



Memoria del proyecto para optar al grado de
MAGÍSTER EN ADMINISTRACIÓN Y GESTIÓN PORTUARIA
y para el título de
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

**“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN
DE LAS VÍAS DE EVACUACIÓN ANTE TSUNAMI
APLICADA EN IQUIQUE”**

Alex Fabián Lobos Astudillo

Octubre 2016

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL

ALEX LOBOS ASTUDILLO

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Mauricio Reyes Gallardo Profesor Guía	_____	_____
Jaime Leyton Espoz Director del Programa de Magister Administración y Gestión Portuaria	_____	_____
Felipe Caselli Benavente Docente	_____	_____

*MEMORIA PARA OPTAR AL POSTGRADO DE
MAGISTER EN GESTIÓN Y ADMINISTRACIÓN PORTUARIA
Y AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO*

*VALPARAÍSO, CHILE
OCTUBRE 2016*

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados 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.

Mauricio Reyes Gallardo

Profesor Guía

Alex Lobos Astudillo

Alumno Memorista

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a:

Mi Dios, que es la energía universal que mueve toda la creación de manera perfecta y quien me ha mostrado que la humildad es el camino a la sabiduría y la fortaleza de espíritu.

Mis padres, hermanos y Muñu, quienes han creído en mí en todo momento sin reparos y que han sido un pilar fundamental tanto en mi desarrollo profesional como en el hombre que soy hoy. Gran parte de lo que he logrado es por y gracias a ustedes.

Ana Josefa Moraga (mi amada Zanahoria), la mujer que me inspira a ser mejor un mejor hombre. Quien ha estado junto a mí en todo momento apoyándome incluso en las instancias más difíciles. Quien me impulsa a seguir soñando cada día.

Mis amigos de la vida: Hernán Bononato, Diego Egido, Giafar Deij, Patricio Castro, Richard Pereira, Marco Bosque, Sebastian Maggi, Valentina Céspedes, Carlos Olivares quienes han sido participes en los mejores y peores momentos de mi vida. Que a pesar de nuestras diferencias, siempre han tenido una palabra de aliento y cariño para mí.

Mis queridos amigos de la universidad: Francisca Araya, Cindy Bernal y Gustavo Hafemann con quienes compartí mi vida universitaria y muchos hermosos momentos que tengo atesorados en mi corazón. Excelentes personas de las cuales me siento orgulloso ser parte de su historia.

Mis profesores y maestros: Mauricio Reyes, Patricio Winckler, Felipe Caselli a quienes admiro por su dedicación y profesionalismo en cada una de sus áreas y especialidades. Gracias por esa entrega y vocación académica que muestran cada día al servicio de sus estudiantes.

Y todos a quienes no recuerde en este preciso instante, y que han puesto un granito de arena de alguna manera en la realización de esta tesis.

Esta memoria de título está dedicada:

Con todo mi amor y cariño para mis queridos padres. Espero hacerlos sentir orgullosos de todo el esfuerzo depositado en este gran sueño que he venido tejiendo hace varios años atrás. Tarea cumplida.

En memoria de mi querido amigo Juan Carlos Mercado (Chanito), a quien siempre voy a admirar en su calidad de personas y profesional. En mi afán de ser mejor, mantengo viva tu memoria hermano.

*“Considero más valiente al que conquista sus deseos que al que conquista a sus
enemigos, ya que la victoria más dura es la victoria sobre uno mismo.”*

Aristóteles

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	MATERIALES Y HERRAMIENTAS	3
3.1	SOFTWARE DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	3
3.1.1	GOOGLE EARTH ©.....	3
3.1.2	GOOGLE STREET VIEW ©.....	3
3.2	ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP).....	3
3.2.1	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO.....	3
3.2.2	FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MÉTODO NUMÉRICO	7
3.2.2.1	Descripción general	7
3.2.2.2	Construcción del modelo.....	7
3.2.2.3	Estimación del vector de criterios de peso W	8
3.2.2.4	Obtención de la matriz de alternativas S	9
3.2.2.5	Clasificación de alternativas	10
3.2.2.6	Comprobación de la consistencia.....	10
3.2.3	APLICACIÓN Y USO DE LA HERRAMIENTA <i>AHPcalc-2</i>	12
4	SITUACIÓN ACTUAL DEL MÉTODO	13
4.1	ESTUDIO DE AMENAZA	13
4.1.1	AMENAZA SÍSMICA	13
4.1.2	AMENAZA DE TSUNAMI.....	13
4.1.3	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	14
4.2	EVACUACIÓN HORIZONTAL (EH)	15
4.2.1	DEFINICIÓN DE LA OFERTA DE EVACUACIÓN HORIZONTAL	15
4.2.2	ASPECTOS CUALITATIVOS.....	16
4.2.2.1	Análisis del riesgo y diagnóstico de la realidad actual	17
4.2.2.2	Planificación integral	18
4.2.3	ASPECTOS CUANTITATIVOS.....	19
5	METODOLOGÍA PROPUESTA	21

5.1	CIUDAD OBJETIVO.....	23
5.2	ESTUDIO DE AMENAZA	24
5.2.1	ZONAS EXPUESTAS	24
5.2.2	DEFINICIÓN DE ESCENARIO DE DESASTRE.....	25
5.3	ESTUDIO DE IMPACTO	25
5.3.1	VULNERABILIDADES.....	25
5.3.1.1	Descripción general	25
5.3.1.2	Análisis y selección de principales actores.....	26
5.3.1.3	Análisis y selección de problemas.....	29
5.3.2	CRITERIOS DE ZONIFICACIÓN.....	30
5.3.2.1	Zonificación por tiempos de arribo a zona de seguridad	30
5.3.2.2	Zonificación por distribución de densidades de población	33
5.3.2.3	Zonificación de Evacuación Vertical (EV).....	35
5.3.3	CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EH.....	36
5.3.3.1	Definición de la Oferta de EH en Iquique	36
5.3.3.2	Aspectos cuantitativos y escalas de evaluación	40
5.3.3.3	Aspectos cualitativos y escalas de evaluación	41
5.3.3.4	Definición de criterios.....	42
5.3.3.5	Extrapolación de las velocidades de desplazamiento en la evaluación de las vías de evacuación horizontales de Iquique	43
5.3.4	PONDERACIÓN DE VARIABLES EH	44
5.3.5	CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA DE EV.....	46
5.3.5.1	Definición de la oferta de EV.....	46
5.3.5.2	Aspectos cualitativos y escalas de evaluación	47
5.3.5.3	Criterios de evaluación – Ficha A.....	47
5.3.5.4	Criterios de evaluación – Ficha B.....	49
6	RECOPIACIÓN DE RESULTADOS	51
6.1	EVACUACIÓN HORIZONTAL.....	51
6.1.1	BALANCE OFERTA/DEMANDA EH.....	51
6.2	EVACUACIÓN VERTICAL	56
6.2.1	BALANCE OFERTA/DEMANDA EV.....	56
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
7.1	RESPECTO DEL ESTUDIO DE AMENAZA.....	59

7.2	RESPECTO DEL ESTUDIO DE IMPACTO	59
7.3	RESPECTO DE LA RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.....	60
7.4	RECOMENDACIONES	62
ANEXO A: LA AMENAZA SÍSMICA EN IQUIQUE		64
CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA		64
<i>ESTADO DEL ARTE</i>		64
<i>ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS EVENTOS DE TSUNAMI OCURRIDOS EN CHILE</i> 65		
<i>ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA ACTUAL DE TERREMOTO EN EL NORTE DE CHILE</i>		70
Estudios paleosísmicos y paleotsunamis.....		72
Actividad sísmica histórica en el norte de Chile		74
Nuevos antecedentes: terremoto de Iquique – 1 de abril del 2014.....		76
Análisis sísmico y geodésico		78
Mega eventos sísmicos (Megaterremotos)		58
ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA DE TSUNAMI EN IQUIQUE		61
CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....		61
<i>DESCRIPCIÓN GENERAL</i>		61
<i>GENERACIÓN DE TSUNAMI POR EVENTOS SÍSMICOS</i>		64
<i>TIPOLOGÍAS DE TSUNAMIS</i>		66
Tsunamis locales.....		66
Tsunamis regionales.....		66
Tsunamis Lejanos (Transoceánicos)		67
<i>EVALUACIÓN DE RIESGO DE UN TSUNAMI</i>		68
<i>IMPACTO FÍSICO DE UN TSUNAMI SOBRE LA COSTA</i>		69
CONTEXTO GUBERNAMENTAL.....		71
MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA INUNDACIÓN		72
ANEXO C: ANÁLISIS FODA (PCM).....		78
ANEXO D: FICHA DE EVALUACIÓN EH.....		86
ANEXO E: LICENCIA DE HERRAMIENTA AHPCALC		91
ANEXO F: RIESGO DE DESASTRES		96
CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....		96
<i>GENERALIDADES</i>		96
<i>RIESGO: DEFINICIÓN DEL CONCEPTO</i>		97

<i>EVALUACIÓN DEL RIESGO</i>	99
Descripción General	99
Análisis del Riesgo	99
Evaluación del Riesgo	101
<i>VULNERABILIDAD</i>	101
<i>DESASTRE</i>	102
Definición del concepto.....	102
Amenazas naturales	103
Ciclo de desastres	104
<i>ETAPAS DEL CICLO DESASTRE</i>	105
Antes del desastre (planificación)	106
Durante del Desastre (Respuesta).....	108
Después del Desastre (Recuperación)	109
ANEXO G: GESTIÓN DEL CICLO DE PROYECTOS (PCM)	111
CONCEPTOS FUNDAMENTALES	111
<i>DESCRIPCIÓN GENERAL</i>	111
<i>ANÁLISIS DE LAS PARTES INTERESADAS</i>	112
ANEXO H: TELEOBSERVACIÓN	113
CONCEPTOS FUNDAMENTALES	113
<i>DESCRIPCIÓN GENERAL</i>	113
<i>PRINCIPALES APLICACIONES DE LA TELEOBSERVACIÓN</i>	114
<i>VENTAJAS DE LA TELEOBSERVACIÓN</i>	115
ANEXO I: DEMANDA DE EVACUACIÓN	116
CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE EVACUACIÓN	116
<i>DEFINICIÓN GENERAL</i>	116
<i>ZONIFICACIÓN POR RANGOS DE TIEMPO DE ARRIBO A ZONA DE SEGURIDAD</i>	116
<i>ZONIFICACIÓN POR DISTRIBUCIÓN DE LA DENSIDAD DE POBLACIÓN</i>	117
<i>ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE EVACUACIÓN</i>	118
<i>METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA POBLACIÓN EXPUESTA</i>	119
ANEXO J: FICHAS DE EVALUACIÓN EV	121
FICHAS A.....	121
FICHAS B.....	128
ANEXO K: GRÁFICOS DE RADAR	135

SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO DE LAS VÍAS	135
CONFIABILIDAD DE LAS VÍAS.....	140
ANEXO J: DATOS KMZ	147
REFERENCIAS	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo jerárquico para la toma de decisiones con AHP.....	4
Figura 2: Definición del árbol jerárquico.	8
Figura 3: Mapa conceptual correspondiente a la línea de investigación de la tesis.	21
Figura 4: Ubicación del sitio de estudio.	23
Figura 5: Caracterización de las zonas de inundación por tsunami en Iquique.....	24
Figura 6: Fase analítica del PCM.	26
Figura 7: Zonificación por tiempo de arribo a zona segura en función de movilidad normal.	31
Figura 8: Zonificación por tiempo de arribo a zona segura en función de movilidad reducida.	31
Figura 9: Zonificación por distribución de densidad en escenario Invierno - Día.....	34
Figura 10: Zonificación por distribución de densidad en escenario Verano - Día.....	34
Figura 11: Zonificación por distribución de densidad en escenario Verano - Noche.	35
Figura 12: Puntos de evacuación vertical (PEV).....	36
Figura 13: Ejemplo de vía de evacuación, calle Rodríguez, Iquique.....	37
Figura 14: Selección de vías de evacuación EH.....	39
Figura 15: Gráfico de radar de susceptibilidad de bloqueo promedio de las vías de evacuación.	51
Figura 16: Gráfico de radar de confiabilidad promedio de las vías de evacuación.....	52
Figura 17: Señalética disponible durante el recorrido de las vías.	53
Figura 18: Ubicación de los edificio de EV según zonificación.	57
Figura 19: Gráfico de resultado de demanda de evacuación.....	61
Figura 20: Configuración tectónica del Sudeste del Pacífico	65
Figura 21: Interacción de placas tectónicas en Sudamérica.....	66
Figura 22: Data histórica de terremotos en Chile.....	67
Figura 23: Datos históricos de generación de tsunamis en Chile.....	68
Figura 24: Longitudes de ruptura a lo largo de la costa de Chile.	69
Figura 25: Generación de registros sedimentarios de tsunami en zonas costeras afectadas por hundimiento co-sísmico.....	72
Figura 26: Localización global de las principales investigaciones de depósitos de tsunami.	73
Figura 27: El terremoto de Arica 1868. Estimación histórica de la zona de ruptura.	74
Figura 28: El terremoto de Iquique 1877. Estimación histórica de la zona de ruptura.....	75
Figura 29: Sismicidad superficial en la zona norte de Chile.....	77
Figura 30: Actividad sísmica en la zona norte de Chile.	79
Figura 31: Fondo sismo tectónico del Norte de Chile y las principales características geológicas.....	80
Figura 32: Conjunto de datos intersísmicos adquiridos por Métois et al. 2013.....	82
Figura 33: Distribuciones de acoplamiento resultantes del modelo de Metois 2013.	84
Figura 34: Modelo bidimensional de velocidad-profundidad.	85

Figura 35: Recopilación de grandes terremotos en el sur de Perú y norte de Chile (entre 14°S y 24°S).....	57
Figura 36: terremotos conocidos de intensidad 7.5 [Ms].....	59
Figura 37: Distribución energética de las ondas de superficie.	61
Figura 38: Efectos devastadores en las costas de Japón ante el Tsunami del 2011.	62
Figura 39: Zona de inundación de un tsunami.....	63
Figura 40: Generación de un tsunami por desplazamiento vertical de placas.....	66
Figura 41: Propagación del tsunami generado en el océano Índico (2004), a escala global.	68
Figura 42: Perfiles altimétricos de las latitudes 20 S, 21 S y 22 S y plano de ruptura utilizados por el SHOA.	73
Figura 43: Modelo de Tsunami realizado por el SHOA para la zona de Iquique.	74
Figura 44: Diagrama no escalado de una corrección teórica para el plano de ruptura.....	75
Figura 45: Primera versión de la carta de inundación de Iquique por efectos de un tsunami.	76
Figura 46: Tercera versión de la carta de inundación de Iquique por efectos de un tsunami.	77
Figura 47: Resultados de las fortalezas (FODA).	84
Figura 48: Resultados de las oportunidades (FODA).....	84
Figura 49: Resultados de las debilidades (FODA).....	85
Figura 50: Resultados de las amenazas (FODA).	85
Figura 51: Adaptación en español del esquema de gestión de riesgos de Pliefke (2007). 98	
Figura 52: Esquema de evaluación de riesgo.....	100
Figura 53: Diagrama del ciclo de desastres.....	104
Figura 54: Diagrama del ciclo de gestión de proyectos.	112
Figura 55: Extracción de datos por medio de la teledetección satelital y output de elevación obtenido.	113
Figura 56: Identificación de puntos de medición por mitad de cuadra.	119
Figura 57: Ejemplo de toma de datos por cuadra.	120
Figura 58: Ficha Access A EV1	121
Figura 59: Ficha Access A EV2.....	122
Figura 60: Ficha Access A EV3.....	123
Figura 61: Ficha Access A EV4.....	124
Figura 62: Ficha Access A EV5.....	125
Figura 63: Ficha Access A EV6.....	126
Figura 64: Ficha Access A EV7.....	127
Figura 65: Ficha Access B EV1.....	128
Figura 66: Ficha Access B EV2.....	129
Figura 67: Ficha Access B EV3.....	130
Figura 68: Ficha Access B EV4.....	131
Figura 69: Ficha Access B EV5.....	132
Figura 70: Ficha Access B EV6.....	133

Figura 71: Ficha Access B EV7..... 134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Escala de intensidad de importancia.	5
Tabla 2: Valores del índice de azar (IR) para problemas pequeños.	11
Tabla 3: Definición de los actores principales.	27
Tabla 4: Asignación grupal de los actores.	28
Tabla 5: Sistematización de daños propuesta en "Estimación de daños del terremoto en la prefectura de Yamaguchi".	30
Tabla 6: Escenarios de tiempo de ocurrencia de la inundación por tsunami.	33
Tabla 7: Asignación de densidades por zona y momento de ocurrencia.	33
Tabla 8: Distancias máximas y tiempos máximos de desplazamiento desde la costa hacia a las zonas de seguridad de las vías EH.	39
Tabla 9: Escala cualitativa de impacto por susceptibilidad de bloqueo de la vía horizontal.	42
Tabla 10: Escala cualitativa de impacto por confiabilidad de la vía horizontal.	42
Tabla 11: Factores de evaluación de las vías de evacuación horizontales.	43
Tabla 12: Cuadro comparativo de velocidades de desplazamiento.	43
Tabla 13: Ponderación de factores mediante AHP para la evaluación de los factores de confiabilidad de las vías EH.	44
Tabla 14: Ponderación de factores mediante AHP para la evaluación de los factores de susceptibilidad de bloqueo de las vías EH.	45
Tabla 15: Resultados de demanda de evacuación.	54
Tabla 16: Resumen de las principales localidades dañadas por sismos en Chile.	64
Tabla 17: Parámetros sísmicos para la entrada en el modelo numérico de tsunami.	73
Tabla 18: Análisis FODA - Fortalezas y Debilidades.	78
Tabla 19: Análisis FODA - Oportunidades y Amenazas.	81
Tabla 20: Organización secuencial del ciclo de desastre.	105
Tabla 21: Criterio de densidad de población propuesto.	117
Tabla 22: Asignación de densidades por zona y momento de ocurrencia.	118

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Capacidad de las vías de evacuación.	40
Ecuación 2: Demanda de evacuación.	118

RESUMEN

El presente trabajo propone un método para la evaluación de sistemas de evacuación ante la amenaza de un evento de Tsunami en la zona norte de Chile, con el objetivo de caracterizar el impacto ante la ocurrencia de tsunamis de campos cercanos en la ciudad de Iquique y generar herramientas que aporten en la planificación y evaluación de sus sistemas de evacuación.

En primera instancia, se realizó una recopilación de datos y antecedentes como fundamentos para la determinación del escenario de desastre asociado a un evento sísmico en Iquique de 8.5 [Mw] con las condiciones necesarias para generar un tsunami. Posteriormente, se realizó un estudio de impacto, con el fin de caracterizar la oferta y demanda de evacuación horizontal y vertical mediante el uso del método AHP (Analytical Hierarchy Process) como herramienta complementaria en la toma de decisiones. Análogamente, se evaluaron las vías de evacuación horizontal (VEH), mediante el análisis de su confiabilidad y susceptibilidad de bloqueo como dos aspectos de calidad propuestos en este trabajo. Finalmente, se realizó un balance Oferta/Demanda de los sistemas de evacuación con el fin de evaluar si la oferta de evacuación existente en la zona de La Península y playa Cavancha, es suficiente para la demanda de personas a evacuar en ante la inundación de un tsunami.

Si bien este estudio se sustenta en un análisis cualitativo, los resultados obtenidos demuestran una serie de disfuncionalidades en las VEH que pueden afectar su respuesta al momento de evacuar. En consecuencia de esta problemática, se crea la necesidad de integrar nuevos elementos como las vías de evacuación vertical (VEV) que aumenten la calidad y oferta de los sistemas de evacuación existentes considerando que la oferta de evacuación vertical (OEV) actual en Chile es nula.

Palabras Claves: *Vulnerabilidad, Confiabilidad, Susceptibilidad, Gestión del Riesgo, Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), Tsunami, Teleobservación.*