



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED
NUMÉRICA DE INFORMACIÓN DE OLEAJE PARA LAS
COSTAS DE CHILE, APLICADO A LAS REGIONES DE
ANTOFAGASTA Y VALPARAÍSO**

Felipe Antonio Maldonado Gutiérrez

Diciembre 2017

**METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED NUMÉRICA DE
INFORMACIÓN DE OLEAJE PARA LAS COSTAS DE CHILE, APLICADO A LA
REGIÓN DE ANTOFAGASTA Y VALPARAÍSO**

Felipe Antonio Maldonado Gutiérrez

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Patricio Winckler Grez
Profesor Guía

Rodrigo Filippi Fernández
Profesor Co Referente

Catalina Aguirre Galaz
Profesor Revisor

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.

Patricio Winckler G
Profesor Guía

Felipe Maldonado G
Estudiante Memorista

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres Ernesto y Graciela por su apoyo incondicional desde el primer hasta el último momento, por el ánimo y en general por estar siempre conmigo con un consejo o los miles de enseñanzas que han hecho de mí, una mejor persona. A mis hermanos Marcela y Ernesto porque siempre me dieron palabras de aliento y apoyaron en cada una de mis decisiones. A mi polola Fernanda por el amor que me ha entregado y por estar conmigo en las buenas y en las malas, por apoyarme una y mil veces. A mi cuñado Ignacio, y a mis sobrinos Constanza, Valentina y Joaquín por estar siempre conmigo, por su apoyo y alegrías. A mi cuñada Claudia, y a mis sobrinos Benjamín y Javiera por su apoyo en este proceso. A mis mejores amigos Pablo y Stephanie por estos años de amistad y por contar con sus consejos siempre.

A Rodrigo Filippi por permitirme trabajar en este hermoso proyecto, por su apoyo, continuas y largas revisiones además del apoyo en todo lo necesario, a todo el equipo de la DOP especialmente a la Directora Nacional Antonia Bordas y a su jefa de gabinete Edith Del Pino por su apoyo y colaboración en este proyecto, a Pablo Pozo por sus correcciones y explicaciones en las primeras etapas, a Juan Carlos Domínguez por explicarme su memoria de postgrado y por corregir varias veces los resultados, y a todos quienes en mi estadía como memorista en la DOP me dieron aliento en este largo proceso, especialmente a Raúl Oberreuter, Soledad Hidalgo, Daniela Arregui, Don José, Pablo Mieres, Cristina Contzen, Fernando Moreira, Francisco Castro y María Angélica Gormaz. Al equipo del Laboratorio DOP por sus consejos e inyección de energía en las etapas finales de este proceso.

A mi profesor guía Patricio Winckler por sus continuas revisiones, correcciones y consejos para mejorar el documento y por enseñarme que un buen modelador no solamente sabe usar un software, sino que sabe qué hace el modelo y es crítico con los resultados. A mis profesores de la universidad Felipe Caselli, Cristian Valderas, Guillermo Acuña, José Beya y Mario Beale por marcar mi paso por la Universidad, a los amigos del kiosco FEUV (Erwin, tía Sole y tía Clari) por esa sonrisa y buena onda, a las tías del aseo, por su sonrisa y por hacer de la UV un lugar más ameno.

A Héctor Hidalgo y Jaime Herrera por sus consejos y apoyo en algunos scripts de Matlab.

A todos y cada uno de ustedes, infinitas gracias

...Dedicado a mis padres, hermanos y a mi polola...

**“ El Señor es mi luz y mi salvación
¿a quien temeré?
El señor es la defensa de mi vida,
”
¿ante quien temblaré?**

Salmo 26

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	XII
2	INTRODUCCIÓN	1
3	OBJETIVOS	2
3.1	OBJETIVO GENERAL	2
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
4	ALCANCES Y LIMITACIONES	3
5	MARCO TEÓRICO	4
5.1	EI OLEAJE	4
5.2	PROCESOS FÍSICOS DE PROPAGACIÓN	4
5.3	MODELO DE PROPAGACIÓN ESPECTRAL DE OLEAJE SWAN	5
5.3.1	ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN	5
5.3.2	PROCESOS FÍSICOS DEL MODELO	6
5.3.2.1	REFRACCIÓN Y DIFRACCIÓN	6
5.3.2.2	FRICCIÓN DE FONDO	7
5.3.3	RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DEL MODELO	7
5.4	TRANSFERENCIA PSEUDOESPECTRAL DE OLEAJE DE DOMINGUEZ (2011)	7
6	METODOLOGÍA	10
6.1	FUENTES DE DATOS	11
6.2	PRE PROCESO	13
6.3	PROCESO	13
6.4	POST PROCESO	16
6.4.1	CLIMA MEDIO	16
6.4.2	CLIMA EXTREMO	17
6.4.3	ANÁLISIS DE INFORMACION Y VALIDACIÓN	18
6.4.4	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS (PUBLICACIÓN EN SITIO WEB)	20
7	RESULTADOS	22
7.1	REGIÓN DE ANTOFAGASTA	22
7.1.1	NODO 2-1: MEJILLONES	23
7.1.1.1	VALIDACIÓN	23
7.1.1.2	CLIMA MEDIO	23
7.1.1.3	CLIMA EXTREMO	26
7.1.1.4	ANÁLISIS DE CLIMA	27
7.1.2	NODO 2-2: BALNEARIO DE JUAN LÓPEZ	28
7.1.2.1	VALIDACIÓN	28
7.1.2.2	CLIMA MEDIO	34
7.1.2.3	CLIMA EXTREMO	37
7.1.2.4	ANÁLISIS DE CLIMA	38
7.2	REGIÓN DE VALPARAÍSO	39
7.2.1	NODO 5-1: VALPARAÍSO	40
7.2.1.1	VALIDACIÓN	40
7.2.1.2	CLIMA MEDIO	40
7.2.1.3	CLIMA EXTREMO	43

7.2.1.4	ANÁLISIS DE CLIMA.....	44
7.2.2	NODO 5-2: PLAYA LAS DOCAS	45
7.2.2.1	VALIDACIÓN.....	45
7.2.2.2	CLIMA MEDIO	47
7.2.2.3	CLIMA EXTREMO.....	50
7.2.2.4	ANÁLISIS DE CLIMA.....	51
7.2.3	NODO 5-1-1: BAHÍA CUMBERLAND	52
7.2.3.1	VALIDACIÓN	53
7.2.3.2	CLIMA MEDIO	53
7.2.3.3	CLIMA EXTREMO.....	56
7.2.3.4	ANÁLISIS DE CLIMA.....	57
7.3	PRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN.....	58
8	CONCLUSIONES	59
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
10	ANEXOS.....	64
10.1	TRANSFERENCIA ESPECTRAL.....	64
10.2	CONFIGURACION DEL MODELO	67
10.3	DIFRACCIÓN DEL MODELO.....	71
10.3.1	METODOLOGÍA.....	71
10.3.2	RESULTADOS.....	73
10.3.3	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	79
10.4	INFORMACIÓN DE OLEAJE TRANSFERIDO.....	80
10.4.1	REGIÓN DE ANTOFAGASTA.....	80
10.4.1.1	NODO 2-3	80
10.4.1.2	NODO 2-4	84
10.4.2	REGIÓN DE VALPARAISO.....	88
10.4.2.1	NODO 5-3	88
10.4.2.2	NODO 5-4	92
10.4.2.3	NODO 5-5	96

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Espectros unitarios a propagar	8
Ilustración 2: Transferencia espectral	9
Ilustración 3: Diagrama de flujo (Metodología).....	10
Ilustración 4: Georreferencia de anidamientos.....	14
Ilustración 5: Histograma (clima medio)	16
Ilustración 6: Tabla de incidencia (clima medio)	16
Ilustración 7: Rosa de Oleaje (Dir-Hs) y Rosa de Dispersión (Dir-Tm)	17
Ilustración 8: Gráfico de peak sobre el umbral.....	17
Ilustración 9: Curvas bandas de confianza	18
Ilustración 10: Espectro promedio de frecuencias	19
Ilustración 11: Cuantil – cuantil (Bondad de ajuste)	20
Ilustración 12: Sitio web red de oleaje.....	21
Ilustración 13: Campos bidimensionales – Malla Gruesa Antofagasta	22
Ilustración 14: Geo posicionamiento de nodo 1 – Mejillones.	23
Ilustración 15: Histograma Dir	24
Ilustración 16: Histograma Hm0	24
Ilustración 17: Histograma Tm	25
Ilustración 18: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	25
Ilustración 19: Rosas de oleaje y rosa de dispersión radial	26
Ilustración 20: Tabla de Incidencia.....	26
Ilustración 21: Clima extremo, bandas de confianza 90%	27
Ilustración 22: Georreferencia Nodo 2-2 – Balneario de Juan López	28
Ilustración 23: Georreferencia nodo 2 – ADCP validación	29
Ilustración 24: Gráfico de bondad de ajuste de alturas significativas (Hm0).....	29
Ilustración 25: Gráfico de bondad de ajuste para dirección media (medida y modelada)..	30
Ilustración 26: Gráfico de bondad de ajuste de periodos medios (numéricos y medidos) .	30
Ilustración 27: Gráfico de bondad de ajuste de Hm0 (modelado y medido)	32
Ilustración 28: Gráfico de bondad de ajuste de dirección media.....	32
Ilustración 29: Gráfico de bondad de ajuste de periodos medio.	33
Ilustración 30: Histograma Dir	34
Ilustración 31: Histograma Hm0	35
Ilustración 32: Histograma de periodo medio (Tm)	35
Ilustración 33: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	36
Ilustración 34: Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial	36
Ilustración 35: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	37
Ilustración 36: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	37
Ilustración 37: Campos bidimensionales Valparaíso.....	39
Ilustración 38: Georreferenciación nodo 5-1 Valparaíso	40
Ilustración 39: Histograma Dir	41
Ilustración 40: Histograma Hm0	41
Ilustración 41: Histograma Tm	42
Ilustración 42: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	42
Ilustración 43: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	43
Ilustración 44: Bandas de confianzas Tm	43
Ilustración 45: Georreferenciación Nodo 5-2 – Curaumilla	45
Ilustración 46: Bondad de ajuste cuantil – cuantil (altura significativa)	46
Ilustración 47: Histograma Dir	47

Ilustración 48: Histograma Hm0	48
Ilustración 49: Histograma Tm	48
Ilustración 50: Tabla de Incidencia Dir – Hm0	49
Ilustración 51: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	49
Ilustración 52: Tabla de Incidencia Dir – Tm	50
Ilustración 53: Tabla de Incidencia Dir – Tm	50
Ilustración 54: Campos bidimensionales Juan Fernández	52
Ilustración 55: Georreferencia nodo 5-1-1 Juan Fernández	53
Ilustración 56: Histograma Dir	54
Ilustración 57: Histograma Hm0	55
Ilustración 58: Tabla de Incidencia Dir – Hm0	55
Ilustración 59: Rosas de oleaje y dispersión radial	55
Ilustración 60: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	56
Ilustración 61: Bandas de confianza	56
Ilustración 62: Web presentación de resultados red de oleaje	58
Ilustración 63: Superposición de espectros unitarios	64
Ilustración 64: Propagación de oleaje sector Antofagasta – península de Mejillones	69
Ilustración 65: Zona de estudio Juan Fernández	72
Ilustración 66: Zona de estudio – Dominio	72
Ilustración 67: Histograma difracción - no difracción	74
Ilustración 68: Histograma comparación difracción - no difracción	74
Ilustración 69: Campos bidimensionales – Comparación	75
Ilustración 70: Histograma comparación difracción - no difracción	75
Ilustración 71: Histograma comparación direcciones - difracción - no difracción	76
Ilustración 72: Histograma comparación swan difracción - no difracción	76
Ilustración 73: Histograma comparación direcciones difracción - no difracción	77
Ilustración 74: Campos bidimensionales	77
Ilustración 75: Campos bidimensionales	78
Ilustración 76: Campos bidimensionales - comparación difracción - no difracción	78
Ilustración 77: Georreferenciación Nodo 2-3	80
Ilustración 78: Histograma Dir	81
Ilustración 79: Histograma Hm0	81
Ilustración 80: Histograma Tm	82
Ilustración 81: Tabla de Incidencia Dir – Hm0	82
Ilustración 82: Rosa de oleaje y rosa de dispersión	83
Ilustración 83: Tabla de Incidencia Tm - Hm0	83
Ilustración 84: Clima Extremo	83
Ilustración 85: Georreferenciación Nodo 2-4	84
Ilustración 86: Histograma Dir	84
Ilustración 87: Histograma Hm0	85
Ilustración 88: Histograma Tm	85
Ilustración 89: Histograma Dir – Tm	86
Ilustración 90: Histograma Dir – Hm0	86
Ilustración 91: Histograma Tm – Hm0	86
Ilustración 92: Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial	87
Ilustración 93: Clima Extremo	87
Ilustración 94: Georreferenciación nodo 2	88
Ilustración 95: Histograma Dir	88
Ilustración 96: Histograma Hm0	89
Ilustración 97: Histograma Tm	89

Ilustración 98: Tabla de Incidencia Dir – Tm	90
Ilustración 99: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	90
Ilustración 100: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	90
Ilustración 101: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	91
Ilustración 102: Clima Extremo – intervalos de confianza.....	91
Ilustración 103: Georreferenciación nodo 3	92
Ilustración 104: Histograma Dir	92
Ilustración 105: Histograma Hm0	93
Ilustración 106: Histograma Tm	93
Ilustración 107: Histograma Dir – Tm	94
Ilustración 108: Histograma Dir – Hm0	94
Ilustración 109: Histograma Tm	94
Ilustración 110: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	95
Ilustración 111: Clima Extremo – intervalos de confianza.....	95
Ilustración 112: Georreferenciación nodo 5	96
Ilustración 113: Histograma Dir	96
Ilustración 114: Histograma Hm0	97
Ilustración 115: Histograma Tm	97
Ilustración 116: Tabla de Incidencia Dir – Tm	98
Ilustración 117: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	98
Ilustración 118: Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial	98
Ilustración 119: Clima Extremo – intervalo de confianza	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Selección de cartas náuticas.....	12
Tabla 2: Configuración de anidamientos para mallado de cálculo.....	15
Tabla 3: Diferencias de parámetros de resumen, entre modelo y mediciones	31
Tabla 4: Diferencias entre parámetros de resumen	31
Tabla 5: Error porcentual - diferencia entre parámetros de resumen	33
Tabla 6: Diferencia entre parámetros de resumen modelo – mediciones.....	33
Tabla 7: Mallado caso difracción.....	71
Tabla 8: Localización nodos.....	78
Tabla 9: Comparación parámetros de resumen	79

1 RESUMEN

En la presente memoria, se muestra una metodología para el desarrollo de la red numérica de información de oleaje costera de la Dirección de Obras Portuarias (DOP), que se configura como un sistema de información de oleaje disponible libremente, a través del sitio web www.oleajecostero.cl.

La red numérica corresponde a una serie de nodos ubicados aproximadamente a 20 metros de profundidad, en los cuales se presenta información estadística de oleaje (información de 36 años de oleaje propagado).

En la región de Antofagasta se analizaron en detalle 2 nodos, Mejillones y el balneario de Juan López. En la región de Valparaíso se analizaron 3 nodos, bahía de Valparaíso, playa Las Docas y Bahía Cumberland – archipiélago de Juan Fernández. En el anexo 10.4 se encuentran 5 nodos (2 nodos en la región de Antofagasta y 3 nodos en la región de Valparaíso).

Se consideraron 2 nodos para la validación. Estos nodos corresponden a Punta Curaumilla (playa Las Docas - Valparaíso) y Balneario de Juan López (Antofagasta). Para el sector de Juan López, la bondad de ajuste cuantil cuantil muestra diferencias entre datos medidos y modelados, principalmente debido a la alta difracción, por la escasa profundidad en el fondeo del instrumento y el acotado tiempo de medición. En el sector de punta Curaumilla la bondad de ajuste cuantil cuantil muestra mejores aproximaciones, sin embargo, se presenta una gran dispersión en valores peak de alturas significativas tanto para datos medidos como modelados.