



Facultad de Ingeniería

Memoria de titulación para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREJADAS DEL VERANO 2015-16 Y SU RELACIÓN CON FENÓMENO “EL NIÑO”

Diego Ignacio Becerra Godoy

Diciembre 2017

APROBACIÓN

CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREJADAS DEL VERANO 2015-16 Y SU RELACIÓN CON FENÓMENO “EL NIÑO”

Diego Ignacio Becerra Godoy

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Dra. Catalina Aguirre Galaz
Profesora guía

Comandante Luis Vidal
Jefe Servicio Meteorológico de la
Armada

Dr. Aldo Montecinos
Oceanógrafo
Académico de la Universidad de
Concepción

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.

Diego Becerra Godoy

Catalina Aguirre

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a:

Mi profesora guía, Catalina Aguirre, gran profesional muy inteligente que siempre tuvo la mejor disposición para responder mis dudas, guiar, aconsejar y encaminar este gran trabajo. Muchas veces destinando más tiempo del disponible, muy entusiasta, simpática y motivadora. Estoy muy agradecido de trabajar con ella, espero nos volvamos a encontrar laboralmente.

A Andrea Ignacia, por levantarme cuando estaba complicado, por estar en cada momento que lo necesitaba, por soportar mis momentos estresantes, por estar conmigo a pesar de dedicar todo mi tiempo a los estudios. Fue el gran apoyo emocional constante que tuve y que necesité para lograr el éxito, estaré eternamente agradecido.

A mi Abueli tere, por inculcarme valores, guiar mi infancia, por siempre preocuparse y estar atenta de mí. Quisiera que la vida fuera eterna para vivirla con usted.

A mis padres, Andrea y Jose Luís, por sacrificarse durante muchos años para entregarme la mejor educación y calidad de vida posible. Muchas gracias papás.

A Mario Cáceres Soto por su excelente disposición en responder dudas y guiar en algunos procesamientos de datos. Por reunirse conmigo a conversar de la tesis y de la vida, muchas gracias.

A mis compañeros de carrera, Diego Silva y Rodrigo Campos, por la cooperación y compañía en los almuerzos. Permitieron que los días pasaran más rápidos y la motivación fuera distinta.

*Finalmente, quiero agradecer a las entidades que aportaron en la realización de esta memoria: Empresa ING.MAT S.A por entregarme los datos necesarios para mi estudio a través de **SIPROL®**, al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) por entregarme información espectral y parámetros de resumen de la boya watchkeeper, junto con datos del nivel del mar de Valparaíso.*

Dedicado a mi familia y
a mis futuras generaciones.

"El éxito no está en la perfección, sino en la motivación, el esfuerzo y la constancia"

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS Y ALCANCES	3
3	MARCO TEÓRICO	5
3.1	GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL OLEAJE.....	5
3.1.1	GENERACIÓN	5
3.1.2	PROPAGACIÓN OCEÁNICA: DISPERSIÓN Y CLASIFICACIÓN	5
3.1.3	MAREJADAS.....	7
3.2	ZONAS DE GENERACIÓN EN EL PACÍFICO NORTE	7
3.2.1	CLIMATOLOGIA SINÓPTICA EN EL PACÍFICO NORTE.....	9
3.3	FENÓMENO EL NIÑO.....	10
3.3.1	FENÓMENO OCÉANO-ATMOSFÉRICO	10
3.3.2	ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI).....	12
3.3.3	RELACIÓN CON PATRONES ATMOSFÉRICOS EN HEMISFERIO NORTE 14	
4	METODOLOGÍA.....	15
4.1	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	15
4.1.1	BOYA WATCHKEEPER	15
4.1.2	SIPROL®	15
4.1.3	CAWRC CSIRO.....	17
4.2	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	20
4.2.1	VALIDACIÓN.....	20
4.2.2	SERIES DE TIEMPO	21
4.2.3	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN.....	22
4.2.4	ANÁLISIS DE COMPUESTOS	22
4.2.5	PROPAGACIÓN DE ENERGÍA	23
5	RESULTADOS	25

5.1	VALIDACIÓN.....	25
5.1.1	CAWRC CSIRO.....	25
5.1.2	SIPROL®	28
5.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREJADAS DEL NOROESTE.....	32
5.2.1	SERIES DE TIEMPO PARA EL NIÑO EXTREMO 1982-83 Y 1997-98.....	32
5.2.2	SERIES DE TIEMPO PARA EL NIÑO EXTREMO 2015-16.....	33
5.3	CORRELACIONES MENSUALES Y ESTACIONALES CON SOI.....	37
5.4	ANÁLISIS DE COMPUESTOS DE EVENTOS EL NIÑO EXTREMO	40
5.5	ANÁLISIS DE COMPUESTOS DE EVENTOS EL NIÑO FUERTE	58
5.6	PROPAGACIÓN DE ENERGÍA	61
6	DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
7	CONCLUSIONES	74
8	REFERENCIAS	76
9	ANEXOS.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 4-1: Información geográfica de boyas virtuales de SIPROL®.....	17
Tabla 4-2: Información geográfica de boyas virtuales de CAWRC CSIRO.....	19
Tabla 4-3: Espectros de CAWRC CSIRO seleccionados.	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Titulares en medios de comunicación. A) 16/12/15, B) 24/01/16, (C, D, E) 25/01/16, F) 26/01/16, G) 26/01/16, H) 6/02/16, I) 14/02/16 y J) 6/03/2016..	2
Figura 3-1: Formación de tipos de oleaje, según las características de su generación.	5
Figura 3-2: Dispersión direccional y radial del oleaje.	6
Figura 3-3: Campo de presión atmosférica superficial. La posición del centro promedio de la Baja Aleutiana en el invierno boreal es indicada con una X. Las unidades están en hectopascales [hPa].....	8
Figura 3-4: Trayectorias de ciclones en el hemisferio Norte.....	9
Figura 3-5: Frecuencia promedio de tormentas en el hemisferio Norte. A) Invierno boreal B) Verano boreal.....	10
Figura 3-6: Anomalía de TSM en [°C] del índice 3.4. En color negro se muestran los eventos El Niño Extremo y en azul los eventos El Niño Fuerte..	11
Figura 3-7: Anomalías (C°) promedio de la temperatura superficial del Océano (SST, por sus siglas en inglés) para la semana centrada el 2 de diciembre de 2015, 20 de enero 2016, 2 de marzo 2016 y 4 de mayo 2016. Las anomalías son calculadas utilizando como referencia base los periodos promedio semanales de 1981-2010.....	11
Figura 3-8: Índice de Oscilación del Sur (SOI).	12
Figura 3-9: Periodo estable e inestable de línea de agua.	13
Figura 3-10: Índices de regiones El Niño.	13
Figura 4-1: Ubicación de boya watchkeeper 2010 y 2015-16.....	15
Figura 4-2: Ubicación de boyas virtuales SIPROL® seleccionadas frente a Chile y costa del Perú.	16
Figura 4-3: Resolución de grilla del modelo utilizado en los 32 años de hindcast. Las cuadrículas de alta resolución se anidan dentro de una cuadrícula global de 0,4°. Las zonas azules indican regiones de 10' de resolución (~ 18 km) y las áreas rojas indican las resoluciones de 4' (~ 7 km).....	18

Figura 4-4: Ubicación de boyas virtuales CAWRC CSIRO frente Chile y costa del Perú..	19
Figura 4-5: Distribución de boyas virtuales (Puntos azules) y trayectos (Líneas segmentadas) en el Océano Pacífico de la base de datos CAWRC CSIRO..	23
Figura 5-1: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para HS. La barra de colores muestra la concentración de datos por bin (rango de colores).....	25
Figura 5-2: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para TM.	26
Figura 5-3: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para TP.....	26
Figura 5-4: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para DMO.....	27
Figura 5-5: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para DP.	28
Figura 5-6: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para HS.	28
Figura 5-7: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para TM.	29
Figura 5-8: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para TP.....	30
Figura 5-9: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para DMO.....	30
Figura 5-10: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia (color rojo) para DP.....	31
Figura 5-11: Series de tiempo de energía cuarto cuadrante de CAWRC CSIRO y nivel del mar de Valparaíso en DEF para eventos El Niño Extremo 1982-83 y 1997-98. A) Energía 1982-83, B) Nivel del mar 1982-83, C) Energía 1997-98 y D) Nivel del mar 1997-98.....	32
Figura 5-12: Comparación de series boya watchkeeper 2015-16 vs SIPROL®. A) Altura de ola significativa, B) Periodo peak, C) Periodo medio, D) Dirección media de oleaje, E) Dirección peak.....	34
Figura 5-13: A) Potencia total, B) Energía espectral (cuarto cuadrante) y C) Nivel del mar estación Valparaíso.	35
Figura 5-14: Correlación mensual. A) Anomalías de presión atmosférica vs SOI. B) Anomalías de velocidad de viento superficial vs SOI. C) Anomalías de altura de ola significativa vs SOI.	37

Figura 5-15: Correlación DEF para los 32 años. A) Anomalías de presión atmosférica vs SOI. B) Anomalías de velocidad de viento superficial vs SOI. C) Anomalías de altura de ola significativa vs SOI.....	39
Figura 5-16: Climatología estacional de presión atmosférica [hPa]. A) invierno boreal (DEF), B) verano boreal (JJA).	40
Figura 5-17: Promedio de presión atmosférica [hPa] en (DEF). A) 1982-83, B) 1997-98 y C) 2015-16.....	41
Figura 5-18: Anomalías de presión atmosférica [hPa]. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.	42
Figura 5-19: Climatología estacional de velocidad de viento superficial [m/s]. A) invierno boreal (DEF), B) verano boreal (JJA).	44
Figura 5-20: Promedio de velocidad de viento superficial [m/s] en (DEF). A) 1982-83, B) 1997-98 y C) 2015-16.	45
Figura 5-21: Anomalías de velocidad de viento superficial [m/s]. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.	46
Figura 5-22: Climatología estacional de altura significativa [m]. A) invierno boreal (DEF), B) verano boreal (JJA).	47
Figura 5-23: Promedio de alturas significativas [m] en (DEF). A) 1982-83, B) 1997-98 y C) 2015-16.	48
Figura 5-24: Anomalías de alturas significativas [m]. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.....	49
Figura 5-25: Anomalías de periodo peak [s]. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.....	50
Figura 5-26: Flechas rojas indican el promedio mensual de dirección peak del oleaje y flechas negras indican la climatología (Correspondiente al mes evaluado) de dirección peak del oleaje. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero, G) diciembre 2015, H) enero 2016, y I) febrero 2016.....	51
Figura 5-27: Flechas rojas indican el promedio mensual de dirección media del oleaje y flechas negras indican la climatología (Correspondiente al mes evaluado) de dirección media del oleaje. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.. ...	52

Figura 5-28: Anomalías de densidad de energía espectral [$m^2/Hz \cdot Deg$] de la boya virtual 3519 localizada a $10^\circ S$ y $80^\circ W$. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998 y F) febrero 1998.....	53
Figura 5-29: Anomalías de densidad de energía espectral [$m^2/Hz \cdot Deg$] de la boya virtual 3489 localizada a $20^\circ S$ y $80^\circ W$. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998 y F) febrero 1998.	54
Figura 5-30: Anomalías de densidad de energía espectral [$m^2/Hz \cdot Deg$] de boya virtual 3460 localizada a $30^\circ S$ y $80^\circ W$ y boya virtual 882 localizada a $26.333056^\circ S$ y $79.916944^\circ W$. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.....	55
Figura 5-31: Anomalías de densidad de energía espectral [$m^2/Hz \cdot Deg$] de la boya virtual 3431 localizada a $40^\circ S$ y $80^\circ W$. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998 y F) febrero 1998.	56
Figura 5-32: Anomalías de presión atmosférica [hPa]. A) diciembre 1986, B) enero 1987, C) febrero 1987, D) diciembre 1991, E) enero 1992, F) febrero 1992, G) diciembre 2004, H) enero 2005, I) febrero 2005, J) diciembre 2009, K) enero 2010 y L) febrero 2010.....	58
Figura 5-33: Anomalías de velocidad de viento superficial [m/s]. A) diciembre 1986, B) enero 1987, C) febrero 1987, D) diciembre 1991, E) enero 1992, F) febrero 1992, G) diciembre 2004, H) enero 2005, I) febrero 2005, J) diciembre 2009, K) enero 2010 y L) febrero 2010..	59
Figura 5-34: Anomalías de alturas significativas [m]. A) diciembre 1986, B) enero 1987, C) febrero 1987, D) diciembre 1991, E) enero 1992, F) febrero 1992, G) diciembre 2004, H) enero 2005, I) febrero 2005, J) diciembre 2009, K) enero 2010 y L) febrero 2010..	60
Figura 5-35: Diagrama Hovmoller (trayectoria 1) de energía espectral en [m^2] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1982, B) enero 1983 y C) febrero 1983..	61
Figura 5-36: Diagrama Hovmoller (trayectoria 2) de energía espectral en [m^2] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1982, B) enero 1983 y C) febrero 1983..	62
Figura 5-37: Diagrama Hovmoller (trayectoria 3) de energía espectral en [m^2] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1982, B) enero 1983 y C) febrero 1983..	63
Figura 5-38: Diagrama Hovmoller (trayectoria 4) de energía espectral en [m^2] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1982, B) enero 1983 y C) febrero 1983..	64
Figura 5-39: Diagrama Hovmoller (trayectoria 5) de energía espectral en [m^2] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1982, B) enero 1983 y C) febrero 1983..	65
Figura 5-40: Diagrama Hovmoller (trayectoria 1) de energía espectral en [m^2] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1997, B) enero 1998 y C) febrero 1998..	66
Figura 5-41: Diagrama Hovmoller (trayectoria 2) de energía espectral en [m^2] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1997, B) enero 1998 y C) febrero 1998..	67

Figura 5-42: Diagrama Hovmoller (trayectoria 3) de energía espectral en [m ²] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1997, B) enero 1998 y C) febrero 1998.	68
Figura 5-43: Diagrama Hovmoller (trayectoria 4) de energía espectral en [m ²] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1997, B) enero 1998 y C) febrero 1998.	68
Figura 5-44: Diagrama Hovmoller (trayectoria 5) de energía espectral en [m ²] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1997, B) enero 1998 y C) febrero 1998.. . . .	69

RESUMEN

Durante el verano 2015-2016 las marejadas con dirección Noroeste (NW) fueron muy recurrentes e intensas, con gran contenido de energía en comparación a años anteriores. El fenómeno tuvo un gran impacto mediático, debido a los daños que provocó sobre la infraestructura costera, el turismo, playas e incluso en la pérdida de vidas. Además, considerando que durante el 2015 se desarrolló un fenómeno El Niño, considerado “Extremo”, se establece la siguiente hipótesis; “El fenómeno El Niño tuvo un impacto significativo en la intensidad de las marejadas NW del verano 2015-2016 presentes en la costa de Chile”.

En base a datos de simulaciones numéricas de oleaje, de tipo *hindcasting* denominado CAWRC CSIRO y *forecasting* denominado **SIPROL®**, en este trabajo se cuantifican las anomalías del oleaje durante el verano 2015-2016, y se demuestra que existe una relación significativa del fenómeno El Niño en la intensidad de las marejadas NW. Además, se cuantifican las anomalías de energía espectral durante eventos El Niño Extremo, y se realizan comparaciones en distintos puntos frente a Chile. Finalmente, se realiza un análisis de propagación de energía espectral desde el Pacífico Norte hasta la costa de Chile.

Los resultados muestran que los mayores impactos en la costa se debieron a oleaje del NW en ocurrencia conjunta con pleamares en sicigia. Las correlaciones de las anomalías de altura de ola con el Índice de Oscilación del Sur (SOI), muestran que existe una relación significativa entre el fenómeno El Niño y las anomalías de las alturas de olas en el Pacífico Norte. Además, mediante el análisis de compuestos se pudo establecer que existe una importante disminución de la presión atmosférica y una intensificación de la velocidad de los vientos superficiales en el Pacífico Norte cuando se presenta un fenómeno El Niño “Extremo”. Del análisis de propagación de energía, se pudo establecer que los frentes de olas que son propagados desde el centro de las latitudes medias del Pacífico Norte son las que tienen mayor susceptibilidad de generar daños en las bahías abiertas al NW en la costa de Chile.

ABSTRACT

During the summer of 2015-2016 extreme waves from Northwest (NW) direction were very recurrent and intense, they brought a with great amount of energy compared to previous years. The phenomenon had a huge media coverage, due to significant impacts on infrastructure, tourism, beaches and even loss of human life. Regarding that during 2015 an "extreme" warm phase of El Niño Southern Oscillation, was developed, the following hypothesis was established; "El Niño Southern Oscillation play a significant role impact on the extreme waves from NW present at the coast of Chile during summer 2015-2016".

Based on numerical wave simulations, *hindcasting* from CAWRC CSIRO data set and *forecasting* from **SIPROL**® data, this work quantifies wave anomalies during the summer of 2015-2016 and demonstrates that there is a significant relationship between El Niño Southern Oscillation and intensity of extreme waves from NW. Furthermore, spectral energy anomalies are quantified during extreme warm phases of El Niño Southern Oscillation, and comparisons are made at different points of the coast of Chile. Finally, a spectral energy propagation analysis is performed from the North Pacific to the coast of Chile.

Results show that the greatest impacts on the coast were due to extreme waves from NW in conjunction with high tides during spring tides. The correlations of wave height anomalies with the Southern Oscillation Index (SOI) show that there is a significant relationship between the El Niño Southern Oscillation and the wave heights anomalies in the North Pacific. In addition, through a composite analysis, it was possible to establish that there is a significant decrease in atmospheric pressure and an increase in the velocity of surface winds in the North Pacific when an "extreme" El Niño Southern Oscillation occurs. From the analysis of energy propagation, it is established that the wave fronts that are propagated from the center of the mid latitudes of the North Pacific are more susceptible to generate damages in the bays open to the NW in the coast of Chile.