011), debe concentrar esfuerzos para contar con una comunidad preparada para enfrentar terremotos y tsunamis, además de un sistema urbano capaz de sobreponerse a estos desastres o contar con una rápida recuperación post desastre. A lo largo de su historia, los terremotos de 1647, 1730, 1822, 1906, 1985 y 2010, han dejado cuantiosos daños en la infraestructura de Valparaíso.

A pesar de la modernización de los códigos sísmicos, la amenaza por tsunami y el diseño tsunamirresistente aún se encuentra en sus primeras etapas de implementación. De ahí que estudiar el comportamiento de las estructuras ante tsunami resulta una interesante tarea, especialmente por la posibilidad de que alguna de ellas pueda servir como refugio de evacuación vertical. Dentro de ese contexto, en este proyecto de título se propone una metodología cualitativa y cuantitativa para el análisis de las alternativas de evacuación de personas ante tsunami en el sistema urbano de la comuna de Valparaíso, entendido este como el *“conjunto de asentamientos ubicados en un determinado territorio, creados y organizados por la sociedad que los habita, y que mantienen relaciones entre sí”* (Fernández, 2006).

Considerando la planificación como un proceso de toma de decisiones, el ordenamiento objetivo de la información necesariamente optimiza dicho proceso. Con ese fin, en este estudio se analizan tres subcomponentes de vulnerabilidad ligadas al sufrimiento humano de personas arrastradas por tsunami (HS04), de acuerdo a la sistematización propuesta por Reyes (2013). La primera estudia la población expuesta a la amenaza por tsunami (HS04-01) utilizando la información disponible de la ciudad para caracterizar la amenaza de tsunami. La segunda vulnerabilidad considera el tiempo y/o temporada del escenario de amenaza y residentes o población expuesta (HS04-02), basado en la ocurrencia de la amenaza en tres escenarios hipotéticos representativos del funcionamiento de la ciudad, ya sea en un día laboral, una noche de año nuevo o una noche de fin de semana de verano. La última vulnerabilidad evalúa la confiabilidad de la infraestructura de evacuación (HS04-04) con un ejercicio hipotético de evacuación por tsunami realizado en las calles Uruguay, Rodríguez, Francia, Edwards y Ecuador en el que a través de escalas cualitativas de impacto se evalúa la susceptibilidad de bloqueo y la confiabilidad de evacuación de las vías de evacuación.

Otra de las contribuciones de este estudio, es la caracterización de la oferta de estructuras de evacuación vertical con fichas de registro cualitativas en 13 edificios de la ciudad, que indican si se cumplen o no los criterios estructurales, hidrodinámicos y de ubicación propuestos en este estudio. Finalmente, se realiza un balance de oferta y demanda de evacuación horizontal y vertical.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Caracterizar el impacto ante la ocurrencia de tsunamis de campos cercanos en la ciudad de Valparaíso y generar herramientas que aporten en la planificación y evaluación de sus sistemas de evacuación.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir escenarios de amenaza de terremoto y tsunami de campo cercano en la ciudad de Valparaíso.
- Desarrollar una metodología cuantitativa y cualitativa para la caracterización de la oferta y demanda de evacuación horizontal en la ciudad de Valparaíso.
- Desarrollar una metodología cualitativa para la caracterización de la oferta y demanda de evacuación vertical en la ciudad de Valparaíso.
- Realizar balances de oferta y demanda de evacuación horizontal y vertical.

### **3 SITUACIÓN ACTUAL DEL MÉTODO**

La gestión del riesgo de desastres nace a raíz de la necesidad del ser humano y de los asentamientos humanos, de prepararse para enfrentar de mejor manera las amenazas a las que se encuentran expuestos. Este estudio se enfoca en los desastres naturales, particularmente ante a tsunami.

Según Cardona (2004) se entiende por desastre natural:

*“Ocurrencia de fenómenos severos de la naturaleza que conllevan enormes pérdidas materiales y vidas humanas, ocasionadas por eventos naturales como tsunamis, terremotos, erupciones volcánicas, huracanes, inundaciones, movimiento de masa, entre otros”* (Cardona, 2004)

Chile se encuentra expuesto a amenazas naturales tales como terremotos, tsunamis, inundaciones, aluviones, sequías, tormentas y erupciones volcánicas, entre otros. El carácter cíclico de estos desastres y la exposición de la ciudad ante ellos, obliga a incorporar la gestión del riesgo en las grandes discusiones a nivel país, siendo fundamental disminuir el riesgo en las comunidades para generar una mayor resiliencia en la población.

Para Cardona (2004), la gestión del riesgo de desastres requiere más que medir sólo el riesgo y factores como el daño físico, pérdidas de vida y económicas, también deben tomarse en cuenta las variables sociales, organizacionales y factores institucionales. En este sentido, para comprender el riesgo se debe tener en cuenta que se trata de un concepto complejo y extraño que representa algo que parece irreal, relacionado con el azar y las posibilidades, pues se asocia con algo que aún no ha sucedido. En efecto, si hay certeza no hay riesgo (Cardona, 2004).

El riesgo se comporta de manera distinta si se evalúa a nivel local o a nivel nacional. Es por este motivo que Cardona (2004), sugiere que el riesgo debe presentarse y explicarse de una manera suficientemente atractiva que sea capaz de llamar la atención de las autoridades e inversionistas, ya que sin ellos no se puede avanzar en la gestión de desastres ni en la disminución del impacto en las comunidades. Reyes (2013) desarrolla un análisis de distintas propuestas para la evaluación del riesgo de desastres naturales, optando por la que se presenta en la Ecuación 1. En ella se considera el riesgo como el producto entre la probabilidad de ocurrencia de la amenaza y el impacto, que depende de la exposición y la vulnerabilidad del sistema.

$$R = P \times I$$

Ecuación 1 Cálculo del Riesgo (Reyes, 2013).

R: Riesgo.

P: Probabilidad de ocurrencia de una amenaza.

I: Impacto o nivel de consecuencias, dependiente de la vulnerabilidad y exposición.

El impacto producido por una amenaza natural sobre un sistema humano presenta numerosas componentes de incerteza, tanto respecto a las condiciones de exposición como a las vulnerabilidades propias del sistema. En particular, para los sistemas urbanos existen incontables complejidades y dinámicas que pueden llegar a ser obstáculos para entender y gestionar sus vulnerabilidades. En el trabajo de Reyes (2013) las vulnerabilidades del sistema urbano se descomponen en un árbol con conectores lógicos causa-consecuencia, logrando desagregar los impactos y el riesgo en distintos niveles y dimensiones, utilizando para ello la Ecuación 1. Adicionalmente, en el mismo estudio se propone utilizar el proceso de jerarquización analítica (AHP, por sus siglas en inglés) para asignar pesos o factores de importancia a cada una de las componentes de vulnerabilidad del sistema bajo análisis. Finalmente, Reyes (2013) propone el uso de escalas cualitativas como complemento o alternativa para la medición de las vulnerabilidades y/o impactos, que en conjunto con la aplicación del AHP permite obtener indicadores de riesgo por niveles o en la globalidad del sistema.

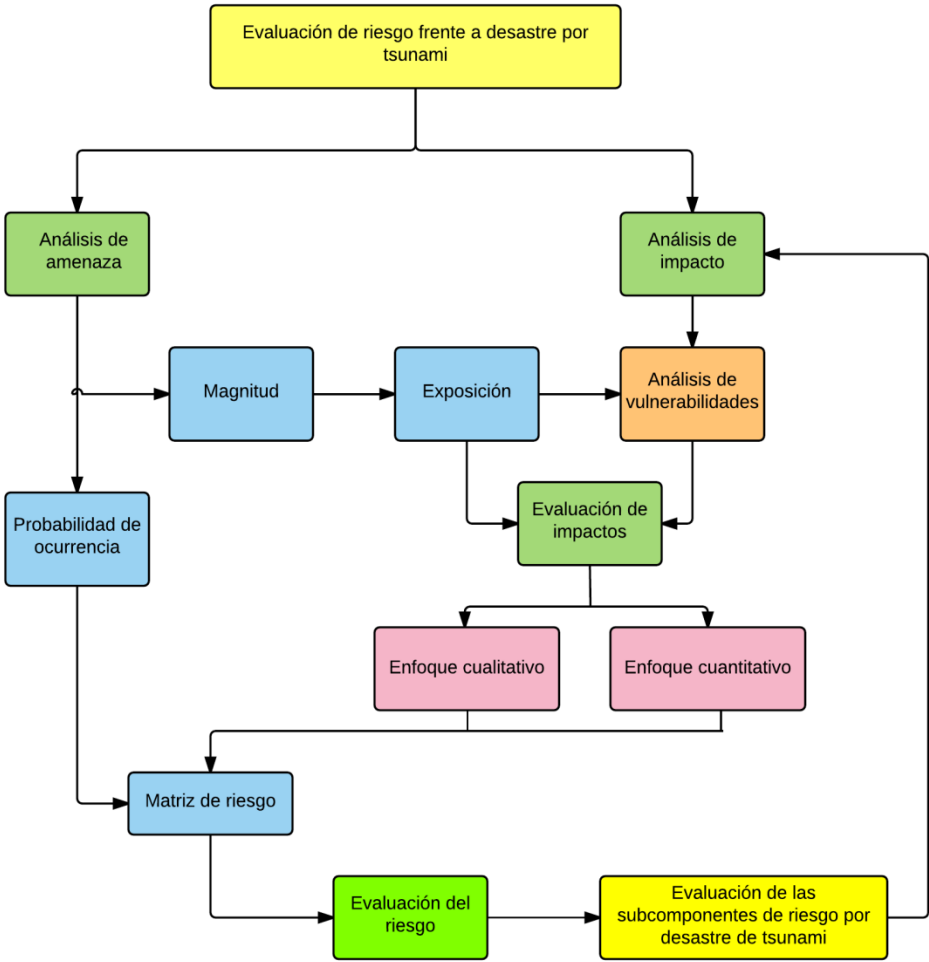


Figura 1 Esquema de evaluación riesgo por tsunami. Adaptado de Reyes (2013).

## 3.1 ESTUDIO DE AMENAZA

### 3.1.1 AMENAZA

El concepto de amenaza considerado en este estudio se basa en el enfoque holístico propuesto por Cardona (2004) que guarda relación con una visión transversal de la gestión de desastres naturales, es decir, incluyendo no sólo factores asociados a la física de los fenómenos sino también a la interacción con la sociedad, marco regulatorio vigente, política y comportamiento humano. El mismo autor señala textualmente la siguiente definición para la amenaza:

*“Peligro latente o factor de riesgo externo de un sistema o un sujeto expuesto, que se puede expresar en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado”* (Cardona, 2004).

### 3.1.2 GRANDES TERREMOTOS Y TSUNAMIS EN EL MUNDO

Debido a que en este capítulo las variables de altura, profundidad y cota máxima de inundación por tsunami se utilizan en extenso, dirigirse al apartado GLOSARIO para ahondar en la definición de cada uno de ellas.

A continuación, se desarrolla el estudio de amenaza sísmica y ante tsunami.

La intensa actividad sísmica que poseen ciertas regiones del mundo ha generado interés científico por entender la dinámica de la tierra, información que se ha convertido en una poderosa herramienta para preparar a la población expuesta. Debido a la ocurrencia y al carácter cíclico de estos desastres, especialmente terremotos y tsunamis, es que en las últimas décadas los gobiernos han aumentado su interés por conocer estos fenómenos e implementar medidas de mitigación.

En este contexto, después del mega terremoto chileno de 1960 y el terremoto de Alaska de 1964 se produjo un aumento importante en materia de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente en Chile, Estados Unidos y Japón.

A partir de la década del 80, la implementación paulatina de redes sismológicas en países del mundo como Chile, Perú, Ecuador, Puerto Rico y Estados Unidos, significó un cuantioso aumento en la información sísmica disponible, facilitando un mayor conocimiento de la actividad sísmica a nivel mundial.

En la última década, y después de los terremotos de Sumatra- Andamán en 2004, Chile en 2010 y Japón en 2011, se han mejorado bastante en estos países los sistemas de alarma/alerta, redes sismológicas, cartas de inundación por tsunami, marcos regulatorios, normas sísmicas y coordinación con organismos internacionales como el Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) y el United States Geological Survey (USGS). En el año 2005, tras la devastación producto del tsunami de Sumatra-Andamán en varios países del Océano Índico como India, Sri Lanka, Indonesia y Tailandia, se forma el sistema de alerta ante tsunami del Océano Índico, el Indian Ocean Tsunami Warning Center (IOTWC).

En Tabla 1, una compilación de los terremotos con magnitud superior a 8.5 en el mundo.

Los países que predominan en esta lista son:

- Chile, con los eventos de 1730 (Ms 8.7), 1868 (Mw 9.0), 1922 (Mw 8.5), 1960 (Mw 9.5) y 2010 (Mw 8.8).
- Indonesia, con los eventos de 2004 (Mw 9.1), 2005 (Mw 8.6), 2007 (Mw 8.5) y 2012 (Mw 8.6).

Tabla 1 Grandes terremotos a nivel mundial.

AÑO	MES	DÍA	LUGAR	MAGNITUD Ms-Mw
1960	5	22	Valdivia, Chile	9.5
1964	3	28	Alaska	9.2
2004	12	26	Sumatra-Andamán, Indonesia	9.1
2011	3	11	Honshu, Japón	9
1952	11	4	Kamchatka	9
1868	8	13	Arica, Chile	9
1700	1	26	Cascadia	9
2010	2	27	Biobío, Chile	8.8
1906	1	31	Esmeralda, Ecuador	8.8
1965	2	4	Islas Rat, Alaska	8.7
1755	11	1	Lisboa, Portugal	8.7
1730	7	8	Valparaíso, Chile	8.7
2012	4	11	Norte de Sumatra, Indonesia	8.6
2005	3	28	Norte de Sumatra, Indonesia	8.6
1957	3	9	Islas Andreanof , Alaska	8.6
1950	8	15	Assam - Tíbet	8.6
2007	9	12	Sur de Sumatra, Indonesia	8.5
1963	10	13	Islas Kuril	8.5
1938	2	1	Banda Sea, Indonesia	8.5
1923	2	3	Kamchatka	8.5
1922	11	11	Norte de Chile	8.5

Fuente: Elaborado con data de USGS (2013).

El mayor terremoto registrado en la historia instrumental moderna, ocurrió el 22 de Mayo de 1960 en la ciudad de Valdivia con una magnitud (Mw) de 9.5. Sigue en la lista el terremoto de Alaska de 1964 (Mw 9.2), el devastador terremoto de 2004 en Indonesia (Mw 9.1) y el reciente terremoto de Japón (Mw 9).

Los terremotos históricos de 1730, 1868, 1906 y los terremotos instrumentales de 2004, 2010 y 2011 se caracterizaron por generar tsunamis altamente destructivos con propagaciones de miles de kilómetros a lo largo de los océanos Índico y Pacífico (Lagos, 2000; Lagos & Cisternas, 2008; Lockridge, 1985; USGS, 2009; Reyes, 2013).

### 3.1.2.1 TERREMOTO DE ALASKA

El 27 de Marzo de 1964 un terremoto gigante de magnitud Mw 9.2 se produjo en la zona de la fosa de las Aleutianas, donde la placa Pacífica subducta bajo la placa

Norteamericana (Figura 2). Su longitud de ruptura se estima en 900 [km] y la duración del terremoto en 4.5 [min]. Este megaterremoto es el mayor ocurrido en Estados Unidos y es el segundo terremoto de mayor magnitud del que se tenga registro instrumental (Brocher et al., 2014).

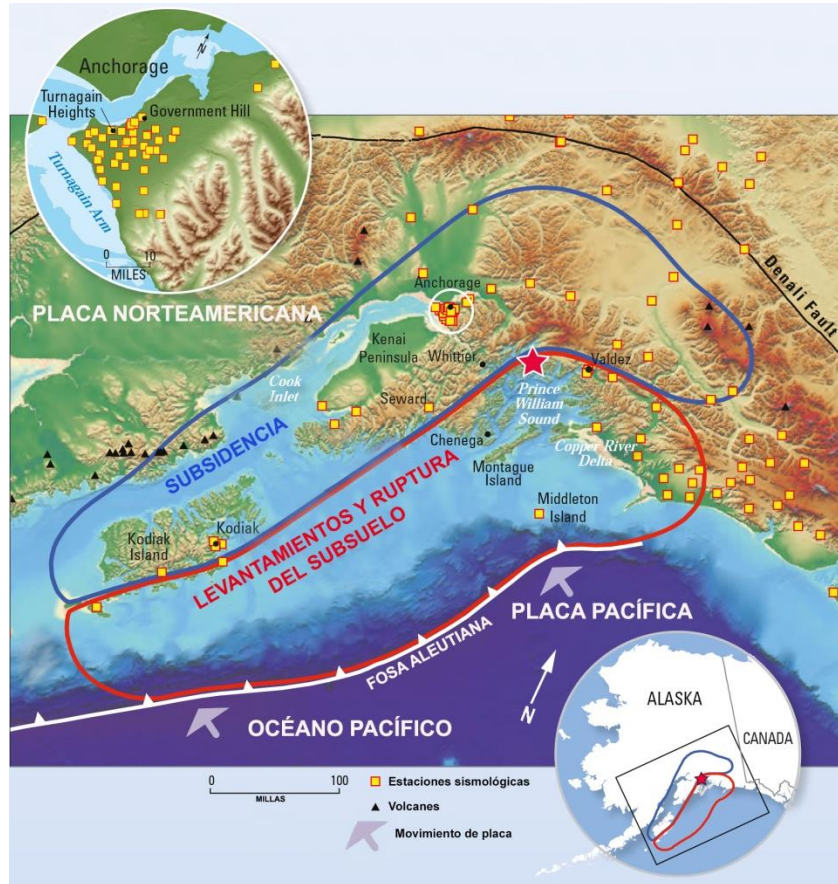


Figura 2 Terremoto de Alaska 1964, tectónica de placas. Adaptado de Brocher et al. (2014).

Los segmentos de placa que rompieron se deslizaron 9 [m] en algunos sectores, llegando inclusive a 18 [m] en otros. Habiéndose liberado una enorme cantidad de energía, los daños fueron cuantiosos y se extendieron por varios estados del país. La ciudad de Anchorage ubicada al oeste de la zona de ruptura sufrió daños importantes en su infraestructura portuaria y vial. Otras ciudades alejadas del epicentro como Seattle y Washington también registraron daños. Se observaron cambios en la topografía como consecuencia de subsidencias y levantamientos cosísmicos (Figura 2) (Brocher et al., 2014).

Producto de este gran terremoto se generó un tsunami cuya propagación por el Océano Pacífico causó daños en las ciudades costeras de California y Oregon. Deslizamientos de laderas submarinas en las cercanías del epicentro a causa del terremoto generaron tsunamis casi instantáneos en las proximidades de las zonas costeras de Whittier, Valdez y Seward. En Chena, 4 minutos después del terremoto arribó a la costa una primera ola

de 19 [m]. La acción combinada de ambos fenómenos dejó 129 fallecidos (Brocher et al., 2014).

### 3.1.2.2 TERREMOTO DE SUMATRA-ANDAMÁN, INDONESIA

El 26 de Diciembre de 2004 a las 8:00 am, hora local (00:56:53 UTC) se produjo un terremoto de magnitud Mw 9.3 costa afuera del sector norte de Banda Aceh en Sumatra, Indonesia (Dalrymple & Kriebel, 2005; Liu, 2005). El terremoto se generó en la zona de subducción existente entre la placa Indo-Australiana y la microplaca de Burma (Figura 3), donde la primera subducta bajo la otra a una velocidad de 6 [cm/año] (Liu, 2005; Satake, 2014). La longitud de ruptura se extendió por 1200 [km] con una duración superior a los tres minutos, el deslizamiento máximo entre placas fue de 11 [m] y un ancho de 200 [km] (Liu, 2005; Synolakis, Okal, & Bernard, 2005). Los efectos cosísmicos en las zonas costeras se extendieron por 1600 [km], desde Sumatra hasta el sector norte de la isla de Andaman (Satake, 2014).

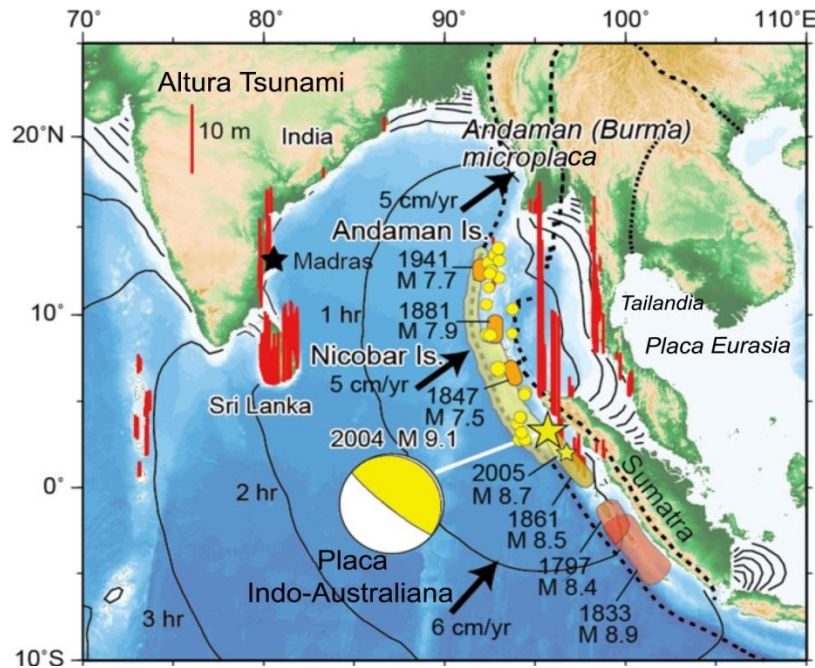


Figura 3 Epicentro, magnitud, altura de inundación y diagrama *beach ball* terremoto de Sumatra. Adaptado de Satake (2014).

Producto de este gran terremoto se generó un tsunami que se propagó a lo largo del Océano Índico afectando países como Tailandia, Indonesia, Sri Lanka, India, Maldivas y Somalia. Los mayores daños se registraron en la costa este de Sumatra, donde los registros indican alturas máximas de inundación de 35 [m]. En Banda Aceh la primera onda de tsunami llegó a las costas 30 minutos después del terremoto (Liu, 2005). En India, los daños llegaron hasta la central nuclear de Madras en Kalpakkam donde se registró una altura de 4.5 [m] (Satake, 2014). La cantidad de personas que perdieron sus viviendas producto del tsunami fueron alrededor de 1.5 millones, mientras que el número de muertos y desaparecidos alcanzó mas de 230.000 personas (Liu, 2005).

Los daños asociados al tsunami se intensificaron debido a que el flujo coincidió con la marea alta, por lo que la inundación avanzó con una mayor columna de agua (Dalrymple & Kriebel, 2005). Por otro lado, cabe señalar que la fecha en la que ocurrió este desastre fue uno de los peores escenarios posibles, pues coincidió con la temporada alta de turistas, los que en su mayoría eran extranjeros provenientes de países en los que la actividad sísmica no era tan elevada o inclusive nula, por lo que no tenían preparación frente a este tipo de desastres. En la Isla Phi Phi Don cerca de 10.000 personas estaban vacacionando en sus playas cuando la primera onda de tsunami llegó. Debido a la singular morfología de la isla llegaron trenes de onda en diversas direcciones, lo que produjo que el impacto por escombros fuera aún más severo, la altura en superficie alcanzó los 5 [m] dejando 2000 muertos (Dalrymple & Kriebel, 2005). Según Satake (2014) de las 8.000 personas muertas en Tailandia, la mitad de ellas eran turistas extranjeros.

Este gran terremoto, el tercero más grande del que se tenga registro instrumental, causó gran sorpresa en la comunidad científica, ya que se produjo en una zona de subducción en la que no existía evidencia ni registro histórico sugerente de la ocurrencia de un terremoto tan destructivo (Figura 4) (USGS, 2013). Alrededor del mundo los terremotos gigantes sólo se habían producido en zonas de subducción jóvenes (10 millones de años) con velocidades de desplazamiento mayores (McCaffrey, 2007). Debido a este desconocimiento es que los países azotados no tuvieron la planificación ni pudieron prepararse para tan devastador desastre (Lagos & Cisternas, 2008) razón por la que se produjo tanta cantidad de muertes.

Cabe destacar que como principal lección, este terremoto, dejó clara la necesidad de contar con un sistema de alerta en el Océano Índico. Muchas de las localidades arrasadas no percibieron el terremoto, razón por la que no tuvieron ocasión de advertir la posible ocurrencia de un tsunami ni menos realizar una evacuación preventiva. Este es uno de los principales motivos de la gran cantidad de muertes registradas, ya que la población no tuvo oportunidad de ponerse a salvo ante el tsunami.

Otra de las conclusiones de esta tremenda catástrofe es el largo camino que queda por recorrer en materia investigativa y en materia de gestión del riesgo, una correcta caracterización de la amenaza y políticas públicas eficientes por parte de los gobiernos sí que pueden hacer la diferencia al momento de disminuir el riesgo frente a este tipo de desastres. No se deben ignorar las zonas de subducción a lo largo del mundo, enfocarse en algunas e ignorar otras puede ser muy perjudicial especialmente aquellas que poseen bordes costeros densamente poblados en que los efectos de terremotos y tsunamis no pueden subestimarse. Cada segmento de estas zonas posee el largo suficiente para producir un terremoto gigante, en especial aquellas que se desplazan a mayores velocidades. A pesar de ello, se requiere mucho más tiempo e inclusive muchos más terremotos para conocer el patrón de comportamiento de las zonas de subducción (McCaffrey, 2007).

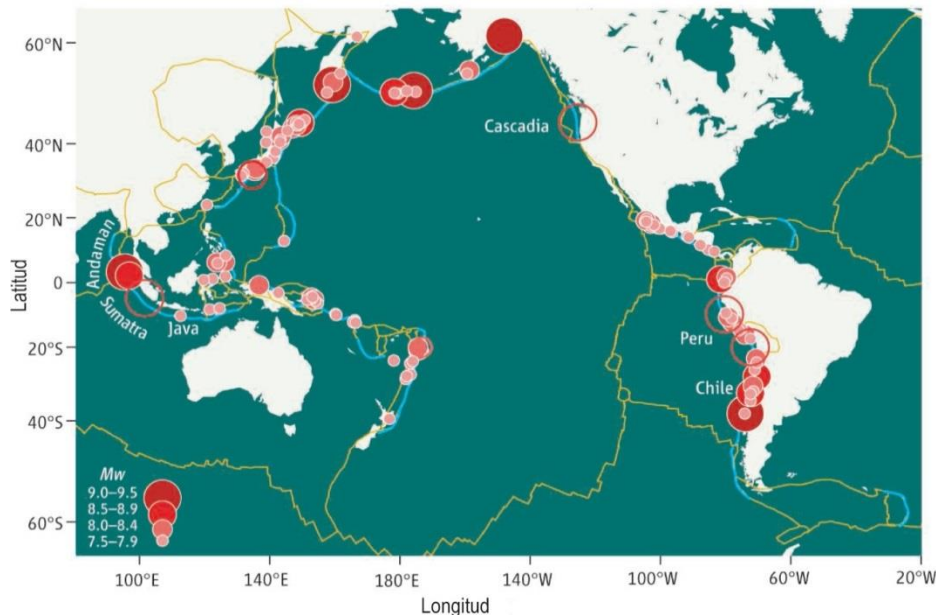


Figura 4 Zonas de subducción y placas tectónicas. Adaptado de McCaffrey (2007).

En Figura 4, zonas de subducción en líneas azules y placas tectónicas en líneas amarillas. Círculos rellenos indican ubicación de terremotos con magnitudes mayores a 7.5 a partir de 1900. Círculos vacíos indican la ocurrencia de terremotos inferidos entre 1700 y 1900. Los segmentos que están libres de terremotos de magnitud 9 en los últimos 100 años los tuvieron en los 200 años anteriores.

### 3.1.2.3 TERREMOTO DE TOHOKU, JAPÓN

El 11 de Marzo de 2011 a las 14:43 hora local (5:43:26 UTC) se produjo un megaterremoto de falla inversa producto de la subducción de la Placa del Pacífico por debajo de la placa Euroasiática, en el borde noreste de la isla de Honshu (Satake, 2014). El epicentro se produjo en la costa noreste de la Región de Tohoku, costa afuera de la Prefectura de Miyagi, Japón. Con una magnitud Mw 9, la longitud de ruptura se entendió por 450 [km] con un ancho de 200 [km] (Kobayashi, Mikio, Takuya, Akira, Noguchi, & Yamanaka, 2011; Mori, Takahashi, Yasuda, & Yanagisawa, 2011). Este evento ha sido el mayor terremoto ocurrido en la historia de Japón (Satake, 2014)

Producto de este gran terremoto se generó un devastador tsunami que afectó las costas japonesas del Pacífico Este, a lo largo de 2000 [km] (Figura 5), donde se ubican cuatro estaciones nucleares, entre ellas la central de Fukushima (Satake, 2014). La inundación llegó 20 minutos después de ocurrido el terremoto (Mori, Takahashi, Yasuda, & Yanagisawa, 2011). Ambos fenómenos naturales causaron la muerte de aproximadamente 20.000 personas, de las cuales el 90% fallecieron ahogadas (Satake, Rabinovich, Dominey-Howes, & Borrero, 2013). La superficie de inundación por tsunami se estimó en 500 km<sup>2</sup>, las prefecturas de Sanriku, Miyagi, Fukushima e Ibaraki fueron las más afectadas. De los datos de campo recopilados en las costas japonesas debido al tsunami, fue posible determinar alturas máximas de hasta 39 [m] en la Región de Sanriku, mientras que en Sendai y Fukushima las alturas variaron entre los 7 y 15 [m] (Imamura & Anawat, 2012). En lugares con topografías más planas como es el caso de la Bahía de

Sendai, los efectos del tsunami se extendieron por más de 5 [km] tierra adentro (Imamura & Anawat, 2012; Mori, Takahashi, Yasuda, & Yanagisawa, 2011).

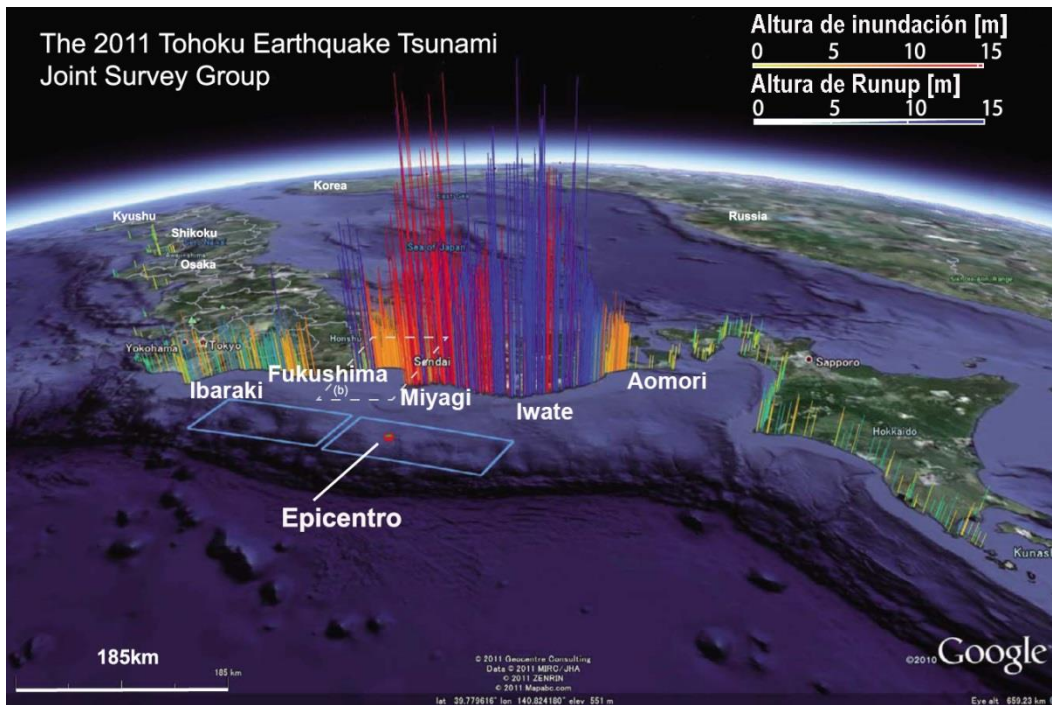


Figura 5 Altura de inundación y altura máxima alcanzada en superficie (Runup), terremoto de Tohoku, Japón. Adaptada de Mori, Takahashi, Yasuda, & Yanagisawa (2011).

La destrucción debido al tsunami afectó carreteras, rompeolas de protección frente a tsunami, líneas ferroviarias, casas, edificios e infraestructura portuaria en Hitachinaka, Hitachi, Soma, Shiogama, Kesenuma, Ofunato, Kamashi y Miyako. Alrededor de 359.073 casas fueron destruidas, así como también 230.000 autos y camiones (Figura 6). La cantidad de escombros que dejó el paso del tsunami fue de 22.633.000 toneladas (Imamura & Anawat, 2012). Es preciso destacar que a pesar de la gran inversión (billones de dólares) en infraestructura costera para evitar inundaciones severas por tsunamis, los muros rompeolas que superan los 12 [m] de altura y abarcan en extensión el 40% de la costa japonesa, presentaron rebases y colapsos en algunos sectores (Imamura & Anawat, 2012).

El sistema japonés de alerta temprana ante terremotos se activó ocho segundos después de la detección de la primera onda P. La alerta de tsunami fue emitida tres minutos después del terremoto (Imamura & Anawat, 2012).



Figura 6 Daños a sectores residenciales, autos, camiones y escombros debido a la acción del tsunami en el sector de Kesennuma, Japón (Imamura & Anawat, 2012).

Una de las mayores sorpresas que causó este terremoto en la comunidad científica fue la subestimación del mismo, ya que los mapas de amenaza sísmica para Tohoku estaban diseñados para un terremoto de magnitud 7.7, muy inferior al 9.0 que en realidad ocurrió. Según Mori et al. (2011) la Región de Tohoku era una de las mejores preparadas para enfrentar un tsunami, debido a que contaban con barreras frente a tsunami tanto costa afuera como en tierra, la preparación de la población para enfrentar este tipo de eventos se había realizado a través de ejercicios de evacuación, existían estructuras de evacuación vertical especialmente diseñadas y hectáreas de barreras naturales que podían reducir velocidades de flujo. El gobierno japonés, por otro lado, manejaba una probabilidad de ocurrencia de 99%, dentro de los próximos 30 años, para un terremoto costa afuera de la prefectura de Miyagi, de magnitud 7.4 con una longitud de ruptura cercana a los 200 [km].

La variabilidad que presentan los mecanismos de ruptura de placas en las zonas de subducción existentes a lo largo del mundo y la incerteza existente en la predicción instantánea de alturas de ola utilizada por los sistemas de alerta temprana ante tsunami, ha sido una de las grandes enseñanzas que ha dejado este terremoto en la comunidad científica. El deslizamiento entre placas y la consecuente propagación de la fractura del fondo marino al momento del terremoto, son aspectos que deben manejarse con premura al momento de alertar a la población frente a evacuaciones por tsunami. En Japón, a pesar de poseer un sistema robusto de alerta por tsunami, se cometieron errores en la estimación de la altura de inundación en las costas de Tohoku, debido a que la altura de la primera ola no fue la mayor, inmediatamente después de esa primera onda venía una segunda cresta de mayor altura, es por esta razón que la altura de ola dada en la alerta fue superada por la siguiente onda. Producto de esto, algunas personas se confiaron y no evacuaron a lugares lo suficientemente altos como para estar a salvo.

### 3.1.3 GRANDES TERREMOTOS Y TSUNAMIS EN CHILE

### 3.1.3.1 CONTEXTO TECTÓNICO

Chile es considerado como uno de los países más sísmicos del mundo, después de Japón (Gusiakov, 2005; Lomnitz, 2004). Esta alta actividad sísmica se debe a que el país se ubica en la zona de convergencia de placas entre la corteza Oceánica (Placa Nazca) y la corteza Continental (Placa Sudamericana), una de las más activas del mundo (Lomnitz, 2004). Se estima que entre un 15% y 20% de la energía sísmica total del planeta se libera en Sudamérica (Giesecke, 2004; Lomnitz, 2004; Lagos & Cisternas, 2008). En promedio, cada 10 años se produce un terremoto de magnitud superior a 8 (Madariaga, Métois, Vigny, & Campos, 2010)

La Placa de Nazca, al ser más densa que la Placa Sudamericana, subducta bajo ésta a una tasa de 8-10 [cm/año] en dirección Nor-Este (Figura 7), una de las mayores velocidades de placas en el mundo (Bernal & Tavera, 2002; Lomnitz, 2004; Pararas-Carayannis, 2010).

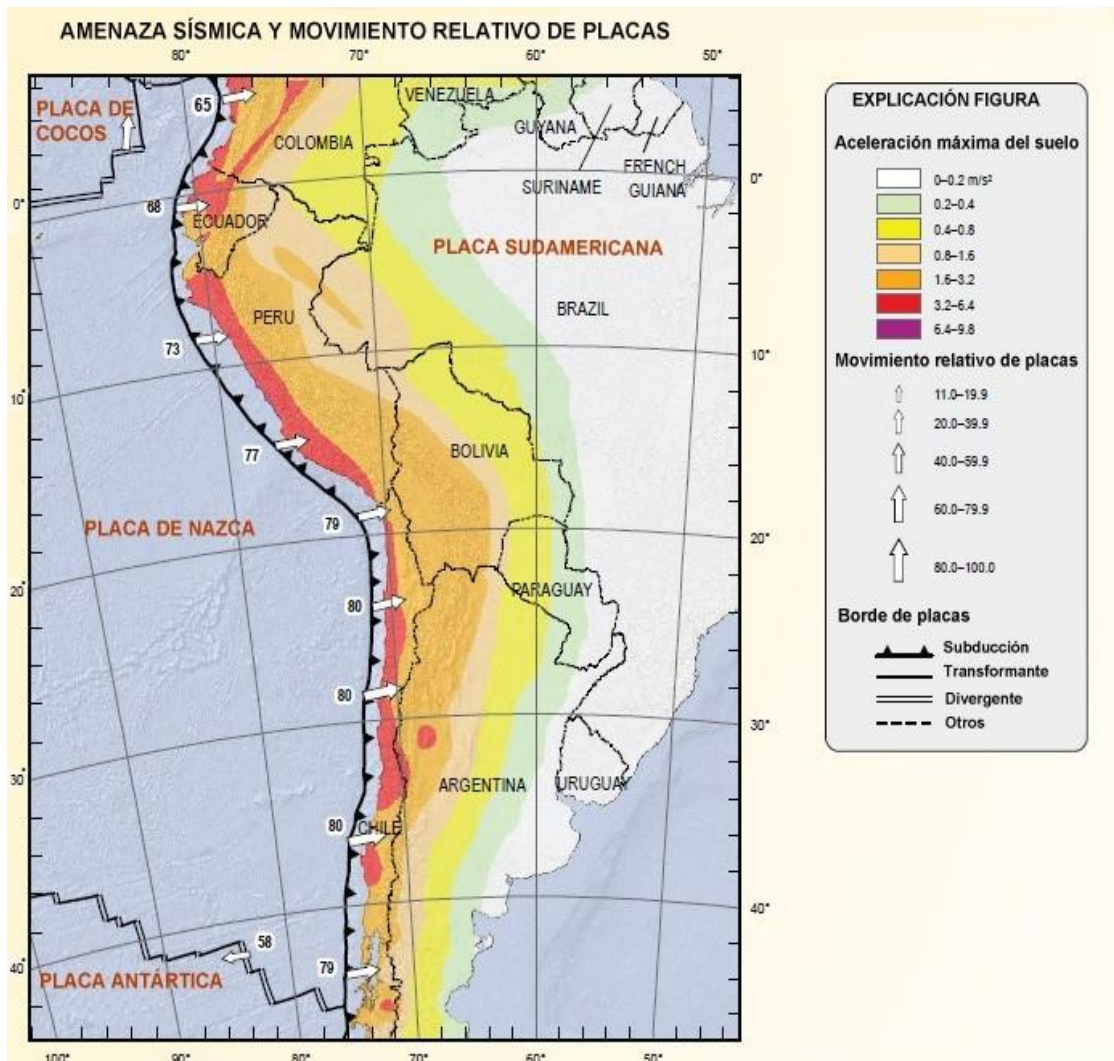


Figura 7 Movimiento relativo de placas en Sudamérica. Adaptado de Rhea (2010).

A medida que las placas se tensionan, se genera una compresión en la placa superior por lo que la deformación comienza a aumentar lentamente, al igual que la acumulación de energía elástica, demorándose años e inclusive décadas en destrabarse (USGS, 2009). Una vez que se produce este destrabe, se generan sismos con o sin potencial tsunamigénico, dependiendo de su profundidad y energía liberada (magnitud).

En Figura 8, se presenta un esquema de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, en el que se distinguen diferentes tipos de sismos.

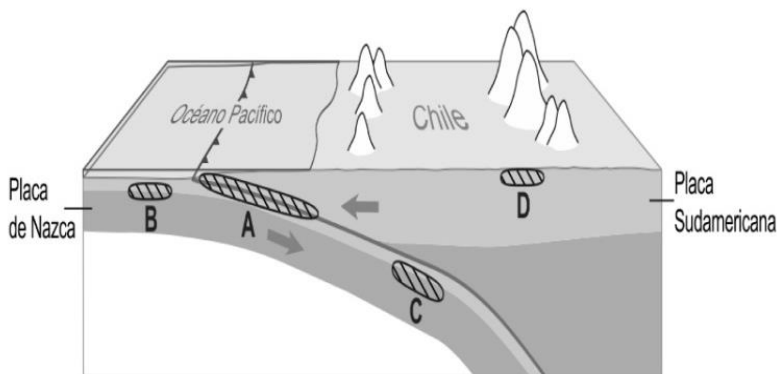


Figura 8 Zona de subducción Chile central (Cisternas, 2012).

Los sismos interplaca (**A**) se producen por el contacto entre ambas placas y la constante acumulación de tensiones. Se genera cuando las placas son capaces de destrabarse y su magnitud varía proporcionalmente al área desplazada y a la longitud. Estos sismos destacan por ser los de mayor magnitud como es el caso del terremoto de Valdivia de 1960 (Mw 9.5) y el del Maule de 2010 (Mw 8.8) (CSN, 2014; Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010), entre otros.

Los sismos outer-rise (**B**) se generan costa afuera de la fosa oceánica y se producen por la deformación de la placa de Nazca previo al proceso de subducción. Se caracterizan por generar sismos de magnitud intermedia producidos aproximadamente a 150 [km] de la costa. Un ejemplo es el terremoto de Valparaíso ocurrido en el año 2001 de magnitud Mw 6.7 (CSN, 2014; Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010).

Los sismos intraplaca de la placa de Nazca o sismos de profundidad intermedia (**C**) se producen al interior de la placa oceánica de Nazca, generalmente a partir de los 60 [km] de profundidad. Ejemplos de estos tipos de sismos son; el terremoto de Chillán de 1939 (Mw 8.3), el de Calama en 1950, el de Punitaqui en 1997 (Mw 7.1) y el de Tarapacá en 2005 (CSN, 2014; Madariaga, 1998; Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010)

Los sismos intraplaca continental o corticales (**D**) se producen al interior de la placa continental en fallas sísmicamente activas a profundidades menores de 30 [km]. Son de características superficiales y se generan entorno a la Cordillera de los Andes, tanto por el lado argentino como chileno. Un ejemplo de estos sismos es el terremoto del Cajón del Maipo, Santiago en 1958 (Madariaga, 1998; Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010). Es importante señalar que este tipo de sismos aunque sean menores en magnitud y menos frecuentes que los sismos interplaca, se caracterizan por causar serios daños en las ciudades densamente pobladas, a causa de que pueden producirse muy cerca de las

zonas habitadas y no costa afuera como los sismos interplaca (Madariaga, 1998). La falta de registros instrumentales y la mayor escala temporal en la que se generan estos sismos dificulta su estudio, por ello es imprescindible realizar estudios geológicos en las fallas activas del país. En Santiago, un estudio paleosísmico desarrollado por Vargas et al. (2014), en la falla activa de San Ramón, señala la potencial ocurrencia futura de un terremoto cortical de magnitud Mw 7.5.

Cabe destacar que independientemente del estudio de la sismología, las zonas de subducción a lo largo de todo el mundo poseen una singular importancia científica en el área de la geodinámica de la tierra, ya que permiten estudiar el comportamiento de los diversos fenómenos que se producen al interior de la tierra (Bernal & Tavera, 2002).

En el caso de Chile, la longitud de la zona de subducción se extiende 4500 [km] a lo largo de la costa, Figura 7 (Lagos & Cisternas, 2008). La trascendencia de esta zona, se debe a la formación de cordones montañosos, volcanes y mesetas, en la que destaca la Cordillera de Los Andes que se extiende de Norte a Sur por todo el borde oceánico de Sudamérica, abarcando desde Venezuela hasta Tierra del Fuego (Bernal & Tavera, 2002).

A lo largo de la zona de subducción chilena, los ángulos de subducción varían entre sí y se dividen en tres segmentos. El primero corresponde a la zona del Norte Grande, entre los 15°S y 27°S, donde la placa de Nazca subducta bajo la placa Sudamericana con un ángulo entre los 25° y 30°. Dicho segmento se caracteriza por la presencia de volcanes activos, la Cordillera de la Costa y una meseta intermedia. En la segunda zona, ubicada entre los 26°S y 33°S, la placa de Nazca desciende por el continente justo por debajo de la Cordillera de Los Andes y Argentina, con un ángulo de 10°. Debido a este ángulo la presencia de volcanes es nula y se observa una alta sismicidad por parte de Argentina, en las ciudades de San Juan y Mendoza. La última zona, del valle central, a partir de los 33°S se inclina nuevamente hasta alcanzar los 30°. En este tramo la presencia de volcanes activos aumenta y también se presenta un valle central bien desarrollado (Madariaga, 1998).

Un estudio basado en la recopilación histórica de tsunamis ocurridos en el Océano Pacífico realizado por Gusiakov (2005) a partir de información emanada del proyecto Historical Tsunami Database (HTDB) entre los años 1901 y 2000, señala a la zona de subducción de Sudamérica con el mayor valor de eficiencia ante tsunami (84%), es decir, el mayor porcentaje de tsunamis generados por placas tectónicas, deslizamiento de masas y de origen desconocido (102 eventos), asociados al total de terremotos submarinos y costeros (122 eventos) ocurridos con potencial tsunamigénico, cuya profundidad de foco sea menor a 100 km y magnitud Ms superior a 7.0.

Con estos antecedentes, es evidente el gran potencial tsunamigénico de la región, lo que ciertamente representa una amenaza potencial para el país, en especial para las zonas costeras densamente pobladas que pueden ser afectadas por tsunamis.

### 3.1.3.2 TERREMOTOS HISTÓRICOS

A lo largo de la historia de Chile, se han producido devastadores y destructivos terremotos, muchos de ellos con potencial tsunamigénico. Uno de ellos corresponde al evento del 22 de Mayo de 1960, el mayor terremoto registrado en la historia instrumental

moderna con una magnitud Mw de 9.5. Dentro de los eventos más recientes se encuentra el terremoto y posterior tsunami del 27 de febrero de 2010 (Mw 8.8) y el terremoto de Iquique del 1 de Abril de 2014 (Mw 8.2) (Centro Sismológico Nacional, 2014).

La información disponible sobre los terremotos ocurridos en Chile, comienza en el año 1520 con los registros obtenidos de los escritos narrados por colonos españoles que a mediados del siglo XVI llegaron a conquistar Chile. En ellos, se relatan reconstrucciones de ciudades devastadas por fuertes terremotos (Reyes, 2013). Otras fuentes de información, de la misma época, se recopilaron gracias a cartas entregadas al Reino Español por el Vicegobernador de Chile Luíz López de Azoca (Cisternas, Torrejón, & Gorigoitia, 2012). De la misma manera, periódicos antiguos, notas personales, crónicas, registros de oficinas públicas, entre otros, fueron posteriormente recopilados por el científico francés Ferdinand Montessus de Ballore con la finalidad de completar el primer catálogo sísmico de Chile. Aportes posteriores fueron las contribuciones de Lomnitz en 1970 y Greve en 1964 (Giesecke, 2004).

En lo que respecta a la historia instrumental chilena, ésta comienza en el año 1980 cuando se densificó la primera red sismológica en la Región Metropolitana, que posteriormente se expandió hacia el sur de la zona centro del país, llegando hasta la ciudad de San Fernando (Centro Sismológico Nacional, 2014).

Según el listado de terremotos significativos elaborado por el National Geophysical Data Center (NGDC) en Figura 9, son 185 los eventos considerados desde el año 1520 hasta el último terremoto del norte del país ocurrido en abril de 2014.

Tal como se aprecia en Figura 9, la densidad de eventos registrados en el siglo XX es muy superior a la de siglos previos, con 86 terremotos versus los 58 del siglo XIX y los 7 del siglo XVII, esto debido a los avances tecnológicos, incremento de la población y la densificación de redes sismológicas.

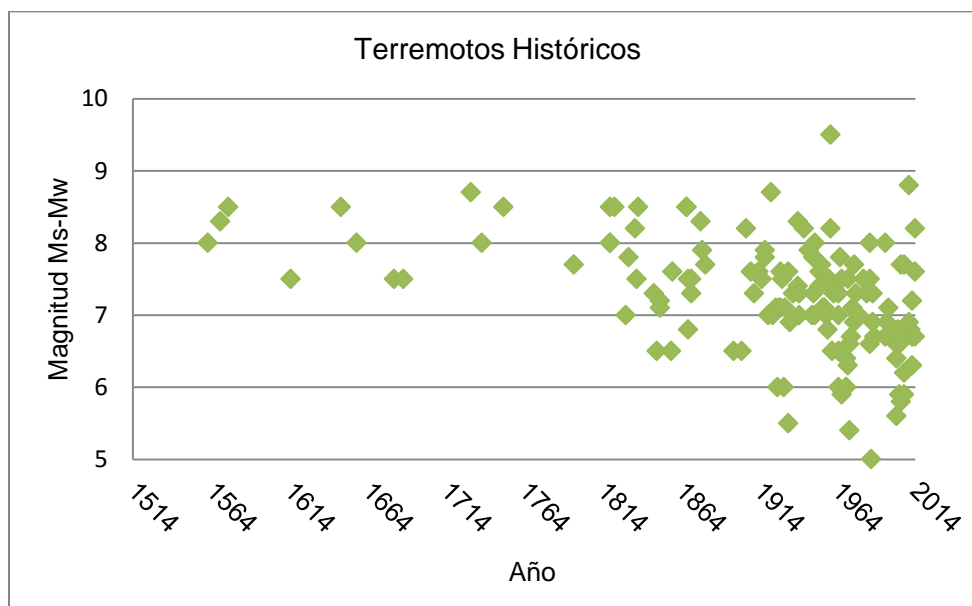


Figura 9 Terremotos históricos en Chile. Elaboración propia con datos de NGDC (2014).

### 3.1.3.2.1 TERREMOTO DE VALDIVIA 1960

El mayor terremoto registrado en la historia instrumental moderna es el de Valdivia de 1960, dicho evento fue de subducción con falla oblicua. A las 15:11 (hora local) del 22 de Mayo la tierra se remeció alarmando a la población de la zona centro sur del país. La energía liberada por este terremoto gigante de Mw 9.5 fue tan enorme, que se estima que el orden de magnitud fue dos veces mayor que la energía sísmica promedio anual liberada en todo el planeta. La falla se extendió por más de 1000 [km] a lo largo de la costa chilena con un ancho de 300 [km] y a una velocidad de 3.5 [km/s] (Lomnitz, 2004; Pararas-Carayannis, 2010). Cabe destacar que la secuencia sísmica de este terremoto gigante duró 33 horas, el día anterior al terremoto principal (21 de Mayo a las 6:02 am, hora local) se produjo un terremoto predecedor de Ms 7.8 con epicentro en Concepción que generó un tsunami menor y provocó serios daños en las ciudades cercanas. El segundo terremoto de magnitud Ms 7.9 se produjo a las 14:56 (hora local) del 22 de Mayo, 15 minutos antes del evento más destructivo (Lomnitz, 2004; Barrientos & Ward, 1990; Pararas-Carayannis, 2010).

Producto del terremoto varias ciudades costeras sufrieron subsidencia y levantamientos (Figura 10b), Valdivia se hundió 1 [m] ocasionando una inundación por tsunami aún más severa que destruyó campos de agricultura, casas y todo lo que encontró a su paso (Lagos & Cisternas, 2008). Se estima que 15.000 hectáreas de terrenos destinados a la agricultura quedaron sumergidos por la inundación (Barrientos & Ward, 1990). La Isla Guafo se levantó entre 3 y 4 [m] (Pararas- Carayannis, 2010).

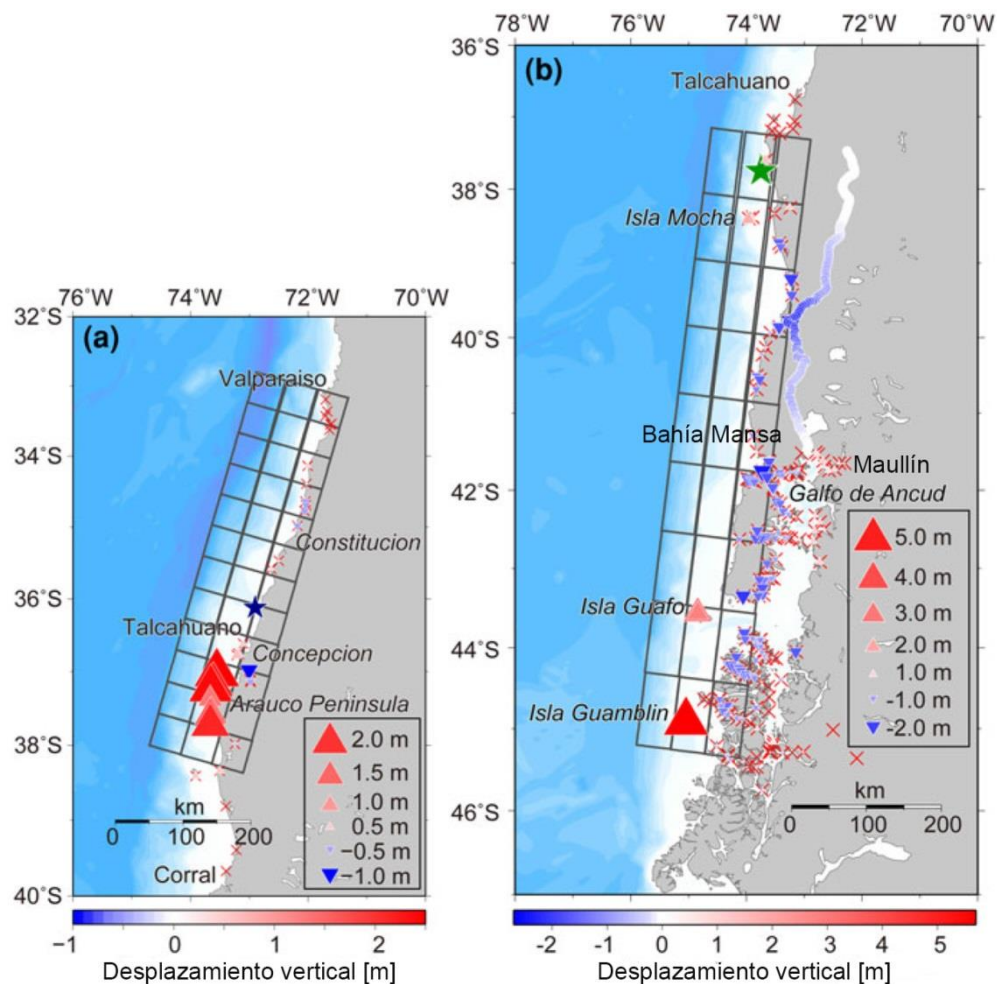


Figura 10 Desplazamientos verticales terremoto 2010 y 1960. Adaptado de Fujii & Satake (2012)

El posterior tsunami generado por este mega terremoto tuvo una magnitud  $m=4$  en la escala de Inamura e  $lida^1$  (adaptada por Wiegel), la cota máxima de inundación alcanzada en superficie (run up) fue de 25 [m]. En Maullín la altura de ola máxima alcanzó los 14 [m]. En Caleta Mansa la primera ola llegó con una altura de 8 [m], 15 minutos después de ocurrido el terremoto. El segundo tren de ondas alcanzó una altura de 10 [m] y la última 12 [m] (Pararas- Carayannis, 2010).

Los efectos de este gran tsunami además de observarse a lo largo de la costa chilena, generando daños en las localidades de Puerto Saavedra, Toltén, Queule, Corral y Maullín,

<sup>1</sup> Se define la magnitud del tsunami como  $m=\log_2 h$ , con "h" altura máxima de inundación (runup)

se extendieron por el Océano Pacífico causando daños en las costas de Hawaii, Japón, Nueva Zelanda, Papua Nueva Guinea y Australia (Lagos & Cisternas, 2004; USGS, 2009; Pararas-Carayannis, 2010). La máxima altura de ola registrada en Hawai fue de 12 [m], mientras que en Japón llegaron olas de hasta 7 [m] (Pararas- Carayannis, 2010).

La cifra de muertos según PNUD (2011) alcanzó las 6000 personas, sólo entre Concepción y Chiloé los muertos se cifraron en 2000 personas (Lomnitz, 2004). Las pérdidas económicas ascendieron a U\$ 550 millones, referido al dólar de la época (USGS, 2009).

#### 3.1.3.2.2 TERREMOTO DEL MAULE 2010

El 27 de Febrero de 2010 a las 3:34 se remeció el territorio chileno de la zona central del país. Un terremoto de subducción con falla oblicua de magnitud Mw 8.8, se generó costa afuera de la Región del Maule, en la localidad de Cobquecura (PNUD, 2012; Pararas-Carayannis, 2010). En la historia sísmica chilena este evento es el segundo terremoto de mayor magnitud, a nivel mundial se encuentra dentro de los cinco más destructivos (Fritz et al., 2011; Pararas-Carayannis, 2010).

La ruptura se localizó en el segmento norte de la ruptura del terremoto de Valdivia de 1960 (Figura 11) y se extendió por 550 [km], entre la Región de Valparaíso y la Araucanía ( 33°S y 37°S), con un ancho de más de 100 [km] y una profundidad de 50 [km], afectando un área total de 82.500 [km<sup>2</sup>]. Mediciones geodésicas estimaron que la ciudad de Concepción se desplazó 3 [m] hacia el oeste, mientras que Santiago se desplazó 20 [cm] en dirección oeste- suroeste (Pararas- Carayannis, 2010).

En Figura 11, la estrella azul indica el epicentro del terremoto de 2010 mientras que la estrella verde indica el epicentro del terremoto de 1960. Puntos rojos y diamantes verdes dan cuenta de las réplicas registradas al día siguiente de ambos terremotos, 2010 y 1960 respectivamente, según USGS. Las subrupturas se presentan en color amarillo para el evento de 2010 y en púrpura para el terremoto de 1960.

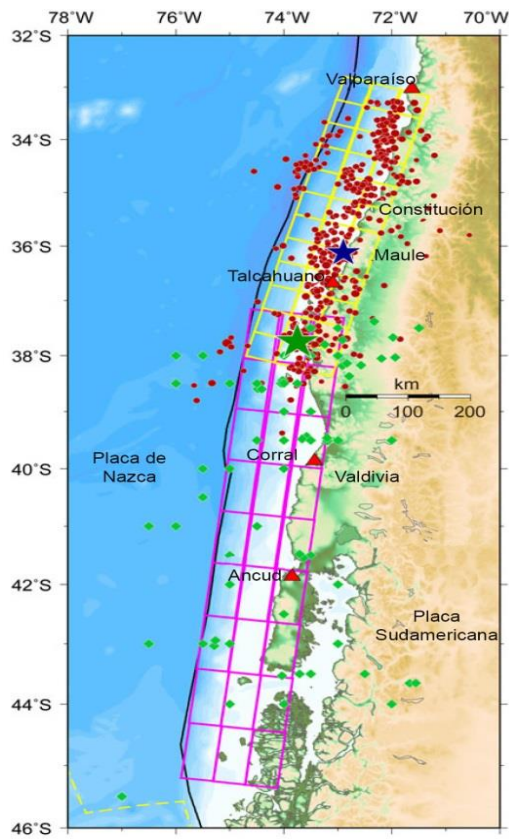


Figura 11 Epicentros y réplicas terremoto de 2010 y 1960. Adaptado de Fujii & Satake (2012).

Producto de este gran terremoto, se generó un devastador tsunami de campo cercano, que causó cuantiosos daños a lo largo de la costa chilena. Se estima que el mayor desplazamiento vertical del fondo marino fue de 2 [m] y se produjo al norte de Concepción, en el resto del área de ruptura los desplazamientos alcanzaron 50 [cm] (Pararas- Carayannis, 2010).

Las ciudades de Talcahuano, Coquimbo, Antofagasta, Caldera y Bahía Cumberland, fueron las más dañadas. Debido a las singularidades batimétricas y orientación de la bahía de Cumberland y Talcahuano la energía del tsunami se difractó hacia esos lugares acrecentando aún más los daños debido a los fenómenos de resonancia allí ocurridos. En esta última ciudad, la primera ola llegó 19 minutos después de ocurrido el terremoto, con una altura máxima de 2.34 [m]. En Dichato el 90% del pueblo fue arrasado por el tsunami, se estima que llegaron siete trenes de ondas de los cuales 6 fueron los más destructivos, la altura máxima alcanzada fue de 10 [m]. La cifra de muertos en esta localidad fue de 50 personas. En Valparaíso, 20 minutos después del terremoto llegó a las costas una ola con altura de 1.3 [m] (Pararas- Carayannis, 2010).

El mayor runup se registró en la ciudad de Constitución con 29 [m] (Figura 12). Según testigos oculares, arribaron a las costas entre uno y cuatro trenes de ondas. En la mayoría de las localidades la primera ola llegó 30 minutos después del terremoto. En los ríos Coliumbo y Tubul la inundación se extendió hasta por más de un kilómetro tierra adentro.

En las cercanías del Golfo de Arauco el levantamiento del terreno alcanzó los 3 [m], mientras que en la Isla Santa María 2 [m] (Fritz et al., 2011).

Los efectos del tsunami también se extendieron a otros países de América del Sur y del Norte, así como a la región Oeste del Océano Pacífico (Pararas- Carayannis, 2010). En las costas japonesas se reportaron alturas de ola de hasta 2 [m] y se reportaron daños menores debido al tsunami en jaulas destinadas a la acuicultura (Fujii & Satake, 2012). Según Contreras & Winckler (2013) dicho tsunami provocó la mayor cantidad de muertes asociadas a este tipo de eventos en los últimos 30 años en Sudamérica.

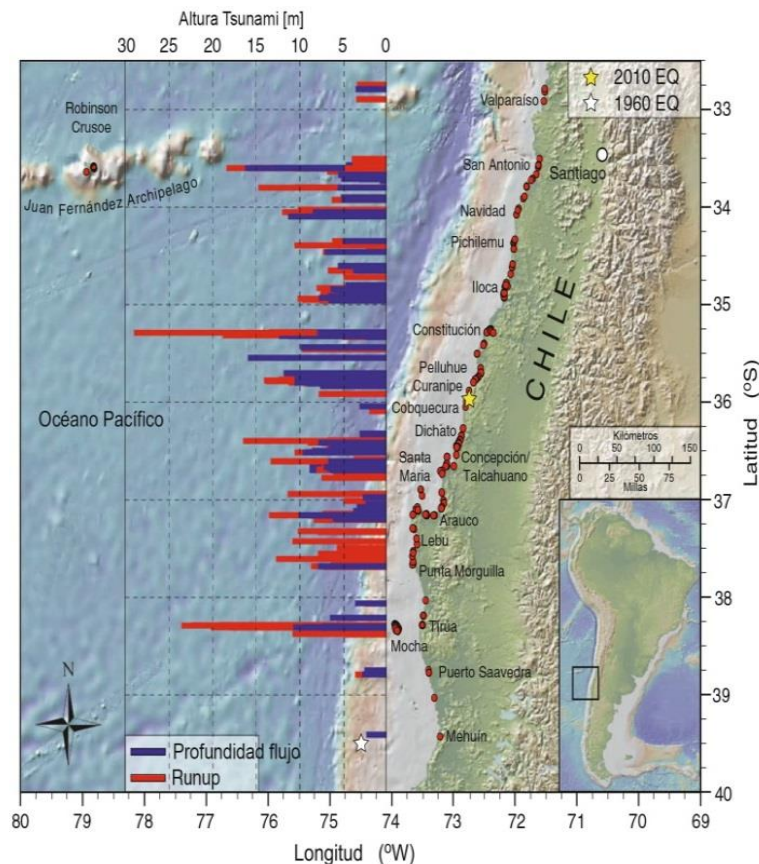


Figura 12 Profundidades de flujo y runup tsunami 2010. Adaptada de Fritz *et al.* (2011).

La acción conjunta de ambos fenómenos naturales, afectaron al 75% de la población del país, desde la V a la IX Región. La cifra de muertos fue de 521 personas, de las cuales 124 fallecieron a causa del tsunami, la mayoría de las muertes se debió a turistas que acampaban en las zonas bajas de los sectores costeros azotados (Fritz et al., 2011). Las pérdidas económicas se cifraron en US\$ 30.000 millones, equivalentes al 18% del PIB (Superintendencia de Valores y Seguros SVS).

### 3.1.3.2.3 TERREMOTO DE ILLAPEL 2015

El 16 de Septiembre de 2015 a las 19:54 hora local, un terremoto interplaca de falla inversa oblicua de magnitud Mw 8.4 con una longitud de ruptura entre 200-250 [km], 70

segundos de duración y un deslizamiento entre placas de 6-7 [m], tuvo lugar en la zona centro-norte del país. El epicentro localizado en la zona costera, 46 [km] al oeste de Illapel, dejó graves daños en la Región de Coquimbo (Aránguiz et al., 2015; USGS, 2015).

La ruptura (Figura 13) se localizó en el mismo segmento del terremoto magnitud Ms 8.3 de 1943, bordeando el límite sur del terremoto de 1922 Ms 8.4 y el límite norte del terremoto de Valparaíso de 1985 Ms 7.8 (Aránguiz et al., 2015; USGS, 2015).

Debido al mecanismo inverso de la falla, profundidad menor a 20 [km] e hipocentro oceánico, se desencadenó un tsunami de campo cercano cuya propagación se extendió a lo largo de toda la costa chilena, emitiéndose alarma de tsunami desde la primera a la duodécima Región (USGS, 2015).

Las lecciones aprendidas después del terremoto del Maule de 2010, quedaron evidenciadas en este terremoto. Las personas siguieron las instrucciones de la autoridad y evacuaron la zona costera con normalidad. Las sirenas ubicadas en el borde costero alertaron a la población sobre la amenaza de tsunami y el sistema de mensajería de texto en celulares también alertó a las personas ubicadas en zona inundable. La alarma de tsunami fue emitida por el SHOA 8 minutos después del terremoto y se estima que la evacuación del borde costero alcanzó cerca de 1 millón de personas.

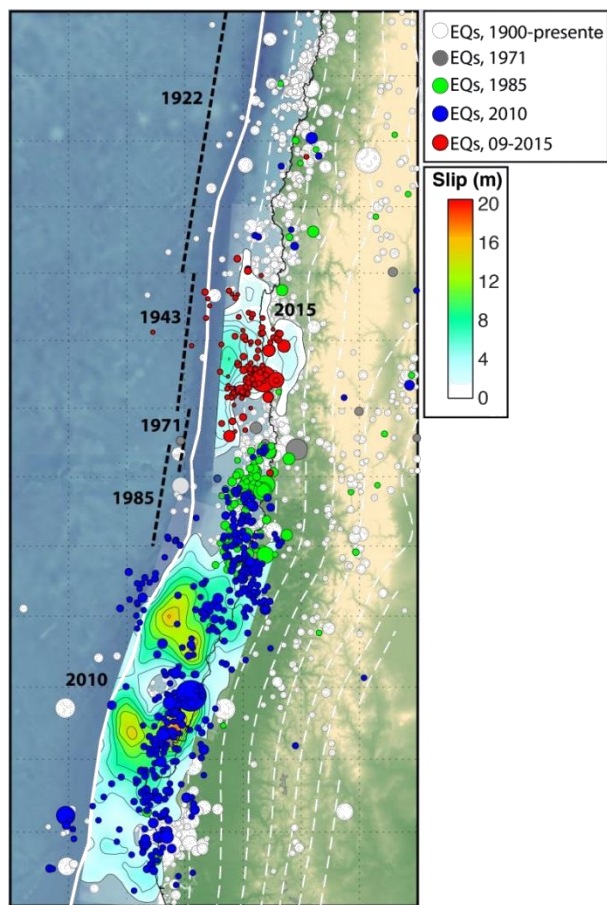


Figura 13 Zona de ruptura terremoto Illapel 2015. Adaptada de USGS (2015).

Según Aránguiz et al. (2015), el relato de testigos en la zona cercana al epicentro indica que el tsunami en algunos lugares llegó a la costa casi inmediatamente después de terminado el terremoto. En la bahía de Coquimbo llegaron 5 trenes de ondas y se estima que la inundación debido al tsunami llegó hasta los 700 [m] en el eje horizontal. En Totoral, se registró el máximo runup de 10 [m] y la primera onda de tsunami llegó 12 [min] después de ocurrido el terremoto.

Otros tiempos de arribo de acuerdo al trabajo de Tomita et al. (2016) señalan que en la localidad de Los Vilos la inundación arribó 10 [min] después del terremoto con una profundidad máxima entre 60-70 [cm], los mismos valores de profundidad se registraron en los sectores de Puerto Aldea y Tongoy donde la inundación llegó entre 10 y 12 [min] después del terremoto. En Coquimbo, los tiempos de arribo varían entre 30-40 [min].

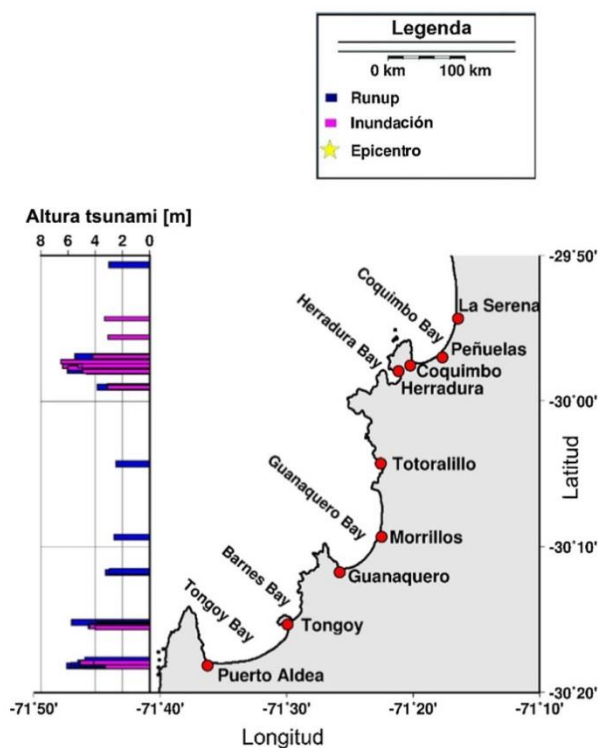


Figura 14 Altura de tsunami y runup máximo terremoto de Illapel. Adaptado de Aránguiz et al. (2015).

### 3.1.4 AMENAZA DE TERREMOTO Y TSUNAMI EN VALPARAÍSO

El 80% de los tsunamis generados en la costa chilena se deben a terremotos (Lockridge, 1985). Esto se debe a la zona de convergencia de placas existente en la costa del Pacífico Sur, específicamente entre la Placa Nazca y la Placa Sudamericana (Figura 7).

La zona central de Chile es una de las regiones sísmicas más activas del mundo, aproximadamente cada diez años se produce un terremoto de magnitud Mw 8 y un par de veces cada siglo se producen terremotos de magnitud superior a Mw 8.5 que pueden provocar gran destrucción y ocurrencia de tsunamis (Udías, Madariaga, & Buforn, 2012).

En la génesis de un tsunami se produce una sobre elevación de la columna de agua cuando ocurre el destrabe de placas, y si el sismo es superficial y de magnitud considerable, como consecuencia puede generarse un tsunami mayor. Para que un sismo tenga potencial tsunamigénico su magnitud debe ser mayor a 6.5, debe ocurrir en una zona de subducción para que la falla tenga movimiento vertical y lateral, hipocentros superficiales inferiores a 60 [km] y epicentros oceánicos y continentales cercanos a la línea de costa (Lagos, 2000).

En Valparaíso, la historia sísmica señala la ocurrencia de cuatro terremotos interplaca tsunamigénicos en los años 1730, 1822, 1906 y 1985 (Dura, Cisternas, Horton, Ely, & Nelson, 2014). A pesar de ello, estos eventos no han sido los únicos en la zona central, en el año 1575 se produjo el primer terremoto del que se tenga registro escrito (Cisternas, Torrejón, & Gorioitia, 2012; Cisternas, 2012).

En 1647 la ciudad vuelve a sufrir otro terremoto del que no se tiene registro de tsunami. Cisternas (2012) señala que el motivo se debe a que dicho terremoto no se produjo en la zona de subducción propiamente tal, sino que pudo localizarse en la zona intraplaca cortical o en la zona de profundidad intermedia de la placa de Nazca.

El terremoto de mayor magnitud ocurrido en Valparaíso es el de 1730 y originó un devastador tsunami de magnitud cuatro en la escala de Inamura e Iida (NGDC, 2014). Dicho tsunami causó los mayores daños en la bahía de Valparaíso de los que se tenga registro, inundando y destruyendo severamente el puerto, además de destruir dos tercios de la ciudad, 200 casas y edificaciones aledañas al borde costero. Las ondas de tsunami se propagaron hasta llegar a la localidad de Honshu, Japón y Callao, Perú. En Chile, los efectos se extendieron por 1000 [km] a lo largo de la costa, afectando las localidades de La Serena, Coquimbo, Illapel, Petorca y Tiltil (Montessus de Ballore, 1916).

En Tabla 2 se observan descripciones y parámetros sísmicos de los terremotos ocurridos en Valparaíso.

Tabla 2 Terremotos en Valparaíso.

FECHA	MAGNITUD Ms	PROFUNDIDAD [km]	RUNUP [m]	FUENTE TSUNAMI
17-03-1575	7.3	-	-	-
13-05-1647	8.5	-	-	-
08-07-1730	8.7	-	16	Relato histórico, registro geológico
19-11-1822	8.5	-	3.5	Relato histórico
16-08-1906	7.9	25	3.5	Relato histórico, mareógrafo
03-03-1985	7.8	33	0.6	Registro sismográfico, mareógrafo

Fuente: Elaborado con data de NGDC (2014) y CSN (2014).

A continuación, una revisión detallada de los seis terremotos históricos más importantes ocurridos en la ciudad de Valparaíso.

#### 3.1.4.1 17 DE MARZO DE 1575

En Santiago, a las 10:00 am (hora local) se produjo un terremoto cuya intensidad varió entre VI y VII, mientras que la magnitud Ms fluctuó entre 7 y 7.5 con epicentro en La Ligua (Lomnitz, 2004).

Debido a que este terremoto ocurrió durante el período de la conquista española, los relatos e información existente se encuentran pobremente documentados. A pesar de ello, en la actualidad se considera como el primer terremoto documentado en la zona central del país (Barrientos, 1988; Cisternas, Torrejón, & Gorigoitia, 2012; Comte, 1986). No existe registro de generación de tsunami.

#### 3.1.4.2 13 DE MAYO DE 1647

A las 10:30 pm (hora local) la ciudad de Santiago sufrió un terremoto de magnitud Ms 8. La destrucción fue total, la ciudad quedó en ruinas y cerca de 1000 personas murieron, lo que equivale a un 20% de la población de la ciudad en esa época (Lomnitz, 2004; Udías, Madariaga, & Buforn, 2012). La cifra de muertos posterior al terremoto (entre 2000 y 4000) aumentó considerablemente debido al brote de plagas (Udías et al., 2012).

En relación al sismo se conoce que el impacto fue rápido y violento, con una duración aproximada de 100 segundos (tres credos), catalogando éste como el primer gran terremoto de Santiago y de Chile colonial. Grandes rocas se desprendieron del cerro Santa Lucía, las réplicas se sintieron y escucharon por semanas (Lomnitz, 2004). El área destruida se extendió desde el río Choapa hasta el río Maipo con una zona de ruptura de aproximadamente 400 [km] entre los 31° y 36° (Cisternas, 2012; Montessus de Ballore, 1916; Greve, 1964; Udías et al., 2012). No se reportaron daños ni en Valparaíso ni en Concepción (Udías et al., 2012). El movimiento además se sintió en Cuzco, Buenos Aires y Valdivia (Montessus de Ballore, 1916; Greve, 1964).

Respecto a la ocurrencia de tsunami, debido a que los registros históricos señalan daños locales sólo en la ciudad de Santiago, podría tratarse de un terremoto intraplaca al interior de la Placa de Nazca, por lo que la generación de tsunami para este evento no queda clara (Udías et al., 2012). Un estudio reciente de Cisternas (2012) indaga esta inquietud y sugiere que este terremoto fue del tipo intraplaca, ya sea cortical de los Andes o de profundidad intermedia en la placa de Nazca (Figura 8).

Uno de los argumentos que valida estas sospechas es el hecho de que no consta dentro de los registros históricos algún reporte de tsunami en la bahía de Concepción. Dicho lugar, por su configuración natural, se caracteriza por amplificar los efectos de tsunamis inclusive aquellos de campo lejano. La historia señala que cada vez que en Valparaíso se produce un tsunami, éste se amplifica en la bahía de Concepción por lo que si no existe registro de tsunami en este lugar es probable que se deba a que no se produjo (Cisternas, 2012).

Con estos antecedentes, queda claro que el terremoto de mayo de 1647 no sería capaz de producir un tsunami, ya que independientemente del tipo de terremoto, su hipocentro no sería oceánico por lo que se descarta la generación de tsunami en las costas de Chile central (Cisternas, 2012).

### 3.1.4.3 8 DE JULIO DE 1730

Gran terremoto en Santiago y Valparaíso con magnitud Ms 8.5- 9, la destrucción en la ciudad puerto fue total incluyendo los cerros. En aquella época, Valparaíso era una ciudad pequeña y se situaba sobre suelos blandos (Lomnitz, 2004). El área dañada abarcó una extensión de 1000 [km] desde Copiapó hasta Concepción (Figura 15). Las ciudades de Copiapó, La Serena, Coquimbo, Quillota, Valparaíso, Santiago, Malloa, Alcantara, Curicó, Santa Rosa, Chillán, Concepción e inclusive Mendoza, Argentina, registraron daños (Udías et al., 2012).

Producto del terremoto se produjo un devastador tsunami cuyos efectos en las costas chilenas se extendieron desde Coquimbo hasta Valdivia (Montessus de Ballore, 1916), en Concepción las primeras olas llegaron cuatro horas después de sentirse en Valparaíso (Greve, 1964), los daños fueron mayores a los producidos en 1657 abarcando un área de ruptura dos veces mayor en longitud. Este terremoto en Valparaíso es considerado el más grande desde el asentamiento de los españoles en el país (Udías et al., 2012).

A pesar del desastre, se registraron escasas muertes debido a que la población se refugió en las alturas de cerros. El poder destructivo de este tsunami fue tan cuantioso que se propagó hacia la costa este del Océano Pacífico llegando a la península de Oshika, al noreste de Honshu, Japón (Carvajal, Cisternas, Catalán & Gorioitía, 2014). En Callao, Perú también se registraron daños producto del tsunami (Lomnitz, 2004; Greve, 1964).

Cabe destacar que la calidad de la información existente respecto a este terremoto hasta hace unos años atrás no era la mejor, ya que la mayoría correspondía a recopilaciones históricas que no poseían validaciones científicas.

En este contexto, a partir del año 2011, se han concretado avances investigativos importantes en relación a las características físicas del terremoto y posterior tsunami de 1730. Un ejemplo de ello es la investigación desarrollada por Cisternas, Gorioitía, Torrejón, & Urbina (2011) en la que señalan el plano de ruptura del terremoto de 1730 como multidominio con una ruptura segmentada por porciones, es decir, varias de menor tamaño con la probable ocurrencia de más de un terremoto y más de un tsunami. De esta misma manera, un estudio posterior de Carvajal et al. (2014) asegura que el desastre no consistió en un solo evento, sino que en realidad fueron al menos dos terremotos independientes con tsunamis independientes. El primero de ellos alrededor de las 01:30 am y el segundo a las 04:30 am, siendo este último el más destructivo. Al mediodía se produjo un tercer sismo en la ciudad de Santiago que pasó inadvertido en Concepción (Quiroz, Aránguiz, & Belmonte, 2014).

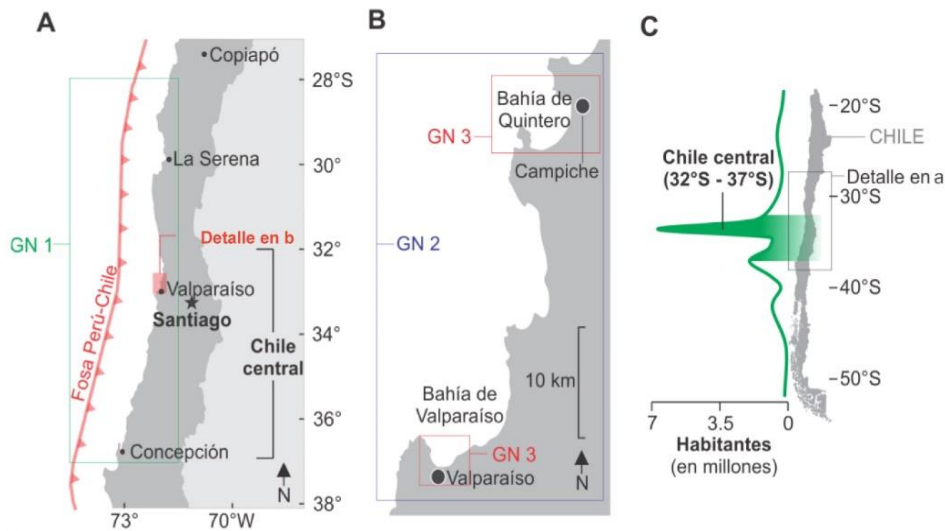


Figura 15 Área afectada por el terremoto de 1730. Adaptada de Carvajal, Cisternas, & Catalán (2014). En A y B sitios de estudio. En C distribución de población afectada. La sigla GN se refiere a los niveles de grilla utilizados en la modelación numérica.

Líneas de investigación en materia de paleotsunamis llevada a cabo por Dura, Cisternas, Horton, Ely, & Nelson (2014) han tenido lugar en la Bahía de Quintero, ubicada a 36 [km] al norte de Valparaíso. En este sector, a través del uso de evidencia sedimentaria y extracción de microfósiles desde la parte plana de la bahía, ha sido posible identificar seis depósitos de tsunamis formados entre los años 6200-3200 antes del presente. Gracias a estos depósitos se pudo observar evidencia de levantamientos cosísmicos y tsunamis ocurridos en la región.

Los trabajos citados constituyen la primera evidencia estratigráfica de terremotos prehistóricos y tsunamis en la costa central de Chile. Equipos de trabajo encabezados por investigadores chilenos como Cisternas, Catalán, Lagos, Winckler y Contreras se han encargado de avanzar en materias similares de cuantificación de daños por tsunami, gestión del riesgo de desastres naturales y registros geológicos de terremotos ancestrales.

Otros estudios actuales como el de Carvajal et al. (2014) y Quiroz et al. (2014) han aportado información nueva respecto al terremoto de 1730. En la investigación realizada por Carvajal et al. (2014) se reconstruye el pasado para determinar la topografía de la bahía de Valparaíso al momento del terremoto, esto fue posible gracias a la vasta recopilación de documentos históricos tanto nacionales como internacionales que finalmente fueron georreferenciados a la ciudad actual. La planicie de inundación se obtuvo a través de la utilización de varios modelos de ruptura (Figura 16) que posteriormente se compararon con la evidencia existente y los registros geológicos obtenidos de la bahía de Quintero, de esta manera, el escenario final fue el que se ajustó a la información recopilada. En el depósito extraído desde Campiche, en las cercanías de Quintero, se encontraron microfósiles cuya data coincide con el tsunami de 1730.

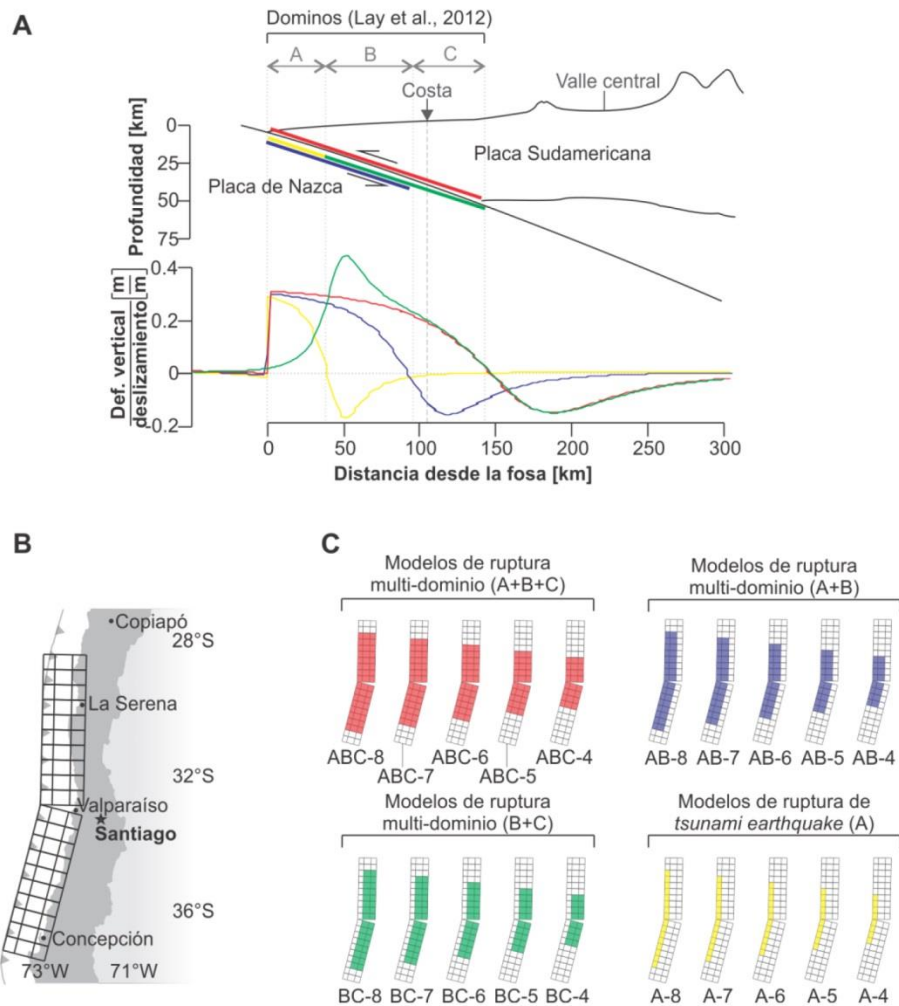


Figura 16 Modelos de ruptura y desplazamientos verticales asociados al terremoto 1730. En A la posición de las rupturas en la zona de acoplamiento sismogénico y los desplazamientos verticales. En B la ubicación de las sub rupturas presentadas en C (Carvajal et al., 2014).

Como resultado de este estudio, Carvajal et al. (2014) sostiene que el evento de 1730 ha sido subestimado, es decir, fue mayor de lo que en la actualidad se cree, y no constó de una sola ruptura homogénea y continua. De la recopilación de resultados y producto de la reconstrucción de perfiles topográficos basados en los registros históricos, el mayor runup de inundación fue de 10.7 m.s.n.m en el sector colonial del convento San Agustín y de 8.7 m.s.n.m. en el convento de La Merced y en la colonia de La Matriz (Figura 17 D).

Asimismo, Carvajal et al. (2014), sostiene que la magnitud del terremoto fluctuó entre Mw 9-9.1 para una ruptura multidominio (ABC según Figura 16) de longitud entre 600 y 800 [km], siendo como mínimo 1.7 veces mayor que el terremoto del Maule de 2010 (Mw 8.8).

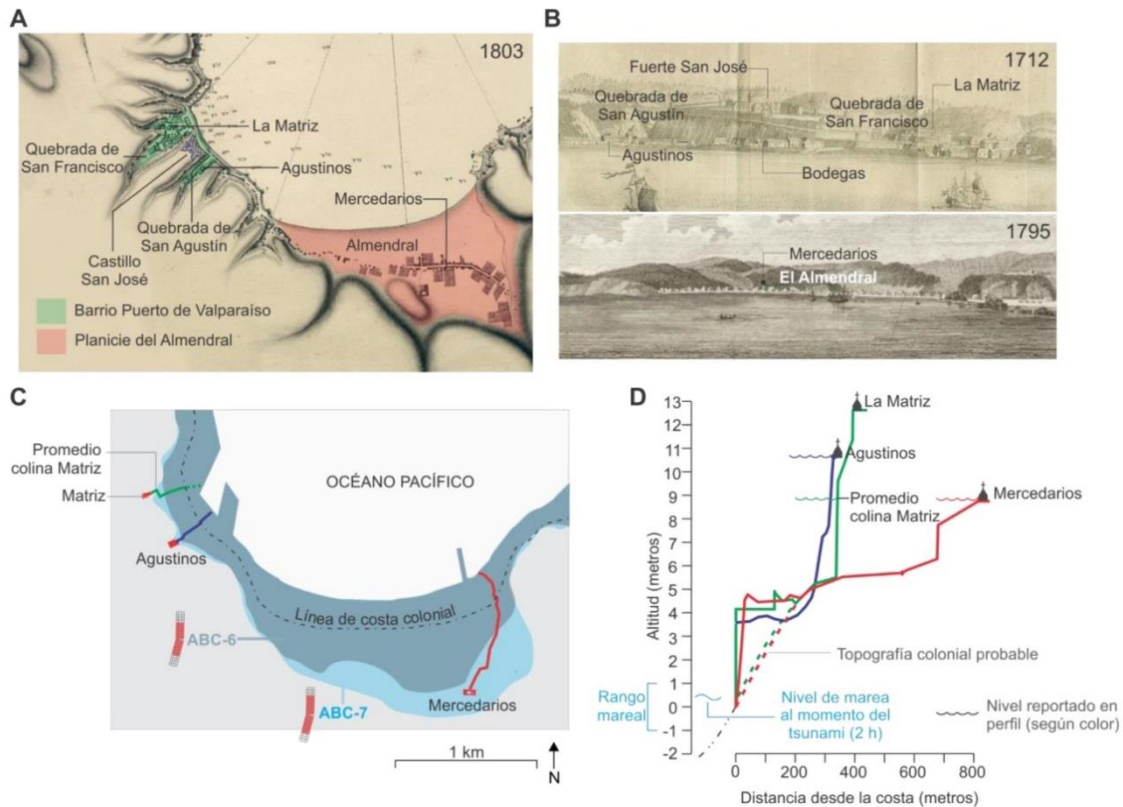


Figura 17 Planicies de inundación y runup perfiles topográficos (Carvajal et al., 2014). En A y B ubicación histórica de los reportes coloniales. En C el área de inundación generada por los modelos de ruptura ABC-6 y ABC-7. En D perfiles topográficos y el nivel inundación según reportes históricos.

Quiroz et al. (2014) también estudia el plano de ruptura de 1730 y en su trabajo propone un modelo de ruptura de falla plana (S) de 450 [km] de longitud y 120 [km] de ancho, similar al propuesto por el SHOA en la carta de inundación elaborada para la Región de Valparaíso (Tabla 3), y otro modelo con una falla de tres segmentos (S1, S2, S3 según Figura 18). Al igual que Carvajal et al. (2014), reconoce dos terremotos independientes con tsunamis independientes y un último sismo de menor magnitud.

En el trabajo de Quiroz et al. (2014) el modelo que obtuvo mejor ajuste fue el FFM-3 que considera la ruptura de los segmentos S1 y S2 (Figura 18) con una falla no simultánea con tres horas de diferencia entre ellas. El segmento S1 alcanza una amplitud de onda de 2 [m], mientras que el segmento S2 alcanza una amplitud de 8 [m]. El área de inundación en Figura 19 con una altura máxima de inundación de 8 [m].

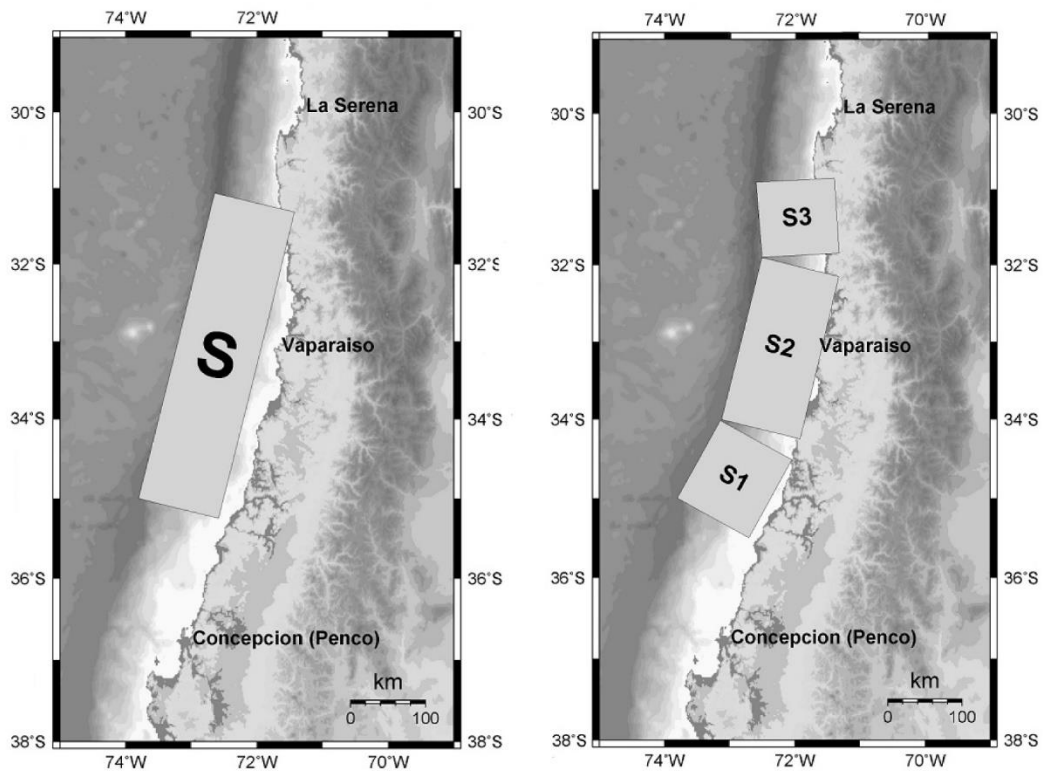


Figura 18 Modelos de ruptura terremoto 1730 (Quiroz et al., 2014). A la izquierda el modelo de ruptura plana y a la derecha el modelo de ruptura de tres segmentos.

Cabe destacar que el modelo de falla plana (PFM) entrega una mayor área de inundación, que llega al Congreso Nacional y al convento San Agustín (Figura 19) con alturas de inundación mayores de 10 [m]. A pesar de no ser el modelo que mejor se ajusta a la información histórica recopilada por Quiroz et al. (2014), el modelo PFM se encuentra sobrestimado más aún si se considera que la inundación llega hasta al Congreso Nacional, pues en la época en la que ocurrió este terremoto, la línea de costa se ubicaba a la mitad de distancia de lo que actualmente se encuentra (en Figura 19 la línea continua representa la línea de costa actual).

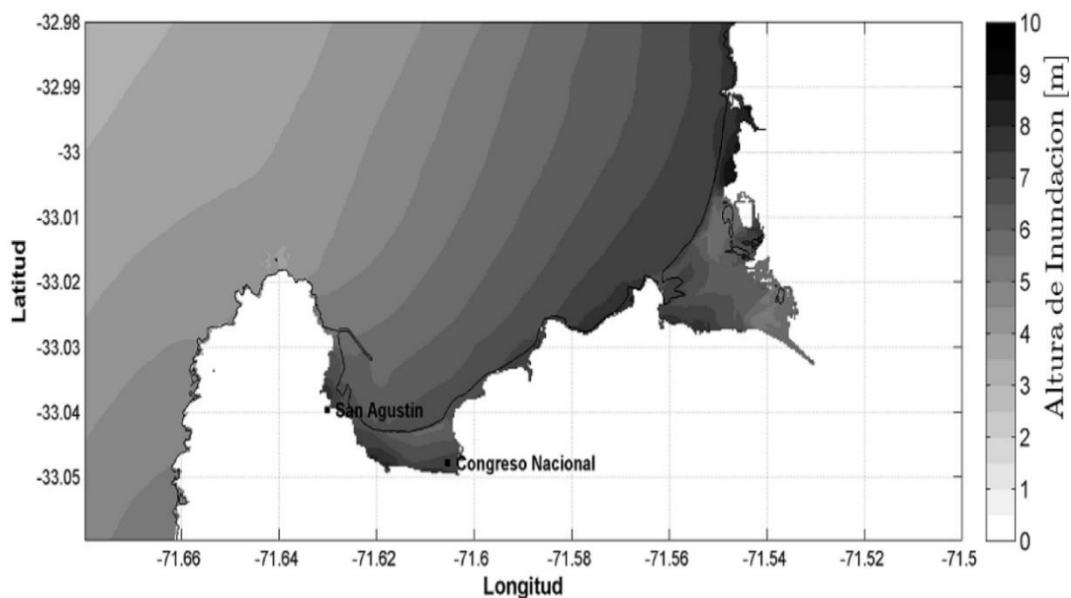


Figura 19 Área de inundación y altura tsunami 1730 modelo FFM-3 (Quiroz et al., 2014).

Finalmente, con las investigaciones realizadas por Carvajal et al. (2014) y Quiroz et al. (2014) se establece que la zona de ruptura del terremoto de 1730 no fue una falla plana y continua como el escenario propuesto por el SHOA en la Carta de Inundación elaborada para la Región de Valparaíso, si no que fueron dos segmentos que rompieron. El primero en romper a las 1:30 am en la ciudad de Concepción con generación de tsunami y el segundo y más destructivo a las 4:30 am en Valparaíso, cuyo terremoto y posterior tsunami afectó las costas chilenas entre Copiapó y Concepción.

En la actualidad, el terremoto de 1730 se plantea como el peor escenario para la Región de Valparaíso pues es el que ha causado mayor destrucción en la ciudad y ha generado el mayor tsunami de campo cercano en Valparaíso.

#### 3.1.4.4 19 DE NOVIEMBRE DE 1822

El puerto de Valparaíso fue sacudido a las 10:15 pm (hora local) por un terremoto grado V cuya destrucción se estimó en 700 edificios. La magnitud  $M_s$  según Lomnitz (2004) fluctuó entre 8 - 8.5 con epicentro en La Ligua. La cantidad de fallecidos fue de 72 personas quienes habitaban viviendas de adobe.

Existe información de la generación de tsunami cuyo flujo experimentó tres retiradas y alturas de ola de 4 [m]. Producto del terremoto se observaron cambios en la topografía del terreno con subsidencias de un metro de altura (Greve, 1964; Graham, 1824).

En relación a los daños en Valparaíso, según Greve (1964) y Graham (1824), el barrio El Almendral fue el más devastado, mientras que los sectores de Quillota y Quintero también fueron destruidos (Graham, 1824). De la misma manera, los daños en Santiago fueron importantes pero no tan catastróficos como en Valparaíso (Greve, 1964; Lomnitz, 2004).

#### 3.1.4.5 16 DE AGOSTO DE 1906

Desastre en Valparaíso, un terremoto de magnitud Mw 8.2 azotó la ciudad a las 8:40 pm (hora local). El fuego y la destrucción cobraron la vida de 3800 personas. La intensidad fue de IX desde Papudo hasta el río Rapel y hacia el este de Melipilla, en algunos sectores de Valparaíso la destrucción fue total con una intensidad de XI. En Santiago la intensidad fue de VIII, la mayoría de los edificios quedaron agrietados. El terremoto se sintió latitudinalmente desde Tacna a Chiloé, y longitudinalmente desde la Isla de Juan Fernández hasta Buenos Aires, en Córdoba también se sintió el movimiento (Greve, 1964; Lomnitz, 2004). Producto del terremoto, se produjo un tsunami de campo cercano que no registró daños en el puerto de Valparaíso, la amplitud por sobre el nivel del mar fue de 1.2 [m]. Se observaron subsidencias de 80 [cm] en la costa cercana al epicentro (Lomnitz, 2004).

#### 3.1.4.6 3 DE MARZO DE 1985

En la zona central de Chile a las 7:46 pm (hora local) se produjo un terremoto de magnitud Ms 7.8. Los daños producto de este terremoto se registraron desde la ciudad de Quintero hasta Matanzas en la VII Región, hacia el Este, una de las ciudades más devastadas fue Santiago. Días antes de la ocurrencia de este terremoto, la intensa actividad sísmica fue registrada por la red sísmológica del país. En total se produjeron más de 360 sismos, que comenzaron el 21 de febrero y se extendieron por 11 días. Debido al desplazamiento vertical producido en el fondo marino de 0.5 [m] (Barrientos, 1988) se produjo un tsunami. Los mareógrafos ubicados en San Antonio y Valparaíso registraron una variación en el nivel del mar de  $\pm 5$  [cm] (Comte, 1986).

Según Barrientos (1988), la elevación máxima predicha por el modelo para el terremoto de 1985 se produce justamente en los lugares en los que no se produjeron elevaciones en el terremoto anterior de 1906. Lo mismo ocurre con las zonas en las que se registraron los mayores levantamientos en el año 1906, que para el terremoto de 1985 no mostraron elevaciones, lo que podría deberse a un mecanismo de ruptura variable, es decir, que la energía contenida en la zona de ruptura de placas no se libera con un solo sismo.

Korrat & Madariaga (1986) proponen que el terremoto de 1985 es la culminación de una zona de ruptura que comenzó en 1971 con un sismo de magnitud Ms 7.5 generado 100 [km] al norte del epicentro de 1985 (Figura 20), posteriormente continuó con los sismos de los años 1973 y 1981 con magnitudes Ms de 6.5 y 6.2, respectivamente. Por lo tanto, sólo después de todos estos terremotos, esta zona de ruptura fue capaz de liberar la energía almacenada por lo que establecer que un solo terremoto es capaz de liberar toda la energía contenida resulta ser muy arriesgado e impreciso desde el punto de vista del peligro sísmico (Madariaga, 1998).

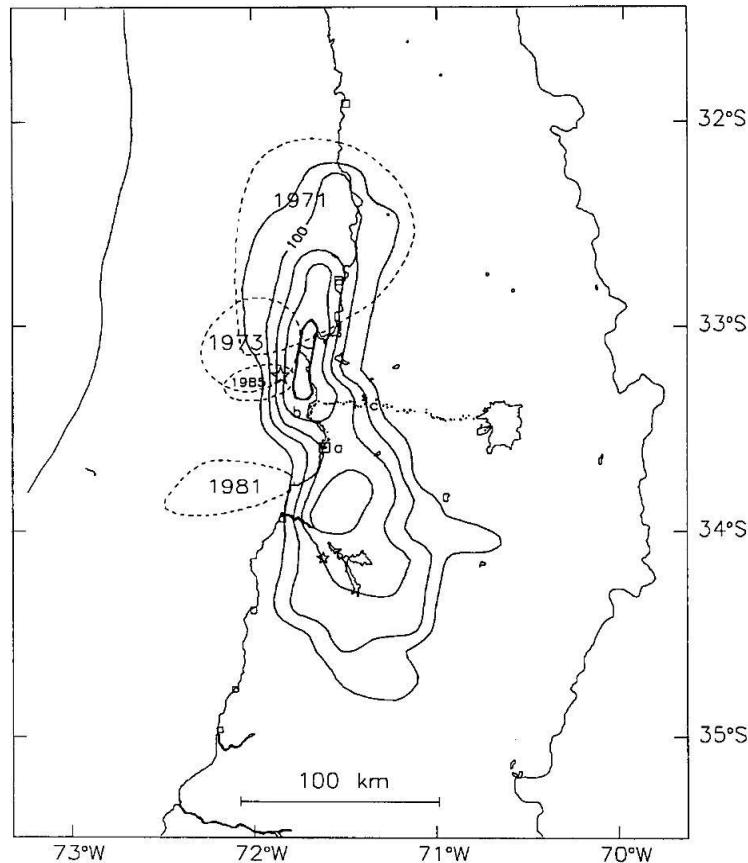


Figura 20 Área de influencia (líneas punteadas) terremotos de 1971, 1973, 1981 y 1985. (Barrientos, 1988)

Conocer el pasado sin duda que puede ayudar a reducir pérdidas en el futuro, una manera de hacerlo es identificar y definir el peligro ante terremotos y tsunamis. Las futuras direcciones para evaluar estos peligros en las zonas de subducción, apuntan al desarrollo de estudios paleosismológicos que incluyan la búsqueda de trasas de terremotos gigantes no contemplados en la historia escrita (Satake & Atwater, 2007).

Para determinar futuros escenarios de inundación y sus consecuencias en las zonas costeras que se encuentran expuestas a amenaza por tsunamis, es necesario considerar el peor escenario conocido, pues entrega un mayor margen de seguridad (Lagos & Cisternas, 2008). Es importante evaluar el riesgo bajo el peor escenario posible, ya que permite obtener información valiosa que puede servir de ayuda para realizar una mejor planificación y ordenamiento del territorio costero (UNESCO, 2008).

La combinación entre información histórica recopilada, observaciones geológicas y la implementación de modelos numéricos que sean capaces de validar la información recabada, ha resultado ser un mecanismo efectivo en la reconstrucción de escenarios de amenaza (Lagos & Cisternas, 2008).

La corta historia instrumental sumada a la abundante pero joven historia sísmica es insuficiente para caracterizar el complejo comportamiento sísmico en las zonas de

subducción (Goldfinger, Ikeda, Yeats, & Ren, 2013; Lagos & Cisternas, 2008). Los registros geológicos y paleosísmicos resultan ser fuentes valiosas, ya que pueden ser capaces de entregar una gama mucho más amplia de información sísmica. La paleosismología resulta ser un método relativamente simple para determinar futuros escenarios en un sistema de fallas tectónicas, asimismo los datos paleosismológicos pueden ser muy útil en la eliminación de escenarios cíclicos que nunca han ocurrido, así como en aquellos que sí han ocurrido (Goldfinger, Ikeda, Yeats, & Ren, 2013).

Un claro ejemplo de la importancia de los registros geológicos en la compilación de información sísmica, es el estudio realizado por Cisternas et al. (2005), quienes a través de registros geológicos e históricos de los últimos 2000 años demostraron que el antecesor del gran terremoto de 1960 fue el evento de 1575, estableciendo que el periodo de recurrencia de terremotos gigantes generados en la zona de subducción frente a las costas chilenas de la zona centro-sur, es de al menos 285 años, evidencia que contrasta drásticamente con el promedio de 128 años obtenido de los registros históricos existentes para la zona centro-sur del país (Cisternas et al., 2005).

McCaffrey (2007) señala información interesante respecto a la generación de terremotos gigantes, aquellos de magnitud 9 (Mw) o superior cuya longitud de ruptura continua sea mayor o igual a 800 km. Generalmente ocurren en zonas de subducción y poseen un potencial tsunamigénico mayor debido a que la mayoría de las veces se generan bajo el mar (hipocentros oceánicos) desencadenando consecuencias devastadoras en las zonas costeras. Aunque estos gigantes sean muy infrecuentes, ciertamente que constituyen una amenaza especialmente para los países que se encuentran en zonas de subducción tan activas como es el caso de Chile (Lomnitz, 2004).

El periodo de retorno para los terremotos ocurridos en la zona central ubicada entre los 32° y 34°S, según Comte (1986) es de  $83 \pm 9$  años. Este periodo hace referencia a los terremotos en Tabla 2, es decir se basa sólo en eventos históricos registrados.

En Figura 21, el diagrama de espacio temporal de los terremotos ocurridos en la zona central.

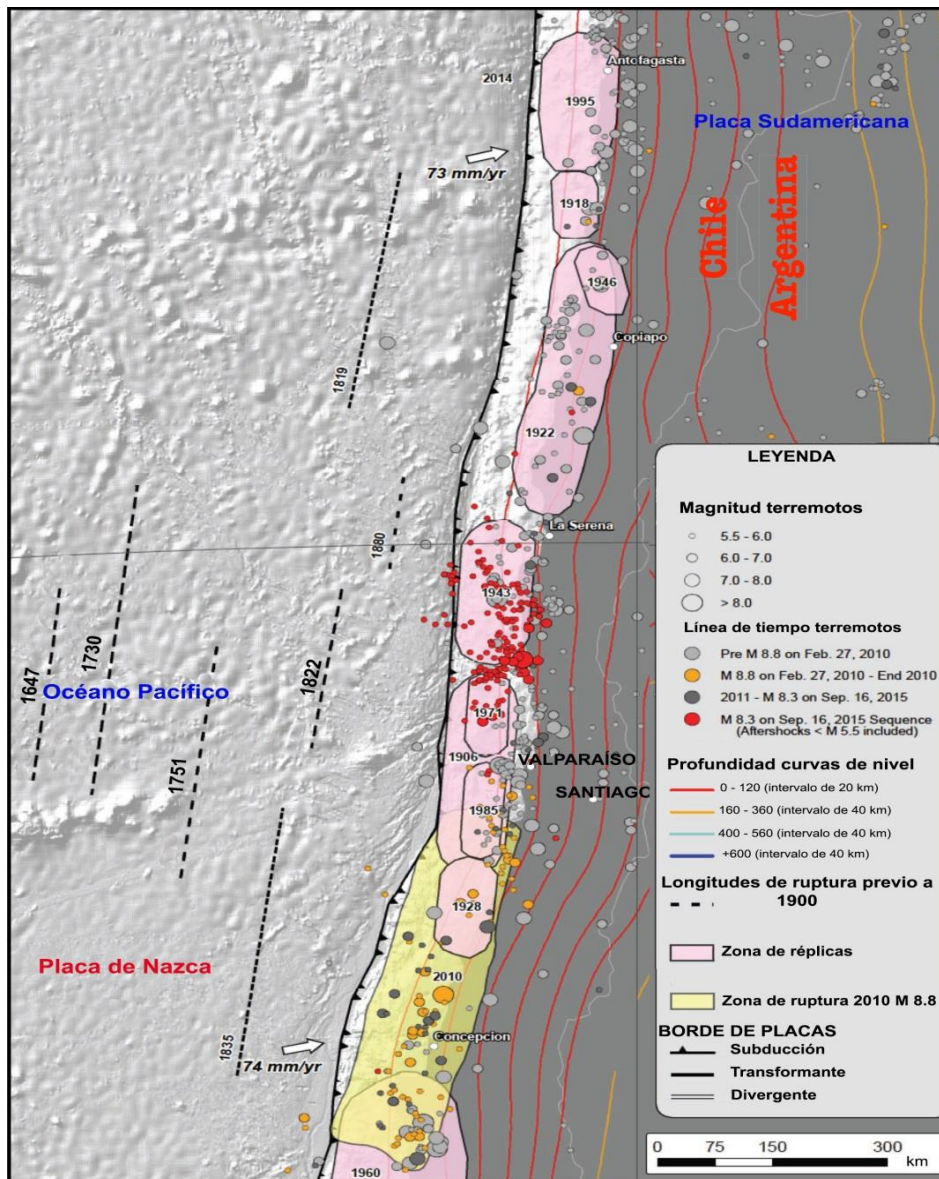


Figura 21 Terremotos zona central de Chile. Adaptado de Yeck et al. (2015).

Finalmente, sabiendo que el terremoto de 1906 y el de 1985 no fueron eventos gigantes ni tampoco fueron capaces de generar tsunamis destructivos, y considerando que el periodo de recurrencia de terremotos gigantes para la zona centro-sur, según Cisternas et al. (2005) es de al menos 285 años, cabe señalar el amplio rango de incertezas que persiste en el estudio de terremotos y tsunamis en la zona centro del país, esto debido a la corta historia instrumental, a la falta de antecedentes en zonas no habitadas, a la re-validación de testimonios narrados por los conquistadores europeos, pues muchos de ellos están sobreestimados, y a la carencia de estudios paleosísmicos.

#### 3.1.4.7 AMENAZA SÍSMICA

Tal como se ha mencionado en el apartado 3.1.3, Chile es uno de los países más sísmicos del mundo (Gusiakov, 2005; Lomnitz, 2004). Se estima que aproximadamente cada 10 años se produce un terremoto de magnitud 8 o superior (Madariaga, Métois, Vigny, & Campos, 2010).

A lo largo de la historia han ocurrido grandes terremotos altamente destructivos como por ejemplo: el terremoto de Valdivia en 1960, el terremoto de Valparaíso en 1730, el terremoto de Arica en 1868 y el terremoto del Maule en 2010. Conocidos estos antecedentes, es posible establecer que la amenaza sísmica se encuentra presente en gran parte del país.

##### 3.1.4.7.1 RED SISMOLÓGICA

En Chile, la red sismológica está a cargo del Centro Sismológico Nacional (CSN) perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (FCFM). El CSN depende directamente del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, y posee convenios de colaboración con la ONEMI (CSN, 2015).

Posterior al terremoto y tsunami de 2010, la necesidad de densificar la red existente tomó relevancia desde el gobierno central, de esta manera en Marzo de 2011 se firmó un convenio en el que se traspasaron fondos al CSN para robustecer la red sismológica existente, ya que existían lugares en los que la actividad sísmica no se encontraba monitoreada. Los planes de densificación de la red incluyeron la compra e instalación de 65 nuevas estaciones sismológicas, 297 acelerógrafos y 130 GPS. A pesar de que a la fecha (Julio 2015) aún se están instalando y construyendo estas estaciones, los avances han sido importantes en lugares como la Isla de Juan Fernández, Isla de Pascua, zona austral y el norte chico (CSN, 2015).

A la fecha de este estudio, la red sismológica está compuesta por 91 estaciones distribuidas a largo de todo el país, desde Arica hasta la base Frei en la Antártica (Figura 22). Dentro de los instrumentos utilizados para monitorear la actividad sísmica se encuentran sismógrafos, acelerógrafos y GPS.

Los sismógrafos de banda ancha permiten registrar las velocidades del terreno en un amplio espectro de frecuencias. La sensibilidad de estos instrumentos permite captar sismos de baja magnitud, sin embargo, presentan grandes saturaciones para sismos locales de gran magnitud (CSN, 2015).



Figura 22 Red Sismológica operada por el CSN (CSN, 2015).

Los acelerógrafos permiten conocer las aceleraciones del terreno a altas frecuencias, esto permite registrar mayores amplitudes de onda, y por consiguiente, sismos de campo cercano de mayor magnitud. La relevancia en la recopilación de estas aceleraciones radica en que a través del análisis de dicha información se puede obtener el hipocentro y magnitud del sismo. Adicionalmente, estos registros sirven como base para el diseño sismorresistente de estructuras, así como también en la elaboración o mejoras de las normas sísmicas existentes (CSN, 2015).

La red de GPS basada en posicionamiento satelital se encuentra desplegada a lo largo del territorio chileno y además de complementar la red existente, permite monitorear los deformaciones superficiales o desplazamientos que experimenta la corteza terrestre frente a grandes sismos, con una alta precisión que abarca desde milímetros hasta pocos centímetros (CSN, 2015).

Además de la red sismológica nacional, el CSN posee información en tiempo real de otras redes sismológicas de países como Alemania, Estados Unidos, Francia, Argentina, Perú y Brasil lo que permite manejar una base de datos de toda la actividad sísmica mundial.

Sin embargo, a pesar de la valiosa información histórica e instrumental de la sismicidad en Chile, y más aun considerando los avances que la geodesia y la paleosismología aportan a la ciencia en cuestión, no es posible predecir la ocurrencia de terremotos y

tsunamis en Chile. En efecto, la incerteza asociada a amenazas de origen tectónico en torno a las zonas de subducción, es elevada tanto respecto a la variable temporal como a la magnitud del evento. Tal característica no es exclusiva de Chile, y tal como señala Goldfinger (2013), se generaliza para todas las zonas de subducción del mundo.

#### 3.1.4.8 AMENAZA DE TSUNAMI

De acuerdo a los antecedentes presentados en el apartado 3.1.4 queda en evidencia que el terremoto de 1730 constituye el primer terremoto gigante ocurrido en la zona central del país desde el comienzo de la historia escrita (siglo XVI), por lo que se puede la repetición de un evento como este en el futuro, más aún si se sabe que los terremotos de 1575, 1822, 1906 y 1985 no fueron lo suficientemente grandes para generar tsunamis destructivos, por lo que la acumulación de desplazamientos entre placas evidentemente debe liberarse en el futuro.

Los daños registrados, la longitud de la ruptura y el gran tsunami generado, posicionan al terremoto de 1730 en el mismo rango de magnitud que el terremoto de 27 de Febrero de 2010, por lo que un futuro terremoto de estas características en la zona central no se debe descartar (Udías, Madariaga, & Buforn, 2012). La data de los depósitos encontrados en Campiche confirman que el tsunami de 1730 fue el que acumuló esas capas de sedimento (Carvajal et al., 2014). Por estos motivos no debe omitirse la consideración de una catástrofe que podría afectar al 70% de la población del país, según Carvajal et al. (2014), en Figura 15C.

Adicionalmente, es prudente señalar que en el desarrollo metodológico del presente proyecto de título se utiliza el peor escenario conocido, es decir, el terremoto y tsunami de 1730. El mapa de amenaza se basa en la Carta de Inundación elaborada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) para la V Región de Valparaíso.

##### 3.1.4.8.1 MARCO REGULATORIO EN CHILE

El sistema de alerta de tsunamis de Chile es controlado por la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI) en conjunto con el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

Desde 1966 el SHOA opera el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) y es el encargado de representar oficialmente al Estado de Chile ante el Sistema Internacional de Alerta de Tsunamis del Pacífico, cuyo centro de operaciones es el Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) ubicado en Hawaii. El SNAM y el PTWC están en permanente contacto e intercambio de información a través de tecnologías que monitorean constantemente la posible generación de un tsunami en las costas (SHOA, 2014).

La ONEMI, creada en Marzo de 1974, es el organismo técnico del Estado de Chile encargado de coordinar el Sistema Nacional de Protección Civil (ONEMI, 2014). Desde el año 2013 este organismo se ha enfocado en educar a la población bajo la premisa de que la prevención ante desastres naturales es la clave al momento de salvar vidas (ONEMI, 2014), especialmente por la constante amenaza de terremotos y tsunamis a lo largo del territorio chileno.

A partir del año 1997, el SHOA ha elaborado cartas de inundación para los principales puertos y regiones costeras del país. En estas cartas, se definen los niveles máximos de inundación de las áreas urbanas y portuarias (SHOA, 2014).

Para las comunas de Valparaíso y Viña del Mar, el SHOA, a través la utilización de modelos numéricos, ha elaborado la segunda edición de la Carta de Inundación por Tsunami publicada en Marzo de 2012 (Figura 23) basada en el peor escenario conocido, el terremoto y posterior tsunami del 8 de julio de 1730 (SHOA, 2012).

La primera edición de esta carta de inundación hacía referencia al evento de 1906, sin embargo, esta edición se mejoró después del terremoto de 27 de febrero de 2010. El impacto del tsunami y las graves consecuencias en el borde costero, reformuló e hizo necesario utilizar un escenario más desfavorable, a modo de planificar y ordenar el borde costero ante a la amenaza por tsunami.

Dentro de las modificaciones incluidas en la segunda edición se encuentra la utilización del modelo numérico Cornell Multigrid Coupled Tsunami (COMCOT) 1.7, elaborado por la Universidad de Cornell y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Sobarzo, 2011).

El modelo numérico utiliza datos topográficos, batimétricos y parámetros de la fuente sísmica (SHOA, 2012). En Tabla 3, los parámetros sísmicos utilizados en el modelo.

Tabla 3 Parámetros sísmicos utilizados en modelo numérico.

Terremoto 1730	Epicentro		Ancho [km]	Longitud [km]	Dislocación [m]	Profundidad [km]	Strike $\theta$ [°]	Slip $\lambda$ [°]	Dip $\delta$ [°]
	Latitud [°S]	Longitud [°W]							
	32.5	72	125	450	7	40	N 10° E	90	18

Fuente: SHOA (2012).

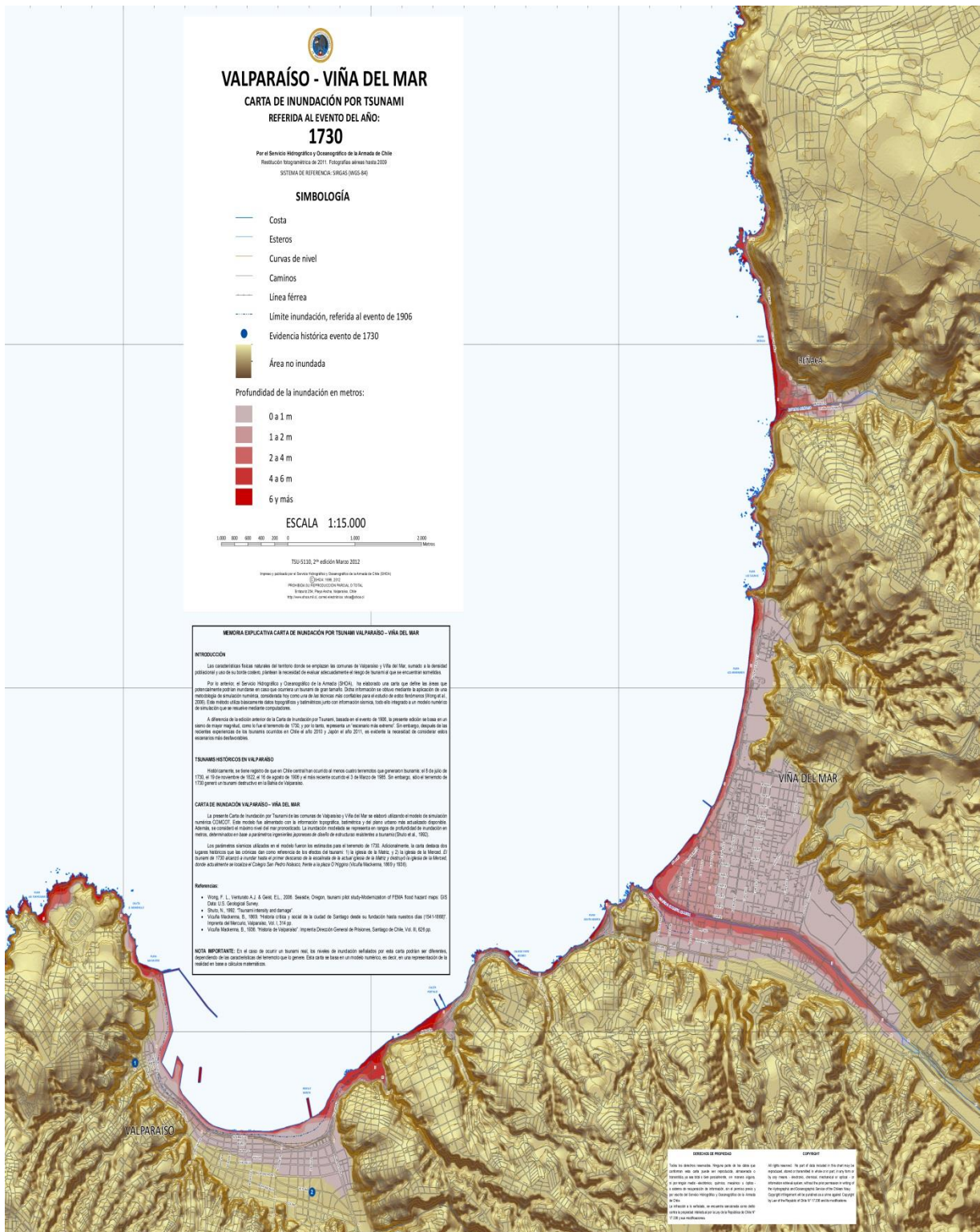


Figura 23 Carta de Inundación por Tsunami Región de Valparaíso (SHOA, 2012).

La ONEMI, a través del programa Chile Preparado, ha elaborado en conjunto con las distintas municipalidades del país, los mapas de evacuación por tsunami (ONEMI, 2014).

Para la ciudad de Valparaíso, en la Figura 24 el mapa de evacuación horizontal ante tsunami, en él se encuentran designadas las vías de evacuación, línea de seguridad ubicada en la cota 30 [m], puntos de encuentro y zona a evacuar.



Figura 24 Mapa de Evacuación por Tsunami, ciudad de Valparaíso (ONEMI, 2014).

### 3.1.4.8.2 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE TSUNAMIS

El Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) en colaboración con los distintos entes gubernamentales de monitoreo frente a tsunami de los países del Pacífico, es el encargado de operar el centro de alerta temprana ante tsunami en prácticamente todo el borde oeste del Océano Pacífico. Además monitorea, difunde y elabora boletines informativos sobre la posible generación de tsunamis en el Pacífico, su cobertura se extiende a lugares de interés de Estados Unidos que se encuentran fuera del área de cobertura del NTWC como es el caso de Hawaii, Islas Marshall, Isla Johnston, Samoa, entre otros.

Adicionalmente, el PTWC es el centro de alerta interino de las costas del Mar del Sur de China por lo que monitorea las costas de China, Macao, Hong Kong, Taiwan, Filipinas, Malasia, Brunei, Indonesia, Singapur, Tailandia, Cambodia y Vietnam (PTWC, 2009).

Países del Mar del Caribe como Colombia, Aruba, Costa Rica, República Dominicana, Guatemala, Haití, Honduras, entre otros pertenecientes al Tsunami Warning Focal Points (TWFP) también reciben alertas por tsunami emanadas del PTWC.

El National Tsunami Warning Center (NTWC) de Estados Unidos monitorea la actividad tsunamigénica en las costas de Alaska, California, Oregon, Washington y British Columbia. En los últimos años, producto de las lecciones aprendidas por el devastador tsunami de Indonesia en 2004, se han producido cambios en los principales centros de alerta por tsunamis del mundo. Debido a esto el NTWC extendió su red de monitoreo incluyendo áreas de interés para Estados Unidos como Puerto Rico, Islas Vírgenes, costa atlántica de Canadá, costa atlántica de Estados Unidos y el Golfo de México (PTWC, 2009).

Tal como se mencionó en el párrafo anterior, luego del tsunami de Sumatra en 2004, el PTWC dejó de tener control en el monitoreo de tsunamis ocurridos en el Océano Índico, fue así que en 2005 se formó el Indian Ocean Tsunami Warning Center (IOTWC) que incluye a países como Indonesia, Australia, India, Bangladesh, Sri Lanka, Irán, Madagascar, Mozambique, Pakistán, Somalia, Tailandia, entre otros.

Finalmente, el borde noreste del Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo es monitoreado por el North Eastern Atlantic and Mediterranean Tsunami Warning System (NEAMTWS). Algunos de los países que participan de esta red de monitoreo incluye a: Albania, Algeria, Bulgaria, Croacia, Dinamarca, Egipto, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Irlanda, Italia, Portugal, Rusia, Suecia, Reino Unido, entre otros.

#### 3.1.4.9 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Uno de los aspectos en los que se basa el presente proyecto de título, es en el carácter práctico de la metodología desarrollada. Por este motivo, es que la utilización de variables cuantitativas y cualitativas toma especial relevancia al momento de proponer un enfoque simplificado y realista. Es en este contexto que determinar la probabilidad de ocurrencia de la amenaza, resulta prácticamente imposible de medir certeramente, pues la información existente no es suficiente ni es posible predecir la ocurrencia de terremotos y tsunamis. Es por esto que se proponen rangos de probabilidad de ocurrencia arbitrarios basados en el estudio de Reyes (2013). Una vez asumida la probabilidad de ocurrencia de la amenaza, se determina el factor de probabilidad a través del uso de una escala cuantitativa siguiendo el esquema de la Figura 25.

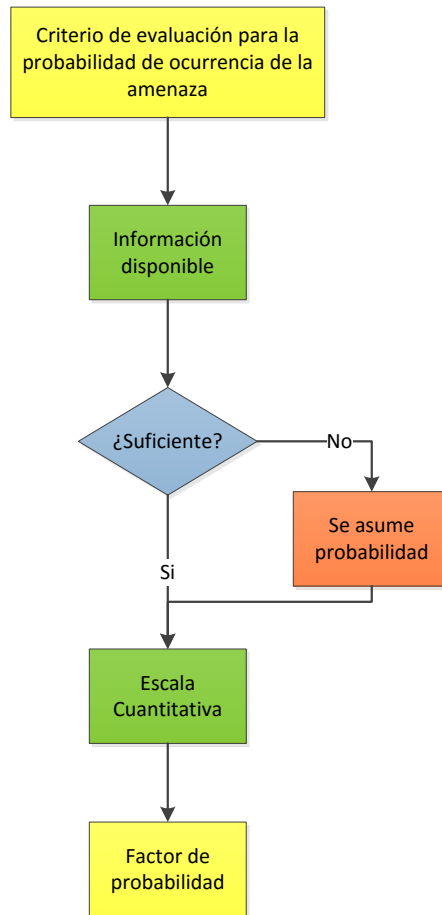


Figura 25 Diagrama de flujo probabilidad de ocurrencia de amenaza. Adaptado de Reyes (2013).

El factor de probabilidad se determina de acuerdo a la Tabla 4.

Tabla 4 Probabilidad y factor de probabilidad de ocurrencia de la amenaza.

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	FACTOR DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (P)
Ocorre un evento dentro de los próximos 10 años	5
Ocorre un evento dentro de los próximos 10 a 100 años	4
Ocorre un evento dentro de los próximos 100 a 500 años	3
Ocorre un evento dentro de los próximos 500 a 1000 años	2
Ocorre un evento dentro de los próximos 1000 años o más	1

Fuente: Reyes (2013).

## 3.2 EVACUACIÓN HORIZONTAL

La evacuación horizontal es el tipo de evacuación más recomendado por las autoridades a lo largo de todo el mundo, ya que resulta ser la evacuación más segura ante a una emergencia por tsunami (FEMA, 2008). La ONEMI en la guía de *Recomendaciones para preparación y respuesta ante tsunami* elaborado en 2014, recomienda como primera opción siempre la evacuación horizontal, sin embargo, reconoce que si este tipo de evacuación no permite llegar a zona segura dentro de un lapso de 15 minutos después de ocurrido el terremoto tsunamigénico, evacuar verticalmente es el paso a seguir.

### 3.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL

La oferta existente de evacuación horizontal (EH) viene dada por las rutas de evacuación ante tsunami elaboradas por la ONEMI (2014) en conjunto con los municipios de las zonas costeras.

En el plan de la ciudad de Valparaíso las rutas oficiales de EH se muestran en Figura 26.



Figura 26 Vías de evacuación horizontal plan de Valparaíso. Adaptado de ONEMI (2014).

La caracterización de las rutas de EH de la ciudad de Valparaíso se realiza a través del análisis de las calles Ecuador, Edwards, Francia, Rodríguez y Uruguay con un ejercicio

hipotético de evacuación ante tsunami detallado en ANEXO B DATOS DE CAMPO. Las subcomponentes de vulnerabilidad evaluadas en las rutas se encuentran en el ANEXO C FICHA DE REGISTRO CAMPAÑA DE TERRENO.

### **3.3 EVACUACIÓN VERTICAL**

El concepto de Evacuación Vertical (EV) se refiere a un tipo de evacuación que puede llegar a utilizarse en las ciudades costeras expuestas a la amenaza por tsunami. La EV es una alternativa a la clásica evacuación horizontal (EH) y consiste en utilizar estructuras de construcción de ingeniería sólida, diseñadas especialmente para resistir las cargas sísmicas y las fuerzas del tsunami, de esta manera, son capaces de proveer refugio seguro a quienes evacúan en ellas. Edificios de hormigón armado que cuenten con más de seis pisos de altura podrían ser utilizados como refugio a corto plazo ante tsunami, especialmente frente a eventos de campo cercano. La estructura de evacuación vertical debe ser capaz de recibir en un breve lapso de tiempo, además de refugiar de manera segura y ubicar por sobre la cota de inundación, aquella población que se encuentre en la zona inundable de la ciudad, cuyas velocidades de desplazamiento no les permitan llegar a tiempo a la zona segura establecida por la autoridad competente en los mapas de evacuación horizontal (FEMA, 2008).

Las estructuras de EV pueden ser construcciones existentes como edificios habitacionales, gubernamentales, hoteles, colegios, estacionamientos u otros de uso exclusivo para refugio ante tsunami. Es importante señalar que debido a los altos costos, entre un 10% y 20% adicional del valor de la obra, y al periodo de tiempo que conllevaría una modificación de una estructura no diseñada para resistir fuerzas por tsunami, resultaría mucho más engorroso adaptar una edificación existente que construir una especialmente para resistir el embate de un tsunami (FEMA, 2008).

Para el caso de Chile, la recientemente elaborada norma chilena Nch3363.Of2015 obliga a incorporar en el diseño de estructuras ubicadas en zonas de riesgo de inundación por tsunami, cargas asociadas a fuerzas hidrostáticas, fuerzas hidrodinámicas, fuerzas boyantes, fuerzas de impacto por escombros, fuerzas de levantamiento, cargas gravitacionales por agua retenida en pisos superiores y fuerzas de impulso.

En la actualidad, no existen estructuras de EV designadas como refugios. En este sentido, el presente estudio es pionero en Chile.

#### **3.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL**

Para definir la oferta de evacuación vertical, es ineludible profundizar en la revisión del estado del arte del diseño resistente ante tsunami, las normativas vigentes que se aplican en el país, el concepto de fragilidad sísmica y ante tsunami y, por supuesto las lecciones aprendidas en diversos países del mundo producto de los tsunamis que han ocurrido en los últimos 15 años y su aporte en el desarrollo de conocimiento de este tipo de desastres naturales. En este contexto, cabe destacar el concepto de fragilidad y la elaboración de curvas de fragilidad, pues en Chile no se han desarrollado lo suficientemente. Finalmente, los aspectos cualitativos y cuantitativos de la oferta existente entregan las bases para evaluar las estructuras existentes en Valparaíso.

### 3.3.1.1 DEFINICIÓN DE OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL

A lo largo del mundo, en países como Japón y Estados Unidos, se han diseñado estructuras de evacuación vertical ante tsunami. Según Cawley (2014) en Estados Unidos existen tres guías de diseño de estructuras de evacuación vertical que incluyen cargas por tsunami, la mencionada “FEMA P-646”, la guía para construcciones de la ciudad de Honolulu “Design and Construction Standards for Residential Construction in Tsunami-Prone Areas in Hawaii” y otro documento elaborado por el comité nuclear regulatorio de Estados Unidos “Tsunami Hazard Assessment at Nuclear Power Plant Sites in the United States of America”. La misma autora señala la guía japonesa “The Guideline Concerning a Tsunami Refugee Building” y la guía de diseño y construcción de edificios de evacuación vertical elaborada por el Ministerio de Tierra, Transporte, Infraestructura y Turismo en el año 2011.

En Japón, en los pueblos de Kaifu y Shirahama, Prefectura de Tokushima, se construyeron estructuras de concreto reforzado para ser utilizados como refugios de evacuación vertical (Figura 27a, Figura 27b). En la Prefectura de Mie, la Torre Nishiki (Figura 28b) construida sobre pilotes de concreto de 6 [m] de largo, con una estructura principal de concreto reforzado y una altura de 22 [m] con seis niveles, posee distintos usos a lo largo del año. Por otro lado, la Torre Tasukaru (Figura 28a) destaca por su bajo costo y facilidad de construcción, se utiliza solamente como estructura de evacuación vertical, posee una capacidad de 50 personas y su altura es de 5.8 [m] (FEMA, 2008).

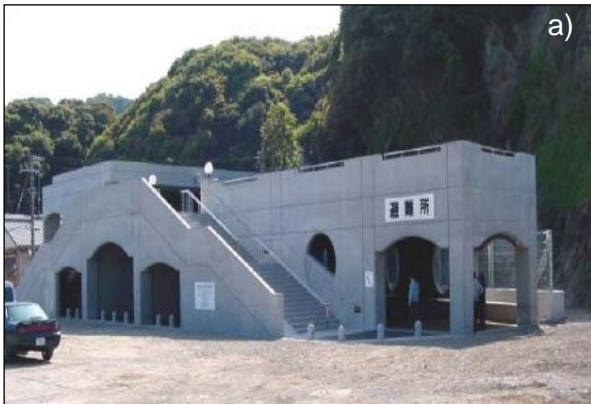


Figura 27 Refugios de concreto reforzado en Prefectura de Tokushima, Japón (FEMA, 2008).

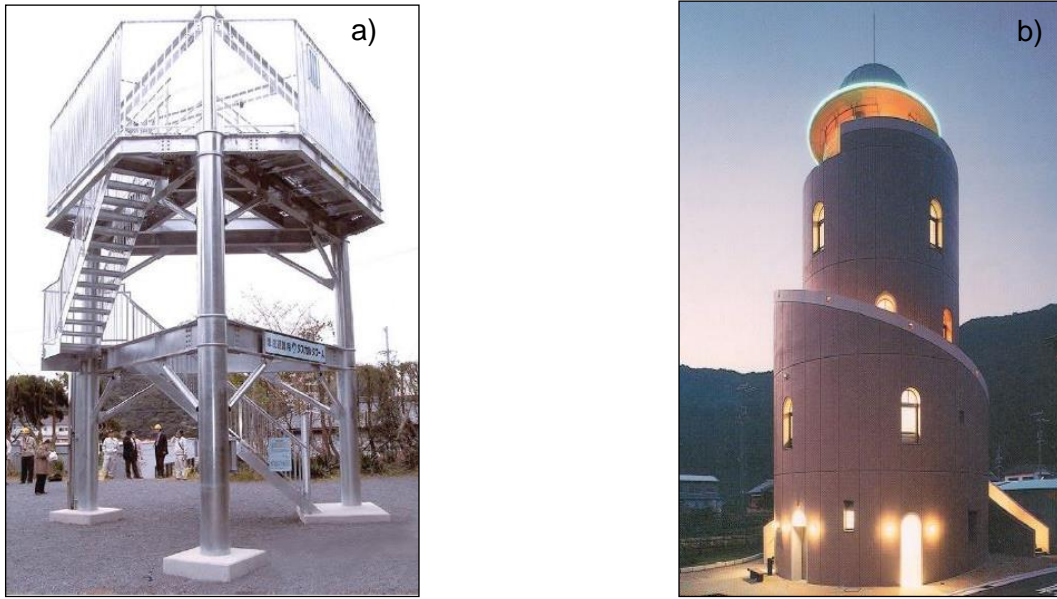


Figura 28 Torre de Tasukaru y torre de Nishiki (FEMA, 2008).

En el plan de evacuación por tsunami de Waikiki (Figura 29), Hawai se han designado estructuras de concreto reforzado y acero, con más de seis pisos de altura, como refugios de evacuación vertical (FEMA, 2008).

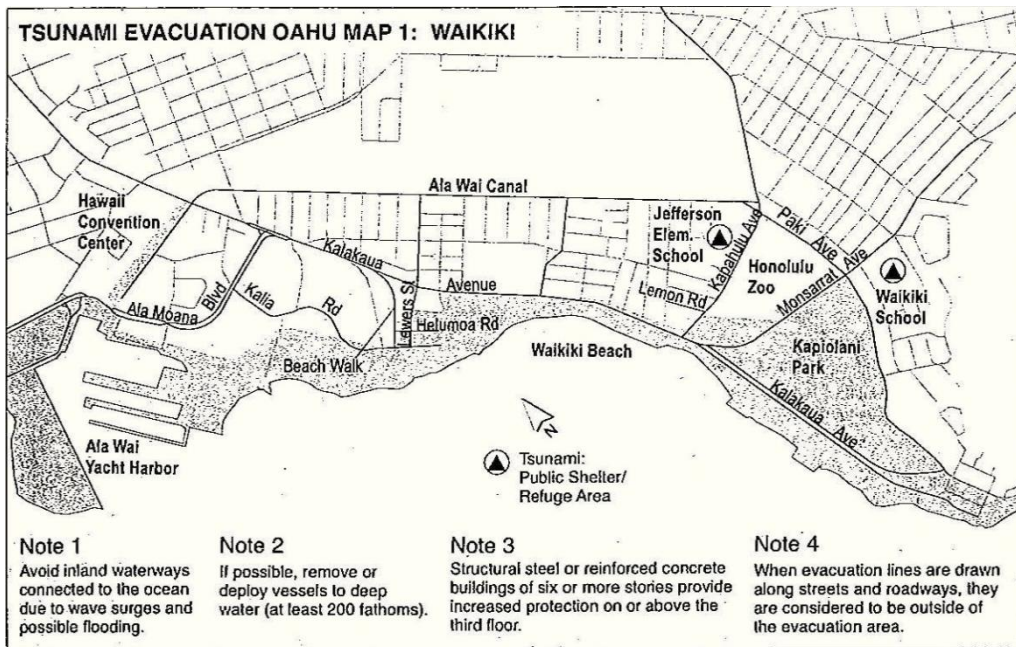


Figura 29 Mapa de evacuación por Tsunami Waikiki, Hawai (FEMA, 2008).

Nuevos enfoques investigativos desarrollados por autores como Muhari, Imamura, & Koshimura (2014) han innovado en el diseño de estructuras de evacuación vertical como la que se presenta en la Figura 30. La particularidad de este tipo de estructuras, es la

facilidad de poder implementarse en ciudades densamente pobladas y modernas. Sencillamente se adopta un diseño mixto tipo torre- puente peatonal en las intersecciones de calles en las que se requieran este tipo de refugios. Otra de las ventajas que presenta este tipo de estructura es su fácil construcción y poco mantenimiento.

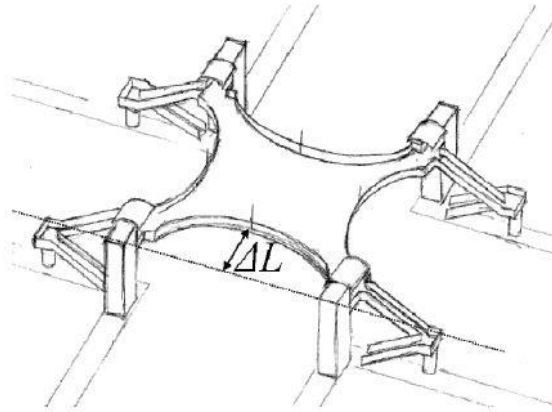


Figura 30 Estructura de EV tipo torre-puente peatonal (Muhari, Imamura, & Koshimura, 2014).

Respecto al desempeño de estructuras de evacuación vertical, el terremoto y posterior tsunami de Tohoku en 2011 ha entregado las primeras lecciones en el mundo.

De acuerdo a Fraser, Leonard, Murakami, & Matsuo (2012) estas estructuras refugiaron 5.438 personas en 37 diferentes refugios a lo largo de la Región de Tohoku. En Figura 31, se aprecian 9 edificaciones destinadas a evacuación vertical en la ciudad de Kesennuma, además se indica la cantidad de personas refugiadas en cada estructura (2.326 personas en total) y su ubicación. Las edificaciones A, F, G, I se utilizaban como oficinas, mientras que B, C, D, E y H eran estructuras destinadas a la fabricación de conservas, comercio, asistencia social, estacionamientos para automóviles y centro comunitario, respectivamente.



Figura 31 Estructuras de EV en la ciudad de Kesennuma, Japón (Fraser et al., 2012).

En general, las estructuras fueron capaces de brindar refugio a los evacuados y lograron salvar vidas durante la emergencia, por lo que se valora de manera positiva la implementación de estos sistemas de evacuación en las zonas costeras de riesgo por tsunami. A pesar de ello, el desempeño de ciertas estructuras no fue el esperado, ya que registraron inundaciones en los niveles designados como zona de seguridad. Según el departamento de bomberos de la ciudad, si la inundación se hubiese producido con marea alta, algunas estructuras hubiesen sido totalmente sobrepasadas con 1 [m] adicional de inundación, por lo que se sugiere elevar a 5 el mínimo de pisos para las estructuras que en el futuro sean designadas como refugios de evacuación vertical (Fraser et al., 2012).

Las inundaciones producidas en los refugios, se debieron a la subestimación de la amenaza por tsunami en el área afectada (revisar apartado 3.1.2.3), en este sentido el llamado de Fraser et al. (2012) es a ser cuidadosos y realizar una correcta caracterización de la amenaza por tsunamis de campo cercano, pues una desprolijidad en este sentido, puede desencadenar consecuencias nefastas tanto en refugiados y estructuras como en el manejo de emergencias.

En este mismo contexto, la acción del fuego en estructuras de evacuación vertical es un aspecto a mejorar, pues la propagación del mismo debido a derrames de sustancias

inflamables y su interacción con escombros flotantes, provocaron daños en algunos refugios, por lo que la prevención del fuego es otra de las lecciones aprendidas (Fraser et al., 2012).

En lo que refiere a la accesibilidad a estructuras, contar con acceso las 24 horas del día resulta imperativo durante escenarios nocturnos. Es por esta razón que alinear esfuerzos con los sectores privados para permitir el ingreso de personas a las estructuras en cualquier instante del día, resulta trascendental. Otra lección que rescata Fraser et al. (2012) es la necesidad de mejorar la señalización exterior de estructuras y la provisión de elementos de supervivencia como víveres, agua y medicamentos, para evitar que los refugiados abandonen las estructuras en busca de elementos de primera necesidad, durante la emergencia.

Es importante señalar, que a pesar de la cercanía con el puerto, las estructuras no registraron daños mayores por escombros, solamente la estructura A en Figura 31 presentó daños en escaleras exteriores. Cabe destacar que las estructuras designadas como evacuación vertical en Japón, deben cumplir con criterios de materialidad (concreto reforzado o acero recubierto con hormigón de baja densidad) y año de construcción posterior a 1981, última modificación importante del código sísmico japonés (Fraser et al., 2012).

Para poder llevar a cabo una evacuación vertical ante tsunami en estructuras previamente designadas por las autoridades competentes, los esfuerzos deben ser transversales, la colaboración entre entidades gubernamentales, comunidades y el sector privado, es vital para llevar a cabo labores de evacuación satisfactorias. Realizar ejercicios de evacuación preventivos, difundir planos de evacuación y educar a las comunidades para que conozcan la ubicación de refugios, es imprescindible (FEMA, 2008).

En relación al diseño de estructuras de evacuación vertical, la FEMA (2008) señala que si bien es primordial incorporar las cargas dinámicas tanto para sismo como aquellas asociadas al tsunami, existe evidencia de que estructuras no necesariamente diseñadas para resistir cargas por tsunami, han sido capaces de sobrevivir el paso de destructivos tsunamis, sirviendo como refugio de evacuación vertical. De esta manera, y después del tsunami de Indonesia en 2004, Dalrymple & Kriebel (2005) concluyeron que las estructuras diseñadas con materiales sólidos de concreto reforzado con buenas fundaciones y sin diseño ante tsunami, tuvieron un buen desempeño al paso de la inundación, y mejor aún fue el comportamiento de las edificaciones construidas en altura que permitieron el libre paso del flujo del tsunami. Asimismo, muchos de los complejos turísticos de hormigón armado resultaron tener diseños accidentalmente favorables ante cargas por tsunami, ya que permitieron el paso del flujo a través del primer piso de las edificaciones, al romperse puertas y ventanales, reportando daños estructurales menores.

### 3.3.1.2 CONCEPTO DE FRAGILIDAD

En términos generales el concepto de fragilidad se asocia a la vulnerabilidad general de un sistema estructural, ya sea por amenaza sísmica o ante tsunami. En este apartado se profundizan ambos conceptos.

### 3.3.1.2.1 FRAGILIDAD SÍSMICA

Una manera de evaluar el comportamiento estructural frente a sollicitaciones sísmicas es con el uso de curvas de fragilidad sísmica. Estas curvas utilizan enfoques probabilísticos que indican el nivel de daño que experimenta una estructura de acuerdo a la probabilidad de excedencia alcanzada en función de algún parámetro que indique la severidad del movimiento sísmico. Es usual que las curvas de fragilidad sísmicas se elaboren utilizando parámetros como el desplazamiento máximo del suelo (PGD), velocidad máxima del suelo (PGV) o aceleraciones máximas del suelo (PGA), sin embargo, las más utilizadas son las de aceleraciones (Vega, 2014).

En materia de gestión, elaboración de códigos sísmicos y ordenamiento territorial, las curvas de fragilidad son una herramienta útil para contar con una estimación de la amenaza ante terremotos, así como los daños producidos en las estructuras (Reese, Cousins, Power, Palmer, Tejakusuma, & Nugrahadi, 2007).

Para poder desarrollar curvas de fragilidad, se requiere una red sismológica robusta con instrumentos de alta precisión cuya cobertura y densidad sean suficientes para su correlación con daños locales. De ahí que la importancia de este concepto para el futuro de la gestión del riesgo de desastres naturales, es tan grande.

El procesamiento de datos de la serie de tiempo de aceleraciones posterior a la ocurrencia de terremotos, entrega parámetros importantes utilizados en las normativas de diseño sismorresistente como es el caso de la norma chilena Nch 433.Of 96 Mod.2009 que utiliza un espectro de respuesta en términos de aceleración máxima del suelo o Peak Ground Acceleration (PGA) que es un parámetro que indica la intensidad del evento sísmico.

Según la metodología propuesta por Vega (2014) y Jorquera (2014), para elaborar curvas de fragilidad sísmica se debe contar con elementos como parámetros indicadores de intensidad del sismo (PGA, PGD, PGV, entre otros), un modelo estructural, parámetro indicador de daño y un análisis dinámico no lineal (sismos de alta intensidad).

En Figura 33, la curva de fragilidad sísmica para el set de terremotos de subducción elaborado por Jorquera (2014) en el que se utiliza un modelo estructural de un grado de libertad representativo de edificios habitacionales chilenos de hormigón armado de 19 pisos con dos niveles de subterráneo, cuyos daños producto del terremoto de 2010 fueron mayores a pesar de ser construcciones relativamente nuevas. Esta vulnerabilidad sísmica causó sorpresa, pues para una aceleración máxima del suelo (PGA) de 0.4g registrada mayoritariamente en los suelos de Santiago, el nivel de daño en algunos edificios fue severo declarando inclusive su inhabilitabilidad.

<b>Nivel de desempeño</b>	<b>Estado de daño</b>	<b>Desplazamiento objetivo <math>\delta/H</math></b>
Totalmente Operacional	No Daño	0.002
Operacional	Ligero	0.005
Seguridad a la vida	Moderado	0.015
Pre-Colapso	Severo	0.025
Colapso	Colapso	> 0.025

Figura 32 Desplazamiento objetivo según estado de daño. Tabla 6, capítulo 7 Jorquera (2014).

Tal como se aprecia en Figura 33, el 64% de los edificios analizados en la muestra alcanzan un estado de daño de no daño (encima de curva negra,  $d > 0.002H$ , según Jorquera (2014) Figura 32, donde  $d$  corresponde al desplazamiento lateral máximo del nivel superior respecto a la base y  $H$  es la altura del edificio) para PGA 0.4g, mientras que un 33% de la muestra analizada experimenta un estado de daño ligero para PGA 0.4g (entre curva negra y roja,  $d > 0.005H$ ), finalmente un 3% de las estructuras debieron haber registrado daño moderado (entre curva roja y azul,  $d > 0.015H$ ).

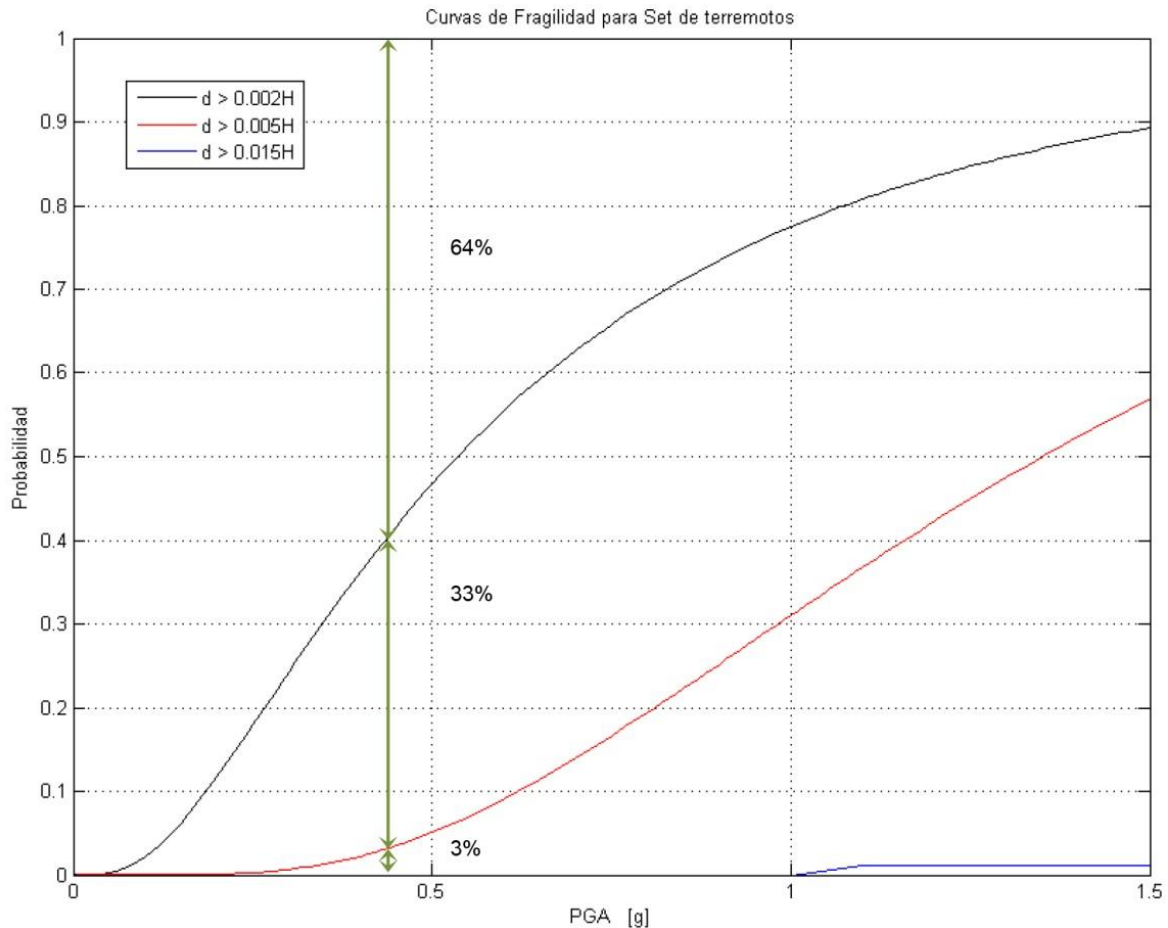


Figura 33 Curvas de Fragilidad Set de Terremotos (Jorquera, 2014).

### 3.3.1.2.2 CURVAS DE FRAGILIDAD ANTE TSUNAMI

Las curvas de fragilidad ante tsunami se basan en un enfoque probabilístico que permite estimar la cantidad de daño que puede soportar o que ha sufrido una estructura de acuerdo a las características físicas propias del flujo de un tsunami, es decir, cuantificando daños según la velocidad de flujo, profundidad de inundación o fuerza hidrodinámica (Koshimura, Namegaya, & Yanagisawa, 2009).

Comúnmente estas curvas se desarrollan para estimar la probabilidad de excedencia de daño en estructuras según la profundidad de inundación alcanzada. En países como Japón, Indonesia y Tailandia se han desarrollado curvas de fragilidad ante tsunami utilizando distintas metodologías. En este sentido, Suppasri et al. (2013) desarrollaron

curvas de fragilidad con datos de campo recopilados por el gobierno japonés después del devastador tsunami de 2011. Se evaluaron daños en 250.000 estructuras, y a partir de dicho catastro se estimaron probabilidades de daño según material de construcción, número de pisos, altura de inundación y topografía costera. Respecto a este último punto, cabe destacar la importante contribución de Suppasri et al. (2013) en el desarrollo de curvas de fragilidad que cuantifican los daños estructurales, considerando una materialidad mixta, en dos sectores costeros de la ciudad de Ishinomaki, Japón. En la Figura 34a el sector costero plano y en Figura 34b sector costero cercano a un estero. Con estas curvas se ha demostrado el aumento en la probabilidad de daño estructural que ocasiona el emplazamiento de ciudades costeras en la cercanía a cursos de agua como esteros o ríos, en que los efectos del tsunami se caracterizan por ser más severos que en topografías planas. La diferencia en la probabilidad de daño en aquellas estructuras arrasadas por el tsunami para un nivel de daño 6 (Tabla 5) situadas en el sector costero con topografía plana (Figura 34a) en relación a las que se encontraban en las cercanías el estero (Figura 34b), es considerable. Por ejemplo, para una profundidad de inundación de 3 [m] se observa un 10% y un 60%, respectivamente.

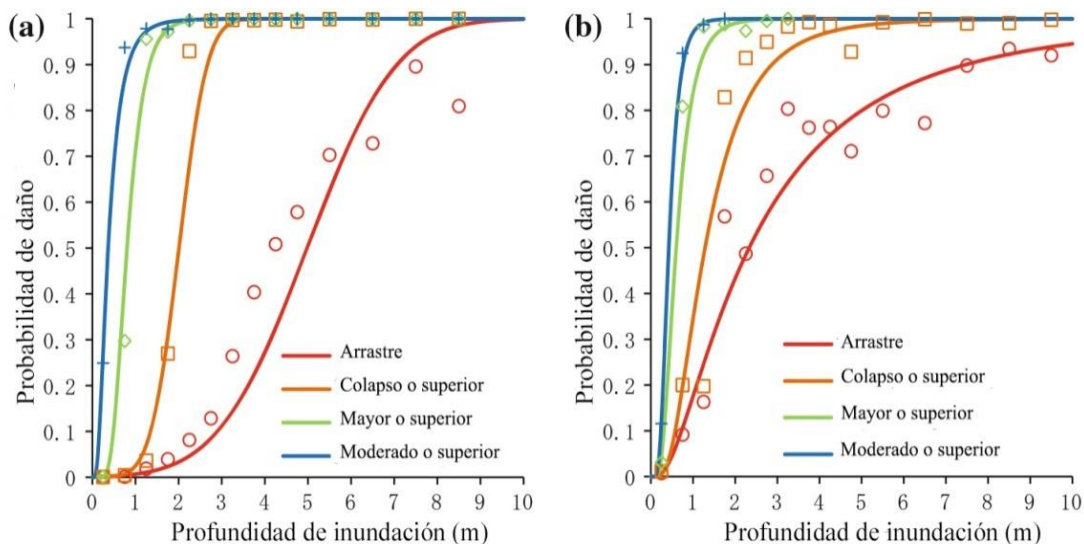


Figura 34 Curvas de fragilidad material mixto ciudad Ishinomaki, Japón. Adaptado de Suppasri et al. (2013).

Tabla 5 Nivel de daño, clasificación y descripción.

Nivel de daño	Clasificación	Descripción
1	Daño menor	Sin daño estructural o no estructural significativo, posiblemente inundación menor
2	Daño moderado	Daños leves en componentes no estructurales
3	Daño mayor	Daños graves en algunos muros pero sin daños en columnas
4	Daño completo	Daños graves en varios muros y algunas columnas
5	Colapso	Daño destructivo en muros ( en más de la mitad de la densidad del muro) y en varias columnas
6	Arrasado	Arrastrado, solamente permanecen las fundaciones, volcamiento total

Fuente: Adaptada de Suppasri et al. (2013).

En el mismo trabajo de Suppasri et al. (2013) las curvas de fragilidad desarrolladas para distintos materiales de construcción y número de pisos, entregan resultados bastante interesantes (Figura 35). En general se aprecia que el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado para uno (Figura 35a), dos (Figura 35c) y tres o más niveles (Figura 35e), superan sustancialmente el desempeño de la madera (Figura 35b, Figura 35d y Figura 35f).

Las estructuras de concreto reforzado y madera con tres o más niveles, según Figura 35e y Figura 35f para un nivel de daño completo (número 4, color verde) para una profundidad de inundación de 8 [m], la probabilidad de daño es de 10% y 85%, respectivamente. Para las estructuras arrastradas (nivel 6, color rojo) la probabilidad de daño difiere trascendentalmente. Por otro lado, la madera alcanza un 60% de probabilidad de daño para una profundidad de inundación de 6 [m] mientras que el concreto reforzado tiene una probabilidad de daño menor al 5%.

En lo que respecta a la madera propiamente tal, no se observan grandes diferencias en el desempeño de las estructuras con 1 o 2 pisos (Figura 35b y Figura 35d), sin embargo, para aquellas de 3 o más pisos, se observa una disminución importante en la probabilidad de daño, especialmente para los niveles de daño 5 y 6 (Figura 35f).

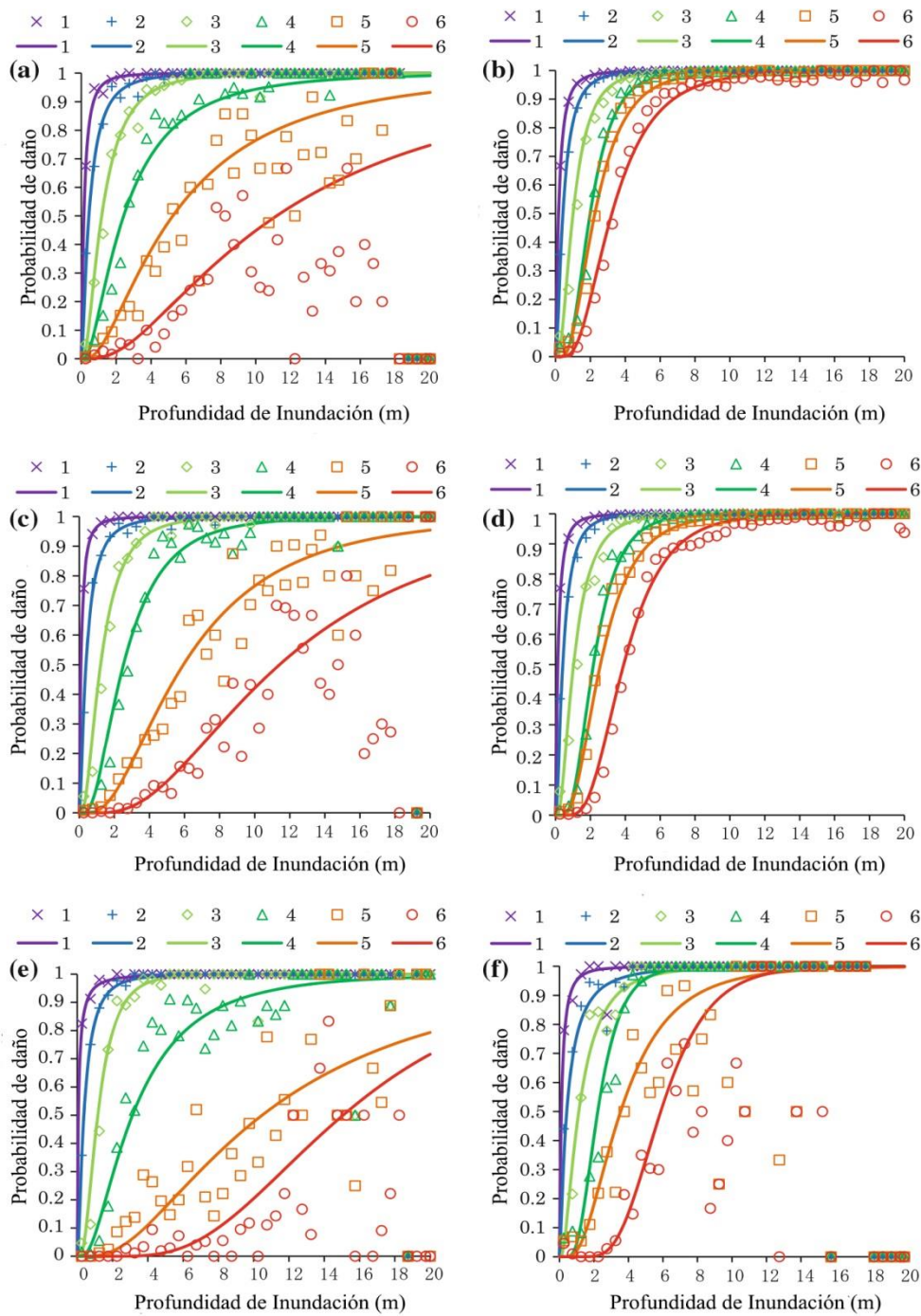


Figura 35 Curvas de fragilidad según materialidad y número de pisos. Adaptado de Suppasri et al (2013).

Autores como Koshimura et al. (2009) y Mas et al. (2012) han integrado el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la estimación de daños en estructuras afectadas por tsunamis. El uso de estos sistemas ha sido de invaluable utilidad, especialmente en lugares en los que la información post desastre no existe o cuya calidad no es la mejor.

Koshimura et al. (2009) además han integrado el uso de modelos numéricos para determinar velocidades de flujo y fuerzas hidrodinámicas del tsunami, información que posteriormente se calibra con datos de campo recopilados en terreno.

### 3.3.1.2.3 CURVAS DE FRAGILIDAD ANTE TSUNAMI EN CHILE

En Chile y en Sudamérica, la investigación en materia de curvas de fragilidad por tsunami no ha sido tan ardua como en otros países del mundo, en este sentido la comunidad científica está al debe. La invitación a conformar grupos de investigación que se dediquen en el futuro a desarrollar estas temáticas en nuestro país queda en manifiesto. Es vital contar con una estimación de daños por tsunami en las ciudades costeras, pues esta información es relevante como instrumento de planificación del borde costero y para la gestión del riesgo de desastres naturales.

A pesar de esta carencia, Mas et al. (2012) desarrollaron curvas de fragilidad (las primeras en la costa sur del pacífico) ante tsunami en Dichato después del terremoto de 27 de Febrero de 2010. Tal como se ha mencionado con anterioridad, Mas et al. (2012) integraron el uso de SIG e imágenes satelitales a través de técnicas de percepción remota, las que posteriormente se calibraron con observaciones en terreno (Figura 36a previo al tsunami, Figura 36b después del tsunami). De esta manera, se obtuvieron curvas de fragilidad según la materialidad de las viviendas azotadas por el tsunami. Para el caso particular de Chile, el material de construcción de las estructuras analizadas resultó ser una materialidad mixta entre albañilería y madera, en su mayoría de dos pisos, con albañilería en primer piso y madera en la planta superior.



Figura 36 Imágenes satelitales Dichato 2010. Adaptado de Mas et al. (2012).

Del catastro de 915 estructuras, se obtuvo una probabilidad de daño estructural de 68% para una profundidad de inundación de 2 [m] (Figura 37f), en tanto que para profundidades superiores a 3 [m], el daño estructural sobrepasa el 80%.

Evento (año)	Localidad	País	Tipo Estructura	n° Estructuras Inspeccionadas	n° Estructuras en el rango	$\mu$	$\sigma$	$\mu'$	$\sigma'$	$R^2$	Curva Fragilidad
Nansei Hokkaido (1993)	Okushiri Is. – Aonae	Japón	Madera	523	50	–	–	0.216	0.736	0.82	a.
Indian Ocean (2004)	Banda Aceh	Indonesia	Madera	48 910	1.000	2.985	1.117	–	–	0.99	b.
Indian Ocean (2004)	Phang Nga	Tailandia	Reforzado (RC)	3.007	100	–	–	0.689	0.903	0.80	c.
Indian Ocean (2004)	Phuket	Tailandia	Reforzado (RC)	1.589	50	–	–	0.917	0.642	0.62	d.
Samoa (2009)	American Samoa	USA	CR	344	20	–	–	1.170	0.691	0.89	e.
Chile (2010)	Dichato	Chile	Madera Albañilería Mixta	915	50	–	–	0.092	1.272	0.86	f.

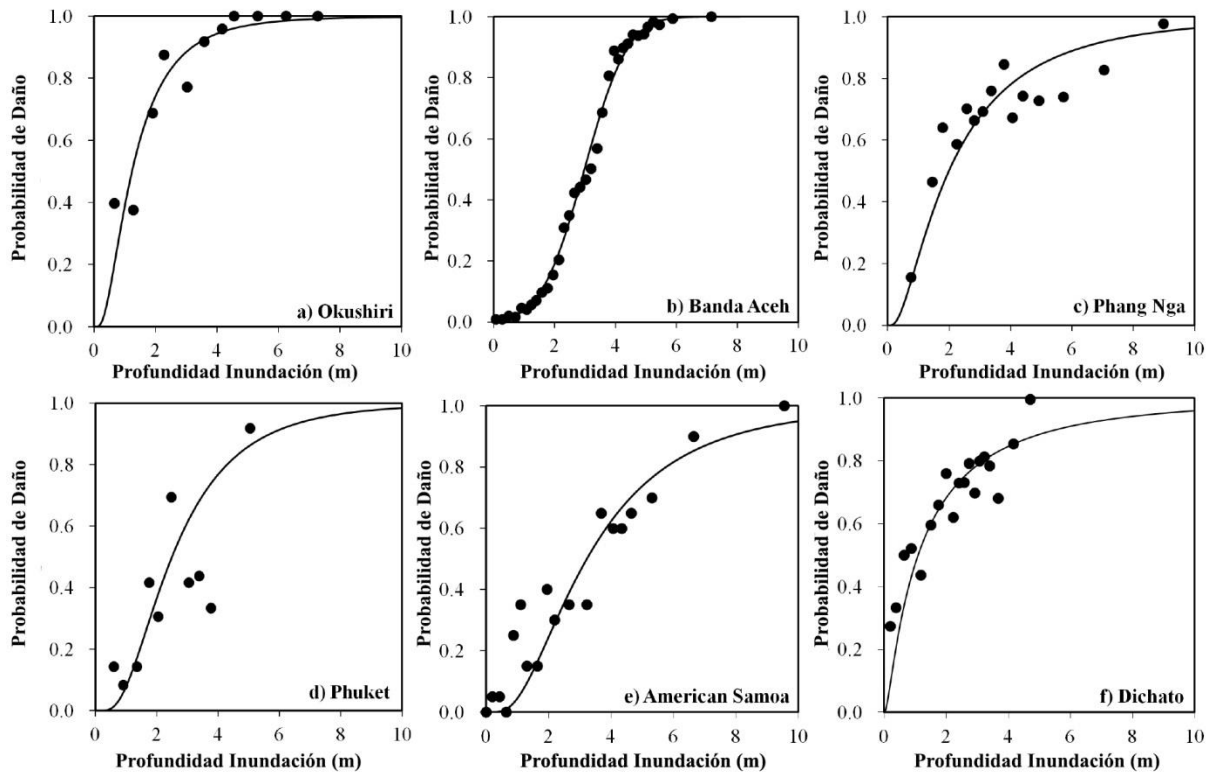


Figura 37 Curvas de fragilidad ante tsunami en el mundo. Adaptado de Mas et al. (2012).

Adicionalmente, en el trabajo de Mas et al. (2012) se realiza una comparación entre las diversas curvas de fragilidad ante tsunami desarrolladas en el mundo (Figura 37). En el caso de Japón predominan las construcciones de madera. En Indonesia y Tailandia, el análisis se centró en estructuras de concreto reforzado (Figura 37b, Figura 37c, Figura 37d). En Samoa (USA) se analizaron estructuras de madera y concreto reforzado (Figura 37e).

Los resultados entregan información valiosa respecto al desempeño estructural de los distintos materiales de construcción utilizados en regiones del mundo. Se comprueba que el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado es muy superior al de las construcciones de madera (probabilidad de daño entorno al 20% y 60%, respectivamente, para una profundidad de inundación de 2 [m]).

Cabe destacar que los métodos constructivos, códigos sísmicos y calidad de materiales varían, es por esta razón que en países como Japón, las estructuras de madera para una

misma profundidad de inundación pueden presentar mejor comportamiento que otras estructuras del mismo material en otra zona geográfica (Suppasri et al., 2013).

### 3.3.1.3 NORMATIVA Y MÉTODOS DE DISEÑO

La norma chilena Nch433Of.96 Mod.2009 es el código sísmico obligatoriamente utilizado en Chile para el diseño de edificios sometidos a cargas dinámicas de origen sísmico a lo largo de todo el país. En la actualidad, esta norma se encuentra en proceso de modificación debido a las lecciones aprendidas después del terremoto del Maule en 2010, que en su mayoría reportaron fallencias en la clasificación de suelos y en elementos estructurales diseñados con hormigón armado. Es por este motivo, que los decretos supremos D.S n°60 y D.S n°61 se utilizan a la fecha como complemento a la norma, específicamente para el diseño de estructuras de hormigón armado y la nueva clasificación de tipo de suelos establecida en el D.S n°61. Adicionalmente, esta norma establece la zonificación sísmica del país, dividida en zona I, II y III.

En relación a las estructuras de carácter industrial, ya sean edificios o instalaciones, la norma Nch2369.Of2003 establece los criterios para el diseño sismorresistente.

Respecto al diseño ante tsunami, hasta finales del año 2013, no se contaba con normativa que regulara dentro del diseño de edificaciones y estructuras destinadas a la habitación de personas o al uso no habitacional de las mismas, cargas por tsunami, por lo que no había manera de que las entidades públicas o privadas diseñaran edificaciones tsunamirresistentes. En diciembre de 2013 el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) en conjunto con diferentes entidades educativas y especialistas tanto del campo consultivo como académico, elaboraron la Norma Técnica NTM 007 "Diseño estructural para edificaciones en área de riesgo de inundación por tsunami o seiche" que indica los requisitos mínimos de diseño para edificaciones situadas en zonas de riesgo de tsunami. Con esta normativa, las estructuras que se construyan en el futuro han de incluir en sus diseños cargas por tsunami tanto para fuerzas hidrostáticas, como para fuerzas hidrodinámicas. Adicionalmente, establece que las estructuras de evacuación vertical deben diseñarse de acuerdo a lo establecido en la FEMA P646 "Guías para el diseño de estructuras de desalojo vertical en caso de tsunami". Por otro lado, las estructuras existentes que requieran reconstrucciones, ampliaciones, remodelaciones estructurales mayores o cambio de ubicación a una zona de riesgo de inundación por tsunami, deben acogerse a esta norma.

La recientemente elaborada Nch3363.Of2015, es la norma chilena que regula el diseño estructural para edificaciones situadas en zonas de riesgo por tsunami o zonas potencialmente inundables, ya sea para edificaciones destinadas o no a la habitación de personas. Aquellas edificaciones destinadas a la habitación de personas se deben construir en altura y sobre estructuras de soporte. En caso que se encuentren bajo la cota de inundación pueden ser habitadas siempre y cuando cuenten con vías de evacuación y/o se propongan medidas de mitigación. Las edificaciones no destinadas a la habitación de personas que se ubiquen bajo la cota de inundación deben considerar algunos criterios como diseño transparente, componentes estructurales resistentes a fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas, o tabiques colapsables ante tsunami que no implique un riesgo para la estructura. Además, tanto el diseño de fundaciones como los elementos de soporte deben considerar el potencial de socavación.

Por otro lado, ONEMI (2014) en el manual de “RECOMENDACIONES PARA LA PREPARACIÓN Y RESPUESTA ANTE TSUNAMI”, establece que si existen personas que vean dificultada su evacuación horizontal o que el tiempo de evacuación de 15 minutos no sea suficiente para llegar a zona segura, pueden utilizar estructuras de más de ocho pisos de altura para refugiarse ante tsunamis.

Finalmente, para determinar la intensidad de sismos y terremotos, la Nch3.Of1971 establece la escala oficial utilizada para dichos propósitos (Tabla 22, ANEXO A TERREMOTOS Y TECTÓNICA DE PLACAS).

#### 3.3.1.4 ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA OFERTA EXISTENTE

La FEMA (2008) establece que el diseño de estructuras de evacuación vertical debe realizarse de manera tal que las edificaciones sean capaces de soportar tanto las sollicitaciones dinámicas asociadas al sismo como cargas de tsunami (fuerzas hidrostáticas, fuerzas hidrodinámicas, fuerzas boyantes, fuerzas de impacto por escombros, fuerzas de levantamiento, cargas gravitacionales por agua retenida en pisos superiores y fuerzas de impulso).

Respecto a la materialidad de las estructuras y tal como se discute en puntos previos de este estudio, las estructuras que accidentalmente han brindado protección son aquellas con diseños transparentes de hormigón armado o acero, que permitieron el libre paso del flujo en la planta baja, además de poseer fundaciones profundas y estar construidas sobre pilotes. Aquellos hoteles y complejos turísticos que en su diseño integraron grandes ventanales y anchas puertas, que al romperse permitieron el paso de la inundación, entregaron protección a la estructura impidiendo el daño estructural (Dalrymple & Kriebel, 2005; FEMA, 2008; Reese, Cousins, Power, Palmer, Tejakusuma, & Nugrahadi, 2007).

En Japón, se aceptan como refugios de evacuación vertical aquellas estructuras que hayan sido construidas con hormigón armado o acero reforzado con hormigón, sin embargo, las que presentan mejor comportamiento son las primeras. Las profundidades de inundación se obtienen de los mapas de amenaza para zonas costeras, de este modo el número de pisos de altura de las estructuras varía de acuerdo a dichas profundidades. Aquellas que soporten menos de 1 [m] de profundidad deben contar con más de 2 pisos de altura, si son 2 [m] de profundidad mínimo 3 pisos de altura, mientras que las que soporten más de 3 [m] de profundidad de flujo han de tener más de 5 pisos de altura. El diseño sismorresistente está sujeto a códigos modernos que contemplen diseños de ingeniería de alta calidad (posterior a 1981), y cargas por tsunami tanto hidroestáticas como hidrodinámicas (Fraser, Leonard, Murakami, & Matsuo, 2012).

En Waikiki, Hawaii, tal como se ha mencionado en capítulos anteriores, el plan de evacuación por tsunami contempla EV de concreto reforzado con más de 6 pisos de altura (FEMA, 2008).

Las edificaciones existentes que no posean estas cualidades, deben modificarse para cumplir con los estándares. A pesar de ello, la experiencia de los últimos tsunamis como el de Indonesia ha demostrado que estructuras sismorresistentes no diseñadas para resistir cargas por tsunami, han servido como refugio de EV al incluir diseños que han permitido el libre paso de la inundación (Dalrymple & Kriebel, 2005; FEMA, 2008).

Para la accesibilidad a estructuras, se debe contar con señalética exterior que indique la designación de la estructura como edificio de EV. Es importante que el acceso sea las 24 horas del día a modo de prever un posible escenario nocturno. El uso de rampas exteriores para agilizar la circulación en la estructura y evitar problemas de acceso, se considera una excelente opción. Además, es imprescindible que la población se encuentre informada y entrenada para ubicarse y desplazarse hasta la cota de seguridad designada al interior de la estructura, complementariamente el personal calificado debe asistir a dichas personas durante la evacuación. A modo de asegurar que las personas permanezcan al interior del refugio durante todo el lapso de tiempo que dure la emergencia, dichas estructuras deben contar con abastecimiento de víveres, agua, medicamentos y otros elementos de primera necesidad (FEMA, 2008; Fraser, Leonard, Murakami, & Matsuo, 2012).

La ubicación de estructuras de EV en las ciudades modernas es una problemática debido a factores como el escaso ordenamiento territorial de ciertas ciudades costeras, el limitado tiempo para refugiar a la población especialmente ante tsunamis de campo cercano y la variabilidad en las velocidades de desplazamiento de las personas que muchas veces no permite escoger una ubicación óptima. De todos modos, la FEMA (2008) aconseja ubicar las estructuras en lugares alejados de posibles fuentes de incendios como gasolineras o industrias químicas, así como evitar lugares en los que se puedan concentrar grandes cantidades de potenciales escombros flotantes, ya sea en las cercanías de los puertos o grandes avenidas con excesivo tráfico de vehículos. Finalmente, ubicarse inmediatamente cerca de la línea de costa también debe evitarse si es posible. Fraser et al. (2012) reconoce esta limitación e indica que a pesar de que en ciertas ocasiones no se cuente con ubicaciones idóneas, el hecho de salvar vidas y refugiar personas en estructuras de EV, sienta un precedente positivo para estos sistemas de evacuación.

En Tabla 6, un resumen de los criterios cualitativos de la oferta existente descrita en los párrafos anteriores.

Tabla 6 Criterios cualitativos de la oferta existente.

ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA OFERTA EXISTENTE
Diseño de ingeniería basado en códigos sísmicos modernos (sismorresistente)
Diseño ante cargas por tsunami (tsunamirresistente)
Materialidad (Hormigón Armado o Acero)
Número de pisos superior a 6
Diseño de la planta baja transparente
Señalética exterior
Acceso 24 horas
Rampas de acceso exterior
Abastecimiento de elementos de primera necesidad (agua, víveres, medicamentos, entre otros)
Evitar cercanía a bencineras e industrias químicas
Evitar cercanía a fuentes de escombros flotantes como puertos y grandes avenidas
Evitar cercanía a línea de costa

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1.5 ASPECTOS CUANTITATIVOS Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Los aspectos cuantitativos a utilizar se refieren a la superficie de ocupación al interior de la estructura por persona. Entendiendo que la evacuación por tsunami puede durar varias horas, es primordial refugiar a las personas de la mejor manera posible durante el desastre. Para ello, y según la FEMA (2008) se recomienda contar con un área de 1 [m<sup>2</sup>] por ocupante. Con esta superficie por persona, las personas podrían moverse cómodamente sin sentirse encerradas en el lugar que están evacuados. Cabe destacar que dicha superficie está sujeta a variaciones dependiendo de la condición física y estado de salud de las personas, pues si la estructura está destinada a recibir personas heridas o con movilidad reducida, se necesita un área mayor por persona.

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 CONTEXTO Y CIUDAD OBJETIVO

La Región de Valparaíso es la V Región del país, posee 8 provincias y 38 comunas. Su extensión territorial abarca entre los 32° 02' y 33° 57' latitud Sur y entre los 70° de longitud Oeste y el Océano Pacífico. Incluye las Islas Salas y Gómez, San Félix, San Ambrosio, Isla de Pascua y el archipiélago Juan Fernández. Es la tercera región más populosa del país con 1.539.852 habitantes, le anteceden las regiones Metropolitana y del Bío Bío (Municipalidad de Valparaíso, 2014; Gobierno Regional de Valparaíso, 2014; División Política Administrativa Censal, 2007).



Figura 38 Ubicación geográfica ciudad Valparaíso. Adaptado de <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region5> y google earth.

La ciudad de Valparaíso (Figura 38) es una de las más antiguas del país, su origen data del año 1536 asociado principalmente a la temprana construcción del puerto. Debido a la importancia económica para el país y para la región, con el transcurso de los años el aumento de la población permitió la configuración tan particular de la ciudad que combina su carácter urbano con la actividad portuaria. Producto de este crecimiento de la población, la distribución de habitantes se efectúa a lo largo de 44 cerros, hecho que ha

permitiendo catalogar a Valparaíso como un anfiteatro natural con vista al océano (Municipalidad de Valparaíso, 2014).

En el año 2003 fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).

Según las proyecciones realizadas por el Instituto Nacional de Estadística (2012), la población de la ciudad de Valparaíso al año 2015 corresponde a 295.489 habitantes.

En la actualidad, la ciudad se ha estructurado de manera tal que existe el denominado plan de Valparaíso. Dicho plan consiste en una planicie artificial formada por relleno de la base de los cerros de la ciudad, se extiende desde la avenida Argentina hasta el muelle del puerto. La mayor parte del comercio actual se desarrolla en este sector, asimismo es considerada como una de las zonas de mayor riesgo ante terremotos (Municipalidad de Valparaíso, 2014). Según SERNATUR (2014), la comuna de Valparaíso se encuentra dentro de las 20 comunas con mayor población flotante de turistas. En este ranking, es la séptima con 2.955.944 turistas al año.

Por otra parte, en el Plan de la ciudad, existen 17 cauces de escurrimiento de aguas superficiales, dichos cauces de sur a norte son: San Francisco, San Martín, Márquez, Aduana, Tomás Ramos, Melgarejo, Bellavista, Edwards, Carrera, Las Heras, Rodríguez, Av. Francia, Av. Uruguay y Av. Argentina (Municipalidad de Valparaíso, 2014).

La cíclica actividad sísmica de la zona central del país, ha provocado que Valparaíso se encuentre constantemente expuesto a amenazas tales como terremotos y tsunamis. Los últimos terremotos datan de los años 1965, 1971, 1973, 1985 y 2010. Sin embargo, el mayor terremoto y el tsunami más destructivo ha sido el del 8 de Julio de 1730. (Barrientos, 1988; Carvajal, Cisternas, & Catalán, 2014; Cisternas, 2012; Cisternas, Gorigoitia, Torrejón, & Urbina, 2011; Comte, 1986; Udías, Madariaga, & Buforn, 2012; Madariaga, 1998; Quiroz, Aránguiz, & Belmonte, 2014; Pararas-Carayannis, 2010; Fritz et al., 2011).

## **4.2 ESTUDIO DE AMENAZA**

El estudio de amenaza física se basa en el peor escenario conocido, para ello, se va a utilizar la carta de inundación por tsunami para la ciudad de Valparaíso, elaborada por el SHOA (Figura 23), y desarrollada de acuerdo al terremoto y posterior tsunami de 1730.

### **4.2.1 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS**

Para el estudio de amenaza por tsunami de campo cercano, se proponen 3 escenarios basados en la peor condición posible, adoptando así un enfoque conservador.

El primer escenario en simular es durante un día laboral, el segundo es en una noche de fin de semana de verano y el último es en una noche de año nuevo.

Lo que se busca representar en los tres escenarios, es la ocurrencia de la amenaza en distintas condiciones del sistema urbano. Por ejemplo, en el primer escenario la población expuesta corresponde a la cantidad de personas que se encuentran en la zona de análisis (calles Ecuador, Edwards, Francia, Rodríguez y Uruguay) durante una jornada laboral, es

decir, se pretende simular el funcionamiento de la ciudad en un día normal de trabajo, estudios, actividades comerciales, atención de servicios de salud, entre otros.

Por otro lado, en una noche de fin de semana de verano, la variación en la población viene dada por el arribo de turistas a la ciudad, concentrándose la actividad nocturna en focos específicos de la ciudad.

Finalmente, el sistema urbano para la noche de año nuevo es quizás la condición más desfavorable para la ciudad, sin embargo, para el área de análisis de este estudio, la demanda se concentra mayormente en la línea de costa.

#### 4.2.2 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Según lo visto en el esquema de la Figura 25 y de acuerdo a la Tabla 4, la probabilidad de ocurrencia escogida es la más desfavorable, es decir, la ocurrencia de un evento dentro de los próximos 10 años con un factor de probabilidad de  $P=5$ .

### 4.3 ESTUDIO DE IMPACTOS

Para el estudio de impactos se utiliza un enfoque cualitativo debido a la escasez de información y a la incerteza del fenómeno estudiado. De esta manera, es necesario definir las vulnerabilidades del sistema y la exposición de los mismos.

#### 4.3.1 VULNERABILIDADES

Se entiende como vulnerabilidad al factor de riesgo interno expresado matemáticamente por la factibilidad de que un sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. En el presente estudio se utiliza la definición propuesta por Cardona (2004):

*“Susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños en caso de un fenómeno desestabilizador de origen natural o antrópico”* (Cardona, 2004)

Las vulnerabilidades a estudiar se relacionan con el nivel 3 de impacto por desastre ante tsunami definido en la metodología propuesta por Reyes (2013), específicamente aquella ligada al sufrimiento humano (Human Suffering) en Figura 39. A su vez, la vulnerabilidad asociada al sufrimiento humano (HS) se descompone en 4 subcomponentes de vulnerabilidad; pérdidas humanas debido al colapso de edificios (HS01), personas que necesitan asistencia durante el desastre (HS02), personas atrapadas bajo escombros (HS03) y personas arrastradas por el tsunami (HS04) según Figura 40.

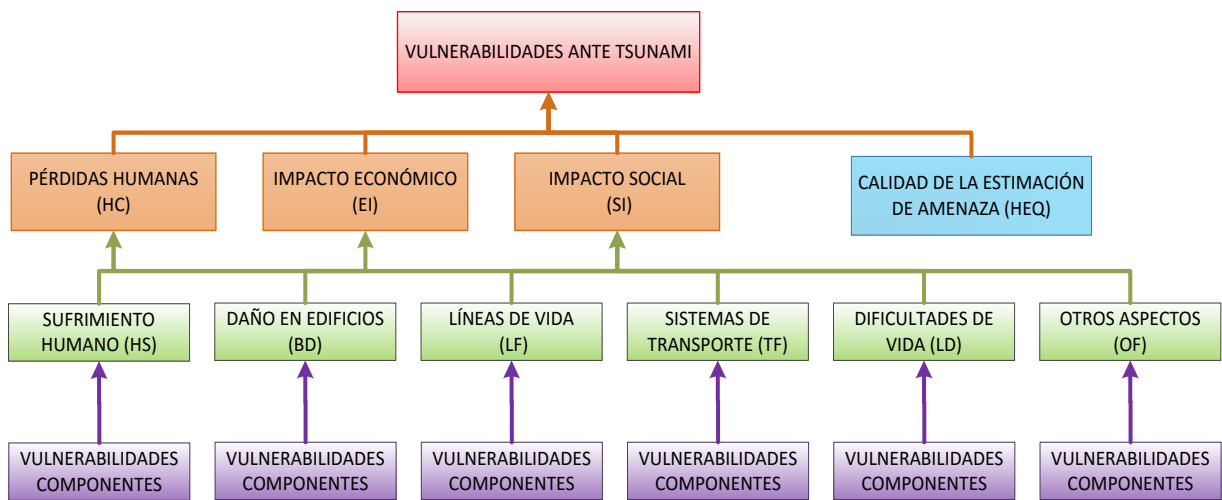


Figura 39 Niveles de impacto desastre por tsunami. Adaptado de Reyes (2013).

El estudio de vulnerabilidad de este proyecto de título se basa en el análisis de personas arrastradas por tsunami (HS04) que a su vez se descompone en 8 subcomponentes de vulnerabilidad, detalladas en Figura 40.

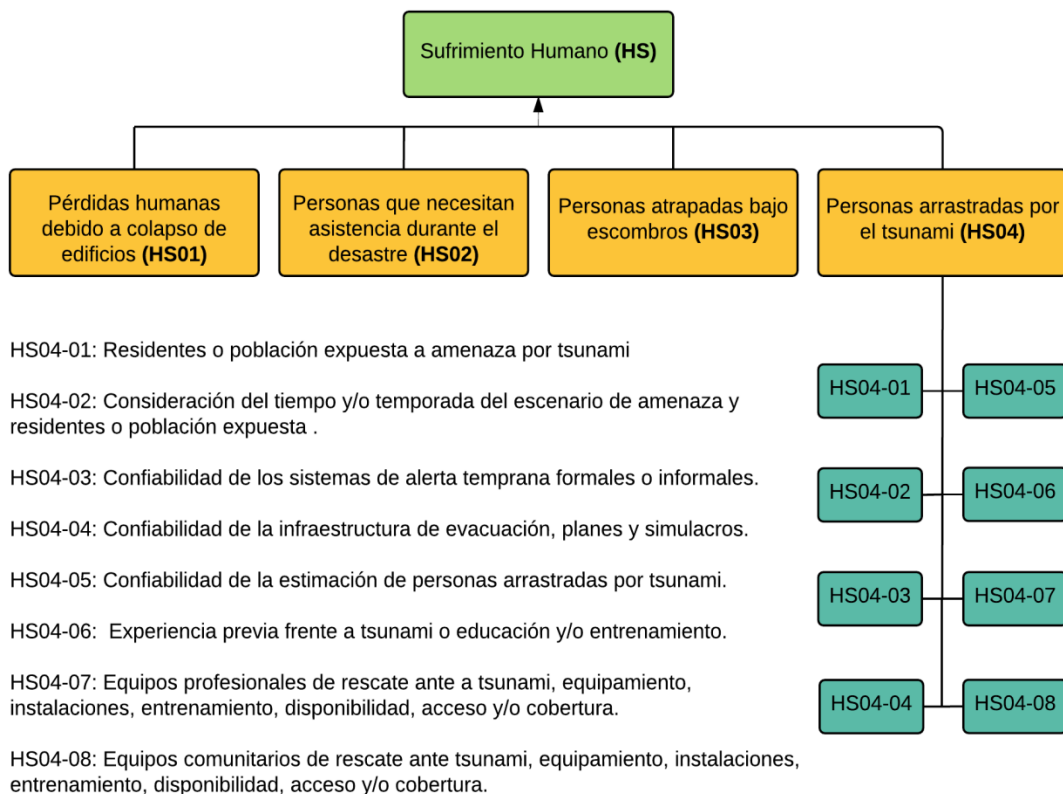


Figura 40 Subcomponentes de vulnerabilidad asociadas al Sufrimiento Humano (HS). Adaptado de Reyes (2013).

En consecuencia, las subcomponentes de vulnerabilidad seleccionadas para el estudio corresponden a residentes o población expuesta a la amenaza por tsunami (HS04-01), tiempo y/o temporada del escenario de amenaza y residentes o población expuesta (HS04-02) y la confiabilidad de la infraestructura de evacuación, planes y simulacros (HS04-04), de acuerdo al esquema en Figura 40.

La recopilación de información científica que permita entender el contexto tectónico del país y la historia sísmica de la ciudad de Valparaíso, se utiliza para determinar el peor escenario de amenaza para la ciudad, y por consiguiente, los residentes o población expuesta (HS04-01).

El estudio del tiempo y/o temporada del escenario de amenaza y residentes o población expuesta, consiste en proponer valores de demanda de personas para cada escenario de ocurrencia de la amenaza escogido; día laboral, fin de semana de verano y año nuevo.

Para evaluar la subcomponente de vulnerabilidad HS04-04, se analizan cualitativamente las vías de evacuación horizontal existentes en la ciudad de Valparaíso, en especial las que se ubican en el plan de Valparaíso entre las calles Uruguay y Ecuador (Figura 26). Para llevar a cabo la evaluación, se obtienen datos de campo a través de un ejercicio hipotético de evacuación por tsunami detallado en ANEXO B DATOS DE CAMPO para el cual fueron definidas escalas de impacto por susceptibilidad y confiabilidad, descritas en Tabla 7 y Tabla 8, respectivamente.

Tabla 7 Escala cualitativa de impacto por susceptibilidad.

<b>Escala cualitativa de impacto por Susceptibilidad</b>	
<b>No Susceptible</b>	1
<b>Baja Susceptibilidad</b>	2
<b>Susceptibilidad Media</b>	3
<b>Alta Susceptibilidad</b>	4
<b>Muy Alta Susceptibilidad</b>	5

Fuente: Adaptado de Reyes (2013).

Tabla 8 Escala cualitativa de impacto por confiabilidad.

<b>Escala cualitativa de impacto por Confiabilidad</b>	
<b>No Confiable</b>	5
<b>Baja Confiabilidad</b>	4
<b>Confiabilidad Media</b>	3
<b>Alta Confiabilidad</b>	2
<b>Muy Alta Confiabilidad</b>	1

Fuente: Adaptado de Reyes (2013).

Para la caracterización de las vías de evacuación horizontal, la escala de impacto por susceptibilidad se utiliza para evaluar el bloqueo de las vías debido a escombros, atochamiento vehicular, incendios y/o explosiones durante el desastre, presencia de tendido eléctrico, atochamiento de personas en temporada de verano, atochamiento de personas en horario peak, atochamiento de personas debido a estrechez de la vía y bloqueo por desborde de cauces, ríos y esteros. Por otro lado, la escala de confiabilidad se utiliza para evaluar criterios de las vías de evacuación ligados al tiempo de desplazamiento desde la zona inundable hasta el punto de encuentro, presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de personas (rejas, barreras de contención, baches, resaltos), ancho de la vía, pendiente (pronunciada o suave), señalética disponible durante el recorrido, evacuación de personas con movilidad reducida y evacuación en escenario nocturno. Para mayor detalle revisar ANEXO C FICHA DE REGISTRO CAMPAÑA DE TERRENO.

Finalmente, el análisis de confiabilidad de la infraestructura de evacuación, planes y simulacros se completa con la utilización de un enfoque cualitativo-cuantitativo de balance de oferta-demanda de evacuación horizontal y un balance cualitativo de evacuación vertical.

#### 4.3.2 ZONAS EXPUESTAS

Para determinar las zonas expuestas en la ciudad de Valparaíso ante amenaza por tsunami, se utiliza el escenario representado en la Carta de Inundación elaborada por el SHOA (Figura 41). Aquellas zonas inundables se consideran como expuestas, mientras que las zonas no inundables se consideran no expuestas.



Figura 41 Zona inundable plan de Valparaíso. Adaptado de SHOA (2010).

No obstante e independientemente de la profundidad de inundación, parámetros de interés como velocidades de flujo y fuerzas hidrodinámicas también son relevantes al momento de evaluar la exposición de un sistema urbano, ya que dependiendo de la topografía del sector, el flujo por tsunami puede afectar zonas adyacentes a grandes avenidas y/o puertos producto del arrastre de escombros flotantes. Respecto a las velocidades de flujo Reese et al. (2007) reconocen que no necesariamente las mayores velocidades se producen en la línea de costa, pueden generarse variaciones en el campo de velocidades debido a la presencia de edificios u otras estructuras, además de cambios en el flujo por variación de rugosidades. De acuerdo a las mediciones realizadas después del tsunami de Java, Indonesia en 2006, los mayores valores de velocidades de 4.4, 4.5 y 4.3 [m/s] se observaron a una distancia de 165, 175 y 190 [m], respectivamente, a la línea de costa.

## **4.4 EVACUACIÓN HORIZONTAL**

### **4.4.1 CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA DEMANDA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL**

La demanda de evacuación horizontal (DEH) viene dada por la cantidad de personas expuestas a la amenaza por tsunami que requieren evacuar horizontalmente hasta la zona segura designada por la autoridad competente (Figura 26). Para ello, se asume que la totalidad de personas ubicadas en la zona inundable evacúan a pie hacia zonas altas de la ciudad.

La caracterización de la demanda de EH se basa en una propuesta cualitativa que zonifica la ciudad según el tiempo de evacuación por tsunami medido en el ejercicio hipotético y según la propuesta de densidad de personas en las vías en las que se genera la demanda al momento de ocurrencia de la amenaza. Finalmente, se codifican las calles de la ciudad para generar la base de datos.

### **4.4.2 CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LA DEMANDA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL**

Para caracterizar cuantitativamente la demanda de evacuación horizontal se estiman valores de demanda para cada calle analizada, es decir, las vías Uruguay, Francia, Rodríguez, Edwards y Ecuador (Bellavista). Estos cálculos dependen de la zonificación de la ciudad por tiempo de evacuación y la zonificación por densidad de personas al momento de ocurrencia de la amenaza para cada escenario, de este modo, y teniendo en cuenta la superficie en la que se produce la demanda de evacuación horizontal se cuantifica la demanda de evacuación horizontal.

## **4.5 EVACUACIÓN VERTICAL**

### **4.5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL**

Según lo establecido en el punto 3.3.1 la oferta de evacuación vertical en la actualidad es nula, ya que las estructuras existentes en la zona de amenaza por tsunami, no han sido especialmente diseñadas para resistir cargas de tsunami, sin embargo, y tal como expresa la FEMA (2008) a veces es mejor proveer algo de protección en vez de nada.

Sabiendo que la oferta de evacuación vertical no se presenta de manera óptima, puede que las estructuras existentes eventualmente brinden alguna protección ante a una inundación por tsunami, pues según la experiencia en otros países del mundo, estructuras no especialmente diseñadas para resistir cargas por tsunami, pueden servir como refugio durante el desastre, siempre y cuando posean diseños de ingeniería basados en códigos sísmicos modernos, material de construcción sólido como hormigón armado y un número de pisos superior a seis (FEMA, 2008; Dalrymple & Kriebel, 2005). En Chile, la ONEMI recomienda a quienes se les dificulte la evacuación horizontal o si el tiempo de evacuación de 15 [min] no es suficiente para llegar a zona segura, refugiarse en estructuras de más de ocho pisos de altura.

#### 4.5.1.1 DEFINICIÓN DE OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL

Para definir la oferta de evacuación vertical se realiza un análisis de las estructuras existentes en el Plan de Valparaíso a través de un recorrido virtual con la herramienta Google Earth, específicamente con Google Street View. Para llevar a cabo el recorrido, primeramente deben establecerse los criterios de evaluación a los que se someten las estructuras. Esta evaluación se lleva a cabo con las fichas de registro elaboradas y explicadas en detalle en el siguiente capítulo. En dicho apartado se especifican los criterios de evaluación con los que debe contar una estructura de evacuación vertical.

##### 4.5.1.1.1 DEFINICIÓN DE CRITERIOS

En la Figura 43 y Figura 44 se muestran las fichas de registro A y B utilizadas para evaluar las estructuras existentes en la ciudad de Valparaíso. A partir de ellas, se genera la base de datos con la evaluación de cada estructura. Con posterioridad a la creación de la base de datos, y una vez establecidos los criterios de ubicación, se pueden recién obtener resultados sobre las intersecciones de calles donde podría existir factibilidad de implementar estructuras de evacuación vertical.

Tal como se aprecia en Figura 43, la ficha A recopila información general dividida en dos secciones. La primera considera información que se puede obtener utilizando la vista en planta que ofrece Google Earth Pro, mientras que la segunda selecciona información que se extrae con la herramienta Google Street View. De esta manera, se compilan para el análisis los siguientes aspectos:

- Dirección: Se estima según la intersección de calles en la que se encuentra la estructura, además de especificar la orientación respecto al norte geográfico.
- Coordenadas geográficas: Proyección mercator (UTM).
- Fecha de visualización: Corresponde a la fecha en la que se realizó el análisis visual de la estructura.
- Fecha satelital: Corresponde a la fecha en la que el satélite obtuvo las imágenes.
- Distancia desde línea de costa: Distancia entre la línea de costa y la ubicación de la estructura.
- Distancia desde edificio a zona segura: Distancia entre la estructura y la zona segura.

- Fecha imagen Google Street View: Fecha de las imágenes de Google Street View.
- Número de pisos: Número de pisos de la estructura analizada
- Acceso a la estructura: Se ingresa considerando su orientación respecto al norte geográfico.
- Material de construcción: Corresponde a la materialidad de la estructura analizada (acero, adobillo, albañilería, hormigón armado o madera).
- Uso de la estructura: Se determina de acuerdo a la categoría de uso, ya sea para aquellas destinadas al uso habitacional o gubernamental, detalladas en la norma chilena Nch433.Of 96.Mod.2009 (categoría I, II, III ó IV), así como las de uso industrial según la Nch2369.Of 2003 (C1, C2 o C3).
- Tipo de suelo FEMA: Clasificación de tipo de suelo según FEMA (2008) presentado en Figura 42.

Tipo de suelo	Profundidad de socavación (Distancia de la orilla < 91[m])	Profundidad de socavación (Distancia de la orilla > 91[m])
Arena suelta	80%d	60%d
Arena densa	50%d	35%d
Limo suave	50%d	25%d
Limo rígido	25%d	15%d
Arcilla suave	25%d	15%d
Arcilla rígida	10%d	5%d

Figura 42 Potencial de socavación y clasificación tipo de suelo. Adaptado de FEMA (2008).


- Tipo de suelo DS°61: Clasificación del tipo de suelo según normativa chilena (tipo A, B, C, D o E).
- Profundidad de inundación: Profundidad de inundación de la estructura de acuerdo a la Carta de Inundación por Tsunami para la V Región (Figura 23) confeccionada por el SHOA.

Finalmente, las estructuras que cumplan los criterios mínimos de número de pisos, superior a 8 según el manual de “RECOMENDACIONES PARA LA PREPARACIÓN Y RESPUESTA ANTE TSUNAMI” (ONEMI, 2014) y material de construcción sólido de hormigón armado según FEMA (2008), pasan a la segunda fase de evaluación dispuesta en ficha B (Figura 44).

## FICHA A


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>PAIS</b>	CHILE
<b>CIUDAD</b>	VALPARAÍSO
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-AMTE BARROSO-IND
<b>DIRECCIÓN</b>	ALMIRANTE BARROSO 560
<b>COORDENADAS UTM</b>	6340192S 256635E
<b>FECHA DE VISUALIZACIÓN</b>	03-03-2016
<b>FECHA SATELITAL</b>	01-01-2015
<b>DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA</b>	643M
<b>DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA</b>	776M


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>FECHA IMAGEN GSV</b>	01-07-2015
<b>NÚMERO DE PISOS</b>	>8
<b>ACCESO</b>	<p style="text-align: center;"><b>N</b></p> 
<b>MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN</b>	HORMIGÓN ARMADO
<b>USO DE LA ESTRUCTURA</b>	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
<b>TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA</b>	ARENA DENSA
<b>TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61</b>	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
<b>PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN</b>	0m
<b>OBSERVACIONES</b>	EEV2.1 EDIFICIO 17 PISOS UBICADO EN ZONA NO INUNDABLE. SIN ACCESO A

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 43 Ficha de registro A. Elaboración propia.



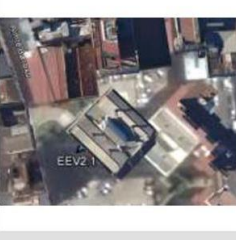
FICHA B	
INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-AMTE BARROSO-IND
SUPERFICIE EN PLANTA	500
CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES	MEDIANAMENTE ABUNDANTE
INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
TIPO DE OBJETOS FLOTANTES	BAJO TONELAJE (<12 TON)
AÑO DE CONSTRUCCIÓN	
AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN	ANTES DE 2000
ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO	NO
NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO	
POTENCIAL DE SOCAVACIÓN	35
OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA	SEMI- TRANSPARENTE
RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO	RESISTENCIA MEDIA
OBSERVACIONES	
	IMAGEN FRONTAL
	
	IMAGEN PLANTA
	
	IMAGEN UBICACIÓN
	

Figura 44 Ficha de registro B. Elaboración propia

La información que se recopila en la ficha B consta de mayor detalle. Son de interés criterios estructurales como la superficie en planta del edificio, año de construcción, estado de conservación exterior de la estructura, cantidad de subniveles y el potencial de socavación. Respecto a los criterios hidrodinámicos, se recopila información relacionada a la opacidad de la estructura, objetos flotantes (cantidad y tipos) y la resistencia ante impacto.

A continuación, el detalle de cada aspecto recopilado:

- Cantidad de objetos flotantes: Se clasifica como muy abundante si un número considerable de contenedores y/o buques o embarcaciones mayores pueden ser arrastrados por el flujo. La clasificación medianamente abundante se designa si el flujo desplaza varios vehículos de tonelaje intermedio como camiones de carga. Finalmente, la cantidad de objetos flotantes es poco abundante si bajas cantidades de vehículos livianos son arrastrados por el flujo.

- Tipo de objetos flotantes: Se clasifica de acuerdo al tonelaje, de esta manera, aquellos cuyo tonelaje sea superior a 85 (buques, grúas y embarcaciones mayores de pesca) son clasificados como alto tonelaje. Los de tonelaje medio, se encuentran entre 12 y 85 toneladas (vehículos pesados como camiones de 3 y 4 ejes, contenedores, lanchas y botes pesqueros), mientras que los de bajo tonelaje poseen menos de 12 toneladas (vehículos livianos, buses de locomoción colectiva, escombros menores y botes de pesca artesanal). Como criterio conservador se asume que todos los vehículos, botes, embarcaciones mayores y buses, se encuentran a su máxima capacidad de carga.
- Año de construcción: Se analiza si la estructura fue construida con anterioridad o posterioridad a 2010, de esta manera se puede saber si su diseño incluye las mejoras incluidas en la clasificación del tipo de suelo y el diseño de elementos de hormigón armado establecidos en los decretos D.Sn°61 y D.Sn°60. En caso de que con la inspección visual no fuera posible determinar el año de construcción, se entrega un año estimativo.
- Estado de conservación exterior: Se clasifica con buen estado de conservación si no presenta hormigón desprendido o elementos de acero de refuerzo a la vista, conexiones eléctricas y cañerías protegidas (no expuestas) y columnas en buen estado. Se considera medianamente conservado si posee pequeñas fisuras, grietas o acero de refuerzo a la vista, conexiones eléctricas y cañerías levemente expuestas, y columnas en buen estado. Finalmente, su estado de conservación es deficiente si presenta desprendimiento de hormigón o acero de refuerzo a la vista, conexiones eléctricas y cañerías expuestas, y columnas en mal estado.
- Acceso vehicular subterráneo: Para evaluar la socavación y comparar con el potencial de socavación del suelo donde se emplaza la estructura, se analiza si las estructuras tienen o no acceso vehicular subterráneo, además de los subniveles (1 o mayor que 1) que poseería.
- Potencial de socavación (profundidad de socavación): Se expresa como porcentaje de la profundidad de inundación y se determina de acuerdo al tipo de suelo, profundidad de inundación por tsunamis y distancia a la línea de costa, en sitios con o sin pavimento (Figura 42).
- Opacidad de la estructura: Se considera transparente si existen solamente columnas interiores o perimetrales que se opongan al flujo. Se supone semi-transparente si presenta columnas exteriores, amplios ventanales y baja presencia de muros en planta baja. Se asume opaca si presenta ventanales pequeños y alta presencia de muros que impidan el paso del flujo.
- Resistencia ante impacto: Depende de aspectos como la materialidad de la estructura, el estado de conservación exterior y la cantidad de objetos flotantes. La resistencia se considera buena solamente para estructuras de hormigón armado con buen estado de conservación impactadas por objetos flotantes poco abundantes (Tabla 9). La resistencia ante impacto es media para estructuras de hormigón armado con un buen estado de conservación impactadas por una

cantidad de objetos flotantes muy abundante y medianamente abundante, según Tabla 9. Se escoge este criterio conservador de resistencia ante impacto debido a que además de la inundación por tsunami, previamente las estructuras deben resistir el terremoto.

Tabla 9 Resistencia ante impacto hormigón armado. Elaboración propia

<b>Hormigón Armado</b>			
Estado de conservación	Cantidad de objetos flotantes		
	Muy abundante	Medianamente abundante	Poco abundante
Buen estado de conservación	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Buena</b>
Medianamente conservado	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>
Deficiente estado de conservación	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>
<b>Resistencia ante impacto</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Las estructuras de acero con un buen estado de conservación impactadas por una cantidad de objetos flotantes medianamente abundante y poco abundante, poseen una resistencia ante impacto media (Tabla 10), para los demás estados de conservación la resistencia es deficiente (Tabla 10).

Tabla 10 Resistencia ante impacto acero. Elaboración propia

<b>Acero</b>			
Estado de conservación	Cantidad de objetos flotantes		
	Muy abundante	Medianamente abundante	Poco abundante
Buen estado de conservación	<b>Deficiente</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>
Medianamente conservado	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>
Deficiente estado de conservación	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>
<b>Resistencia ante impacto</b>			

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las estructuras de madera, adobillo y albañilería, la resistencia ante impacto se clasifica como baja aunque su estado de conservación sea bueno y la cantidad de objetos flotantes sea poco abundante (Tabla 11). Se adopta este criterio conservador debido a que se desconoce el comportamiento y los daños que pueden tener las estructuras con estos tipos de materialidad después del terremoto tsunamigénico.

Tabla 11 Resistencia ante impacto adobillo. Elaboración propia

Adobillo, Albañilería y Madera			
Estado de conservación	Cantidad de objetos flotantes		
	Muy abundante	Medianamente abundante	Poco abundante
Buen estado de conservación	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>
Medianamente conservado	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>
Deficiente estado de conservación	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Deficiente</b>
<b>Resistencia ante impacto</b>			

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.1.2 ASPECTOS CUANTITATIVOS Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La formulación utilizada para determinar cuantitativamente la oferta de EV consiste en medir la superficie de azotea disponible en cada estructura, esto se realiza a través del uso de la vista en planta proporcionada por Google Earth Pro con el propósito de estimar la cantidad de personas que podrían refugiarse allí durante la emergencia por tsunami. Cabe destacar que la FEMA (2008) recomienda que cada refugiado cuente con un área mínima de 1 [m<sup>2</sup>].

#### 4.5.2 ZONIFICACIÓN PARA ESTUDIO

El territorio expuesto a la amenaza por tsunami, se zonifica de acuerdo a criterios cualitativos y cuantitativos dependientes de la posición espacial. En efecto, para llevar a cabo el análisis, se analizan aspectos ligados tanto al entorno de las estructuras como a los tiempos de evacuación por tsunami de la población expuesta. De esta manera, la correcta selección de edificaciones que puedan servir para este tipo de evacuación, puede ayudar a reducir el número de víctimas fatales e incrementar la seguridad de la población expuesta a la amenaza por tsunami (Park, Van de Lindt, & Gupta, 2012).

##### 4.5.2.1 CRITERIOS DE UBICACIÓN

A continuación, los criterios de ubicación:

- Distancia desde la línea de costa a la estructura.
- Distancia entre la estructura y la zona segura de evacuación horizontal.
- Presencia o no de cursos de agua y distancia del curso de agua a la estructura.
- Tiempo de desplazamiento desde línea de costa hasta estructura de evacuación.
- Tiempo de desplazamiento desde línea de costa hasta zona segura de evacuación horizontal.

- Presencia de zonas portuarias o zonas con alta susceptibilidad de bloqueo por escombros y distancia hasta la estructura.
- Presencia de gasolineras o lugares con alta susceptibilidad de bloqueo por incendios y/o explosiones y distancia hasta la estructura.

Tal como se ha mencionado con anterioridad, las limitaciones del sistema urbano del Plan de Valparaíso, dificulta en extremo poder escoger una ubicación idónea para las estructuras de EV, por lo que cumplir con la totalidad de los criterios establecidos es altamente improbable. Por este motivo, la propuesta contempla delimitar el área de influencia en función del tiempo de evacuación más desfavorable, es decir, la velocidad mínima registrada en el ejercicio de evacuación detallado en ANEXO B DATOS DE CAMPO y definidas para cada vía en Tabla 13.

Finalmente, la caracterización de la oferta de evacuación vertical viene dada por el diagrama de flujo en Figura 45. Tal como ahí queda expresamente señalado, si las estructuras sometidas a evaluación con ficha B cumplen todos los requisitos conservadores establecidos en Tabla 12 además de los criterios de ubicación, los edificios podrían clasificarse como probablemente aptos.

Cabe señalar que se asume un tipo de suelo arena densa (clasificación FEMA (2008)) acordado en una conversación con el profesor guía Mauricio Reyes. Los demás criterios como la profundidad de inundación, cantidad de objetos flotantes, tipo de objetos flotantes, estado de conservación exterior, acceso vehicular a subterráneo y subniveles, potencial de socavación, opacidad de la estructura y resistencia del edificio ante impacto, se establecen asumiendo criterios conservadores que entreguen la mejor condición estructural de los edificios después del terremoto, además del menor daño producto de la inundación por tsunamis. De este modo, una profundidad de inundación menor a 2[m], una cantidad de objetos flotantes poco abundante, tipo de objetos flotantes de bajo tonelaje, un buen estado de conservación exterior, acceso vehicular a subterráneo con más de 1 subnivel, profundidad de socavación entre un 35-50%, estructura transparente y una buena resistencia ante impacto, representarían la mejor condición posible de una estructura teniendo en cuenta que el método propuesto en este estudio se trata de un análisis visual.

Tabla 12 Criterios cualitativos oferta de EV en Valparaíso

CRITERIO	REQUISITO
Número de pisos	Superior a 8 según ONEMI
Accesibilidad	Número indistinto, si tiene más de 1 ideal
Material de construcción	Acero u hormigón armado
Uso de la estructura	Categoría II, III, IV Nch433.of96.Mod2009. Habitacionales, colegios y universidades, y refugios de emergencia, respectivamente.
	Categoría C1 Nch 2369of2003. Obras críticas: Vitales, Peligrosas o Esenciales
Tipo de suelo según FEMA	Arena densa
Tipo de suelo según D.S n°61	Tipo D, suelo medianamente denso o firme
Profundidad de inundación	Menor a 2 [m]
Cantidad de objetos flotantes	Poco abundante
Tipo de objetos flotantes	Bajo tonelaje
Año de construcción	Posterior a 2010
Estado de conservación exterior	Bueno
Acceso vehicular subterráneo	Si
Número de subniveles	1 o superior
Potencial de socavación	35-50% profundidad de inundación
Opacidad de la estructura	Transparente
Resistencia del edificio ante impacto	Buena

Fuente: Elaboración propia.

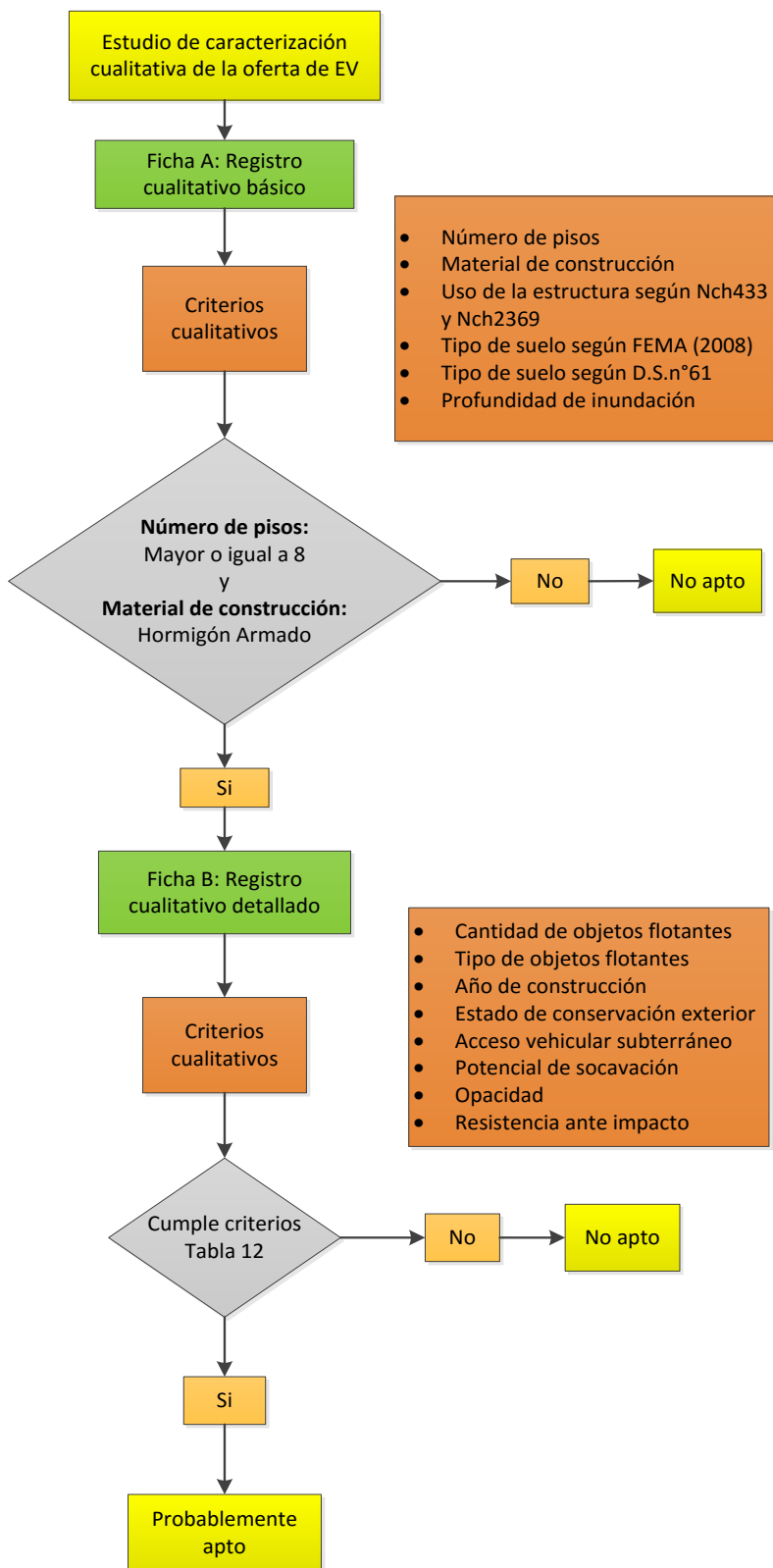


Figura 45 Diagrama de flujo caracterización de oferta de EV en Valparaíso. Elaboración propia.

## 5 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 EVACUACIÓN HORIZONTAL (EH)

#### 5.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EH

##### 5.1.1.1 RESULTADOS EJERCICIO DE EVACUACIÓN POR TSUNAMI

Tal como ha quedado establecido en el estudio de impactos (capítulo 4.3.1), para analizar la subcomponente de vulnerabilidad HS04-04, se utilizan los resultados obtenidos del ejercicio hipotético de evacuación detallado a continuación.

En Figura 46, una vista satelital en planta con el trazado de las vías de EH analizadas en Valparaíso. En la misma figura, información complementaria como la cantidad de señalética de evacuación ante tsunami para cada vía de evacuación, ubicación de potenciales focos de incendio como bencineras; colegios, estaciones de buses y puntos de encuentro designados por ONEMI.

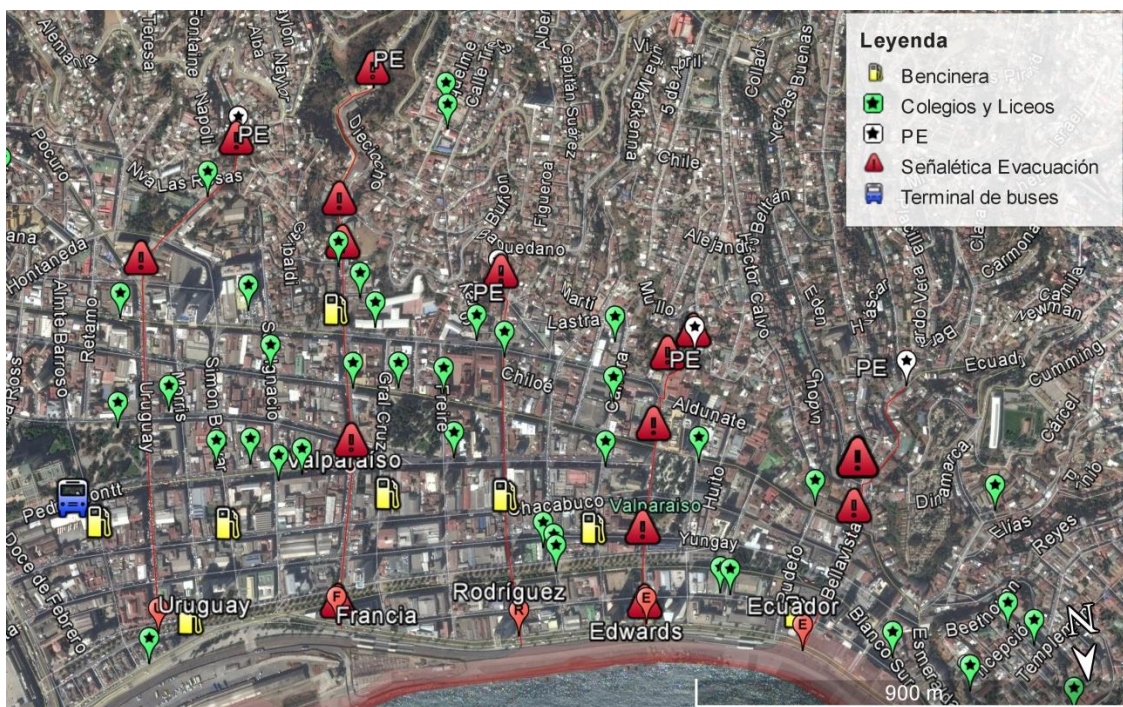


Figura 46 Trazado vías de evacuación analizadas en Valparaíso. Elaboración propia.

Respecto a los tiempos de evacuación, distancias y velocidades, en Tabla 13 se muestra el detalle para cada calle recorrida a paso apresurado y a paso de personas con movilidad reducida. En Figura 47, una vista satelital en planta con los tiempos de evacuación desde la línea de costa (Av Errázuriz) hasta el punto de encuentro (PE) de cada vía.



Figura 47 Tiempos de evacuación paso apresurado y reducido. Elaboración propia.

Tabla 13 Tiempo de desplazamiento, distancia y velocidades.

Calle	Distancia [m]	Tiempo de desplazamiento [m:s]		Velocidad de desplazamiento [m/s]	
		Paso apresurado	Movilidad reducida	Paso apresurado	Movilidad reducida
Ecuador	620	6:30	9:09	1.59	1.13
Edwards	600	6:17	12:00	1.59	0.83
Francia	1200	10:51	13:30	1.84	1.48
Rodríguez	720	13:03	17:47	0.92	0.67
Uruguay	1110	16:32	22:00	1.11	0.83
<b>Promedio</b>				<b>1.4</b>	<b>1</b>

Fuente: Elaboración propia.

En general, los tiempos de evacuación (Tabla 13) se consideran medianamente breves. Las calles Ecuador y Edwards son las que entregaron los menores tiempos con 6:30 y 6:17 minutos cada una. Por otro lado, Uruguay y Rodríguez presentan los mayores tiempos (paso apresurado) con 16:32 y 13:03 minutos, respectivamente.

Para las personas con movilidad reducida los resultados variaron sustancialmente. Los tiempos de desplazamiento a zona segura aumentaron entre un 50 y 100%. Las calles Ecuador y Edwards son las que registran los mayores aumentos de tiempo respecto al desplazamiento a paso apresurado con 3 y 6 minutos respectivamente. Dicho incremento

se relaciona directamente con la estrechez de calles y pendientes pronunciadas (Figura 48) Para las calles Francia, Rodríguez y Uruguay el aumento es de 3 y 4 minutos, respectivamente.



Figura 48 Estrechez y estado de la vía de evacuación horizontal, intersección calle Edwards con Av Colón en dirección sur. Elaboración propia.

Es preciso señalar que debido al hecho de tratarse de un ejercicio hipotético de evacuación, los tiempos de evacuación y el estado real de las vías posterior a la ocurrencia de la amenaza de terremoto, evidentemente varían respecto a un escenario real, motivo por el cual la incerteza en el estado de las vías previo a la llegada del tsunami, es alta. Por otro lado, las velocidades de desplazamiento poseen buena aproximación según lo establecido en la literatura. La FEMA (2008) establece una velocidad de 1.8 [m/s] para personas promedio, mientras que para personas con movilidad reducida considera 0.9 [m/s].

En relación al tiempo de evacuación por tsunami, y tal como se menciona al inicio de este capítulo, si es posible llegar a zona segura en menos de 15 [min] luego de ocurrido el terremoto, evacuar horizontalmente es la alternativa más segura. Sin embargo, se debe tener claridad de que dicho lapso de tiempo trae incorporado aspectos complejos como el tiempo de reacción de la población previo a la decisión de evacuar, en este sentido, factores emocionales como racionales influyen en el tiempo de respuesta. Verificar el estado de los integrantes del grupo familiar, recuperación del shock post terremoto, recoger kit de emergencia y el grado de entrenamiento frente a una evacuación por tsunami, disminuyen el tiempo de inicio de evacuación  $T_0$  (Ecuación 2) para llegar a zona segura.

$$T_0 = t_{reacción} + t_{preparación}$$

Ecuación 2 Tiempo inicial de evacuación por tsunami. Elaboración propia

Se estima que un individuo puede tardar entre 4-5 [min] en abandonar el lugar que habita. Por esta razón, es prudente mencionar que también existe incertidumbre respecto a este lapso de tiempo, pues dependiendo de la cantidad de niños que integren el grupo familiar y/o si existen personas con movilidad reducida que requieran asistencia para evacuar y la rapidez en el procesamiento de la información, el tiempo en abandonar el lugar puede ser mayor. La evacuación también puede dificultarse dependiendo de las condiciones físicas en las que quede el sitio después del terremoto.

El tiempo de evacuación empleado para llegar a zona segura también puede aumentar debido a bloqueos de las vías de evacuación después del terremoto, si se considera la evacuación de personas con movilidad reducida este aumento puede ser aún mayor. Por ejemplo, si se quisiera evacuar por calle Edwards en dirección sur según Figura 48, la dificultad debido a la estrechez de la vía implica un aumento en el tiempo requerido para llegar a zona segura.

Otro aspecto importante a considerar en el análisis del tiempo de evacuación, es el tipo de escenario en el que se produzca el terremoto, ya que si se trata de un escenario nocturno o durante el horario laboral y/o de estudios, el tiempo de evacuación a zona segura también varía debido a condicionantes como el tipo de lugar en el que se encuentren los individuos. Por ejemplo, si se encuentran durante la jornada laboral al interior de un edificio, se debe contemplar el tiempo en abandonar el lugar para posteriormente comenzar la evacuación, misma situación ocurre con las personas que se encuentran en lugares de estudio y/o encuentro como colegios, universidades, charlas, asambleas o congregaciones. En caso de un escenario nocturno, es muy probable que la ocurrencia de un terremoto grande ocasione una falla en el servicio eléctrico, por lo que el tiempo inicial de evacuación (mayor tiempo de preparación) se modifica y por consiguiente, el tiempo total requerido para llegar a zona segura aumenta.

#### 5.1.1.2 RESULTADOS EVALUACIÓN VÍAS DE EVACUACIÓN HORIZONTAL

De la serie de aspectos de las rutas de evacuación evaluados en terreno (ANEXO C FICHA DE REGISTRO CAMPAÑA DE TERRENO) se consideran críticos, el tiempo de evacuación hasta la zona segura (punto de encuentro), ancho de las vías de evacuación, presencia de señalética, pendiente de las vías, desplazamiento de personas con movilidad reducida, bloqueo por incendios y bloqueo por aglomeración de personas.

Tal como se aprecia en la Figura 46, existen grandes diferencias en la cantidad de señalética existente. Las calles Edwards y Francia son las mejor evaluadas con cinco unidades cada una. La calle Ecuador posee dos, mientras que Uruguay y Rodríguez son las peor evaluadas, con dos y una unidad, respectivamente. Ciertamente que la señalética es un punto importante en el análisis de las vías de evacuación, ya que al momento de la emergencia, la población requiere indicaciones sobre el recorrido para llegar a zona segura. Una manera de realizar con éxito esta labor, es entregando información clara y oportuna durante el desastre, tanto para los residentes como para los turistas que no conocen la ciudad y no saben por dónde evacuar. Para la calle Rodríguez la situación es crítica, ya que sólo existe señalética al final de la vía, es decir, en la zona segura.

En la Figura 49, se muestra el gráfico de radar con la evaluación del impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo de las vías de EH en Valparaíso, basada en la escala de impacto en Tabla 7.

El bloqueo por escombros es un aspecto relevante para la ciudad, ya que debido a la antigüedad de las construcciones históricas presentes en el plan de Valparaíso, ante la ocurrencia de amenaza de terremoto y sus posteriores réplicas, pueden desprenderse cantidades importantes de cornisas, bloqueando las vías de evacuación. En Figura 49 se observa que las calles Uruguay, Rodríguez y Francia presentan muy alta susceptibilidad de bloqueo por escombros, en tanto que Ecuador y Edwards poseen alta susceptibilidad.

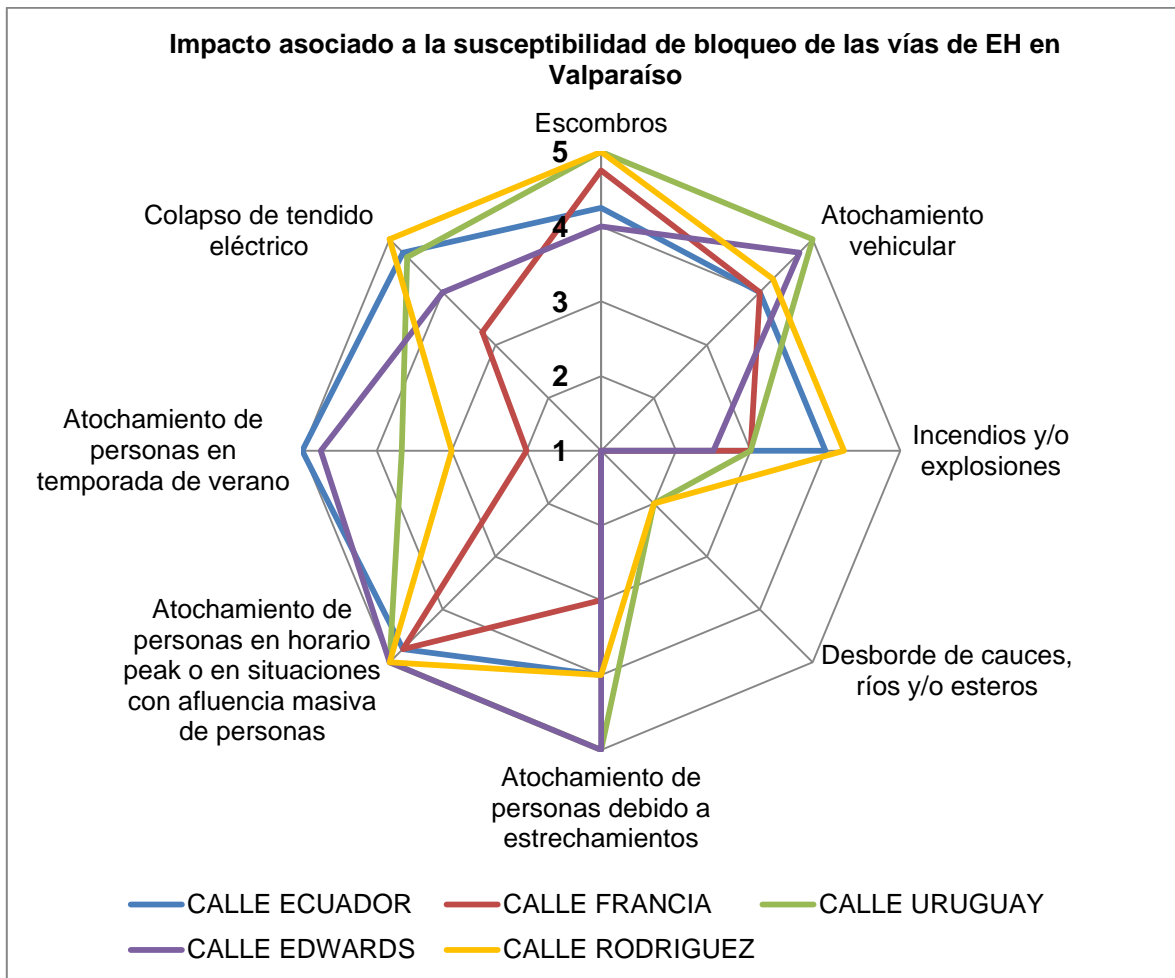


Figura 49 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo de vías de EH en Valparaíso. Elaboración propia.

El atochamiento vehicular asociado a la gran cantidad de vehículos estacionados en las calles, estrechez de las vías al pie de los cerros, una sola vía de circulación y calles angostas con doble sentido de tránsito como se aprecia en Figura 48, son factores que incrementan la susceptibilidad de bloqueo en las vías de evacuación. Ejemplo de esto es lo que ocurre en las calles Edwards y Uruguay cuya susceptibilidad es muy alta. Las calles Rodríguez, Ecuador y Francia presentan alta susceptibilidad de acuerdo a la Figura 49.

La susceptibilidad de bloqueo de las vías por atochamiento de personas en horario peak o en situaciones de afluencia masiva se podría producir en lugares de concentración de personas debido a la presencia de colegios, universidades, hospitales, comercio, estadios u otros sitios destinados a actividades masivas. Este aspecto de evaluación en la ciudad resulta clave, pues todas las vías presentan muy alta susceptibilidad de bloqueo (Figura 49).

El mal estado del tendido eléctrico debido a cables sueltos y acumulación de ellos en ciertas esquinas, favorecen una mayor susceptibilidad de bloqueo de las vías producto de

un eventual colapso. Tal como se aprecia en la Figura 49, las calles Ecuador, Rodríguez y Uruguay presentan muy alta susceptibilidad de bloqueo por colapso del tendido eléctrico, mientras que Edwards posee alta susceptibilidad y Francia susceptibilidad media. Cabe señalar que la interrupción del suministro eléctrico durante la evacuación puede dificultar considerablemente el desplazamiento de personas, especialmente aquellas con movilidad reducida.

Las calles Ecuador y Edwards presentan muy alta susceptibilidad de bloqueo por atochamiento de personas en temporada de verano. La calle Uruguay presenta alta susceptibilidad, mientras que la calle Rodríguez presenta susceptibilidad media (Figura 49). Finalmente, la calle Francia es la mejor evaluada con baja susceptibilidad. Un factor clave en el estudio de este tipo de bloqueo es la cantidad de población flotante que llega a la ciudad en época de verano, por este motivo durante el desarrollo de este estudio se asume que uno de los escenarios ocurre durante una noche de fin de semana de verano.

La susceptibilidad de bloqueo por incendio y/o explosiones para las calles Ecuador y Rodríguez es alta. Las calles Edwards, Francia y Uruguay presentan susceptibilidad media (Figura 49). Factores como la materialidad y antigüedad de las construcciones, presencia de bencineras, empresas distribuidoras de gas y bodegas de almacenamiento de material inflamable, incrementan esta susceptibilidad.

En relación al bloqueo de vías por desborde de cauces, ríos y/o esteros, las calles Ecuador, Edwards y Francia no son susceptibles. Rodríguez y Uruguay presentan baja susceptibilidad (Figura 49). En relación a estos resultados, es prudente mencionar que para el caso particular de la ciudad de Valparaíso durante la evaluación no se consideró la existencia de los cauces que se encuentran debajo de la ciudad y desembocan al océano, por lo que ante la ocurrencia de una inundación por tsunami, el desborde o colapso podría ocurrir por las calles de la ciudad en dirección a la línea de costa debido al colapso de alcantarillas producto de la intrusión horizontal de la inundación.

En Figura 50, el gráfico de radar con la evaluación del impacto asociado a la confiabilidad de las vías de EH en Valparaíso, basada en la escala cualitativa en Tabla 8.

Respecto a la confiabilidad ante la presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de personas, la calle Uruguay fue la peor evaluada (no confiable) debido a la gran presencia de comercio informal en las calles (Figura 50). La confiabilidad de las calles Edwards, Francia y Rodríguez se califica como baja, mientras que la calle Ecuador posee confiabilidad media. Estos resultados se deben a la presencia de árboles, basura, rejas, baches, letreros, desniveles de veredas, peldaños de escaleras altos y la gran cantidad de comercio en las veredas de las calles.

El tiempo de desplazamiento desde la zona inundable hasta el punto de encuentro, la calle Francia es la mejor evaluada con muy alta confiabilidad, este resultado coincide con la información presentada en Tabla 13 en la que obtuvo la mayor velocidad de desplazamiento a pesar de ser la vía con la mayor extensión. Ecuador, Edwards y Uruguay han sido evaluadas con alta confiabilidad, información que se complementa con lo presentado en la Tabla 13 donde las dos primeras calles mencionadas poseen los menores tiempos de desplazamiento al punto de encuentro. La confiabilidad de Rodríguez resulta media, según Tabla 13 posee la menor velocidad de desplazamiento a paso apresurado.

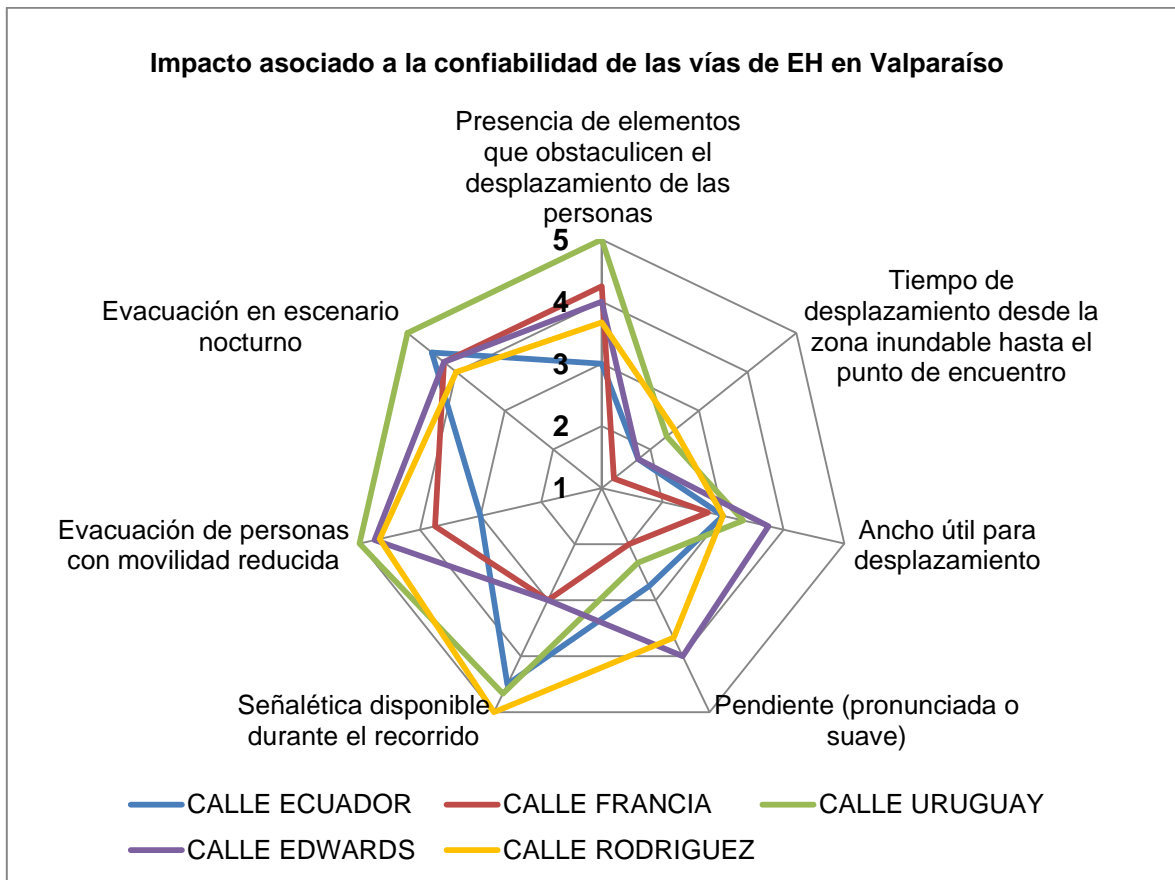


Figura 50 Impacto asociado a la confiabilidad de las vías de EH en Valparaíso. Elaboración propia.

La confiabilidad de ancho útil de desplazamiento para Edwards es baja. En tanto que todas las demás calles, es decir, Ecuador, Francia, Rodríguez y Uruguay presentan confiabilidad media. El ancho útil en el plan de la ciudad es suficiente para la evacuación, sin embargo, a medida que se acerca la zona segura, el recorrido por los cerros las vías se estrechan considerablemente dificultando la evacuación.

La confiabilidad de la vía según su pendiente (pronunciada o suave) arroja que las calles Ecuador y Uruguay presentan confiabilidad media, en cambio que Francia posee alta confiabilidad. Por otro lado, Edwards y Rodríguez son las calles peor evaluadas con baja confiabilidad. La pendiente en el plan de la ciudad es suave, al llegar a pie de los cerros se incrementa considerablemente dificultando la evacuación, especialmente para personas con movilidad reducida. Es importante mencionar que esta mayor pendiente implica una disminución en el tiempo para alcanzar la zona segura, debido a que la distancia recorrida para alcanzar la cota de seguridad resulta menor.

La confiabilidad de la señalética (Figura 46) disponible durante el recorrido de las calles Rodríguez (una señalética) y Uruguay (dos señaléticas) ha sido evaluada como no confiable. Ecuador, con dos señaléticas ha sido evaluada con baja confiabilidad, mientras que las calles Edwards y Francia poseen confiabilidad media con cinco señaléticas cada una (Figura 46). Un aspecto preocupante de los resultados obtenidos, es el hecho de que existen calles que no poseen señalética al inicio de las rutas (borde costero) como es el

caso de las calles Uruguay, Ecuador y Rodríguez. Otro punto clave en la evaluación de señalética es la ubicación y el tamaño, muchas se ubican en lugares poco visibles con tamaños muy pequeños por lo que pasan desapercibidas (Figura 51).



Figura 51 Señalética de evacuación por tsunami. Intersección calle Edwards/Independencia. Elaboración propia.

La evacuación para personas con movilidad reducida en las calles Edwards, Rodríguez y Uruguay ha sido evaluada como no confiable. La confiabilidad para Francia ha sido calificada como baja. La calle mejor evaluada con confiabilidad media ha sido Ecuador. Estos resultados se deben al hecho de que las calles no se encuentran preparadas ni diseñadas para el desplazamiento de personas con movilidad reducida, las vías no están en buen estado y la alta presencia de escaleras dificulta en extremo el desplazamiento (Figura 52).

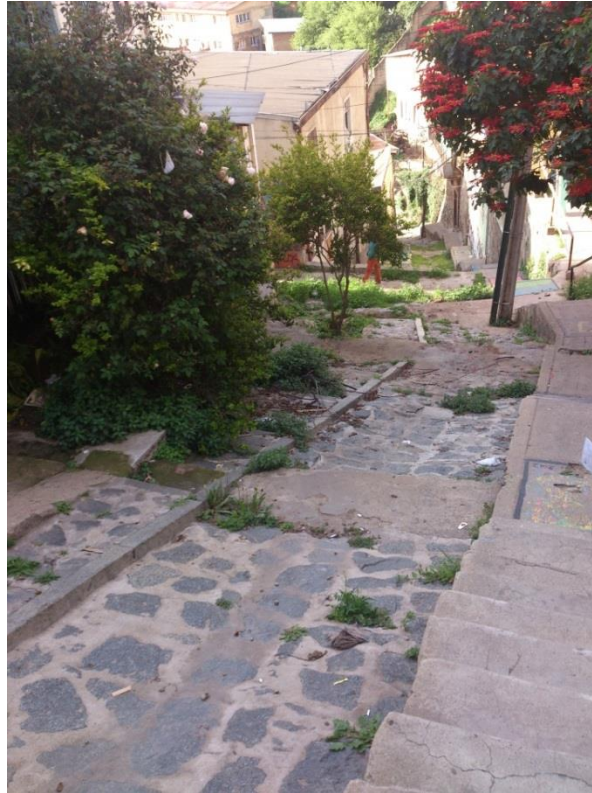


Figura 52 Vía de EH intersección calle Rodríguez/Las Monjas. Recorrido en dirección N-S. Elaboración propia

En relación a la evacuación en escenario nocturno la calle Uruguay posee nula confiabilidad. Las calles Ecuador, Edwards, Francia y Rodríguez poseen baja confiabilidad. Factores que influyen en este resultado es la poca visibilidad de la señalética y la inexistencia de la misma en algunas calles, la estrechez y mal estado de veredas, escasa iluminación y elementos que dificultan el desplazamiento.

Para mayor información sobre el análisis individual de cada ruta de evacuación, revisar el ANEXO B DATOS DE CAMPO.

## 5.1.2 CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA DEMANDA DE EH

### 5.1.2.1 ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD POR TIEMPO DE EVACUACIÓN

Para la zonificación de la ciudad por tiempo de arribo a zona segura, se decide adoptar un criterio conservador de velocidad promedio para toda la ciudad. Según Tabla 13, la velocidad media de las vías analizadas es de 1[m/s], dicho promedio no se considera representativo de las vías pues la distribución de velocidades es muy variable y se ve alterada por los valores de las calles Francia y Ecuador. Por otro lado, las vulnerabilidades encontradas en el sistema urbano de Valparaíso, caracterizado por la estrechez de las vías, fuertes pendientes, presencia de escaleras y elementos que bloquean las vías tales como el comercio informal, dificultan la evacuación, especialmente la de personas con movilidad reducida. Por este motivo, la velocidad promedio

seleccionada corresponde a la mínima velocidad registrada a paso reducido (calle Rodríguez) cuyo valor equivale a 0.67 [m/s].

La subdivisión de la ciudad se realiza en función de la velocidad promedio en intervalos de 5 minutos, es decir, cada 5 minutos se trazan polígonos con el software Google Earth Pro, que indican el tiempo de evacuación (hipotético) medido desde la línea de costa hasta la zona segura, para cada punto de la ciudad. El primer intervalo de color blanco (ZONA 1, Figura 53) contempla tiempos entre 0-5 [min] mientras que el polígono de color rojo oscuro (ZONA 6, Figura 53) corresponde a tiempos de evacuación a zona segura mayores a 20 [min].

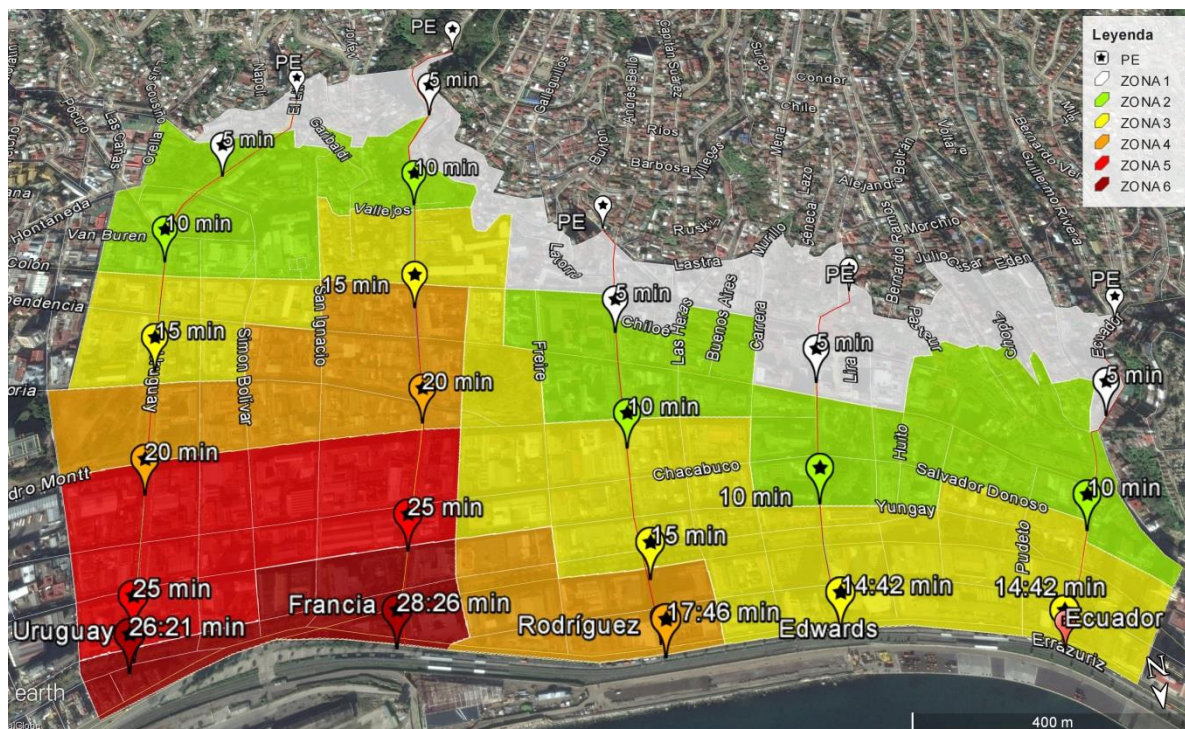


Figura 53 Zonificación por tiempo de evacuación a zona segura. Elaboración propia.

#### 5.1.2.2 ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD POR DENSIDAD DE PERSONAS

La zonificación por densidad de personas se basa en el criterio de Jacobs (1967). El trabajo de este autor ha sido ampliamente utilizado para estimar la cantidad de personas presentes en multitudes, específicamente en marchas o en situaciones con grandes aglomeraciones de personas.

En Tabla 14, los valores de densidad de personas por unidad de superficie dependiendo del tipo de aglomeración en las calles.

Tabla 14 Valores de densidad de personas por unidad de superficie.

Multitud	Densidad de personas [personas/m <sup>2</sup> ]
Fluida	1
Densa	2
Muy densa	4

Fuente: Jacobs (1967).

El procedimiento para zonificar la ciudad por densidad de personas, se basa en el estudio de amenaza (apartado 4.2.1) y contempla escenarios hipotéticos representativos del funcionamiento de la ciudad en situaciones específicas. De esta manera, se considera que la amenaza puede ocurrir en cualquiera de los tres escenarios planteados, ya sea durante una noche de fin de semana de verano, un día laboral o en una noche de año nuevo. Asimismo, a cada escenario se le asigna una densidad de personas según el criterio de Jacobs en Tabla 14. Cabe señalar que para agudizar el análisis y representar de mejor manera la densidad de personas en las calles de la ciudad, cada zona definida en el capítulo anterior (5.1.2.1) se subdivide en tres subzonas.

En Tabla 15, la densidad de personas para cada subzona y cada escenario.

Tabla 15 Densidad de personas por unidad de superficie para cada escenario.

ZONA	SUBZONA	FDS NOCHE DE VERANO j:1	DÍA LABORAL j:2	NOCHE DE AÑO NUEVO j:3
Z1	1	1p/m2	1p/m2	1p/m2
	2	1p/m2	1p/m2	1p/m2
	3	1p/m2	1p/m2	1p/m2
Z2A	1	1p/m2	1p/m2	1p/m2
	2	1p/m2	1p/m2	1p/m2
	3	1p/m2	1p/m2	1p/m2
Z2B	1	1p/m2	1p/m2	1p/m2
	2	2p/m2	1p/m2	2p/m2
	3	2p/m2	4p/m2	2p/m2
Z3A	1	2p/m2	4p/m2	2p/m2
	2	1p/m2	1p/m2	1p/m2
	3	1p/m2	1p/m2	1p/m2
Z3B	1	4p/m2	4p/m2	4p/m2
	2	1p/m2	2p/m2	1p/m2
	3	2p/m2	1p/m2	4p/m2

ZONA	SUBZONA	FDS NOCHE DE VERANO j:1	DÍA LABORAL j:2	NOCHE DE AÑO NUEVO j:3
Z4A	1	2p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>	2p/m <sup>2</sup>
	2	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>
	3	2p/m <sup>2</sup>	2p/m <sup>2</sup>	2p/m <sup>2</sup>
Z4B	1	2p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>
	2	2p/m <sup>2</sup>	2p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>
	3	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>
Z5	1	2p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>	2p/m <sup>2</sup>
	2	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>
	3	4p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>	2p/m <sup>2</sup>
Z6	1	2p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>	2p/m <sup>2</sup>
	2	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>	1p/m <sup>2</sup>
	3	2p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>	4p/m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia.

En Figura 54, el escenario de una noche de fin de semana de verano, en ella se distinguen zonas específicas de densidad de personas muy alta, asociada a una concentración de actividad de entretención nocturna en la calle Ecuador y en un tramo de la calle Francia. Grandes avenidas como Pedro Montt, Errázuriz y Uruguay consideran un criterio de densidad de  $[2p/m^2]$ , mientras que para el resto de la ciudad se establece una densidad fluida.



Figura 54 Escenario noche de fin de semana de verano. Elaboración propia.

En Figura 55, la vista satelital para el escenario de día laboral en la que se aprecia una distribución de densidades bastante variable. Para las calles Uruguay, Pedro Montt, un tramo de Francia, un tramo de Ecuador y un tramo de Condell, se considera una densidad de personas equivalente a una multitud muy densa debido a la gran cantidad de personas que transitan por esas calles. En algunos tramos de las calles Errázuriz y Brasil se asignan valores de densidad densa por la presencia de universidades e institutos.



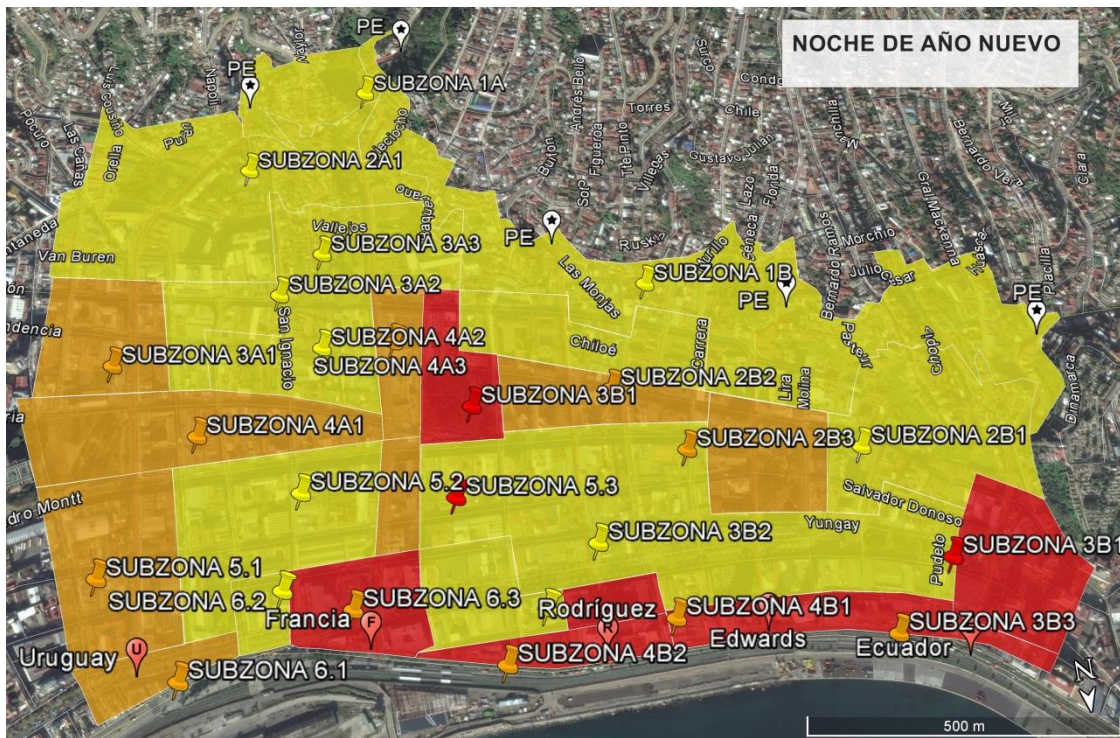


Figura 56 Escenario noche de año nuevo. Elaboración propia.

### 5.1.2.3 CODIFICACIÓN DE LA CIUDAD

La codificación del área de análisis viene dada por el siguiente orden; zona-calle-cuadra, donde las calles perpendiculares se enumeran en sentido norte-sur y las paralelas en sentido oeste-este. Por ejemplo, en Figura 57 el código Z3-1-1 indica que la primera cuadra de la calle perpendicular Ecuador pertenece a la ZONA 3 (tiempo de evacuación a zona segura entre 10-15 [min]), lo mismo sucede con la primera cuadra de la calle paralela Errázuriz (Z3B-P1B-1).



Figura 57 Codificación calles analizadas. Elaboración propia.

Una vez codificadas todas las calles de interés, con el uso de la herramienta Google Street View, se toma una fotografía de cada calle a mitad de cuadra en sentido sur-norte para calles perpendiculares y de oeste-este para las calles paralelas (Figura 58) posteriormente se obtienen anchos de veredas y calzadas y el largo de cada calle, de esta manera multiplicando el largo de la cuadra por la suma del ancho de calzada y cuadras, se determina la superficie en la que se genera la demanda de evacuación. Este procedimiento se realiza para cada calle, completando la Tabla 16, para generar la base de datos de la ciudad.

Tabla 16 Código, Zona, Anchos de vereda, calzada y largo de calles.

Código	Z3-3-3
Zona	Z3
Calle	3
Cuadra	3
Largo cuadra [m]	60



Figura 58 Ejemplo de fotografía a mitad de cuadra. Elaboración propia.

Ancho Vereda Izq [m]	Ancho calzada [m]	Ancho Vereda Der [m]	Total	Demanda zona amarilla	Demanda zona naranja	Demanda zona roja
1.6	6	1.6	9.2	552	1104	2208

Fuente: Elaboración propia.

Es preciso señalar que el cálculo de áreas está sujeto a la densidad de personas de cada subzona, de este modo, en las zonas en color rojo (multitud muy densa, Tabla 15) además de considerar los anchos de veredas y calzadas, se deben incorporar si es que poseen, el cálculo de áreas verdes como parques o plazas. Para el caso de densidades correspondientes a multitudes fluidas y densas, el área se determina considerando solamente los anchos de veredas y calzadas.

Respecto al área en la que se genera la demanda de EH, es prudente señalar que la estimación posee incertezas relacionadas al cálculo de anchos útiles de las vías al momento de ocurrencia de la amenaza. En la Figura 59 y Figura 60 disminuciones en los anchos útiles de veredas y calzadas debido al comercio y a las zonas destinadas a estacionamientos de vehículos. Se estima que para el escenario de día laboral el comercio formal e informal pueden disminuir hasta en un 50% el ancho útil de veredas, mientras que las áreas destinadas a estacionamientos disminuyen el ancho útil de calzadas entre un 33% y 50%.

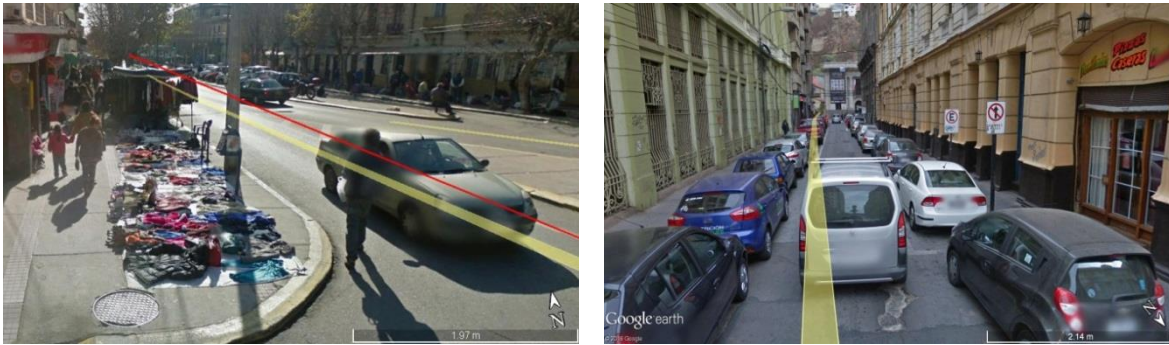


Figura 59 A la izquierda, disminución ancho útil de vereda intersección calle Van Buren/Uruguay. A la derecha, disminución ancho útil calzada intersección calle Ramirez/Brasil. Elaboración propia.



Figura 60 Comercio en veredas de tránsito peatonal, intersección Ecuador/Condell. Elaboración propia.

Otras incertezas ligadas a la evacuación en vehículos y al escenario de ocurrencia, plantean la discusión acerca del cálculo de DEH. Si bien para este estudio se asume que todas las personas evacúan a pie hacia zona segura utilizando calzadas y veredas, esta condición dista de la realidad. Una recopilación de información a través de videos de evacuación por tsunami en la ciudad de Valparaíso producto del terremoto de Illapel del 16 de Septiembre de 2015, muestra la realidad de la evacuación en la calle Ecuador. En la Figura 61 y Figura 62, atochamiento vehicular en la intersección de las vías Ecuador-Yerbas Buenas y disminuciones en el ancho útil de calzadas debido a la circulación de vehículos.

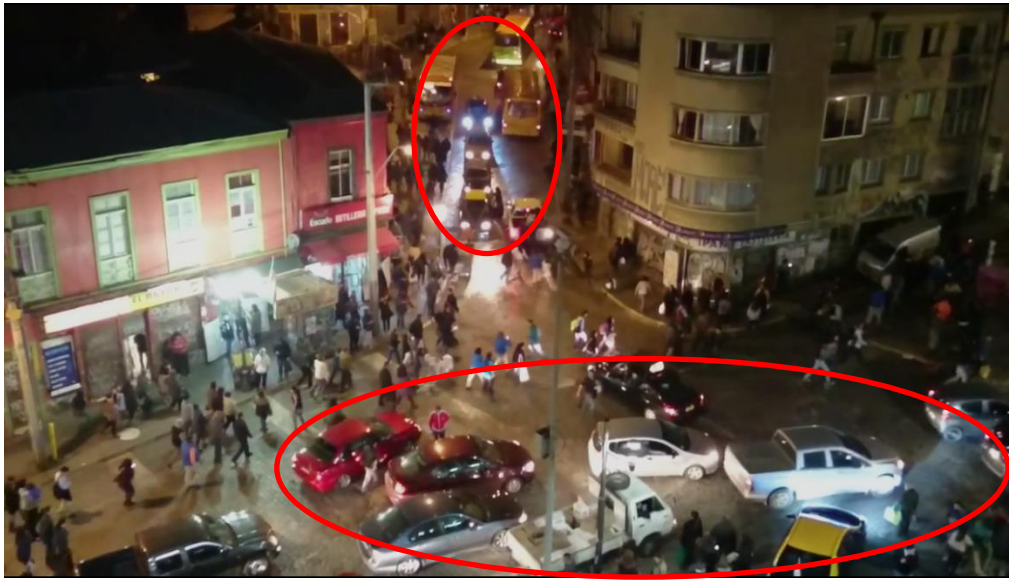


Figura 61 Atochamiento vehicular calle Ecuador evacuación por tsunami 16/9/2015. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=JGbplwB0Hik>



Figura 62 Disminución ancho de calzadas durante evacuación por tsunami 16/9/2015. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=JGbplwB0Hik>

### 5.1.3 CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LA DEMANDA DE EH

El cálculo de demanda de evacuación ( $D$ ) viene dada por el producto entre la densidad de personas por unidad de superficie ( $d$ ) y la superficie en la que se produce la demanda de evacuación ( $A$ ).

$$D = d_{i,j} * A$$

Ecuación 3 Demanda de evacuación horizontal. Elaboración propia.

Donde:

D: Demanda de evacuación, medida en cantidad de personas.

d: Densidad de personas por unidad de superficie .

i: Indicador de subzona, definido en Tabla 15.

j: Indicador del momento de ocurrencia de la amenaza, Tabla 15

A: Superficie donde se produce la demanda de evacuación.

Finalmente, la demanda total de evacuación horizontal (DEH) resulta de la suma de la demanda individual de cada calle para cada escenario escogido.

En relación a los resultados, vale la pena comentar que el uso del criterio de densidad de personas planteado por Jacobs (1967) (Tabla 14) entrega valores exageradamente altos de demanda, los que no se consideraron representativos de las vías de evacuación horizontal analizadas. Por esta razón, se opta por sensibilizar los valores de densidad de personas asumiendo una distribución homogénea a lo largo de las vías de evacuación con el propósito de determinar una densidad que se ajuste a la ciudad para cada escenario de ocurrencia de la amenaza.

#### 5.1.3.1 AJUSTE DE DENSIDAD HOMOGÉNEA DE PERSONAS

Cabe destacar que las incertezas en la estimación de la población expuesta son grandes debido a factores como la disponibilidad de información estadística detallada de los residentes en la zona de análisis, cantidad de personas pertenecientes a la tercera edad y niños, porcentajes de personas desempleadas y sin ocupación, desglose estadístico de trabajadores por industria, entre otros. Adicionalmente, la evacuación al tratarse de un fenómeno dinámico y multivariable, resulta muy difícil estimar valores con precisión.

Según información entregada por la oficina SIG de la Ilustre Municipalidad de Valparaíso (Figura 63, polígonos en color celeste), la cantidad total de habitantes en la zona de interés es de aproximadamente 15.000 personas. La mayor parte de los residentes se concentran en los cerros de la ciudad (10.000), mientras que en el sector del Plan de Valparaíso se desarrolla el comercio y una cifra importante de edificaciones corresponden a entidades gubernamentales, privadas y educativas.

Sabiendo que en el Plan de la ciudad la cantidad de residentes es aproximadamente un tercio del total de la zona de análisis, la concentración se lleva a cabo en 18 edificios residenciales distribuidos a lo largo de la zona de estudio. Las demás manzanas ubicadas en el Plan no están destinadas a la habitación, por lo que en ellas se encuentran colegios, jardines infantiles, universidades, clínicas, hospitales, hoteles, oficinas de trabajo y locales comerciales. Producto de esta distribución de la población expuesta, para el desarrollo de cada escenario de ocurrencia de la amenaza es necesario contar con información estadística muy detallada.

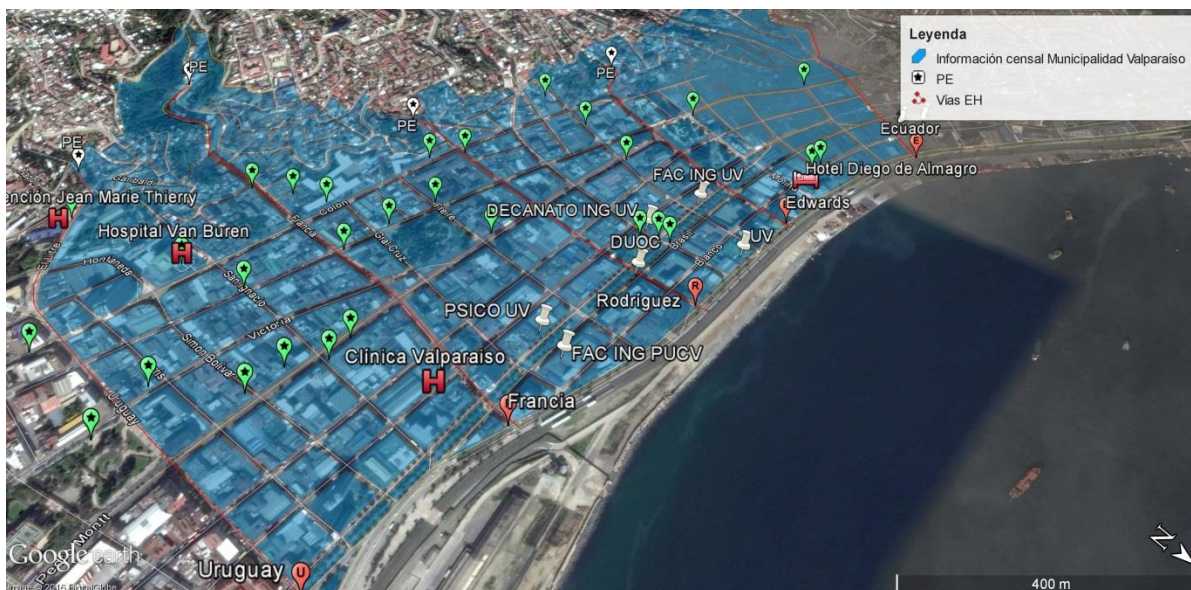


Figura 63 Manzanas censales habitantes zona de estudio. Elaboración propia con información entregada por unidad SIG Ilustre Municipalidad de Valparaíso.

En el caso del escenario de día laboral, se consideran todos los establecimientos educativos situados en la zona de estudio para determinar el total de estudiantes. De la misma manera, se estiman valores aproximados de personas atendidos en clínicas y hospitales, así como los funcionarios que trabajan allí, lo mismo ocurre con la cantidad de personas que trabajan en el comercio y en entidades gubernamentales y privadas.

El escenario de noche de año nuevo se considera crítico, ya que la cantidad de turistas que recibe la ciudad es la mayor durante todo el año. En la V Región, las comunas de Concón, Viña del Mar y Valparaíso reciben 1.000.000 de personas para la celebración de año nuevo (ADN, 2015). Cabe destacar que en la víspera de año nuevo, los focos de concentración de personas son específicos y ocurren en sectores como: Plaza Sotomayor, Muelle Prat, Caleta Portales, Muelle Barón y a lo largo del borde costero (calle Errázuriz). Teniendo en consideración esta información, se sabe que la totalidad de la demanda no se produce netamente dentro del polígono de análisis, sin embargo, a medida que avanza la celebración de año nuevo, la actividad de entretenimiento nocturna se traslada a lugares como la calle Ecuador por lo que se asume que durante la ocurrencia de la amenaza en este escenario, 120.000 personas se encuentran en el área de estudio.

Para el escenario de noche de fin de semana de verano, se estima un valor aproximado de turistas en la ciudad y además se asume que la población residente se mantiene dentro del polígono de análisis. Según la Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico (EMAT) elaborada por SERNATUR en colaboración con el INE, entre los meses de Diciembre, Enero y Febrero de 2015, en la comuna de Valparaíso se registraron en promedio 19.000 pernoctaciones en establecimientos de alojamiento turístico como hoteles, apart-hoteles, hostales, residencias, hosterías y cabañas (INE, 2015).

Finalmente, para el cálculo de los valores de demanda se asumen los siguientes criterios:

- En el escenario de día laboral, la totalidad de habitantes desarrolla su actividad laboral y de estudios, dentro del polígono de análisis.
- Para el escenario de noche de verano, se considera que la totalidad de las pernoctaciones se llevan a cabo dentro del polígono de análisis. Asimismo, se asume que los residentes se desplazan y mantienen dentro de la zona de análisis.
- La trayectoria de evacuación hacia la zona segura se realiza únicamente por las vías oficiales designadas por la ONEMI para evacuación ante tsunami.

En Tabla 17, los valores de demanda de EH para cada escenario.

Tabla 17 DEH en Valparaíso para cada escenario.

ESCENARIO			
	Día laboral	Noche de fin de semana de verano	Noche de año nuevo
<b>Demanda [n° personas]</b>	50000	35000	120000

Fuente: Elaboración propia con información INE (2015), ADN (2015) y SIG Municipalidad de Valparaíso.

En Tabla 18, se presenta el ajuste de densidad homogénea de personas y la demanda individual de EH por vía de evacuación para cada escenario.

Tabla 18 DEH para cada escenario con densidad homogénea de personas. Elaboración propia.

VÍA EH	DÍA LABORAL [n° personas]	NOCHE DE FDS DE VERANO [n° personas]	NOCHE DE AÑO NUEVO [n° personas]
<b>Uruguay</b>	11765	10056	34478
<b>Francia</b>	18716	11780	40389
<b>Rodríguez</b>	6466	4879	16727
<b>Edwards</b>	6482	3994	13695
<b>Ecuador</b>	6571	4291	14711
<b>Total</b>	<b>50000</b>	<b>35000</b>	<b>120000</b>
<b>Densidad [n° personas/m<sup>2</sup>]</b>	<b>1,03</b>	<b>0,57</b>	<b>1,95</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.1.4 BALANCE OFERTA/ DEMANDA DE EH

En relación a la oferta de EH, el sistema urbano presenta vulnerabilidades importantes asociadas a la susceptibilidad de bloqueos y a la confiabilidad de las vías. Un ejemplo de esto es lo que ocurre con los bloqueos por atochamiento vehicular, escombros y atochamiento de personas en horario peak o en situaciones de afluencia masiva, pues todas las vías de evacuación presentan muy alta o alta susceptibilidad. En el caso de la confiabilidad por presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de personas, la situación de la calle Uruguay es crítica, pues posee nula confiabilidad. Respecto al ancho útil de desplazamiento Edwards tiene baja confiabilidad mientras que todas las demás calles poseen confiabilidad media. La evacuación en escenario nocturno resultó en valores de baja y nula confiabilidad para todas las calles. Con este diagnóstico, el desempeño de las vías para los valores propuestos de demanda (35.000 personas escenario de día laboral, 50.000 personas escenario de noche de fin de semana de verano y 120.000 personas durante una noche de año nuevo) es incierto, más aún si se tiene en consideración la dinámica del proceso de evacuación, por lo que se debe tener claridad que ante un escenario real por tsunami en la ciudad, la DEH se modificará. Finalmente, y a pesar de que el balance de evacuación horizontal (BEH) posee una componente importante de incerteza, se considera positivo.

## 5.2 EVACUACIÓN VERTICAL (EV)

### 5.2.1 CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA DEMANDA DE EV

La demanda de EV viene dada por la población expuesta que no alcanza a llegar a zona segura desde el lugar de evacuación. Tal como se discute en el capítulo 5.1.1.1, la ONEMI (2014) sugiere evacuar verticalmente siempre que los 15 minutos de evacuación teóricos disponibles, no sean suficientes para alcanzar la zona segura. Asimismo, se sabe que este tiempo se encuentra sujeto a disminuciones asociadas al tiempo de respuesta de la población y al tiempo de preparación previo a la evacuación (Ecuación 2). De acuerdo a las lecciones del último terremoto de Illapel en 2015, el reducido tiempo de llegada de las primeras ondas de tsunami sentaron la discusión sobre el tiempo disponible antes del inicio de la inundación en las ciudades costeras. Según Aránguiz et al. (2015) en las localidades cercanas al epicentro, el tsunami llegó casi instantáneamente después del terremoto, mientras que en Totoral un reloj encontrado detenido 12 minutos después de ocurrido el terremoto sugiere dicho tiempo de arribo del tsunami. Complementariamente el trabajo de Tomita et al. (2016) señala que en la localidad de Los Vilos la inundación arribó 10 [min] después del terremoto, en tanto que en los sectores de Puerto Aldea y Tongoy llegó entre 10 y 12 [min] después del terremoto.

Basado en los antecedentes descritos en el párrafo anterior y en la incerteza en el tiempo de llegada de la inundación, el presente estudio asume un tiempo de arribo para un tsunami de campo cercano de 10 minutos, por lo que se considera que las personas disponen de este tiempo de evacuación para llegar a zona segura o si es estrictamente necesario, para refugiarse en una estructura de evacuación vertical (EEV).

La caracterización cualitativa de demanda se realiza tomando en cuenta los criterios de ubicación (capítulo 4.5.2). De ellos, el de mayor importancia es el criterio de tiempo de desplazamiento desde la línea de costa hasta la zona segura.

A continuación, las intersecciones de calles en las que teóricamente se genera la demanda de EEV utilizando el criterio conservador de evacuación a paso reducido a velocidad mínima de 0.67 [m/s] para un tiempo de evacuación disponible de 10 minutos:

- Uruguay, entre Chacabuco y Pedro Montt (EEV1).
- Uruguay, entre Independencia y Colón (EEV2).
- Francia, entre Chacabuco y Pedro Montt (EEV3).
- Francia, entre Colón y Vallejos (EEV4).
- Rodríguez, entre Chacabuco y Pedro Montt (EEV5).
- Edwards, entre Brasil y Yungay (EEV6).
- Ecuador, entre Brasil y Yungay (EEV7).

Conocida la ubicación teórica de la demanda de EEV y considerando que muy probablemente la realidad del sistema urbano no se ajuste a esta ubicación, se definen áreas de influencia (Figura 64) para cada estructura tomando en cuenta la distancia entre las vías de evacuación oficiales. De esta manera, se asume que en el punto medio de la distancia entre las vías, la mitad de las personas evacúan por la vía situada inmediatamente a la derecha mientras que las demás personas lo hacen por izquierda.



Figura 64 Ubicación teórica estructuras de evacuación vertical (EEV). Elaboración propia.

## 5.2.2 CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LA DEMANDA DE EV

Definida la ubicación teórica de cada estructura de evacuación vertical (EEV), la caracterización cuantitativa de demanda de EV para una distribución homogénea de personas en las calles de la ciudad para cada escenario viene dada en la Tabla 19.

Tabla 19 Demanda de EV para cada EEV

DEMANDA DE EV			
EEV	Día laboral [n°personas]	Noche de fin de semana de verano [n°personas]	Noche de año nuevo [n°personas]
EEV1	3153	3154	10814
EEV2	4901	3640	12478
EEV3	6230	3962	13583
EEV4	5888	3625	12428
EEV5	3361	2452	8405
EEV6	1159	732	2510
EEV7	2204	1385	4750

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LA OFERTA DE EV

La oferta de EV en la ciudad de Valparaíso según lo dispuesto en las guías de diseño ante tsunami como la FEMA (2008) es nula (revisar capítulo 4.5.1.1.1 para mayor detalle), sin embargo, pueden existir algunas estructuras que entreguen algún grado de protección.

Valparaíso, se caracteriza por el invaluable patrimonio histórico presente en sus construcciones. En términos generales, la mayor parte del plan de Valparaíso se constituye por las típicas estructuras antiguas construidas en base a albañilería que no cumplen con los criterios estructurales mínimos de materialidad y número de pisos especificados en Tabla 12. Por otro lado, los edificios modernos construidos en el siglo XXI que podrían servir como EV gracias al uso de normativas sismorresistentes, son pocos y la mayoría de ellos no cumplen con los criterios de zonificación (4.5.2), es decir, se encuentran cercanos a la línea de costa o cerca de potenciales focos de incendio como bencineras.

Un ejemplo de la oferta de EV existente en Valparaíso en la Figura 65. En ella es posible apreciar la tipología de estructuras que representan el plan de la ciudad. Las estructuras n°1 y n°3 son de uso habitacional o comercial, poseen dos pisos cuyo material de construcción puede ser albañilería confinada u hormigón armado, el año de construcción se estima previo al 2003 de acuerdo a las imágenes satelitales de Google Earth Pro. En esta misma imagen (Figura 65) el edificio n°2 tiene 20 pisos y su año de construcción se estima entre 2005-2007 según las imágenes satelitales proporcionadas por Google Earth Pro.

La información preliminar obtenida de la inspección visual descrita anteriormente se completa evaluando las estructuras con la ficha A (Figura 43). Posteriormente, y dependiendo si se cumplen los criterios de materialidad (hormigón armado) y número de pisos mínimo 8 (apartado 4.5.1.1.1), el análisis continúa con la ficha B (Figura 44).

Finalmente, para caracterizar completamente la oferta de EV, las estructuras se evalúan para establecer si cumplen con los criterios estructurales de la Tabla 12 y los criterios de ubicación siguiendo el esquema propuesto en Figura 45.



Figura 65 Oferta de EV. Intersección calle Francia con Brasil. Adaptado de Google Earth. LC: Línea de costa. REH: Ruta de evacuación horizontal. 1, 2 y 3 tipo de estructuras presentes en el plan de Valparaíso.

### 5.2.3.1 EVALUACIÓN VISUAL DE LA CIUDAD

Actualmente en la ciudad de Valparaíso no existen estructuras destinadas como evacuación vertical, sin embargo, como la demanda y el área de influencia de cada estructura se conoce (Figura 64), se realiza la inspección visual de la ciudad en busca de estructuras que puedan ser calificadas como probablemente aptas según la Figura 45. Para llevar a cabo dicha inspección, se evalúan criterios estructurales, de ubicación y la hidrodinámica de las estructuras con el uso de las fichas de registro A y B (Figura 43 y Figura 44, respectivamente).

La primera fase de inspección visual de la ciudad, se lleva a cabo completando la información de la ficha A para cada EEV. Si se verifican los criterios mínimos de número de pisos superior a 8 y materialidad de la estructura sólida (hormigón armado), la EEV puede continuar la evaluación con la ficha B. En el caso de que los criterios anteriormente señalados no se cumplan, la estructura se clasifica inmediatamente como no apta (Figura 45).

#### 5.2.3.1.1 EVALUACIÓN VISUAL USANDO GOOGLE EARTH FICHA A

Como era de esperar, en la primera fase de inspección visual de la ciudad (Figura 66) la ubicación teórica de la demanda de EEV difiere con la realidad de la ciudad, ya que la mayoría de las estructuras situadas en el polígono de análisis, no cumplen con los criterios mínimos anteriormente señalados, es por esto que se propone continuar la siguiente fase de evaluación con las estructuras propuestas en Tabla 20.

Tabla 20 Estructuras evaluadas con ficha de registro.

ESTRUCTURAS ANALIZADAS CON FICHA DE REGISTRO A Y B				
Área de influencia	Ubicación	Dirección	Coordenadas UTM	
			E	S
EEV1	Yungay con Simón Bolívar	Simón bolívar 153	256296	6340664
EEV2.1	Almirante Barroso con Independencia	Almirante Barroso 560	256635	6340192
EEV2.2	Morris con Colón	Morris 776	256346	6340046
EEV2.3	Hontaneda con Colón	Hontaneda 735	256283	6340066
EEV3	General Cruz con Brasil	Brasil 2274	256020	6340676
EEV4	-	-	-	-
EEV5	Rodríguez con Errázuriz	Rodríguez 99	255731	6340815
EEV6.1	Carrera con Blanco	Blanco 1791	255518	6340772
EEV6.2	Blanco con Edwards	Blanco 1693	255400	6340796
EEV6.3	Blanco con Molina	Blanco 1623	255388	6340785
EEV7.1	Blanco con Melgarejo	Blanco 1231	255025	6340923
EEV7.2	Blanco con Melgarejo	Blanco 1169	255006	6340942
EEV7.3	Bellavista entre Blanco y Brasil	Bellavista 168	255059	6340844
EEV7.4	Melgarejo con B. O'higgins	Melgarejo 669	255950	6340854

Fuente: Elaboración propia.

Esta primera fase de inspección del área de estudio con la ficha A, resulta tan categórica que en la zona de influencia EEV4 no se encontraron estructuras para continuar con el análisis, por lo que en este perímetro la oferta se considera nula, por consiguiente, la demanda no puede ser cubierta.

En el área de influencia EEV2, producto de la materialidad y el número de pisos inferior a 8 de las estructuras existentes, la posible oferta EEV2.1, EEV2.2 y EEV2.3, se sitúa fuera de los límites del polígono EEV2.

Respecto a la ubicación, las estructuras EEV1, EEV5, EEV6.1, EEV6.2 y EEV6.3, se encuentran en la línea de costa (Figura 66) por lo que pueden sufrir daños producto del paso de la inundación por tsunami, especialmente por la cantidad y tonelaje de los escombros flotantes que podrían impactarlas. Por otro lado, la cercanía a la línea de costa y las mayores profundidades de inundación a las que están afectas las estructuras EEV7.1 y EEV7.2 (Figura 101, Figura 113, Figura 102 y Figura 114) se consideran críticas para el análisis.



Figura 66 Primera fase de inspección visual de la ciudad. Elaboración propia.

En la Figura 67, se muestra el análisis de la estructura EEV1 con ficha A. El detalle de las demás estructuras analizadas se encuentra en ANEXO D EDIFICIOS EVALUADOS CON FICHAS DE REGISTRO.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-YUNGAY-S.BOLIVAR
DIRECCIÓN	SIMÓN BOLIVAR 153
COORDENADAS UTM	6340664.62S 256296.08E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	02-03-2016
FECHA SATELITAL	01-01-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	67 m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	1100 m

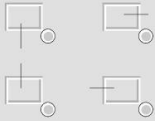
INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0-1m
OBSERVACIONES	EEV1 NO POSEE SUBTERRÁNEO, ES OPACO Y ESTÁ AL FRENTE A LA LC. NO




IMAGEN FRONTAL

IMAGEN PLANTA

IMAGEN UBICACIÓN


Figura 67 Evaluación EEV1 ficha A. Elaboración propia.

#### 5.2.3.1.2 EVALUACIÓN VISUAL USANDO GOOGLE STREET VIEW FICHA B

Debido a que todas las estructuras en Tabla 20 cumplen con el criterio de número mínimo de pisos y materialidad, califican para la segunda fase de evaluación llevada a cabo con ficha B.

En Figura 68, la evaluación de la EEV1 con la ficha B.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-YUNGAY-S.BOLIVAR
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	997
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	<2000
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1964
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	NO
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	Arena densa con una distancia a la orilla de playa mayor a 92 [m] (300 ft) 50% d. SEGÚN UNA NOTICIA ESTAYOTRAC DOG

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 68 Evaluación EEV1 ficha B. Elaboración propia.

El detalle individual de cada edificio analizado se encuentra en ANEXO D EDIFICIOS EVALUADOS CON FICHAS DE REGISTRO.

### 5.2.3.2 OFERTA DE EV

A pesar de que se sabe que la oferta de EV en la ciudad es nula, para determinar si existen estructuras que puedan catalogarse como probablemente aptas, la información obtenida de la inspección visual se evalúa según el diagrama de flujo en Figura 45.

El resultado de la evaluación visual con las fichas A y B, se presenta en Tabla 21, los dos edificios mejor evaluados fueron EEV2.2 y EEV2.3. El detalle de cada estructura en ANEXO D EDIFICIOS EVALUADOS CON FICHAS DE REGISTRO (Tabla 23 y Tabla 24).

Las características principales de las estructuras EEV2.2 y EEV2.3 son la materialidad de hormigón armado y la fecha reciente de construcción (2014) que incorpora en su diseño

códigos sísmicos modernos. El número de pisos, 25 cada uno, cumple el criterio mínimo establecido por la ONEMI (manual de “RECOMENDACIONES PARA LA PREPARACIÓN Y RESPUESTA ANTE TSUNAMI” elaborado en 2014). La categoría de uso corresponde a edificios de uso privado destinados a habitación. También se cumplen los criterios de tipología de suelo según el D.S n°61 y FEMA (2008). La distancia desde la línea de costa supera los 600 [m] y no se encuentran cerca de zonas portuarias o zonas con alta densidad de escombros. La cantidad de objetos flotantes y el tonelaje de los mismos se catalogan como poco abundante y de bajo tonelaje, respectivamente. Otro de los criterios satisfactoriamente evaluados es la resistencia ante impacto, producto de la materialidad, cantidad de objetos flotantes y el estado de conservación del edificio, se evalúa como buena. La profundidad de socavación (35%*d*) debido al paso del flujo y la existencia de dos niveles de subterráneo son indicadores positivos ante un eventual paso de la inundación por tsunami. Respecto a este último punto, y a pesar de que el edificio no se encuentra en zona expuesta, un factor clave relacionado con la opacidad de la estructura plantea incertidumbre ante un escenario real por tsunami, ya que el edificio al ser opaco impediría el libre paso del flujo, incrementando así la probabilidad de daños en pilares o muros estructurales.

En general, se considera positiva la evaluación ya que se cumplen casi la mayoría de los criterios establecidos en Tabla 12. Similar situación es lo que ocurre con los criterios de ubicación (4.5.2), pues las estructuras no se encuentran cercanas ni a cursos de agua ni a potenciales focos de incendio como gasolineras. En relación a la accesibilidad de las estructuras, ambas poseen un solo acceso peatonal al edificio. Adicionalmente, se rescata positivamente que ambas torres posean acceso al área de azotea y que ésta sea destinada exclusivamente al uso de espacios comunes (Figura 69).



Figura 69 Área de azotea EEV 2.3. Fuente: [http://checkinly.com/es/geopark-valparaiso,h.html#zoom-img-gallery\[room151208501/0/](http://checkinly.com/es/geopark-valparaiso,h.html#zoom-img-gallery[room151208501/0/)

A pesar de los buenos resultados obtenidos del análisis de las estructuras mencionadas en el párrafo anterior, la limitada oferta de edificios en la ciudad condiciona la inspección visual, por lo que su ubicación no es la mejor. La cercanía a la zona segura sumado al hecho de que la zona no es inundable (Figura 41) plantean inquietud en el análisis.

Finalmente, según Tabla 21 ambas estructuras se consideran como no aptas para evacuación vertical debido a que no cumplen con el criterio de opacidad. Cabe señalar que su emplazamiento en zona no inundable además del criterio de hidrodinámica de la

planta baja de los edificios, son determinantes para no considerarlos aptos para evacuación vertical. A pesar de esto, la metodología desarrollada es una útil herramienta de evaluación aplicable a otras ciudades costeras.

Tabla 21 Resumen criterios evaluados con fichas de registro edificios EEV2.2 y EEV2.3.

CRITERIOS	REQUISITO	EEV2.2	EEV2.3
Número de pisos	Superior a 8 según ONEMI	25 pisos	25 pisos
Accesibilidad	Número indistinto, si tiene más de 1 ideal	1	1
Material de construcción	Acero u hormigón armado	H.A	H.A
Uso de la estructura	Categoría II, III, IV Nch 433of96MOD2009. Habitacionales, colegios y universidad, y refugios de emergencia, respectivamente.	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009
	Categoría C1 Nch 2369of2003. Obras críticas: Vitales, Peligrosas o Esenciales		
Tipo de suelo según FEMA	Arena densa	Arena densa	Arena densa
Tipo de suelo según D.S n°61	Tipo D, suelo medianamente denso o firme	Tipo D	Tipo D
Profundidad de inundación	Menor a 2 [m]	0 [m]	0 [m]
Cantidad de objetos flotantes	Poco abundante	Poco abundante	Poco abundante
Tipo de objetos flotantes	Bajo tonelaje	Bajo tonelaje	Bajo tonelaje
Año de construcción	Posterior a 2010	2014	2014
Estado de conservación exterior	Bueno	Bueno	Bueno
Acceso vehicular subterráneo	Si	Si	Si
Número de subniveles	1 o superior	2	2
Potencial de socavación	35-50% profundidad de inundación	35%d (0 [m])	35%d (0 [m])
Opacidad de la estructura	Transparente	Opaco	Opaco
Resistencia del edificio ante impacto	Buena	Buena	Buena

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4 BALANCE OFERTA/ DEMANDA DE EV

Con la metodología de inspección visual propuesta, se ha corroborado que la oferta de evacuación vertical (OEV) es nula, ya que del total de estructuras analizadas, ninguna cumple todos los criterios establecidos en Tabla 12, lo que según Figura 45 permite clasificar, inclusive a las estructuras mejor evaluadas (EVV2.2 y EEV2.3) como no aptas para evacuación vertical.

Finalmente, el balance de oferta-demanda de evacuación vertical (EV) resulta negativo debido a que los valores de demanda no pueden ser cubiertos.

## 6 GLOSARIO

A continuación, una revisión de conceptos utilizados a lo largo del desarrollo del presente estudio.

Profundidad de inundación ( $d$ ): Profundidad de la inundación por tsunami referida al nivel del terreno del sitio de estudio. Como nivel de referencia se puede utilizar la máxima pleamar al momento de ocurrencia del tsunami.

Altura de inundación ( $h$ ): Altura de la inundación por tsunami medida respecto al nivel de referencia del evento.

Runup o cota máxima de inundación ( $R$ ): Diferencia entre la cota de terreno en el punto de máxima intrusión horizontal de la inundación por tsunami y el nivel de referencia del evento.

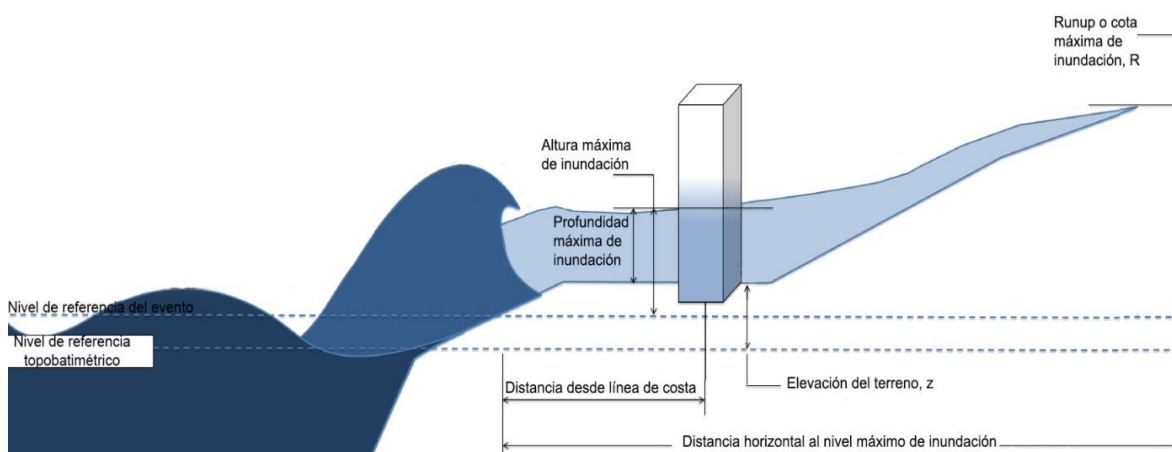


Figura 70 Variables de interés ante una inundación por tsunami. Adaptado de Cawley (2014).

Magnitud de tsunami ( $m$ ): Basada en la escala de Inamura e Iida, indica el grado de magnitud de un tsunami en función del runup y la altura de ola (Figura 71).

Escala de grados de *tsunami* según Inamura e Iida

Grado <i>tsunami</i> $m$	Altura de la ola (m)	Cota máxima de inundación $r$ (m)	Descripción de los daños
0	1 - 2	1 - 1.5	No produce daños.
1	2 - 5	2 - 3	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5 - 10	4 - 6	Hombres, barcos y casas son barridos.
3	10 - 20	8 - 12	Daños extendidos a lo largo de 400 km de la costa.
4	> 30	16 - 24	Daños extendidos sobre más de 500 km a lo largo de la línea costera.

Figura 71 Escala de Inamura e Iida adaptada por Wiegel (Lagos, 2000).

## **7 DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 ACERCA DE LA AMENAZA**

En los últimos 6 años, las regiones de Tarapacá, Coquimbo y el Maule registraron terremotos de magnitud Mw 8.2 en 2014, Mw 8.4 en 2015 y Mw 8.8 en 2010, respectivamente. Por ello y en consideración de que los terremotos en Chile pueden tener potencial tsunamigénico, la amenaza por tsunami en las distintas comunidades costeras a lo largo del país, es efectiva, es decir, su probabilidad de ocurrencia es distinta de cero. En este sentido, la ciudad de Valparaíso no está exenta de esta realidad, como lo demuestra la ocurrencia de terremotos registrados en la zona central del país en los años 1647, 1730, 1822, 1906 y 1985. Cada uno de esos eventos provocó cuantiosos daños en Valparaíso y otras ciudades cercanas, siendo el de 1730 de mayor magnitud y el que generó el mayor tsunami de campo cercano. Además, debe tenerse en consideración que desde 1730 no se ha vuelto a generar un tsunami destructivo, configurándose así el peor escenario para la Región de Valparaíso y también el peor escenario para este estudio.

Respecto a la probabilidad de ocurrencia, la calidad y diversidad de registro histórico e instrumental del país, conduce a una base de datos breve y parcial para el análisis de fenómenos geológicos de alta complejidad y amplitud geográfica. Por ello, la tarea de determinar confiablemente una probabilidad de ocurrencia de la amenaza, se ve dificultada.

En tanto a la magnitud de la amenaza, el amplio espectro de incertidumbre motiva la proposición de escenarios de diseño que recojan condiciones representativas de las peores circunstancias posibles de concreción de la amenazas sobre los sistemas expuestos.

### **7.2 ACERCA DE LA METODOLOGÍA**

#### **7.2.1 EVACUACIÓN HORIZONTAL**

Para el caso particular de la ciudad de Valparaíso, durante la evaluación en terreno del impacto por susceptibilidad de bloqueo por desborde de cauces, ríos y/o esteros, no se consideró un eventual bloqueo asociado al colapso de alcantarillas producto de la intrusión horizontal del flujo por tsunami, por lo que para posteriores estudios de los sistemas de evacuación en la ciudad, se sugiere perfeccionar este análisis y considerar este aspecto.

La caracterización cuantitativa de demanda de evacuación horizontal según el criterio de densidades de Jacobs (multitud fluida: 1[persona/m<sup>2</sup>], multitud densa: 2 [personas/m<sup>2</sup>] y multitud muy densa: 4 [personas/m<sup>2</sup>]), no resultó representativa para la ciudad de Valparaíso. En efecto, la demanda de evacuación horizontal obtenida con esas densidades resulta muy grande respecto a la información demográfica disponible. Ello aun considerando que existen grandes vacíos estadísticos de base censal. Por ello se contrastó con información local, calibrando las densidades poblacionales que determinan la demanda de evacuación horizontal, bajo la suposición de una distribución homogénea de personas en las vías analizadas.

## 7.2.2 EVACUACIÓN VERTICAL

El enfoque cualitativo utilizado para determinar la demanda de evacuación vertical (DEV), se sustenta en un criterio conservador de velocidad mínima de evacuación a paso reducido de 0.67 [m/s] ligado tanto al resultado de confiabilidad de evacuación para personas con movilidad reducida como a la distribución de velocidades registradas en terreno. En este sentido y, a pesar de que este estudio no se centró en un grupo específico de la población, el gran incremento de los tiempos de evacuación a paso reducido plantea la discusión acerca de la situación de las personas con movilidad reducida. Las vías Uruguay y Edwards resultaron nulas en confiabilidad, en tanto que Francia y Rodríguez poseen baja confiabilidad.

El posicionamiento de los nodos (EEV) donde potencialmente podrían ubicarse estructuras que satisfagan la demanda de EV (ubicación teórica) se estimó de acuerdo al tiempo teórico disponible antes de la llegada de la inundación, establecido en 10 [min], utilizando el criterio conservador de velocidad mínima de evacuación (0.67 [m/s]). Cabe señalar que el posicionamiento posee grandes incertezas producto de la dinámica del proceso de evacuación, la estimación de velocidades de desplazamiento y el tiempo de arribo del tsunami. Por esto, y dado este contexto de incertidumbre, la cuantificación de la demanda de evacuación vertical se plantea como un desafío importante, por lo que en este estudio se utilizó una propuesta simplificada para su cuantificación, a fin de hacer más objetivo el análisis del sistema.

Finalmente, e independiente de las ya mencionadas incertezas, el presente estudio se considera como un primer paso para abrir futuras líneas de investigación que contribuyan al análisis de confiabilidad de los sistemas de evacuación de las ciudades costeras.

## 7.3 RECOMENDACIONES

En relación a la evaluación general de las vías, se propone la realización de un diagnóstico de las vías durante un simulacro real por tsunami en la ciudad, a cargo de un comité de expertos liderado por la autoridad competente. De esta manera, la identificación temprana de vulnerabilidades es imperiosa para mejorar y preparar las vías de evacuación ante un escenario real de amenaza por terremoto y tsunami.

Durante el diagnóstico, además de caracterizar las vías, por ejemplo, a través del uso de escalas de impacto cualitativas, y cronometrar los tiempos de desplazamiento hasta la zona segura, otro tipo de mediciones dirigidas a obtener valores de densidad de personas en terreno, puede llevarse a cabo con la toma de fotografías aéreas, sobrevuelos o el uso de drones. Con estos valores de densidad de personas, se pueden manejar distintos escenarios de ocurrencia de la amenaza y caracterizar tramos o puntos críticos en cada uno de ellos. Respecto a los tiempos de evacuación, para obtener una aproximación del tiempo que conlleva abandonar un lugar de estudios y/o trabajo para llegar a la vía y comenzar la evacuación horizontal, dirigir mediciones a grupos específicos de la población ubicados en jardines infantiles, colegios, universidades y oficinas en edificios altos, es de importancia para caracterizar de manera más precisa el tiempo total de evacuación de la población. En cuanto a las personas con movilidad reducida, ya sean adultos mayores, personas con lesiones físicas u otro tipo de afecciones y/o adultos con niños pequeños o infantes, obtener tiempos de desplazamiento y evaluar el proceso de evacuación durante un simulacro por tsunami, resultaría interesante para estudiar

alternativas orientadas a disminuir el impacto asociado a la baja confiabilidad de evacuación de este grupo de personas, detectadas en las vías analizadas. La implementación de rampas y barandas en tramos de mayor complejidad debido a las pronunciadas pendientes y la alta presencia de escalones, podría ser una alternativa para disminuir este impacto, especialmente en los últimos tramos hacia zona segura de las calles Edwards, Rodríguez y Uruguay.

Debido a la incertidumbre en torno al desempeño de las vías de evacuación ante la ocurrencia de un escenario real por tsunami, se plantea la discusión respecto al ancho útil de desplazamiento de personas. En las calles Uruguay y Ecuador, producto de la presencia de comercio ambulante, se registraron disminuciones de hasta un 50% en el ancho útil de veredas. Disponer de una mayor área peatonal durante la evacuación es una manera de reducir esta vulnerabilidad y aumentar la confiabilidad, por lo que reubicar el comercio existente en estos espacios, puede ser una medida a considerar.

Para mejorar la confiabilidad de disponibilidad de señalética, se propone aumentar el número de señalética en las vías de evacuación peor evaluadas, es decir, en las calles Uruguay, Rodríguez y Ecuador. Se sugiere especialmente ubicar señalética en el borde costero, pues ninguna de estas rutas allí posee. Adicionalmente, se sugiere aumentar el tamaño de la señalética y mejorar la visibilidad de las mismas, por ejemplo, en la intersección de las calles Edwards con Independencia. Como medida complementaria para aumentar la confiabilidad durante la evacuación, se propone demarcar las calzadas de las vías oficiales de evacuación horizontal.

En futuras líneas de investigación, se aconseja la utilización de un modelo de evacuación que permita estudiar posibles focos de atochamiento de personas en las vías de evacuación. Esta valiosa información puede ser utilizada para identificar vías críticas y mejorar su diseño. Un ejemplo de ello es lo que sucede en la intersección de las calles Edwards con Colón, pues al llegar a la subida Ferrari se han observado grandes atochamientos de personas durante simulacros por tsunami realizado por la ONEMI.

Aunque se reconoce el gran rango de incerteza en el cálculo de valores de demanda de evacuación horizontal, realizar una medición in situ de los anchos de calzadas y veredas de las vías de evacuación, permitiría obtener una aproximación del rango de error en los valores de áreas medidos con el software Google Earth Pro.

## **8 CONCLUSIONES**

Del análisis de la subcomponente de vulnerabilidad (HS04-02), considerando los tres escenarios propuestos: día laboral, noche de fin de semana de verano y noche de año nuevo, este último resultó ser el más crítico en términos de cantidad de gente, estimando una demanda aproximada de 120.000 personas en la ciudad al momento de ocurrencia de la amenaza por tsunami. Por otro lado, las condiciones de este escenario resaltan aspectos calificados como factores de baja confiabilidad y muy alta susceptibilidad en las vías, asociado ello a un impacto potencial mayor de la amenaza sobre el sistema en estudio. Ejemplo de esto es la nula confiabilidad de Uruguay y la baja confiabilidad de Ecuador, Edwards, Rodríguez y Francia para evacuación durante un escenario nocturno. En relación a la evaluación de la susceptibilidad de bloqueo de las vías por atochamiento de personas en horario peak o en situaciones de afluencia masiva, resultó muy alta en todas las calles. Las vías Ecuador y Edwards presentaron muy alta susceptibilidad de bloqueo por atochamiento de personas en temporada de verano.

### **8.1.1 OFERTA EVACUACIÓN HORIZONTAL**

De las cinco vías de evacuación horizontal evaluadas, la distribución de la composición de vulnerabilidades entrega variados resultados para cada una de las vías. En este sentido, uno de los aspectos mejor evaluados fue el tiempo de desplazamiento desde la zona inundable hasta el punto de encuentro. Rodríguez presentó confiabilidad media (13:03 [min]), en cambio que Francia (10:51[min]) muy alta confiabilidad. Ecuador (6:30 [min]), Edwards (6:17 [min]) y Uruguay (16:32 [min]) poseen alta confiabilidad. En términos generales de impacto asociado a la confiabilidad, la calle Uruguay fue la peor evaluada, resultó no confiable en cuatro aspectos de la evaluación: presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento, escasa señalética disponible durante el recorrido, evacuación de personas con movilidad reducida y evacuación durante un escenario nocturno. Por otro lado, y también en términos generales, a pesar de poseer cuatro aspectos evaluados con baja confiabilidad, la calle Francia fue la mejor evaluada.

De los resultados de impacto por susceptibilidad de bloqueo, todas las vías presentaron muy alta susceptibilidad por atochamiento de personas en horario peak o en situaciones con afluencia masiva. La susceptibilidad de bloqueo por atochamiento vehicular fue otro de los aspectos peor evaluados en las calles Edwards y Uruguay pues resultó muy alta, mientras que en las otras tres vías la susceptibilidad fue alta. El bloqueo por escombros también arrojó una evaluación negativa en las calles Francia, Rodríguez y Uruguay, pues la susceptibilidad fue muy alta, en Ecuador y Edwards la susceptibilidad fue alta.

Aunque por las limitaciones del presente estudio no es posible precisar los puntos en los que se producen bloqueos por atochamientos de personas en temporada de verano, horario peak y debido a estrechamientos, en términos globales de acuerdo a la percepción de los evaluadores durante la campaña de terreno, el impacto asociado a la susceptibilidad para estos tipos de bloqueo, las calles peor evaluadas fueron Ecuador, Edwards y Uruguay, en tanto que la mejor evaluación fue para la calle Francia.

### 8.1.2 DEMANDA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL

La densidad de personas por unidad de superficie según la distribución homogénea para cada escenario estudiado fue asumida en 1,03 [personas/m<sup>2</sup>] para una demanda de 50.000 personas en un día laboral, 1,95 [personas/m<sup>2</sup>] para una demanda de 120.000 personas durante una noche de año nuevo, mientras que para una noche de fin de semana de verano una menor densidad de 0,57 [personas/m<sup>2</sup>], se ajusta al valor de demanda de 35.000 personas.

La vía de evacuación con el mayor valor de demanda de evacuación horizontal fue Francia. Para el escenario de día laboral la demanda de personas es de 18.716, para una noche de año nuevo la demanda es de 40.389 personas, finalmente, para una noche de fin de semana de verano la demanda es de 11.780 personas. Por otro lado, la vía que recibe la menor demanda es Edwards, para un escenario de día laboral la demanda es de 6.482 personas, en tanto que para una noche de fin de semana de verano la demanda es de 3.994 personas y para una noche de año nuevo la demanda es de 13.695 personas.

En relación a estos resultados de demanda, cabe señalar que el valor conservador de velocidad mínima a paso reducido utilizado en toda la ciudad y el cálculo de áreas en las que se genera la demanda, entregan valores de demanda conservadores.

### 8.1.3 BALANCE DE EVACUACIÓN HORIZONTAL

A pesar de que las calles Rodríguez y Uruguay fueron las peor evaluadas debido a la baja confiabilidad de evacuación y la alta susceptibilidad de bloqueo, el balance de evacuación horizontal en todas las vías, se considera positivo para los valores de demanda propuestos en la ciudad.

### 8.1.4 OFERTA DE EVACUACIÓN VERTICAL

De la inspección visual realizada con la ficha cualitativa de registro A en 13 estructuras, todas calificaron para la segunda fase de evaluación en Ficha B, pues cumplieron con los criterios de número de pisos igual o superior a 8 y materialidad de hormigón armado. Del análisis de la Ficha B y de acuerdo al diagrama de flujo (Figura 45), las estructuras EEV2.2 y EEV2.3 fueron las mejor evaluadas, pese a esto, ninguna de ellas cumplió con los requisitos establecidos en Tabla 12. Por lo tanto, y según los criterios expuestos en este trabajo, la oferta de evacuación vertical es nula.

### 8.1.5 DEMANDA DE EVACUACIÓN VERTICAL

La demanda de EV en la EEV6 (calle Edwards, entre Brasil y Yungay) presentó los valores más bajos con 1.159 personas, 2.510 personas y 732 personas para el escenario de día laboral, noche de año nuevo y noche de fin de semana de verano, respectivamente. Por otro lado, los valores más altos de demanda se obtuvieron en EEV3 (calle Francia, entre Chacabuco y Pedro Montt), para un escenario de día laboral la demanda es de 6.230 personas, en tanto que para una noche de año nuevo la demanda es de 13.583 personas, finalmente en una noche de fin de semana de verano la demanda producida es de 3.962 personas.

En lo que concierne a los resultados de demanda de evacuación vertical es importante señalar que los valores están ligados solamente a la ubicación teórica de los nodos de estructuras de evacuación vertical (EEV), pues tal como se mencionó a lo largo del desarrollo de este estudio, las estructuras que posee la ciudad difiere con la ubicación teórica de las EEV propuestas, por lo que estimar valores de demanda en calles en las que no se tienen datos de terreno no se considera prudente.

#### 8.1.6 BALANCE DE EVACUACIÓN VERTICAL

El balance cualitativo de evacuación vertical (BEV) en la ciudad de Valparaíso resulta negativo. Del análisis de oferta realizado en 13 edificios con la inspección visual y el uso de las fichas de registro A y B, en la actualidad, ninguno se encuentra apto para servir como refugio de evacuación vertical ante tsunamis. Por esta razón, al ser nula la oferta, la demanda de EV no puede ser cubierta. Sin embargo, y a juicio de la autora, si en el futuro se concentran esfuerzos en el manejo de nuevas estrategias para habilitar y/o diseñar estructuras especialmente para estos propósitos, la vulnerabilidad del sistema urbano ante la ocurrencia de un escenario por tsunami, podría disminuir.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADN. (2 de 1 de 2015). *ADN Noticias*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2015, de <http://www.adnradio.cl/noticias/nacional/intendente-de-valparaiso-al-menos-un-millon-de-personas-recibiran-el-2015-en-el-borde-costero/20141231/nota/2569643.aspx>
- Alvarez, G. e. (2010). Zonas oscuras en el sistema de alarma de advertencia de tsunami en Chile. *Ingeniare, Revista chilena de Ingeniería*, 316-325.
- Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P., Cienfuegos, R., Yagi, Y., . . . Rojas, C. (2015). The 16 September 2015 Chilean Tsunami from Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 333-348.
- Barrientos, S. (1988). Slip distribution of the 1985 Central Chile earthquake. *Tectonophysics*, 145, 225-241.
- Barrientos, S., & Ward, S. (1990). The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation. *Geophysical Journal International*, 589-598.
- Bernal, I., & Tavera, H. ( 2002). *Geodinámica, Sismicidad y Energía Sísmica en Perú*. Lima: Instituto Geofísico del Perú.
- Beyá, J., & Winkler, P. (2012). *Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis*. Santiago.
- Brocher, T., Filson, J., Fuis, G., Haeussler, P., Holzer, T., Plafker, G., y otros. (4 de Marzo de 2014). The 1964 Great Alaska Earthquake and tsunamis—A modern perspective and enduring legacies: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2014–3018. California, Estados Unidos .
- Cardona, O. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo*. Bogotá: CEDERI.
- Cardona, O. (2011). *Updating the Indicators of Disaster Risk and Risk Management for the Americas*. Bogotá: Journal of Integrated Disaster Risk Management (IDRiM).
- Carvajal, M., Cisternas, M., & Catalán, P. G. (2014). Redimensionando el terremoto de 1730 de Chile central, mediante evidencias históricas y geológicas del tsunami resultante. *Riesgos, vulnerabilidades y resiliencia socioambiental para enfrentar los cambios globales*, (págs. 1134-1142). Santiago.
- Cawley, J. (Junio de 2014). Review of Guidelines for the Design of Tsunami Vertical Evacuation Buildings (Master Thesis). Oregon, Oregon, Estados Unidos.
- Centro Sismológico Nacional. (2014). *Centro Sismológico Nacional*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2014, de <http://www.sismologia.cl/seismo.html>
- Centro Sismológico Nacional. (2015). CSN. Recuperado el 1 de Marzo de 2015, de <http://www.sismologia.cl/>

- Cisternas, M. (2005). Suelos enterrados revelan la prehistoria sísmica del centro-sur de Chile durante los últimos dos milenios. *Revista de Geografía Norte Grande*, 33, 19-31.
- Cisternas, M. (2012). El terremoto de 1647 de Chile central como un evento intrapalaca: ¿Otra amenaza para Chile metropolitano? *Revista de Geografía Norte Grande*, 53, 23-33.
- Cisternas, M., & Atwater, B. e. (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 404-407.
- Cisternas, M., Gorigoitia, N., Torrejón, F., & Urbina, X. (2011). Terremoto y Tsunami de Chile Central de 1730: ¿Un gigante o una serie de eventos menores? *XXXI Congreso de Ciencias del Mar*, (pág. 85). Viña del Mar.
- Cisternas, M., Torrejón, F., & Gorigoitia, N. (2012). Amending and complicating Chile's seismic catalog with the Santiago earthquake of 7 August 1580. *Journal of South American Earth Sciences*, 102-109.
- Comte, D. e. (1986). The 1985 Central Chile Earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region. *Science*, 449-452.
- Contreras, M., & Winckler, P. (2013). Pérdidas de vida, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el Tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa central de Chile. *Obras y Proyectos*, 6-19.
- Cronin, V. (2004). A Draft Primer on Focal Mechanism Solutions for Geologists. 14. Texas, EE.UU: Baylor University. Obtenido de <http://serc.carleton.edu/files/NAGTWorkshops/structure>
- CSN. (2014). *Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2014, de [http://www.sismologia.cl/pdf/difusion/001\\_terremotos\\_y\\_sismicidad\\_chile.pdf](http://www.sismologia.cl/pdf/difusion/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf)
- CSN. (2015). *Centro Sismológico Nacional*. Recuperado el 27 de Julio de 2015, de <http://www.csn.uchile.cl/red-sismologica-nacional/red-sismografos/>
- Dall'Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., & Domiey-Howes, D. (2009). Assessing the vulnerability of building to tsunami in Sydney. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015-2026.
- Dall'Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., & Dominey-Howes, D. (2009). A revised (PTVA) model for assessing the vulnerability of buildings to tsunami damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1557-1565.
- Dalrymple, R., & Kriebel, D. (2005). Lessons in Engineering from the Tsunami in Thailand. *The Bridge. National Academy of Engineering*, 35(2), 4-13.
- Dean, R., & Darlymple, R. (1991). *Water Wave Mechanics For Engineers and Scientists*. Prentice Hall.

- División Político Administrativa Censal. (2007). Región de Valparaíso. Valparaíso, Valparaíso, Chile. Obtenido de <http://www.inevalparaiso.cl/archivos%5Cfiles%5Cpdf%5CDivisionPoliticoAdministrativa%5Cvalparaiso.pdf>
- Dominey-Howes, D., Dunbar, P., & Varner, J. (2010). Estimating probable maximum loss from Cascadia tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 53, 43-61.
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B., Ely, L., & Nelson, A. (2014). Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 1-19.
- Fernández, J. M. (2006). *Planificación estratégica de ciudades: Nuevos instrumentos y procesos*. (Vol. 10). Barcelona: Reverté.
- FEMA. (2008). *Guías para el Diseño de Estructuras de Desalojo Vertical en caso de Tsunami*. California.
- FEMA, A. F. (2009). *Desalojo Vertical en caso de Tsunami: Una guía para oficiales comunitarios*. California.
- Fraser, S., Leonard, G., Murakami, H., & Matsuo, I. (2012). Tsunami Vertical Evacuation Buildings. Lessons for International Preparedness Following the 2011 Great East Japan Tsunami. *Journal of Disaster Research*, 7, 446-457.
- Fritz, H., Petroff, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., Wincker, P., Kalligeris, N., y otros. (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*.
- Fujii, Y., & Satake, K. (2012). Slip Distribution and Seismic Moment of the 2010 and 1960 Chilean Earthquakes Inferred from Tsunami Waveforms and Coastal Geodetic Data. *Pure and Applied Geophysics*, 170, 1493-1509.
- Giesecke, A. e. (2004). The CERESIS earthquake catalogue and database of the Andean Region: background, characteristics and examples of use. *ANNALS OF GEOPHYSICS, VOL. 47*, 421-435.
- Gobierno Regional de Valparaíso. (19 de Diciembre de 2014). *Gobierno Regional de Valparaíso*. Obtenido de <http://www.gorevalparaiso.cl/region.php>
- Goldfinger, C., Ikeda, Y., Yeats, R., & Ren, J. (2013). Superquakes and Supercycles. *Seismological Research Letters*, 1-9.
- Graham, M. (1824). Diario de su residencia en Chile (1822) y de su viaje a Brasil (1823). En M. Graham, *Diario de su residencia en Chile (1822) y de su viaje a Brasil (1823)* (págs. 376-383). Madrid: América.
- Gusiakov, V. (2005). Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific. *Marine Geology*, 215, 3-9.

- Gutierrez, D. (2005). Numerical simulation for tsunami inundation maps in Chile. *Tsunami Hazard Mitigation and Risk Assessment Workshop*. Santiago.
- Holmes, A., & Holmes, D. (1987). Geología física. En A. Holmes, & D. Holmes, *Geología física* (M. Domingo de Miró, Trad., Tercera ed., págs. 714-720). Londres: Omega.
- Imamura, F., & Anawat, S. (Marzo de 2012). Damage due to the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami and it's lessons for future mitigation. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, 21-30.
- Instituto Nacional de Estadística . (2012). *Reportes Estadísticos Comunes 2012. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <http://reportescomunales.bcn.cl/2012/index.php/Valpara%C3%ADso/Poblaci%C3%Bn>
- INE. (2015). *INE*. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/estadisticas\\_economicas/turismo/series\\_mensuales\\_2015.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/turismo/series_mensuales_2015.php)
- Jacobs, H. (1967). To count a crowd. *Columbia Journalism Review*.6, 36-40
- Kobayashi, T., Mikio, T., Takuya, N., Akira, S., Noguchi, Y., & Yamanaka, M. (2011). Crustal deformation map for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, detected by inSAR analysis combined with GEONET data. *Earth Planet Space*, 63, 621-625.
- Koshimura, S., Namegaya, Y., & Yanagisawa, H. (2009). Tsunami Fragility- A New Measure to Identify Tsunami Damage. *Journal of Disaster Research*, 4(6), 479-488.
- Lagos, M. (2000). Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 93-102.
- Lagos, M., & Cisternas, M. (2004). Depósitos de Tsunami como indicadores de riesgo: evidencias sedimentarias. *Terra Australis*, 329-351.
- Lagos, M., & Cisternas, M. (2008). El nuevo riesgo de tsunami: considerando el peor escenario. *Diez años de cambios en el Mundo, en la Geografía y en las Ciencias Sociales, 1999-2008*. Barcelona.
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. (Julio de 2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology*, 37(2), 455-472.
- Liu, P. (2005). Tsunami Simulations and Numerical Models. *The Bridge. National Academy of Engineering*, 35(2), 14-20.
- Lockridge, P. (1985). *Tsunamis in Chile- Perú*. Colorado.
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 12.

- Lorca, E., & Recabarren, M. (1994). *Terremotos y Tsunamis o Maremotos. Santiago de Chile: Comisión Oceanográfica Intergubernamental, Centro Internacional de Informaciones*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*(10), 221-258.
- Madariaga, R., Métois, M., Vigny, C., & Campos, J. (2010). Central Chile Finally Breaks. *Science*, 328, 181-182.
- Mas, E., Koshimura, S., Suppasri, A., Matsuoka, M., Matsuyama, M., Yoshii, T., y otros. (2012). Developing Tsunami fragility curves using remote sensing and survey data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 2689-2697.
- McCaffrey, R. (2007). The Next Great Earthquake. *Science*, 1675-1676.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2013). *Diseño estructural para edificaciones en área de riesgo de inundación por tsunami o seiche*. Santiago.
- Miraglia, M., Flores, A., Rivalora y Benitez, M., D'Liberis, M., Galván, L., Natale, D., y otros. (2010). *Manual de Cartografía, Teleobservación y Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires: Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Montessus de Ballore, F. (1916). *Historia Sísmica de Los Andes Meridionales al Sur del paralelo XVI*. Santiago: Imprenta Universitaria.
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., & Yanagisawa, H. (2011). Survey of the 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation run-up. *Geophysical Research Letters*, 38, L00G14.
- Muhari, A., Imamura, F., & Koshimura, S. (2014). Tsunami Deck: A New Concept of Tsunami Vertical Evacuation System. En Y. Kontar, V. Santiago-Fandiño, & T. T., *Tsunami Events and Lessons Learned* (Vol. 35, págs. 335-345). Springer.
- NGDC. (2014). *National Geophysical Data Center*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2014, de [http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?bt\\_0=&st\\_0=&type\\_17=EXACT&query\\_17=160&op\\_12=eq&v\\_12=CHILE&type\\_12=Or&query\\_14=None+Selected&type\\_3=Like&query\\_3=&st\\_1=&bt\\_2=&st\\_2=&bt\\_1=&bt\\_4=&st\\_4=&bt\\_5=&st\\_5=&bt\\_6=&st\\_6=&bt\\_7=&st\\_7=&bt\\_8=&st\\_8=&bt\\_9=&st\\_9=](http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?bt_0=&st_0=&type_17=EXACT&query_17=160&op_12=eq&v_12=CHILE&type_12=Or&query_14=None+Selected&type_3=Like&query_3=&st_1=&bt_2=&st_2=&bt_1=&bt_4=&st_4=&bt_5=&st_5=&bt_6=&st_6=&bt_7=&st_7=&bt_8=&st_8=&bt_9=&st_9=)
- ONEMI. (2014). *Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior y Seguridad Pública*. Recuperado el 1 de Octubre de 2014, de <http://www.onemi.cl/wp-content/uploads/2013/09/VALPO1.pdf>
- ONEMI. (2014). *Onemi. Ministerio del Interior y Seguridad Pública*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2014, de <http://www.onemi.cl/presentacion/>
- ONEMI. (23 de Enero de 2015). *ONEMI, Ministerio del Interior y Seguridad Pública*. Obtenido de <http://siac.onemi.gov.cl/documentos/Mercalli06.pdf>

- Pararas-Carayannis, G. (2010). The earthquake and tsunami of 27 february 2010 in Chile- Evaluation of Source Mechanism and of Near and Far-field Tsunami Effects. *Science of Tsunami Hazards*, 29(2), 96-125.
- Park, S., Van de Lindt, J., & Gupta, R. (2012). Method to determine the locations of tsunami vertical evacuation shelters. *Natural Hazards*, 63, 891-908.
- PNUD. (2012). *Guía Participativa de Orientaciones de Respuesta frente a Emergencias de Terremoto-Tsunami a partir de la Experiencia de Talcahuano, Chile*. Santiago: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- PNUD, P. d. (2012). *Análisis de Riesgo de Desastres en Chile*.
- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2011). *Plan de recuperación post desastre con enfoque de gestión de riesgo y participación ciudadana. Comuna de Curepto, Región del Maule- Chile*. Santiago.
- PTWC. (Noviembre de 2009). *Pacific Tsunami Warning Center*. Recuperado el 2 de Agosto de 2015, de <http://ptwc.weather.gov/ptwc/responsibilities.php>
- Quiroz, M., Aránguiz, R., & Belmonte, A. (2014). Peligro de Tsunami en Chile Central: Modelo de ruptura del evento de 1730. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, (págs. 1-10). Santiago.
- Reese, S., Cousins, W., Power, W., Palmer, N., Tejakusuma, I., & Nugrahadi, S. (2007). Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java- field observations after the July 2006 Java tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 573-589.
- Reyes, M. (2013). *A Proposal of Tsunami Risk Assessment Method for Iquique City*. Tokyo.
- Sánchez, A., & Jiménez, C. (2011). *Valparaíso: la ciudad-puerto más importante de Chile y la vulnerabilidad de su patrimonio arquitectónico a los riesgos sísmicos*. Estudios Geográficos.
- Satake, K. (2014). Advances in earthquakes and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian ocean tsunami. *Geoscience Letters*, 1-15.
- Satake, K., & Atwater, B. (2007). Long-Term Perspectives on Giant Earthquakes and Tsunamis at Subduction Zones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 349-374.
- Satake, K., Rabinovich, A., Dominey- Howes, D., & Borrero, J. (2013). Introduction to "Historical and Recent Catastrophic Tsunamis in the World: Volume I. The 2011 Tohoku Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 170, 955-961.
- SERNATUR. (Agosto de 25 de 2014). *Academia Capacitación Municipal y Comunal. Subdere*. Recuperado el 2014, de <http://www.academia.subdere.gov.cl/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=256>

- SHOA. (2010). *Servicio Nacional de Alarma de Maremotos*. Recuperado el 14 de Mayo de 2014, de <http://www.snamchile.cl/>
- SHOA. (2012). *Informe elaboración Carta de Inundación por Tsunami (CITSU) Valparaíso-Viña del Mar 2da Edición*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- SHOA. (2014). *Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM)*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2014, de <http://www.snamchile.cl/>
- Sobarzo, C. (2011). *Esri Chile*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2014, de <http://www.usuarios.cl/presentaciones/Shoa.pdf>
- Strabler, A., & Strabler, A. (2005). Geografía física. En A. Strabler, & S. Alan, *Geografía física* (Tercera ed., págs. 230-264). Chicago: Omega.
- SUBDERE, S. d. (2011). *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*. Santiago.
- Superintendencia de Valores y Seguros SVS. (s.f.). *Terremoto 2010. Análisis e Impacto del 27- F en el Mercado Asegurador*. Santiago.
- Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutani, Y., y otros. (2013). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, 66, 319-341.
- Synolakis, C., Okal, E., & Bernard, E. (2005). The Megatsunami of December 26, 2004. *The Bridge. National Academy of Engineering*, 35(2), 26-35.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física. En E. Tarback, & F. Lutgens, *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física* (págs. 51-54). Madrid.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física. En E. Tarback, & F. Lutgens, *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física* (Octava ed., págs. 290-300). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Tomita, T., Arikawa, T., Takagawa, T., Honda, K. C., & Sase, K. (2016). Results of Post-Field Survey on the Mw 8.3 Illapel Earthquake Tsunami in 2015. *Coastal Engineering Journal*, 58(2), 17.
- Udías, A., Madariaga, R., & Buforn, E. (Agosto de 2012). The Large Chilean Historical Earthquakes of 1647,1657,1730 and 1751 from Contemporary Documents. *Bulletin of Seismological Society of America*, 102(4), 1639-1653.
- UNESCO. (2008). *Comisión Oceanográfica Intergubernamental. Preparación para casos de tsunami - Guía informativa para los planificadores especializados en medidas de contingencia ante catástrofes. Manuales y guías de la COI N°49*. Francia: UNESCO.

- USGS. (Octubre de 2013). *United State Geological Survey*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2014, de <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/byyear.php>
- USGS. (2015). *United States Geological Survey*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/beachball.php>
- USGS. (23 de Septiembre de 2015). *USGS*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2015, de [http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Coquimbo Educational Slides.pdf](http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Coquimbo_Educational_Slides.pdf)
- USGS, U. G. (2009). *Sobreviviendo a un tsunami:lecciones de Chile, Hawai y Japón*. Virginia.
- Valparaíso, I. M. (2014). *Ilustre Municipalidad de Valparaíso Transparencia municipal*. Obtenido de [http://www.munivalpo.cl/transparencia/archivos/plan\\_desarrollo\\_comunal/PLADEC O.pdf](http://www.munivalpo.cl/transparencia/archivos/plan_desarrollo_comunal/PLADEC O.pdf)
- Vega, S. (Noviembre de 2014). Estudio del uso de registros compatibilizados con los espectros de respuesta para la generación de curvas de fragilidad (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile. Santiago, Santiago, Chile.
- Yeck, W., Herman, M., Nealy, J., Hayes, G., Barnhart, B., Smoczyk, G., y otros. (2015). *The Mw 8.3 September 16, 2015 Coquimbo, Chile Earthquake and Associated Aftershock Sequence: Earthquake Educational Slides*. USA.

## **10 ANEXO A TERREMOTOS Y TECTÓNICA DE PLACAS**

### **10.1 TERREMOTOS**

Los terremotos se originan a raíz las vibraciones elásticas generadas como consecuencia de una súbita liberación de energía provocada por el deslizamiento de una porción de corteza terrestre a lo largo de un plano de falla, generalmente por falla normal o de desgarre (Strabler & Strabler, 2005; Tarbuck & Lutgens, 2005). El punto de origen de la liberación de energía a través de ondas sísmicas irradiadas en varias direcciones, se denomina foco o hipocentro. Los terremotos constituyen una de las fuerzas naturales más destructivas del planeta, los daños estructurales en edificaciones y sectores poblados combinados con el fenómeno de licuefacción de los suelos, resultan ser un desafío para la ingeniería moderna (Tarbuck & Lutgens, 2005).

El mecanismo de generación de terremoto consiste en la acumulación de energía elástica entre placas tectónicas. A medida que la litósfera se deforma, la energía comienza a almacenarse hasta que el esfuerzo de fricción es mayor en una placas por sobre la otra, originando la falla en el punto más débil (hipocentro) que posteriormente se propaga por el largo de la falla. El rebote elástico de las placas permite que vuelvan a su posición inicial (Tarbuck & Lutgens, 2005).

#### **10.1.1 ONDAS SÍSMICAS**

Al momento de producirse el deslizamiento entre placas, la liberación de energía elástica se propaga en múltiples direcciones en forma de ondas sísmicas. Dichas ondas pueden ser superficiales o de cuerpo (Tarbuck & Lutgens, 2005).

##### **10.1.1.1 ONDAS DE CUERPO**

Este tipo de ondas llamadas ondas de cuerpo, se propagan por el interior de la tierra y existen dos tipos; la onda primaria (P) y la onda secundaria (S).

La onda P desplaza las partículas en la misma dirección de propagación de la falla, provocando movimientos de compresión y expansión de los materiales por los que viaja (Figura 72 P), ya sean líquidos, sólidos o gases, produciendo cambios en el volumen de estos. La velocidad de propagación de las ondas primarias en los materiales sólidos es hasta 1.7 veces mayor que las ondas S. La velocidad varía según la densidad y las propiedades elásticas de la roca (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La onda S desplaza las partículas en sentido perpendicular a la propagación de la onda (Figura 72 S), su velocidad es menor a las ondas P. En los materiales por los que viaja produce cambios en la forma, es por esto que no se propaga en líquidos ni en gases pues no permiten cambios elásticos. Las amplitudes de las ondas S son ligeramente mayores a las de las ondas P (Tarbuck & Lutgens, 2005).

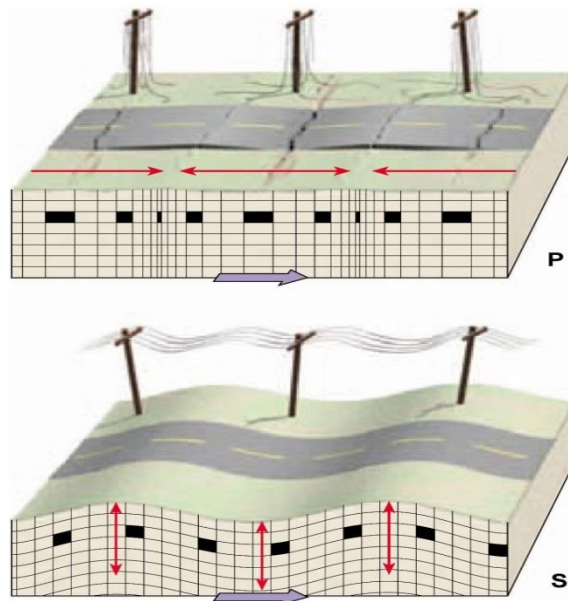


Figura 72 Ondas de cuerpo P y S (Tarbuck & Lutgens, 2005).

#### 10.1.1.2 ONDAS SUPERFICIALES

Las ondas superficiales son aquellas que viajan a través de la superficie de la tierra y existen dos tipos de ondas. Si el movimiento de las partículas describe una trayectoria elíptica retrógrada (ascendente-descendente, Figura 73 A) se denominan Rayleigh, si el movimiento es lateral (Figura 73 B) son ondas Love.

Debido al movimiento lateral de las ondas Love ocurren los mayores daños en estructuras, en especial en las fundaciones. La velocidad de propagación de las ondas superficiales se estima en un 90% de la velocidad de la onda S (Tarbuck & Lutgens, 2005).

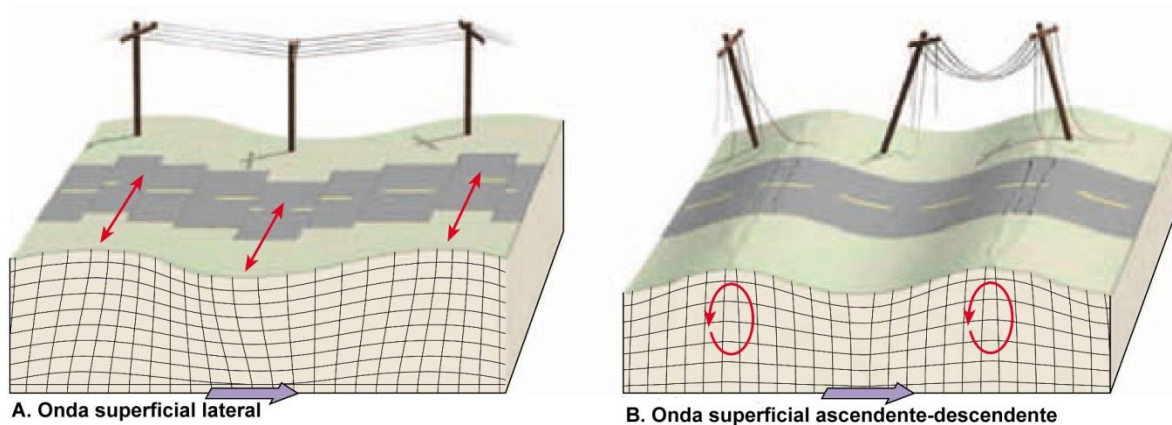


Figura 73 Ondas de superficie. Adaptado de Tarbuck & Lutgens (2005).

Las ondas superficiales poseen amplitudes mayores a las ondas de cuerpo, lo que explica su mayor poder de destrucción. La amplitud máxima se conserva por un mayor lapso de tiempo, ya que están restringidas a viajar solamente por la superficie de la corteza terrestre (Tarbuck & Lutgens, 2005).

A diferencia de las ondas de cuerpo, los periodos de las ondas superficiales suelen ser más largos (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### 10.1.2 INTENSIDAD

La escala de intensidad de terremotos entrega información referente a los daños producidos en edificaciones, percepción de la población, deslizamientos de laderas, grietas en el terreno, entre otros aspectos. Esta información es muy valiosa para los sismólogos, especialmente en aquellas áreas en las que no existen sismógrafos. A pesar de ello, la escala posee inconvenientes pues es subjetiva, los factores que mide dependen no sólo de la magnitud del terremoto, lo que puede generar ambigüedades al momento de clasificar un evento, por ejemplo, el material de construcción de las edificaciones influye en los daños producidos (CSN, 2014; Tarbuck & Lutgens, 2005).

En Chile, se utiliza la escala de Mercalli modificada. La notación se expresa en números romanos ascendentes del I al XII (Tabla 22).

Tabla 22 Escala de intensidad de Mercalli modificada.

<b>ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLI MODIFICADA</b>	
<b>Menor Intensidad</b>	
I	No se siente. Algunas personas lo perciben bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Se percibe sólo por personas en reposo, en especial aquellos ubicados en pisos elevados de edificios.
III	Se percibe con nitidez en los interiores, especialmente en pisos elevados de edificios. Pocas personas lo reconocen como terremoto.
IV	Durante el día se percibe en el interior de edificios por muchas personas, en el exterior no muchas perciben el movimiento. La sensación es similar a la del paso de un camión pesado.
<b>Mediana Intensidad</b>	
V	Se percibe por casi todo el mundo, muchas personas se despiertan. En ocasiones se observan cambios en árboles, postes y otros objetos altos. Los líquidos almacenados en recipientes oscilan e inclusive se derraman.
VI	Se percibe por todos. Se siente inseguridad al caminar. Se quiebran vidrios de ventanas y objetos frágiles. Algunos muebles pesados se desplazan y vuelcan. Se producen grietas en estucos y se hace visible el movimiento de árboles.
<b>Mayor Intensidad</b>	
VII	Dificultad para mantenerse en pie. Daño en estructuras de albañilería mal construidas. Caen al suelo cornisas, estucos, ladrillos y otros elementos arquitectónicos.
VIII	Daño considerable y derrumbes parciales en estructuras de albañilería bien construidas. Se hace inseguro y peligroso la conducción de vehículos. Caen chimeneas, monumentos, columnas, estanques y torres elevadas. Casas de madera desplazadas y desprendidas de su base.
IX	Pánico generalizado en la población. Daño en estructuras de albañilería bien construidas, derrumbe total en algunas ocasiones. Estructuras de madera removidas de sus cimientos. Cañerías subterráneas rotas.
X	La mayoría de las estructuras de albañilería se destruyen. Estructuras de madera bien construida e incluso puentes se destruyen. Deformaciones en rieles de ferrocarriles. Grandes daños en represas, malecones y diques.
XI	Sólo algunas estructuras de albañilería quedan en pie. Rieles de ferrocarriles fuertemente deformados. Cañerías fuera de servicio.
XII	Daño total. Se visualizan ondas en el terreno. Los objetos son lanzados al aire. Niveles y perspectivas distorsionadas. Se desplazan grandes masas de rocas.

Fuente: Adaptada de Tarbuck & Lutgens (2005) y ONEMI (2015).

### 10.1.3 MAGNITUD

La magnitud de un terremoto mide la cantidad de energía liberada en forma de ondas sísmicas. La escala más utilizada es la de Richter, se basa en la amplitud máxima de la onda sísmica registrada en los instrumentos y puede ser una onda superficial, P o S. Utiliza una escala logarítmica de base 10 lo que explica la diferencia entre la energía liberada por un terremoto de magnitud 5.5 y uno de 6.5 (32 veces mayor).

La escala de Richter original ( $M_L$ ) fue modificada por varios autores para poder extender la medición a terremotos generados a cualquier distancia y a focos más profundos (Tarbuck & Lutgens, 2005).

$$M_L = \log A - \log A_0$$

Donde:

A: Amplitud del movimiento del suelo.

$A_0$ : Valor estándar.

La magnitud de onda superficial ( $M_s$ ) mide la amplitud máxima de la onda superficial con periodos de 20 segundos, se utiliza para medir la energía liberada por un terremoto de foco superficial (Tarbuck & Lutgens, 2005).

$$M_s = \log \frac{A}{T} + 1.66 \log D + 3.3$$

Donde:

D: Distancia foco-estación.

A: Amplitud del movimiento del suelo.

T: Periodo de la onda considerada.

Para poder medir la magnitud de terremotos con foco profundo alejados del punto de medición, se creó la magnitud de onda de cuerpo ( $M_b$ ).

$$M_b = \log \left( \frac{A}{T} \right) + Q(D, h)$$

Donde:

D: Distancia foco-estación.

A: Amplitud del movimiento del suelo.

T: Periodo de la onda considerada.

Q (D, h): Función entre distancia y profundidad.

h: Profundidad.

La onda de cuerpo viaja por el interior de la corteza terrestre y se presenta como ondas P y ondas S. La onda primaria P viaja 1.7 veces más rápido que la onda secundaria S, esto se debe a que viaja a través de material sólido, líquido y gaseoso. La onda S, por el contrario, viaja solamente a través de sólidos, esto permite que la amplitud se conserve en la superficie del interior de la tierra por más tiempo, motivo por el que son más destructivas. La onda P induce esfuerzos de compresión y tensión en el material rocoso según dirección de desplazamiento. La onda S produce un movimiento perpendicular

según dirección de desplazamiento de las ondas (Tarbuck & Lutgens, Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física, 2005).

Para medir el tamaño de terremotos grandes se creó la escala de magnitud de momento ( $M_w$ ). Esta escala representa de manera más precisa la energía liberada por un terremoto grande, ya que mide parámetros involucrados en la generación. Entre ellos se encuentra, desplazamiento medio a lo largo de la falla, área de ruptura y resistencia de corte de la roca fallada. La consideración de estos parámetros permitió eliminar la saturación de datos que las escalas existentes presentaban.

$$M_w = \left( \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \right)$$

$$M_0 = \mu * A * u$$

Donde:

$M_0$ : Momento sísmico escalar, representa la energía liberada por un terremoto.

$\mu$ : Módulo de deformación de las rocas.

A: Área de ruptura a lo largo de la falla.

U: Desplazamiento promedio del área.

#### 10.1.4 SOLUCIÓN DEL MECANISMO FOCAL

La Solución del Mecanismo Focal (SMF) entrega un análisis de las ondas generadas por un terremoto a través de la inversión del tensor de momento. La representación gráfica se realiza a través de una proyección estereográfica conocida como pelotas de playas o beach balls (USGS, 2015). Tal como se aprecia en Figura 74 cada diagrama posee un cuadrante de color blanco y negro, dichos colores indican el estado tensional de la placa, es decir si se contrajo o expandió (Cronin, 2004). Las que se encuentren en compresión se indican en color blanco (P) y en negro las porciones que hayan sufrido tensiones (T) (Figura 74).

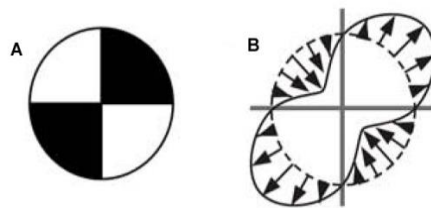


Figura 74 Estados tensionales diagrama de pelota de playa (Cronin, 2004).

Los diagramas de pelota de playa entregan información valiosa sobre la generación de un terremoto, ya que permiten obtener el hipocentro, tiempo de origen, profundidad focal, magnitud y orientación de las componentes del tensor de momento y el momento sísmico. La red sismológica debe ser lo suficientemente robusta para poder obtener la SMF, al menos deben existir diez sismógrafos en el área cercana al foco para obtener los parámetros sísmicos necesarios para determinar la geometría del plano de falla (Cronin,

2004). En Figura 75A, las estaciones sismográficas y el registro de la llegada de las ondas P para cada estación. En Figura 75B los planos nodales perpendiculares entre sí para cada estado tensional en que los círculos de color negro representan la llegada de ondas de tensión y los círculos blancos la llegada de ondas de compresión, las cruces representan aquellas estaciones que recibieron señales muy débiles. Finalmente, en Figura 75C, el diagrama de pelota de playa resuelto.

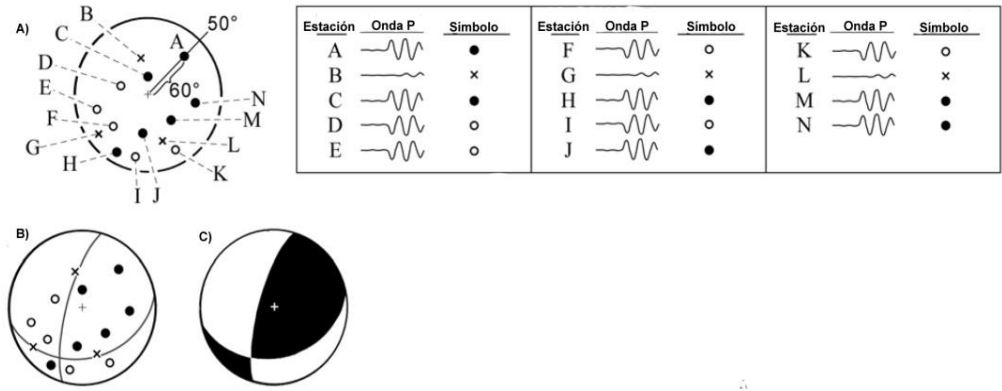


Figura 75 Representación gráfica estaciones sismográficas y planos nodales (Cronin, 2004).

El plano de falla de un terremoto entrega la dirección de los deslizamientos producidos entre las porciones de placas que han dado origen a la falla (Figura 76). De esta manera, los deslizamientos dan origen a tres ángulos: rumbo (strike), buzamiento o manteo (dip) y deslizamiento (slip) (CSN, 2015). El rumbo viene dado por el ángulo comprendido entre el norte geográfico y el plano horizontal que pasa por la falla, medido en sentido horario (0-360°). El manteo forma un ángulo recto con el rumbo, viene dado por la inclinación que se produce entre el plano horizontal y la línea que pasa por la falla, dicho ángulo se mide hacia abajo en sentido horario (0-90°) (Tarbuck & Lutgens, 2005). Para determinar el deslizamiento se considera el bloque superior e inferior de la falla, asimismo el deslizamiento es el resultado entre el bloque superior y el rumbo, dicho ángulo se mide en sentido antihorario (0-360°).

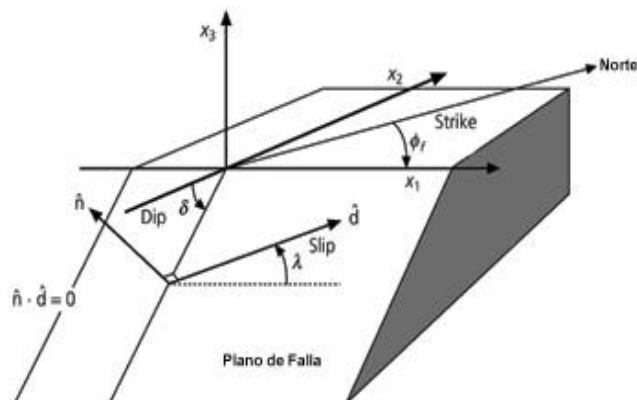


Figura 76 Ángulos de deslizamientos plano de falla (CSN, 2015)

Dependiendo de la dirección de los deslizamientos ocurridos en el plano de falla existen diferentes tipos de fallas: normal, inversa, oblicua o transformante (CSN, 2015).

La falla normal (Figura 77A) se produce por tracción y provoca desplazamientos verticales con un ángulo de manteo de aproximadamente  $60^\circ$ . La porción de roca situada en la parte superior de la línea de falla desciende respecto a la que se encuentra debajo de ella (Tarbuck & Lutgens, 2005; CSN, 2015). El diagrama de pelota de playa para este tipo de falla se muestra en Figura 77B. Por lo general los terremotos intraplaca son generados por este tipo de fallas.

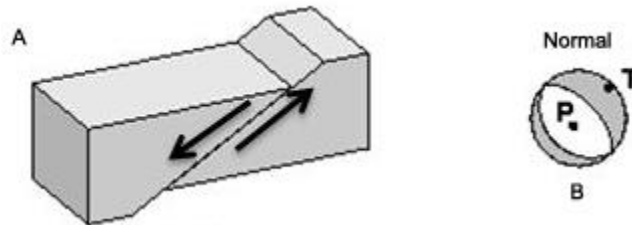


Figura 77 Plano de falla normal y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015)

La falla inversa (thrust) se produce por la acumulación de fuerzas de compresión que generan un desplazamiento vertical en que la roca situada por sobre el plano de falla asciende respecto a la roca inferior con ángulos de manteo superiores a  $45^\circ$  (Figura 78A). Si el ángulo de manteo es menor a  $45^\circ$  se llama cabalgamiento (Tarbuck & Lutgens, 2005). Usualmente los terremotos de subducción se generan por fallas inversas. Cabe destacar que tanto las fallas inversas como normales producen deslizamientos puros en el manteo.

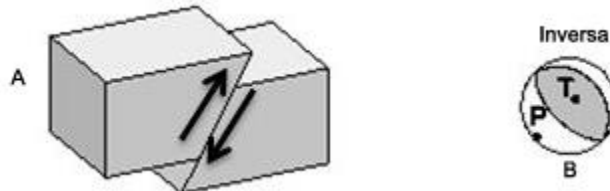


Figura 78 Plano de falla inverso y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015)

La falla transformante (strike-slip) se produce predominantemente por desplazamientos horizontales (Figura 79A), aunque posee una ligera componente vertical. Si el movimiento lateral es hacia la derecha es del tipo dextral. Si el movimiento es hacia la izquierda se denomina sinistral (Cronin, 2004).

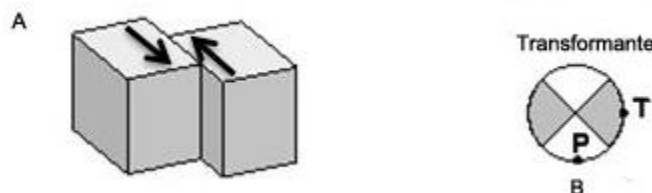


Figura 79 Plano de falla transformante y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015)

La falla oblicua posee deslizamientos tanto en el manto como en el rumbo, puede ser normal o inversa (Cronin, 2004). En Figura 80 el plano de falla y diagrama de pelota de playa para una falla oblicua inversa. En este tipo de falla, contrario a lo que ocurre con las fallas normales, inversas y transformantes, es posible observar los cuatro cuadrantes en el diagrama de pelota de playa.

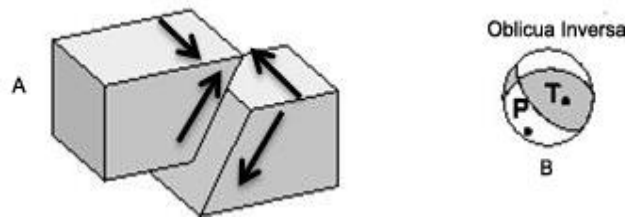


Figura 80 Plano de falla oblicuo inverso y diagrama de pelota de playa (USGS, 2015).

## 10.2TECTÓNICA DE PLACAS

El estudio de la tectónica de placas presentó particular interés científico en la década del 60 tras producirse grandes terremotos alrededor del mundo, como el de Alaska (1961), Chile (1960) y Kamkatcha (1962). El mundo científico después de años de discutir la validez de la teoría de la deriva continental postulada por el científico alemán Wegener entre 1880 y 1930, llegó a consenso y a partir de 1964 el enfoque cambió. Este hecho se produjo por la mayor cantidad de información disponible sobre datos magnéticos del fondo oceánico, lo que permitió explicar el motivo del movimiento de placas asociado a las corrientes de convección térmica del manto terrestre. Este auge en la investigación de la dinámica litosférica permitió que el estudio de la tectónica de placas pasara a ser una disciplina relevante para los países expuestos a desastres naturales como grandes terremotos y erupciones volcánicas, en especial aquellos que se encuentran en los bordes de placas convergentes de las costas del pacífico (Holmes & Holmes, 1987).

La teoría de la deriva continental establece que hace más de 200 millones de años la Pangea se separó en varias partes más pequeñas dando origen a los continentes que hoy se conocen. Para sustentar estos postulados, Wegener utilizó la semejanza entre fósiles, estructuras rocosas y paleoclima existentes en Sudamérica y África. A pesar de ello, no fue suficiente para explicar la separación del supercontinente, es por este motivo que no se aceptó como válida esta teoría hasta que en 1968 se combinó evidencia paleomagnética, que sí fue capaz de explicar la idea de la expansión del fondo oceánico (constantemente se crea nueva corteza oceánica), con la teoría de la deriva continental, dando origen a la teoría de la tectónica de placas (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Se denominan placas tectónicas (Figura 81) a las diversas porciones de litósfera terrestre existentes en la tierra. Cada una de ellas posee movimientos relativos y están condicionadas a diferentes tipos de actividad sísmica y vulcanológica, dependiendo del tipo de borde que posean unas con otras. Dichos movimientos entre placas se debe a las corrientes de convección interna de la tierra, ya que el material a mayor temperatura situado en las profundidades de la tierra comienza a ascender lentamente, lo que provoca desplazamientos lentos y continuos en la litósfera terrestre (Tarbuck & Lutgens, 2005).

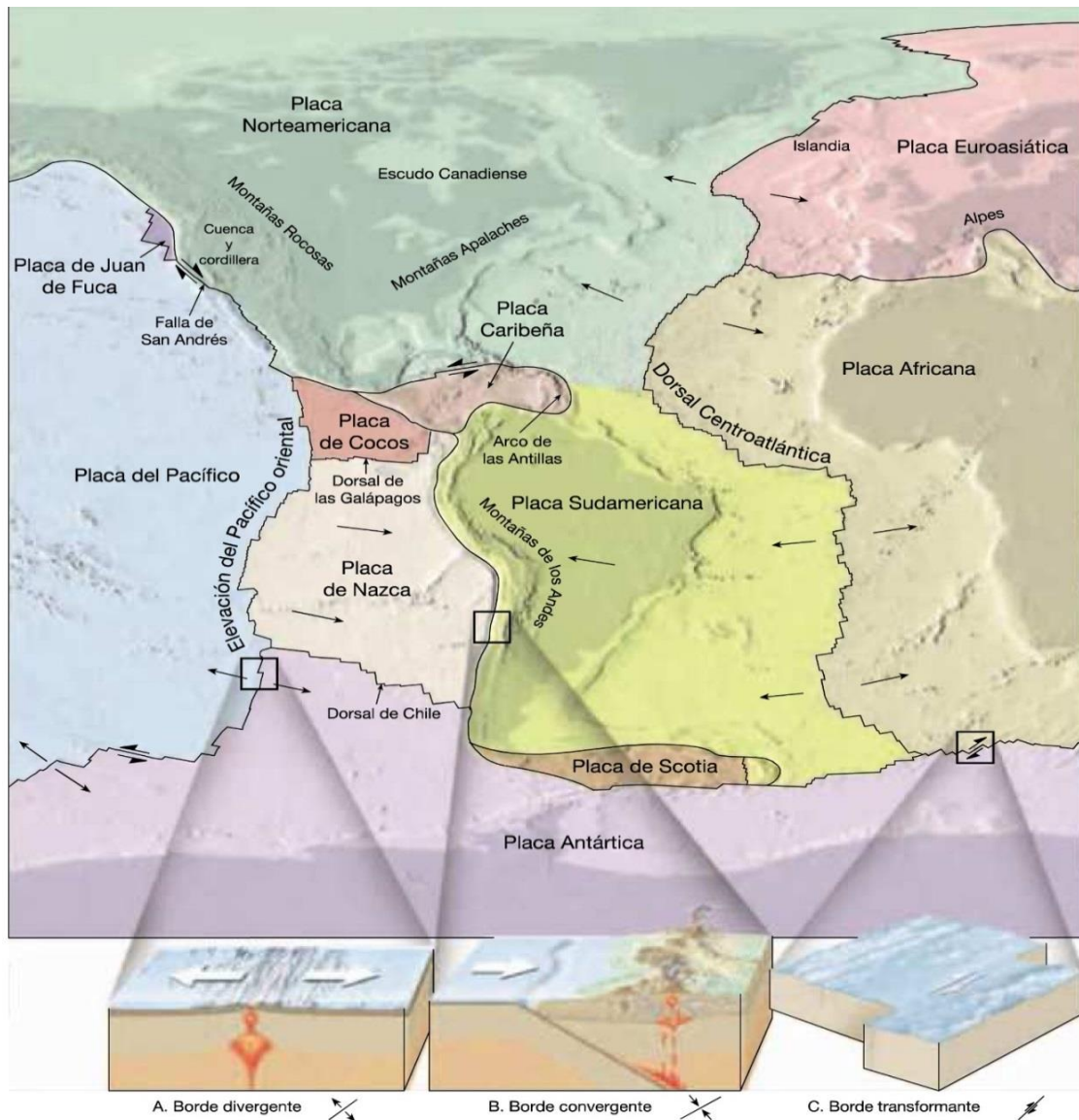


Figura 81 Placas y bordes tectónicos (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Las placas principales de mayor tamaño son seis; Placa del Pacífico, Americana (Norte y Sur), Africana, Euroasiática, Indo-Australiana y Antártica. La mayor de éstas es la placa del Pacífico, abarca casi la totalidad de la cuenca del Océano Pacífico, su movimiento relativo es en dirección noroeste. La placa Sudamericana abarca prácticamente el continente completo (Strabler & Strabler, 2005).

Las seis placas restantes son de tamaño intermedio a pequeño, entre ellas se encuentra la placa de Nazca, Cocos, Filipina, Caribe, Árabe y Juan de Fuca (Strabler & Strabler, 2005).

### 10.2.1 BORDE DE PLACAS

Existen diferentes tipos de bordes entre placas; convergentes, divergentes o transformantes (Tarbuck & Lutgens, 2005; Holmes & Holmes, 1987; Strabler & Strabler, 2005).

Los bordes convergentes o destructivos (Figura 81B) son aquellos en los que se destruye corteza terrestre debido a la colisión entre placas. Generalmente su ubicación coincide geográficamente con fosas oceánicas que bordean grandes cadenas montañosas como la Cordillera de los Andes en Sudamérica (Strabler & Strabler, 2005). Dependiendo si la litósfera es continental u oceánica, se pueden generar cadenas montañosas y volcanes submarinos que al ascender a superficie generan arcos de islas o insulares (Figura 82).

Cuando la convergencia es entre dos placas continentales (Figura 82C) se forma una gran cadena montañosa como el Himalaya debido a que ambas litósferas son livianas por lo que su capacidad de flotación es mayor. La subducción al ser poco profunda genera una colisión entre ambas placas.

La convergencia entre dos placas oceánicas genera un arco de islas volcánicas (Figura 82B), la mayoría de ellos se localiza en las costas occidentales del pacífico. En estas zonas la actividad sísmica es menor debido al mayor ángulo de subducción entre placas ( $>90^\circ$ ).

Finalmente, la convergencia entre una placa continental y una oceánica (Figura 82A) genera subducción de la placa más densa (oceánica) dando paso a la formación de arcos volcánicos continentales como la Cordillera de Los Andes (Tarbuck & Lutgens, 2005).

En las costas del Océano Pacífico se encuentra la mayor parte de este tipo de límite de placas (Strabler & Strabler, 2005). Debido a la alta actividad volcánica, esta zona ha sido denominada "el cinturón de fuego del pacífico". La zona de contacto entre placas es mayor debido al menor ángulo de subducción entre ellas ( $<45^\circ$ ), lo que explica la intensa actividad sísmica en estos lugares, siendo capaz de producir sismos a diferentes profundidades desde someros a profundos, muchos de ellos de gran magnitud. El plano formado por los hipocentros de estos sismos es conocido como el plano de Benioff.

Este tipo de límite de placas llamado zona de subducción, se caracteriza por su alta actividad sísmica y generación de grandes terremotos. Esto se debe a que la placa más densa y de mayor edad (litósfera oceánica) se mueve en dirección a la litósfera continental menos densa, curvándose hacia abajo y hundiéndose en la astenósfera provocando una trabazón entre placas (Strabler & Strabler, 2005).

Conforme los movimientos relativos entre ellas lleguen a un umbral suficiente para que se destraben, la liberación de energía sísmica acumulada durante décadas desencadena un sismo. Dependiendo de la magnitud del sismo, ubicación del hipocentro y profundidad de foco, el potencial tsunamigénico de dichos terremotos varía.

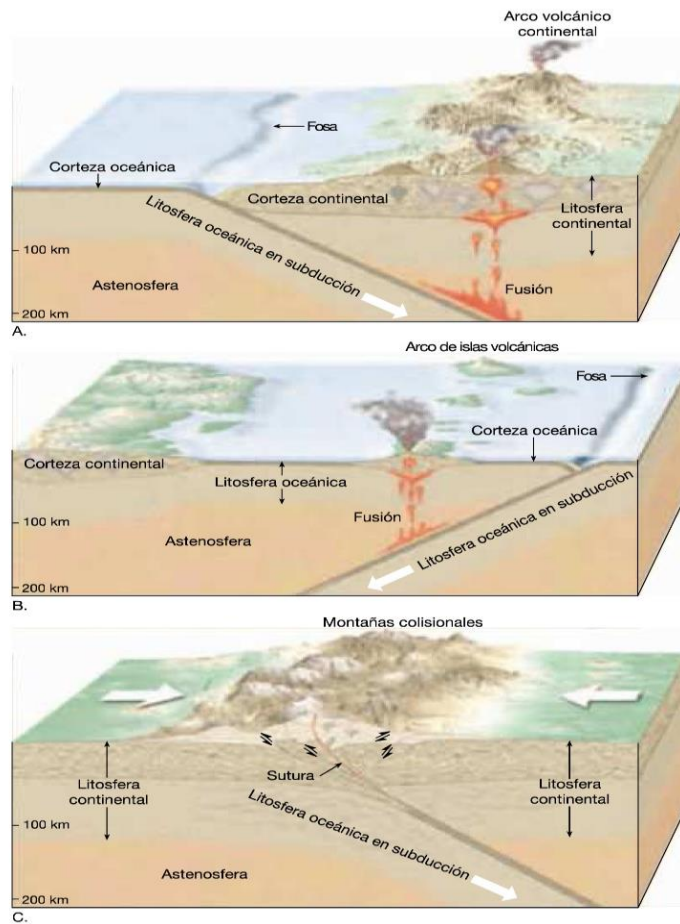


Figura 82 Tipos de zonas de subducción (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Los bordes divergentes o constructivos (Figura 81 A) se caracterizan por crear corteza oceánica y volcanismo basáltico. Se encuentran en las dorsales mesoceánicas donde se divide y aleja corteza continental. Los sismos generados en estos bordes de placas son superficiales (Holmes & Holmes, 1987; Tarbuck & Lutgens, 2005; Strabler & Strabler, 2005). La expansión del fondo oceánico se produce a medida que las placas se separan del eje de la dorsal, permitiendo que la roca fundida a altas temperaturas ascienda desde el manto terrestre. A medida que este material se enfría la roca se endurece y el espacio entre placas es ocupado por el nuevo fondo oceánico. El sistema de dorsales es la estructura topográfica más larga existente en la superficie de la tierra, abarcando el 20% de la superficie. El ancho de estos sistemas varía entre 1000 y 4000 [km] (Tarbuck & Lutgens, 2005). Los sismos generados en estos bordes de placas son superficiales.

Los bordes transformantes o pasivos (Figura 81C) son aquellos en los que no se crea ni se destruye litósfera, pues las placas se desplazan lateralmente. La mayoría de este tipo de placas se localiza en las cuencas oceánicas, se caracterizan por transportar la corteza oceánica creada en las dorsales hasta su zona de destrucción (Tarbuck & Lutgens, 2005). La actividad sísmica en este tipo de bordes varía entre moderada a fuerte, la falla de San Andrés es una de las más activas del mundo (Strabler & Strabler, 2005).

## **11 ANEXO B DATOS DE CAMPO**

Para obtener los datos de campo, el día 29 de Agosto de 2014, se realizó una campaña de terreno en las ciudades de Viña del Mar y Valparaíso con la finalidad de caracterizar cualitativamente las vías oficiales de evacuación horizontal establecidas por la ONEMI.

Para llevar a cabo esta actividad se reclutaron voluntarios de la carrera de Ingeniería Civil Oceánica, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso. La cantidad de voluntarios que participaron en la actividad fue de 20 personas, las que se dividieron en cinco grupos de cuatro personas, asignando a cada grupo una vía de evacuación horizontal. Para representar el desplazamiento de personas con movilidad reducida, en cada uno de los grupos un participante se vendó los ojos con la finalidad de incluir los tiempos de evacuación de personas no videntes. Adicionalmente, dicha persona llevaba un lazarillo que se encargaba de asistirlo durante el desarrollo del ejercicio. El tercer voluntario de cada grupo, se desplazó caminando a paso apresurado (simulando una emergencia real) durante todo el recorrido. Finalmente, la última persona de cada grupo, supervisaba la correcta realización de la actividad.

Uno de los propósitos de esta campaña de terreno fue calcular el tiempo que demora recorrer una vía de evacuación horizontal desde la línea de costa hasta los puntos de encuentro ubicados en la zona segura designada por la autoridad (ONEMI), realizando un ejercicio hipotético de evacuación en caso de tsunami. De manera complementaria, se evaluó la calidad de cada una de las vías de evacuación recorridas, para ello cada participante completó la ficha de registro que se presenta en el ANEXO C FICHA DE REGISTRO CAMPAÑA DE TERRENO.

La campaña de terreno se dividió en dos actividades que se presentan a continuación:

### **11.1 ACTIVIDAD 1: SIMULACRO DE EVACUACIÓN ANTE TSUNAMI**

- Iniciar el recorrido desde el lugar de partida simulando un escenario de emergencia, es decir a paso ágil, evitando correr y siguiendo la ruta de evacuación asignada.
- Medir el tiempo del recorrido desde el lugar de partida hasta el punto de encuentro.
- Trazar la trayectoria del recorrido de la vía de evacuación realizada, en el mapa de la ciudad de Valparaíso entregado.
- Llegar al punto de encuentro y esperar instrucciones.

### **11.2 ACTIVIDAD 2: EVALUACIÓN DE LAS VÍAS DE EVACUACIÓN ANTE TSUNAMI**

- Iniciar el recorrido de vuelta, desde el punto de encuentro hasta el lugar de inicio, por la ruta de evacuación asignada.
- Responder el cuestionario de evaluación de vías de evacuación entregado.

- Ubicar la señalética informativa de vías de evacuación de tsunami en Valparaíso, en el mapa entregado (marcar con una "X").
- Anotar observaciones respecto a la señalética.
- Llegar al punto de partida y esperar instrucciones.

## 11.3 RESULTADOS POR VÍAS DE EVACUACIÓN

### 11.3.1 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE ECUADOR

Ecuador (Figura 83) presenta susceptibilidad de bloqueo muy alta por colapso del tendido eléctrico, atochamiento de personas en temporada de verano y atochamiento de personas en horario peak. La susceptibilidad es alta para bloqueo por escombros, atochamiento vehicular, incendios y/o explosiones y atochamiento de personas por estrechamiento. El aspecto mejor evaluado es el desborde de cauces, ríos y/o esteros (nula susceptibilidad).

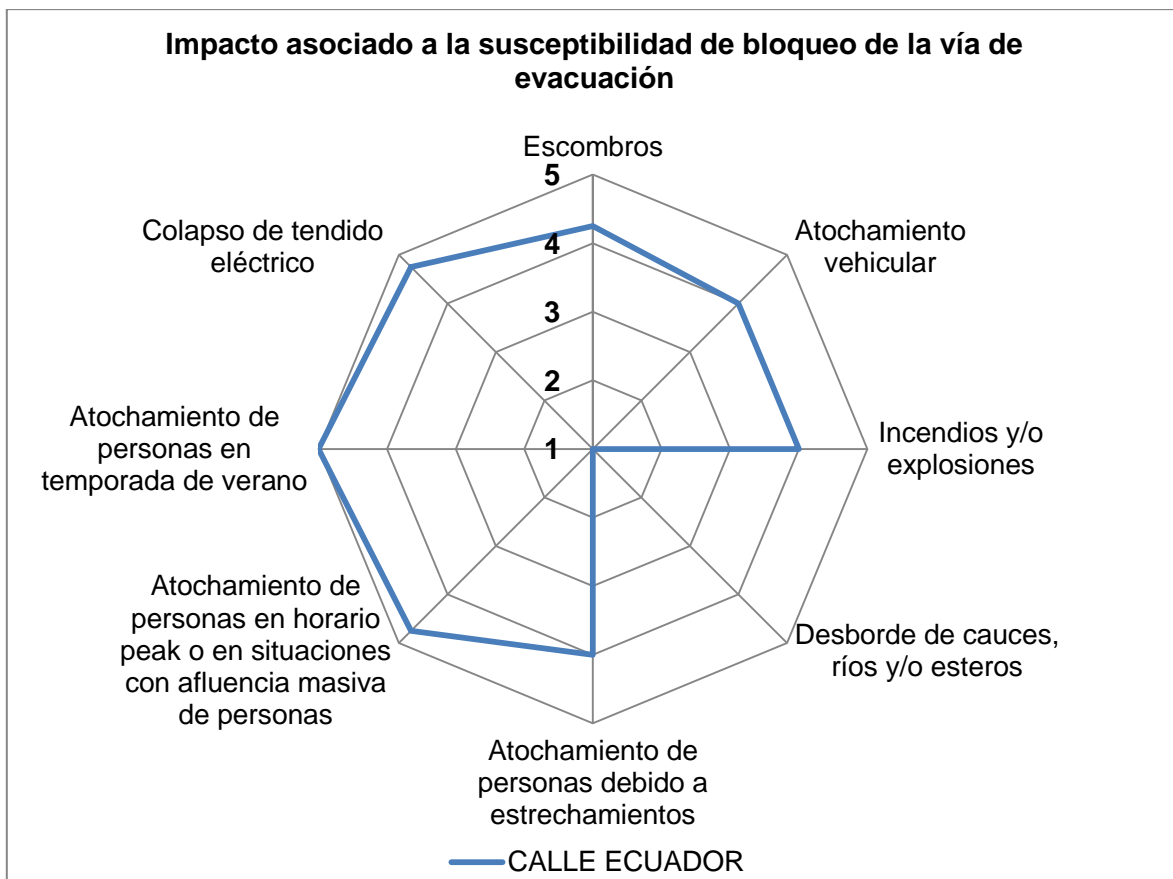


Figura 83 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Ecuador. Elaboración propia.

### 11.3.2 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE FRANCIA

Para la calle Francia (Figura 84) la susceptibilidad de bloqueo por escombros y atochamiento de personas en horario peak es muy alta. La susceptibilidad de bloqueo por atochamiento vehicular es alta. La susceptibilidad de bloqueo por incendios y/o explosiones, atochamiento de personas por estrechamientos y colapso del tendido eléctrico es media. La susceptibilidad de bloqueo por atochamiento de personas en temporada de verano es baja, mientras que el bloqueo por desborde de cauces, ríos y/o esteros arroja nula susceptibilidad.

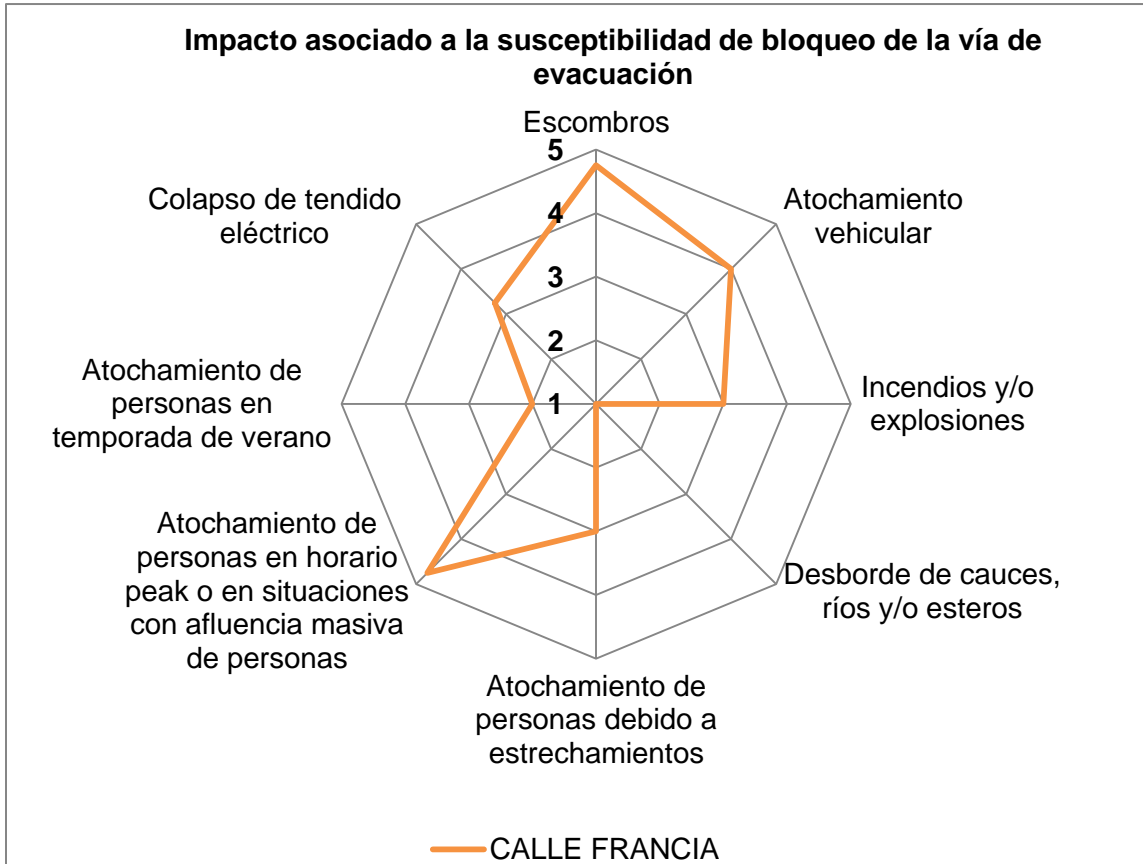


Figura 84 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Francia. Elaboración propia.

### 11.3.3 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE URUGUAY

La calle Uruguay (Figura 85) presenta muy alta susceptibilidad de bloqueo por escombros, atochamiento vehicular, atochamiento de personas debido a estrechamientos, atochamiento de personas en horario peak y colapso del tendido eléctrico. La susceptibilidad de bloqueo por incendios y/o explosiones durante el desastre es media, mientras que el bloqueo por desborde de cauces, ríos y/o esteros presenta baja susceptibilidad. Finalmente, la susceptibilidad de bloqueo por atochamiento de personas en temporada de verano es alta.

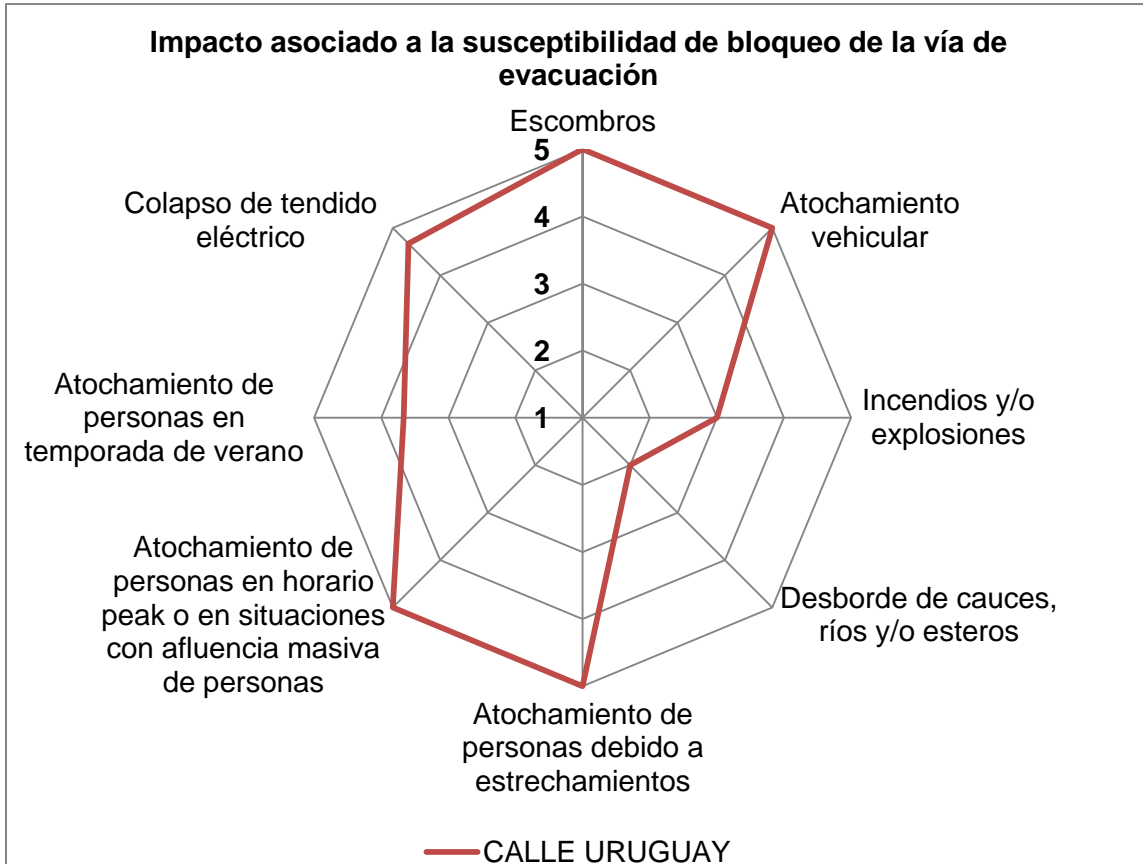


Figura 85 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Uruguay. Elaboración propia.

### 11.3.4 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE EDWARDS

La calle Edwards (Figura 86) presenta muy alta susceptibilidad de bloqueo por atochamiento vehicular, atochamiento de personas debido a estrechamiento, atochamiento de personas en horario peak y atochamiento de personas en temporada de verano. La susceptibilidad de bloqueo por escombros y colapso del tendido eléctrico es alta. El bloqueo por incendios y/o explosiones durante el desastre presenta susceptibilidad media, en tanto que la susceptibilidad de bloqueo por desborde de cauces, ríos y/o esteros es nula.

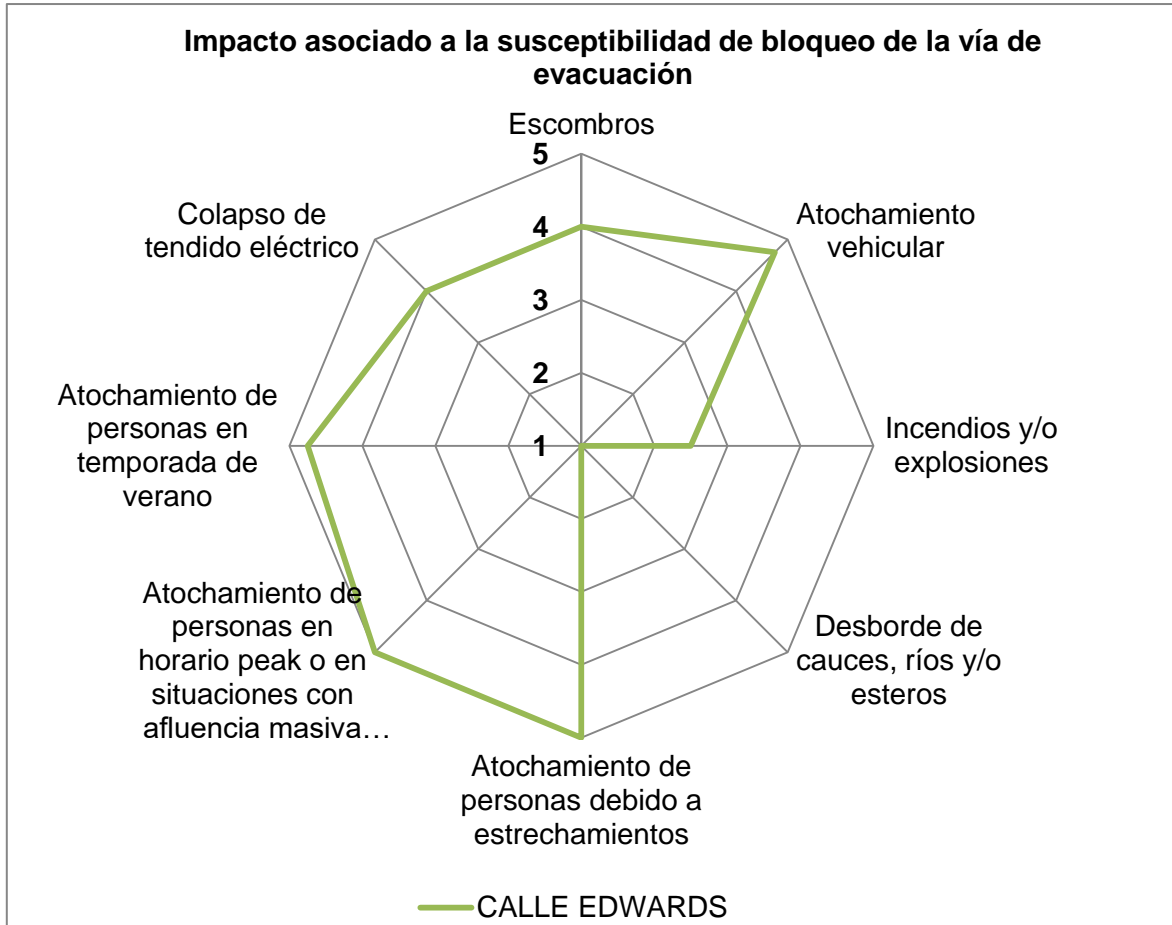


Figura 86 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Edwards. Elaboración propia.

### 11.3.5 IMPACTO POR SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO CALLE RODRÍGUEZ

La calle Rodríguez (Figura 87) presenta susceptibilidad muy alta de bloqueo por escombros, colapso del tendido eléctrico y atochamiento de personas en horario peak. La susceptibilidad de bloqueo debido a atochamiento de personas por estrechamientos, atochamiento vehicular y bloqueo por incendios y/o explosiones es alta. El bloqueo por atochamiento de personas en horario de verano posee susceptibilidad media, mientras que el desborde de cauces, río y/o esteros presenta baja susceptibilidad.

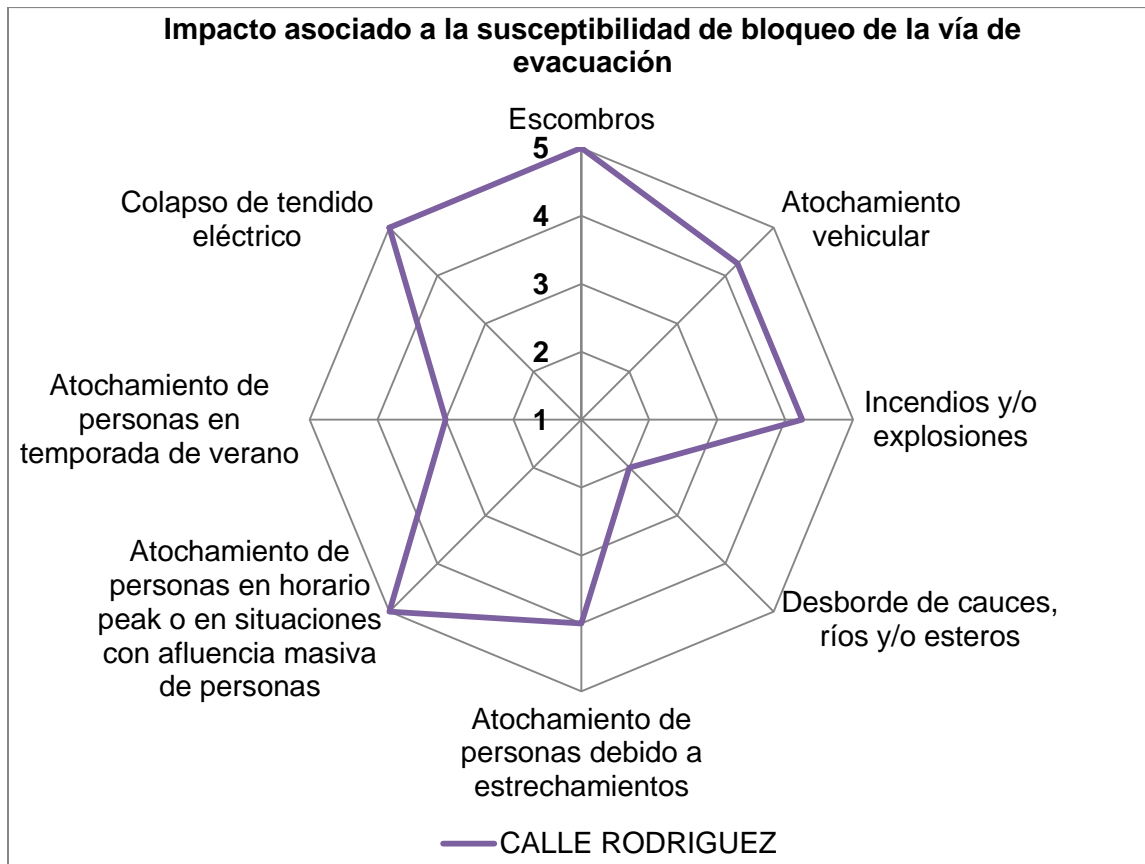


Figura 87 Impacto asociado a la susceptibilidad de bloqueo calle Rodríguez. Elaboración propia.

### 11.3.6 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE ECUADOR

Ecuador (Figura 88) posee baja confiabilidad de acuerdo a la señalética disponible durante el recorrido y para la evacuación en escenario nocturno. Respecto a la presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de personas, ancho útil de desplazamiento, pendiente y evacuación de personas con movilidad reducida, la vía se evalúa con confiabilidad media. Por otro lado, el aspecto mejor evaluado es el tiempo de desplazamiento a zona segura cuya confiabilidad es alta.

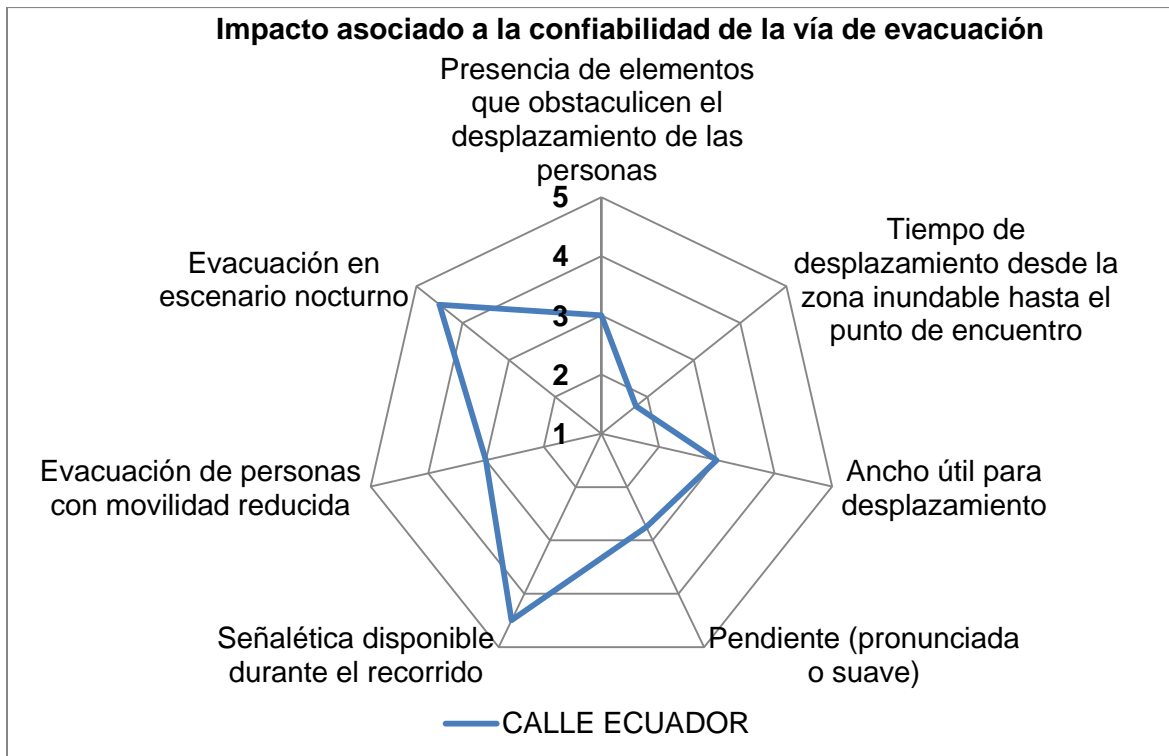


Figura 88 Impacto asociado a la confiabilidad calle Ecuador. Elaboración propia.

### 11.3.7 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE FRANCIA

La vía de evacuación Francia (Figura 89) presenta baja confiabilidad por elementos que obstaculicen el desplazamiento de personas, evacuación de personas con movilidad reducida y evacuación en escenario nocturno. La confiabilidad de evacuación por ancho útil de desplazamiento y señalética disponible durante el recorrido es media. La confiabilidad de acuerdo a la pendiente de la vía, es alta. Finalmente, el aspecto mejor evaluado es el tiempo de desplazamiento a zona segura pues resulta con muy alta confiabilidad.

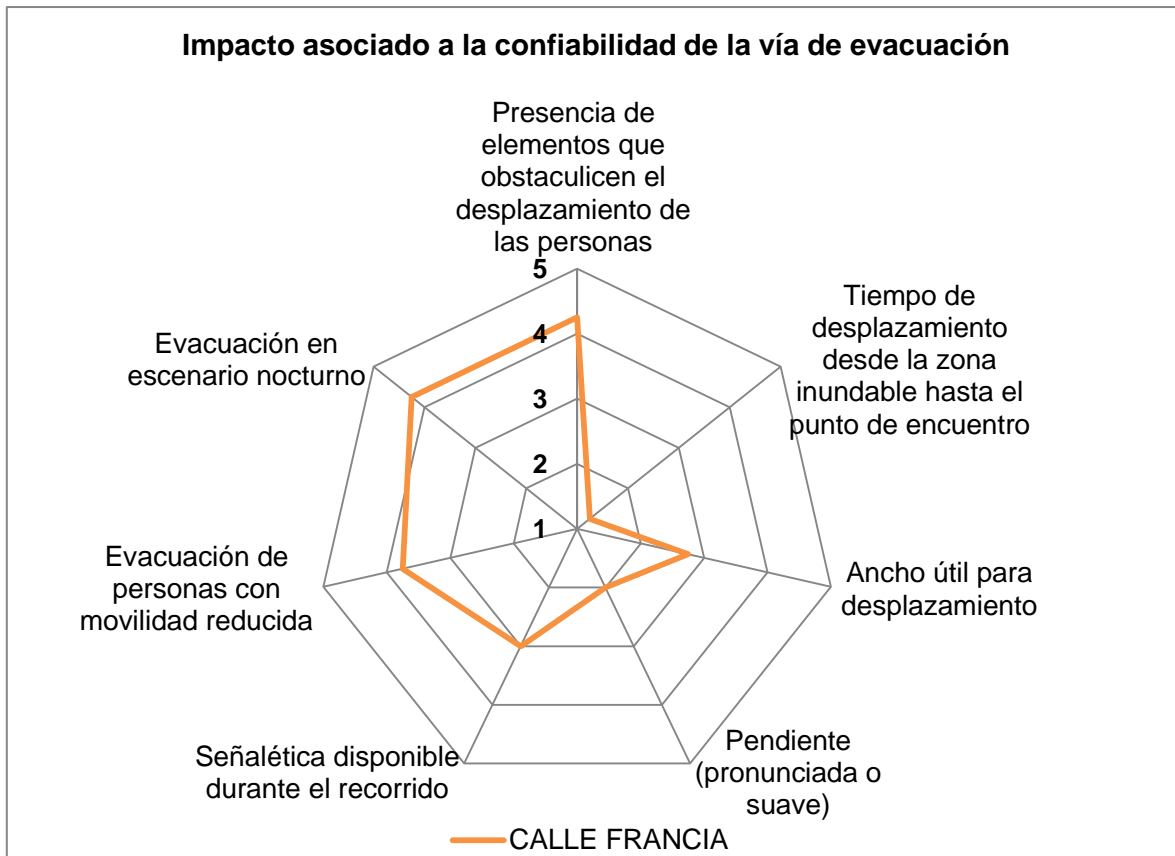


Figura 89 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Francia. Elaboración propia.

### 11.3.8 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE URUGUAY

Uruguay destaca por ser una de las calles peor evaluadas (Figura 90), resulta no confiable por la presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de personas, señalética disponible, evacuación de personas con movilidad reducida y evacuación en escenario nocturno. El ancho útil de desplazamiento y la pendiente de la vía presentan confiabilidad media. Finalmente, el aspecto mejor evaluado es la confiabilidad respecto al tiempo de evacuación a zona segura, pues es alta.

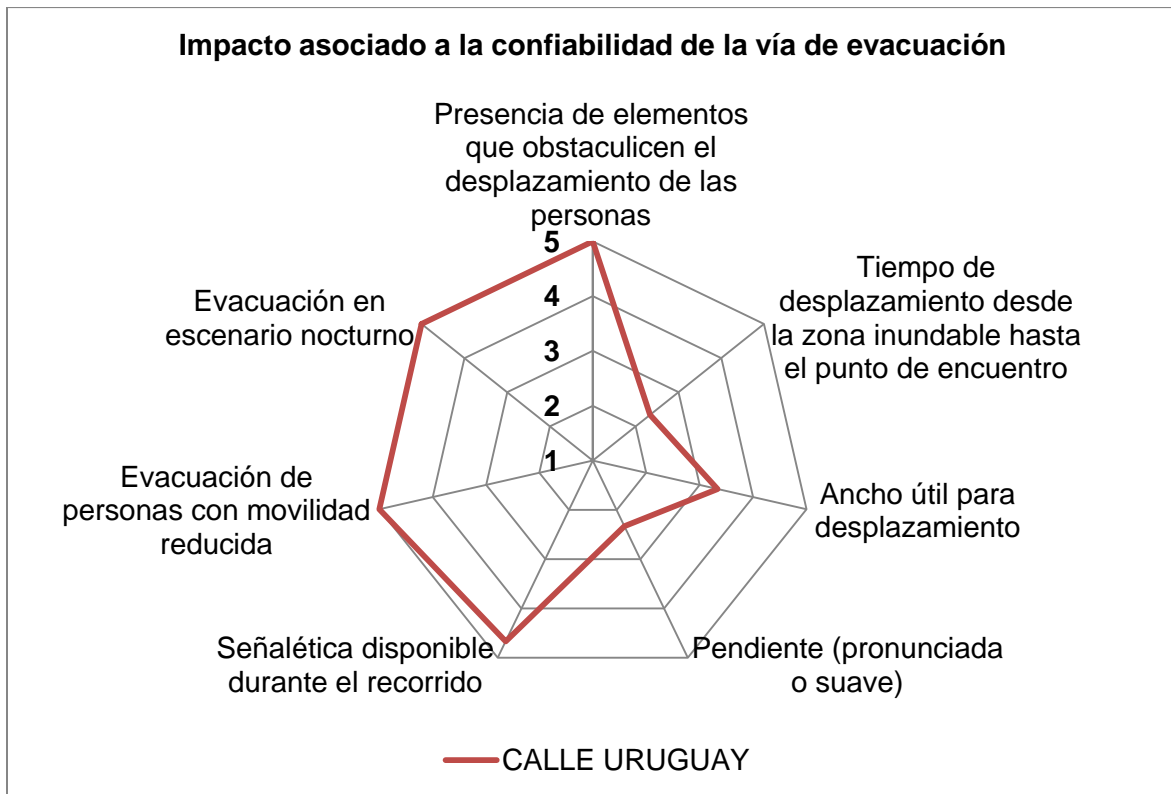


Figura 90 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Uruguay. Elaboración propia.

### 11.3.9 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE EDWARDS

La confiabilidad de la calle Edwards (Figura 91) para la evacuación de personas con movilidad reducida es nula. Respecto a la presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de personas, pendiente, ancho útil de desplazamiento y evacuación en escenario nocturno, la confiabilidad es baja. La señalética disponible durante el recorrido resulta con confiabilidad media. Por otro lado, el aspecto mejor evaluado es el tiempo de desplazamiento a zona segura cuya confiabilidad es alta.

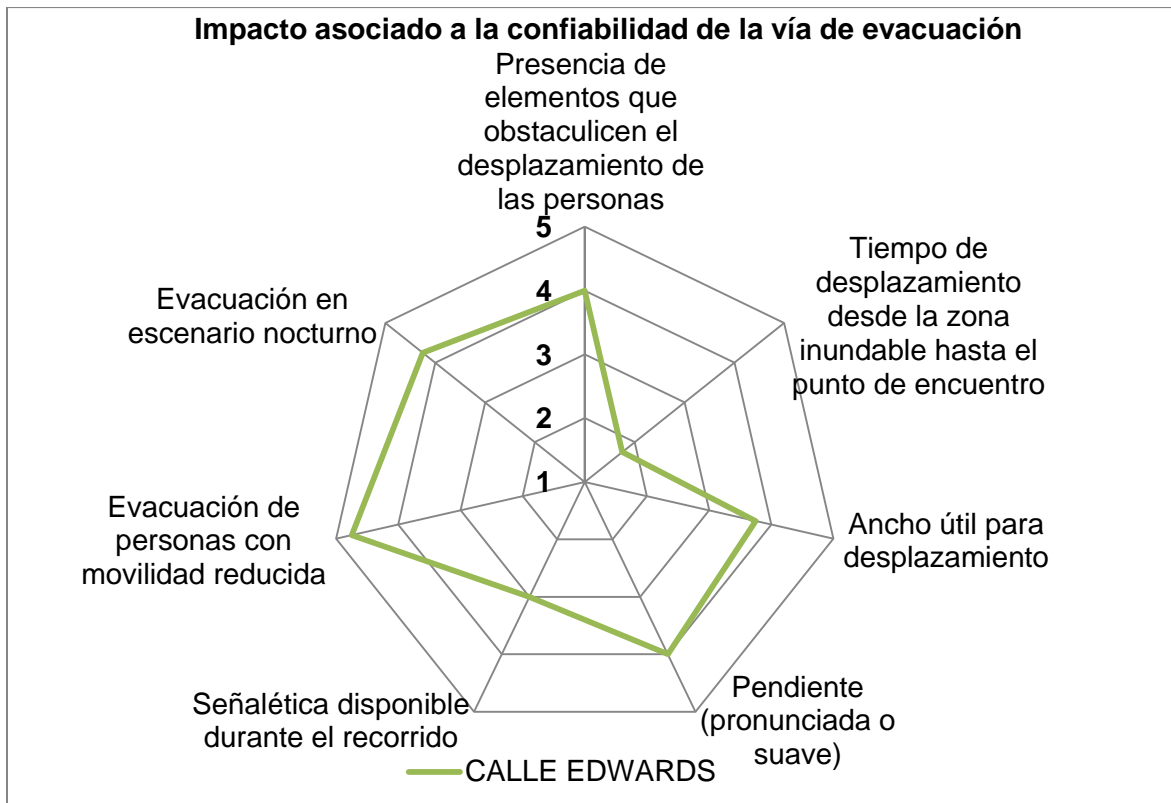


Figura 91 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Edwards. Elaboración propia.

### 11.3.10 IMPACTO POR CONFIABILIDAD DE EVACUACIÓN CALLE RODRÍGUEZ

La confiabilidad de Rodríguez (Figura 92) debido a la presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de las personas, pendiente y la evacuación en escenario nocturno, ha sido evaluada como baja. La confiabilidad en relación al tiempo de desplazamiento a zona segura y respecto al ancho útil de desplazamiento, es media. Finalmente, la confiabilidad de acuerdo a la señalética disponible durante el recorrido y la evacuación de personas con movilidad reducida, resulta nula.

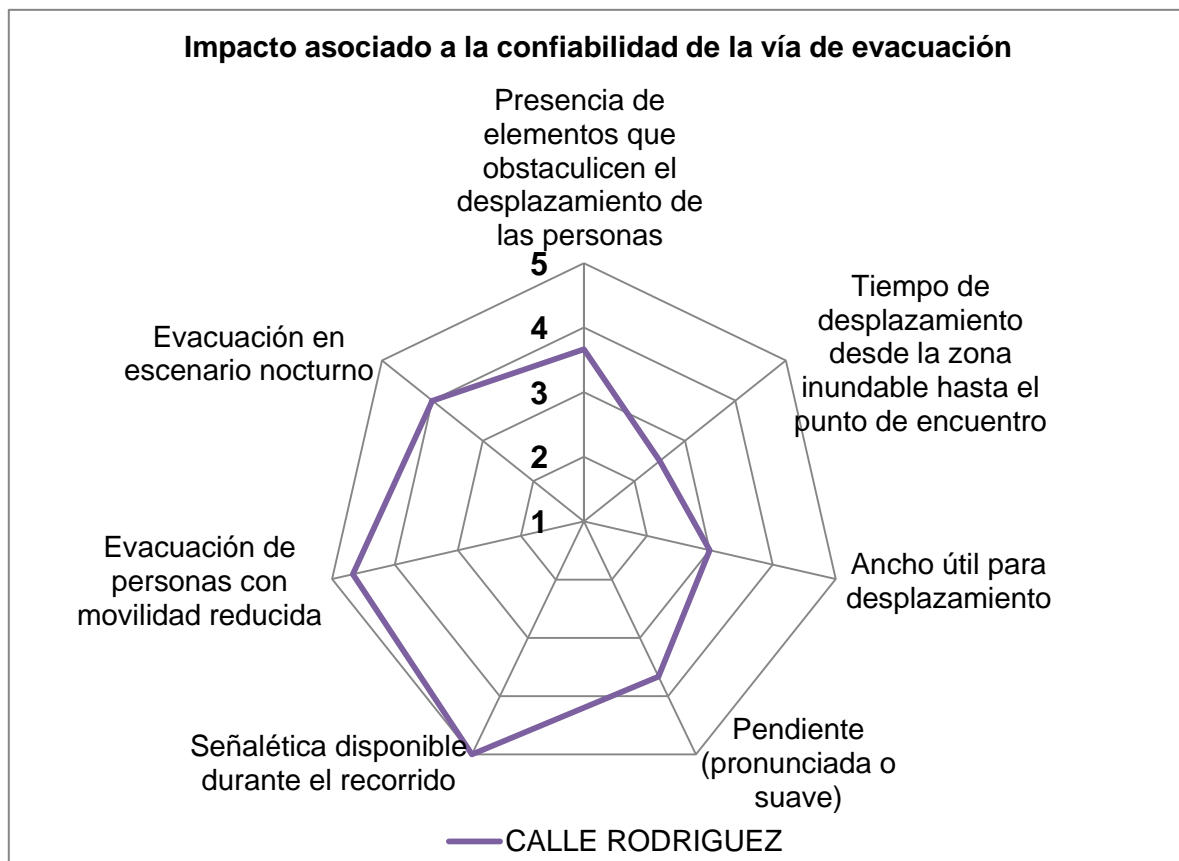


Figura 92 Impacto asociado a la confiabilidad de evacuación calle Rodríguez. Elaboración propia.

## **12 ANEXO C FICHA DE REGISTRO CAMPAÑA DE TERRENO**

### 1.- Susceptibilidad de bloqueo de la vía de evacuación

1.1 La vía de evacuación es susceptible al bloqueo por escombros

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

1.2 La vía es susceptible al bloqueo por atochamiento vehicular

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

1.3 La vía es susceptible al bloqueo por incendios y/o explosiones durante el desastre

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

1.4 La vía es susceptible al bloqueo por colapso de cauces, ríos y esteros

1

2

3

4

5

OBS:

1.5 La vía es susceptible al bloqueo por atochamiento de personas debido a estrechez de la vía

1

2

3

4

5

OBS:

1.6 La vía es susceptible al bloqueo por atochamiento de personas en horario peak

1

2

3

4

5

OBS:

1.7 La vía es susceptible al bloqueo por atochamiento de personas en temporada de verano

1

2

3

4

5

OBS:

1.8 La vía es susceptible al bloqueo por presencia de tendido eléctrico

1

2

3

4

5

OBS:

Escala Cualitativa de Impacto por Susceptibilidad	
No Susceptible	1
Baja Susceptibilidad	2
Susceptibilidad Media	3
Alta Susceptibilidad	4
Muy Alta Susceptibilidad	5

2.- Confiabilidad de las vías de evacuación

2.1 La vía es confiable respecto a la presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de las personas (rejas, barreras de contención, baches, resaltos)

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

2.2 La vía es confiable respecto al tiempo de desplazamiento desde la zona inundable hasta el punto de encuentro

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

2.3 La vía es confiable respecto al ancho

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

2.4 La vía es confiable respecto a la pendiente (pronunciada o suave)

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

2.5 La vía es confiable respecto a la señalética disponible durante el recorrido

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

2.6 La vía es confiable para la evacuación de personas con movilidad reducida

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

OBS:

## 2.7 La vía es confiable para la evacuación en escenario nocturno

1

2

3

4

5

OBS:

Escala Cualitativa de Impacto por Confiabilidad	
No Confiable	5
Baja Confiabilidad	4
Confiabilidad Media	3
Alta Confiabilidad	2
Muy Alta Confiabilidad	1

### Documento complementario con definiciones para realizar encuesta

**Susceptible:** Indica la probabilidad que algo suceda, está vinculado a aquello capaz de ser modificado o de recibir impresión por algo o alguien.

**Bloqueo por escombros:** Probabilidad de bloqueo por un conjunto de fragmentos o restos de ladrillos, hormigón, acero, madera, entre otros, provenientes de derrumbes de muros y/o estructuras. Presencia de cornisas o edificios antiguos.

**Bloqueo por atochamiento vehicular:** Dificultad para circular por la vía de evacuación debido a la ocupación de ésta por el masivo flujo de vehículos.

**Bloqueo por incendio o explosiones:** Bloqueo de las vías de evacuación por las probabilidades de sufrir un incendio o explosiones por presencia de bombas de bencina, tanques de gas, edificaciones de material ligero, etc.

**Bloqueo por colapso de cauces, ríos y esteros:** Probabilidad que la vía de evacuación sea inundada por la existencia de cauces, ríos o esteros cercanos que sean desbordados por un aumento de caudal.

**Bloqueo por atochamiento de personas por vías estrechas:** Dificultad para circular por la vía de evacuación debido a la aglomeración de personas provocado por un angostamiento de la vía.

**Bloqueo por atochamiento de personas en horario peak:** Dificultad para circular por la vía de evacuación en horarios de mayor circulación de personas (ej: horarios de entrada y salida de trabajo, colegios, etc).

**Bloqueo por atochamiento de personas en temporada de verano:** Dificultad para circular por la vía de evacuación en periodos de mayor acumulación de personas; en lugares como playas, borde costero, mall, etc. y eventos como año nuevo y fiestas masivas, etc.

**Bloqueo por presencia de tendido eléctrico:** Probabilidad que la vía de evacuación sea bloqueada por caída de postes de alumbrado público y/o existencia de cables electrificados.

**Confiabilidad:** Probabilidad de que un producto realice su función prevista sin incidentes por un periodo de tiempo especificado y bajo condiciones indicadas.

**Elementos que obstaculicen el desplazamiento:** Se entiende como aquellos elementos tales como, rejas, barreras de contención, baches y resaltos que puedan obstaculizar el desplazamiento de personas durante la emergencia.

**Zona inundable:** Es aquella zona demarcada, en la carta de inundación del SHOA, que ante la ocurrencia de un tsunami sería inundada.

**Punto de encuentro:** Punto demarcado en el Plano de Evacuación ante a Tsunami, elaborado por la ONEMI, en el cual se especifica el punto al que debe llegar y permanecer la población evacuada durante la emergencia.

**Tiempo de desplazamiento:** Lapso de tiempo que los individuos tardan en desplazarse desde un punto a otro durante la evacuación.

**Pendiente:** Plano inclinado presente en las vías de evacuación, ya sea suave (ligeramente inclinada) o fuerte (bastante inclinada).

**Señalética disponible:** Mecanismo de información basado en el uso de dibujos o señales que sirven de orientación a la población durante la evacuación por tsunami.

**Personas con movilidad reducida:** Son aquellos individuos que poseen dificultades para trasladarse, causadas ya sea por edad, enfermedad, accidente, condición física o acompañamiento de personas que requieran asistencia durante la evacuación.

**Escenario nocturno:** Se entiende como escenario nocturno aquel momento del día en el que la luz solar comienza a escasear hasta el punto de quedar completamente oscuro, teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados (tiempo de desplazamiento, obstáculos, señalética especial, etc.).

**Ancho de Vía:** Se debe evaluar el ancho de la vía de evacuación respecto al flujo de gente que utilice dicha vía. Para esto, se pueden considerar variables como densidad de población (que está directamente relacionada con el flujo de gente) y locación de la vía. El objetivo es justamente, fundamentar si el ancho de la vía de evacuación responde correctamente a su uso y no genere posibles atochamientos humanos.

## **FICHA DE REGISTRO - CAMPAÑA DE TERRENO**

**“FACTIBILIDAD DE VÍAS DE EVACUACIÓN VERTICAL, APLICADA A LAS CIUDADES DE VALPARAÍSO Y VIÑA DEL MAR”**

Alumnos tesistas

Constanza Flores Henríquez  
Alex Lobos Astudillo  
Jazmin Lues Gallardo  
Eduardo Sánchez Araya

Profesor guía

Mauricio Reyes Gallardo

### **Proyecto:**

*“Propuesta metodológica para la evaluación de sistemas de evacuación vertical ante tsunami”*

### **Objetivos:**

*Estimar el tiempo promedio de evacuación hasta los puntos de encuentro, mediante las distintas capacidades físicas de los colaboradores.*

*Evaluar las vías de evacuación horizontal en la ciudad a analizar, a través de un cuestionario que permita identificar las vulnerabilidades de ésta.*

## **CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE VALPARAÍSO**

### **HISTORIA**

La comuna de Valparaíso fue fundada bajo el nombre de Nuestra señora de las Mercedes de Puerto Claro de Valparaíso. Existen dos versiones sobre el origen de su nombre. Una se le atribuye a Juan de Saavedra, quien habría bautizado en 1536 con el nombre de Valparaíso a la rada donde encontró la nave "Santiaguillo" en recuerdo de su pueblo natal de Valparaíso de Arriba (Ayuntamiento de Carrascosa del Campo, España). Otra versión atribuye este nombre a los soldados del navegante Juan Bautista Pastene, quienes lo

habrían llamado "Val del paraíso", es decir "Valle del Paraíso", y que con el uso se habría transformado en Valparaíso.

A mediados del siglo XVI (1544), la ciudad fue declarada puerto oficial de Santiago, la legislación mercantil fue pensada para hacer de Valparaíso un puerto de primer orden, favorecido por su posición geográfica en la zona central del país y el gran empuje económico dado por la exportación de trigo chileno a California y Perú.

El auge económico que significó para Chile su independencia de la corona de España, permitió que con el modelo exportador primario se abrieran nuevos mercados a los recursos naturales que en la época de la colonia se enviaban solamente a la península ibérica. Esta creciente actividad mercantil del sector portuario vino acompañada de la llegada a la ciudad de comerciantes provenientes de Europa, especialmente ingleses, franceses, italianos y alemanes, que junto a su actividad comercial y financiera, dejaron huellas de su permanencia, en la arquitectura y en el diseño de los edificios construidos en distintos puntos de la nascente ciudad puerto de la zona central de Chile y en particular, en la conformación urbana de los cerros Alegre y Concepción.

En la actualidad, Valparaíso es sede del Congreso Nacional de Chile. La Armada de Chile posee una importante presencia en la ciudad, también se encuentra la Intendencia de la Región, servicios de Aduanas, Pesca y Acuicultura y dentro del ámbito privado, la sede central del diario El Mercurio de Valparaíso.

La cíclica actividad sísmica de la zona central del país, ha provocado que Valparaíso esté constantemente expuesto a amenazas, tales como terremotos y tsunamis. Los últimos eventos datan de los años 1965, 1971, 1985 y 2010, sin embargo el mayor terremoto y posterior tsunami, fue el del 8 de Julio de 1730 con una intensidad de 8,7 en la escala de Richter. Dicho evento causó los mayores daños en la Bahía de Valparaíso de los que se tenga registro, inundando y destruyendo severamente el Puerto, además de destruir dos tercios de la ciudad, entre ellos 200 casas y edificaciones aledañas al borde costero. Los efectos se extendieron por 1000 [km] a lo largo de la costa, afectando las localidades de La Serena, Coquimbo, Illapel, Petorca y Tiltil. La máxima cota de inundación se produjo en el sector de La Concepción alcanzando los 16 [m]. (SHOA).

La configuración morfológica de la ciudad y el escaso ordenamiento territorial se confabulan para que permanentemente sea afectada por incendios, inundaciones y deslizamientos de laderas.

## **INFORMACIÓN POBLACIONAL**

En la comuna de Valparaíso habitan 275.982 personas, las que se distribuyen en una superficie de 402 km<sup>2</sup>, de los cuales 140.765 son mujeres y 135.217 son hombres. Valparaíso acoge al 17,92% de la población total de la región. El 99,70% (275.141 habitantes) corresponde a población urbana y el 0,30% (841 habitantes) a población rural. Según SERNATUR, la comuna de Valparaíso se encuentra dentro de las 20 comunas con mayor población flotante de turistas. En este ranking, es la séptima comuna con 2.955.944 turistas.

## CARACTERÍSTICAS DE LA CIUDAD

Valparaíso posee características especiales, tanto por su aspecto topográfico, físico y urbanístico, como por su historia, tradiciones y patrimonio.

La importancia geográfica, se refleja en las condiciones morfológicas que definen el paisaje natural de Chile Central. La presencia de la cordillera de la Costa y el talud natural sobre el que se sitúa la ciudad, permitió el emplazamiento original y espontáneo de Valparaíso, elemento diferenciador respecto a las demás ciudades costeras. Dicha configuración se basa en los 42 cerros que conforman la ciudad, los que se expanden en torno a la bahía, generando un anfiteatro natural. Este escenario de cerros poblados condicionó el desarrollo urbano de la ciudad y al mismo tiempo fue la base de una distribución socio-demográfica claramente diferenciada entre los habitantes del *plan* y de los *cerros*. El clima mediterráneo, templado cálido con temperaturas moderadas y con una estación seca prolongada, se explica por la presencia de la corriente fría de Humboldt, y a la presencia de la brisa marina sobre el espacio costero local. Durante los meses de verano las temperaturas varían entre los 10° C y 22° C, las masas de aire en movimiento (vientos), generadas en ésta época del año, provocan un aumento en la humedad del ambiente, subiendo la temperatura de la zona inclusive hasta los 27 ° C. En invierno, entre mayo y octubre, la zona se ve afectada por masas de aire frías y húmedas de origen polar que pueden bajar la temperatura incluso a valores bajo cero.

Respecto a la hidrología, no existen cursos de agua de importancia en la comuna, encontrándose sólo algunos esteros y quebradas costeras, y varias quebradas interiores de régimen intermitente. Adicionalmente, existen una serie de lagos y embalses de distintos tamaños.

## GEOMORFOLOGÍA

La comuna de Valparaíso está formada por una gran presencia de cerros y acantilados del litoral sur. Dentro de las unidades geomorfológicas menores destacan las quebradas costeras, laderas de cerros mirando en dirección al mar y laderas interiores de exposición norte y sur. Como unidad menor de importancia se puede mencionar el Plan de Valparaíso, planicie artificial formada a partir del relleno de la base de los cerros. En general, hacia la costa el relieve se caracteriza por formas llanas separadas por pendientes más o menos abruptas. Las formaciones dunarias en la comuna son prácticamente nulas.

## CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El trabajo de terreno consta de dos actividades a realizarse el día Viernes 29 de Agosto de 2014 en la ciudad de Valparaíso. Para ello, se organizarán 5 grupos de 4 personas los que deberán realizar las siguientes tareas:

### **Actividad 1: Simulacro de Evacuación ante Tsunami en Valparaíso**

- Iniciar el recorrido desde el lugar de partida a paso normal

- Medir el tiempo empleado en realizar el recorrido desde el punto de partida hasta el punto de encuentro
- Trazar en el mapa de Valparaíso, el recorrido de la ruta de escape utilizada desde el punto de partida hasta el punto de encuentro
  
- Llegar al punto de encuentro

## **Actividad 2: Evaluación de las vías de Evacuación ante Tsunami en Valparaíso**

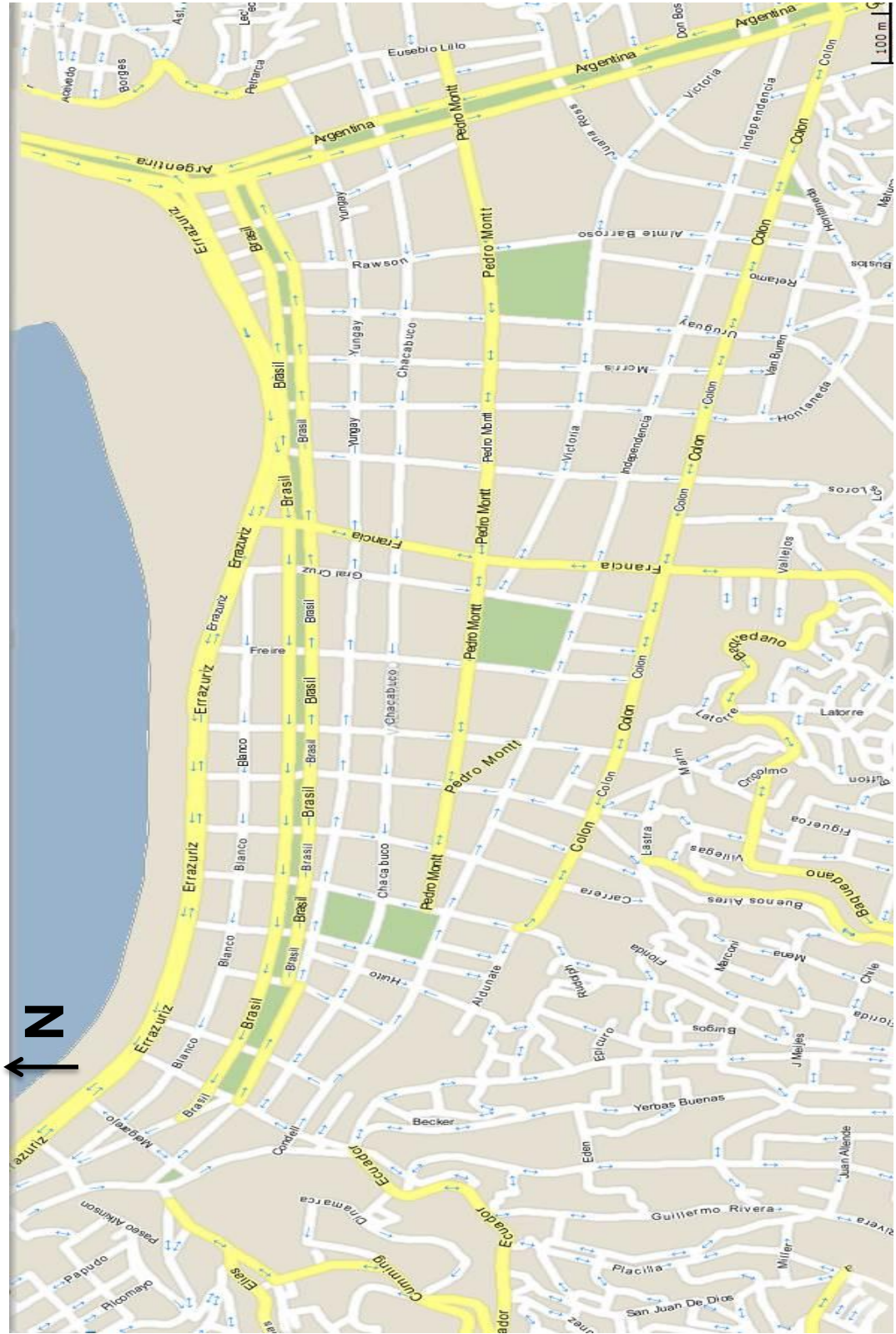
- Iniciar el recorrido de vuelta, desde el punto de encuentro hasta el lugar de partida
- Responder la encuesta de Evaluación de Vías de Evacuación
- Ubicar en el mapa de Valparaíso, los lugares donde se encuentre la señalética informativa de Tsunami
- Anotar las observaciones respecto a las señaléticas
- Tomar registro fotográfico de las vías de evacuación y señaléticas
- Llegar al lugar de partida.

### **MATERIALES**

- Cámara fotográfica
- Cronómetro
- Lápiz
- Libreta de notas
- Protección solar
- Sombrero

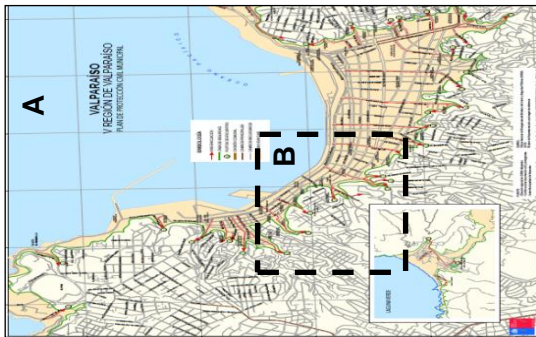
# ACTIVIDAD 1

Simulacro de Evacuación ante Tsunami en Valparaíso



# ACTIVIDAD 1

Mapa de Vías de Evacuación ante Tsunami en Valparaíso



SIMBOLOGÍA	
	VÍAS EVACUACION
	LÍNEA DE SEGURIDAD
	PUNTOS DE ENCUENTRO
	DIVISIÓN COMUNAL
	CAMINOS PRINCIPALES
	CAMINOS SECUNDARIOS
	ZONA A EVACUAR

Fuente: <http://www.onemi.cl/wp-content/uploads/2013/09/VALPO1.pdf>



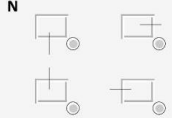
## 13 ANEXO D EDIFICIOS EVALUADOS CON FICHAS DE REGISTRO

A continuación se presentan las fichas de registro con la evaluación de las estructuras de evacuación vertical (EEV) analizadas en la ciudad de Valparaíso.

### 13.1 EDIFICIOS ANALIZADOS CON FICHA A

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-AMTE BARROSO-IND
DIRECCIÓN	ALMIRANTE BARROSO 560
COORDENADAS UTM	6340192S 256635E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	03-03-2016
FECHA SATELITAL	01-01-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	643M
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	776M

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-07-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0m
OBSERVACIONES	EEV2.1 EDIFICIO 17 PISOS UBICADO EN ZONA NO INUNDABLE. SIN ACCESO A




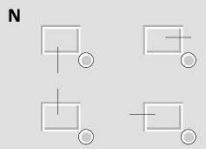
<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 93 Evaluación ficha A EEV2.1 Almirante Barroso #560. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-MORRIS-COLÓN
DIRECCIÓN	MORRIS 776
COORDENADAS UTM	6340046S 256346E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	12-01-2016
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	680
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	450

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0m
OBSERVACIONES	EEV2.2 EDIFICIO DE 25 PISOS. ZONA NO INUNDABLE SEGÚN CI




<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 94 Evaluación ficha A EEV2.2 Morris #776. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-HONTANEDA-COLÓN
DIRECCIÓN	HONTANEDA 735
COORDENADAS UTM	340066S 256283E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	01-06-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	670m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	455m

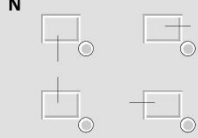
INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-07-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0m
OBSERVACIONES	EEV2.3 EDIFICIO DE 25 PISOS





IMAGEN FRONTAL

IMAGEN PLANTA

IMAGEN UBICACIÓN


Figura 95 Evaluación ficha A EEV2.3 Hontaneda #735. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-GRAL CRUZ-BRASIL
DIRECCIÓN	AV BRASIL 2274
COORDENADAS UTM	6340676S 256020E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	01-07-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	100M
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	1170M

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0-1m
OBSERVACIONES	EEV3 EDIFICIO DE 17 PISOS. LA DISTANCIA A ZONA SEGURA DE DETERMINA




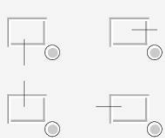
<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 96 Evaluación ficha A EEV3 Brasil #2274. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-RODRIGUEZ-ERRAZ
DIRECCIÓN	RODRÍGUEZ 99
COORDENADAS UTM	6340815S 255731E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	02-06-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	30m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	720m

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0-1m
OBSERVACIONES	EEV5 EDIFICIO DE 28 PISOS UBICADO FRENTE A LA LC. PISO 28 FUNCIONA COMO




<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 97 Evaluación ficha A EEV5 Rodríguez #99. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-CARRERA-BLANCO
DIRECCIÓN	BLANCO 1791
COORDENADAS UTM	634077S 2255518E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	01-06-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	30m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	620m

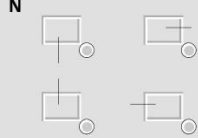
INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-07-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0-1m
OBSERVACIONES	EEV6.1 EDIFICIO DE 18 PISOS UBICADO FRENTE A LA L.C




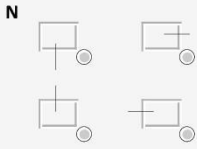
IMAGEN FRONTAL

IMAGEN PLANTA

IMAGEN UBICACIÓN


Figura 98 Evaluación ficha A EEV6.1 Blanco #1791. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-BLANCO-EDWARDS
DIRECCIÓN	BLANCO 1693
COORDENADAS UTM	6340796S 255400E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	01-06-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	85m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	565m

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0-1m
OBSERVACIONES	EEV6.2 TORRE MAR DEL SUR I. SIN ACCESO A AZOTEA UBICADO FRENTE A LC




<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 99 Evaluación ficha A EEV6.2 Blanco #1693. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-BLANCO-MOLINA
DIRECCIÓN	BLANCO 1623
COORDENADAS UTM	6340785S 255388E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	01-06-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	91m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	620m

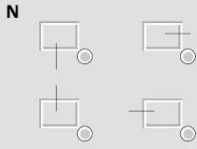
INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0-1m
OBSERVACIONES	EEV6.3 EDIFICIO MAR DEL SUR II. SIN ACCESO A AZOTEA.UBICADO FRENTE A LC




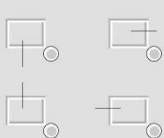
IMAGEN FRONTAL

IMAGEN PLANTA

IMAGEN UBICACIÓN


Figura 100 Evaluación ficha A EEV6.3 Blanco #1623. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-BLANCO-MARGALEJO
DIRECCIÓN	BLANCO 1231
COORDENADAS UTM	6340923S 255025E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	05-03-2016
FECHA SATELITAL	01-06-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	40m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	480m

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-02-2012
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	1-2m
OBSERVACIONES	EEV7.1 PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN MAYOR.




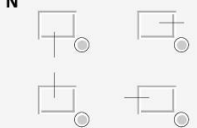
<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 101 Evaluación ficha A EEV7.1 Blanco #1231. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-BLANCO-MELGAREJO
DIRECCIÓN	BLANCO 1169
COORDENADAS UTM	6340942S 255006E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	06-03-2016
FECHA SATELITAL	12-01-2016
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	75m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	440m

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-01-2013
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	1-2m
OBSERVACIONES	EEV7.2 EDIFICIO DE 14 PISOS. ACCESO 1




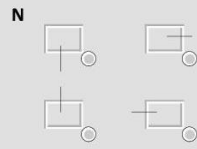
<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 102 Evaluación ficha A EEV7.2 Blanco #1169. Elaboración propia.

INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-BELLAVISTA-BLANC
DIRECCIÓN	BELLAVISTA 168
COORDENADAS UTM	6340844S 255059E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	07-03-2016
FECHA SATELITAL	01-07-2015
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	110M
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	300M

INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría II, Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	1-2m
OBSERVACIONES	EEV7.3 EDIFICIO CENTENARIO 21 PISOS


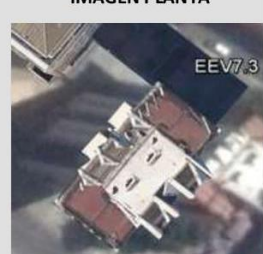


<p><b>IMAGEN FRONTAL</b></p> 
<p><b>IMAGEN PLANTA</b></p> 
<p><b>IMAGEN UBICACIÓN</b></p> 

Figura 103 Evaluación ficha A EEV7.3 Bellavista #168. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
PAIS	CHILE
CIUDAD	VALPARAÍSO
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-MELGAREJO-B.O'H
DIRECCIÓN	MELGAREJO 669
COORDENADAS UTM	6340854S 255950E
FECHA DE VISUALIZACIÓN	07-03-2016
FECHA SATELITAL	12-01-2016
DISTANCIA DESDE LÍNEA DE COSTA	180m
DISTANCIA DESDE EDIFICIO A ZONA SEGURA	380m


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
FECHA IMAGEN GSV	01-06-2015
NÚMERO DE PISOS	>8
ACCESO	<p>N</p> 
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	HORMIGÓN ARMADO
USO DE LA ESTRUCTURA	NCH-433 Categoría IV, Edificios y otras estructuras clasificadas como edificios gubernamentales, municipales, de servicios públicos o de utilidad pública, instalaciones esenciales, estructuras auxiliares, sustancias peligrosas.
TIPO DE SUELO SEGÚN FEMA	ARENA DENSA
TIPO DE SUELO SEGÚN DS n°61	TIPO D: SUELO MEDIANAMENTE DENSO O FIRME
PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	0-1m
OBSERVACIONES	EEV7.4 EDIFICIO INTENDENCIA REGIONAL 19 PISOS. DISTANCIA DE EVACUACIÓN ES

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 104 Evaluación ficha A EEV7.4 Melgarejo #669. Elaboración propia.

## 13.2 EDIFICIOS ANALIZADOS CON FICHA B

A continuación, las fichas de registro B con el detalle de todos los edificios analizados en la ciudad.



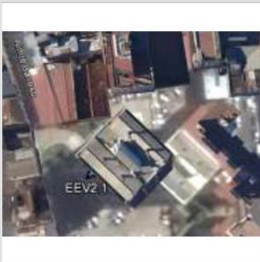
<b>FICHA B</b>		
INFORMACIÓN GOOGLE EARTH		
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-AMTE BARROSO-IND	<b>IMAGEN FRONTAL</b> 
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	500	
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MEDIANAMENTE ABUNDANTE	
INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW		
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	BAJO TONELAJE (<12 TON)	<b>IMAGEN PLANTA</b> 
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>		
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	ANTES DE 2000	<b>IMAGEN UBICACIÓN</b> 
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN	
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	NO	
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>		
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	35	
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	SEMI- TRANSPARENTE	
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA	
<b>OBSERVACIONES</b>		

Figura 105 Evaluación ficha B EEV2.1 Almirante Barroso #560. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-MORRIS-COLÓN
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	430
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	POCO ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	BAJO TONELAJE (<12 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	2014
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	SI
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	35
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	BUENA RESISTENCIA
<b>OBSERVACIONES</b>	EDIFICIO SE ENCUENTRA EN ZONA NO INUNDABLE. INCERTEZA SOBRE EL ÁREA DE USO COMÚN EN AZOTEA

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**

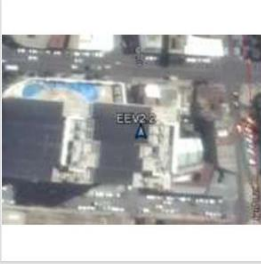


Figura 106 Evaluación ficha B EEV2.2 Morris #776. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
CÓDIGO EDIFICIO	VLP-HONTANEDA-COLÓN
SUPERFICIE EN PLANTA	430
CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES	POCO ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
TIPO DE OBJETOS FLOTANTES	BAJO TONELAJE (<12 TON)
AÑO DE CONSTRUCCIÓN	
AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN	2014
ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO	SI
NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO	>1
POTENCIAL DE SOCAVACIÓN	35
OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA	OPACO
RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO	BUENA RESISTENCIA
OBSERVACIONES	SE ENCUENTRA EN ZONA NO INUNDABLE

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 107 Evaluación ficha B EEV2.3 Hontaneda #735. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-GRAL CRUZ-BRASIL
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	450
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	2008
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	SI
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	SEMI-TRANSPARANTE
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	SEGÚN CORREDORA POSEE 3 NIVELES DE ESTACIONAMIENTO SUBTERRÁNEO

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 108 Evaluación ficha B EEV3 Brasil #2274. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-RODRIGUEZ-ERRAZ
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	250
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	2006
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	NO
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	AZOTEA COMPLETA DESTINADA A TERRAZA. ESTACIONAMIENTO Y BODEGA EN ATORNICADO. SALA DE EVENTOS. BISCINA.


**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**



EEV5

Rodríguez

Figura 109 Evaluación ficha B EEV5 Rodríguez #99. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-CARRERA-BLANCO
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	280
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1998
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	SI
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	EDIFICIO DE 22 PISOS. LA SUPERFICIE SE APROXIMA DEBIDO A QUE NO SE CONOCE EXISTE ACCESO A LA AZOTEA EN EL

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 110 Evaluación ficha B EEV6.1 Blanco #1791. Elaboración propia.

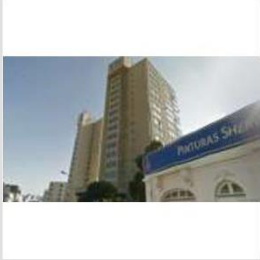
INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-BLANCO-EDWARDS
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	280
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1989
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	SI
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	NO TIENE ACCESO A AZOTEA NI SALA DE EVENTOS NI TERRAZA. DOS NIVELES DE ESTACIONAMIENTO SUBTERRÁNEO.

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**

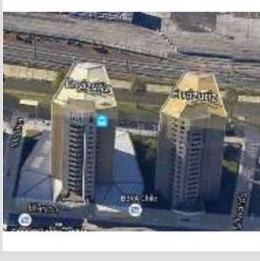


Figura 111 Evaluación ficha B EEV6.2 Blanco #1693. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-BLANCO-MOLINA
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	280
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1989
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	SI
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	NO TIENE ACCESO A AZOTEA NI POSEE ESPACIOS COMUNES. DOS NIVELES DE ESTACIONAMIENTO SUBTERRÁNEO.

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 112 Evaluación ficha B EEV6.3 Blanco #1623. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-BLANCO-MARGALEJO
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	360
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1980
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	SI
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	NO TIENE ACCESO A AZOTEA POR LO QUE NO EXISTEN ÁREAS COMUNES PARA REFUGIAR PERSONAS

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 113 Evaluación ficha B EEV7.1 Blanco #1231. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-BLANCO-MELGAREJO
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	200
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1990
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	SI
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	SEMI- TRANSPARENTE
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	DOS NIVELES DE SUBTERRÁNEO

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 114 Evaluación ficha B EEV7.2 Blanco #1169. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-BELLAVISTA-BLANC
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	250
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	ALTO TONELAJE (>85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1990
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	NO
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	50
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	DOS NIVELES DE SUBTERRÁNEO

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**




Figura 115 Evaluación ficha B EEV7.3 Bellavista #168. Elaboración propia.


INFORMACIÓN GOOGLE EARTH	
<b>CÓDIGO EDIFICIO</b>	VLP-MELGAREJO-B.O'H
<b>SUPERFICIE EN PLANTA</b>	400
<b>CANTIDAD DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MUY ABUNDANTE


INFORMACIÓN GOOGLE STREET VIEW	
<b>TIPO DE OBJETOS FLOTANTES</b>	MEDIO TONELAJE (12- 85 TON)
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>AÑO ESTIMADO DE CONSTRUCCIÓN</b>	1990
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN EXTERIOR</b>	BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN
<b>ACCESO VEHICULAR A SUBTERRÁNEO</b>	NO
<b>NÚMERO DE SUBNIVELES ESTIMADO</b>	>1
<b>POTENCIAL DE SOCAVACIÓN</b>	35
<b>OPACIDAD DE LA ESTRUCTURA</b>	OPACO
<b>RESISTENCIA DEL EDIFICIO ANTE IMPACTO</b>	RESISTENCIA MEDIA
<b>OBSERVACIONES</b>	EDIFICIO DE 19 PISOS (INTENDENCIA REGIONAL). La inspección visual indica que

**IMAGEN FRONTAL**



**IMAGEN PLANTA**



**IMAGEN UBICACIÓN**

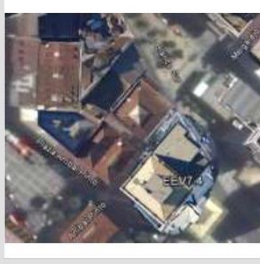


Figura 116 Evaluación ficha B EEV7.4 Melgarejo #669. Elaboración propia.

Tabla 23 Resumen criterios evaluados con fichas de registro edificios EEV1, EEV2.1, EEV3, EEV5, EEV6.1 y EEV6.2.

CRITERIOS	EEV1	EEV2.1	EEV3	EEV5	EEV6.1	EEV6.2
Número de pisos	14 pisos	17 pisos	17 pisos	28 pisos	22 pisos	17 pisos
Accesibilidad	1	1	1	1	3	1
Material de construcción	H.A	H.A	H.A	H.A	H.A	H.A
Uso de la estructura	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009
Tipo de suelo según FEMA	Arena densa	Arena densa	Arena densa	Arena densa	Arena densa	Arena densa
Tipo de suelo según D.S n°61	Tipo D	Tipo D	Tipo D	Tipo D	Tipo D	Tipo D
Profundidad de inundación	0-1 [m]	0 [m]	0-1 [m]	0-1 [m]	0-1 [m]	0-1 [m]
Cantidad de objetos flotantes	Muy abundante	Medianamente abundante	Muy abundante	Muy abundante	Muy abundante	Muy abundante
Tipo de objetos flotantes	Alto tonelaje	Bajo tonelaje	Alto tonelaje	Alto tonelaje	Alto tonelaje	Alto tonelaje
Año de construcción	1964	Antes de 2000	2008	2006	1998	1989
Estado de conservación exterior	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Acceso vehicular subterráneo	No	No	Si	No	Si	Si
Número de subniveles	No posee	No posee	3	No posee	2	2
Potencial de socavación	50%d (0.5 [m])	35%d (0 [m])	50%d (0.5 [m])	50%d (0.5 [m])	50%d (0.5 [m])	50%d (0.5 [m])
Opacidad de la estructura	Opaco	Semi transparente	Semi transparente	Opaco	Opaco	Opaco
Resistencia del edificio ante impacto	Media	Media	Media	Media	Media	Media

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24 Resumen criterios evaluados con fichas de registro edificios EEV6.3, EEV7.1, EEV7.2, EEV7.3 y EEV7.4.

CRITERIOS	EEV6.3	EEV7.1	EEV7.2	EEV7.3	EEV7.4
Número de pisos	17 pisos	14 pisos	12 pisos	21 pisos	19 pisos
Accesibilidad	1	1	1	1	1
Material de construcción	H.A	H.A	H.A	H.A	H.A
Uso de la estructura	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat II Nch433of96MOD 2009	Cat IV Nch433of96MOD 2009
Tipo de suelo según FEMA	Arena densa	Arena densa	Arena densa	Arena densa	Arena densa
Tipo de suelo según D.S n°61	Tipo D	Tipo D	Tipo D	Tipo D	Tipo D
Profundidad de inundación	0-1 [m]	1-2 [m]	1-2 [m]	1-2 [m]	0-1 [m]
Cantidad de objetos flotantes	Muy abundante	Muy abundante	Muy abundante	Muy abundante	Muy abundante
Tipo de objetos flotantes	Alto tonelaje	Alto tonelaje	Alto tonelaje	Alto tonelaje	Alto tonelaje
Año de construcción	1989	1980	1990	1990	1990
Estado de conservación exterior	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Acceso vehicular subterráneo	Si	Si	Si	No	No
Número de subniveles	2	1	2	2	No posee
Potencial de socavación	50%d (0.5 [m])	50%d (0.5 [m])	50%d (1 [m])	50%d (1 [m])	35%d (0.35 [m])
Opacidad de la estructura	Opaco	Opaco	Semi transparente	Opaco	Opaco
Resistencia del edificio ante impacto	Media	Media	Media	Media	Media

Fuente: Elaboración propia.