



**Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico**

**APLICACIÓN DE MODELO NUMÉRICO DE TSUNAMI
UTILIZANDO EL TERREMOTO DE 1730 PARA EVALUAR
DAÑO EN EDIFICACIONES EN LA POBLACIÓN VERGARA
EN VIÑA DEL MAR.**

Fernanda Camila Pérez

Enero 2020

**APLICACIÓN DE MODELO NUMÉRICO DE TSUNAMI UTILIZANDO EL
TERREMOTO DE 1730 PARA EVALUAR DAÑO EN EDIFICACIONES EN LA
POBLACIÓN VERGARA EN VIÑA DEL MAR.**

Fernanda Camila Pérez.

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Patricio Winckler G. Profesor Guía	_____	_____
Rodrigo Filippi F. Revisor 1	_____	_____
Patricio Osorio C. Revisor 2	_____	_____

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.

FERNANDA PÉREZ
Alumna Memorista

PATRICIO WINCKLER
Profesor Guía

AGRADECIMIENTOS

Durante todos estos años he contado con el apoyo, la fe y la confianza puesta en mí de muchas personas, pero en especial agradezco a mis hermanas Deysi, Gabriela y Melania, por su paciencia, amor y en seguir siempre adelante a pesar de los problemas que nos ha puesto la vida. También agradezco a mis tatas, a Juani y tía Lili por su infinita fe en mí, y mi amigo, consejero y pololo Felipe por ayudarme a enfrentar este difícil camino, a ustedes infinitas gracias.

Como no agradecer a mi hermano perdido Danilo, a mi tía Gaby y su familia por apoyarme a mí y a mis hermanas durante tantos años, también por las palabras de ánimo la Sra. Graciela y Don Ernesto. A mi amiga Elizabeth que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas y a su familia.

A mis grandes amigos en este largo proceso Stephanie y Pablo, por todas esas conversaciones épicas con un café, tratando de arreglar el mundo, viendo como seguir o terminar un trabajo o como estudiar para un ramo, ¡¡¡chiquillos gracias por todo!!!. A las tías del quiosco, la tía Clari, tía Sole y a Erwin por ese tecito para el frío y brindar su cariño. A las tías del aseo por siempre tratarme con cariño cuando nos encontrábamos en los pasillos de la UV; a pesar de su cansancio siempre estaban dispuestas a entregar un momento cálido.

Mis agradecimientos a mi Profesor Guía Patricio Winckler, por sus consejos y recomendaciones sobre mi estudio, a Rodrigo Filippi, Patricio Osorio y al equipo del laboratorio DOP por ayudarme y entregarme información sobre el Modelo y tsunami, al Profesor Yamazaki por dejarme utilizar el Modelo NEOWAVE y confiar en mí cuando le presente la idea, al Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile por permitirme utilizar LEFTRARU para poder realizar las simulaciones.

A todos mis compañeros con los que hemos compartido todos estos años, a mis profesores durante la carrera, a todos por ser parte de una u otra forma de mi formación de Ingeniero, agradezco haber compartido con ustedes, a la Sra. Virginia Sánchez y Profesor David Jamet por creer en mí y darme la oportunidad de seguir adelante con la carrera.

Finalmente agradezco a la persona más importante de mi vida, que a pesar que no esté conmigo de forma física, sin sus enseñanzas y ejemplo no sería la mujer que soy y no hubiera perseverado como lo he hecho, a JORGE PÉREZ, mi papá, gracias por todo, gracias gracias gracias!!!.

DEDICATORIA

Para mi Papá.

*“Eres más valiente de lo que piensas.
Más fuerte de lo que pareces. Y más
Inteligente de lo que crees.”*

Alan Milne.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. DEFINICIONES	15
3. OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	19
4.1 ALCANCES.....	19
4.2 LIMITACIONES.....	19
5. HIPÓTESIS	20
6. FUNDAMENTO TEÓRICO	21
6.1 HISTORIA SÍSMICA CHILE CENTRAL.....	21
6.2 HISTORIA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	22
6.3 RUPTURA.....	23
6.4 BATIMETRÍA Y TOPOGRAFÍA.....	25
6.5 MODELO NUMÉRICO NEOWAVE.....	26
6.5.1 FORMULACIÓN TEÓRICA.....	27
6.5.2 ECUACIONES DE GOBIERNO TRIDIMENSIONALES.....	27
6.5.3 ECUACIONES DE GOBIERNO INTEGRADAS EN LA PROFUNDIDAD....	29
6.5.4 RELACIÓN DE DISPERSIÓN LINEAL.....	34
6.6 CURVAS DE FRAGILIDAD.....	38
6.6.1 OBTENCIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD.....	39
6.6.2 MÉTODOS PROBABILÍSTICO.....	40
7. METODOLOGÍA	41
7.1 PRE-PROCESO.....	42
7.1.1 ANÁLISIS DE AMENAZA.....	42
7.1.2 MODELO DE FALLA.....	44
7.1.3 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA.....	45
7.1.4 INTERPOLACIÓN.....	45
7.2 PROCESO.....	47
8. RESULTADOS	59
8.1 RESULTADOS MODELACIÓN NEOWAVE.....	59

8.1.1	MALLA GRUESA.....	59
8.1.2	MALLA FINA.....	61
8.2	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE INUNDACIÓN MODELADA	64
8.3	ANÁLISIS DE CURVAS DE FRAGILIDAD.....	67
8.4	PÉRDIDA ECONÓMICA.....	72
9.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	74
9.1	CONCLUSIONES.....	74
9.2	TRABAJOS FUTUROS.....	76
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN ...	77
11.	ANEXO	80

INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1, MARCO TECTÓNICO DE CHILE.....	13
ILUSTRACIÓN 2, POBLACIÓN VERGARA.....	14
ILUSTRACIÓN 3, SECUENCIA CRONOLÓGICA DE TERREMOTOS EN CHILE CENTRAL.....	21
ILUSTRACIÓN 4, UBICACIÓN SISMOS INTERPLACA E INTRAPLACA.....	24
ILUSTRACIÓN 5, ESQUEMA DEL FLUJO DE SUPERFICIE LIBRE GENERADO POR LA DEFORMACIÓN DEL FONDO MARINO.....	27
ILUSTRACIÓN 6, RELACIÓN DE DISPERSIÓN LINEAL.....	36
ILUSTRACIÓN 7, CURVAS DE FRAGILIDAD PARA LOS DISTINTOS ESTADOS DE DAÑO.....	40
ILUSTRACIÓN 8, DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO.....	41
ILUSTRACIÓN 9, ZONAS DE RUPTURA DE GRANDES TERREMOTOS QUE HAN AFECTADO EL CENTRO DE CHILE.....	43
ILUSTRACIÓN 10, FALLA PLANA EN TRES DIMENSIONES	44
ILUSTRACIÓN 11, SPLINES EN TENSIÓN	45
ILUSTRACIÓN 12, RUPTURA.....	48
ILUSTRACIÓN 13, SETEO RUPTURA.....	49
ILUSTRACIÓN 14, INICIO RUPTURA.....	50
ILUSTRACIÓN 15, SETEO TIEMPO DE MODELACIÓN.....	50
ILUSTRACIÓN 16, INTERFAZ DE CUADRÍCULA.....	51
ILUSTRACIÓN 17, SETEO MALLAS.....	52
ILUSTRACIÓN 18, SETEO INTERACCION MALLAS.....	52
ILUSTRACIÓN 19, MALLA 01.	53
ILUSTRACIÓN 20, MALLA 02.	53
ILUSTRACIÓN 21, MALLA 03.	54
ILUSTRACIÓN 22, MALLA 04.	54
ILUSTRACIÓN 23, CUADRAS INUNDADAS.....	56
ILUSTRACIÓN 24, CURVA DE FRAGILIDAD MADERA.....	57
ILUSTRACIÓN 25, CURVA DE FRAGILIDAD ACERO.....	58
ILUSTRACIÓN 26, CURVA DE FRAGILIDAD HORMIGÓN ARMADO.....	58
ILUSTRACIÓN 27, PROPAGACIÓN TSUNAMI.....	60
ILUSTRACIÓN 28, INUNDACIÓN POR TSUNAMI.....	62
ILUSTRACIÓN 29, NIVEL MÁXIMO DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA	63
ILUSTRACIÓN 30, INUNDACIÓN ZONA DE INTERÉS.....	63
ILUSTRACIÓN 31, PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA	65
ILUSTRACIÓN 32, PROFUNDIDAD MÁXIMA DE INUNDACIÓN POBLACIÓN VERGARA.	65
ILUSTRACIÓN 33, NÚMERO ESTIMADO DE EDIFICIOS DAÑADOS PARA SEIS NIVELES DE INUNDACIÓN Y CUATRO NIVELES DE DAÑO.....	70
ILUSTRACIÓN 34, SECTOR DE MENOR INUNDACIÓN.....	71
ILUSTRACIÓN 35, EDIFICIO TIPO.....	72
ILUSTRACIÓN 36, CUADRAS POR VALOR ECONÓMICO.....	72
ILUSTRACIÓN 37, PÉRDIDA POR DAÑO COMPLETO	73

ILUSTRACIÓN 38, INUNDACIÓN CUADRA C01_1.....	80
ILUSTRACIÓN 39, INUNDACIÓN CUADRA C01_2.....	80
ILUSTRACIÓN 40, INUNDACIÓN CUADRA C01_3.....	81
ILUSTRACIÓN 41, INUNDACIÓN CUADRA C01_4.....	81
ILUSTRACIÓN 42, INUNDACIÓN CUADRA C01_5.....	82
ILUSTRACIÓN 43, INUNDACION CUADRA C02_1.....	82
ILUSTRACIÓN 44, INUNDACIÓN CUADRA C02_2.....	83
ILUSTRACIÓN 45, INUNDACION CUADRA C03_1.....	83
ILUSTRACIÓN 46, INUNDACIÓN CUADRA C03_2.....	84
ILUSTRACIÓN 47, INUNDACIÓN CUADRA C03_3.....	84
ILUSTRACIÓN 48, INUNDACIÓN CUADRA C03_4.....	85
ILUSTRACIÓN 49, INUNDACIÓN CUADRA C03_5.....	85
ILUSTRACIÓN 50, INUNDACIÓN CUADRA C04_1.....	86
ILUSTRACIÓN 51, INUNDACIÓN CUADRA C04_2.....	86
ILUSTRACIÓN 52, INUNDACIÓN CUADRA C04_3.....	87
ILUSTRACIÓN 53, INUNDACIÓN CUADRA C04_4.....	87
ILUSTRACIÓN 54, INUNDACIÓN CUADRA C04_5.....	88
ILUSTRACIÓN 55, INUNDACIÓN CUADRA C04_6.....	88
ILUSTRACIÓN 56, INUNDACIÓN CUADRA C05_1.....	89
ILUSTRACIÓN 57, INUNDACIÓN CUADRA C05_2.....	89
ILUSTRACIÓN 58, INUNDACIÓN CUADRA C05_3.....	90
ILUSTRACIÓN 59, INUNDACIÓN CUADRA C05_4.....	90
ILUSTRACIÓN 60, INUNDACIÓN CUADRA C05_5.....	91
ILUSTRACIÓN 61, INUNDACIÓN CUADRA C05_6.....	91
ILUSTRACIÓN 62, INUNDACIÓN CUADRA C06_1.....	92
ILUSTRACIÓN 63, INUNDACIÓN CUADRA C06_2.....	92
ILUSTRACIÓN 64, INUNDACIÓN CUADRA C06_3.....	93
ILUSTRACIÓN 65, INUNDACIÓN CUADRA C06_4.....	93
ILUSTRACIÓN 66, INUNDACIÓN CUADRA C06_5.....	94
ILUSTRACIÓN 67, INUNDACIÓN CUADRA C07_1.....	94
ILUSTRACIÓN 68, INUNDACIÓN CUADRA C07_2.....	95
ILUSTRACIÓN 69, INUNDACIÓN CUADRA C07_3.....	95
ILUSTRACIÓN 70, INUNDACIÓN CUADRA C07_4.....	96
ILUSTRACIÓN 71, INUNDACIÓN CUADRA C08_1.....	96
ILUSTRACIÓN 72, INUNDACIÓN CUADRA C08_2.....	97
ILUSTRACIÓN 73, INUNDACIÓN CUADRA C08_3.....	97
ILUSTRACIÓN 74, INUNDACIÓN CUADRA C09_1.....	98
ILUSTRACIÓN 75, INUNDACIÓN CUADRA C09_2.....	98
ILUSTRACIÓN 76, INUNDACIÓN CUADRA C09_3.....	99
ILUSTRACIÓN 77, INUNDACIÓN CUADRA C10_1.....	99
ILUSTRACIÓN 78, INUNDACIÓN CUADRA C10_2.....	100
ILUSTRACIÓN 79, INUNDACIÓN CUADRA C11_1.....	100
ILUSTRACIÓN 80, INUNDACIÓN CUADRA C12_1.....	101
ILUSTRACIÓN 81, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 1.....	101
ILUSTRACIÓN 82, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 2.....	102

ILUSTRACIÓN 83, UBICACIÓN PERFIL TOPOGRÁFICO 3.....	102
ILUSTRACIÓN 84, PERFILES TOPOGRÁFICOS.....	103
ILUSTRACIÓN 85, CORTE TRANSVERSAL INUNDACIÓN.....	103
ILUSTRACIÓN 86, INUNDACIÓN Y UBICACIÓN CUADRAS.....	104
ILUSTRACIÓN 87, ONDA DE TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 1.....	104
ILUSTRACIÓN 88, ONDA TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 2.....	105
ILUSTRACIÓN 89, ONDA TSUNAMI EXTERIOR VIÑA DEL MAR 3.....	105
ILUSTRACIÓN 90, ONDA TSUNAMI, MUELLE VERGARA.....	106
ILUSTRACIÓN 91, CITSU VIÑA DEL MAR.....	106
ILUSTRACIÓN 92, DEM USADA EN MODELO.....	107
ILUSTRACIÓN 93, DEM REGIÓN DE VALPARAÍSO.....	107
ILUSTRACIÓN 94, CUADRAS POR VALOR ECONOMICO.....	108
ILUSTRACIÓN 95, PÉRDIDAS POR DAÑO COMPLETO.....	109

INDICE DE TABLAS

TABLA 1, MAGNITUD SEGÚN ÁREA DE RUPTURAS.	23
TABLA 2, NIVELES DE DAÑO.	38
TABLA 3, DATOS RUPTURA.	47
TABLA 4, TAMAÑO MALLAS.	55
TABLA 5, ESPACIAMIENTO.	55
TABLA 6, UBICACIÓN LUGARES DE INTERÉS.....	56
TABLA 7, PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN POR CUADRA ESTUDIADA.	67
TABLA 8, PARÁMETROS CURVA DE FRAGILIDAD HORMIGÓN ARMADO.....	69
TABLA 9, PORCENTAJE DE DAÑOS ACUMULADO RESPECTO A LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.	69
TABLA 10, EDIFICACIONES DAÑADAS RESPECTO A LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.	70
TABLA 11, PÉRDIDA ECONÓMICA ACUMULADA TOTAL EN USD.	73

RESUMEN

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, y donde se ha producido el evento sísmico más grande y energético del que se tiene registro, el terremoto de Valdivia 1960 (9.6 M_w). La preparación ante una emergencia por la ocurrencia de un tsunami implica generar estudios de simulación de eventos de importancia con el objetivo de apoyar la toma de decisiones.

La estimación de daños por eventos de tsunami puede ser evaluada por medio de modelos numéricos, un ejemplo de ello es el modelo Non-hydrostatic Evolution of Ocean WAVES (NEOWAVE), desarrollado por la Universidad de Hawaii. NEOWAVE es un modelo que utiliza las ecuaciones no lineales de aguas someras y las ecuaciones Boussinesq en sus distintos niveles de anidamiento.

Nuestro país está localizado en una zona de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, donde la primera subyace a la segunda, es muy útil la aplicación de modelos numéricos que permitan cuantificar la magnitud del impacto de un tsunami, para así tomar las medidas de mitigación, prevención y reducción del riesgo de desastre, definir estados de alerta y alarma, que tienen por finalidad evitar o disminuir los efectos adversos del tsunami en la población y disminuir el daño a la infraestructura.

El presente trabajo muestra la aplicación de NEOWAVE y el posterior análisis de curvas de fragilidad para la Población Vergara, Viña del Mar, región de Valparaíso; sector expuesto que se encuentra en una zona donde existe un GAP sísmico considerable de aproximadamente de 300 años. Para este análisis se utiliza el sismo ocurrido el 8 de julio de 1730, donde el sector de estudio se encontraba ocupado por dos extensas haciendas, de uso rural y agrícola, por ello la importancia de revisar un evento tsunamigénico en el sector y la pérdida económica que produciría.

La simulación muestra que el tsunami arribaría a la primera línea de Viña del Mar a los 13 minutos de terminado el terremoto, generando inundaciones de 7 [m] de profundidad, de esta forma utilizando la inundación se realizó un análisis de daño probable por medio de curvas de fragilidad creadas según los diferentes niveles de inundación, los tipos de daños que serán menor, moderado, mayor y completo en la zona de estudio. Los efectos de este tsunami serían devastadores para la población Vergara, múltiples puntos de interés como equipamiento médico, hoteles, casino Municipal, equipamiento educacional y policiales se encuentran en zonas expuestas. El costo económico que produciría el tsunami en la infraestructura podría llegar a los \$115 millones de dólares.