



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

ANÁLISIS MULTIVARIADO DE VALORES EXTREMOS DE OLEAJE EN CHILE

Claudio Alejandro Meza Valle

Junio 2016

ANÁLISIS MULTIVARIADO DE VALORES EXTREMOS DE OLEAJE EN CHILE

Claudio Alejandro Meza Valle

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Sr. Hugo Acuña Sfrasani
Profesor guía

Sr. Roberto Salinas Naranjo
Integrante de Comisión

Sr. José Beyá Marshall
Integrante de Comisión

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.

Claudio Alejandro Meza Valle

AGRADECIMIENTOS

A ti Pamela Eileen, te agradezco el incondicional apoyo que me has dado en este largo trayecto, el amor y ánimo de cada día, y por sobre todas las cosas, por la ciega confianza que siempre has tenido en mí, aun cuando yo no he tenido las fuerzas suficientes. Te amo y sin ti nada de esto podría haber sido posible. Soy lo que soy gracias a tu persona. Infinitas gracias.

Kevin Alejandro, Isabella Agustina y Emilia Camille, mis niños y mi principal razón de ser.

A mis padres Claudio y Pamela, los amo, esto es para ustedes. Espero ser el reflejo de lo que siempre quisieron para mí. Esto representa toda la dedicación que a lo largo del tiempo pusieron en mí y en mi formación. La vida me eligió para ser el primero de muchos. Espero ser un ejemplo para los más pequeños de mi familia y puedan seguir el camino del estudio. Yo pondré todas mis ganas y energías para que así sea.

A los más locos, mis hermanos Esteban Andrés y Martín Alexis. Gracias por la vida de sonrisas y alegrías. Esto es para ustedes queridos míos.

A todos mis familiares que han estado haciendo el aguante durante toda mi vida, mis abuelos, mis tíos y tías, mis primos y primas. Nombrarlos uno por uno tomaría quizás más hojas de las que contiene este documento. Sin embargo, agradezco de manera especial a mi abuela Sonia Fuentes, a mi tío y amigo Mauricio Meza y a mi querida tía Guicela Valle, quienes han estado en mi caminar durante toda mi vida. Muchas gracias por su incondicional apoyo y cariño.

A mi amigo y profesor guía, Hugo Acuña Sfrasani, quien siempre tuvo una palabra de aliento y motivación, y quien depositó su confianza en mí para realizar esta memoria.

A mis amigos Matías Quezada y Benjamín Hernández, los cuales forman parte importante de mi carrera y en especial de este trabajo, ya que, con sus comentarios y sugerencias, cada vez fue mejorando.

A los profesores Álvaro Valdivia Olivares, Rubén Escanilla Camus y Pablo González Lever, motivadores que siempre me han apoyado hasta el día de hoy.

A mi gran amigo Felipe Concha, por los años de amistad y las innumerables jornadas de estudio.

A mis compañeros de estudio los brochas Ariel Gallardo, César Esparza, Rodrigo Leal, Janisse Ferrada por aquellas jornadas de discusiones a cerca del estudio y de la vida.

Les agradezco también a ustedes, a los que pusieron trabas para que esto saliera bien. Sin sus dificultades esto no podría haberse logrado.

A la compañía Baird & Associates S.A., por facilitarme el uso de sus datos para llevar a cabo este trabajo.

Agradecer no es una tarea fácil, ya que siempre queda algo por qué agradecer, o bien alguien a quién agradecer, por lo tanto, si usted lee esto, conoce mi historia personal hasta este punto, y sabe que de alguna forma contribuyó en este camino, agradezco que haya participado.

DEDICATORIA

*A mi mujer Pamela Eileen
y a mis hijos Kevin Alejandro,
Isabella Agustina
y Emilia Camille,
los amo, ustedes son el combustible perfecto de esta máquina que no se detiene...*

*...A mis amados Mario Meza y Santiago Valle, yo soy lo mejor de ustedes,
su partida fue temprana, sin embargo, están en cada acción, cada pensamiento, todos los días de mi
vida. Les dedico esto con el mayor amor que tengo.*

Claudio Alejandro Meza Valle

RESUMEN

En el presente trabajo se estimaron parámetros extremos de oleaje de manera simultánea a partir de análisis multivariados de valores extremos de oleaje en las zonas norte, centro y sur de Chile utilizando tres nodos de aguas profundas de la base de datos Olas Chile IV: nodo Iquique, nodo Valparaíso y nodo Chile 54S (54° latitud sur).

Previamente se realizaron agrupaciones de tormentas por medio del método de rastreo de *swells* (*Swell Tracking*, Hanson 2000) en aguas profundas, logrando identificar las características completas de los conjuntos de estados de mar que los constituyen en base a la física de sus parámetros componentes. A partir de las tormentas separadas se identificaron y extrajeron los mayores valores de altura de oleaje, además del periodo, dirección y duración asociada a la altura de oleaje máxima en cada tormenta.

Considerando los valores previamente identificados se realizó un análisis de valores extremos multivariados en las tres zonas a partir de un modelo multivariado de probabilidad conjunta (Heffernan & Tawn, 2004), extrapolando de manera simultánea pares de parámetros extremos de oleaje en aguas profundas. Con este método fue posible obtener curvas de distribución de probabilidad de periodo, dirección y duración para alturas de oleaje de diferentes periodos de retorno. Utilizando esta información fue posible definir los rangos que pueden adoptar estos parámetros con distintos valores de probabilidad.

ABSTRACT

In the present work extreme wave parameters were estimated in a simultaneous manner from a multivariate analysis of extreme wave values in the north, center and south of Chile using three deepwater wave nodes of the Olas Chile IV database: Iquique, Valparaiso and 54S (latitude 54° south) nodes.

Previously, storms grouping was performed using the swell tracking method proposed by Hanson (2000) in deep water; achieving identification of storm sets characteristics based on their physical components. From separated storms, the highest values of wave height and their associated parameters (periods, direction and duration) have been identified and extracted for each storm set.

Considering the previously identified values, a multivariate extreme value analysis in three points of Chile was performed using a multivariate joint probability model (Heffernan & Tawn, 2004), extrapolating simultaneously pairs of extreme wave parameters in deep water. With this method it was possible to obtain probability distribution curves of period, direction and duration associated to wave heights of different return periods. Using this information, it was possible to calculate the ranges that these parameters can take with different values of probability.

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	MARCO TEÓRICO	3
3.1	VALORES EXTREMOS UNIVARIADOS	4
3.2	VALORES EXTREMOS MULTIVARIADOS	6
3.3	APROXIMACIÓN CONDICIONAL MULTIVARIADA	7
3.3.1	ANTECEDENTES DEL MODELO	7
3.3.2	MODELO MARGINAL	8
3.3.3	MODELACIÓN ESTADÍSTICA	10
3.3.4	MODELO DE DEPENDENCIA CONDICIONAL	12
3.3.5	EXTRAPOLACIÓN DE DATOS	13
3.3.6	INFERENCIA ESTADÍSTICA	14
3.4	AVANCES SOBRE EL MODELO CONDICIONAL MULTIVARIADO	17
3.4.1	TRANSFORMACIÓN MARGINAL DE LAPLACE	17
3.5	RESUMEN DEL MÉTODO DE SIMULACIÓN MULTIVARIADA	18
4	METODOLOGÍA	19
4.1	MATERIALES	19
4.1.1	BASE DE DATOS DE OLEAJE	19
4.1.2	SOFTWARE	19
4.2	DEFINICIONES	20
4.3	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	23
4.3.1	BASE DE DATOS	24
4.3.2	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DE OLEAJE	25
4.3.3	AGRUPACIÓN DE SWELLS	27
4.3.4	IDENTIFICACIÓN DE VALORES EXTREMOS	31
4.3.5	MODELACIÓN MULTIVARIADA DE PARÁMETROS EXTREMOS	35
5	RESULTADOS	39
5.1	AGRUPACIÓN DE SWELLS	39
5.2	LISTAS DE MAYORES TORMENTAS Y COMPARACIÓN CON POT	43

5.3	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CONJUNTA DE PARÁMETROS DE OLEAJE....	49
5.3.1	<i>DEFINICIÓN DE UMBRAL PARA SELECCIÓN DE DATOS</i>	49
5.3.2	<i>Cálculo de alturas de oleaje extremo</i>	51
5.3.3	<i>Cálculo de parámetros del modelo multivariado</i>	52
5.3.4	<i>Resultados de modelaciones condicionales multivariadas</i>	53
5.3.5	<i>Resultados de las modelaciones condicionales multivariadas: Zonas norte, centro y sur de Chile</i>	55
6	DISCUSIÓN SOBRE LA VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA	69
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Rosa periodos de oleaje en aguas profundas	1
Figura 4.1: Esquema de fenómenos de oleaje considerados en el estudio	21
Figura 4.2: Rosa de puntos de periodo – Nodo Valparaíso.....	22
Figura 4.3: Diagrama de flujo. Modelación multivariada de parámetros extremos de oleaje	23
Figura 4.4: Comparación en aguas profundas nodo Valparaíso vs boya Watchkeeper	24
Figura 4.5: Sistemas de oleaje identificados – Zona norte, centro y sur	26
Figura 4.6: Ejemplo de evolución de sistemas de oleaje particionados. Estación 51028, 1 – 15 de Noviembre de 2000. a) Mediciones de boya NDBC. b) Hindcast WaveWatch III	28
Figura 4.7: Diagrama de flujo. Método de separación de tormentas	30
Figura 4.8: Esquema de método de valores sobre el umbral	31
Figura 4.9: Esquema de método de máximos anuales.....	32
Figura 4.10: Serie de tiempo de tormentas y sus parámetros	33
Figura 4.11: Identificación de parámetros – Tormenta típica.....	34
Figura 4.12: Dispersión de datos. Ejemplo de alturas máximas vs periodos <i>peak</i> de oleaje.....	35
Figura 4.13: Extrapolación condicional multivariada. a) Dispersión de datos extremos simulados. b) Densidad de probabilidad de periodos máximos en función de la altura de retorno	38
Figura 5.1: Separación se tormentas – <i>Swell</i> cercano SW, Zona central	40
Figura 5.2: Separación de tormentas – <i>Swell</i> remoto SW, Zona central.....	40
Figura 5.3: Separación de tormentas – <i>Swell</i> cercano NW E, Zona central.....	41
Figura 5.4: Separación de tormentas – <i>Swell</i> remoto NW, Zona central.....	41
Figura 5.5: Gráficos de estabilidad de parámetros – <i>Swell</i> remoto SW, Zona central	50
Figura 5.6: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> remoto SW – Zona central.....	54
Figura 5.7: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> remoto SW – Zona central	54
Figura 5.8: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> remoto SW – Zona central .	54
Figura 5.9: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> cercano SW – Zona norte.....	56
Figura 5.10: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> cercano SW – Zona norte	56
Figura 5.11: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> cercano SW – Zona norte .	56
Figura 5.12: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> remoto SW – Zona norte	57
Figura 5.13: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> remoto SW – Zona norte	57
Figura 5.14: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> remoto SW – Zona norte ...	57

Figura 5.15: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> cercano NE SE – Zona norte.....	58
Figura 5.16: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> cercano NE SE – Zona norte	58
Figura 5.17: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> cercano NE SE – Zona norte	58
Figura 5.18: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> remoto NW – Zona norte	59
Figura 5.19: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> remoto NW – Zona norte.....	59
Figura 5.20: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> remoto NW – Zona norte... ..	59
Figura 5.21: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> cercano SW – Zona central	60
Figura 5.22: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> cercano SW – Zona central.....	60
Figura 5.23: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> cercano SW – Zona central.....	60
Figura 5.24: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> remoto SW – Zona central.....	61
Figura 5.25: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> remoto SW – Zona central	61
Figura 5.26: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> remoto SW – Zona central ..	61
Figura 5.27: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> cercano NE E – Zona central	62
Figura 5.28: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> cercano NE E – Zona central	62
Figura 5.29: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> cercano NW E – Zona central	62
Figura 5.30: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> remoto NW – Zona central	63
Figura 5.31: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> remoto NW – Zona central	63
Figura 5.32: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> remoto NW – Zona central ..	63
Figura 5.33: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> cercano NE SW – Zona sur.....	64
Figura 5.34: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> cercano NE SW – Zona sur.....	64
Figura 5.35: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> cercano NE SW – Zona sur.....	64
Figura 5.36: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> SW NW – Zona sur.....	65
Figura 5.37: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> SW NW – Zona sur.....	65
Figura 5.38: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> SW NW – Zona sur	65
Figura 5.39: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Tp , <i>Swell</i> remoto NW – Zona sur	66
Figura 5.40: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Dpk , <i>Swell</i> remoto NW – Zona sur	66
Figura 5.41: Resultados simulación multivariada Hm_0 vs Duración, <i>Swell</i> remoto NW – Zona sur	66
Figura 42: Ajuste de Pareto vs Ajuste empírico sobre datos de oleaje. Nodo Valparaíso	70
Figura 43: Dispersión de datos reales y simulados - <i>Swell</i> remoto SW, Valparaíso	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1: Sistemas de oleaje identificados.....	25
Tabla 4.2: Valores del parámetro d utilizados para cada sistema de oleaje	29
Tabla 5.1: 30 mayores tormentas <i>swell</i> cercano SW - POT (izq.) y máximos por tormenta (der.)	44
Tabla 5.2: Estadística de alturas de ola identificadas - <i>swell</i> cercano SW	44
Tabla 5.3: 30 mayores tormentas <i>swell</i> remoto SW - POT (izq.) y máximos por tormenta (der.)	45
Tabla 5.4: Estadística de alturas de ola identificadas - <i>swell</i> remoto SW	45
Tabla 5.5: 30 mayores tormentas <i>swell</i> cercano NW E - POT (izq.) y máximos por tormenta (der.)...	46
Tabla 5.6: Estadística de alturas de ola identificadas - <i>swell</i> cercano NW E	46
Tabla 5.7: 30 mayores tormentas <i>swell</i> remoto NW - POT (izq.) y máximos por tormenta (der.).....	47
Tabla 5.8: Estadística de alturas de ola identificadas - <i>swell</i> remoto NW	47
Tabla 5.9: Umbrales seleccionados para simulaciones.....	50
Tabla 5.10: Valores de retorno de altura de oleaje en distintas zonas.....	51
Tabla 5.11: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> remoto SW	54
Tabla 5.12: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> remoto SW.....	54
Tabla 5.13: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> remoto SW	54
Tabla 5.14: Descripción de tablas y gráficos asociados a los resultados obtenidos.....	55
Tabla 5.15: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> cercano SW	56
Tabla 5.16: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> cercano SW	56
Tabla 5.17: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> cercano SW.....	56
Tabla 5.18: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> remoto SW	57
Tabla 5.19: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> remoto SW.....	57
Tabla 5.20: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> remoto SW	57
Tabla 5.21: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> cercano NE E.....	58
Tabla 5.22: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> cercano NE E	58
Tabla 5.23: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> cercano NE E	58
Tabla 5.24: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> remoto NW	59
Tabla 5.25: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> remoto NW	59
Tabla 5.26: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> remoto NW	59
Tabla 5.27: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> cercano SW	60
Tabla 5.28: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> cercano SW	60

Tabla 5.29: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> cercano SW	60
Tabla 5.30: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> remoto SW	61
Tabla 5.31: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> remoto SW	61
Tabla 5.32: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> remoto SW	61
Tabla 5.33: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> cercano NE E	62
Tabla 5.34: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> cercano NE E	62
Tabla 5.35: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> cercano NE E	62
Tabla 5.36: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> remoto NW	63
Tabla 5.37: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> remoto NW	63
Tabla 5.38: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> remoto NW	63
Tabla 5.39: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> cercano NE SW	64
Tabla 5.40: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> cercano NE SW	64
Tabla 5.41: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> cercano NE SW	64
Tabla 5.42: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> SW NW	65
Tabla 5.43: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> SW NW	65
Tabla 5.44: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> SW NW	65
Tabla 5.45: Tabla de percentiles de periodos, <i>Swell</i> remoto NW	66
Tabla 5.46: Tabla de percentiles de direcciones, <i>Swell</i> remoto NW	66
Tabla 5.47: Tabla de percentiles de duraciones, <i>Swell</i> remoto NW	66
Tabla 5.48: Resumen comparativo entre sistemas y nodos. Caso H_{tr} 100 años, ajuste superior	67