



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS
NATURALES INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
VIÑA DEL MAR

“EVALUACIÓN DEL TSUNAMI POR REMOCIÓN EN MASA EN FIORDO AYSÉN, CHILE”

FRANCISCO RIQUELME SALINAS

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico

Profesor Guía:

PATRICIO WINCKLER GREZ

AGOSTO 2010

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
VIÑA DEL MAR

**“EVALUACIÓN DEL TSUNAMI POR REMOCIÓN EN MASA EN FIORDO AYSÉN,
CHILE”**

COMISIÓN REVISORA

CALIFICACIONES

Nota

Firma

PROFESOR GUÍA

Sr. Patricio Winckler Grez

PROFESOR INTEGRANTE 1

Sr. Mario Cáceres Muñoz

PROFESOR INTEGRANTE 2

Sr. Pedro Campos Arizabalo

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO**

VIÑA DEL MAR, CHILE
AGOSTO 2010

DECLARACIÓN

Este trabajo o alguna de sus partes no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera y organización 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.

Patricio Winckler Grez
Profesor Guía

Francisco Riquelme Salinas
Alumno Memorista

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas han contribuido, de una u otra forma, a la elaboración de este trabajo. A todas ellas quiero expresar mi más sincero agradecimiento. En primera instancia quiero agradecer la ayuda recibida por parte de mi familia quienes me apoyaron en todo momento para cumplir el objetivo de llegar a terminar mis estudios profesionales como Ingeniero Civil Oceánico.

Agradezco al profesor Patricio Winckler Grez por estar siempre dispuesto en ayudar, proporcionando las herramientas necesarias para desarrollar este proyecto y a Don Dante Gutiérrez Besa por facilitar la información sobre el tema de estudio, mediante la ayuda del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). También agradecer en forma especial a Don Bo Henrik Mogensen del Danish Hydraulic Institute (DHI) quien me facilitó las herramientas computacionales de modelación numérica y a la Sra. Carmen Gloria León Gerente General Kolbach S.A por acelerar los trámites y la comunicación con la empresa DHI. Finalmente quiero agradecer a la carrera Ingeniería Civil Oceánica (ICO) por ayudarme a conseguir los modelos numéricos esenciales para concretar el tema de memoria.

Gracias a todos
Francisco Javier Riquelme Salinas.

*Dedicada a mis padres y a mis hermanos,
a quienes estaré agradecido por siempre por su ayuda.*

CONTENIDO

	Páginas
1 INTRODUCCIÓN	1-1
1.1 GENERALIDADES.....	1-1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL FIORDO AYSÉN	1-2
1.3 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS.....	1-5
1.4 MORFOLOGÍA SUBMARINA DEL FIORDO AYSÉN.....	1-7
1.5 ANTECEDENTES SISMOLÓGICOS DE LA REGIÓN DE AYSÉN.....	1-7
1.6 ANTECEDENTES DEL TSUNAMI EN AYSÉN.....	1-8
1.7 OBJETIVOS.....	1-18
1.7.1 OBJETIVOS GENERALES	1-18
1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1-18
2 HIDRODINÁMICA DE TSUNAMIS	2-1
2.1 FUENTES DE GENERACIÓN DE TSUNAMIS.....	2-1
2.1.1 TERREMOTOS.....	2-2
2.1.2 ERUPCIONES VOLCÁNICAS.....	2-2
2.1.3 EXPLOSIONES NUCLEARES Y METEORITOS.....	2-2
2.1.4 REMOCIONES EN MASA.....	2-2
2.2 PARÁMETROS DE UN TSUNAMI.....	2-6
2.3 OTROS TIPOS DE ONDAS.....	2-9
2.4 DINÁMICA DE UN TSUNAMI POR REMOCIÓN EN MASA.....	2-11
2.4.1 GENERACIÓN.....	2-11
2.4.2 PROPAGACIÓN DE LA ONDA.....	2-15
2.5 HISTORIA DE LOS TSUNAMIS POR REMOCIÓN EN MASA.....	2-25
3 MODELACIÓN NUMÉRICA	3-26
3.1 GENERALIDADES.....	3-26
3.2 MODELO MATEMÁTICO MIKE 21 BW.....	3-26
3.2.1 ECUACIONES DE BOUSSINESQ.....	3-28
3.2.2 ESQUEMA NUMÉRICO DE BOUSSINESQ.....	3-31
3.3 MODELO MATEMÁTICO MIKE 21 FLOW.....	3-34
3.3.1 ECUACIONES DE SAINT VENANT.....	3-35
3.3.2 ESQUEMA NUMÉRICO DE SAINT VENANT.....	3-37
4 METODOLOGÍA	4-1
4.1 GENERALIDADES.....	4-1
4.2 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	4-1

4.2.1	BATIMETRÍA.....	4-1
4.2.2	TOPOGRAFÍA.....	4-1
4.2.3	ESTUDIOS POST-TSUNAMI.....	4-3
4.3	CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE.....	4-9
4.3.1	GENERALIDADES.....	4-9
4.3.2	CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE DEL MODELO MIKE 21 BW.....	4-9
4.3.3	CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE DEL MODELO MIKE 21 HD.....	4-21
5	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	5-30
5.1	GENERALIDADES.....	5-30
5.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN.....	5-30
5.3	ANÁLISIS DEL TSUNAMI A TRAVÉS DEL TIEMPO.....	5-35
5.4	ANÁLISIS DE LAS ZONAS INUNDADAS.....	5-44
5.5	TIEMPO ESTIMADO DE ARRIBO DEL TSUNAMI.....	5-52
5.6	MIKE 21 HD VS REGISTRO REAL DEL TSUNAMI.....	5-53
6	TSUNAMI EN LA BAHÍA ACANTILADA.....	6-54
6.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	6-54
6.2	PARÁMETROS BÁSICOS DE LA SIMULACIÓN.....	6-56
6.3	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	6-57
6.4	ANÁLISIS DE LAS ZONAS INUNDADAS POR EL TSUNAMI EN BAHÍA ACANTILADA.....	6-61
6.5	RESUMEN DE INUNDACIÓN DEL TSUNAMI.....	6-68
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	7-70
7.1	TSUNAMI DEL 21 DE ABRIL EN FIORDO AYSÉN.....	7-70
7.2	TSUNAMI EN BAHÍA ACANTILADA.....	7-71
7.3	RECOMENDACIONES.....	7-72

INDICE DE TABLAS

	Páginas
TABLA 2-1. NIVELES MAREALES PARA EL FIORDO AYSÉN.....	2-10
TABLA 2-2. CLASIFICACIÓN DE ROMPIENTES SEGÚN NÚMERO IRIBARREN.	2-21
TABLA 4-1. PARÁMETROS ASOCIADOS A LAS REMOCIONES EN MASA.	4-8
TABLA 4-2. VALORES CONSIDERADOS PARA LA CONDICIÓN DE COURANT.	4-12
TABLA 4-3. DIMENSIONES PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	4-13
TABLA 4-4. VALORES PROPUESTOS PARA EL MAPA DE POROSIDAD DEL MODELO.....	4-15
TABLA 4-5. VALORES PROPUESTOS PARA LA FRICCIÓN DEL FONDO EN EL FIORDO AYSÉN.	4-17
TABLA 4-6. DATOS ASIGNADOS PARA LA ROTURA DEL TSUNAMI EN EL FIORDO AYSÉN.	4-19
TABLA 4-7. VOLUMEN DESPLAZADO PARA LAS REMOCIONES EN MASA.....	4-24
TABLA 4-8. VALORES CONSIDERADOS PARA LA CONDICIÓN DE COURANT.	4-26
TABLA 4-9. VALORES PROPUESTOS PARA LA FRICCIÓN DEL FONDO EN EL FIORDO AYSÉN.	4-27
TABLA 5-1. PARÁMETROS RESULTANTES - REGISTRO REAL VERSUS MODELOS NUMÉRICOS.....	5-32
TABLA 5-2. PARÁMETROS RESULTANTES - REGISTRO REAL VERSUS MODELOS NUMÉRICOS.....	5-32
TABLA 5-3. PARÁMETROS MÁS SIGNIFICATIVOS REGISTRADOS POR LOS MODELOS.	5-35
TABLA 5-4. CONDICIONES INICIALES UTILIZADAS EN LOS MODELOS NUMÉRICOS.	5-36
TABLA 5-5. RESUMEN DE LOS RESULTADOS REGISTRADOS CON EL MODELO MIKE 21 HD.....	5-45
TABLA 6-1. PARÁMETROS POR REMOCIÓN EN MASA EN BAHÍA ACANTILADA.....	6-55
TABLA 6-2. VALORES CONSIDERADOS PARA LA CONDICIÓN DE COURANT.	6-56
TABLA 6-3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS REGISTRADOS CON EL MODELO MIKE 21 HD.....	6-62

INDICE DE FIGURAS

	Páginas
FIGURA 1-1. GEOGRAFÍA DE LA XI REGIÓN DE AYSÉN.....	1-2
FIGURA 1-2. ZONA DE ESTUDIO – FIORDO AYSÉN.....	1-3
FIGURA 1-3. SISTEMA DE FALLA LIQUIÑE-OFQUI (SFLO).....	1-6
FIGURA 1-4. MORFOLOGÍA DEL FIORDO AYSÉN EN 3D.....	1-7
FIGURA 1-5. LOCALIZACIONES EPICENTRALES REGISTRADOS EN LOS MESES ENERO-FEBRERO..	1-8
FIGURA 1-6. UBICACIÓN DE LAS DIFERENTES REMOCIONES EN MASA, JUNTO AL EPICENTRO.....	1-9
FIGURA 2-1. POSIBLES FUENTES DE ACTIVACIÓN DE UN TSUNAMI.....	2-1
FIGURA 2-2. TIPOS DE MOVIMIENTOS.....	2-3
FIGURA 2-3. ESQUEMA MAREOGRÁFICO DE UN TSUNAMI.....	2-6
FIGURA 2-4. DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LAS ONDAS DE SUPERFICIE.....	2-8
FIGURA 2-5. PROCESOS DE UN TSUNAMI INDUCIDO POR UNA REMOCIÓN EN MASA.....	2-11
FIGURA 2-6. TIPO DE TSUNAMIS INDUCIDO POR UNA REMOCIÓN EN MASA.....	2-12
FIGURA 2-7. PROCESOS DE GENERACIÓN DE UN TSUNAMI INDUCIDO POR UNA REMOCIÓN.....	2-13
FIGURA 2-8. EJEMPLO DE UN TSUNAMI DE PROPAGACIÓN RADIAL.....	2-15
FIGURA 2-9. REPRESENTACIÓN IDEALIZADA DE UN DIAGRAMA DE REFRACCIÓN.....	2-18
FIGURA 2-10. TIPO DE ROMPIENTES.....	2-20
FIGURA 2-13. TSUNAMI-BORE FORMADO EN EL RIO WAILUA, HAWÁI (1946).....	2-22
FIGURA 2-14. TSUNAMI-BORE PROPAGÁNDOSE POR UN RIO EN HOKKAIDO, JAPÓN (2003).....	2-22
FIGURA 2-13. DEFINICIÓN ESQUEMÁTICA DE UN RUN-UP DE OLA.....	2-23
FIGURA 3-1. SECCIÓN REPRESENTATIVA DE UNA OLA ROMPIENTE.....	3-30
FIGURA 3-2. DIAGRAMA DE GRILLA RECTANGULAR DEL MODULO MIKE 21 BW.....	3-31
FIGURA 3-3. DIAGRAMA DE GRILLA RECTANGULAR DEL MODULO MIKE 21 HD.....	3-37
FIGURA 4-1. CARTA NÁUTICA N°8610 DEL FIORDO AYSÉN.....	4-2
FIGURA 4-2. CARTA NÁUTICA N° 8611 DEL FIORDO AYSÉN.....	4-2
FIGURA 4-3. REGISTRO MAREOGRÁFICO DEL TSUNAMI EN AYSÉN.....	4-3
FIGURA 4-4. REGISTRO MAREOGRÁFICO AJUSTADO POLINÓMICAMENTE.....	4-4
FIGURA 4-5. REGISTRO MAREOGRÁFICO SIN LA ONDA DE MAREA.....	4-4
FIGURA 4-6. MAPA DE CATASTRO CON LOS EFECTOS DE LAS MAREJADAS.....	4-5
FIGURA 4-7. MAPA DEL TSUNAMI A CALIBRAR.....	4-7
FIGURA 4-8. DOMINIO FÍSICO DEL FIORDO AYSÉN (LÍNEA ROJA).....	4-10
FIGURA 4-9. BATIMETRÍA DEL FIORDO AYSÉN.....	4-11
FIGURA 4-10. TOPOGRAFÍA TERRESTRE DEL FIORDO AYSÉN.....	4-11
FIGURA 4-11. MAPA EN 2D DEL FIORDO AYSÉN CON LAS DIFERENTES ELEVACIONES DEL MAR...	4-14
FIGURA 4-12. MAPA DE POROSIDAD PARA LA ZONA DE ESTUDIO.....	4-15
FIGURA 4-13. MAPA DE FRICCIÓN DE FONDO PARA LA ZONA DE ESTUDIO.....	4-17
FIGURA 4-14. MAPA DE ABSORCIÓN DEL OLEAJE PARA LA ZONA DE ESTUDIO.....	4-18

FIGURA 4-15. ESQUEMA DE UN ROLLER.	4-19
FIGURA 4-16. DOMINIO FÍSICO DEL FIORDO AYSÉN.	4-22
FIGURA 4-17. ÁREA BATIMÉTRICA DEL FIORDO AYSÉN.	4-22
FIGURA 4-18. TOPOGRAFÍA TERRESTRE DEL FIORDO AYSÉN.	4-23
FIGURA 4-19. ESQUEMA TOPO-BATIMÉTRICO VARIABLE EN EL TIEMPO.	4-23
FIGURA 4-20. CONDICIONES DEL TSUNAMI A CALIBRAR.	4-25
FIGURA 4-21. ESQUEMA DE UN DESLIZAMIENTO REALIZADO CON EL MODELO MIKE 21 HD.	4-25
FIGURA 4-22. MAPA DE FRICCIÓN DE FONDO PARA LA ZONA DE ESTUDIO.	4-28
FIGURA 5-1. PUNTO DE CALIBRACIÓN MAREOGRÁFICA EN BAHÍA CHACABUCO.	5-31
FIGURA 5-2. SUPERPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS MIKE 21 HD Y MIKE 21 BW VS REAL.	5-31
FIGURA 5-3. PARÁMETROS DE ONDA REGISTRADA EN PUNTO DE CALIBRACIÓN - MIKE 21 BW.	5-33
FIGURA 5-4. PARÁMETROS DE ONDA REGISTRADA EN PUNTO DE CALIBRACIÓN - MIKE 21 HD.	5-34
FIGURA 5-5. MAPA 3D DEL TSUNAMI DE AYSÉN CON LOS DISTINTOS SECTORES A ANALIZAR.	5-35
FIGURA 5-6. DIAGRAMA DE ALTURAS Y VELOCIDAD EN ISLA MENTIROSA.	5-37
FIGURA 5-7. DIAGRAMA DE ALTURAS Y VELOCIDAD EN LOS ESTEROS LUMA-LECHE.	5-38
FIGURA 5-8. DIAGRAMA DE ALTURAS Y VELOCIDAD EN PUNTA COLA.	5-39
FIGURA 5-9. DIAGRAMA DE ALTURAS Y VELOCIDAD EN AGUAS CALIENTES.	5-40
FIGURA 5-10. DIAGRAMA DE ALTURA Y VELOCIDAD DEL TSUNAMI, T = 60 [S] (MIKE 21 HD).	5-41
FIGURA 5-11. DIAGRAMA DE ALTURA DEL TSUNAMI, T = 60 [S] (MIKE 21 BW).	5-41
FIGURA 5-12. DIAGRAMA DE ALTURA Y VELOCIDAD DEL TSUNAMI, T = 120 [S] (MIKE 21 HD).	5-42
FIGURA 5-13. DIAGRAMA DE ALTURA DEL TSUNAMI, T = 120 [S] (MIKE 21 BW).	5-43
FIGURA 5-14. DIAGRAMA DE ALTURA DEL TSUNAMI, T = 420 [S] (MIKE 21 BW).	5-43
FIGURA 5-15. DIAGRAMA DE ALTURA Y VELOCIDAD DEL TSUNAMI, T = 420 [S] (MIKE 21 HD).	5-44
FIGURA 5-16. MAPA DE INUNDACIÓN DEL FIORDO AYSÉN.	5-45
FIGURA 5-17. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN ISLA MENTIROSA.	5-46
FIGURA 5-18. TÍPICAS ALTURAS DE LAS ONDAS EN ISLA MENTIROSA Y ESTERO FRÍO.	5-46
FIGURA 5-19. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN PUNTA CAMELLO.	5-47
FIGURA 5-20. TÍPICAS ALTURAS DE LAS ONDAS EN CALETA DAGNY Y CALETA JORGE.	5-47
FIGURA 5-21. VISTA AÉREA DE LA DESTRUCCIÓN EN PLAYA BLANCA Y CALETA RABUDOS.	5-48
FIGURA 5-22. TÍPICAS ALTURAS DE LAS ONDAS EN PLAYA BLANCA Y CALETA RABUDOS.	5-48
FIGURA 5-23. RUN-UP CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN, PLAYA BLANCA - CALETA RABUDOS.	5-49
FIGURA 5-24. DAÑOS ESTRUCTURALES EN JAULAS SALMONERAS CERCA PUNTA YELCHO.	5-49
FIGURA 5-25. TÍPICAS ALTURAS EN YELCHO, CAL. BLUFF, B. CHACABUCO Y ENSENADA BAJA.	5-50
FIGURA 5-26. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN BAHÍA CHACABUCO.	5-50
FIGURA 5-27. TÍPICAS ALTURAS EN ISLA CARMÉN, RÍO AYSÉN, NALCAS, CIUDAD DE AYSÉN.	5-51
FIGURA 5-28. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN EL SECTOR RÍO AYSÉN.	5-51
FIGURA 5-29. TIEMPO DE ARRIBO SIMULADO CON MIKE 21 HD Y MIKE 21 BW.	5-52
FIGURA 5-30. MAPA DE RUN-UP DEL TSUNAMI: SERNAGEOMIN VS MIKE 21HD.	5-53
FIGURA 5-31. REGISTRO RUN-UP: MIKE 21 HD VS SERNAGEOMIN.	5-53
FIGURA 6-1. ÁREAS DE POSIBLES REMOCIONES EN MASA EN LA BAHÍA ACANTILADA.	6-54

FIGURA 6-2. ÁREAS CONSIDERADAS PARA LA SIMULACIÓN EN MIKE 21 HD.	6-56
FIGURA 6-3. DIAGRAMA DE ALTURA Y VELOCIDAD EN BAHÍA ACANTILADA ((T = 1 [S]).	6-57
FIGURA 6-4. ALTURAS Y VELOCIDADES DEL TSUNAMI EN BAHÍA ACANTILADA (T = 67 [S]).	6-58
FIGURA 6-5. ALTURAS Y VELOCIDADES DEL TSUNAMI EN BAHÍA ACANTILADA (T = 373 [S]).	6-59
FIGURA 6-6. ALTURAS Y VELOCIDADES DEL TSUNAMI EN BAHÍA ACANTILADA (T = 1800 [S]).	6-60
FIGURA 6-7. MAPA DE INUNDACIÓN DEL FIORDO AYSÉN.	6-61
FIGURA 6-8. TÍPICAS ALTURAS Y PERÍODOS DE LAS ONDAS EN ISLA CARMEN.....	6-62
FIGURA 6-9. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN LAS ISLAS CARMEN E PARTIDA. .	6-63
FIGURA 6-10. TÍPICAS ALTURAS EN LA I. DEL NALCAS, B. ACANTILADA, R. AYSÉN, C.AYSÉN.....	6-63
FIGURA 6-11. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN FRENTE A LA BAHÍA ACANTILADA. .	6-64
FIGURA 6-12. TÍPICAS ALTURAS EN B. CHACABUCO, P. YELCHO, R. CÓNDOR, C. BLUFF.....	6-64
FIGURA 6-13. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN BAHÍA CHACABUCO.....	6-65
FIGURA 6-14. TÍPICAS ALTURAS EN PLAYA BLANCA Y CALETA RABUDOS.....	6-65
FIGURA 6-15. RUN-UP EN PLAYA BLANCA Y CALETA RABUDOS.	6-66
FIGURA 6-16. TÍPICAS EN CALETA DAGNY Y CALETA JORGE.....	6-66
FIGURA 6-17. RUN-UP (R) CON LOS NIVELES MÁXIMOS DE INUNDACIÓN EN PUNTA CAMELLOS....	6-67
FIGURA 6-18. MAPA DE RUN-UP DEL TSUNAMI HIPOTÉTICO.	6-68
FIGURA 6-19. REGISTRO RUN-UP DEL TSUNAMI HIPOTÉTICO EN BAHÍA ACANTILADA.	6-68
FIGURA 6-20. TIEMPO DE ARRIBO DEL TSUNAMI.	6-69

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Páginas
FOTO 1-1. VISTA AÉREA DEL PUERTO CHACABUCO.	1-4
FOTO 1-2. VISTA AÉREA DE LA CIUDAD DE AYSÉN.	1-4
FOTO 1-3. CONO DE ESCORIAS RELATIVAMENTE MODERNO CARACTERÍSTICO DE LA ZONA.	1-6
FOTO 1-4. PRINCIPAL FLUJO DE DETRITOS OCURRIDO EN EL VALLE AL ESTE DE PUNTA COLA. ...	1-10
FOTO 1-5. REMOCIONES EN MASA OCURRIDA ENTRE EL ESTERO LUMA Y LA ISLA MENTIROSA. ...	1-10
FOTO 1-6. REMOCIÓN EN MASA EN LA RIBERA NORTE DE LA ISLA MENTIROSA.	1-11
FOTO 1-7. REMOCIÓN EN MASA OCURRIDA ENTRE LOS ESTEROS LUMA Y LECHE.	1-11
FOTO 1-8. REMOCIÓN EN MASA OCURRIDO AL ESTE DEL SECTOR AGUAS CALIENTES.	1-12
FOTO 1-9. OLA INICIAL DEL TSUNAMI EN LA RIBERA NORTE DE LA ISLA MENTIROSA.	1-13
FOTO 1-10. OLA INICIAL DEL TSUNAMI IMPACTANDO LA ISLA MENTIROSA.	1-13
FOTO 1-11. OLAJE INICIAL DEL TSUNAMI EN EL SECTOR ESTE DE AGUAS CALIENTES.	1-14
FOTO 1-12. RUN-UP DEJADO POR EL TSUNAMI EN LA ISLA MENTIROSA.	1-15
FOTO 1-13. EL ANTES Y DESPUÉS DEL TSUNAMI EN EL SECTOR ESTERO FRÍO.	1-16
FOTO 1-14. EL ANTES Y DESPUÉS DEL TSUNAMI EN EL SECTOR PUNTA CAMELLO.	1-17
FOTO 4-1. ELEVACIÓN INICIAL DEL TSUNAMI EN EL SECTOR NORTE DE LA ISLA MENTIROSA.	4-6
FOTO 4-2. RUN-UP MÁXIMO ALCANZADO POR EL TSUNAMI EN LA ISLA MENTIROSA.	4-6

REFERENCIAS

- Ref. 1:** Abbott & Skovgaard. (1978). *"On the numerical modelling of short waves in shallow water"*. Tech. Univ. Denmark, Denmark
- Ref. 2:** Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2009). Obtenido el 5 de marzo de 2009, de <http://www.bcn.cl/siit/regiones/region11/autoridad.htm>
- Ref. 3:** Bonilla, G. (2005). *"Inestabilidad de las laderas"*. Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER), Nicaragua.
- Ref. 4:** Carl B. Harbitz, Finn Løvholt, Geir Pedersen & Doug G. Masson. (2007). *"Mechanisms of tsunami generation by submarine landslides: a short review"*. Norwegian Journal of Geology.
- Ref. 5:** Danish Hydraulics Institute (DHI). (2007). *"Mike 21 Boussinesq wave module Scientific Documentation"*. Denmark.
- Ref. 6:** DHI Water & Environment. (2007). *"MIKE 21 Flow Model"*. Denmark.
- Ref. 7:** González, F.I., E. Bernard, P. Dunbar, E. Geist, B. Jaffe, U. Kanoglu, J. Locat, H. Mofjeld, A. Moore, C. Synolakis, V. Titov, and R. Weiss. (2007). *"Scientific and technical issues in tsunami hazard assessment of nuclear power plant sites"*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA), Seattle, WA.
- Ref. 8:** Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2000). *"Documentos de Referencia Volumen I: Dinámicas"*. Universidad de Cantabria, España.
- Ref. 9:** Heller, V. (2007). *"Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics"*. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) at the Swiss Federal Institute of Technology (ETH)., Zurich.
- Ref. 10:** Hermann M. Fritz, Willi H. Hager and Hans-Erwin Minor. (2001). *"Lituya Bay case: Rockslide impact and wave run-up"*. Swiss Federal institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland.
- Ref. 11:** Herrero, E. C. (2005). *"La peligrosidad de Tsunamis en las costas Española. Simulaciones"*. España.
- Ref. 12:** Kofoed-Hansen, H., & Cifres Giménez, E. *"Modelling of landslide-generated waves in MIKE 21"*. DHI Water & Environment, Denmark.
- Ref. 13:** López Munain, R. G. (2006). *"El desastre de Vaiont"*. Italia.
- Ref. 14:** Madsen & Sorensen. (1992). *"A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry"*. Danish Hydraulic Institute, Denmark.

- Ref. 15:** Madsen & Sorensen. (1998). *"Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations"*. Danish Hydraulics Institute, Denmark.
- Ref. 16:** Madsen, P. (1983). *"Wave reflection from a vertical permeable wave absorber"*. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Ref. 17:** Mingorance, F. (2006). *"Morfometría de la escarpa de falla histórica identificada al norte del cerro la cal, zona de Falla la cal, Mendoza"*
- Ref. 18:** Naranjo, J. A., Arenas, M., Clavero, J., & Lara, L. (2007). *"Estudio preliminar de peligros por Remociones en Masa en la zona afectada por el sismo (MW 6,2) del 21 de abril de 2007, región de Aysén"*. Sernageomin, Chile.
- Ref. 19:** Naranjo, J. A., Clavero, J., Moreno, H., & Basualto, D. (2007). *"Crisis sísmica en la comuna de Puerto Aysén Enero-Febrero 2007"*. Sernageomin, Chile.
- Ref. 20:** National Tsunami Hazard Mitigation Program. (2001). *"Designing for Tsunamis"*. NOAA, USGS, FEMA, NSF, Alaska, California, Hawaii, Oregon, and Washington.
- Ref. 21:** Nieuwkoop, J. v. (2007). *"Experimental and numerical modelling of tsunami waves generated by landslides"*. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Ref. 22:** Schaffer & Sorensen. (2004). *"Boussinesq-type modelling using an unstructured finite element technique"*. Danish Hydraulics Institute, Denmark.
- Ref. 23:** Serplac XI; Gobierno Regional de Aysén; Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica. (2005). *"Atlas Región de Aysén"*. Chile.
- Ref. 24:** Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). (2007). *"Carta de Inundación por Tsunami generado por Remociones en Masa. Puerto Aysén y Puerto Chacabuco"*. Chile.
- Ref. 25:** Sorensen & Madsen. (1990). *"A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics"*. Danish Hydraulic Institute, Denmark; Department of Harbours and Marine, Australia.
- Ref. 26:** Sorensen & Madsen. (1998). *"Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part 1. Model description and cross-shore motion of regular waves"*. Danish Hydraulics Institute, Denmark.
- Ref. 27:** Westen V. (2003). *"Deslizamientos"*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), The Netherlands.
- Ref. 28:** Winckler Grez, P. (2002). *"Evaluación del riesgo de inundación por tsunami en Quintero, Chile"*. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Ref. 29:** Centre, International Tsunami Information. (2006). *"Tsunami Glossary"*. Hawaii.

- Ref. 30:** R.M. Sorensen. (2006). *"Basic Coastal Engineering. 3rd edition"*. Department of Civil and Environmental Engineering Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania.
- Ref. 31:** Pascual, C. V. *"Introducción a la energía del oleaje y posibilidades de la costa vasca"*. Universidad de Cantabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, España.
- Ref. 32:** Yesa-Coagret. (s.f.). *Fotos del desastre del embalse de Vajont-Longarone*. Obtenido el 24 de julio de 2009, de <http://www.yesano.com/images/Vajont/index.htm>.
- Ref. 33:** Llasat, M. d. *"Algunas cuestiones sobre los tsunamis"*. Universidad de Barcelona, España.
- Ref. 34:** Comunidad de Educación Ambiental. (12 de abril del 2009). Obtenido de <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>.
- Ref. 35:** O.R. Sørensen , H.A. Schäffer, P.A. Madsen. (1998). *"Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations"*. International Research Centre for Computational Hydrodynamics(ICCH), Danish Hydraulic Institute (DHI). Denmark: Elsevier.
- Ref. 36:** Danish Hydraulics Institute. (2007). *"Mike 21 BW, Manual de guía para el usuario"*. Danish.
- Ref. 37:** Wicander, R., & Monroe, J. (1999). *"Fundamentos de geología"* (Vol. Segunda edición). EEUU: Ciencias Thomson.
- Ref. 38:** W. Phillips, D. Garwood, and R. Stewart. (2008). *"Landslide hazards of Idaho: Idaho Geological Survey"*. Obtenido de www.idahogeology.org/DrawOnePage.asp?PageID=83
- Ref. 39:** Gutierrez, D. B. (2007). *"Carta de Inundación por Tsunami"*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), Sistema Nacional de Alarma de Maremotos, Chile.
- Ref. 40:** Departamento de Geología Aplicada, Dirección Nacional de Geología (Sernageomin). (2007). *"Estimación de parámetros de posibles remociones en masa que podrían afectar el sector de Bahía Acantilada en el fiordo Aysén, región de Aysén"*. Chile.
- Ref. 41:** Quezada, M. (2008). *"Estudio de Erosion Costera y Regeneracion de espacios Litorales. Una aplicación en Playa Papagayo, Quintero"*. Chile.

RESUMEN

El día 21 de abril de 2007 la XI Región de Aysén situada al Sur de Chile, fue sacudida por un sismo que alcanzó una magnitud de 6,2 en la escala Richter. En el momento del evento sísmico, a las 13:53 hora local (17:53 UTC), se desencadenó una serie de deslizamientos en diferentes ubicaciones geográficas del Fiordo Aysén, dando origen al primer tsunami por remoción en masa¹ que se registra profusamente en la costa de Chile.

Para caracterizar este fenómeno tsunamigénico se utilizaron los modelos numéricos Mike 21 BW y Mike 21 HD, basados en las ecuaciones de Boussinesq y Saint Venant, respectivamente. Estos modelos numéricos resuelven sus ecuaciones sobre una malla en dos dimensiones de diferencias finitas, permitiendo simular el tsunami mediante dos modelos matemáticos diferentes, y dos métodos para simular la perturbación inicial. El primer método es a través de un levantamiento inicial de la superficie de agua y el segundo es representado por una deformación vertical dinámica de la batimetría, y la influencia de factores debidos a las fuerzas viscosas y de inercia.

Los ajustes hidrodinámicos obtenidos de ambos modelos numéricos, se calibraron con el registro mareográfico ubicado a 10 km al sureste de la zona de los deslizamientos en Puerto Chacabuco, y se ajustaron a los registros de catastro de run-up e inundación generados en algunos sectores de la costa. Esta validación permitió realizar una simulación de un caso extremo hipotético de un posible riesgo de tsunami por remoción en masa en la Bahía Acantilada, situada en el mismo Fiordo Aysén. Los resultados arrojaron un área total de inundación de 9,028 [km²], registrándose elevaciones del frente de ola hasta la ciudad de Aysén, ubicada a 15 km de la Bahía Acantilada.

Los resultados obtenidos para cada caso, se presentan mediante cartas de inundación por tsunami, diagramas bidimensionales de alturas, campos de velocidades y simulaciones en 3D.

¹ "Denominados landslide tsunamis en la literatura en inglés".