



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO  
WAVEWATCH III EN LA SIMULACIÓN DE MAREJADAS DEL  
3/7/2013 Y DEL 8/8/2015**

César Antonio Esparza Acuña

Agosto 2017

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO WAVEWATCH III EN LA  
SIMULACIÓN DE MAREJADAS DEL 3/7/2013 Y DEL 8/8/2015

César Antonio Esparza Acuña

Comisión Revisora	Nota	Firma
José Beyá Marshall Profesor guía	_____	_____
Patricio Winckler Grez Revisor	_____	_____
Eduardo González Pacheco Revisor	_____	_____

*Este trabajo, considerado tanto en su totalidad como alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, ni institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal; ya sea 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.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar les agradezco a mi familia y mis amigos que me brindan día a día su apoyo incondicional, en las buenas y en las malas.

Me gustaría agradecer (sin orden de importancia) al equipo de trabajo del proyecto “Un Atlas de Oleaje para Chile”, a mi profesor guía Sr. José Beyá Marshall por disponer esta oportunidad para mí, al profesor Patricio Winckler Grez por revisar cada detalle y cada resultado. Se agradece la facilitación mediciones de oleaje al SHOA, al Proyecto Corfo-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz” y a la oficina consultora APUERTO Ingeniería Limitada en especial a Sr. Danilo Omeñaca por enseñarme los primeros pasos en este oficio.

*"Sé curioso, lee mucho, intenta nuevas cosas. Creo que lo que mucha gente califica como inteligencia, no es más que curiosidad"*

*Aaron Swartz  
(1986-2013)*

# **CONTENIDO**

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
1.1 MOTIVACIÓN.....	16
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	17
1.3.1 OBJETIVOS GENERALES .....	17
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.4 ALCANCES .....	18
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	19
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1 DEFINICIONES BASICAS .....	20
2.1.1 EL OLEAJE GENERADO POR VIENTO .....	20
2.1.2 MODELOS MATEMÁTICOS DE OLEAJE .....	20
2.1.3 LEYES BÁSICAS EN LA PREDICCIÓN DEL OLEAJE .....	21
2.1.4 TIPOS DE OLEAJE .....	22
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE.....	24
2.2.1 TEORÍA LINEAL DE AIRY (TLO).....	24
2.2.2 ESTADO DE MAR.....	26
2.2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	27
2.2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL .....	28
2.3 EVOLUCIÓN DEL ESPECTRO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....	32
2.3.1 ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN DEL OLEAJE CONSERVATIVA .....	32
2.3.2 TÉRMINOS FUENTE Y SUMIDERO DE ENERGÍA.....	35
2.3.3 MODELO NUMÉRICO WAVEWATCH III v4.18.....	36
2.3.4 PARAMETRIZACIÓN FÍSICA DEL INGRESO DE ENERGÍA POR VIENTO $S_{in}$ .....	41
2.3.5 PARAMETRIZACIÓN FÍSICA DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA $S_{ds}$ .....	45
2.3.6 INTERACCIONES NO LINEALES ENTRE CUADRUPLÉTAS $S_{nl}$ .....	51
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO .....	53
2.4.1 CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA .....	53
2.4.2 SISTEMAS DE ALTAS PRESIONES SEMIPERMANENTES .....	54
2.4.3 CICLONES EXTRATROPICALES .....	54
2.4.4 MODELOS DE REANÁLISIS ATMOSFÉRICOS .....	56
<b>3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....</b>	<b>58</b>
3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN DE OLEAJE .....	58
3.1.1 MEDICIONES DE OLEAJE .....	58
3.1.2 MODELOS NUMÉRICOS.....	59
3.2 CALIBRACIÓN DE BASE FÍSICA .....	60
3.3 ANTECEDENTES DE LAS MAREJADAS ANALIZADAS.....	63
3.3.1 MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013.....	63
3.3.2 MAREJADA DEL 8 DE AGOSTO DE 2015 .....	65
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>68</b>
4.1 CALIBRACIÓN DE BASE FÍSICA .....	68
4.2 FUENTES DE INFORMACIÓN .....	69
4.2.1 BATIMETRÍA.....	69
4.2.2 LINEA DE COSTA Y PRESENCIA DE ISLAS .....	69
4.2.3 REANÁLISIS ATMOSFÉRICOS FORZANTES.....	69
4.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO.....	70

4.3.1	MALLAS COMPUTACIONALES .....	70
4.3.2	PASOS DE TIEMPO .....	70
4.3.3	PARAMETRIZACIONES FÍSICAS .....	71
4.3.4	CARACTERÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES .....	73
4.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	74
4.4.1	EMPAREJAMIENTO DE DATOS ALTIMETRICOS Y SIMULADOS .....	74
4.4.2	ANÁLISIS CUALITATIVO ENTRE SIMULACIONES Y ALTIMETROS .....	75
4.4.3	ANÁLISIS ESTADISTICO ENTRE SIMULACIONES Y ALTÍMETROS .....	75
4.4.4	ANÁLISIS PUNTUAL CON MEDICIONES INSITU.....	76
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>77</b>
5.1	ANÁLISIS CUALITATIVO MODELO VS. ALTÍMETRO .....	77
5.1.1	MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013: BALANCE CFSR-TEST451 .....	77
5.1.2	MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013: BALANCE CFSR-TEST471 .....	79
5.1.3	MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013: BALANCE ERA-TEST471.....	81
5.1.4	MAREJADA DEL 8 DE AGOSTO DE 2015: BALANCE CFSR-TEST451 .....	83
5.1.5	MAREJADA DEL 8 DE AGOSTO DE 2015: BALANCE CFSR-TEST471 .....	85
5.1.6	MAREJADA DEL 8 DE AGOSTO DE 2015: BALANCE ERA-TEST471 .....	87
5.1.7	COMENTARIOS FINALES DEL ANÁLISIS CUALITATIVO.....	88
5.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO MODELO VS ALTÍMETRO.....	90
5.2.1	MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013: BALANCE CFSR-TEST451 .....	90
5.2.2	MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013: BALANCE CFSR-TEST471 .....	92
5.2.3	MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013: BALANCE ERA-TEST471.....	94
5.2.4	MAREJADA DEL 8 DE AGOSTO DE 2015: BALANCE CFSR-TEST451 .....	96
5.2.5	MAREJADA DEL 8 DE AGOSTO DE 2015: BALANCE CFSR-TEST471 .....	98
5.2.6	MAREJADA DEL 8 DE AGOSTO DE 2015: BALANCE ERA-TEST471 .....	100
5.2.7	RESUMEN ESTADISTICO .....	102
5.3	ANÁLISIS PUNTUAL CON MEDICIONES INSITU .....	104
5.3.1	MAREJADA DEL 3 DE JULIO DE 2013.....	104
5.3.2	MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015 .....	110
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>117</b>
6.1	ACERCA DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA.....	117
6.2	ACERCA DEL ANÁLISIS CUALITATIVO MODELO VS ALTÍMETRÍA.....	117
6.3	ACERCA DEL ANÁLISIS ESTADISTICO MODELO VS. ALTIMETRÍA .....	118
6.4	ACERCA DEL ANÁLISIS PUNTUAL CON MEDICIONES <i>INSITU</i> .....	118
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>121</b>
7.1	MEDICIONES ALTIMÉTRICAS Y CALIBRACIÓN OCEÁNICA .....	121
7.2	MEDICIONES INSITU Y VALIDACIÓN LOCAL .....	121
<b>8.</b>	<b>FUTURAS INVESTIGACIONES .....</b>	<b>123</b>
8.1	FORZAMIENTO DEL MODELO WWIII CON CORRIENTES SUPERFICIALES.....	123
8.2	FORZAMIENTO DEL MODELO WWIII CON EL REANÁLISIS ECMWF-ERA5.....	124
<b>9.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>125</b>
9.1	PROGRAMA GRIDGEN.....	125
9.2	EXPERIMENTO NUMÉRICO EFECTO GARDEN SPRINKLER.....	126
9.2.1	CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO Y TECNICAS DE ALIVIACIÓN .....	126
9.2.2	ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN.....	126
9.2.3	ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 1 <sup>ER</sup> ORDEN .....	128
9.2.4	ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN CON DIFUSIÓN CONTROLADA .....	129
9.2.5	ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN CON PROMEDIACIÓN .....	130

9.3	VELOCIDAD DE ADVECCIÓN DE LA EBAO.....	131
9.3.1	VELOCIDAD DE ADVECCIÓN EN EL ESPACIO GEOGRÁFICO .....	131
9.3.2	VELOCIDADES DE ADVECCIÓN EN EL ESPACIO ESPECTRAL .....	131
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>134</b>



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1. CONTENIDO ENERGÉTICO DE LAS OSCILACIONES DEL MAR Y DISTRIBUCIÓN FRECUENCIAL. FUENTE: LOSADA (2009).	20
FIGURA 2-2. MODELO DE GENERACIÓN DE OLEAJE POR VIENTO. FUENTE: BEYÁ ET AL. (2016).	22
FIGURA 2-3. EJEMPLO DE OLEAJE <i>SEA</i> . FUENTE: BABABIN (2011).	23
FIGURA 2-4. EJEMPLO DE OLEAJE <i>SWELL</i> . FUENTE: BABANIN (2011).	23
FIGURA 2-5. DISPERSIÓN DE FRECUENCIA DE LOS <i>SWELLS</i> DEL OCEANO PACIFICO DEL HEMISFERIO NORTE. LAS FIGURAS (A), (B) Y (C) DENOTA LA EVOLUCIÓN A ESCALA GLOBAL DE LOS PERIODOS PICO. LAS FIGURAS (D), (E) Y (F) DENOTAN LA EVOLUCIÓN A ESCALA GLOBAL DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	24
FIGURA 2-6. DESCRIPCIÓN REGULAR O MONOCROMÁTICA DEL OLEAJE. FUENTE: ADAPTADO DE DEAN Y DALRYMPLE (2015).	24
FIGURA 2-7. SERIE DE TIEMPO DE DESNIVELACIONES DE LA SUPERFICIE DEL MAR. FUENTE: MASSIE (2001).	26
FIGURA 2-8. DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH Y ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	27
FIGURA 2-9. SUPERPOSICIÓN DE OLAS MONOCROMÁTICAS QUE DEFINEN EL MODELO DE AMPLITUD Y FASE ALEATORIA. FUENTE: ADAPTADO DE EAK, 2002.	28
FIGURA 2-10. ESPECTRO DIRECCIONAL DE OLEAJE. FUENTE: ADAPTADO DE HOLTHUIJSEN (2007).	30
FIGURA 2-11. ESQUEMATIZACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE CORTE IMPLEMENTADOS EN EL PAQUETE ST4 DEL MODELO WWMIII. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	43
FIGURA 2-12. COEFICIENTES DE CRECIMIENTO DE OLEAJE. FUENTE: HOLTHUIJSEN (2007).	44
FIGURA 2-13. DEFINICIÓN ESQUEMÁTICA DE LA FUNCIÓN $\Lambda$ . FUENTE: REUL Y CHAPRON (2003).	47
FIGURA 2-14. COMPARACIÓN LOGARÍTMICA ENTRE LA PROBABILIDAD DE ROTURA DEL OLEAJE DOMINANTE $bt$ VERSUS EL PERALTE DEL OLEAJE DOMINANTE $\varepsilon$ . FUENTE: BANNER ET AL. (2000).	48
FIGURA 2-15. MEDICIONES DE LA DISIPACIÓN DEL OLEAJE <i>SWELL</i> . FUENTE: ADAPTADO DE ARDHUIN F., <i>OBSERVATION OF SWELL DISSIPATION ACROSS OCEANS</i> (2009).	49
FIGURA 2-16. ESQUEMATIZACIÓN DE LA OLA MICRO-ROMPIENTE. (A) CAPA LÍMITE, TURBULENCIA Y ONDAS CAPILARES. (B) ROMPIENTE DE UNA OLA CORTA CON PENETRACIÓN DE AIRE EN LA CRESTA. FUENTE: (A) MODIFICADO DE SIDDIQUI AND LOEWEN (2007), CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. (B) MODIFICADO DE KOGA (1982).	51
FIGURA 2-17. CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA DE 3 CELDAS. FUENTE: AHRENS (2008).	53
FIGURA 2-18. DISTRIBUCIÓN MEDIA DE LAS PRESIONES Y DE LOS PRINCIPALES FLUJOS EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA. FUENTE: HAYER & ESPINOZA (1987).	54
FIGURA 2-19. ESQUEMATIZACIÓN DE LA CICLOGÉNESIS (NOTAR QUE EL GIRO DE ESTE EJEMPLO ES ACORDE AL HEMISFERIO NORTE). FUENTE: ADAPTADO DE LOS APUNTES DE CLASE DE LA DRA. FERGUSON (2015). ESS-5 CIENCIAS ATMOSFÉRICAS UC-IRVINE.	56
FIGURA 3-1. DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXTREMOS EN FUNCIÓN DE LOS PERIODOS DE RETORNO PARA DIFERENTES FUENTES DE INFORMACIÓN DE OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS A LA CUADRA DE VALPARAÍSO. FUENTE WINCKLER ET AL. (2015).	60
FIGURA 3-2. SESGO (BIAS) PROMEDIO ENTRE EL ALTÍMETRO JASON1 VS <i>HINDCAST</i> PARA EL AÑO 2007 BAJO LA PARAMETRIZACIÓN DE BIDLOT ET AL. (2005) Y EL TEST441 DEL IFREMER. FUENTE: ARDHUIN ET AL. (2013).	61
FIGURA 3-3. BALANCES DE TÉRMINOS FUENTE PARA UN CAMPO DE OLEAJE QUE SE ENCUENTRA BAJO LA ACCIÓN DE VIENTO CONSTANTE DE MAGNITUD 10 M/S DURANTE 48 HRS. FUENTE: ARDHUIN ET AL. 2010.	62
FIGURA 3-4. CARTA SUPERFICIAL DE PRESIONES 3 DE JULIO DE 2013 A LAS 12:00. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ERA-INTERIM.	63
FIGURA 3-5. A) CARTA DE LA MAGNITUD Y DIRECCIÓN DE VIENTOS A 10 M DE ALTURA 3 DE JULIO DE 2013 A LAS 12:00. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ERA-INTERIM.	64

FIGURA 3-6. IMAGEN SATELITAL DEL DÍA 3 DE JULIO A LAS 12:00. FUENTE: MISIÓN GOES-12 PERTENECIENTE A LA NOAA. ....	64
FIGURA 3-7. CARTA SUPERFICIAL DE PRESIONES 8 DE AGOSTO DE 2015 A LAS 12:00UTC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ERA-INTERIM. ....	65
FIGURA 3-8. CARTA SUPERFICIAL DE VELOCIDAD DEL VIENTO 8 DE AGOSTO DE 2015 A LAS 12:00 UTC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ERA-INTERIM. ....	65
FIGURA 3-9. PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN EL YALI, SANTO DOMINGO Y VENTANAS, Y RESIDUO METEOROLÓGICO EN VALPARAÍSO. FUENTE: WINCKLER ET AL. (2015). ....	66
FIGURA 3-10. IMAGEN SATELITAL DEL CICLÓN EXTRATROPICAL 8 DE AGOSTO DEL 2015 A LAS 12:00 UTC. FUENTE: MISIÓN GOES-12 PERTENECIENTE A LA NOAA. ....	66
FIGURA 4-1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ..	68
FIGURA 4-2. DOMINIO NUMÉRICO DEL MODELO DE GENERACIÓN DE OLEAJE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	70
FIGURA 4-3. ALGORITMO DE EMPAREJAMIENTO TEMPORAL ENTRE LOS DATOS DEL ALTÍMETRO Y EL MODELO NUMÉRICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	74
FIGURA 4-4. SALIDA DE EJEMPLO PARA EL ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS RUTAS DEL MODELO VERSUS ALTÍMETRO. A) RUTAS EMPAREJADAS DEL MODELO; B) RUTAS DEL SATÉLITE C) DIFERENCIA MODELO-ALTÍMETRO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	75
FIGURA 5-1. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE JASON1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	77
FIGURA 5-2. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE JASON2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	77
FIGURA 5-3. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE CRYOSAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	78
FIGURA 5-4. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE JASON1 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	79
FIGURA 5-5. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE JASON2 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	79
FIGURA 5-6. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE CRYOSAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	80
FIGURA 5-7. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE JASON1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	81
FIGURA 5-8. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE JASON2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	81
FIGURA 5-9. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO <i>VERSUS</i> ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 15 DE JUNIO AL 15 DE JULIO DE 2013. SATÉLITE CRYOSAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	82
FIGURA 5-10. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE JASON2 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	83

FIGURA 5-11. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO VERSUS ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE CRYOSAT FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	83
FIGURA 5-12. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO EMPAREJADO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE SARAL FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	84
FIGURA 5-13. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO VERSUS ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE JASON2 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	85
FIGURA 5-14. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO VERSUS ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE CRYOSAT FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	85
FIGURA 5-15. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO VERSUS ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE SARAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	86
FIGURA 5-16. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO VERSUS ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE JASON2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	87
FIGURA 5-17. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO VERSUS ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE CRYOSAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	87
FIGURA 5-18. COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS TRAYECTORIAS DEL MODELO VERSUS ALTÍMETRO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471. EMPAREJAMIENTO DE DATOS ENTRE EL 1 AL 13 DE AGOSTO DE 2015. SATÉLITE SARAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	88
FIGURA 5-19. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451 Y EL ALTÍMETRO JASON1 ENTRE EL 15 DE JUNIO Y 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	90
FIGURA 5-20. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451 Y EL ALTÍMETRO JASON2 ENTRE EL 15 DE JUNIO Y 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	91
FIGURA 5-21. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451 Y EL ALTÍMETRO CRYOSAT ENTRE EL 15 DE JUNIO Y 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	91
FIGURA 5-22. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471 Y EL ALTÍMETRO JASON1 ENTRE EL 15 DE JUNIO Y 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	92
FIGURA 5-23 GRÁFICO DE DISPERSIÓN EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471 Y EL ALTÍMETRO JASON2 ENTRE EL 15 DE JUNIO Y 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	93
FIGURA 5-24. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471 Y EL ALTÍMETRO CRYOSAT ENTRE EL 15 DE JUNIO Y 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	93
FIGURA 5-25. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471 Y EL ALTÍMETRO JASON1 ENTRE EL 15 DE JUNIO Y EL 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	94
FIGURA 5-26. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471 Y EL ALTÍMETRO JASON2 ENTRE EL 15 DE JUNIO Y EL 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	94
FIGURA 5-27. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471 Y EL ALTÍMETRO CRYOSAT ENTRE EL 15 DE JUNIO Y EL 15 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	95
FIGURA 5-28. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451 Y EL ALTÍMETRO JASON2 ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	96

FIGURA 5-29. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451 Y EL ALTÍMETRO CRYOSAT ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	96
FIGURA 5-30. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST451 Y EL ALTÍMETRO SARAL ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	97
FIGURA 5-31. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471 Y EL ALTÍMETRO JASON2 ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	98
FIGURA 5-32. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471 Y EL ALTÍMETRO CRYOSAT ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	98
FIGURA 5-33 GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE CFSR-TEST471 Y EL ALTÍMETRO SARAL ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	99
FIGURA 5-34. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471 Y EL ALTÍMETRO JASON2 ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	100
FIGURA 5-35. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471 Y EL ALTÍMETRO CRYOSAT ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	100
FIGURA 5-36. GRÁFICO DE DISPERSIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO BAJO EL BALANCE ERA-TEST471 Y EL ALTÍMETRO SARAL ENTRE EL 1 Y EL 13 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	101
FIGURA 5-37. SERIE DE TIEMPO DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS. MAREJADA 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	104
FIGURA 5-38. RELACIÓN ENTRE LAS ALTURAS SIGNIFICATIVAS SIMULADAS VS MEDIDAS A LA CUADRA DE VALPARAÍSO. GRÁFICO DE LA IZQUIERDA: BOYA CURAUMILLA. GRÁFICO DE LA DERECHA: BOYA SHOA WATCHKEEPER.....	105
FIGURA 5-39. SERIE DE TIEMPO DE PERIODOS PICO. MAREJADA 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	105
FIGURA 5-40. RELACIÓN ENTRE PERIODOS PICO SIMULADOS VS MEDIDOS A LA CUADRA DE VALPARAÍSO. GRÁFICO DE LA IZQUIERDA: BOYA CURAUMILLA. GRÁFICO DE LA DERECHA: BOYA SHOA WATCHKEEPER .....	106
FIGURA 5-41. SERIE DE TIEMPO DE PERIODOS PICO. MAREJADA 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	107
FIGURA 5-42. BOYA NDBC 32012 PERTENECIENTE A LA NOAA. FUENTE NDBC. ....	107
FIGURA 5-43. SERIE DE TIEMPO DE ALTURA SIGNIFICATIVA. BOYA 32012 PARA EL EVENTO DEL 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. ....	108
FIGURA 5-44. COMPARACIÓN DE ALTURA SIGNIFICATIVA MODELADA VS MEDIDA. BOYA 32012 PARA EL EVENTO DEL 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. ....	108
FIGURA 5-45. SERIE DE TIEMPO DE PERIODOS PICO. BOYA 32012 PARA EL EVENTO DEL 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. ....	108
FIGURA 5-46. COMPARACIÓN DE PERIODOS PICO MODELADOS VS MEDIDOS. BOYA 32012 PARA EL EVENTO DEL 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA.....	109
FIGURA 5-47. SERIE DE TIEMPO DE DIRECCIONES PICO. BOYA 32012 PARA EL EVENTO DEL 3 DE JULIO DE 2013. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. ....	109
FIGURA 5-48. SERIE DE TIEMPO DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	110
FIGURA 5-49. SERIE DE TIEMPO DE PERIODOS PICOS. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	111
FIGURA 5-50. SERIE DE TIEMPO DE DIRECCIONES PICO. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	111
FIGURA 5-51. MAGNITUD DEL VIENTO DE 3HRS PARA EL REANÁLISIS CFSR Y ERA-INTERIM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	112
FIGURA 5-52. RAPIDEZ DEL VIENTO EN CONCÓN Y VENTANAS Y ALTURA SIGNIFICATIVA EN AGUAS PROFUNDAS FRENTE A VALPARAÍSO. ....	113

FIGURA 5-53. SERIE DE TIEMPO DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS DE LA BOYA 32012 DE LA NOAA. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	113
FIGURA 5-54. COMPARACIÓN DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS MODELADAS VS MEDIDAS POR LA BOYA NDBC 32012. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	114
FIGURA 5-55. SERIE DE TIEMPO DE PERIODOS PICO DE LA BOYA 32012 DE LA NOAA. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	114
FIGURA 5-54. COMPARACIÓN DE PERIODOS PICOS MODELADOS VS MEDIDOS POR LA BOYA NDBC 32012. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	115
FIGURA 5-56. SERIE DE TIEMPO DE DIRECCIONES PICO DE LA BOYA 32012 DE LA NOAA. MAREJADA 8 DE AGOSTO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	115
FIGURA 7-1. ESTADÍSTICAS REMALLADAS A PARTIR DE MEDICIONES ALTIMÉTRICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	121
FIGURA 8-1. ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA GRIDGEN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	125
FIGURA 8-2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS SCRIPTS IMPLEMENTADOS EN GRIDGEN V3.0. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE CHAWLA & TOLMAN (2007). .....	125
FIGURA 8-3. PROPAGACIÓN DE OLEAJE, $H_{M0}=2.5M$ ; $\Theta_M=240^\circ N$ ; $T_M=10S$ ; PROPAGACIÓN ESPACIAL BAJO ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	127
FIGURA 8-4. PROPAGACIÓN DE OLEAJE, $H_{M0}=2.5M$ ; $\Theta_M=240^\circ N$ ; $T_M=10S$ ; PROPAGACIÓN ESPACIAL BAJO ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN (ESPECTRO CON FACTOR DE INCREMENTO FRECUENCIAL DE 1.05 Y RESOLUCIÓN DIRECCIONAL DE 2.5°N). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	127
FIGURA 8-5. PROPAGACIÓN DE OLEAJE, $H_{M0}=2.5M$ ; $\Theta_M=240^\circ N$ ; $T_M=10S$ ; PROPAGACIÓN ESPACIAL BAJO ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 1 <sup>ER</sup> ORDEN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	128
FIGURA 8-6. PROPAGACIÓN DE OLEAJE, $H_{M0}=2.5M$ ; $\Theta_M=240^\circ N$ ; $T_M=10S$ ; PROPAGACIÓN ESPACIAL BAJO ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 1 <sup>ER</sup> ORDEN. MALLA ESPECTRAL DIRECCIONAL CON UN OFFSET DE UN 50% AL MALLADO ORIGINAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	128
FIGURA 8-7. PROPAGACIÓN DE OLEAJE, $H_{M0}=2.5M$ ; $\Theta_M=240^\circ N$ ; $T_M=10S$ ; PROPAGACIÓN ESPACIAL BAJO ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN CON TÉRMINOS DIFUSIVOS DE BOOJI & HOLTHUIJSEN, CONTROL DE DIFUSIÓN BAJO UNA EDAD DEL SWELL DE 2 DÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	129
FIGURA 8-8. PROPAGACIÓN DE OLEAJE, $H_{M0}=2.5M$ ; $\Theta_M=240^\circ N$ ; $T_M=10S$ ; PROPAGACIÓN ESPACIAL BAJO ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN CON TÉRMINOS DIFUSIVOS DE BOOJI & HOLTHUIJSEN, CONTROL DE DIFUSIÓN BAJO UNA EDAD DEL SWELL DE 4 DÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	130
FIGURA 8-9. PROPAGACIÓN DE OLEAJE, $H_{M0}=2.5M$ ; $\Theta_M=240^\circ N$ ; $T_M=10S$ ; PROPAGACIÓN ESPACIAL BAJO ESQUEMAS NUMÉRICOS DE 3 <sup>ER</sup> ORDEN CON PROMEDIACIÓN DE TOLMAN FUERTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	130

## LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1. CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE DE ACUERDO A SU PROFUNDIDAD. ....	25
TABLA 2-2. PAQUETES FÍSICOS INCLUIDOS EN EL MODELO WWIII. FUENTE: ADAPTADO DE HIDALGO ET AL. (2015).....	37
TABLA 2-3. DETALLES DE LAS FUENTES DE INFORMACIÓN DISPONIBLES DE RE-ANÁLISIS ATMOSFÉRICOS QUE CONTIENEN VIENTOS SUPERFICIALES Y CONCENTRACIONES DE HIELO MARINO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	57
TABLA 3-1. MISIONES ALTIMÉTRICAS UTILIZADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	58
TABLA 3-2. MEDICIONES <i>INSITU</i> UTILIZADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	58
TABLA 3-3. FUENTES DE INFORMACIÓN DE OLEAJE MÁS UTILIZADAS EN CHILE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	59
TABLA 4-1. PASOS DE TIEMPO DE PROPAGACIÓN ESPACIAL.....	71
TABLA 4-2. COEFICIENTES FÍSICOS DE CRECIMIENTO PARA LOS BALANCES CONSIDERADOS. FUENTE: ADAPTADO DE TOLMAN (2014).....	72
TABLA 4-3. COEFICIENTES FÍSICOS DE DISIPACIÓN PARA LOS BALANCES CONSIDERADOS. FUENTE: ADAPTADO DE TOLMAN (2014).....	73
TABLA 4-4. ESCENARIOS DE COEFICIENTES FÍSICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	73
TABLA 5-1. ESTADÍGRAFOS ESTIMADOS PARA TODOS LOS ESCENARIOS Y EVENTOS DE OLEAJE EXTREMO CONSIDERADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	102



## **RESUMEN**

En el presente trabajo se expone una calibración y validación de base física del modelo numérico WAVEWATCH III v4.18b (Tolman, 2014) aplicado a la simulación de las marejadas ocurridas el día 3/7/2013 y el día 8/8/2015. Para ello, se elaboró una propuesta metodológica que incluyó verificar tres balances energéticos que cuantifican los términos fuente de la ecuación de balance de acción de oleaje (denominados en este trabajo como CFSR-TEST451, CFSR-TEST471 y ERA-TEST471) y así evaluar el desempeño del modelo numérico sobre la base de su configuración física.

La metodología consistió en primera instancia en comparar las alturas significativas simuladas y muestreadas por los altímetros, con el objeto de identificar cualitativa y estadísticamente el error de los balances energéticos propuestos, considerando toda la riqueza de información espacial que presenta dicha medición. Para lograr aquello, fue necesario elaborar una técnica de emparejamiento entre los datos muestreados a lo largo de las trayectorias altimétricas y los resultados de las simulaciones. Posteriormente, utilizando mediciones *insitu*, se verificó cualitativamente la representación de los picos energéticos de los parámetros de resumen a la cuadra de Valparaíso y Arica, para los días 3 de julio de 2013 y 8 de agosto de 2015. El estado de mar calibrado, fue cuantificado únicamente en la zona central de Chile a la cuadra de Valparaíso.

Las simulaciones fueron forzadas con vientos a 10 m de altura proveniente de los reanálisis atmosféricos NOAA-CFSR (Saha et al., 2010) y ECMWF ERA Interim (Dee et al., 2011). Los altímetros utilizados pertenecen a la red satelital del proyecto GlobWave. Las mediciones *insitu* de boyas oceanográficas fueron facilitadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) y el Centro Nacional de Datos de Boyas (National Data Buoy Center, NDBC) adjunto a la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) de los Estados Unidos.

Los resultados demostraron que para los eventos de oleaje extremo analizados, el balance energético de términos fuente definido por defecto en la versión 4.18b del modelo numérico WAVEWATCH III (CFSR-TEST451), tendió a sobrestimar la altura significativa en particular en las zonas comprendidas entre las latitudes 40 a 60°S. El error sistemático de dicho balance se reduce al reajustar el modelo numérico a la nueva parametrización física recomendada por Ardhuin (2015), con el cual en cierta medida se atenuaron los sesgos positivos en dicha zona. Con ello se logró evidenciar que el evento ocurrido el 3/7/2013 presentó a la cuadra de Valparaíso, una altura significativa de  $H_{m0} = 6.3$  m, un periodo pico de  $T_p = 18.8$  s y una dirección pico de  $\theta = 239$  °N. De igual manera, el evento ocurrido el 8 agosto de 2015, presentó a la cuadra de Valparaíso, una altura significativa  $H_{m0} = 7.20$  m, un periodo pico de  $T_p = 11.8$  s y una dirección pico de 336°N.

Al final de este trabajo se plantea una recomendación general, con el objeto que sirva como guía al momento de simular un clima de olas de largo plazo con el modelo WAVEWATCH III.

**Palabras clave:** Marejadas, tormentas, oleaje, *hindcast*, *swell*, modelos numéricos de fase promediada, WAVEWATCH III, altimetría, parametrizaciones físicas, balance de términos fuente.