



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

ANÁLISIS DE MAREJADAS HISTÓRICAS Y RECIENTES EN LAS COSTAS DE CHILE

Rodrigo Vicente Campos Caba

Junio 2016

APROBACIÓN

ANÁLISIS DE MAREJADAS HISTÓRICAS Y RECIENTES EN LAS COSTAS DE CHILE

Rodrigo Vicente Campos Caba

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

José Beyá Marshall

Profesor guía.

Pablo Pozo Rojas

Ingeniero de proyectos,
Dirección de Obras Portuarias.

Alejandro de la Maza

Capitán de Fragata (R),
Servicio Meteorológico de la Armada de
Chile.

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.

Rodrigo Campos Caba

José Beyá Marshall

Quisiera expresar mis sinceros agradecimientos a:

Mi profesor guía, José Beyá, quien en todo momento me motivó a seguir avanzando en el área de la investigación. Sin duda este proceso de aprendizaje y de formación profesional ha sido exitoso gracias a él, sus consejos y una que otra exigencia.

Reina y Vicente, mis amados padres, por su ejemplo de vida, apoyo constante y por cada uno de los valores inculcados que me hacen ser el hombre que soy hoy en día. Sin su amor incondicional nada de esto sería posible.

Mis hermanos, Reina y Cristóbal, por cada una de las bromas, sonrisas y peleas compartidas a lo largo de nuestra vida. Poder tenerlos cerca siempre ha sido una fuente de inspiración.

Normita y Juanito, que siempre viven y vivirán en lo más profundo de mi corazón, sus historias y consejos siguen siendo una fuente de aprendizaje para mí.

Familia Saavedra-Caba, por acogerme como un hijo más cuando esta historia estaba recién comenzando y era un joven un poco perdido por la vida.

A Boris y Sebastián, mis amigos y hermanos del alma, compartir todos estos años de crecimiento a pesar de las distancias es una de las cosas más valiosas que tengo en la vida.

Mis amigos de carrera: Franco, Almuna, Jose Ribba, Santiaguinos, Seba y Clau. Los momentos vividos han hecho que los años de universidad hayan sido una gran aventura.

A Cony, por embarcarse conmigo en un viaje de constante aprendizaje personal y acompañarme a pesar de todas las dificultades generadas por mí.

Por último, pero no menos importante, agradecer a cada una de las personas y entidades que aportaron en la realización de esta memoria: Ariel Gallardo, Héctor Hidalgo y Javier Valdivia (equipo Un Atlas de Oleaje para Chile, Universidad de Valparaíso); José González y Manuel Mena (GSI consultores); Pedro García (Empresa Portuaria de Valparaíso); Catalina Aguirre, Mauricio Molina y Felipe Caselli (Universidad de Valparaíso); Manuel Contreras (Universidad de Playa Ancha); Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile; Dirección de Obras Portuarias y Capitanía de Puerto de Valparaíso.

*Dedicado a mis padres,
hermanos
& abuelos.*

*“Tú tienes planes...
yo tengo sueños”*



CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS.....	2
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	ALCANCES.....	3
4	MARCO TEÓRICO.....	4
4.1	MAREJADAS.....	4
4.1.1	REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	5
4.1.2	GENERACIÓN DE DAÑOS.....	8
4.1.3	ESCALAS PARA EVALUACIÓN DE DAÑOS E IMPACTOS.....	9
4.2	CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA.....	12
4.2.1	PRESIÓN ATMOSFÉRICA	14
4.2.2	VIENTO	14
4.2.3	SISTEMAS FRONTALES.....	16
4.3	OSCILACIONES CLIMÁTICAS	20
4.3.1	EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS).....	22
4.3.2	OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO (PDO)	26
4.3.3	MODO ANULAR DEL SUR (SAM)	28
4.4	CAMBIO CLIMÁTICO	30
4.4.1	EFECTO INVERNADERO.....	32
4.4.2	CALENTAMIENTO GLOBAL.....	34
4.4.3	PROYECCIONES	37
4.5	EL OLEAJE	40
4.5.1	GENERACIÓN.....	42
4.5.2	MODELOS HINDCASTING DE OLEAJE DE TERCERA GENERACIÓN	44

4.5.3	PROPAGACIÓN OCEÁNICA	51
4.5.4	PROPAGACIÓN COSTERA.....	53
4.5.5	CARACTERIZACIÓN.....	55
4.5.6	OLEAJE ESTADÍSTICO.....	62
4.5.7	OLEAJE EN CHILE.....	65
4.6	MAREAS	68
4.6.1	MAREA ASTRONÓMICA.....	68
4.6.2	MAREA METEOROLÓGICA.....	70
5	METODOLOGÍA.....	73
5.1	IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS	73
5.2	ANÁLISIS DE CONDICIONES DE OLEAJE	75
5.3	EVALUACIÓN DE DAÑOS Y/O IMPACTOS	76
6	RESULTADOS.....	80
6.1	DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESTACIONAL DE EVENTOS IDENTIFICADOS	80
6.2	COMPARACIÓN MODELOS Y MEDICIONES DE OLEAJE	81
6.2.1	ALTURA SIGNIFICATIVA	82
6.2.2	PERÍODO	88
6.2.3	DIRECCIÓN.....	93
6.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PARÁMETROS DE OLEAJE DE MAREJADAS	97
6.3.1	CONDICIONES DE OLEAJE POR TIPO DE DAÑOS Y/O IMPACTOS.....	99
6.3.2	ÍNDICE NORMALIZADO DE DAÑOS A INFRAESTRUCTURA COSTERA.....	107
6.4	CATASTRO DE DAÑOS E IMPACTOS	111
6.4.1	SOBREPASOS	115
6.4.2	DAÑO A INFRAESTRUCTURA COSTERA.....	116
6.4.3	DAÑOS A LOCALES COMERCIALES Y VIVIENDAS.....	120
6.4.4	CIERRES DE PUERTOS	121
6.4.5	DAÑOS A EMBARCACIONES	123

6.4.6	DAÑO A INTEGRIDAD FÍSICA HUMANA	124
6.4.7	OTRO TIPO DE DAÑOS.....	125
6.5	DEFINICIÓN DE ESCALA DE MAGNITUD DE INTENSIDAD DE DAÑOS POR MAREJADAS.....	126
6.5.1	INCIDENCIA DE DAÑOS E IMPACTOS SEGÚN PARÁMETROS DE OLEAJE	131
6.5.2	INCIDENCIA DE DAÑOS SEGÚN ÍNDICES DE OSCILACIONES CLIMÁTICAS.....	144
6.5.3	TENDENCIAS DE LARGO PLAZO	147
7	DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
8	CONCLUSIONES.....	156
9	REFERENCIAS.....	158
10	ANEXOS	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Primeros 10 países con riesgo debido a la intensificación de marea meteorológica en base al área costera.....	8
Tabla 4-2: Escala de impactos por <i>storm-surge</i> o marea meteorológica en comunidades costeras de Estados Unidos.....	10
Tabla 4-3: Rango de valores para las distintas escalas de movimientos atmosféricos organizados.....	12
Tabla 4-4: Oscilaciones climáticas, parámetro medido y escala de tiempo.....	21
Tabla 4-5: Clasificación de ondas según su periodo.....	42
Tabla 4-6: Parámetros estadísticos obtenidos por medio de análisis en el dominio del tiempo.....	57
Tabla 4-7: Distribuciones y funciones para análisis de largo plazo.....	63
Tabla 4-8: Fórmulas de linealización y altura de retorno de distribuciones Weibull y Gumbel.....	65
Tabla 4-9: Valores promedio de altura significativa, periodo medio y dirección media en Chile, entre Arica y Corral.....	67
Tabla 5-1: Valores mínimos de altura significativa (H_s) por rango de direcciones medias (D_m) para ocurrencia de impactos por marejadas en las costas de Chile.....	74
Tabla 6-1: Información de boyas oceanográficas utilizadas para comparaciones con modelos de oleaje.....	82
Tabla 6-2: Error medio (medición-modelo) y banda de confianza H_s entre mediciones y modelos de oleaje.....	88
Tabla 6-3: Error medio (medición-modelo) y banda de confianza T_m entre modelos de oleaje y mediciones.....	92
Tabla 6-4: Error medio (medición-modelo) y banda de confianza D_m entre modelos de oleaje y mediciones.....	96
Tabla 6-5: Promedio y rango máximo y mínimo de H_s , T_m , D_m y Potencia de marejadas que produjeron daños por región (de norte a sur).....	98
Tabla 6-6: Promedio de H_s , T_m , D_m y Potencia por tipo de daño o impacto para zonas norte, centro y sur.....	100

Tabla 6-7: Valores de H_{50}^* [m] por región y para cada sub-cardinal.....	107
Tabla 6-8: Principales áreas metropolitanas de Chile.....	112
Tabla 6-9: Principales ciudades costeras de Chile en estudio.....	112
Tabla 6-10: Cantidad total de tipos de daños o impactos identificados por región	113
Tabla 6-11: Fecha, parámetros de oleaje, lugar, efecto y costo estimado por daños a infraestructura costera.....	117
Tabla 6-12: Fecha, parámetros de oleaje, lugar, efecto y costo estimado por daños a infraestructura costera (continuación).....	118
Tabla 6-13: Fecha, parámetros de oleaje, lugar, efecto y costo estimado por daños a infraestructura costera (final).....	119
Tabla 6-14: Región, empresa portuaria y costo diario asociado a cierre de puerto por un día en regiones en estudio.....	122
Tabla 6-15: Gobernaciones Marítimas y Capitanías de Puerto en las regiones del estudio.	123
Tabla 6-16: Descripción de categorías Escala de Campos.....	126
Tabla 6-17: Ejemplos de eventos con categorías 4, 5, 6 y 7 en Escala de Campos.	127
Tabla 6-18: Diez eventos de marejadas categorizados con Escala de Campos.	128
Tabla 6-19: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 180-225 [°], zona norte.....	132
Tabla 6-20: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona norte.....	133
Tabla 6-21: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 180-225 [°], zona centro.	134
Tabla 6-22: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona centro.	136
Tabla 6-23: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona centro (continuación).	137
Tabla 6-24: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 270-315 [°], zona centro.	138
Tabla 6-25: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 315-360 [°], zona centro.	139

Tabla 6-26: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 180-225 [°], zona sur	140
Tabla 6-27: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona sur	141
Tabla 6-28: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 270-315 [°], zona sur	142
Tabla 6-29: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 315-360 [°], zona sur	143
Tabla 6-30: Tendencia de largo plazo de H_s , T_m y D_m entre los años 1979 y 2015.	147
Tabla 10-1: Registro de daños por marejadas identificados, 1823-2015.	165
Tabla 10-2: Cantidad de eventos identificados entre 1823 y 1977, con categoría máxima anual en Escala de Campos e índices MEI y SAM.	187

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Puntos de extracción de parámetros de oleaje	3
Figura 4-1: Frecuencias y períodos de <i>surges</i> y oleaje generado por viento	4
Figura 4-2: Mapa desastres naturales en Estados Unidos, entre los años 1980 y 2003	7
Figura 4-3: Circulación General de la Atmósfera	13
Figura 4-4: Perfil de velocidad de viento en la capa límite atmosférica	16
Figura 4-5: Evolución de un sistema frontal	17
Figura 4-6: Formación de un frente frío en plano vertical	18
Figura 4-7: Formación de un frente cálido en plano vertical	19
Figura 4-8: Sistemas frontales generadores de oleaje que alcanzan las costas chilenas	20
Figura 4-9: Oscilaciones climáticas en sus regiones de origen	22
Figura 4-10: Modelo de viento, precipitación y temperatura del mar en las fases extremas del ciclo ENOS	23
Figura 4-11: Valores de Índice Multivariado del ENOS entre los años 1950 y 2015	24
Figura 4-12: Anomalías (C°) promedio de la temperatura superficial del océano	25
Figura 4-13: Representaciones de fases positiva y negativa de Oscilación Decadal del Pacífico	26
Figura 4-14: Índice PDO entre los años 1854 y 2015	27
Figura 4-15: Fase positiva de SAM	28
Figura 4-16: Valores estacionales del índice SAM	29
Figura 4-17: Vista esquemática de los componentes del sistema de cambio climático global	31
Figura 4-18: Composición de gases de la atmósfera terrestre	32
Figura 4-19: Estructura térmica de Tropósfera y Estratósfera	33
Figura 4-20: Balance energético medio anual de la Tierra	34
Figura 4-21: Anomalía de la temperatura global con referencia al promedio entre los años 1961 y 1990 y concentraciones de CO ₂ en la atmósfera como porcentaje de aire seco	35

Figura 4-22: Cambios en el nivel del mar	36
Figura 4-23: Expansión térmica de océanos y derretimiento de hielos desde 1972 a 2008 ..	37
Figura 4-24: Impacto potencial del nivel del mar en Bangladesh 1990-2100	38
Figura 4-25: Aumento de cota de zona de inundación hacia el año 2100 debido al aumento del nivel del mar	39
Figura 4-26: Distribución energética de las ondas de superficie	40
Figura 4-27: Parámetros de ondas de crestas largas	41
Figura 4-28: Generación de oleaje por viento según el modelo de Harold Jeffreys (1925) ...	43
Figura 4-29: Malla regular de enfoque Euleriano para <i>hindcasting</i> de oleaje en aguas oceánicas.....	45
Figura 4-30: Propagación de energía a lo largo de una celda en una malla regular proyectada en el océano con enfoque Euleriano	46
Figura 4-31: Dispersión de frecuencias y direcciones de oleaje formado en tormenta.....	52
Figura 4-32: Trayectorias de las partículas bajo una onda progresiva en las diferentes profundidades	54
Figura 4-33: Procesos de transformación de oleaje.....	55
Figura 4-34: Parámetros que definen el oleaje	56
Figura 4-35: Estructura de oleaje aleatorio	58
Figura 4-36: Esquema para un espectro de ondas bidimensional.	59
Figura 4-37: Espectro direccional y su espectro de frecuencia y dirección.	60
Figura 4-38: Función de la distribución acumulada de X	64
Figura 4-39: Altura significativa espectral promedio de ola ($Hm0$) alrededor del mundo, entre 1997 y 2006	66
Figura 4-40: Mareas de Sicilia y Cuadratura	69
Figura 4-41: Registro de mareas en la bahía de Valparaíso, abril 2015	69
Figura 4-42: Esquema de efectos barométricos	70
Figura 4-43: Esquema de balance de energía por fuerzas forzantes del viento.....	71

Figura 5-1: Registros de eventos de marejadas en medios de comunicación.....	75
Figura 6-1: Distribución anual de eventos de marejadas con daños y/o impactos en las costas de Chile, 1979-2015.....	80
Figura 6-2: Distribución mensual total eventos de marejadas que produjeron daños, 1823-2015.....	81
Figura 6-3: Series de tiempo de H_s de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) I región, 27/07/1987; B) XV región, 26 y 28/06/1989 y C) V región, 10/09/2000	84
Figura 6-4: Series de tiempo de H_s de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 13 y 15/06/2010;B) 05/07/2010 y C) 19 y 24/08/2010, V región.	85
Figura 6-5: Series de tiempo de H_s de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 30/09/2010; B) 03 y 04/07/2013 y C) 08/08/2015, V región.	86
Figura 6-6: Comparación H_s entre modelos de oleaje y mediciones. Arriba: comparación con boyas; Abajo: comparación con altímetro satelital	87
Figura 6-7: Series de tiempo de T_m de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) I región, 27/07/1987; B) XV región, 26 y 28/06/1989 y C) V región, 10/09/2000	89
Figura 6-8: Series de tiempo de T_m de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 13 y 15/06/2010; B) 05/07/2010 y C) 19 y 24/08/2010, V región	90
Figura 6-9: Series de tiempo de T_m de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 30/09/2010; B) 03 y 04/07/2013 y C) 08/08/2015, V región.	91
Figura 6-10: Comparación T_m entre boyas y modelos de oleaje	92
Figura 6-11: Series de tiempo de dirección de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 10/09/2000; B) 13 y 15/06/2010 y C) 05/07/2010, V región.....	94
Figura 6-12: Series de tiempo de dirección de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 19 y 24/08/2010 y B) 30/09/2010, V región	95
Figura 6-13: Series de tiempo de dirección de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 03 y 04/07/2013 y B) 08/08/2015, V región	96
Figura 6-14: Comparación D_m entre boyas y modelos de oleaje.....	97
Figura 6-15: Rosas de oleaje de daños estructurales, zona norte.	101
Figura 6-16: Rosas de oleaje de impactos, zona norte	102
Figura 6-17: Rosa de oleaje de daños estructurales, zona centro	103

Figura 6-18: Rosas de oleaje de impactos, zona centro	104
Figura 6-19: Rosas de oleaje de daño estructural, zona sur.....	105
Figura 6-20: Rosas de oleaje de impactos, zona sur	106
Figura 6-21: Relación H_s/H_{50}^* para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños.	108
Figura 6-22: Relación $P_m/P_{promedio}$ para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños.....	109
Figura 6-23: Relación $T_m/T_{promedio}$ para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños	110
Figura 6-24: Relación $D_m/D_{promedio}$ para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños	111
Figura 6-25: Daños marejada 08 de agosto de 2015	114
Figura 6-26: Daños marejada 03 de julio de 2013	115
Figura 6-27: Daño a viviendas en la VIII región, evento del 08 de agosto de 1965.....	120
Figura 6-28: Distribución de nivel de daño a embarcaciones.....	124
Figura 6-29: Distribución de tipos de daños a integridad física.....	125
Figura 6-30: Cantidad de eventos de marejadas por región sobre categoría 4 en Escala de Campos.....	130
Figura 6-31: Distribución anual de eventos de marejadas con daños e impactos en las costas de Chile y máximos anuales de índices MEI y SAM, 1979-2015	144
Figura 6-32: Máximos anuales en Escala de Campos e índices de oscilaciones climáticas, 1979-2015.....	146
Figura 6-33: Tendencia de largo plazo H_s , T_m y D_m entre 1979 y 2015, II región.....	149
Figura 6-34: Tendencia de largo plazo H_s , T_m y D_m entre 1979 y 2015, V región	150
Figura 6-35: Tendencia de largo plazo H_s , T_m y D_m entre 1979 y 2015, VIII región	151
Figura 6-36: Tendencia de largo plazo de la cantidad de eventos de marejadas con daños registrados, 1979-2015	152
Figura 6-37: Tendencia de largo plazo de máximos anuales en Escala de Campos, 1979-2015.....	153

RESUMEN

Las marejadas son fenómenos que afectan frecuentemente las costas de Chile causando sobrepasos, cese de operaciones portuarias, daños a infraestructura costera, naufragios, lesiones y pérdida de vidas humanas. Conocer la información sobre las características oceanográficas, comportamiento de largo plazo, efectos y costos producidos por estos eventos extremos es de suma importancia para planificar futuras inversiones en infraestructura costera. En este estudio se entrega una recopilación exhaustiva en medios de prensa, publicaciones y organismos públicos de eventos de marejadas ocurridos en Chile a partir del año 1823.

Con base a la información de eventos de marejadas proporcionada por la Armada de Chile, se realizaron búsquedas en prensa digital y archivos de periódicos de la Biblioteca Nacional de Chile y la Biblioteca Santiago Severín sobre los daños provocados por eventos de marejadas para las zonas costeras entre las regiones XV y XIV, entre los años 1979 y 2015. La cantidad de eventos anuales identificados fueron comparados con índices de las oscilaciones climáticas El Niño-Oscilación del Sur y el Modo Anular del Sur, obteniendo que los años en los cuales se supera la cantidad promedio de eventos anuales, están ligados a las fases positivas de las oscilaciones climáticas consideradas.

Se analizaron daños, costos y parámetros oceanográficos asociados, identificando que los daños son mayores para marejadas de períodos y direcciones medias que se encuentran sobre el promedio de largo plazo de dichos parámetros, y, que marejadas de relativamente baja altura significativa tienen una incidencia importante en los daños registrados.

Se propone una escala de magnitud de intensidad de daños por marejadas, la cual permite categorizar los eventos en base al nivel de daño registrado.

Finalmente, se analizaron los comportamientos de largo plazo de los parámetros de oleaje y de los eventos identificados, obteniendo una tendencia al aumento del valor de la altura significativa y disminución de la dirección de incidencia del oleaje. De mantenerse este comportamiento, dentro de los próximos 100 años se producirían aumentos de 30 [cm] en la altura significativa y disminuciones de 20,5 [°] en la dirección media del oleaje. Adicionalmente, la cantidad anual de eventos de marejadas con registro de daños también presenta un aumento a lo largo del tiempo.

1 INTRODUCCIÓN

El uso sustentable del territorio costero debe garantizar la definición de las zonas potenciales de inundación y el diseño eficiente de las obras costeras, para esto es necesario considerar el comportamiento de las condiciones extremas de oleaje, con el fin de incorporarlas de manera íntegra en la definición de soluciones (Winckler **et al.**, 2015).

Las costas de Chile han estado expuestas a eventos de marejadas a lo largo de su historia, presentando diferentes condiciones de oleaje que son capaces de provocar diversos niveles y tipos de daños (Araya, 1979). Un evento reciente, ocurrido el 08 de agosto de 2015, ha dejado en evidencia la exposición de los emplazamientos costeros, la cual aumenta a medida que se construye sin atender a la naturaleza de las marejadas (Winckler **et al.**, 2015).

Otros casos relevantes corresponden a junio de 1924 (Santibáñez, 1928), julio 1968 (Araya, 1979), mayo 1986, julio 1987, junio y julio 1994, junio 1997, agosto 2011 y julio 2013 (prensa nacional). Todos ellos han contado con algún tipo de cobertura informativa en el cual se describe de manera cualitativa los efectos e intensidad de los eventos, pero no existe un documento que compile toda esta información y cuantifique características y daños. Esto hace que aún exista un alto grado de desconocimiento sobre el comportamiento general de las marejadas.

Debido a esto, se ha realizado una investigación recopilando la información de eventos de marejadas, analizando las condiciones de oleaje de aguas profundas bajo los cuales se manifiestan, los tipos de daños o impactos que se han registrado y los costos asociados por reparación de infraestructura costera dañada.

Parte de los resultados que aquí se exponen fueron publicados por Campos **et al.** (2015), quienes analizaron parámetros de oleaje bajo los cuales han ocurrido diversos tipos de daños y costos asociados a reparación de obras costeras. El presente documento consiste en una continuación del trabajo mencionado, abarcando un periodo de tiempo más extenso, logrando identificar una mayor cantidad de eventos de marejadas que han generado daños en las costas de Chile y analizando con un mayor nivel de detalle toda la información recopilada sobre estos episodios.

En las secciones 2 y 3 se establecen los objetivos y alcances o limitaciones de este trabajo respectivamente, para luego dar paso al marco teórico (sección 4) en el cual se incluye una revisión de antecedentes de estudios relacionados a eventos de marejadas. En la sección 5 se detallan los procedimientos realizados para lograr los objetivos establecidos, incluyendo los criterios de selección de eventos de marejadas que han producido daños. Los resultados obtenidos se exponen en la sección 6, iniciando con la distribución temporal y estacional de los eventos identificados, para luego dar paso a los análisis de las condiciones de oleaje en aguas profundas y una evaluación de los daños registrados a lo largo del país, lo cual conduce al planteamiento de una escala de magnitud de intensidad de daños por marejadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Recopilar, analizar y caracterizar los eventos de marejadas con daños y/o impactos en las zonas costeras de Chile, entre los años 1823 y 2015.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Recopilar registros de eventos de marejadas que hayan producido daños y/o impactos a lo largo del tiempo en las costas de Chile.

Recopilar y caracterizar parámetros de oleaje en aguas profundas para los eventos identificados.

Determinar relaciones entre daños y parámetros de oleaje en aguas profundas.

Cuantificar los daños y/o impactos producidos por los eventos de marejadas identificados.

Analizar influencia de oscilaciones climáticas en la intensidad de las marejadas y daños.

Analizar tendencias de largo plazo en la ocurrencia de marejadas y daños.

3 ALCANCES

Los eventos de marejadas considerados corresponden a aquellos que hayan presentado algún tipo de daño o impacto en las costas de Chile. Las fuentes de información para la identificación de los eventos corresponden principalmente a archivos de prensa, en formato digital e impreso, junto con información proporcionada por la Armada de Chile.

El periodo de tiempo abarcado es entre los años 1823 y 2015, debido a que el año 1823 presenta el registro histórico más antiguo encontrado (Imprenta Victoria, 1927).

Las zonas costeras en estudio se encuentran entre la región de Arica y Parinacota y la región de Los Ríos. No se incluyen regiones ubicadas en sectores más australes del país ya que no hay presencia significativa de infraestructura costera en la costa abierta al oleaje oceánico, y por lo tanto, muy pocos registros de daños o impactos.

Las fechas de eventos de marejadas son analizadas con bases de datos de oleaje en aguas profundas de las agencias NOAA, en sus modelos CFSR y WAVEWATCH III, y ERA-Interim de ECMWF¹. Los puntos de extracción de parámetros de oleaje se encuentran a la cuadra de las zonas costeras consideradas (Figura 3-1).



Figura 3-1: Puntos de extracción de parámetros de oleaje (Fuente: Elaboración propia, Google Earth).

El estudio se limita a analizar condiciones de oleaje estadístico para los eventos de marejadas identificados, por lo cual no se han incluido análisis espectrales de oleaje. Tampoco se incluye información de niveles de marea en los eventos.

¹ European Research Area-European Centre for Medium-Range Weather Forecast

4 MARCO TEÓRICO

4.1 MAREJADAS

Las marejadas o bravezas de mar se definen como eventos de olas de gran altura formadas por fuertes vientos en el área oceánica o en condiciones locales y que se propagan fuera de la zona de generación llegando a los sectores costeros (Paskoff, 2010).

Los estudios realizados a lo largo del tiempo han evolucionado en el entendimiento de los procesos generadores de estos fenómenos, comenzando con el enfoque que atribuía a las interacciones de la Luna y el Sol sobre la superficie terrestre la formación de condiciones extremas de oleaje (Santibáñez, 1928), hasta estudios que llevaron a comprender que las marejadas se producen principalmente por tormentas lejanas con fuertes campos de viento que interactúan con la superficie del mar (Sverdrup, 1942; Araya, 1979).

Un fenómeno que presenta características similares a las marejadas es el *storm-surge*. Este corresponde a una elevación de la superficie del mar en tormentas de gran intensidad, generado por una disminución de la presión atmosférica y aumento de la velocidad del viento (Holthuijsen, 2007). El *storm-surge* se presenta sólo bajo condiciones de tormenta y en una escala tiempo-espacio de horas, mientras que las marejadas generadas en zonas alejadas pueden ocurrir bajo condiciones climáticas de buen tiempo y períodos de segundos debido a su generación por viento (Figura 4-1).

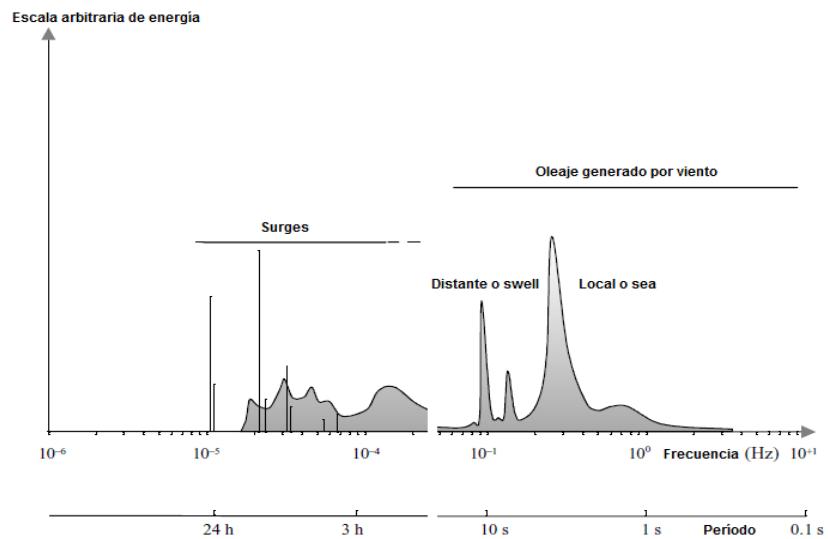


Figura 4-1: Frecuencias y períodos de surges y oleaje generado por viento (Fuente: Adaptado de Holthuijsen, 2007).

Otros fenómenos que producen sobre-elevación del nivel del mar corresponden a marea meteorológica, con componentes de variaciones de presión y *set-up* por viento; *wave set-up*, definido como una elevación del nivel medio del mar en la zona de rompientes; y ondas largas, las cuales son ondas de aguas someras. Estos conceptos no se describen con mayor detalle ya que en el presente estudio no se analiza la influencia de estos fenómenos sobre marejadas. Para mayor información de cada uno de los fenómenos mencionados se recomienda revisar UNICAN (2000) y Dean & Dalrymple (2001).

Dentro de la revisión de antecedentes llevada a cabo se encontraron diversos estudios sobre *storm-surge*, desarrollados principalmente en el extranjero, los cuales han sido incluidos dentro de la sección que se expone a continuación.

4.1.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Como se mencionó anteriormente, antaño se pensaba que las marejadas se producían principalmente por efectos de la Luna y el Sol sobre la superficie del mar. Santibáñez (1928) hace referencia al padre Feuillé como la primera persona en estudiar el fenómeno con fines científicos, observando las bravezas de mar en las costas de Arica e Ilo en el año 1709, periodo de tiempo en el cual ambas localidades formaban parte del virreinato del Perú. Feuillé concluye que éstas siempre ocurrían en los días cercanos a las siccias de la Luna, cuando la diferencia de las declinaciones del Sol y la Luna son pequeñas, y establece que la agitación del mar se producía generalmente sin viento y tenía una duración de 6 días.

Rodríguez (1937) estudia y describe lo ocurrido en la costa norte del país para los días 8 y 9 de agosto de 1929. Los principales perjuicios se presentaron en el puerto de Antofagasta, provocándose la destrucción del molo de abrigo “debido a un fenómeno generado por la propagación de ondas ciclónicas desarrolladas por un gran temporal que azotó con mayor fuerza la costa sur y central del país”. Menciona además la “interferencia de las ondas de oleaje con las ondas de marea”, concluyendo que esto “produjo una onda resultante con mayor fuerza vibratoria, a esto se suma la acción de la fuerza de la corriente de Humboldt”. Ésta última es destacada por al autor como una de las posibles causantes de daños en presencia de eventos extremos de oleaje en las costas chilenas, pero se hace énfasis en la necesidad de seguir realizando observaciones de eventos y estudiar la forma en que las ondas se propagan en el océano.

Posterior al nacimiento de la Ingeniería de Costas (década de 1940), el entendimiento de las causas de la generación del oleaje estaba más claro y había sido científicamente estudiado (Sverdrup & Munk, 1947; Bretschneider, 1952). Araya (1979) señala que “la costa chilena ha sufrido de ataques episódicos e incidentales debido a bravezas de mar o marejadas”. En el estudio se toma como experiencia un evento que se presentó el 25 de julio de 1968 y del cual se desprende que las marejadas en la costa occidental sur de Sudamérica se producen principalmente por tormentas lejanas en el Pacífico Sur, con situaciones favorables para su

formación en presencia de frentes cuasi estacionarios a más de 3.200 [km] de la costa y con más de una situación frontal. Esto aseguraría campos de viento de grandes extensiones y larga duración, además de fuerzas suficientes detrás de los frentes para que estos no se debiliten.

Rojas (2001) realiza una recopilación y análisis de antecedentes históricos durante el siglo XX en la provincia de Valdivia. Dentro de los eventos analizados se encuentran las marejadas, las cuales se identificaron como “condiciones de oleaje aparentemente no vinculados a procesos tsunamigénicos”. Se encontró que los sectores más afectados fueron las comunas de Corral y Valdivia, con descripciones más completas para el puerto de Corral y las localidades de Niebla y Los Molinos. En todos los casos estudiados el oleaje tuvo efectos bastante destructores sobre la infraestructura portuaria, defensas costeras y caminos.

Beyá & Winckler (2012) mencionan brevemente algunos eventos de inundaciones producidos por marejadas en Chile, indicando la escasa información sobre estos eventos y la necesidad de contar con mediciones y bases de datos de oleaje, en especial de eventos extremos.

En Estados Unidos, el 08 de septiembre de 1900, condiciones de oleaje generadas por una intensa tormenta provocaron gran destrucción en Galveston. Durante el día mencionado, la velocidad del viento fue en aumento hasta alcanzar la fuerza de un huracán. En la tarde, el nivel del mar se encontraba aproximadamente 5 [m] por sobre el promedio de los niveles máximos, lo cual produjo inundación en gran parte de la ciudad. Cerca de 6.000 personas fallecieron ahogadas y los daños fueron estimados en 10 millones de dólares de aquella época (Sverdrup, 1942).

En el Reino Unido se realizó un estudio sobre un evento extremo de *storm-surge* ocurrido en 1953 (Risk Management Solutions, 2003), el cual fue identificado como un gran aumento de marea meteorológica. Las condiciones extremas del mar fueron generadas debido a “un sistema frontal intenso, de movimiento rápido y con bajas presiones atmosféricas”, produciendo fuertes vientos dentro y fuera de las zonas costeras. Los factores meteorológicos mencionados se combinaron con un momento en que se presentaban condiciones de alta marea, provocando que el oleaje pasara sobre defensas costeras en Escocia y Holanda. En base a las características que tuvo este evento, se realiza una recreación digital para evaluar los efectos que tendría actualmente en las zonas originalmente afectadas en 1953. Se concluye que debido al aumento de concentración urbana en el borde costero, se producirían grandes daños e inundaciones en zonas comerciales, residenciales e industriales, con daños aún más catastróficos que los ocurridos en 1953.

Reyes (1996) analiza los efectos de temporales en las playas de la bahía de Cádiz, España. Logra identificar gran cantidad de erosión en la bahía, lo cual modifica el perfil de playa debido al material perdido. Del mismo modo, mediante una estimación de daños, verifica que

paseos marítimos, escolleras de protección y espigones de contención de arena de playa se ven fuertemente afectados debido al aumento de altura de ola en temporales.

Baart *et al.* (2011) utilizan datos disponibles de tres grandes eventos de *storm-surge* ocurridos en la costa holandesa durante el siglo XVIII, esto con el fin de mejorar la confianza en las estimaciones de los riesgos de inundación debido a eventos extremos. Los eventos fueron reconstruidos hasta el máximo nivel de marea alcanzado, sin lograr obtener los intervalos de confianza esperados en los resultados. Dado esto, se mencionan recomendaciones sobre los métodos de modelación y de las formulaciones para establecer los intervalos de confianza de los resultados.

El año 2003, la entidad NCDC², elaboró un informe sobre desastres naturales de diversa índole que hayan afectado a Estados Unidos. Esto se realiza en orden cronológico para el período de tiempo entre los años 1980 y 2003, logrando identificar los tipos de desastres, número de eventos y daños evaluados en billones de dólares. El estudio no considera marejadas o *storm-surge*, pero los resultados obtenidos entregan una visión sobre lo que se puede lograr en estudios de eventos de clima extremo (Figura 4-2).

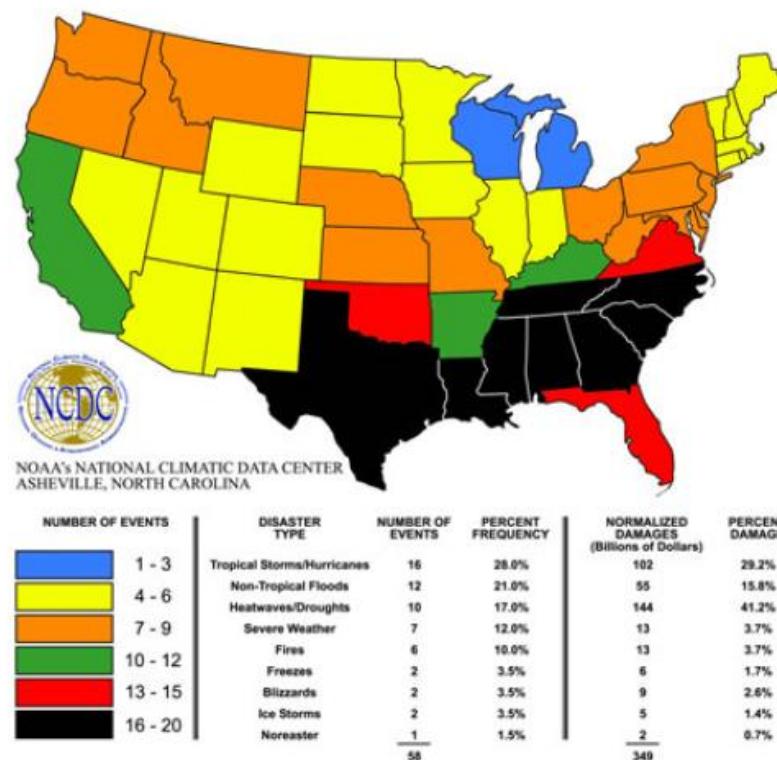


Figura 4-2: Mapa desastres naturales en Estados Unidos, entre los años 1980 y 2003 (Fuente: NCDC, 2003).

² National Climatic Data Center.

Dasgupta **et al.** (2009) estiman a nivel global los impactos futuros por el aumento de la intensidad de marea meteorológica producto del cambio climático y el aumento de población en sectores costeros. Se realizan simulaciones computacionales de diversos escenarios con aumentos en el nivel de marea meteorológica para 84 países, considerando las características geográficas y urbanas. En su análisis, Chile se ubica como el sexto país con mayor riesgo de sufrir daños en zonas costeras debido a la intensificación de marea meteorológica. Este ranking se aprecia en la Tabla 4-1, en la cual el valor entre paréntesis indica el porcentaje de impacto en zonas costeras debido al posible aumento de marea meteorológica.

Tabla 4-1: Primeros 10 países con riesgo debido a la intensificación de marea meteorológica en base al área costera.

Ranking	Área de zona costera
1	Kuwait (81,1)
2	Corea (61,7)
3	Namibia (60,2)
4	Guinea (58,6)
5	El Salvador (55,3)
6	Chile (54,7)
7	Bahamas (54,7)
8	Puerto Rico (51,8)
9	Yemen (50,2)
10	Oman (50,0)

Fuente: Adaptado de Dasgupta **et al.**, 2009

4.1.2 GENERACIÓN DE DAÑOS

Los eventos de marejadas se presentan con mayor frecuencia en comparación a catástrofes como terremotos y tsunamis, y al mismo tiempo tienen la capacidad de producir diversos efectos dañinos como inundación de zonas costeras, erosión costera en playas y acantilados, efectos en la cota de inundación en playas, efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas, aumento del daño durante inundaciones y tormentas, entre otros (Beyá & Winckler, 2012).

Los daños se producen principalmente por diferencias de presión que generan fuertes vientos, produciendo un aumento en el nivel de marea meteorológica. A esto se suma la sobre-elevación del nivel del mar en sectores con oleaje rompiente y el impacto de olas de gran altura sobre infraestructura costera que provocan sobrepasos y socavación en obras de protección, llegando a desplazar unidades de coraza o incluso destruyendo secciones de las estructuras. Para las marejadas que producen daños, se esperan alturas de ola por sobre valores medios. Sin embargo, existen casos en los cuales oleaje proveniente de direcciones menos frecuentes y alturas no excepcionales es capaz de producir impactos significativos.

4.1.3 ESCALAS PARA EVALUACIÓN DE DAÑOS E IMPACTOS

Las escalas de evaluación de fenómenos climáticos permiten categorizar cada uno de los eventos, ya sea respecto al daño que causan una vez ocurrido el episodio o para alertar a las comunidades que puedan resultar afectadas y así tomar los resguardos necesarios. En países que constantemente son afectados por fenómenos climáticos, esto ha sido una gran herramienta para tener una visión clara de los posibles escenarios que se puedan presentar. De esta forma, es posible desarrollar planes de emergencia que permitan disminuir los efectos o realizar una reconstrucción de zonas afectadas de forma eficiente.

En la revisión bibliográfica no se encontró una escala para evaluación de daños generados específicamente por marejadas en Chile o el extranjero, pero si se detectó la existencia de una escala de impactos por *storm-surge* (marea meteorológica) y una escala de vientos de huracanes, ambas en Estados Unidos.

Escala de impactos por *storm-surge* o marea meteorológica para comunidades costeras

La literatura científica contiene escasa información que describe la naturaleza destructiva del *storm-surge*. En este sentido, las comunidades costeras no poseen información crítica que pueda ayudarles a mejorar las decisiones de corto y largo plazo en su preparación ante efectos como inundaciones debido a este fenómeno. Información de largo plazo permitiría mejorar la planificación costera, reduciendo así las pérdidas de vidas humanas y económicas en eventos extremos. Junto con esto, las comunidades tendrían una mayor compresión de este tipo de fenómenos, desde el punto de vista de la frecuencia y de los posibles daños que puedan ocurrir (Needham & Keim, 2011).

La escala de impactos por *storm-surge* consiste en índices que proveen información de los impactos potenciales por inundación mediante cuatro categorías, en las cuales van en aumento los impactos destructivos (Tabla 4-2).

Tabla 4-2: Escala de impactos por *storm-surge* o marea meteorológica en comunidades costeras de Estados Unidos.

Nivel de impacto	Nombre de nivel	Altura de marea meteorológica en la costa del golfo de Estados Unidos	Descripción de daño
1	Impactos marinos	<1,22 [m]	Nivel del mar es alto, pero sólo alcanza áreas de operaciones marítimas sin causar inundación en edificios y carreteras costeras apenas son alcanzadas.
2	Impactos con sobrepaso	1,22 [m] y <1,83 [m]	Nivel del mar produce daños en áreas de operaciones marítimas, sobrepasa caminos costeros e inunda edificios de poca elevación.
3	Inundación de comunidades costeras	1,83 [m] y <2,44 [m]	Daños en infraestructura costera, como caminos, puentes y calzadas. Inundación en comunidades costeras y caminos.
4	Impactos destructivos	2,44 [m]	Graves daños en estructuras costeras, con pérdida de secciones o destrucción completa. Severa erosión costera. Todo tipo de edificios en zona costera con daño o incluso destrucción. Cierre de rutas costeras.

Fuente: Adaptado de Needham & Keim, 2011.

Escala de vientos de huracanes Saffir-Simpson

Es una escala que categoriza de 1 a 5 la intensidad de los huracanes. Ha sido una excelente herramienta para alertar a las comunidades sobre los posibles impactos dependiendo de la intensidad de este fenómeno. La escala indica ejemplos del tipo de daño e impactos en los Estados Unidos asociados con la intensidad del viento. La máxima velocidad del viento sostenida a 10 [m] de altura asociada con el huracán o ciclón es el factor determinante en cada categoría (Schott **et al.**, 2012).

La escala no entrega los daños potenciales de otros fenómenos asociados al huracán, como *storm-surge*, precipitaciones que induzcan inundaciones o tornados. Es importante destacar que los daños que se puedan ocasionar por los vientos dependen de los tipos de edificios de las comunidades afectadas y las normas bajo las cuales estos son construidos. A continuación se indican las categorías de la escala, con los valores de velocidad del viento y los posibles daños.

Categoría 1 (velocidad del viento entre 119 y 153 [km/h]): Fuertes vientos capaces de producir daño. Posibles lesiones o muertes de personas debido a objetos arrastrados por el viento. Casas de construcción liviana pueden experimentar daños, con pérdida de techos. Posible pérdida de techos en edificios. Rotura de vidrios en edificios en altura. Daños a los servicios de luz y agua potable por algunos días.

Categoría 2 (velocidad del viento entre 154 y 177 [km/h]): Vientos extremadamente fuertes causarán graves daños. Riesgo de lesión o muerte de personas. Casas de construcción liviana con altas posibilidades de ser destruidas. Alta probabilidad de pérdida de techos y daños en edificios. Pérdida total de los servicios de luz y agua potable por días o incluso semanas.

Categoría 3 (velocidad del viento entre 178 y 208 [km/h]): Ocurrirá daño devastador. Alto riesgo de lesión o muerte de personas. Casas de construcción liviana pueden ser destruidas, con pérdida de techos y paredes interiores. Alta probabilidad de pérdida de techos y daños en edificios. Gran cantidad de vidrios en edificios en altura serán destruidos. Pérdida de los servicios de luz y agua potable por varios días o incluso varias semanas.

Categoría 4 (velocidad del viento entre 209 y 251 [km/h]): Ocurrirá daño catastrófico. Riesgo muy alto de lesión o muerte de personas. Casas de construcciones livianas pueden colapsar por completo. Alto porcentaje de daño estructural en secciones superiores de edificios. La mayor parte de las ventanas de edificios en altura serán destruidas. Pérdida de los servicios de luz y agua potable por semanas o incluso meses.

Categoría 5 (velocidad del viento mayor a 252 [km/h]): Ocurrirá daño catastrófico. Alto riesgo de lesión y muerte de personas. Alta probabilidad de destrucción total y colapso de casas con construcciones livianas. Daño significativo en techos de edificios comerciales, colapso total de edificios de estructuras metálicas y muros reforzados presentarán fallas. Pérdida de los servicios de luz y agua potable por semanas o incluso meses.

4.2 CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA

El sistema climático terrestre está gobernado por la recepción, transformación y transporte de energía desde y hacia los polos, lo cual es realizado mediante la interacción de la atmósfera y los océanos (Sverdrup, 1942; Izquierre, 2010). Los fenómenos que ocurren en los procesos del sistema climático se clasifican mediante su escala tiempo-espacio, los cuales se exponen en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Rango de valores para las distintas escalas de movimientos atmosféricos organizados.

Mecanismo de transferencia	Longitud típica de escala [m]	Tiempo típico de escala [s]
Molecular	10^{-7} - 10^{-2}	10^{-1}
Turbulenta	10^{-2} - 10^3	10^1
Convectiva	10^3 - 10^4	10^3
Mesoescala	10^4 - 10^5	10^4
Escala sinóptica	10^5 - 10^6	10^5
Larga escala	$>10^6$	10^6

Fuente: Adaptado de CEM II-2, 2003.

La mayor fuente de energía que impulsa el sistema climático es la radiación solar entrante, pero esta no incide de forma homogénea a lo largo de toda la superficie terrestre, sino que concentra mayor energía en el Ecuador y los trópicos y menor en las zonas polares. Esto genera diferencias de calor entre latitudes bajas, medias y altas que son equilibradas mediante un transporte meridional hacia los polos, llevado a cabo por la atmósfera (latitudes medias) y los océanos (latitudes bajas).

En la atmósfera, la transferencia de calor hacia los polos es llevada a cabo por medio de tres grandes células o celdas, cuya estructura es conocida como Circulación General de la Atmósfera (Figura 4-3).

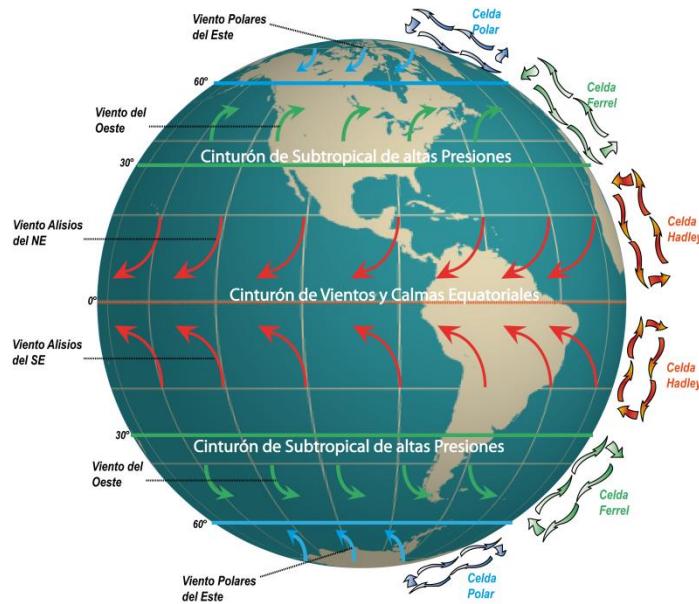


Figura 4-3: Circulación General de la Atmósfera (Fuente: www.proyectolatin.org).

El aire caliente de las regiones ecuatoriales asciende y se mueve hacia latitudes mayores, proceso en el cual el aire disminuye su temperatura y desciende a la superficie. Esto ocurre aproximadamente en la latitud 30° de ambos hemisferios donde se forman los sistemas de altas presiones. Cuando el aire desciende, logra alcanzar la superficie terrestre y una parte es re-circulada hacia el Ecuador, proceso en el cual se forman los Vientos Alisios. La otra fracción restante de aire es propagada hacia los polos (Goosse **et al.**, 2010).

Del mismo modo descrito anteriormente, el aire frío desciende sobre los polos y se propaga hacia el Ecuador. Entre las latitudes 30 y 60° de ambos hemisferios los dos flujos de aire se encuentran, cuya convergencia genera una forzante que hace ascender al aire. La concentración en un mismo punto de estos dos flujos, uno muy frío y otro templado, junto con diferenciar de presión atmosférica, da lugar a un fuerte gradiente de presión, generando los Vientos del Oeste.

Adicionalmente, la interacción de los flujos de aire cálido y frío da como resultado tres grandes células o celdas meridionales: las células en los trópicos conocidas como Células de Hadley, las células de latitudes medias o Células de Ferrel y las de latitudes polares o Células Polares (Izaguirre, 2010).

4.2.1 PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La presión atmosférica es uno de los elementos del sistema climático que menos se aprecian dentro de la vida cotidiana, debido a que sus variaciones en la superficie terrestre no son perceptibles, como si lo son por ejemplo la temperatura, precipitación o el viento. Sin embargo, tiene un rol fundamental en las variaciones diarias de las condiciones climáticas, ya que las diferencias de presión generan los vientos, los que a su vez producen variaciones de temperatura o humedad relativa.

Especificamente, la presión atmosférica corresponde a la presión que ejerce el peso de toda la masa de una columna de aire sobre un nivel dado. Su valor promedio al nivel del mar es aproximadamente 1013,2 [hPa] a 15 [°C]. Dado que la presión del aire aumenta con la temperatura, se espera que en los días cálidos la presión sea mayor que en los días más fríos, pero esto no ocurre en el sistema climático (Sarochar, 2013).

En días fríos, las moléculas de aire se mueven a menor velocidad en la atmósfera y se encuentran a menos distancia. Esto provoca que el aire tenga una mayor densidad y la disminución del movimiento molecular, traducido en una disminución de temperatura, es compensado con aumento en el número de moléculas por unidad de volumen (aumento de densidad) que ejercen presión. El resultado es un aumento neto de presión, lo cual explica que la presión atmosférica sea mayor en días fríos y menor en días cálidos (Goosse **et al.**, 2010).

4.2.2 VIENTO

Dentro de los factores que influyen en la formación del viento se encuentran el calentamiento en superficie que genera diferencias de presión, la distribución desigual de la radiación solar y las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. Dado que el aire fluye desde las áreas de altas presiones a las de baja presión, el viento es el movimiento de las masas de aire y es el resultado de diferencias de presión y gradientes térmicos (Sarochar, 2013).

Adicionalmente, existen otros factores que afectan al viento. Si no hubiera fricción y si la Tierra no presentara rotación, el aire se propagaría libremente desde zonas de alta presión hacia las de baja presión. Como en la realidad ambos efectos existen, el viento es controlado por una combinación de estos factores, los cuales corresponden a la fuerza de variaciones de presión, efecto de rotación terrestre y fricción del aire con la superficie.

Fuerza de variaciones de presión

Esta fuerza es producida por las variaciones de presión, lo cual contribuye a la formación del viento. Cuando una masa de aire es sometida a una mayor presión en uno de sus lados, el desbalance produce una fuerza dirigida desde la zona de alta presión a la de baja presión en forma perpendicular a las isobaras. Esta diferencia entre altas y bajas presiones produce el viento. Mientras mayor sea la diferencia entre dos lugares, mayor es la intensidad del viento en dicha región (Sarochar, 2013).

Efecto de la rotación terrestre o de Coriolis

El efecto de Coriolis o fuerza de Coriolis, describe como todo objeto que se encuentra en movimiento sobre la superficie terrestre (incluyendo el aire y las aguas), experimenta una desviación debido a la rotación de la Tierra. Los desvíos en las trayectorias se producen hacia la derecha e izquierda en el hemisferio norte y sur respectivamente.

La dirección de la fuerza de Coriolis posee una componente que se dirige en sentido perpendicular a la fuerza de presión. Esto produce que la dirección del movimiento del aire no sea cruzando las isobaras, sino que aproximadamente paralelo a ellas (SHOA³).

El viento generado por el equilibrio entre la fuerza de presión y la fuerza de Coriolis se conoce como viento geostrófico (V_g), cuyas componentes son:

$$u_g = \frac{-1}{\rho f} * \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$v_g = \frac{-1}{\rho f} * \frac{\partial P}{\partial x}$$

Donde:

ρ : Densidad del aire.

f : Parámetro de Coriolis dependiente de la latitud.

u_g : Viento geostrófico en eje x .

v_g : Viento geostrófico en eje y .

De forma vectorial se tiene: $V_g = \frac{-1}{\rho f} * \frac{\partial P}{\partial y} i + \frac{-1}{\rho f} * \frac{\partial P}{\partial x} j$

³ Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Viento Geostrófico. Disponible en [http://www.shoa.cl/Vaul/Vaul/meteonavegacion/tema2.htm]. Accesado 16 de enero de 2016.

Fricción del aire con la superficie

El efecto de la fricción entre el aire y superficie terrestre disminuye la velocidad del viento y desvía el movimiento a través de las isobaras hacia el área de bajas presiones. El nivel de irregularidad del terreno determina el ángulo en que se desvía el viento respecto de las isobaras, como también el grado de disminución de la velocidad. Sobre los océanos relativamente llanos, la fricción es pequeña y el aire se desvía entre 10° a 20° respecto de las isobaras, y su velocidad disminuye aproximadamente en un 33% (Inzunza, s.f.).

La Figura 4-4 muestra el perfil de velocidad del viento en cercanías de la capa límite atmosférica. A medida que se asciende en la vertical, comienza a disminuir el efecto del roce con la superficie terrestre. La zona con fricción constante se encuentra aproximadamente a 100 [m] de altura. Para alturas superiores a 1 [km], el viento ya no se encuentra bajo los efectos de fricción, donde fluye paralelo a las isobaras.

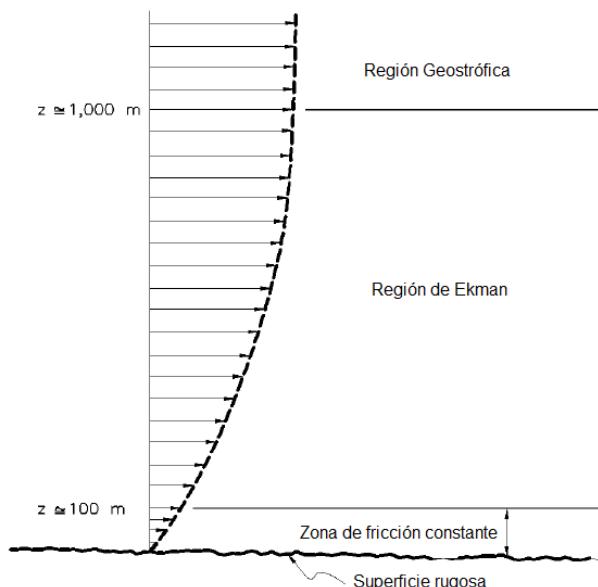


Figura 4-4: Perfil de velocidad de viento en la capa límite atmosférica (Fuente: Adaptado de CEM II-2, 2003).

4.2.3 SISTEMAS FRONTALES

En la superficie de la Tierra, la atmósfera adquiere características termodinámicas de temperatura y cantidad de humedad que corresponden a la superficie sobre la cual permanece una cierta cantidad de tiempo. Estas características pueden llegar a ser distintas a las de otro sector atmosférico adyacente que no estuvo en contacto con la misma superficie (Dirección Meteorológica de Chile⁴).

⁴ Disponible en <http://www.meteochile.gob.cl>. Accesada 16 de enero de 2016.

Estas diferencias entre dos zonas atmosféricas dan paso a la formación de masas de aire, las cuales son amplios sectores de la atmósfera con dimensiones de algunos miles de kilómetros, poseen características físicas propias y se desplazan a velocidades dependientes de su densidad. Los principales generadores de masas de aires son los continentes que dan origen a masas de aire más secas, y los océanos que forman masas de aire más húmedas. El continente antártico es una importante zona generadora de masas de aire polar, muy frío y seco y por lo tanto muy diferente del aire de masas formadas en los océanos tropicales.

La superficie de contacto entre dos masas de aire de distintas características termodinámicas corresponde a un Sistema Frontal (Figura 4-5). Las discontinuidades termodinámicas de las masas de aire se manifiestan en abundante nubosidad e incluso derivan en precipitaciones que pueden alcanzar distintas intensidades.

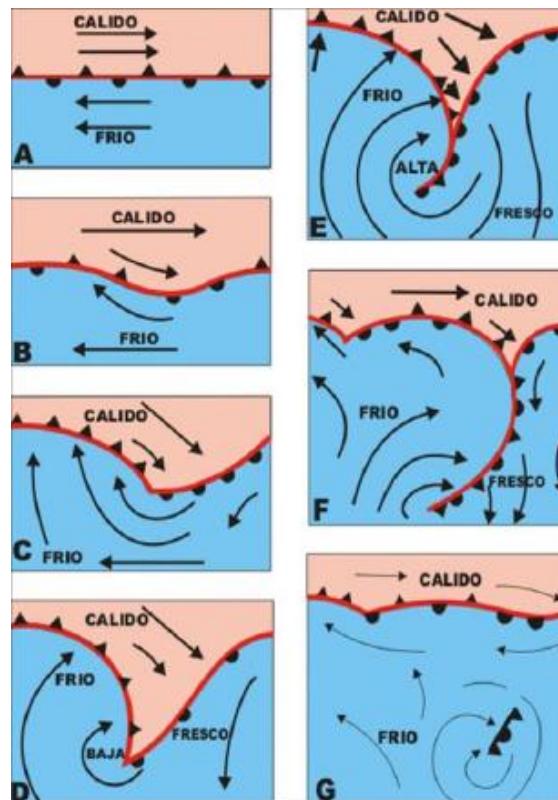


Figura 4-5: Evolución de un sistema frontal. A, encuentro del aire frío y cálido en la superficie frontal; B-C-D, etapa de onda; E-F, madurez; G, desaparición (Fuente: Dirección Meteorológica de Chile).

Un frente de mal tiempo o sistema frontal presenta las siguientes características:

Cambio rápido en la dirección del viento: reflejado a lo largo del frente y una típica curvatura en las isobaras, cuyo vértice apunta en sentido desde las bajas a las altas presiones.

Nubosidad extensa: no siempre se presenta esta condición pero cuando lo hace tiene la capacidad de producir precipitación, principalmente en el lado frío del frente.

En casos extremos, la temperatura cercana al suelo puede estar influenciada fuertemente por condiciones locales. Esto puede confundir los contrastes existentes a través de capas profundas de aire.

Cuando las dos masas de aire interactúan, avanzan en una dirección determinada pero con frecuencia lo hacen a distinta velocidad. Esto provoca que una de masas tienda a desplazar a la otra, introduciéndose por debajo o encima de la masa que avanza frente a ella. Dado que la masa de mayor temperatura tiene un menor peso, al efecto de desplazamiento que se ejerce entre ambas masas se superpone el efecto de elevamiento de la masa cálida sobre la masa fría. De esta forma se determina una estructura vertical muy particular para dos tipos de frentes.

Cuando una masa fría avanza desplazando a una masa más cálida, se obtiene la formación de un Frente Frío. En este caso, la masa fría penetra por debajo de la masa cálida, elevándola (Figura 4-6).

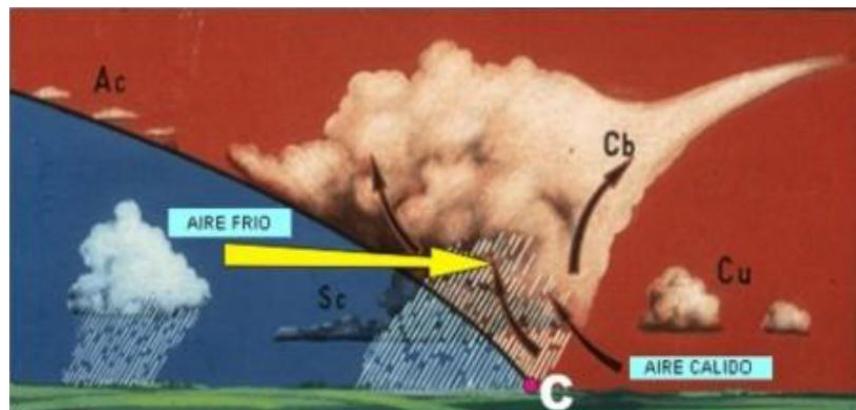


Figura 4-6: Formación de un frente frío en plano vertical (Fuente: Dirección Meteorológica de Chile).

Por el contrario, cuando la masa cálida es la que desplaza a la masa fría, se trata de un Frente Cálido. En este caso el aire cálido se ubica sobre la masa de aire frío (Figura 4-7).

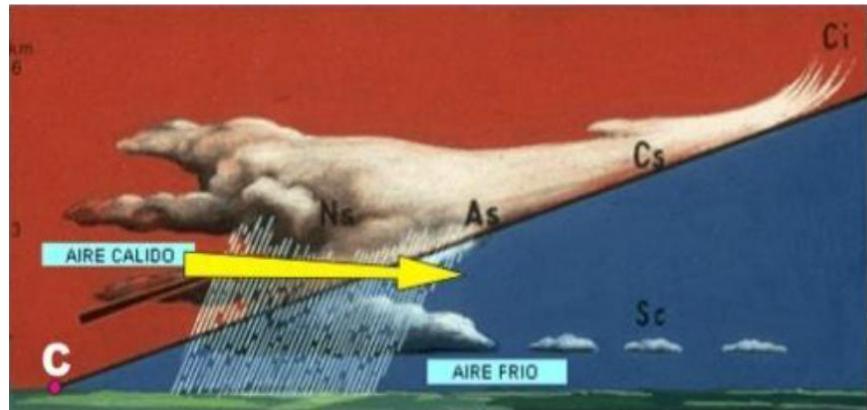


Figura 4-7: Formación de un frente cálido en plano vertical (Fuente: Dirección Meteorológica de Chile).

El punto de contacto (C) entre la superficie frontal y la superficie del suelo, se va retrasando en relación a la dirección de avance de las masas de aire, haciendo que la pendiente de un frente frío vaya aumentando con el tiempo. En el caso de un frente cálido, la pendiente generada comienza a disminuir.

En la Figura 4-8 se muestran las zonas de generación de oleaje, según su frecuencia e impacto, el cual se propaga hacia las costas de Chile. Los sistemas de bajas presiones son los principales generadores de campos de viento, los cuales interactúan con la superficie del mar y dan paso a la generación de oleaje (tema expuesto en detalle en la sección 4.5.1). Mientras más intensos sean estos frentes, mayores serán las velocidades de los vientos y por lo tanto las olas generadas serán más extremas. Este fenómeno provoca la formación de marejadas que se propagan hacia la costa, presentando efectos como los mencionados en la sección 4.1.2.

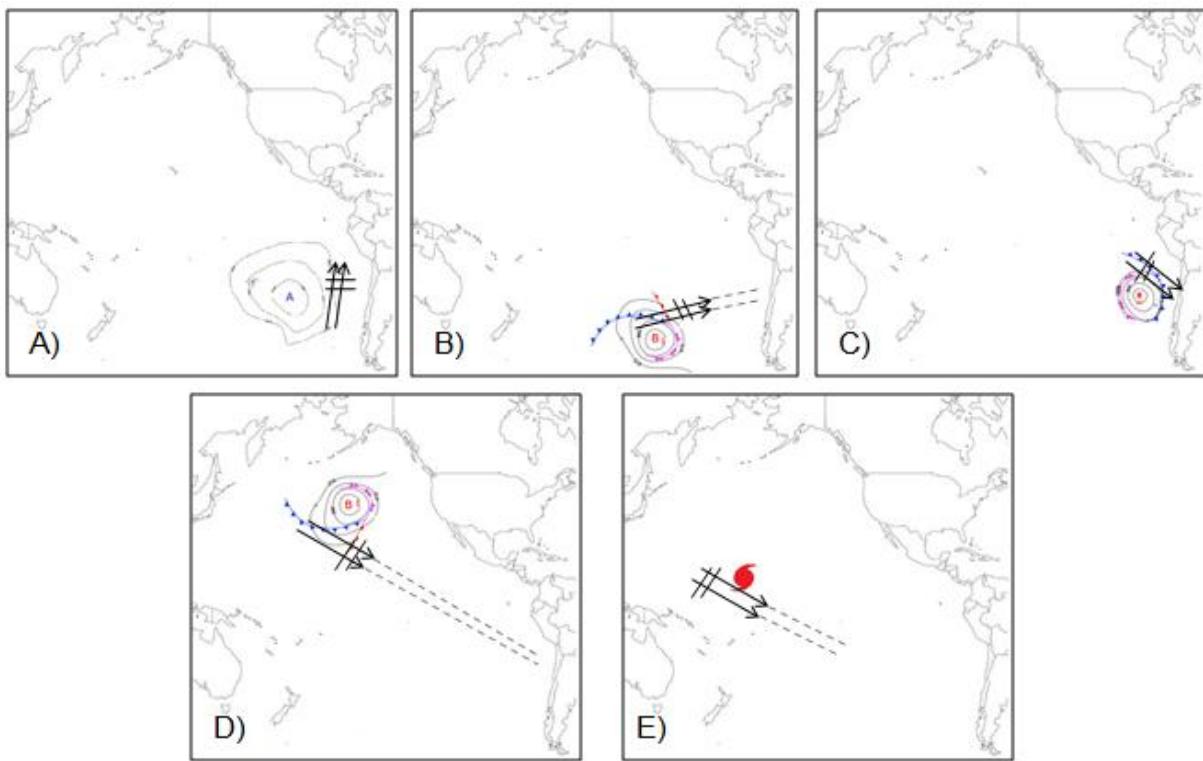


Figura 4-8: Sistemas frontales generadores de oleaje que alcanzan las costas chilenas. A) Anticiclón del pacífico (predominante); B) Frentes Australes (frecuentes); C) Temporales (anómalo); D) Frente boreal (dañino); E) Ciclones tropicales (Fuente: Elaboración propia).

4.3 OSCILACIONES CLIMÁTICAS

Las oscilaciones climáticas corresponden a cualquier oscilación cíclica en el clima a nivel mundial o regional, lo cual establece patrones climáticos. Estas fluctuaciones se manifiestan con cambios en la temperatura atmosférica y de la superficie del mar, vientos, precipitación, entre otros parámetros. Se presentan en diferentes escalas de tiempo, ocurriendo de forma interanual, decenal, multidecadal, llegando a escalas de siglos o incluso milenios. En la Tabla 4-4 se exponen algunas de las oscilaciones más conocidas, junto con el parámetro medido y escala de tiempo en la cual ocurren.

Tabla 4-4: Oscilaciones climáticas, parámetro medido y escala de tiempo. Siglas entre paréntesis corresponden al nombre en inglés de cada oscilación.

Nombre	Parámetro medido	Escala de tiempo
Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)	Temperatura superficial del mar	40-60 años de máximo a máximo
El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)	Presión atmosférica y temperatura superficial del mar	2-6 años de máximo a máximo
Oscilación del Ártico (AO)	Vientos conducidos por diferencias de temperatura	De algunas semanas a muchos meses
Oscilación del Atlántico Norte (NAO)	Presión atmosférica	De algunas semanas a muchos meses
Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)	Temperatura superficial del mar	50-80 años de máximo a máximo
Modo Anular del Sur (SAM)	Vientos conducidos por diferencias de temperatura	Algunas semanas a muchos meses
Dipolo del Océano Índico (IOD)	Viento y temperatura superficial del mar	2 o más años de máximo a máximo

Fuente: University Corporation for Atmospheric Research (UCAR⁵).

La Figura 4-9 muestra cada una de las oscilaciones climáticas expuestas en la Tabla 4-4 ubicadas en su región de origen a nivel global. Se aprecia que en las costas de Chile el fenómeno más cercano, y por ende que el presenta la mayor influencia, es el ENSO. Adicionalmente, SAM presenta fases que dirigen campos de viento en dirección Este a Oeste a lo largo del Océano Pacífico, lo cual influye en las condiciones climáticas del territorio chileno.

⁵ University Corporation for Atmospheric Research. Disponible en [<https://www2.ucar.edu/for-staff/update/cycles-dipoles-and-oscillations>]. Accesada 30 de diciembre de 2015.



Figura 4-9: Oscilaciones climáticas en sus regiones de origen (Fuente: www.ucar.edu).

A continuación, se presentan descripciones detalladas de las oscilaciones que presentan influencia en el área del Océano Pacífico.

4.3.1 EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS)

El ENOS es un evento climático natural que se desarrolla en el océano Pacífico ecuatorial central (Maturana **et al.**, 2004). Es el fenómeno más importante en la interacción océano-atmósfera, causando variabilidad climática a nivel global en escalas de tiempo interanual (NOAA-ESRL⁶).

El origen de la expresión “El Niño” corresponde al hecho de que pescadores artesanales de las costas de Perú identificaron la ocurrencia estacional de agua cálida, la cual solía presentarse alrededor de la celebración de la Navidad. Por este motivo, los pescadores decidieron nombrar este fenómeno como “la corriente de El Niño”, haciendo referencia al nacimiento del Niño Jesús (Trenberth, 1997).

En condiciones normales, las aguas del Pacífico en América del Sur son frías y ricas en nutrientes, debido a la presencia de la corriente de Humboldt proveniente de las aguas de la Antártida. Este es uno de los ecosistemas más productivos del planeta, caracterizado por un flujo hacia el norte de aguas superficiales sub-antárticas y por zonas de surgencia de aguas frías sub-superficiales, ricas en nitratos, fosfatos y otros nutrientes (CEPAL⁷, 2012). Esto genera un ecosistema abundante en vida marina que explica la riqueza pesquera de países como Chile y Perú.

⁶ National Oceanic & Atmospheric Administration-Earth System Research Laboratory. Disponible en [<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/index.html>]. Accesada 30 de diciembre de 2015.

⁷ Corporación Económica para América Latina y el Caribe.

El Niño-Oscilación del Sur presenta dos fases, expuestas en la Figura 4-10. La fase cálida, conocida como El Niño, se expresa con un aumento de la temperatura superficial del mar y una disminución de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico. Al ocurrir esto, las aguas cálidas del Pacífico desde Indonesia y Australia llegan a Sudamérica, desplazando las aguas frías de la corriente de Humboldt. Esta anomalía genera cambios importantes en el clima, con fuertes precipitaciones y temporales de viento en el lado este del océano Pacífico, afectando la economía pesquera en países ribereños del Pacífico sudoriental.

Por otra parte, la fase inversa o fría del ENOS (La Niña) se caracteriza por exhibir condiciones en la temperatura superficial del mar más frías de lo normal debido a que en superficie quedan las aguas más frías del océano Pacífico ecuatorial y disminuye la temperatura superficial del mar. Esto intensifica los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico, provocando períodos de sequía (Maturana **et al.**, 2004).

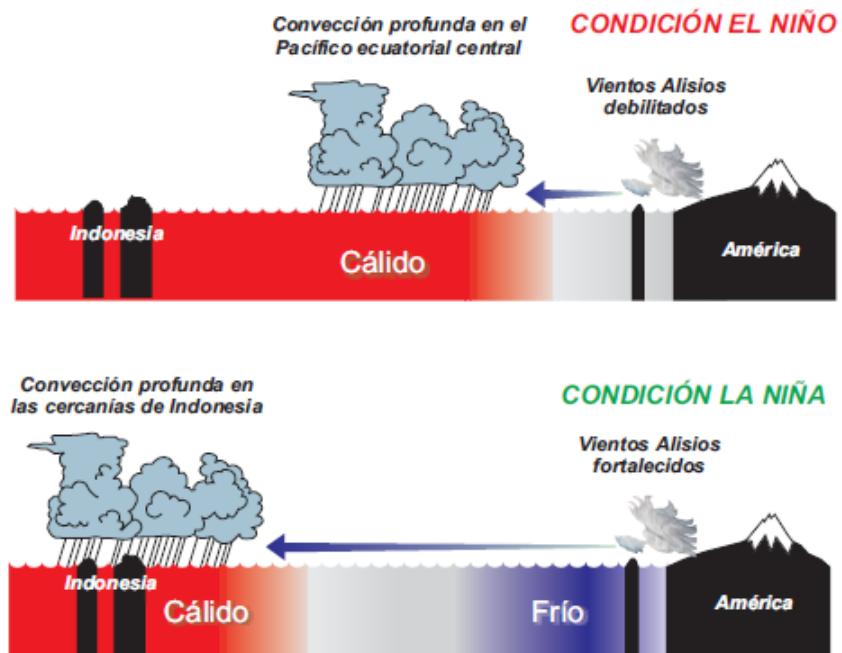


Figura 4-10: Modelo de viento, precipitación y temperatura del mar en las fases extremas del ciclo ENOS
(Fuente: Maturana **et al.**, 2004).

En la Figura 4-11 se muestran los valores del Índice Multivariado del ENOS (MEI, por sus siglas en inglés) entre los años 1950 y 2015. El MEI es calculado por separado de forma bimensual para cada uno de los 12 meses del año. Monitorea el fenómeno en base a seis variables, las cuales son: presión al nivel del mar, componentes de viento superficial zonal (U) y meridional (V), temperatura superficial del mar, temperatura superficial del aire y

fracción de nubosidad total en la atmósfera (NOAA-ESRL). Los valores positivos del índice indican la fase cálida de la oscilación (El Niño), mientras que los valores negativos muestran la fase fría (La Niña).

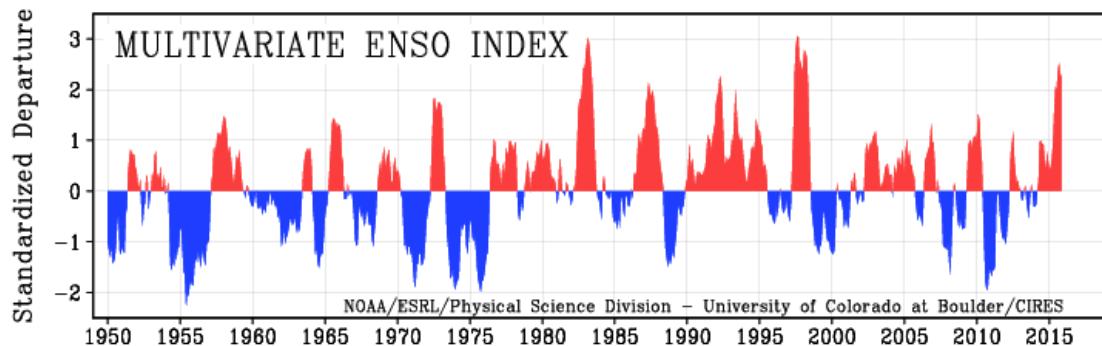


Figura 4-11: Valores de Índice Multivariado del ENOS entre los años 1950 y 2015 (Fuente: NOAA-ESRL).

Los dos episodios cálidos más importantes de las últimas décadas se presentaron en los períodos 1982-1983 y 1997-1998. Estos eventos han motivado intensos estudios sobre sus respectivos impactos socioeconómicos, especialmente llevados a cabo por organismos internacionales vinculados con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

El episodio de 1982-1983 provocó 2.000 víctimas alrededor del mundo y sus daños se estimaron cercanos a 10 mil millones de dólares americanos (Voituriez & Jacques, 2000). Se produjeron intensas precipitaciones que persistieron a lo largo de la costa de América del Sur. A modo de ejemplo, en la costa de Ecuador el agua caída fue 30 veces superior a las condiciones normales, mientras que en el norte del Perú llegó a ser 340 veces superior a lo normal (Maturana *et al.*, 2004).

En Chile, la última fase cálida extrema de ENOS con características significativas ocurrió entre los años 1997 y 1998. Este evento fue uno de los más intensos de los últimos tiempos, provocando alteraciones en las pesquerías y severas inundaciones en la zona central del país. La fase fría se desarrolló inmediatamente después durante los años 1998-1999.

Los valores de MEI para el año 2015 indican que está siendo una de las fases cálidas más intensas desde 1950. Se espera que El Niño continúe intenso durante invierno 2015-2016 del hemisferio norte y verano del hemisferio sur. Los pronósticos de especialistas indican que se espera que este evento pueda ubicarse dentro de los primeros 3 episodios más fuertes medidos desde 1950. Esto debido a que las variaciones de la temperatura superficial del mar medidas muestran una importante alza alrededor de la zona ecuatorial del océano Pacífico,

las cuales se muestran en la Figura 4-12 (NWS-NCEP⁸ e Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad, 2015).

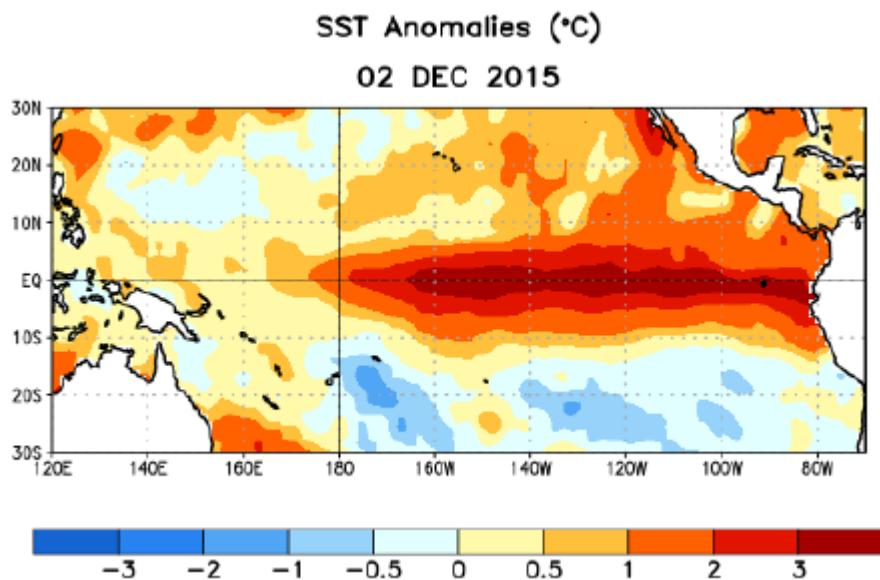


Figura 4-12: Anomalías (C°) promedio de la temperatura superficial del océano (SST, por sus siglas en inglés) para la semana centrada el 2 de diciembre de 2015. Las anomalías son calculadas utilizando como referencia base los periodos promedio semanales de 1981-2010 (Fuente: NWS-NCEP e Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad, 2015).

Por otra parte, los eventos La Niña presentan una duración de más de tres años desde 1950. En promedio tienden a durar más tiempo que los eventos El Niño. Los dos eventos de mayor permanencia, manteniéndose durante la mayor parte de los años en el intervalo, son 1954 a 1956 y 1973 a 1975. El evento más largo se produjo en 1999-2001, generando un par de años después de uno de los eventos Niño más intensos (1997-1998).

⁸ National Weather Service-National Centers for Environmental Prediction.

4.3.2 OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO (PDO)

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) es un patrón de variabilidad climática que se desarrolla a lo largo de la zona norte del Océano Pacífico. Usualmente es descrito como el ENOS de largo periodo, ya que al igual que este presenta una fase positiva o cálida y otra negativa o fría, pero en diferentes escalas de tiempo (NOAA).

Durante la fase cálida de PDO la temperatura superficial del mar (TSM) presenta valores superiores al promedio en la costa oeste de Norte América y en la zona tropical del Pacífico oriental, mientras que en la zona central del Pacífico Norte la TSM es más fría que el promedio. Patrones opuestos ocurren durante la fase negativa o fría (UCAR).

En la Figura 4-13 se presentan las condiciones típicas durante cada una de las fases descritas de PDO. La temperatura superficial del mar es representada como anomalía en grados Celsius, con valores superiores o inferiores al promedio según corresponda. Por otra parte, las flechas en negrita indican las desviaciones típicas del viento durante las fases.

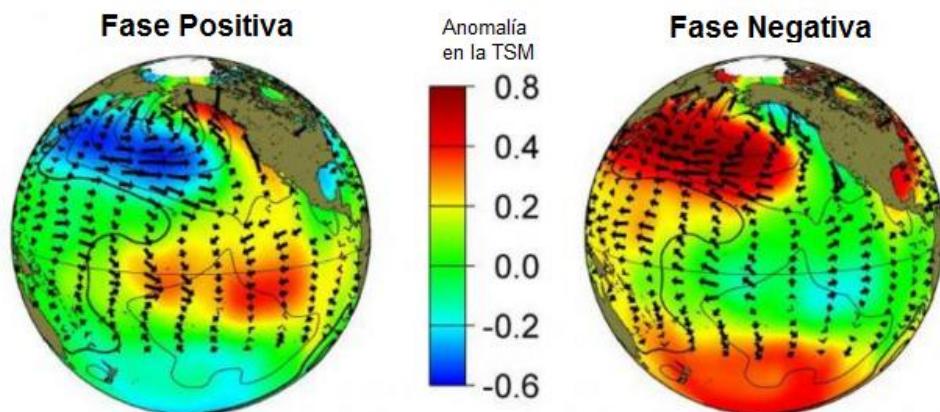


Figura 4-13: Representaciones de fases positiva y negativa de Oscilación Decadal del Pacífico (Fuente: Adaptado de UCAR).

Los cambios en la fase de PDO pueden presentar efectos similares a los ocurridos en el ciclo ENOS, afectando la actividad de huracanes en los océanos Atlántico y Pacífico, provocando sequías e inundaciones alrededor de la cuenca del Pacífico y afectando la productividad de los ecosistemas marinos. Por otra parte, estudios indican que PDO puede intensificar o disminuir los impactos de ENOS, dependiendo de la fase en la cual se encuentren estas oscilaciones. Cuando ENOS y PDO están en la misma fase, los impactos inducidos por El Niño o La Niña serán magnificados respecto a los patrones normales. Por el contrario, si

ENSO y PDO están fases opuestas, los efectos sobre la variabilidad climática global se debilitarán (Wang **et al.**, 2014).

En la Figura 4-14 se expone la serie de tiempo del índice PDO obtenido de la agencia NOAA⁹, entre los años 1854 y 2015. Este índice está basado en una reconstrucción de la temperatura superficial del mar mediante una regresión de las anomalías de TSM comparadas con el índice PDO de Mantua (Mantua **et al.**, 1997).

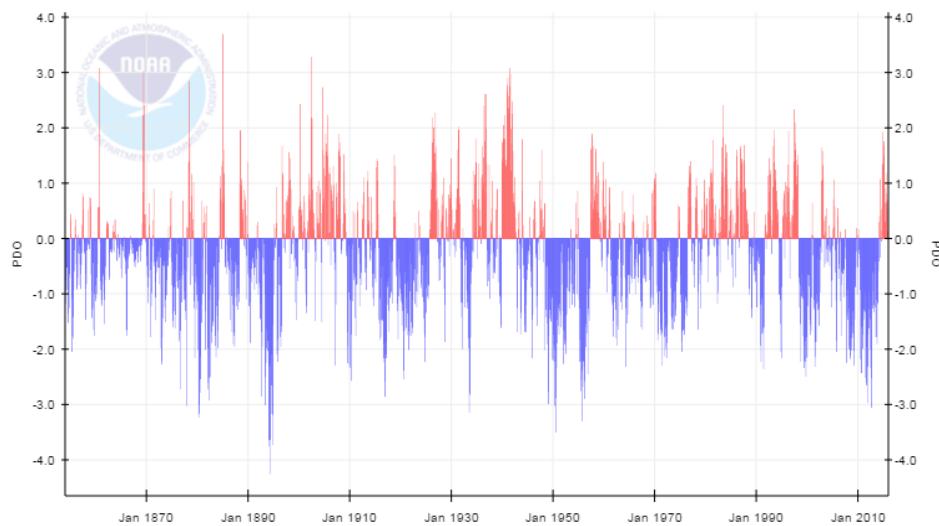


Figura 4-14: Índice PDO entre los años 1854 y 2015 (Fuente: NOAA).

En la figura expuesta se aprecia que una fase cálida predominó desde fines de 1977 hasta el año 2000 aproximadamente, con el PDO moviéndose hacia condiciones más frías desde entonces. En el intervalo de tiempo mencionado se presentó la última fase cálida, específicamente entre los años 1977 y 1999 (NASA¹⁰). Posterior al año 2010, la oscilación ha presentado una tendencia que parece indicar el inicio de una nueva fase cálida.

⁹ Disponible en [<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>]. Accesada 24 de febrero de 2016.

¹⁰ NASA-Jet Propulsion laboratory. Disponible en [<https://sealevel.jpl.nasa.gov/science/elninopdo/pdo/>]. Accesada 15 de abril de 2016.

4.3.3 MODO ANULAR DEL SUR (SAM)

El Modo Anular del Sur, también conocido como Oscilación Antártica, define los cambios en los vientos del oeste que son impulsados por contrastes de presión atmosférica, que a su vez generan diferencias de presión entre los trópicos y las zonas polares del sur (UCAR). El cambio de posición de la banda de vientos del oeste, producidos de oeste a este en latitudes entre 30° y 60° de ambos hemisferios, influye en la fuerza y posición de frentes fríos y sistemas de tormenta en latitudes medias.

En las fases positivas de SAM, los fuertes vientos del oeste se contraen hacia la Antártica. Esto se traduce en vientos del oeste más débiles de lo normal y altas presiones sobre el sur de Australia, restringiendo la entrada de frentes fríos. En la Figura 4-15 se muestra que la fase positiva del SAM está caracterizada por un aumento en la presión atmosférica alrededor de las latitudes medias (sector con tonos rojos) y una disminución de presión en altas latitudes (zona con colores azules). Esta diferencia de presión produce un aumento de los vientos del oeste circumpolares (flecha blanca) y un movimiento hacia el sur de la trayectoria de tormentas del Hemisferio Sur. Esto genera mayores tormentas en el lado este del océano Pacífico.

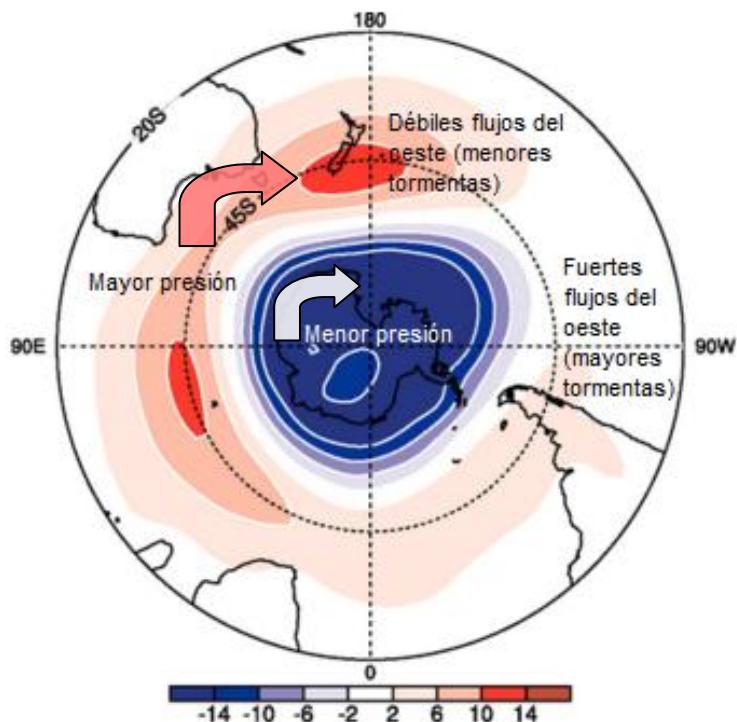


Figura 4-15: Fase positiva de SAM. El patrón geopotencial SAM como una regresión basada en la serie de tiempo SAM para anomalías estacionales a 850 [hPa] (Fuente: Adaptado de www.ipcc.ch).

En eventos los eventos de la fase negativa de SAM, se refleja una expansión del cinturón de vientos fuertes del oeste hacia el Ecuador. Esto se traduce en vientos del oeste que provocan mayores tormentas y sistemas de baja presión sobre el sur de Australia.

La Figura 4-16 muestra los valores del índice SAM entre los años 1967 y 2006 utilizando datos que analizan la diferencia mensual entre anomalías de la presión del nivel medio del mar en seis estaciones cercanas a los 40°S y seis estaciones cercanas a los 65°S . Dado que está calculada directamente desde estaciones de datos, no está influenciada por cambios en cobertura observacional (Marshall, 2003).

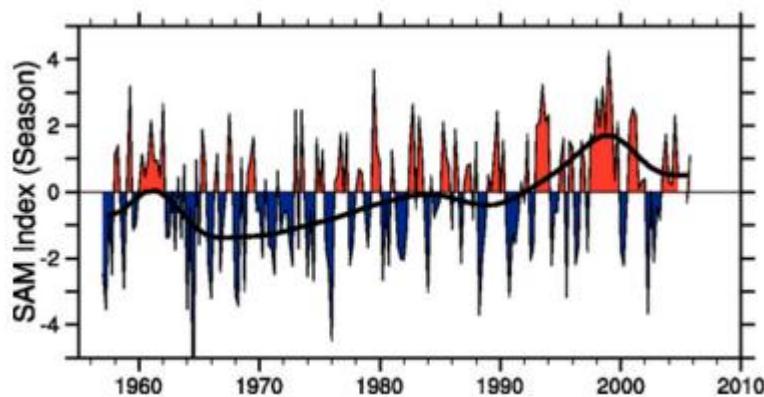


Figura 4-16: Valores estacionales del índice SAM. La curva de negro liso muestra variaciones decenales (Fuente: www.ipcc.ch).

Se aprecia que la curva negra que recorre la figura presenta una tendencia a aumentar los valores del índice a medida que avanzan las décadas, hasta llegar aproximadamente hasta el año 1999. El índice alcanza su mayor valor para el intervalo de tiempo entre 1997-1998, lo cual coincide con la fase cálida del ENOS para el mismo periodo.

Con base en lo anterior, en este estudio se han considerado El Niño-Oscilación del Sur y el Modo Anular del Sur para relacionarlos con eventos de marejadas debido a la influencia que tienen en las condiciones climáticas en Chile, interacción con la superficie del mar y las escalas de tiempo en las cuales ocurren.

4.4 CAMBIO CLIMÁTICO

El clima del planeta depende de diversos factores que interactúan de manera compleja. Actualmente se considera que el clima es un estado cambiante de la atmósfera mediante sus interacciones con los continentes y océanos, en diversas escalas de tiempo-espacio. Cuando un parámetro meteorológico, como la precipitación o la temperatura, presenta valores fuera de los medidos en un periodo de tiempo de varios años, se entiende que se está en presencia de una anomalía climática. Estas anomalías pueden ser generadas por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera, o por forzantes externas tales como cambios en la intensidad de radiación solar entrante a la Tierra o cambios en las características de concentración de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo, entre otros (Martínez & Fernández, 2004).

Los cambios en las condiciones climáticas se atribuyen principalmente a la acción directa o indirecta de la actividad humana, la cual actúa en conjunto con la variabilidad climática natural. Las dos fuentes más importantes por medio de las que el ser humano contribuye al cambio climático son la quema de combustibles fósiles y los procesos de deforestación. Con la primera se aumenta la concentración de gases invernadero en la atmósfera, en particular de dióxido de carbono, el principal gas de efecto invernadero de origen humano. Con la segunda se emite el carbono capturado en la biomasa forestal (CEPAL, 2012).

La Figura 4-17 es una vista esquemática de los componentes fundamentales que interactúan en el cambio climático. Los procesos e interacciones son representados con flechas delgadas, mientras que los aspectos de la configuración natural del planeta que sufren alteraciones con flechas en negrita.

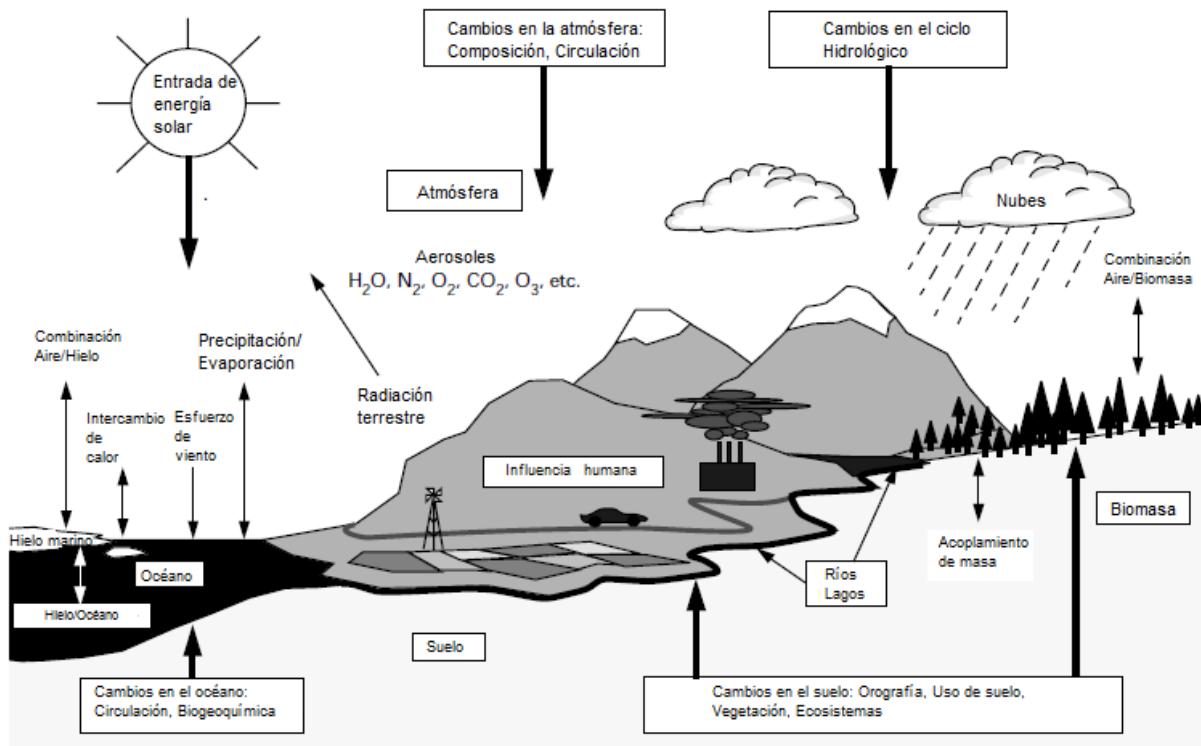


Figura 4-17: Vista esquemática de los componentes del sistema de cambio climático global (Fuente: Adaptado de Houghton, 2002).

Un impacto potencial del cambio climático que aún se encuentra en estudio se relaciona con los cambios en la frecuencia de ocurrencia e intensidad de oscilaciones climáticas como El Niño y La Niña, los cuales tienen repercusiones en el sistema de la corriente de Humboldt. Las interacciones océano-atmósfera y el fortalecimiento de los vientos sobre la superficie del mar están ligados a los cambios de escenario de los modelos del cambio climático e influirán en el funcionamiento de los sistemas oceanográficos del Pacífico suroriental. En Chile y Perú, estos cambios podrían afectar de forma negativa la elevada productividad pesquera alimentada por el sistema de la corriente de Humboldt. Junto con esto, y vinculado a lo anterior, existe la posibilidad que aumente la ocurrencia de eventos con mínima concentración de oxígeno, con consecuencias negativas en la fauna marina y costera (CEPAL, 2012).

A continuación se exponen dos aspectos fundamentales ligados al cambio climático, los cuales corresponden al efecto invernadero y calentamiento global.

4.4.1 EFECTO INVERNADERO

La atmósfera terrestre está compuesta por un delgado manto o capa de gases que rodean el planeta. La importancia de esta capa se debe a que en ella se encuentran los gases fundamentales para el desarrollo de la mayor parte de la vida en la Tierra (Caballero *et al.*, 2007).

El Efecto Invernadero corresponde al mecanismo de la Tierra por medio del cual el planeta se calienta. Por lo tanto, la composición de la atmósfera juega un rol fundamental en la temperatura de la Tierra, ya que a medida que aumenten las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera mayor será la temperatura del planeta (Caballero *et al.*, 2007).

El principal gas de efecto invernadero corresponde al vapor de agua, el cual es un gas natural de la atmósfera, con una concentración 100 veces mayor que el Dióxido de Carbono y es el responsable de dos terceras partes del efecto invernadero en su ciclo natural.

Por otra parte, dentro de los gases que conforman de forma química la atmósfera (Figura 4-18), en su mayoría se encuentra el Nitrógeno y el Oxígeno, los cuales suman el 99% del total. La cantidad restante está formada por diversos gases, entre los que se encuentran en mayor abundancia el Argón (Ar) y Dióxido de Carbono (CO₂). Este último tiene un rol fundamental en el proceso de calentamiento de la atmósfera terrestre en su ciclo químico o artificial.

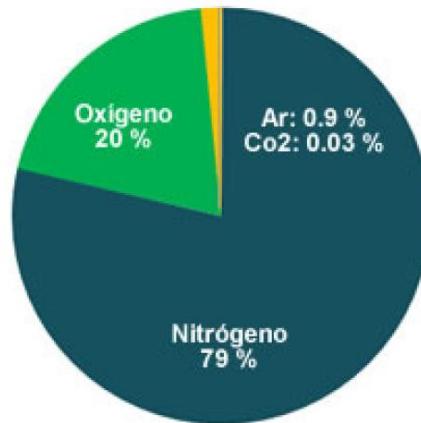


Figura 4-18: Composición de gases de la atmósfera terrestre. Los porcentajes son en base a aire seco, sin tomar en cuenta el contenido de vapor de agua (Fuente: Caballero *et al.*, 2007).

En la Figura 4-19 se puede apreciar que las mayores temperaturas se encuentran en la zona de contacto entre la Tropósfera y la superficie de la Tierra. A medida que aumenta la altura, la temperatura del aire comienza a disminuir paulatinamente hasta llegar a su valor mínimo de -60°C , lo cual ocurre a una altura cercana a los 10 [km]. Este comportamiento es sorpresivo considerando que la fuente de calor para la atmósfera es el Sol, por lo tanto se podría esperar que las capas más cercanas a éste presentaran mayores temperaturas. Esto no ocurre, debido a que los gases que conforman la atmósfera no tienen la capacidad de absorber la luz solar y dejan pasar la mayor parte hacia la superficie terrestre.

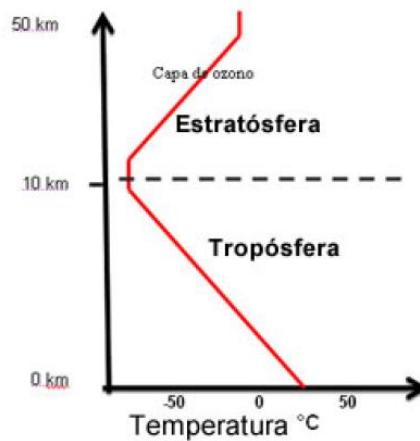


Figura 4-19: Estructura térmica de Tropósfera y Estratósfera (Fuente: Caballero *et al.*, 2007).

La Figura 4-20 esquematiza el balance de energía realizado por la Tierra para la radiación solar entrante. Los componentes de radiación solar están en el lado izquierdo, los componentes de la radiación terrestre al lado derecho y las transferencias de calor sensible y latente son mostrados en el centro. Los valores se encuentran medidos en $[\text{W}/\text{m}^2]$.

El 30% de la radiación solar entrante es regresada al espacio sin ser convertida en calor, cerca de la mitad es absorbida por la superficie de la Tierra y sólo el 20% es retenido en la atmósfera, generándose un calentamiento de la superficie del planeta.

Para la radiación terrestre emitida, sólo el 10% es transmitido directamente al espacio, lo restante es absorbido en la atmósfera. El promedio neto de la radiación solar entrante de $342 \text{ [W/m}^2]$ es parcialmente reflejada por las nubes y la atmósfera o en la superficie. Una parte de ese calor es regresado a la atmósfera como calor sensible y la mayoría como evapotranspiración, lo cual se realiza en forma de calor latente o precipitación (Houghton, 2002).

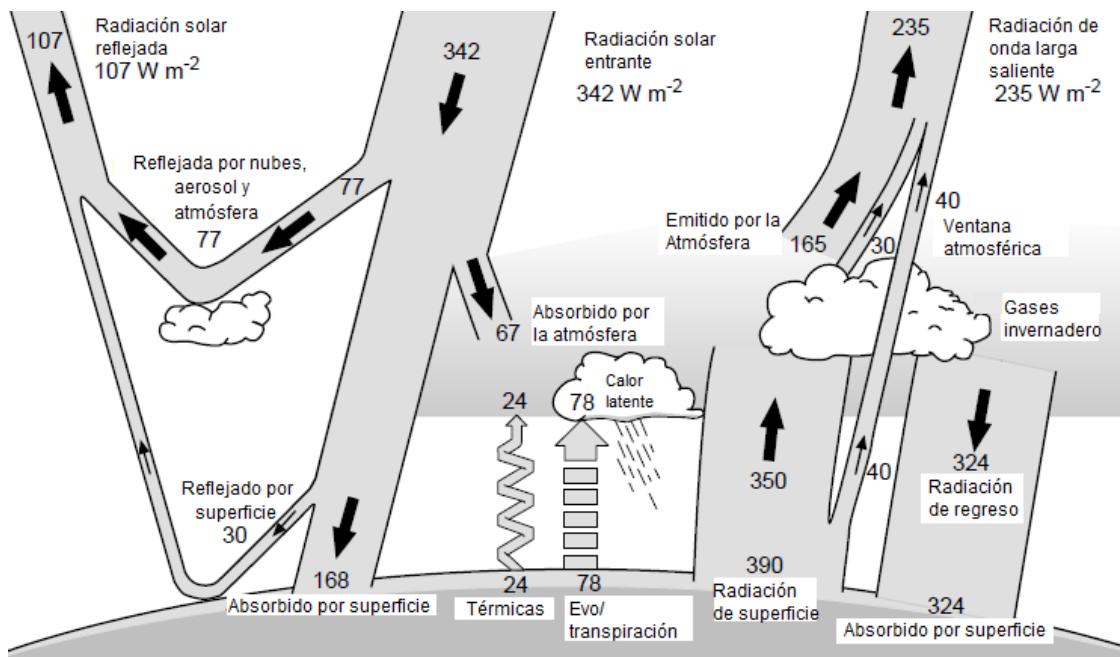


Figura 4-20: Balance energético medio anual de la Tierra (Fuente: Adaptado de Kiehl & Trenberth, 1997).

Al calentarse, la superficie de la Tierra transforma la luz del sol en radiación de baja energía, la cual es reflejada nuevamente hacia la atmósfera. Aquella energía puede ser absorbida de forma eficiente por los gases atmosféricos, especialmente por el CO₂, siendo ésta la principal fuente de calor de la atmósfera.

4.4.2 CALENTAMIENTO GLOBAL

Como se mencionó anteriormente, la composición de los gases que se encuentran en la atmósfera tienen una gran importancia en la configuración de la temperatura global del planeta. Precisamente, debido al aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera, es que se ha generado un proceso de calentamiento global a lo largo de los años (Caballero *et al.*, 2007).

Con base a mediciones realizadas en el observatorio de Mauna (Hawaii), en la Figura 4-21 se aprecia que se ha producido un aumento cercano a 0,5 [°C] en la temperatura de la atmósfera en el período de tiempo entre los años 1961 y 1990. Si se analizan los cambios desde el año 1850 hasta el final de las mediciones presentes en la figura, el aumento de temperatura que se ha generado es de 1 [°C] aproximadamente.

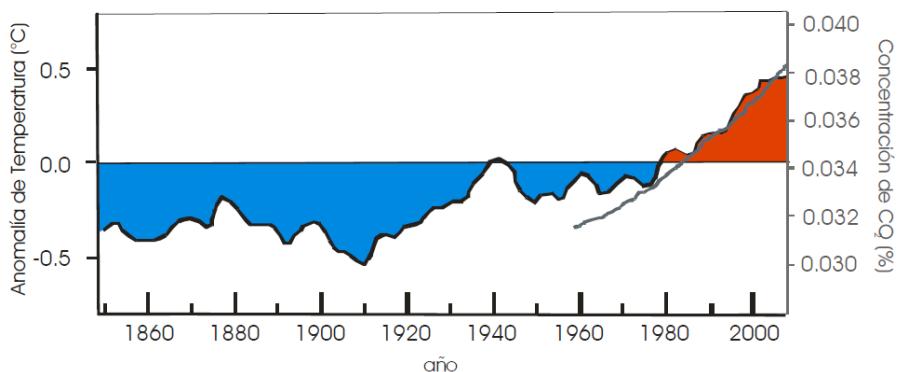


Figura 4-21: Anomalía de la temperatura global con referencia al promedio entre los años 1961 y 1990 y concentraciones de CO₂ en la atmósfera como porcentaje de aire seco (Fuente: NOAA-ESRL).

Por otra parte, el aumento de CO₂ en la atmósfera está asociado a procesos naturales y a la acción de actividades humanas. La tala de árboles y principalmente la quema de combustibles fósiles (como carbón y petróleo) han sido los factores con los cuales la intervención humana ha tenido un papel significativo a la hora de evaluar el aumento de CO₂, y por consecuencia, esto ha contribuido al proceso de calentamiento global.

Actualmente, la concentración promedio de CO₂ alcanza cerca de 360 partes por millón (ppm), lo cual significa un 30% sobre el valor preindustrial, el cual corresponde a 280 ppm. La tasa actual de aumento de CO₂ en la atmósfera es muy pronunciada y las proyecciones indican que dentro de las próximas dos décadas se podría duplicar el valor preindustrial mencionado (Garreaud, 2011).

La Figura 4-22 muestra los cambios producidos en el nivel del mar a lo largo del tiempo. El aumento del nivel del mar es causado principalmente por dos factores relacionados con el calentamiento global: el agua añadida por el derretimiento del hielo de la tierra y la expansión del agua de mar debido al aumento de temperatura (NASA¹¹).

¹¹ National Aeronautics and Space Administration. Disponible [http://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/]. Accesada 30 de diciembre de 2015.

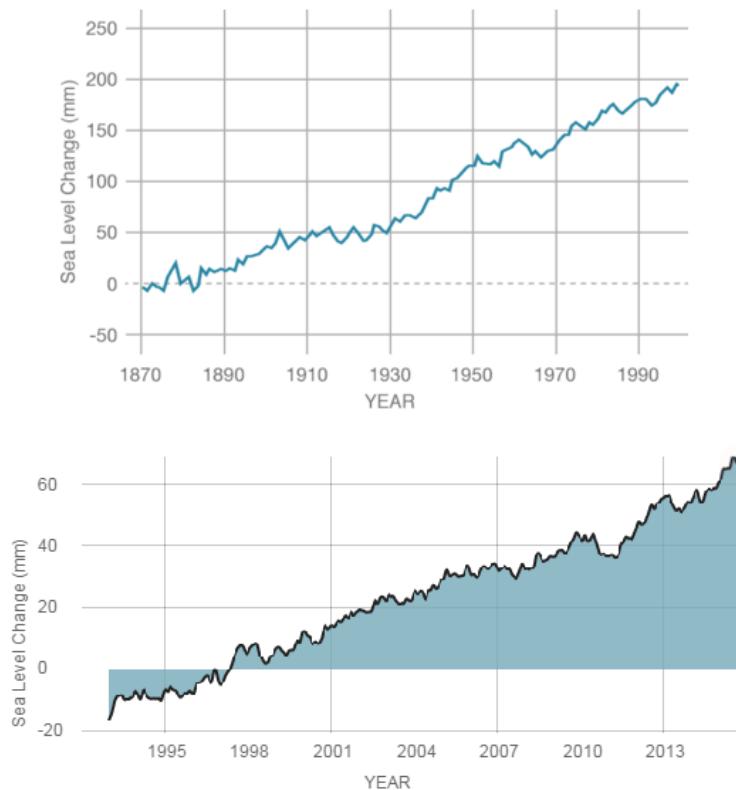


Figura 4-22: Cambios en el nivel del mar. Arriba: cambios desde 1870 a 2000, con registros de mareógrafos costeros. Abajo: cambios desde 1993 a 2015, con observaciones satelitales (Fuente: NASA).

Con la información obtenida se identifica que la razón de cambio en el nivel del mar es de 3,24 [mm] por año. Las mediciones realizadas por mareógrafos costeros indican que se produjo un aumento cercano a 200 [mm] en el periodo 1870-2000. Adicionalmente, se aprecian cambios significativos desde 1997, año en el cual el nivel del mar era cercano a 0 [mm] en las mediciones, aumentando 66,91 [mm] hasta el mes de agosto del 2015 (NASA).

Como se puede apreciar en la Figura 4-23, desde 1972 hasta 2008, el derretimiento de tierras congeladas abarca cerca del 52% del aumento del nivel del mar, mientras que la expansión térmica de los océanos contribuye con un 38%. Las aguas subterráneas y otros factores aportan el 10% restante. La pérdida de zonas de hielos se ha acelerado desde la década del 90, y ha representado desde 75 a 80% del aumento en el nivel del mar desde el año 2003 (Union of Concerned Scientists, 2013).

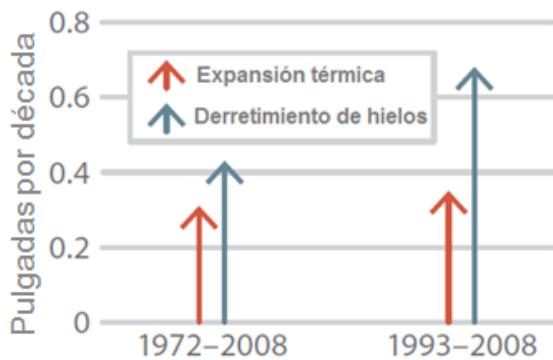


Figura 4-23: Expansión térmica de océanos y derretimiento de hielos desde 1972 a 2008 (Fuente: Adaptado de Union of Concerned Scientists, 2013).

4.4.3 PROYECCIONES

Como consecuencia del incremento de concentración de dióxido de carbono y otros gases de invernadero en la atmósfera, se proyecta que la temperatura media superficial a nivel global experimente un aumento entre 1,4 y 5,8 [°C] hacia el año 2100, tomando como punto de partida el año 1990. Se espera que las modificaciones proyectadas varíen de manera regional y que las zonas en latitudes mayores aumenten su temperatura en una tasa mayor a la del promedio global (Estrada, 2001).

Por otra parte, la expansión térmica de los océanos y el derretimiento de glaciares provocarían un aumento del nivel del mar entre 8 y 88 [cm] en el periodo de 1990 a 2100, trayendo consecuencias graves para países como Bangladesh y las pequeñas naciones insulares. En la Figura 4-24 se muestran las proyecciones de disminución del territorio de Bangladesh, el cual para el año 2100 podría perder 16% de su terreno afectando a 17 millones de habitantes.



Figura 4-24: Impacto potencial del nivel del mar en Bangladesh 1990-2100 (Fuente: Estrada, 2001).

El aumento en la emisión de gases invernadero ha llevado al planeta a un continuo aumento en el nivel del mar, esto debido a que los océanos y glaciares aún se siguen ajustando a los cambios climáticos que se han generado en la atmósfera terrestre. Incluso si se anularan todas las emisiones de gases en el año 2016, las proyecciones indican un aumento en el nivel del mar entre 0,37 y 0,79 [m] hacia el 2100 (Estrada, 2001).

En base a estos pronósticos, uno de los principales efectos que se puede presentar es un aumento en la cota de inundaciones de sectores costeros. De la misma forma que el nivel del mar aumenta, el océano está acercándose hacia los terrenos costeros más bajos. Un pequeño aumento en el nivel del mar se puede traducir en serios riesgos de inundación en esas áreas. En la Figura 4-25 se aprecian las zonas de inundación para los años 1880, 2010 y los pronósticos para los años 2050 y 2100. Factores locales como niveles de marea y el perfil de playa influyen en la forma que aumenten las inundaciones en diversos lugares del mundo. Las proyecciones muestran aumentos en el nivel de alta marea, con lo cual el año 2050 las inundaciones pasarán completamente por las estructuras que se encuentren más cercanas al borde costero y en 2100 llegarán a las zonas urbanas (Union of Concerned Scientists, 2013).

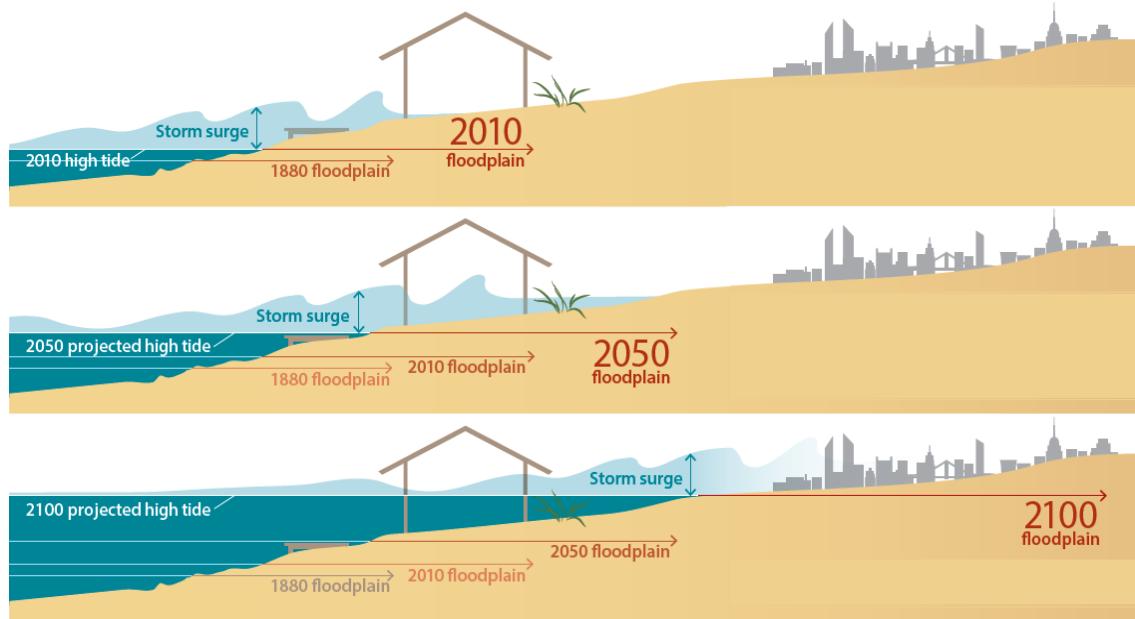


Figura 4-25: Aumento de cota de zona de inundación hacia el año 2100 debido al aumento del nivel del mar
(Fuente: Adaptado de Union of Concerned Scientists, 2013).

El posible escenario que se pueda presentar en Chile con base a los aumentos del nivel del mar proyectados no es idéntico para toda la zona costera del país. Por una parte se esperan aumentos del nivel del mar cercanos a los 20 [cm] en el norte y del orden de 10 [cm] en la zona sur. A pesar de esto, se deja en claro que aún queda mucho por hacer para determinar con claridad cuáles serán los posibles cambios en el ámbito marítimo (CEPAL, 2012).

4.5 EL OLEAJE

En el océano existen diversos mecanismos generadores de ondas en el océano, dentro de los cuales se encuentran: el viento, perturbaciones meteorológicas, terremotos, atracción planetaria, entre otros (UNICAN¹², 2000). Debido a que las fuerzas generadoras difieren en su naturaleza, características, magnitud y frecuencia, la reacción que presenta la superficie del mar ante éstas forzantes es diferente en cada caso. En la Figura 4-26 se exponen de forma gráfica los diferentes tipos de ondas generadas en base a los mecanismos forzantes, con su energía (escala arbitraria) asociada a cada frecuencia (ciclos por segundo).

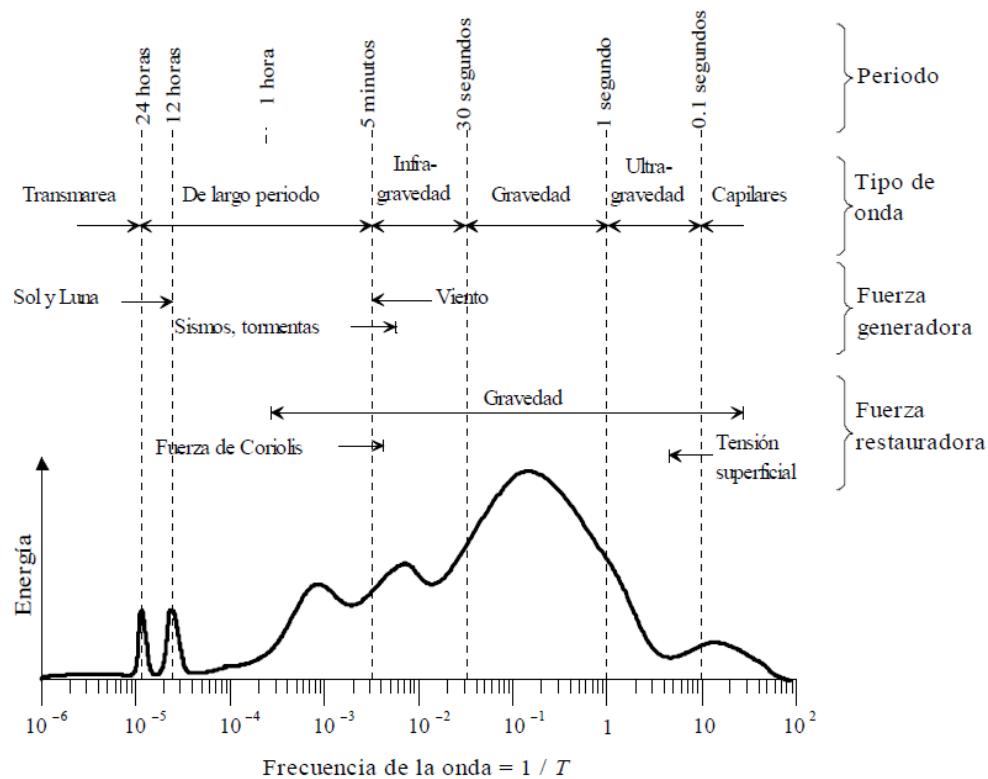


Figura 4-26: Distribución energética de las ondas de superficie (Fuente: UNICAN, 2000).

¹² Universidad de Cantabria.

Se aprecia que las ondas generadas en la superficie del mar presentan diferentes escalas de tiempo, desde ondas capilares con periodos inferiores a 0,1 [s] hasta ondas de marea que pueden superar las 24 horas. De esto se desprenden los conceptos de periodo (T), definido como el intervalo de tiempo entre dos crestas o dos valles sucesivos; y la altura de onda (H), que se refiere al cambio vertical total entre la cresta y el valle (CEM II-1, 2002). En la Figura 4-27 se ilustran los parámetros de onda mencionados.

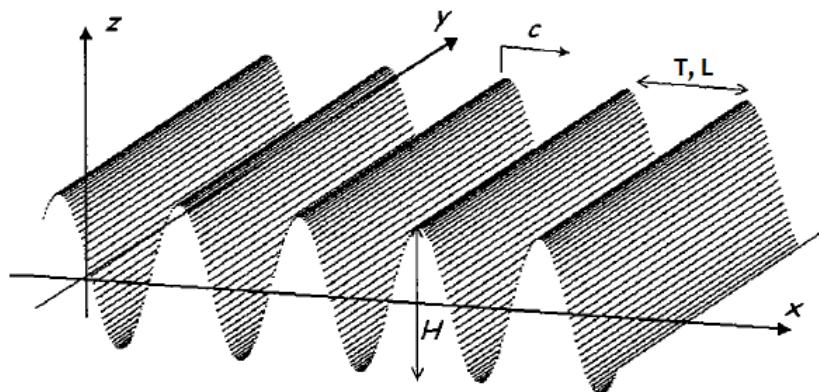


Figura 4-27: Parámetros de ondas de crestas largas (Fuente: Modificado de UNICAN, 2000).

Junto con los parámetros de periodo y altura, para cada tipo de onda generada existe una distancia horizontal entre dos puntos idénticos de dos crestas o valles sucesivos, esto corresponde a la definición de longitud de onda (L).

La Tabla 4-5 muestra los diferentes tipos de ondas generadas en la superficie del mar con sus respectivos parámetros de periodo, longitud y altura, además de estar diferenciadas por sus fuerzas generadoras y restauradoras. Con esta información, se define el oleaje como una onda de gravedad con rangos de periodo entre 1 y 30 [s], generado por la interacción entre la superficie del mar y las fuerzas forzantes del viento.

Tabla 4-5: Clasificación de ondas según su periodo.

Nombre	Periodo (T)	Longitud (L)	Altura (H)	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0,1 [s]	2 a 7 [cm]	1 a 2 [mm]	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0,1 a 1 [s]	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 [s]	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 [m]	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 [s] a 30 [min]	100 a 200 [m]	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 [min] a 24 [h]	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 [m]	Sismos, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24 [h]	-	0 a 12 [m]	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

Fuente: Adaptado de Silva, 2005.

4.5.1 GENERACIÓN

La región oceánica en la cual el viento sopla y existe transferencia de energía hacia la superficie del mar es lo que se conoce como *fetch* de viento. Es en esta región que el oleaje se propaga bajo la influencia sostenida del viento, viajando en su misma dirección (Silva, 2005; UNICAN, 2000).

Harold Jeffreys, en 1925, sugirió que la superficie del mar obtiene energía proveniente del viento por medio de diferencias de presión causadas por un efecto de abrigo de las crestas de las olas (Sverdrup **et al.**, 1942). Esto se visualiza en la Figura 4-28, en la cual se aprecia que la cara posterior de la ola (contra la que sopla el viento) experimenta una presión más alta que la cara frontal que está protegida de la fuerza del viento. Además, se generan remolinos de aire en frente de cada onda, dando lugar a excesos y deficiencias de presión (signos positivos y negativos respectivamente). La diferencia de presión empuja la onda a lo largo de la dirección de propagación (The Open University, 1999).

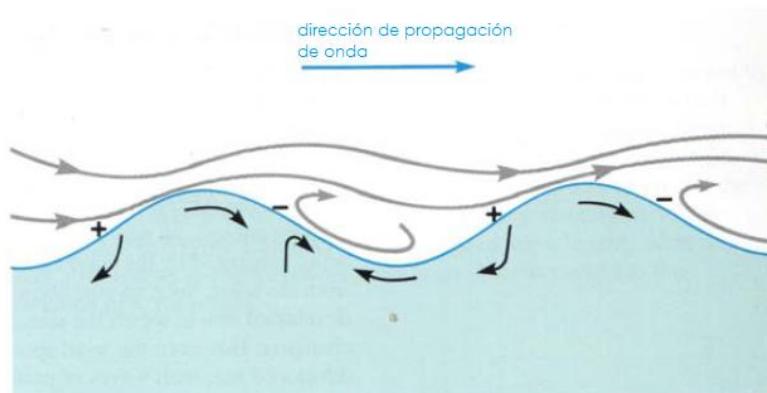


Figura 4-28: Generación de oleaje por viento según el modelo de Harold Jeffreys (1925) (Fuente: Adaptado de The Open University, 1999).

A pesar que el viento continúe interactuando con la superficie del mar en la misma dirección de propagación, la energía del oleaje no puede crecer indefinidamente. Si el *fetch* es lo suficientemente extenso y el viento se mantiene soplando a una velocidad constante, se alcanza un equilibrio en el cual la energía comienza a ser disipada por las olas al mismo ritmo que éstas reciben energía proveniente del viento. Dicho de otra manera, para una condición de viento con una cierta velocidad, el crecimiento del oleaje se detiene al cabo de un tiempo determinado, cuando la transmisión de energía desde el viento al oleaje queda compensada por las pérdidas de energía. Esta condición es llamada Oleaje Completamente Desarrollado.

Si las condiciones que determinan el crecimiento del oleaje dependen de la velocidad del viento, tamaño del *fetch* y de la duración o tiempo durante el que las olas se propagan bajo la influencia sostenida del viento, el oleaje estará limitado por *fetch*. En cambio, si las condiciones del viento se detienen repentinamente, se dice que el oleaje está limitado por duración.

Cabe destacar que la velocidad del viento utilizada para la predicción de condiciones de oleaje es aquella que se presenta a 10 [m] de altura, por lo tanto $U = U_{10}$ y el ajuste se realiza de la forma:

$$U = 0.71 * (U_{10})^{1.23}$$

Para el desarrollo del presente estudio se utilizó información de oleaje proveniente de modelos *hindcasting* de tercera generación, los cuales se describen a continuación.

4.5.2 MODELOS HINDCASTING DE OLEAJE DE TERCERA GENERACIÓN

Los modelos de *hindcasting* son una predicción de las condiciones de oleaje requeridas en una situación idealizada. En primer lugar se debe asumir un modelo de fase y amplitud de forma aleatoria, es decir, las desnivelaciones de la superficie de mar corresponden a una suma de un gran número de componentes independientes. Por lo tanto, el *hindcasting* de oleaje está basado en la predicción de cada uno de esos componentes, motivo por el cual se considera que la densidad espectral $E = E(f, \theta)$ de cada componente de ola varía en el tiempo (t) y en la posición horizontal (x, y).

Si se desea predecir el espectro en un punto específico del océano, es necesario seguir la trayectoria de cada una de las componentes del oleaje, desde su punto de inicio (línea de costa) hasta el punto de predicción y considerar los efectos de generación, interacción ola-ola y disipación. Dicho de otra forma, se debe integrar la ecuación de evolución de la energía del oleaje desde la costa hasta el punto de predicción.

La evolución de la densidad de energía para cada componente de onda (f, θ), puede ser obtenida integrando la ecuación de evolución de energía mientras se propaga con la velocidad de grupo a lo largo del rayo de onda.

$$\frac{dE(f, \theta; x, y, t)}{dt} = S(f, \theta; x, y, t)$$

El término del lado izquierdo es la razón de cambio de la densidad de energía, y:

$$dx/dt = C_{g,x} ; \quad dy/dt = C_{g,y}$$

Donde $C_{g,x}$ y $C_{g,y}$ son las velocidades de grupo en los ejes x e y de los componentes de onda en consideración. La frecuencia y dirección son constantes en aguas profundas. El término de la derecha, llamado término fuente, representa todos los efectos de generación, interacción ola-ola y disipación.

Para llevar a cabo la integración se utiliza el enfoque Euleriano, en el cual el espectro es calculado simultáneamente a lo largo de un gran número de puntos en el océano, con un balance de energía local en cada una de las ubicaciones. Este enfoque es utilizado en modelos de generación de oleaje de segunda y tercera generación.

El enfoque Euleriano abarca el balance de energía del oleaje en una malla geográfica regular, perteneciente a una malla cartesiana de ejes x e y . El balance de energía se considera para cada uno de los componentes individuales de olas y en cada una de las celdas geográficas de la malla (Figura 4-29).

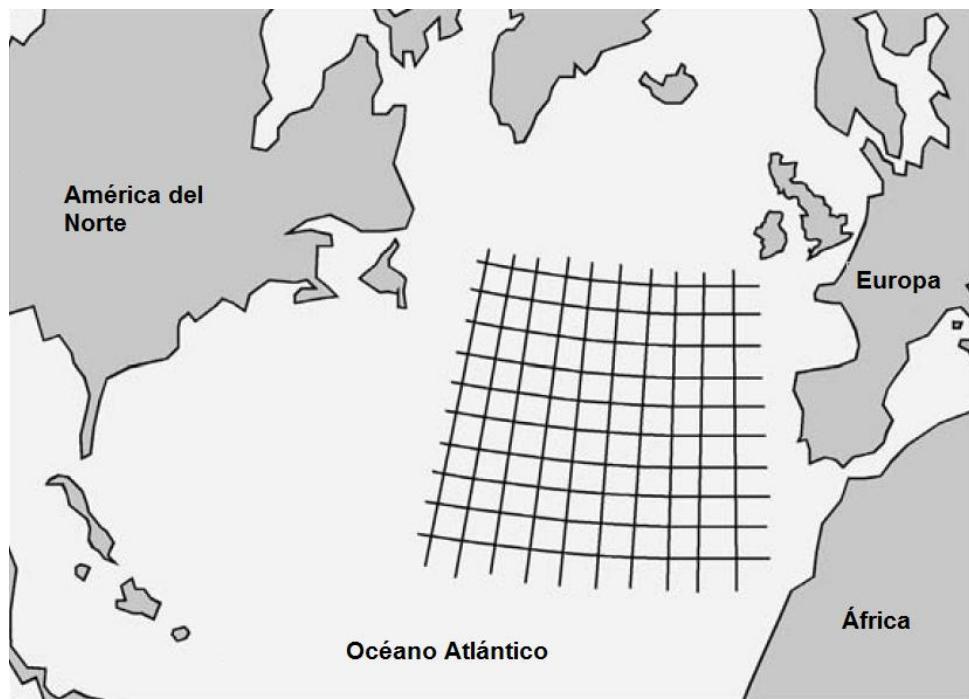


Figura 4-29: Malla regular de enfoque Euleriano para *hindcasting* de oleaje en aguas oceánicas (Fuente: Adaptado de Holthuijsen, 2007).

El balance de energía para todas las celdas en la malla es fundamentalmente el flujo de la energía de un componente arbitrario de onda (f, θ) viajando a lo largo de la celda, es decir, es el balance del cambio de energía en la celda entre el importe neto y la generación local de energía en un intervalo de tiempo (Δt). Las transferencias de energía en la celda se esquematizan en la Figura 4-30.

$$\text{Cambio de energía en la celda} = \text{Importe neto de energía} + \text{Generación local de energía}$$

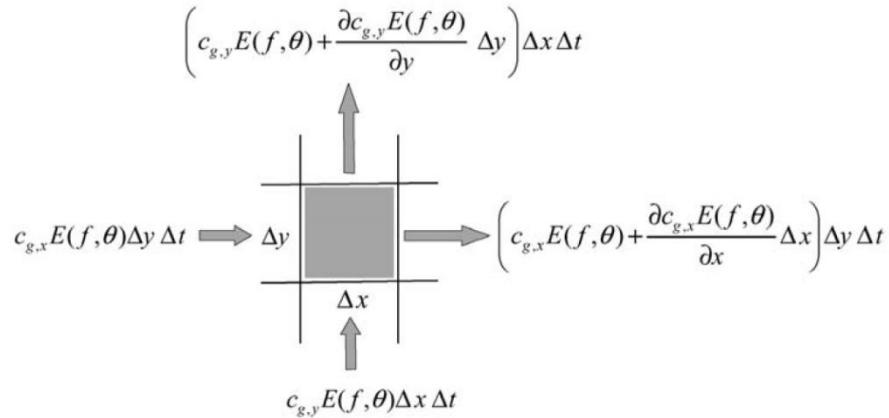


Figura 4-30: Propagación de energía a lo largo de una celda en una malla regular proyectada en el océano con enfoque Euleriano (Fuente: Holthuijsen, 2007).

Considerando constantes los cambios en el tiempo y espacio, el cambio de energía en la celda (C.E.C.) se puede expresar como:

$$\text{C. E. C.} = \left(E(f, \theta) \Delta x \Delta y + \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta t \right) - E(f, \theta) \Delta x \Delta y = \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta t$$

El importe neto de energía (I. Neto de E.) en la celda para la dirección x es igual al importe de energía a través del lado izquierdo de la celda, con velocidad de propagación $C_{g,x} = C_g \cos \theta$ y el ancho de celda es Δy . A esto se resta el exporte de energía a través del lado derecho de la celda, con un transporte de energía que ha evolucionado a lo largo de la distancia Δx .

$$\begin{aligned} \text{I. Neto de } E. \text{ en } x &= C_{g,x}E(f, \theta) \Delta y \Delta t - \left(C_{g,x}E(f, \theta) + \frac{\partial C_{g,x}E(f, \theta)}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta t \\ &= - \frac{\partial C_{g,x}E(f, \theta)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned}$$

De forma análoga, para el eje y se tiene $- \frac{\partial C_{g,y}E(f, \theta)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta t$

La energía generada localmente en la celda durante el intervalo de tiempo Δt se representa como $S(f, \theta) \Delta x \Delta y \Delta t$, donde $S(f, \theta)$ es el término fuente, representando todos los efectos de generación, interacción ola-ola y disipación. Este término usualmente se escribe como:

$$S = S_{in} + S_{nl4} + S_{wc}$$

Con S_{in} , S_{nl4} y S_{wc} representando, de forma independiente, los procesos de generación de oleaje por viento, interacción cuádruple ola-ola y disipación por *white-capping*.

Luego, con todos los conceptos interpretados en el enfoque Euleriano, el balance de energía para la celda $\Delta x \Delta y$ a lo largo del intervalo de tiempo Δt se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} E(f, \theta) \Delta x \Delta y \Delta t = -\frac{\partial C_{g,x} E(f, \theta)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta t - \frac{\partial C_{g,y} E(f, \theta)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta t + S(f, \theta) \Delta x \Delta y \Delta t$$

Donde $C_{g,x} = C_g \cos \theta$ y $C_{g,y} = C_g \sin \theta$. El término C_g corresponde la velocidad de propagación de la energía de onda o velocidad de grupo. Dividiendo todos los términos por $\Delta x \Delta y \Delta t$, despejando la ecuación para la energía generada localmente en la celda y adicionando la dependencia del tiempo y espacio en la notación, se obtiene:

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} = S(f, \theta; x, y, t)$$

En aguas profundas, las velocidades de propagación $C_{g,x}$ y $C_{g,y}$ son independientes de x e y , y pueden ser tomados fuera de las derivadas

$$\frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} + C_{g,x} \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial x} + C_{g,y} \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial y} = S(f, \theta)$$

Las técnicas *hindcasting* pueden proveer datos estadísticos de oleaje en áreas extensas en un corto periodo de tiempo. Estos datos son útiles para el diseño de estructuras costeras y su uso también ha sido implementado para analizar la estabilidad de playas. Es importante enfatizar que este tipo de modelos son una técnica útil que proporcionan una data de oleaje, la cual debe ser comparada con mediciones de oleaje *in-situ* u otro tipo de observaciones, ya que el uso de cada *hindcasting* está sujeto a la incertidumbre de las condiciones de oleaje del lugar de interés (Holthuijsen, 2007).

Las especificaciones de los modelos *hindcasting* de oleaje utilizados en este estudio se describen a continuación.

ERA-Interim

El modelo ERA-Interim de ECMWF (modelo WAM¹³), es un reanálisis de la atmósfera global del cual se puede tener acceso a datos de parámetros atmosféricos y oceanográficos desde el año 1979, y continúa en tiempo real con 3 meses de retraso aproximadamente. Originalmente, ERA-Interim proporcionaba información a partir de 1989, pero la extensión de 10 años para el periodo 1979-1988 se produjo en el año 2011.

El proyecto se inició en 2006 con el fin de proporcionar una conexión entre el reanálisis del ECMWF anterior, ERA-40 (1957-2002), y la actual generación de reanálisis ampliada prevista por ECMWF. Los principales objetivos del proyecto se enfocan en mejorar aspectos claves de ERA-40, tales como la representación del ciclo hidrológico, la calidad de la circulación estratosférica y los cambios en el sistema de observación. Estos objetivos se han alcanzado como resultado de una combinación de factores, incluyendo muchas mejoras del modelo, el uso de análisis de variaciones en 4-dimensiones, una revisión al análisis de humedad, el uso de corrección de sesgo para los datos de satélite y otras mejoras en el manejo de datos (Berrisford **et al.**, 2011).

El modelo atmosférico ERA-Interim y el sistema de reanálisis utilizan el ciclo 31r2 del Sistema Integrado de Pronóstico de ECMWF (IFS, por sus siglas en inglés), introducido operacionalmente en septiembre de 2006. Este modelo está acoplado a un modelo de oleaje oceánico que resuelve 30 frecuencias y 24 direcciones de ola, en nodos de la malla reducida de resolución 1,0°x1,0° en latitud/longitud.

La generación de datos ERA-Interim produce cuatro análisis diarios, 00, 06, 12 y 18 UTC. El análisis producido a las 00 UTC en un día determinado implica observaciones tomadas entre 15 UTC del día anterior y 03 UTC del día actual; el análisis a las 12 UTC implica observaciones entre 03 UTC y 15 UTC.

Los parámetros de oleaje obtenidos de esta base de datos corresponden a altura significativa espectral (H_{m0}), dirección media (D_m) y periodo medio (T_m). Los datos pueden ser descargados gratuitamente¹⁴. Para mayor información se recomienda Berrisford **et al.** (2011).

¹³Wind Wave Model.

¹⁴ERA-Interim, Daily. Disponible en [<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>]. Accesada 31 de diciembre de 2015.

NOAA-WAVEWATCH III

WAVEWATCH III es un modelo de generación de oleaje de tercera generación desarrollado por NOAA/NCEP, como un modelo WAM. Es un desarrollo avanzado del modelo WAVEWATCH, desarrollado por la Universidad Tecnológica Delft, y WAVEWATCH II desarrollado por la NASA. WAVEWATCH III difiere de sus predecesores en muchos puntos importantes, como las ecuaciones que lo gobiernan, la estructura del modelo, los métodos numéricos y las parametrizaciones físicas. Por otra parte, con el modelo de la versión 3,14, WAVEWATCH III evolucionó desde un modelo de onda en el marco de modelado, lo que permite un fácil desarrollo de enfoques físicos y numéricos adicionales.

El modelo resuelve la ecuación de balance de energía de fase aleatoria del espectro para el número de onda y dirección del espectro. El supuesto implícito de esta ecuación es que las propiedades medias de profundidad del agua y de las corrientes, así como el campo de ondas, varían en escalas de tiempo-espacio que son mucho mayores a las escalas de variación de una onda individual.

Dentro de las características físicas del modelo se encuentran:

Ecuaciones de gobierno que incluyen refracción y esfuerzo del campo de oleaje debido a las variaciones temporales y espaciales de la profundidad media del agua y de medios como mareas.

Parametrización de términos fuente, que incluyen crecimiento de las olas y decaimiento debido a las acciones de viento, las interacciones de resonancia no lineal, disipación por *white-capping*, fricción de fondo y rotura inducida por profundidad.

La propagación de oleaje es considerada lineal. Efectos no lineales que sean relevantes se incluyen en los términos fuente.

Los *inputs* requeridos por el modelo son:

Vientos del GDAS¹⁵ operacionales del ciclo GFS¹⁶. Los vientos son considerados a una altura de 10 [m] asumiendo estabilidad neutral. Los campos de vientos están disponibles en intervalos de 3 [hrs].

Las concentraciones de hielo se obtienen de análisis de concentración de hielo marino automatizado de NCEP.

Las temperaturas superficiales del mar necesarias en la corrección de estabilidad para el crecimiento de onda son obtenidas de GDAS.

¹⁵ Global Data Assimilation System.

¹⁶ Global Forecast System.

La agencia NOAA utiliza el modelo WAVEWATCH III para generar *hindcasting* y *forecasting* de oleaje. Los datos obtenidos del modelo NOAA-WAVEWATCH III tienen una cobertura de 77°S-77°N, una resolución de 1,0°x1,25° en latitud/longitud y una profundidad mínima de 25 [m].

Los parámetros de oleaje obtenidos de este modelo corresponden a altura significativa espectral (H_{m0}), dirección *peak* (D_p) y periodo *peak* (T_p) cada 3 [hrs]. Para mayor información, se recomienda la bibliografía disponible Tolman & Chalikov (1996), Tolman (2014) y la página oficial de la base de datos¹⁷.

NOAA-CFSR

Es un nuevo sistema de NCEP/CFSR¹⁸ y supone un análisis acoplado entre la atmósfera, el océano, hielos marinos y terrestres, con datos desde 1979 a 2010. Este reanálisis tiene mucha mayor resolución horizontal y vertical de la atmósfera, por lo tanto puede ser usado para desarrollar una base de datos de *hindcasting* de oleaje a largo plazo.

El modelo de oleaje utilizado en NCEP es un modelo de generación de oleaje de tercera generación WAVEWATCH III. En 2007, el modelo se amplió para ejecutarse como un mosaico de dos mallas anidadas, lo cual facilita el aumento de eficiencia computacional por restricción de las mallas de alta resolución sólo en las áreas necesarias.

Para conducir las olas, el modelo requiere de dos campos de entrada: hielo y vientos, incluyendo la diferencia de temperatura entre el aire y el mar. Los vientos de alta resolución utilizados son a 10 [m] sobre el nivel medio del mar, con una resolución espacio-temporal de 0,5° que cubren todo el mundo, desde 90°S a 90°N.

El dominio global se separó en dieciséis mallas computacionales. El dominio espectral se ha dividido en 50 frecuencias y 36 direcciones, con una resolución direccional de 10°. La frecuencia mínima se ha establecido en 0,035 [Hz] y el factor de incremento de frecuencia se ha fijado en 1,07, proporcionando un rango de frecuencia entre 0,035 y 0,963 [Hz].

Las salidas utilizadas de este modelo son cada altura significativa espectral (H_{m0}), dirección *peak* (D_p) y periodo *peak* (T_p) 3 [hrs]¹⁹.

¹⁷ NOAA WAVEWATCH III. Disponible en [<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml?>]. Accesada 31 de diciembre de 2015.

¹⁸ Climate System Forecast Reanalysis.

¹⁹ Datos disponibles en [<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/nopp-phase1/>]. Accesada 31 de diciembre de 2015.

4.5.3 PROPAGACIÓN OCEÁNICA

En aguas profundas, la energía del oleaje se propaga a una velocidad que depende de la frecuencia de las componentes forzantes, es por esto que la energía de las olas de baja frecuencia viaja a una mayor velocidad. En una tormenta interactuando con la superficie del mar en región oceánica, el campo de oleaje generado se dispersará cuando se propague fuera de la zona de generación, descomponiéndose en campos de ondas más regulares en la dirección de propagación con el oleaje de baja frecuencia avanzado por delante y el de alta frecuencia más atrás. Este proceso es conocido como Dispersión de Frecuencias.

Adicionalmente, en el proceso de propagación, se produce la Dispersión de Direcciones. Esto se debe a que el oleaje cambia su forma, pasando de cresta corta a cresta larga, debido a que en la tormenta las ondas viajan en el rango de direcciones de esta y posteriormente el campo inicial de olas se dispersa en esas direcciones (Holthuijsen, 2007).

La interacción de los campos de vientos con la superficie del mar genera dos tipos de oleaje, mar de viento o sea y mar de fondo o *swell*, los cuales se definen a continuación:

Mar de viento o sea: producido en la zona de generación en el área oceánica, donde con poca frecuencia se logran apreciar ondas de crestas con longitud definida y es difícil observar un periodo característico, sin embargo en el espectro de oleaje es posible apreciar niveles de energía asociados a un mismo rango de periodo. Este tipo de oleaje se define por gran irregularidad, carece de periodicidad, es asimétrico entre la forma del valle y la cresta y las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda (Silva, 2005).

Mar de fondo o *swell*: corresponden a las ondas que se dispersan a lo largo del océano. Cuando el oleaje se propaga y abandona el área de generación, además de experimentar la dispersión de frecuencias y direcciones explicado anteriormente, se produce un decaimiento de energía y un filtrado de ondas. Debido a esto, las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, generando una simplificación de la superficie caótica. Este tipo de oleaje es observable en la plataforma costera, principalmente en profundidades reducidas, donde las olas tienden a presentar mayor regularidad, forman frentes de crestas muy grandes y las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas; se aprecia una periodicidad y las direcciones no son tan dispersas, presentando rangos predominantes (Silva, 2005).

En el ejemplo de la Figura 4-31 se ve que cada componente que es generado en la tormenta se aleja como un campo rectangular de energía de ondas, con un ancho que es aproximadamente igual al ancho de la tormenta y una longitud que es determinada por el largo y duración de la tormenta. Cada uno de los campos de olas que dejan la tormenta viajan a la velocidad de grupo y en la dirección de sus componentes. Las ondas que viajan más rápido lideran la propagación hacia adelante, mientras la dispersión direccional en la tormenta extiende los campos de onda lateralmente. El campo arbitrario inicial de ondas de

cresta corta se desintegra en un gran número de campos regulares e individuales de ondas de cresta larga, debido a las diferencias de velocidad y dirección en la propagación.

En algún instante de tiempo, las componentes de ondas de baja frecuencia llegan al punto arbitrario P en el océano. Luego de un tiempo, esas componentes pasan por el punto P, para ser seguidas por otras componentes con frecuencias un poco mayores, las que también pasarán por P. Luego de un tiempo, todas las componentes con frecuencias más bajas que f_1 habrán pasado por el punto arbitrario, mientras las componentes de ondas con frecuencias mayores que f_2 aún no lo han hecho. Sólo componentes con frecuencias entre f_1 y f_2 se presentan en el punto P, lo cual implica que la energía de onda se presenta sólo en el rango de frecuencias $f_1 - f_2$. Esto causa que el oleaje en el punto P sea mucho más regular que el generado en la tormenta. Dado que la dispersión de frecuencias se vuelve más pronunciada a medida que las olas viajan hacia adelante a lo largo del océano, este carácter regular aumenta con la distancia desde la tormenta. De esta forma se genera el oleaje tipo *swell* que se aprecia en las cercanías de playas y sectores cercanos a la línea de costa.

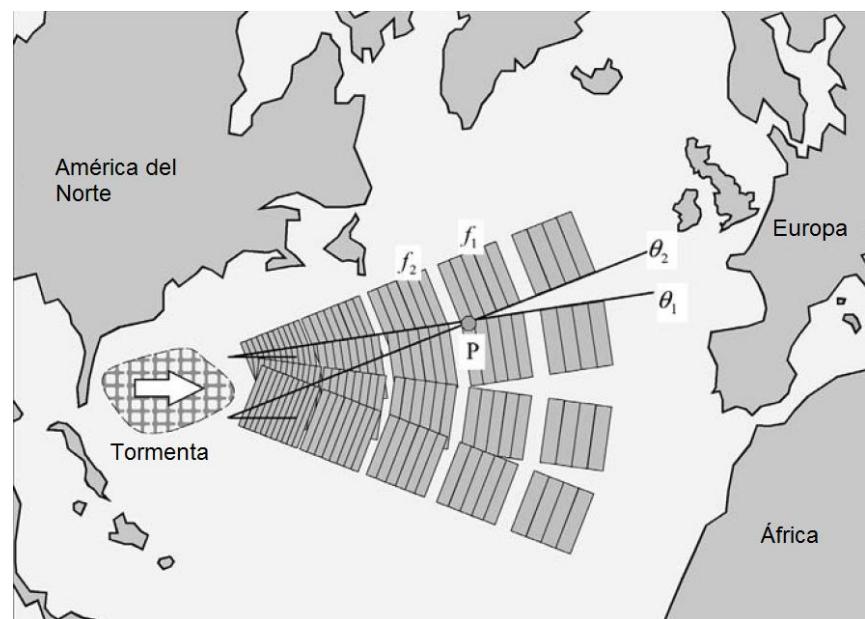


Figura 4-31: Dispersión de frecuencias y direcciones de oleaje formado en tormenta (Fuente: Adaptado de Holthuijsen, 2007).

Un efecto similar se tiene con la dispersión de direcciones. Los campos de ondas dispersas a lo largo del océano son generados en la tormenta en muchas direcciones, centradas en algún promedio de dirección del viento. Dependiendo de sus direcciones de propagación, algunos de esos campos de ondas pasarán al sur o al norte del punto P. Esto implica que en el punto P, la energía de ondas se presenta sólo entre las direcciones θ_1 y θ_2 , es decir, sólo

en el ángulo desde el punto P hacia la tormenta. Este sector direccional limitado por $\theta_1 - \theta_2$ provoca que las ondas sean de cresta más larga en el punto P de lo que son en la tormenta. Debido que esta dispersión direccional es más pronunciada, las ondas viajan hacia adelante a lo largo del océano y el característica de cresta larga aumenta con la distancia a medida que el oleaje se propaga fuera de la tormenta (Holthuijsen, 2007).

4.5.4 PROPAGACIÓN COSTERA

A medida que el oleaje se aproxima hacia la línea de costa comienza a interactuar con el fondo marino. Como consecuencia de esto, el tren de olas experimenta transformaciones que incluyen diversos procesos, los que se traducen fundamentalmente en variaciones en la altura de ola y en la dirección de propagación (UNICAN, 2000).

Existen al menos tres formas de clasificar el movimiento oscilatorio que presentan las partículas del oleaje, las cuales corresponden a la profundidad relativa de propagación, la fuerza principal que lo genera y su periodo de onda. A continuación se describen cada una de estas clasificaciones:

Aguas profundas: cuando la profundidad (h) es igual o mayor que la mitad de la longitud de onda, L , el oleaje no experimenta modificaciones debidas a la profundidad (Silva, 2005).

Aguas intermedias: sector o profundidad en el cual el movimiento de las partículas se encuentra en una relación menor a $L/2$ pero mayor a $L/20$, mostrando un descenso en el diámetro orbital horizontal y un aplastamiento en las órbitas cercanas al fondo del mar.

Aguas someras: el movimiento de las partículas en aguas someras corresponde a la zona en que la profundidad (h) es menor a $L/20$, mostrando una compresión o aplastamiento progresivo de las órbitas cerca del fondo del mar, en el que las partículas tienen una forma achatada a lo largo de la columna de agua.

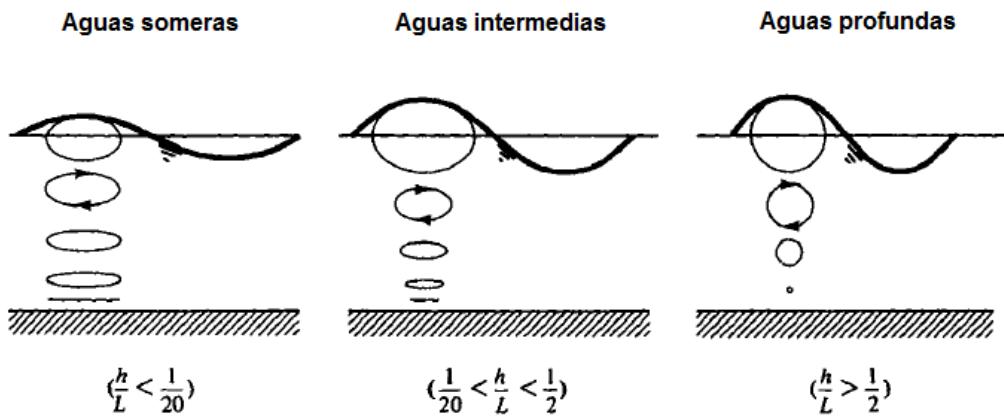


Figura 4-32: Trayectorias de las partículas bajo una onda progresiva en las diferentes profundidades (Fuente: Adaptado de UNICAN, 2000).

Cuando un tren de olas se aproxima hacia la costa, es posible observar un aumento en la altura del oleaje y una reducción de su longitud. A este fenómeno se le conoce como Asomberamiento.

Adicionalmente, cuando el mismo tren se propaga en aguas profundas, la parte del frente viaja con una celeridad mayor que la parte que se encuentra en menor profundidad. Esto da lugar a un giro del frente, haciendo que el tren de olas se vuelva paralelo a la línea de costa. Este fenómeno es llamado Refracción y puede producirse también por las variaciones en la celeridad inducidas por la presencia de una corriente.

En su propagación hacia aguas someras, el oleaje encuentra la presencia de obstáculos como islas, cabos u otros tipos de estructuras naturales y artificiales que dan lugar a un fenómeno que se conoce como Difracción. Este fenómeno se caracteriza por la cesión lateral de energía de forma perpendicular a la dirección de propagación y es el causante de que parte de la energía transportada por el tren de olas se transmita a zonas de sombra o de abrigo generadas por estos obstáculos. Esta no es la única forma posible de difracción, en propagaciones que abarcan grandes áreas pueden producirse discontinuidades en las alturas de ola a lo largo de un frente dado, por efectos atribuidos a la refracción (UNICAN, 2000). Asociado también a la presencia de obstáculos, se produce el fenómeno de Reflexión, el cual consiste en que el oleaje al impactar con un obstáculo regresa en otra dirección.

Todos los procesos de transformación de oleaje mencionados se visualizan en la Figura 4-33.

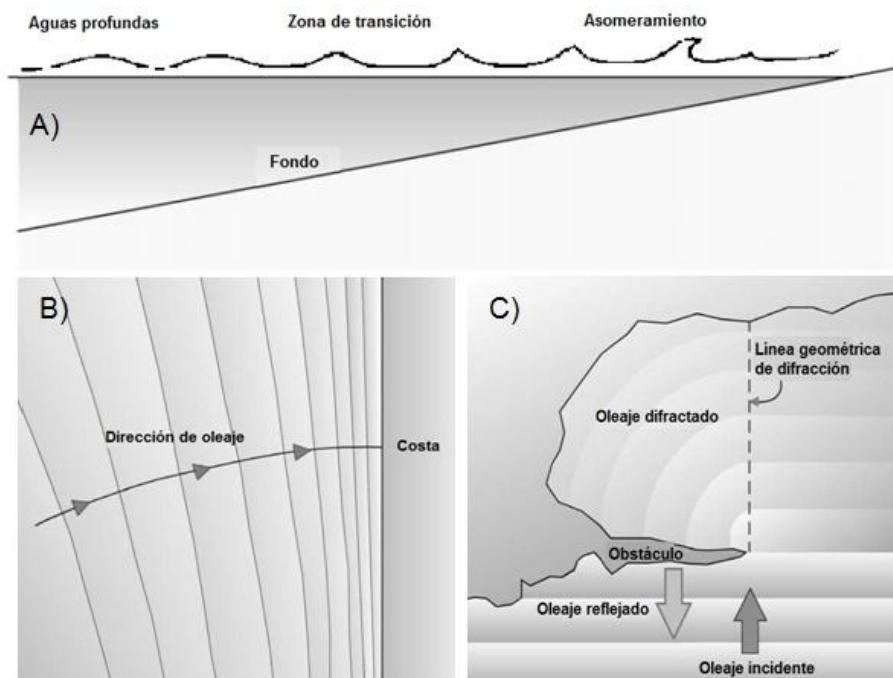


Figura 4-33: Procesos de transformación de oleaje: A) Asombramiento; B) Refracción y C) Difracción y Reflexión (Fuente: Adaptado de Holthuijsen, 2007).

4.5.5 CARACTERIZACIÓN

Para la caracterización de condiciones de oleaje se introduce el concepto de Estado de Mar, definido como aquella situación o periodo de tiempo en que, debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen en el oleaje. Esto produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario (Silva, 2005).

De esta forma, se puede considerar que el oleaje está formado por dos tipos de variaciones (Silva, 2005):

Variación de periodo corto: la variación es muy rápida, del orden de segundos, durante la cual el proceso se considera estacionario.

Variación de periodo largo: la variación es lenta, del orden de horas, y en ella evoluciona el estado de mar.

En Chile, para la medición de estados de mar, el instrumento a utilizar debe ser instalado cerca del sitio de interés y registrar olas cada 3 [hrs] como máximo, por un periodo de muestreo de a lo menos 18 [min] y con una frecuencia de muestreo de 0,5 [s] como mínimo (SHOA, 2005). Esto permite aceptar la hipótesis de estacionalidad y además el muestreo es

lo suficientemente extenso para que al realizar análisis se tenga un número representativo de olas para su tratamiento.

En la actualidad, existen dos ámbitos desarrollados para el tratamiento de señales de oleaje, análisis en el dominio del tiempo y análisis en el dominio de las frecuencias.

Análisis en el dominio del tiempo

Se obtienen las propiedades estadísticas, parámetros de oleaje y distribuciones de desnivelación directamente de una serie de tiempo.

Como se mencionó anteriormente, la muestra que se utiliza para realizar la descripción estadística temporal de un estado de mar es un registro de oleaje medido por un instrumento ubicado en algún punto del mar cercano al sitio de interés. Los registros obtenidos tienen un aspecto similar a la Figura 4-34, donde se muestran los parámetros fundamentales que definen al oleaje, los cuales son altura y periodo de ola asociado.

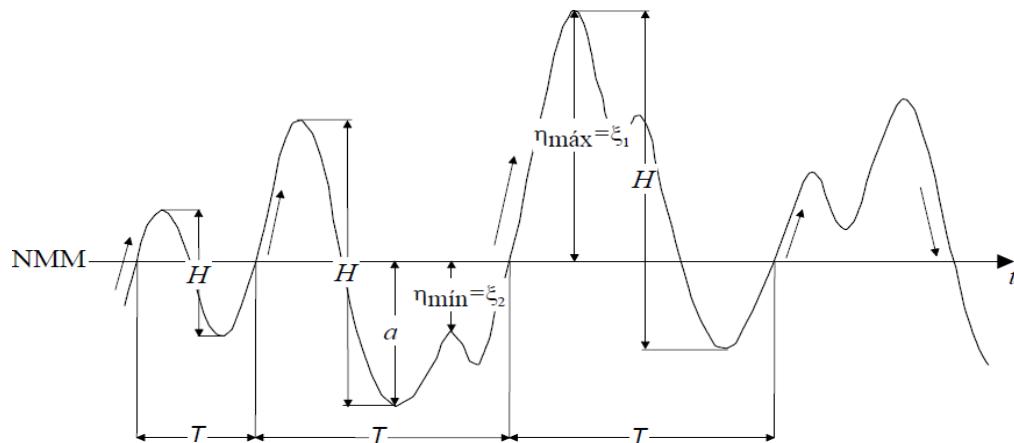


Figura 4-34: Parámetros que definen el oleaje (Fuente: Silva, 2005).

En primer término, se considera el análisis estadístico de la muestra, con lo que se calculan, para el caso de las alturas y periodos de ola, los parámetros estadísticos: número de sucesos, media, media cuadrática, valor significativo, valor décimo y valor máximo del parámetro de la muestra (Tabla 4-6).

Tabla 4-6: Parámetros estadísticos obtenidos por medio de análisis en el dominio del tiempo.

	Altura [m]	Periodo [s]
Máxima	$H_{máx} = \max(H_i)$	$T_{máx} = \max(T_i)$
Media	$H_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$	$T_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$
Significativa	$H_s = H_{1/3} = \frac{3}{n} \sum_{i=1}^{n/3} H_i$	$T_s = T_{1/3} = \frac{3}{n} \sum_{i=1}^{n/3} T_i$
Media cuadrática	$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i^2}$	
1/10	$H_{1/10} = \frac{10}{n} \sum_{i=1}^{n/10} H_i$	

Fuente: Figueroa **et al.**, s.f.

Existen diversos métodos para caracterizar la muestra, calcular las alturas y los períodos de ola de forma individual, dentro de los cuales se encuentran: método de pasos ascendentes por cero, método de pasos descendentes por cero, método de distancia entre crestas y método de distancia entre valles. Para información detallada sobre estos métodos revisar Silva (2005).

Análisis en el dominio de las frecuencias

En este caso se considera el estudio del espectro y sus propiedades en el dominio de las frecuencias. El espectro de energía permite representar cómo está distribuida la energía del oleaje en función de las frecuencias que integran una señal en particular.

El análisis espectral es una técnica que permite descomponer un fenómeno físico complejo en componentes individuales con respecto a la frecuencia. Este modelo matemático del oleaje supone que una señal de superficie libre del mar es resultado de la suma de un gran número de ondas sinusoidales (Figura 4-35).

Este tipo de análisis es de gran importancia para el diseño de estructuras. Por ejemplo, en el diseño de plataformas petroleras, donde la fuerza del oleaje juega un rol importante, esto es de importancia para diseñar la estructura de modo que la frecuencia natural de la estructura esté muy lejos de la banda de frecuencias donde la mayor parte de la energía del oleaje se concentra. De esta forma, el fenómeno de resonancia y la amplificación dinámica de la fuerza resultante y deformación pueden ser evitados (Liu & Frigaard, 2001).

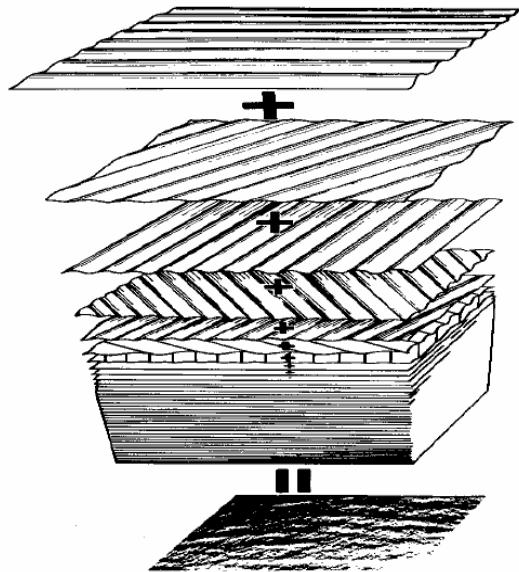


Figura 4-35: Estructura de oleaje aleatorio (Fuente: Silva, 2005).

Por medio del análisis espectral de oleaje es posible describir la distribución de la varianza con respecto a la frecuencia de la señal, la cual se representa como $E(f)$ o $S(f)$, bajo el supuesto que la función es continua en el dominio de la frecuencia. Esto se debe a que todas las observaciones son tomadas discretamente en el tiempo, y por lo tanto, el análisis produce estimaciones de frecuencias discretas que luego son estadísticamente suavizadas para estimar un continuo. A pesar que $E(f)$ es en realidad una media de la varianza, a menudo recibe el nombre de espectro de energía de la frecuencia, ya que la energía del campo del oleaje puede ser estimada multiplicando $E(f)$ por ρg , asumiendo la teoría lineal de oleaje.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

La principal desventaja del análisis espectral es que se pierde información de olas individuales, lo cual no ocurre en el análisis en el dominio del tiempo. Analizando un registro específico, es posible retener la información acerca de las fases del registro, el cual permite la reconstrucción de las condiciones de olas individuales. Sin embargo, este procedimiento no es realizado frecuentemente.

La superficie debe ser considerada como una superficie tridimensional, la cual representa un desplazamiento periódico de la media y de la varianza en el tiempo y en el espacio. La representación más simple es considerar $E(f, \theta)$, la cual representa como la varianza es distribuida en la frecuencia (f) y en la dirección (θ) (Figura 4-36).

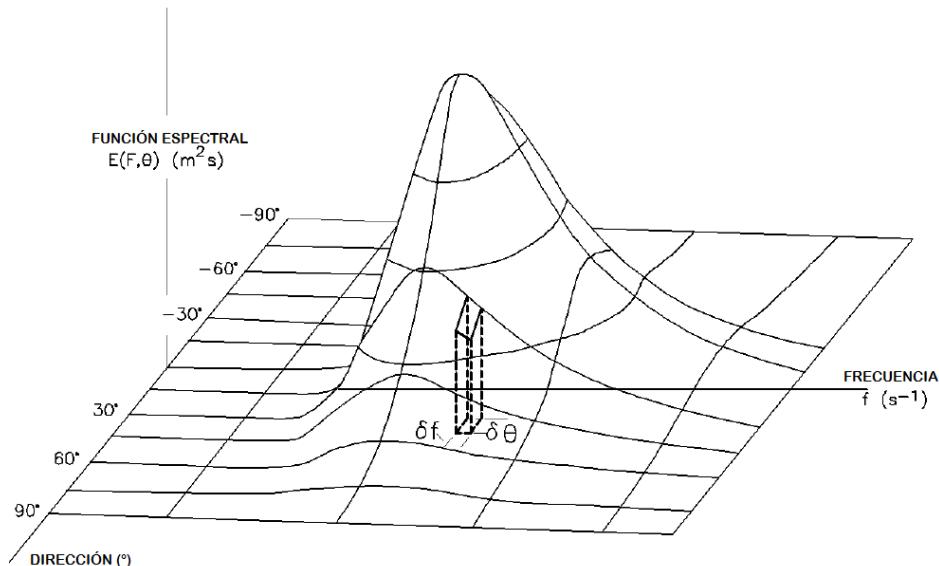


Figura 4-36: Esquema para un espectro de ondas bidimensional (Fuente: Adaptado de CEM II-1, 2002).

$E(f, \theta)$ es conocido como espectro bidimensional o espectro direccional de energía y permite obtener la energía del oleaje. La ventaja de esta representación, es que entrega información acerca de la dirección en la cual la energía de la ola se desplaza (Figura 4-37).

Para las bajas frecuencias, los valores de $E(f)$ informan sobre los cambios lentos del proceso, que corresponden a periodos largos. Mientras que las altas frecuencias corresponden a periodos cortos y los valores de $E(f)$ indicarán los cambios rápidos de desnivelación en el tiempo ($\eta(t)$).

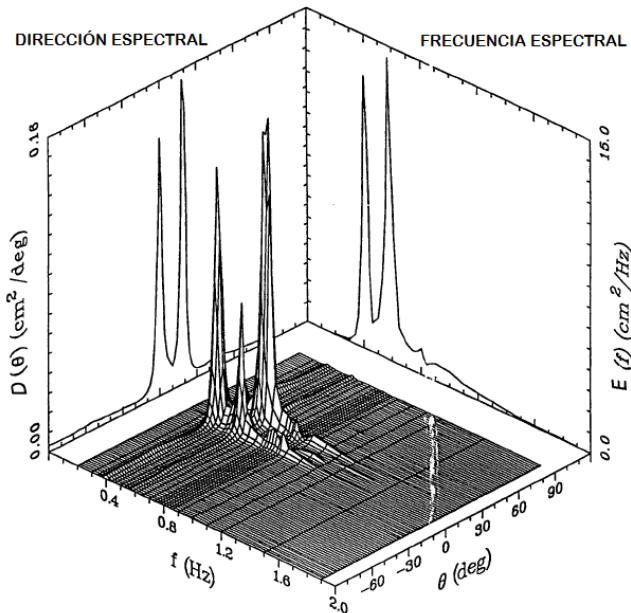


Figura 4-37: Espectro direccional y su espectro de frecuencia y dirección (Fuente: Adaptado de CEM II-1, 2002).

La obtención de la serie de tiempo se puede llevar a cabo utilizando el análisis de Fourier, con el cual es posible expresar la desnivelación de oleaje en el tiempo como una suma infinita de ondas sinusoidales de amplitud (A_n), frecuencia (ω_n) y fase relativa (ε_n). Los coeficientes a_n y b_n pueden ser determinados de forma explícita por las propiedades de ortogonalidad de la función circular.

$$\eta(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n * \cos(\omega_n * t - \varepsilon_n)) = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n * \cos(n * \omega * t) + b_n * \sin(n * \omega * t))$$

Una estimación del espectro continuo de energía de $\eta(t)$ puede ser obtenido por:

$$E(t) = \frac{1}{T_r} * \left[\sum_{n=0}^N \eta(n * \Delta t) * e^{2\pi * n * f(n * \Delta t)} \right]$$

Donde T_r es la extensión del registro y Δt es el intervalo de tiempo de la toma de datos.

Si se considera una desnivelación o perfil de oleaje con una amplitud y frecuencia dada por una función sinusoidal, se tiene lo siguiente:

$$\eta(t) = a * \operatorname{sen}(\omega t)$$

Por lo tanto, la varianza de una ola de periodo 2π puede ser expresada:

$$\sigma^2 = \frac{a^2}{2} = 2 * \int_0^{\infty} E(f) df = \int_{-\infty}^{\infty} E^2(f) df$$

De esta forma se puede obtener el momento de orden i :

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i E(f) df$$

La varianza de un registro aleatorio de media cero puede considerarse constituida por las contribuciones de todas las frecuencias que lo componen. Así, para una señal aleatoria se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_n^2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n^2}{2} = \int_0^{\infty} E(f) df = m_0$$

Donde m_0 es el momento de orden cero del espectro y físicamente representa el área bajo la curva de $E(f)$. Luego, se puede definir la altura significativa espectral de la siguiente forma:

$$H_s = 3,8 * \sqrt{m_0} \approx 4 * \sqrt{m_0}$$

Los momentos m_0 y m_1 se utilizan para determinar el periodo medio de oleaje (T_m):

$$T_m = \frac{m_0}{m_1}$$

El periodo *peak* (T_p) y dirección *peak* (D_p) de oleaje están asociados a la frecuencia y a la dirección en la cual se concentra la mayor cantidad de energía en el espectro de la Figura 2-36 respectivamente. Para el cálculo de la dirección media (D_m) se tiene la expresión:

$$D_m = \frac{\iint \cos(\theta) * E(f, \theta) d\theta df}{\iint \operatorname{sen}(\theta) * E(f, \theta) d\theta df}$$

4.5.6 OLEAJE ESTADÍSTICO

Los estudios estadísticos se enfocan en definir el comportamiento de las componentes del oleaje, específicamente los parámetros altura, dirección y periodo. Conociendo las características del oleaje en un punto de interés es posible construir modelos y sistemas de predicción, útiles en el ámbito de la ingeniería costera y marítima.

Las condiciones estadísticas de la superficie del mar presentan variaciones en escalas tiempo-espacio, es por esto que se definen tres escalas para realizar análisis estadístico de oleaje:

Análisis a corto plazo

Análisis a mediano plazo

Análisis a largo plazo

El análisis de corto plazo corresponde a la definición del estado de mar, lo cual fue descrito en la sección anterior de “Caracterización-Análisis en el dominio del tiempo”.

Análisis a mediano plazo

El análisis a mediano plazo, conocido como clima operacional, caracteriza el comportamiento de los parámetros de oleaje en un año medio. Es utilizado para evaluar condiciones funcionales de las estructuras, ya sea las que se encuentran en un lugar determinado o las que se quieren proyectar.

La información estadística sobre la cual se realiza el análisis del clima medio corresponde a series de tiempo de parámetros de resumen, correspondientes a todos los estados de mar registrados en un lugar específico.

Antes de llevar a cabo el análisis, es necesario verificar la calidad de la información, para lo cual se comprueba que no haya datos faltantes y existencia de datos anómalos. Posteriormente, se analizan las condiciones de oleaje mediante el uso de representaciones gráficas como histogramas, tablas de incidencia, curvas de excedencia y rosas de oleaje. Con la ayuda de estas herramientas, se visualiza el comportamiento y características reinantes del oleaje.

El análisis a medio plazo permite evaluar el porcentaje de operatividad de la infraestructura portuaria, como también la orientación y ubicación de los sitios más apropiados para la instalación de la misma. Estos aspectos influyen directamente en tres de las operaciones más importantes de los puertos, como son el atraque de embarcaciones, operaciones de carga y descarga y permanencia de los buques en los muelles.

Análisis a largo plazo

El análisis de las condiciones de oleaje a largo plazo corresponde a la función de distribución de valores extremos que expresa la probabilidad de que el valor de la altura de retorno (H_r) proyectado no sea superado en un periodo de tiempo determinado. La descripción estadística del oleaje extremo reproduce el comportamiento del fenómeno en las condiciones de mayor intensidad, es por esto que también es llamado análisis de clima extremo o clima de diseño.

El desarrollo del clima de diseño en Chile está basado en el análisis de las olas extremas que han sido definidas en el clima de oleaje de aguas profundas, identificando y aislando, como mínimo, las mayores tormentas ocurridas en 20 años de *hindcasting* (20 eventos). Esto se lleva a cabo para cada una de las componentes del oleaje, tipo *sea* y *swell*, con el fin de observar el oleaje de diseño para diferentes direcciones y caracterizar el oleaje en casos extremos. Con esta información, se lleva a cabo un análisis estadístico de los valores extremos, permitiendo realizar una estimación de la altura de ola con períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años (SHOA, 2005).

Dentro de los métodos para realizar la identificación de las olas extremas se encuentran el método de valores sobre un umbral, el cual identifica las condiciones de oleaje que se encuentren sobre un valor establecido de altura de ola; y el método de los máximos anuales, con el que se identifican los mayores valores de altura de ola por año a lo largo de los datos disponibles.

El estudio del fenómeno en sus condiciones extremas requiere de métodos específicamente diseñados para este fin, puesto que la estadística común se enfoca en los valores medios y la dispersión respecto a estos. Los métodos utilizados en el análisis extremo de oleaje se diferencian por la función de distribución de los valores extremos (Tabla 4-7).

Tabla 4-7: Distribuciones y funciones para análisis de largo plazo.

Nombre distribución	Función
Exponencial	$F = F_x(x) = P(X < x) = 1 - e^{-(\frac{x-B}{A})}$
Weibull	$F = F_x(x) = P(X < x) = 1 - e^{-(\frac{x-B}{A})^k}$
Gumbel	$F = F_x(x) = P(X < x) = e^{-e^{-(\frac{x-B}{A})}}$
Frechet	$F = F_x(x) = P(X < x) = e^{-(\frac{x}{A})^k}$
Log-normal	$F = F_x(x) = P(X < x) = \phi\left(\frac{\ln(x) - B}{A}\right)$

Fuente: Figueroa **et al.**, s.f.

Donde:

X : Altura característica de ola dependiendo de los datos extremos disponibles, la cual puede ser la altura significativa (H_s), altura un décimo $H_{1/10}$ o la altura máxima $H_{máx}$.

x : Altura de ola en estudio.

$F(x)$: Probabilidad de no excedencia de x .

A, B y k : Parámetros a determinar.

Φ : Función estándar de la distribución normal.

La Figura 4-38 muestra la distribución acumulada de la función de X . La probabilidad de no excedencia de x es $F(x)$, o en su defecto, la probabilidad de excedencia de x es $(1 - F(x))$.

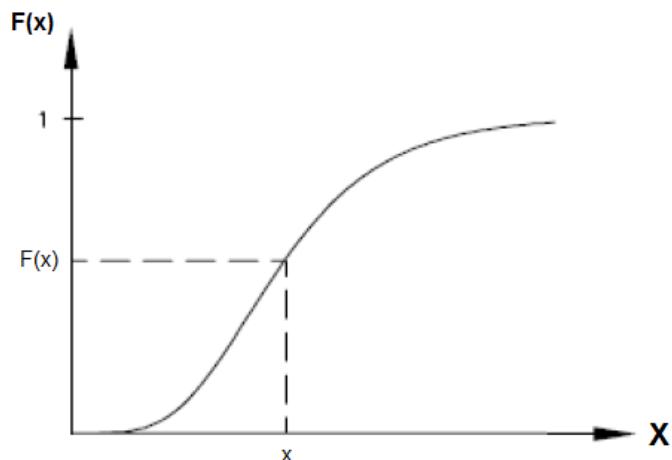


Figura 4-38: Función de la distribución acumulada de X (Fuente: Adaptado de Figueroa et al., s.f.).

En este estudio se han considerado las distribuciones Weibull y Gumbel para el cálculo de alturas de retorno, cuyas formulaciones se exponen en la Tabla 4-8. Las expresiones de linealización cumplen con la ecuación de la recta $y = A + Bx$ y permiten obtener los valores de los coeficientes A y B . El valor k utilizado en la distribución de Weibull es $k = 1$.

Para ambos métodos se tiene $P_0 = 1 - \frac{1}{\frac{n}{t} * T_r}$, donde t es el número de años de observación de X , n el número de observaciones en un periodo de t años y T_r es el periodo de retorno a evaluar en el cálculo de H_r .

Tabla 4-8: Fórmulas de linealización y altura de retorno de distribuciones Weibull y Gumbel.

Distribución	Linealización	Altura de retorno
Weibull	$y = A + B[-\ln(1 - P_0)]^{1/k}$	$H_r = A + B[-\ln(1 - P_0)]^{1/k}$
Gumbel	$y = A - B * \ln[-\ln(P_0)]$	$H_r = A - B * \ln[-\ln(P_0)]$

Fuente: Silva, 2005.

La importancia del periodo de retorno radica en que muchos criterios de diseño están basados en este concepto, es decir, se debe diseñar una obra para resistir una altura de ola extrema que se presente en una cierta cantidad de años. Para definir este parámetro en base a una altura de ola x , se utiliza la siguiente expresión:

$$T_r = \frac{1}{\lambda * (1 - F(x))}$$

Donde λ es la densidad de la muestra ($\lambda = n/t$).

Dentro de las alturas de retorno de oleaje utilizadas para el diseño de obras se encuentran H_{50} y H_{100} , las cuales corresponden a alturas de ola con períodos de retorno de 50 y 100 años respectivamente.

4.5.7 OLEAJE EN CHILE

El oleaje en Chile se presenta según las siguientes componentes principales (Scott **et al.**, 2002):

Mar de viento: Generado por condiciones de vientos locales, los cuales varían a lo largo del país.

Mar de fondo reinante: Generado en las latitudes medias del hemisferio Sur por el paso de sistemas ciclónicos. Este tipo de oleaje, en combinación con el mar de viento generado localmente, constituyen los eventos de mayor frecuencia que llegan a las costas de Chile.

Mar de fondo del Norte: Generado en las latitudes medias del hemisferio Norte, el cual se propaga por aproximadamente 15.000 [km] para llegar a la costa chilena. En ocasiones menos frecuentes se genera oleaje de ciclones tropicales que también incide desde el cuarto cuadrante en las costas de Chile.

Las características del oleaje en Chile se deben principalmente a la presencia de olas generadas en grandes sectores oceánicos, específicamente provenientes de sistemas de bajas presiones en el Pacífico Sur. El oleaje en las costas chilenas es muy regular, presentándose con escasa variación en las diferentes estaciones del año, con baja dispersión direccional y altos períodos (Monárdez **et al.**, 2008).

En general, las condiciones de oleaje en aguas profundas frente a las costas chilenas provienen principalmente desde las direcciones SW y NW y con un menor porcentaje desde el W (Monárdez **et al.**, 2008, SHOA, 2005).

Mediciones satelitales de la altura de ola significativa promedio muestran que los valores para este parámetro varían entre 2 [m] para el extremo norte y 4 [m] en el extremo sur (Figura 4-39). Esto concuerda con lo establecido por Cruz **et al.** (2009), quienes concluyen que el clima de oleaje en el sur de Chile es más energético en comparación a la zona norte.

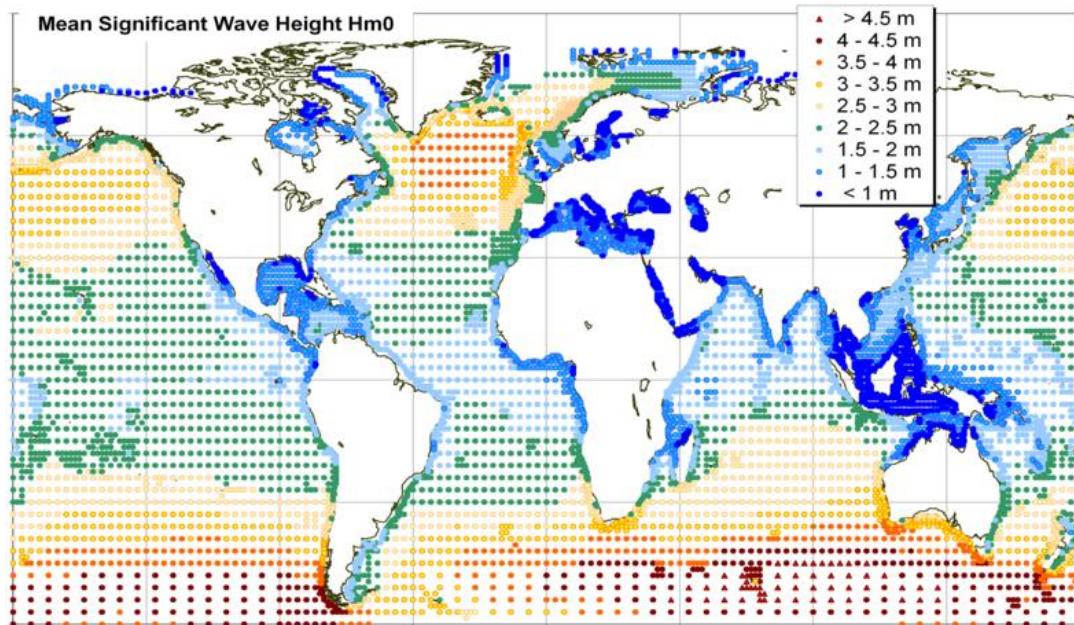


Figura 4-39: Altura significativa espectral promedio de ola (H_{m0}) alrededor del mundo, entre 1997 y 2006 (Fuente: Fugro OCEANOR²⁰).

²⁰ Disponible en [\[http://www.oceanor.no/Services/Worldwaves/WW_database\]](http://www.oceanor.no/Services/Worldwaves/WW_database). Accesada 18 de enero de 2016.

En la Tabla 4-9 se exponen valores promedio de altura significativa, periodo medio y dirección media en Chile entre Arica y Corral (regiones XV a XIV), extensión territorial considerada dentro del presente estudio. Los valores fueron determinados con la base de datos de oleaje en aguas profundas ERA-Interim.

Tabla 4-9: Valores promedio de altura significativa, periodo medio y dirección media en Chile, entre Arica y Corral.

Región	H_s Promedio [m]	T_m Promedio [s]	D_m Promedio [°]
XV	1,79	10,7	217
I	1,78	10,6	220
II	2,04	10,5	221
III	2,04	10,5	221
IV	2,39	10,0	222
V	2,50	10,0	226
VI	2,32	10,1	232
VII	2,32	10,1	234
VIII	2,63	10,3	234
IX	2,79	10,4	239
XIV	2,79	10,4	242

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que los valores de altura significativa comienzan a aumentar de norte a sur en Chile, con valores promedio entre 1,70 y 2,80 [m] a lo largo de todas las zonas consideradas. Adicionalmente, se identifica un periodo característico de 10 [s] aproximadamente, con oleaje proveniente desde el tercer cuadrante.

4.6 MAREAS

Como se pudo ver en la Figura 4-26, las ondas de mayor duración en el océano son aquellas asociadas a las mareas y están caracterizadas por el ascenso y descenso rítmico del nivel del mar, por un período de tiempo de 12 a 24 [hrs]. El aumento y disminución resulta de los movimientos horizontales de la superficie del mar en la onda de marea, las cuales comúnmente son consideradas como un fenómeno costero.

Es importante destacar que el ascenso y descenso del nivel de marea en la costa es una manifestación de la subida y bajada general en el nivel del mar causado por una larga longitud de onda que afecta los océanos. No obstante, debido a su largo período y longitud de onda, las ondas de marea se comportan como ondas de aguas someras (Dean & Dalrymple, 2001).

4.6.1 MAREA ASTRONÓMICA

La marea astronómica corresponde al aumento y descenso de un cuerpo de agua de forma periódica, resultante de las interacciones gravitacionales entre el Sol, la Luna y la Tierra (U.S. Department of Commerce, 2000). Generalmente, el ciclo de marea dominante se produce con el paso de la Luna sobre el meridiano fijo. Esto ocurre en promedio a los 50 [min] del día siguiente. Este paso de la Luna produce aproximadamente dos mareas por cada día solar, mareas que reciben el nombre de Semidiurnas, con un máximo en la elevación de la superficie cada 12 [hrs] y 25 [min]. Sin embargo, diferencias en las posiciones de la Luna y el Sol, en conjunto con las condiciones locales, pueden dar como resultado que las mareas tengan sólo un ciclo por día. Este régimen es denominado marea Diurna. También existen las mareas Mixtas, las cuales poseen características de las mareas Diurnas y Semidiurnas (CEM II-5, 2006).

En Chile, el régimen de marea característico por efectos astronómicos es de marea Semidiurna Mixta (SHOA, 1999; del Canto & Paskoff, 1983), es decir, se presentan dos pleas (altas) y dos bajas mareas por día, pero las pleamaras sucesivas no presentan la misma altura.

Durante las fases de Lunas Nueva y Llena, la Luna y el Sol actúan en forma conjunta sobre la superficie de la Tierra, produciendo una amplitud de marea, la cual recibe el nombre de Marea de Sicilia. Por el contrario, cuando la Luna está en Cuadraturas, forma con la Tierra y el Sol un ángulo de 90°. Esto contrarresta las fuerzas de atracción, disminuyendo la amplitud de la marea, generando la llamada Marea de Cuadratura (SHOA, 1992). Estas interacciones se exponen en la Figura 4-40.

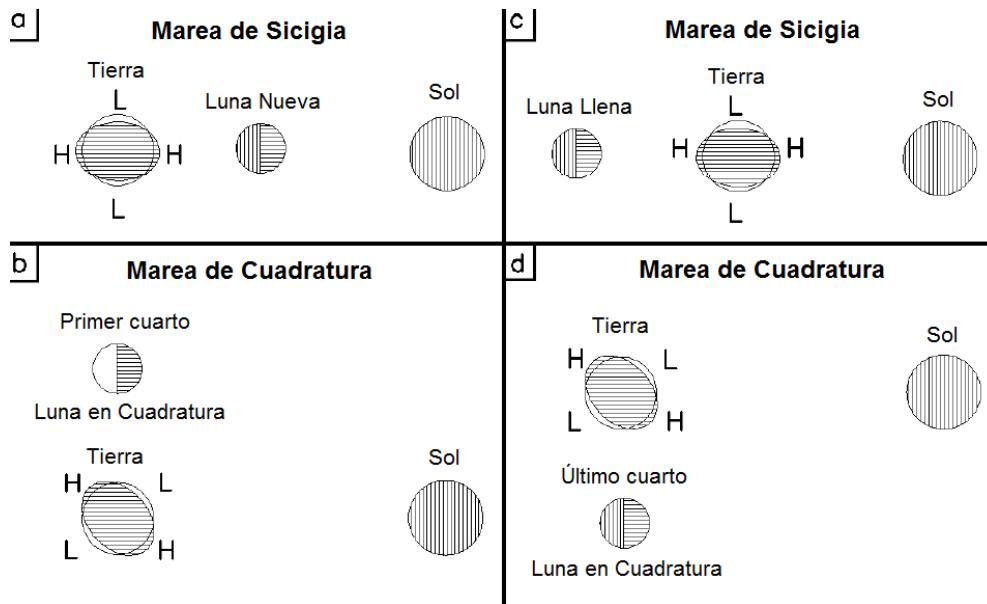


Figura 4-40: Mareas de Sicilia y Cuadratura (Fuente: Adaptado de CEM II-5, 2006).

En la Figura 4-41 se muestra un registro de los niveles de marea para el mes de abril del año 2015 en la bahía de Valparaíso (datos obtenidos de IOC²¹). Se aprecian los efectos que tienen las fases de la Luna y el Sol sobre la superficie del mar, generando aumentos y disminuciones del nivel de marea, con dos Sicigias y dos Cuadraturas a lo largo del mes.

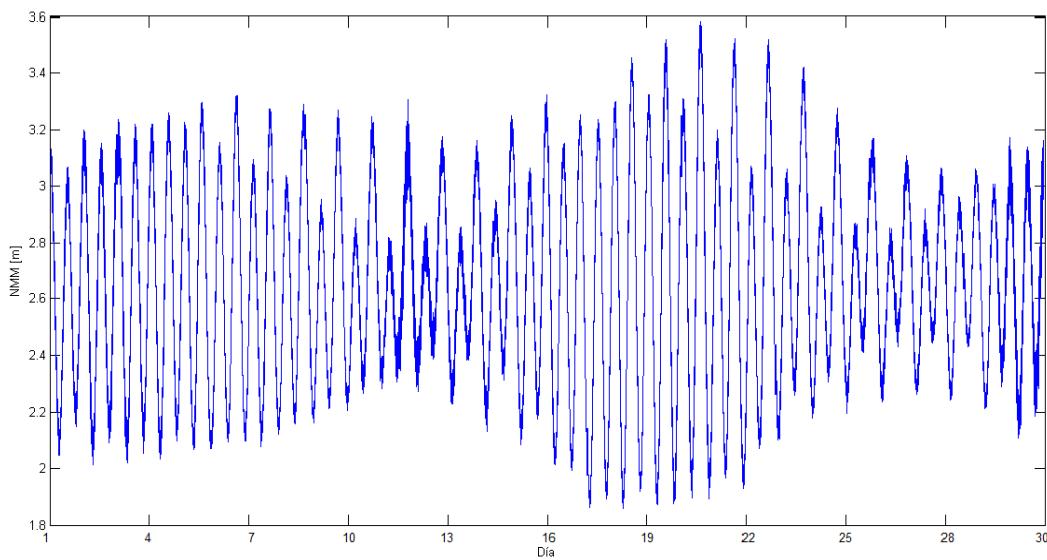


Figura 4-41: Registro de mareas en la bahía de Valparaíso, abril 2015 (Fuente: Elaboración propia).

²¹ Intergovernmental Oceanographic Commission-Sea Level Data Facility. Disponible en [<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=valp>]. Accesada 29 de diciembre de 2015.

4.6.2 MAREA METEOROLÓGICA

La marea meteorológica se define como las variaciones del nivel del mar debido a condiciones atmosféricas y meteorológicas (Ortega et. al., 2012). Los factores ligados a la atmósfera se relacionan principalmente a cambios de presión atmosférica, lo cual también es conocido como marea barométrica. Por otra parte, las variaciones de marea producidas por efectos meteorológicos se deben a las fuerzas forzantes sobre la superficie del mar, producidas por la velocidad del viento. Este fenómeno es llamado *set-up* por viento.

Marea barométrica

Es la respuesta de la superficie del mar a los cambios de presión atmosférica. Si la presión cae lentamente, Δp , el nivel del agua en el área donde la presión atmosférica ha decaído experimentará un aumento, representado como η_B (Figura 4-42).

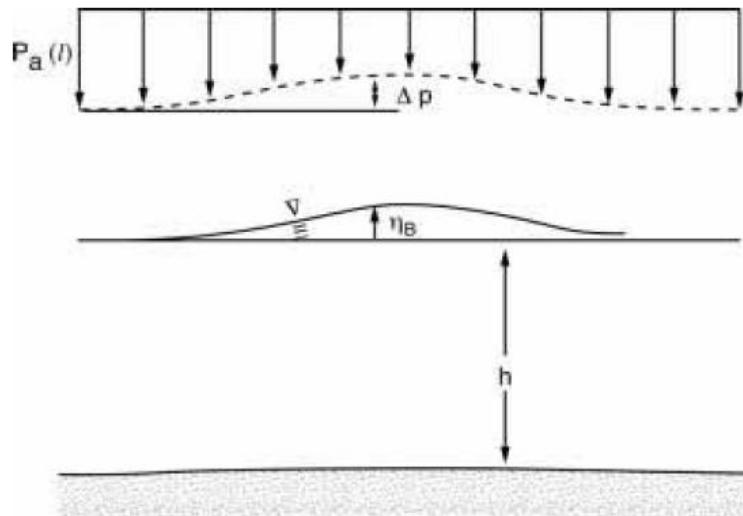


Figura 4-42: Esquema de efectos barométricos (Fuente: Modificado de Dean & Dalrymple, 2001).

Este fenómeno se puede modelar usando principios hidrostáticos. Para esto, se asume la superficie del mar como un sistema estacionario. Por lo tanto, la presión $p(x, z)$ a lo largo del fondo del mar ($z = -h$) debe ser constante. Para una larga distancia ($x = l$) fuera de la zona de generación de oleaje, la presión en el fondo es:

$$p(l, -h) = \gamma h + p_a(l)$$

Donde γ es el peso específico del agua de mar, h es la profundidad del mar y p_a es la presión atmosférica local. Esta presión en el fondo debe ser la misma que se encuentra en el centro de la zona de generación, $p(0, -h)$; de otra forma, el agua aceleraría de acuerdo a la diferencia de presión entre esos puntos, lo cual es contrario al supuesto hidrostático considerado. La presión de fondo en el centro de la zona de generación es:

$$p(0, -h) = \gamma(h + \eta_B) + p_a(l) - \Delta p$$

Donde $h + \eta_B$ es la profundidad total del agua y η_B es la respuesta barométrica a una disminución de presión. Igualando las dos ecuaciones expuesta, para η_B se obtiene:

$$\eta_B = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

Como regla, se tiene la expresión $\eta_B = 1,04 * \Delta p$, cuando Δp es medido en milibares y η_B tiene unidades de centímetros. Debido a su magnitud, las diferencias de presión atmosférica no son las causantes del mayor aumento de marea meteorológica (Dean & Dalrymple, 2001).

Set-up por viento

Cuando un fuerte viento se mantiene soplando por un tiempo prolongado, el agua de la superficie es arrastrada por el viento. Si el viento sopla en la zona de la costa, el agua se acumula en la zona litoral dando como resultado un aumento en el nivel del mar (Figura 4-43).

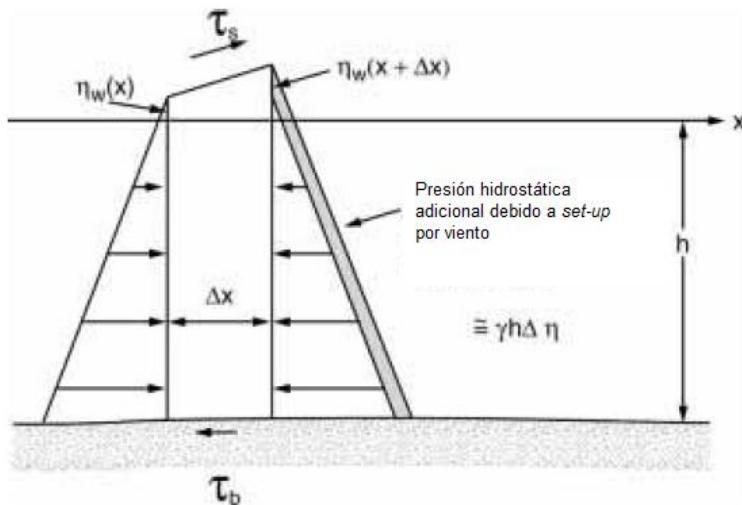


Figura 4-43: Esquema de balance de energía por fuerzas forzantes del viento (Fuente: Modificado de Dean & Dalrymple, 2001).

La fórmula empírica para el esfuerzo del viento es:

$$\tau_s = \rho * C_f * W^2$$

Donde ρ es la densidad del agua, W es la velocidad viento (usualmente medida a 10 [m] de altura, en unidades [m/s]) y C_f es un coeficiente de fricción adimensional. Los valores típicos para C_f se encuentran entre $1,2 \times 10^{-6}$ y $3,4 \times 10^{-6}$, con los mayores valores para altas velocidades del viento, debido al aumento de fricción con la superficie del mar.

Para determinar la magnitud del *set-up* por viento, es necesario analizar las fuerzas actuando en el volumen de control, ubicado en la columna de agua de longitud Δx , ancho unitario y altura $h + \eta_W$. El esfuerzo de viento actuando en la superficie crea una fuerza $\tau_s \Delta x$ actuando en la dirección del viento.

En el lado derecho de la columna, el nivel del agua aumenta $\Delta \eta_W$ como resultado del esfuerzo generado por el viento. Adicionalmente, en el fondo se genera un esfuerzo por fricción, τ_b , el cual actúa en dirección contraria a la velocidad del viento. Luego, el balance de fuerzas en la columna es:

$$\frac{1}{2} \rho g (h + \eta_W)^2 - \frac{1}{2} \rho g (h + \eta_W + \Delta \eta_W)^2 + \tau_s \Delta x - \tau_b \Delta x = 0$$

Asumiendo que $\Delta \eta_W^2$ es muy pequeño, se obtiene:

$$\frac{\Delta \eta_W}{\Delta x} = \frac{(\tau_s - \tau_b)}{\rho g (h + \eta_W)}$$

Dado que Δx se vuelve pequeño, se puede reemplazar el lado izquierdo de la ecuación con una derivada, obteniendo una ecuación diferencial para determinar el valor de η_W :

$$\frac{d\eta_W}{dx} = \frac{(\tau_s - \tau_b)}{\rho g (h + \eta_W)}$$

De esta forma es posible determinar la variación del nivel de marea meteorológica por efectos de la acción del viento sobre la superficie del mar.

5 **METODOLOGÍA**

5.1 IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS

Utilizando información de los eventos de marejadas identificados por la Armada de Chile entre los años 1979 y 2015, en conjunto con la base de datos de oleaje de aguas profundas ERA-Interim, se seleccionaron los estados de mar cuyas alturas significativas en aguas profundas fuesen superiores a 3 [m]. De esta forma se obtienen fechas de posibles eventos de marejadas con daños y/o impactos dentro de la base de datos de la Armada de Chile. El valor umbral mencionado se definió a partir de un análisis preliminar de eventos de marejadas identificados en periódicos *online*, donde dicho valor corresponde a la mínima altura significativa ocurrida durante los eventos de marejada con impactos importantes.

Una vez seleccionadas las fechas más probables de ocurrencia de marejadas con efectos significativos, se revisaron reportes de prensa 3 días antes y 3 días después del evento para identificar si la marejada produjo daños. Este procedimiento fue realizado para fechas anteriores al año 2000, utilizando los archivos de periódicos impresos en la Biblioteca Nacional de Chile (Santiago) y Biblioteca Santiago Severín (Valparaíso) hasta el año 1979. También se revisaron aquellos casos en los que se mencionaban temporales de mal tiempo, ya que en gran parte de estos se encontró información sobre eventos de marejadas. Cabe destacar que para la IX región no se cuenta con registro de marejadas dentro de la base de datos de la Armada de Chile, por lo tanto no se efectuó la revisión para dicha zona.

Dada la disponibilidad de información en internet, para fechas entre los años 2000 y 2015 se revisaron diversos periódicos electrónicos, principalmente El Mercurio, La Tercera y Radio Biobío, recopilando información sobre los efectos de las marejadas. Adicionalmente, y en especial para eventos más recientes, se revisó información gráfica y audiovisual de otras fuentes en internet para identificar los efectos de las marejadas.

Al analizar los eventos identificados mediante el umbral de altura significativa, se concluye que este criterio no es representativo a lo largo de toda la zona costera en estudio. Esto se debe principalmente a que las condiciones de oleaje en Chile presentan variaciones a lo largo del territorio costero. Además, al realizar la búsqueda considerando sólo el parámetro de altura significativa, se ignora la influencia de la dirección de oleaje en eventos de marejadas que producen daños.

Para corregir esto, en base a todos los eventos de marejadas identificados (1979-2015), se establecen valores mínimos de altura significativa por región y por cuadrante (Tabla 5-1) bajo los cuales es probable que se produzcan eventos de marejada con algún impacto en la costa. Se analizaron el tercer y cuarto cuadrante debido a que la costa chilena está expuesta a condiciones de oleaje proveniente de aquellas direcciones. Para las regiones XV y I no se presentan parámetros en el cuarto cuadrante, ya que dentro de las marejadas con daños identificadas no se encontraron eventos provenientes del sector mencionado.

Tabla 5-1: Valores mínimos de altura significativa (H_s) por rango de direcciones medias (D_m) para ocurrencia de impactos por marejadas en las costas de Chile.

Región	180 - 225 [°]		225 - 270 [°]		270 - 360 [°]	
	H_s [m]	D_m [°]	H_s [m]	D_m [°]	H_s [m]	D_m [°]
XV	2,10	214	-	-	-	-
I	2,20	213	1,50	240	-	-
II	2,60	212	2,00	260	2,00	270
III	2,70	213	2,00	230	1,96	270
IV	2,62	204	2,50	235	2,14	270
V	2,67	203	1,64	242	1,64	270
VI	2,89	218	-	-	2,00	270
VII	2,67	231	-	-	2,04	270
VIII	3,97	206	3,00	230	2,45	270
IX	4,70	213	-	-	3,30	270
XIV	4,18	215	2,39	232	2,10	270

Fuente: Elaboración propia.

Las nuevas fechas de posibles eventos se obtuvieron mediante una comparación entre las marejadas identificadas por la Armada de Chile y las fechas obtenidas dentro de la base de datos ERA-Interim para los estados de mar que cumplen con las condiciones expuestas en la Tabla 5-1. Con esto se realizó una nueva búsqueda entre los años 1979 y 2000, siguiendo la metodología antes expuesta.

Los eventos previos al año 1979 fueron identificados con información disponible en diferentes sitios en internet y fuentes bibliográficas. Para estos episodios no se cuenta con información de condiciones de oleaje, por lo tanto se han utilizado las descripciones de lo ocurrido en los eventos pero no se han considerado dentro de los análisis estadísticos de parámetros de oleaje. Cabe destacar que para fechas anteriores a 1979 el análisis es discontinuo.

En la Figura 5-1 se exponen registros de eventos de marejadas recopilados en sitios de internet y archivos de prensa.

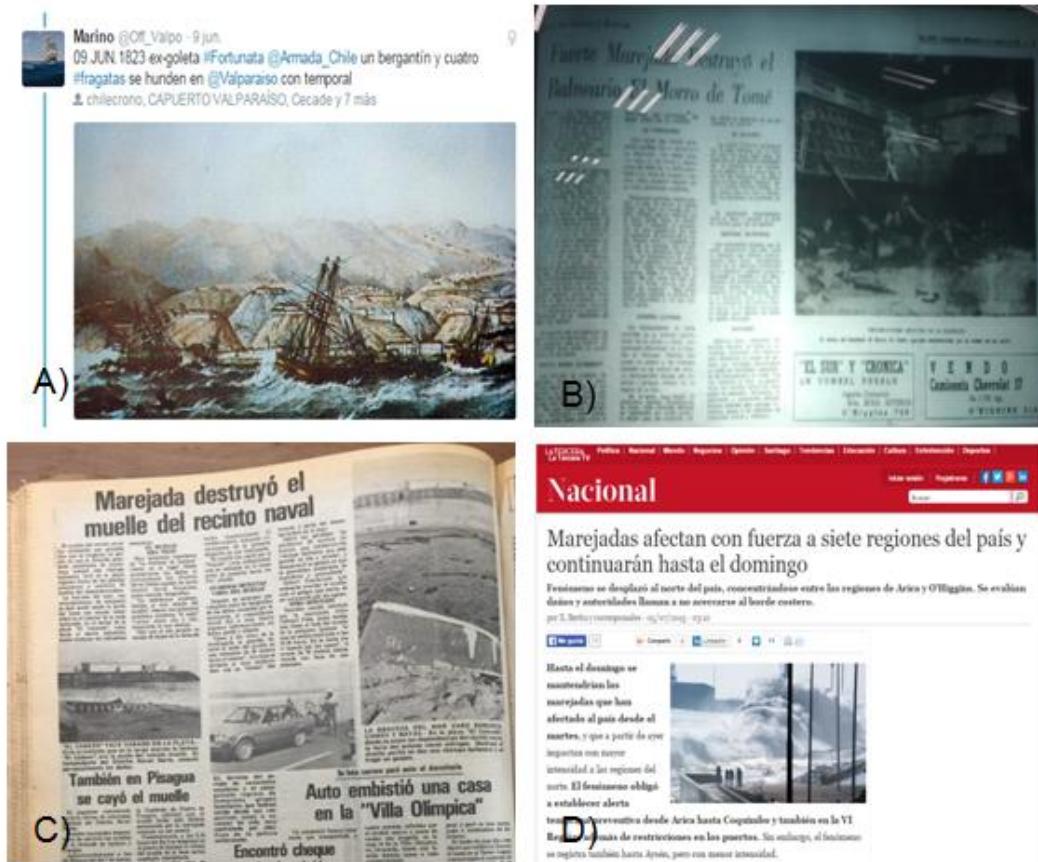


Figura 5-1: Registros de eventos de marejadas en medios de comunicación. A) Naufragio de embarcaciones en Valparaíso, evento del 09 de junio de 1823 (Marino, 09/06/2015. Recuperado de http://twitter.com/@Off_Valpo); B) Daños por marejadas en VIII región, evento del 08 de agosto de 1965 (Biblioteca Nacional de Chile); C) Daño en muelle del puerto de Iquique, evento del 08 de marzo de 1983 (Biblioteca Nacional de Chile); D) Marejadas evento 03 de Julio de 2013 (www.latercera.com, 05/07/2013).

5.2 ANÁLISIS DE CONDICIONES DE OLEAJE

Los parámetros de oleaje para cada una de las fechas de marejadas identificadas fueron obtenidos de las bases de datos NOAA y ERA-Interim en las fechas cercanas al máximo de la marejada. Se consideraron 10 días previos y posteriores a los eventos, con el fin de analizar la evolución del oleaje dentro del periodo de tiempo en que comienza, se desarrolla y debilita la condición de marejada.

Para establecer la base de datos de oleaje a utilizar en los análisis, se realizaron comparaciones del valor de altura significativa (H_s), periodo medio (T_m) y dirección *peak* (D_p) y dirección media (D_m) de los modelos NOAA y ERA-Interim con mediciones de altímetros satelitales e información de boyas oceanográficas escalares y direccionales proporcionada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), en fechas de

eventos de marejadas identificados. En el caso de altímetros satelitales, debido a que estos no presentan un patrón horario de mediciones, se estableció un intervalo de ± 3 horas en comparación a la fecha y hora considerada en la obtención de parámetros de oleaje con la base de datos de oleaje ERA-Interim. Las comparaciones de periodo y dirección fueron efectuadas sólo entre modelos y boyas, dado que no se posee información de estos parámetros medidos por altímetros satelitales.

Con las comparaciones efectuadas, se determinaron intervalos de confianza de 95% entre las mediciones y modelos mediante la ecuación:

$$\bar{x} \pm z * \sigma$$

Donde \bar{x} corresponde al error medio entre medición y modelo, σ la desviación estándar y la cantidad de desviaciones estándar. Este último factor ha sido considerado como 1,96, valor que corresponde para el intervalo de confianza de 95% para una distribución normal (Estuardo, 2012).

Una vez seleccionada la base de datos de oleaje a utilizar, se realizaron cálculos de potencia con las siguientes ecuaciones (Cahill & Lewis, 2014):

$$P = 0,49 H_{m0}^2 T_E$$

$$T_E = \alpha_J T_{02}$$

Donde P corresponde a la potencia por unidad de ancho de la cresta de ola, H_{m0} a la altura significativa espectral de ola, T_E al periodo energético de ola, T_{02} al periodo medio de oleaje (equivalente a T_m de la base de datos ERA-Interim) y α_J a la relación T_E/T_{02} . El valor de α_J fue obtenido de Cahill & Lewis (2014) para el parámetro de forma $\gamma=4,2$ del espectro JONSWAP en las costas de Chile (Beyá & Beyá, 2013), obteniendo un valor de $\alpha_J=1,169$.

5.3 EVALUACIÓN DE DAÑOS Y/O IMPACTOS

Según la revisión de los medios de prensa y de fuentes bibliográficas, los impactos en la costa producidos por marejadas se pueden clasificar y cuantificar según los siguientes indicadores:

Sobrepasos: Número de sectores en los que ocurrió sobrepaso.

Daños a infraestructura costera: Descripción de los daños y costos aproximados de reparación de las estructuras afectadas actualizados al año 2015.

Daños a locales comerciales y viviendas: No fue realizada una evaluación de modo cuantitativo debido a que las fuentes de información no indicaban específicamente cuántas viviendas o locales comerciales habían sido dañados o afectados en cada evento. Por lo tanto, la cuantificación se realizó con base en la ocurrencia o no ocurrencia de este tipo de impacto.

Cierres de puertos: Número de cierres de puertos por región junto con los costos asociados estimados a partir de datos del SEP²². Estos consisten en la estadística de los rendimientos de los puertos en base a la cantidad de carga transferida anualmente, cantidad de naves atendidas, tasas de transferencia (tiempo de ocupación por nave), entre otros. Con esto se determinaron los parámetros de cantidad de naves promedio diaria, embarque medio por nave, tiempo de ocupación medio por nave, toneladas por contenedor, contenedor promedio por nave y factor de ocupación diario de las instalaciones portuarias. Junto con esto, se utilizó la información disponible de las tarifas de empresas portuarias, lo cual permitió determinar la cantidad de dinero que deja de ingresar a las empresas por efecto de suspender sus operaciones.

Daños a embarcaciones: Cantidad de embarcaciones dañadas. Según la revisión de fuentes de información, se ha diferenciado entre embarcaciones menores (lanchas, yates, bongos, botes, chalupas, faluchos, balandras, chatas, veleros, barcas, goletas y remolcadores) y embarcaciones mayores (buques, diques flotantes y mercantes).

Daños a la integridad física humana: Número de personas lesionadas y/o muertas obtenida de los archivos de prensa. Se realizó distinción entre civiles, pescadores y personal de la Armada de Chile.

Otro tipo de daños: Ocurrencia de otros efectos no considerados en la lista anterior.

Para la obtención de la información de costos por reparación de infraestructura costera dañada se consultó a la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y Superintendencia de Valores y Seguros (SVS). Estas gestiones no fueron exitosas, por lo que la información de costos para daños a infraestructura costera se obtuvo mediante: 1) Consultando al Ministerio de Obras Públicas por medio de la Dirección de Obras Portuarias (DOP); 2) A partir de declaraciones de autoridades en sitios web gubernamentales o periódicos; y, 3) Mediante la estimación de costos por la reposición de los daños producidos en cada uno de los casos identificados, utilizando la descripción obtenida de los medios de prensa.

Para este último método, se revisaron las características de cada una de las estructuras afectadas, estimando el porcentaje de pérdida o daño provocado por las marejadas. Finalmente, se estimaron los costos de reposición de las secciones dañadas en base a información de costos de proyectos de características similares realizados por empresas

²² Sistema de Empresas-Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. Disponible en [<http://www.sepchile.cl>]. Accesada 31 de diciembre de 2015.

consultoras. Este procedimiento fue llevado a cabo por un profesional con experiencia en la elaboración de presupuestos de obras marítimas, que se desempeña en una empresa consultora de la V región.

Con la información recopilada se elaboró una base de datos de eventos de marejadas en las costas de Chile con fecha, lugar, información de oleaje, potencia de oleaje, descripción del efecto, tipo de daño y costo asociado por reparación de estructuras dañadas. Esta base de datos fue utilizada para realizar análisis estadísticos geoespaciales de tendencias y correlaciones entre condiciones de oleaje, costos, efectos y daños.

Para los análisis a partir de la sección 6.3.1, los tipos de daños han sido separados en dos categorías:

Daños estructurales: Sobre pasos, daños a infraestructura costera y daños a locales comerciales y viviendas.

Impactos: Cierres de puertos, daños a embarcaciones, daños a integridad física humana y otro tipo de daños.

Es importante señalar que a lo largo de las zonas costeras consideradas se encontró una mayor cantidad de reportes de la categoría de impactos.

Para cuantificar los daños producidos por marejadas, éstos han sido normalizados mediante un índice que consiste en la razón entre el nivel de daño ocurrido para cada evento y el valor máximo para el mismo tipo de daño y localidad. La cuantificación del nivel de daño corresponde a los indicadores de sobre pasos, daño a infraestructura costera y daños a locales comerciales y viviendas, por lo que algunos tipos de daños muestran escalones que se deben a la naturaleza discreta del indicador. Los eventos máximos corresponden a valores unitarios del índice normalizado.

Para analizar el índice normalizado de daño, se definen parámetros normalizados de oleaje de la siguiente forma:

Altura normalizada: Altura significativa de ola máxima de la marejada sobre altura de ola de periodo de retorno de 50 años calculada para cada sub-cardinal en las direcciones y para cada región (H_s/H_{50}^*).

Periodo normalizado: Periodo medio de la marejada sobre el promedio de los periodos medios de todo el registro de la base de datos ERA por región ($T_m/T_{promedio}$).

Dirección normalizada: Diferencia entre dirección media de la marejada y el promedio de las direcciones medias de todo el registro de la base de datos ERA por región ($D_m - D_{promedio}$). Valores positivos y negativos indican condiciones de oleaje proveniente de direcciones más al Norte o más al Sur en comparación al promedio de las direcciones medias para cada región.

Potencia normalizada: Potencia máxima de la marejada sobre el promedio de las potencias de todo el registro de la base de datos ERA por región ($P_m/P_{promedio}$).

Debido a que los eventos de marejadas presentan diferentes niveles de impactos en la línea de costa, se ha elaborado una escala de magnitud de intensidad de daños por marejadas con el fin de categorizar cada uno de los eventos identificados. Esto fue realizado utilizando como referencia la Escala Saffir-Simpson para Vientos en Huracanes (Schott **et al.**, 2012), la Escala de Impactos por Storm Surge (Needham & Keim, 2011) y analizando los efectos que presentan las marejadas en base al porcentaje de ocurrencia de cada tipo de daño, tipos de daños o impactos presentes en un mismo evento y niveles de daños a embarcaciones, infraestructura costera, locales comerciales y viviendas. Cabe destacar que dentro de la categorización no se ha considerado el daño a integridad física humana, debido a que corresponde a un factor no necesariamente ligado a los efectos de las marejadas, sino que responde a la decisión de las personas a exponerse ante estas condiciones adversas de oleaje.

La distribución anual de eventos identificados ha sido comparada con las oscilaciones climáticas de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y Modo Anular del Sur (SAM), con el fin de relacionar si existen períodos de tiempo en los cuales la presencia de mayor cantidad de eventos identificados está vinculada con las distintas fases de fenómenos climáticos. Para el caso del El Niño se ha utilizado el Índice Multivariado del ENOS (MEI). Por otra parte, para comparaciones con SAM, se ha considerado el índice que realiza observaciones del fenómeno basándose en la metodología de Marshall (2003). Las comparaciones fueron realizadas con los eventos identificados desde 1979, ya que desde este año el estudio presenta información de oleaje continua.

Del mismo modo, se han comparado las oscilaciones climáticas con los eventos máximos anuales en la escala de daños elaborada. El valor del índice de los fenómenos climáticos corresponde al del mes en el cual ocurre el evento con máximo daño anual. Esto ha permitido analizar relaciones entre las diferentes fases de los fenómenos con la mayor o menor generación de daños dentro de los eventos.

Finalmente se presentan tablas y figuras con el análisis de la información, incluyendo incidencia estacional de las marejadas, tabla de parámetros de oleaje por región y de eventos importantes con sus respectivos costos en daño a infraestructura costera, gráficos de índices de daños comparados parámetros normalizados del oleaje y categorización de daños en base a la escala de daños por marejadas.

6 RESULTADOS

6.1 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESTACIONAL DE EVENTOS IDENTIFICADOS

Se logró identificar una totalidad de 201 eventos de marejadas en las costas de Chile con alguno de los efectos descritos en la sección 5.3. Del total mencionado, 64 corresponden a eventos ocurridos previamente al año 1979, específicamente entre los años 1823 y 1977. Para dichos eventos no se encontró información sobre las condiciones de oleaje pero sí descripción sobre los efectos. El listado completo de eventos con registro de daños identificados se encuentra en Anexo 10-1.

Considerando la información a partir de 1979, se encontró un total de 137 eventos que produjeron daños, con un promedio de 4 eventos por año aproximadamente. La distribución anual de la información mencionada se expone en la Figura 6-1, en la cual se aprecia que se logró identificar una cantidad considerable de eventos entre los años 2010 y 2015, acumulando un 33% de los episodios ocurridos desde 1979.

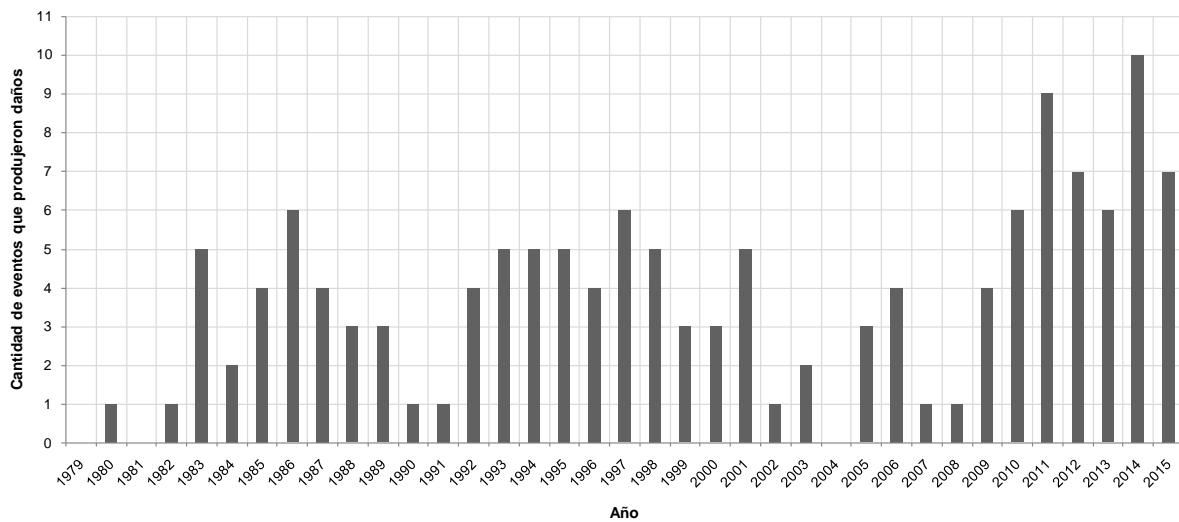


Figura 6-1: Distribución anual de eventos de marejadas con daños y/o impactos en las costas de Chile, 1979-2015 (Fuente: Elaboración propia).

Se detectaron 3 ventanas de tiempo definidas por una cantidad de eventos anuales sobre el promedio. Estos intervalos tienen una duración promedio de 6 años y corresponden a los períodos 1983-1987 (máximo el año 1986); 1992-2001 (máximo el año 1997) y 2009-2015 (máximo el año 2014). El intervalo entre los años 2002 y 2008 no presenta un comportamiento regular en la cantidad de eventos, por lo que no ha sido considerado dentro de las ventanas de tiempo identificadas.

En cuanto a la distribución mensual de marejadas, la Figura 6-2 muestra que la mayor cantidad de eventos ocurren entre los meses de mayo y agosto, alcanzando su máximo el mes de junio. Esto se debe a la presencia de ciclones extratropicales de mayor intensidad generados en latitudes medias del hemisferio sur, los cuales están compuestos por sistemas de baja presión que durante el invierno son más activos e intensos mientras más al Sur se encuentren (Reyes & Romero, 1977; NOAA, 2004).

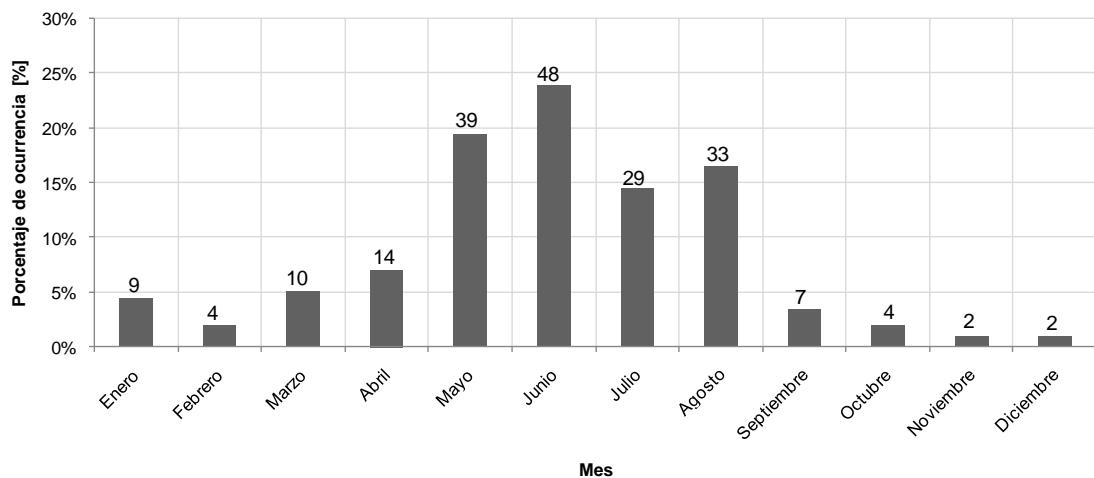


Figura 6-2: Distribución mensual total eventos de marejadas que produjeron daños, 1823-2015. Valores sobre las barras indican la cantidad de eventos identificados para cada mes (Fuente: Adaptado de Campos **et al.**, 2015).

En Chile, principalmente en la zona central, se producen temporales típicos de estaciones lluviosas que presentan distintas intensidades de viento y en ocasiones pueden ser muy destructivos, con marejadas en las costas e inundaciones en ciudades y campos (MINVU, 1996).

6.2 COMPARACIÓN MODELOS Y MEDICIONES DE OLEAJE

La información de las boyas oceanográficas utilizadas para las comparaciones realizadas de los parámetros de oleaje entre mediciones y modelos *hindcasting* de oleaje se expone en la Tabla 6-1. Es importante destacar que las profundidades a las cuales se han obtenido los parámetros de oleaje de los modelos NOAA y ERA-Interim se encuentran en aguas profundas, lo cual es un factor importante en la cuantificación de las diferencias con los sistemas de medición *in-situ*.

Existe información de boyas en las cuales las mediciones presentan discontinuidades, lo cual se podrá apreciar en las figuras en las cuales se exponen series de tiempo de parámetros de oleaje en fechas cercanas a eventos de marejadas.

Para las comparaciones con altímetro satelital se cuenta sólo con información de altura significativa en instantes de tiempo específicos, por lo cual no se presentan series de tiempo de marejadas con este sistema de medición.

Tabla 6-1: Información de boyas oceanográficas utilizadas para comparaciones con modelos de oleaje.

Localidad	Ubicación (Latitud°/Longitud°)	Profundidad [m]	Periodo de medición	Fuente
Arica	-18,45/-70,37	45	31/08/1988 a 07/07/1989	SHOA
Iquique	-20,18/-70,17	30	05/06/1987 a 12/07/1988	SHOA
Valparaíso	-32,93/-71,67	150	01/08/2000 a 01/08/2003	SHOA
Valparaíso	-32,99/-71,82	450	30/08/2009 a 10/10/2010	SHOA
V región	-XX,XX-XX,XX ²³	150	16/06/2011 a 21/12/2013	CORFO-INNOVA
Valparaíso	-32,98/-71,82	460	07/08/2015 a 08/08/2015	SHOA

Fuente: Adaptado de Hidalgo **et al.**, 2015.

6.2.1 ALTURA SIGNIFICATIVA

Las comparaciones realizadas de los valores de altura significativa (H_s) entre modelos de oleaje (NOAA y ERA-Interim) y mediciones de altímetro satelital y boyas SHOA indican que existe una tendencia a sobreestimar los valores de H_s por parte de la base de datos NOAA, mientras que ERA-Interim presenta un comportamiento similar a las mediciones pero subestima los valores máximos. Los resultados mencionados quedan en evidencia en las Figuras 6-3, 6-4 y 6-5, en las cuales se presentan series de tiempo de 9 eventos de marejadas con mediciones de boyas en las regiones XV, I y V.

Adicionalmente, las series de los eventos permiten visualizar el comportamiento de las marejadas en Chile. Del total de casos expuestos, 6 están definidos por condiciones de oleaje que presentan valores máximos de altura significativa (julio 1987, septiembre 2000, junio y agosto 2010, julio 2013 y agosto 2015). Es en estos instantes de tiempo en los cuales las condiciones de oleaje generan la mayor cantidad de daños o impactos en sectores costeros, debido a que se produce un aumento considerable en la altura de ola. Los daños registrados en este tipo de eventos fueron principalmente sobre pasos, daños a infraestructura costera y locales comerciales.

²³ Ubicación exacta no disponible.

Para las series de eventos en las cuales no se visualiza un máximo notorio de H_s (junio 1989, julio 2010 y septiembre 2010) los impactos identificados corresponden a cierres de puerto y daños a embarcaciones.

En los eventos de septiembre 2000 y junio-julio 2010 se detectaron días cercanos al evento de marejadas identificado en los cuales el nivel máximo de altura significativa es mayor al del día en el cual identificó algún tipo de daño y/o impacto. Para estos días cercanos al evento no se encontraron registros de daños.

Las marejadas A y B de la Figura 6-3 muestran claramente las diferencias en los valores de altura significativa, especialmente en el evento de junio 1989, en el cual se aprecia que la base de datos NOAA indica valores superiores en comparación al modelo ERA y a las mediciones de boyas a lo largo de toda la serie.

En las Figuras 6-4 y 6-5, debido a la disponibilidad de información proporcionada por el SHOA, se presentan sólo marejadas ocurridas en la V región. Esto permite analizar las características que han tenido algunos eventos que han generado daños en esta zona, especialmente los eventos de julio 2013 y agosto 2015 (eventos B y C de Figura 6-5). En ambos casos se observan valores *peak* de H_s en las marejadas, alcanzando valores de hasta 7 [m] de altura de ola en las mediciones de boyas SHOA para el evento de agosto 2015.

En general, la base de datos ERA mantiene valores cercanos a lo obtenido con las mediciones de boyas. A pesar de esto, existen casos en los cuales el modelo mencionado no es capaz de representar de la mejor forma los valores máximos de las marejadas, indicando valores inferiores de H_s en comparación a lo ocurrido en la realidad. Por otra parte, en la base de datos NOAA, se producen incrementos importantes a medida que se comienza a desarrollar la marejada, haciendo que esta parezca aún más extrema. Las diferencias en los valores de altura significativa entre ambos modelos se deben principalmente a los mecanismos forzantes que utilizan para la generación de oleaje.

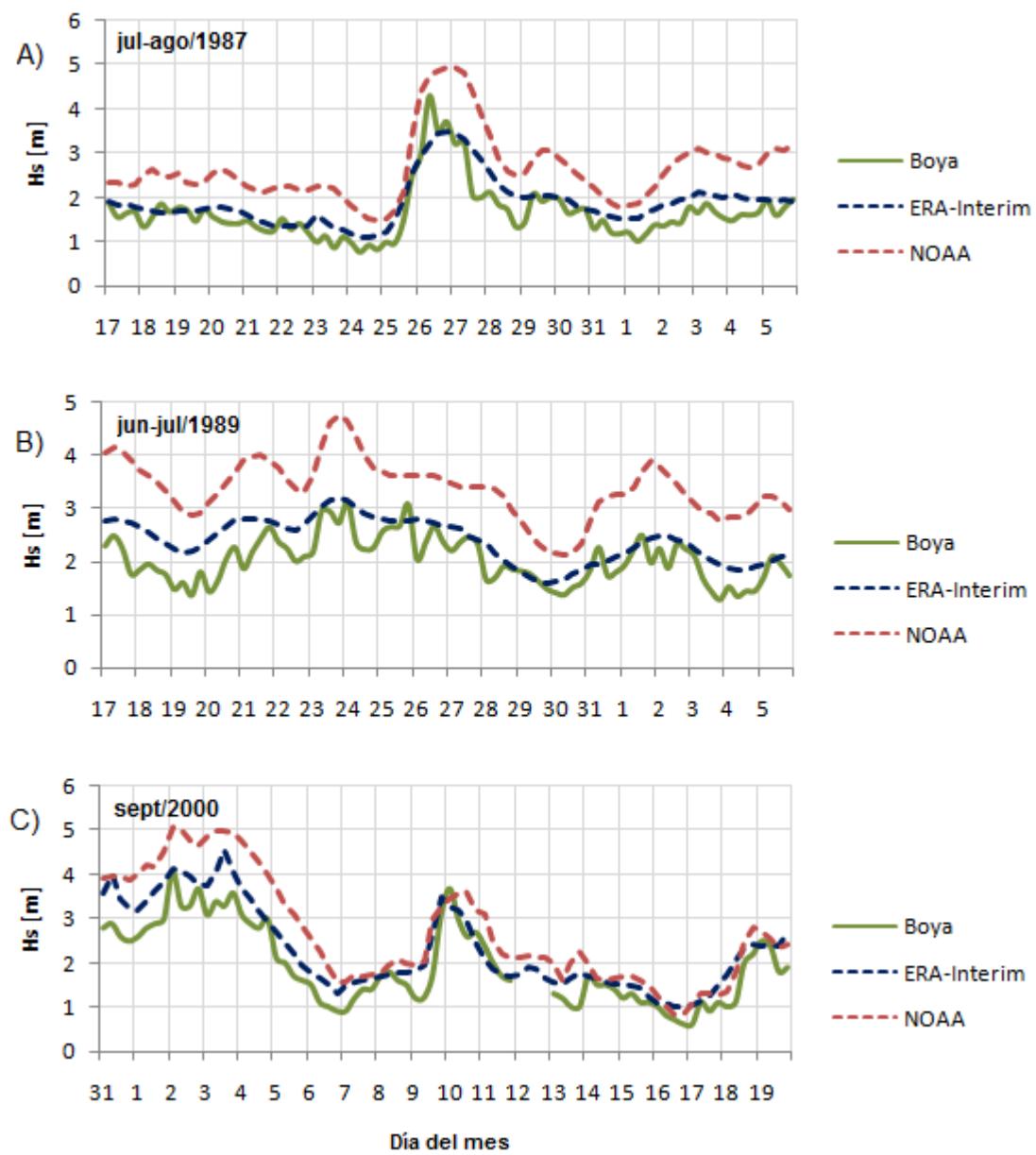


Figura 6-3: Series de tiempo de H_s de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) I región, 27/07/1987; B) XV región, 26 y 28/06/1989 y C) V región, 10/09/2000 (Fuente: Elaboración propia).

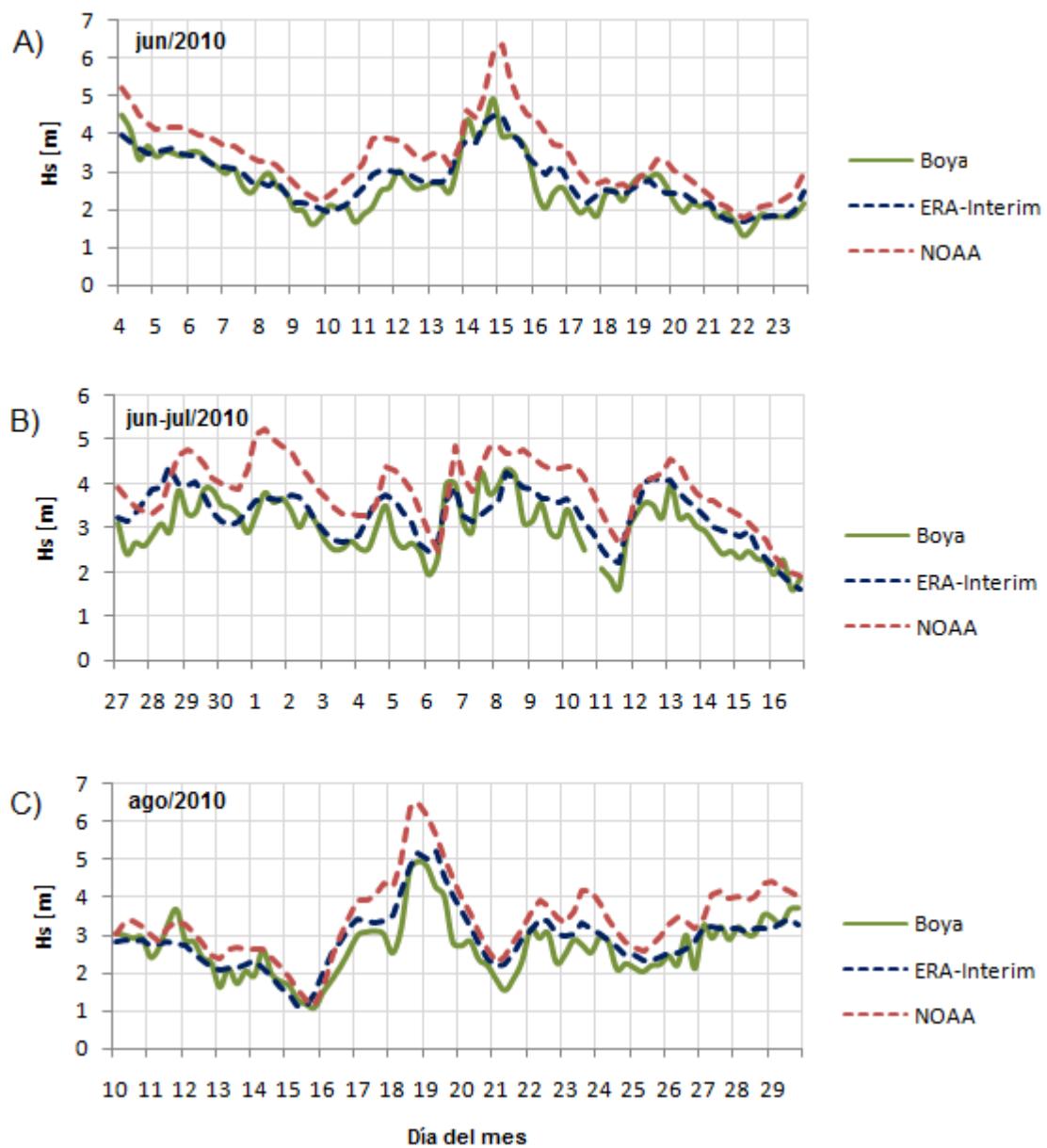


Figura 6-4: Series de tiempo de H_s de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 13 y 15/06/2010; B) 05/07/2010 y C) 19 y 24/08/2010, V región (Fuente: Elaboración propia).

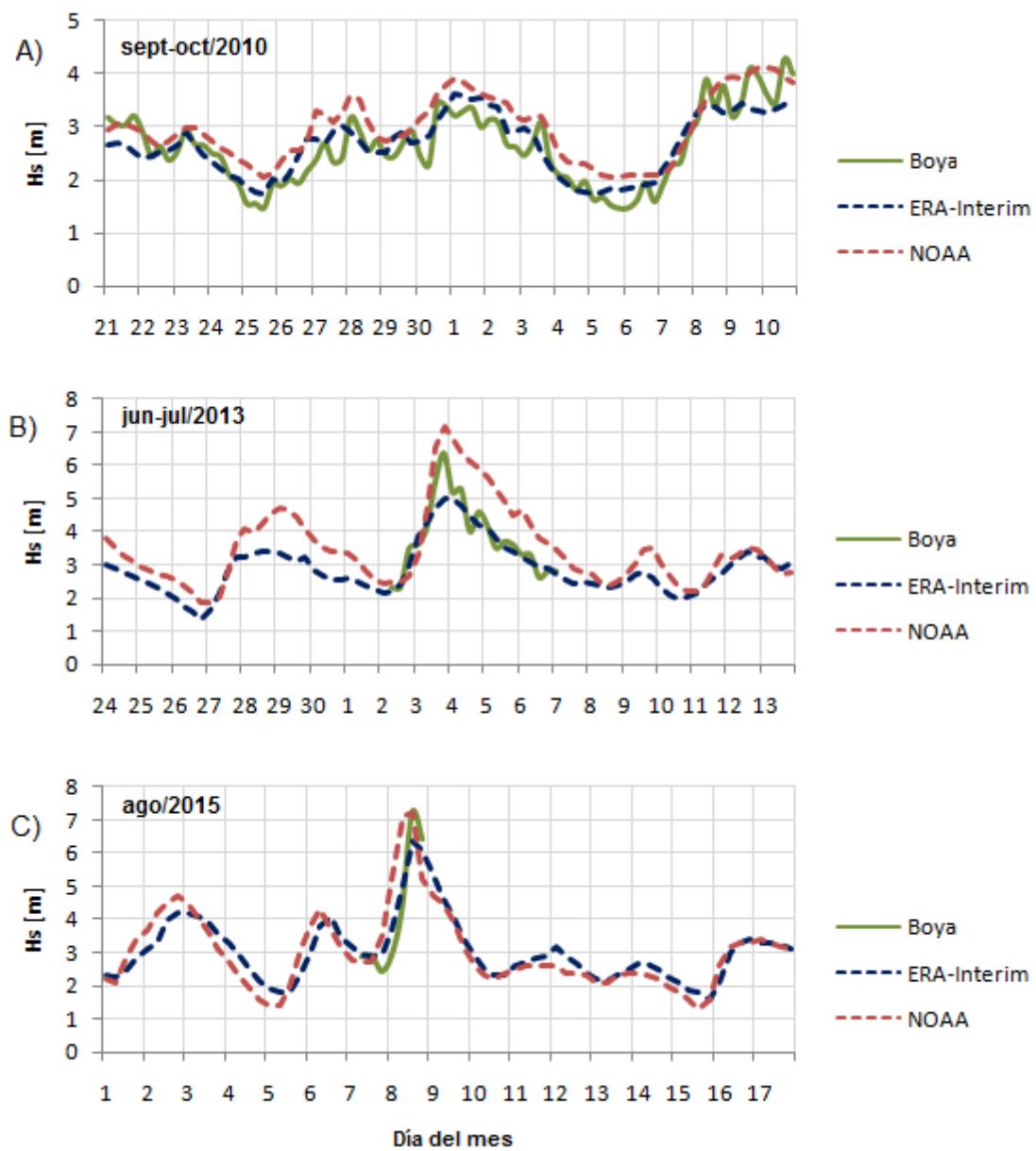


Figura 6-5: Series de tiempo de H_s de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 30/09/2010; B) 03 y 04/07/2013 y C) 08/08/2015, V región²⁴ (Fuente: Elaboración propia).

²⁴Datos NOAA-WAVEWATCH III obtenidos de [<http://www.windguru.cz/es/>]. Accesada 2 de enero de 2016.

En la Figura 6-6 se distingue que los modelos de oleaje se ajustan de mejor manera con las mediciones de boyas SHOA en los eventos de marejadas analizados, presentando valores de coeficiente de determinación (R^2) superiores a 0,8. Por otra parte, se aprecia como el modelo NOAA mantiene una línea de tendencia por sobre ERA-Interim en ambas comparaciones con mediciones, lo cual complementa lo observado en las series de eventos expuestas anteriormente. En las dos comparaciones realizadas, el mejor ajuste se obtiene con el modelo ERA-Interim.

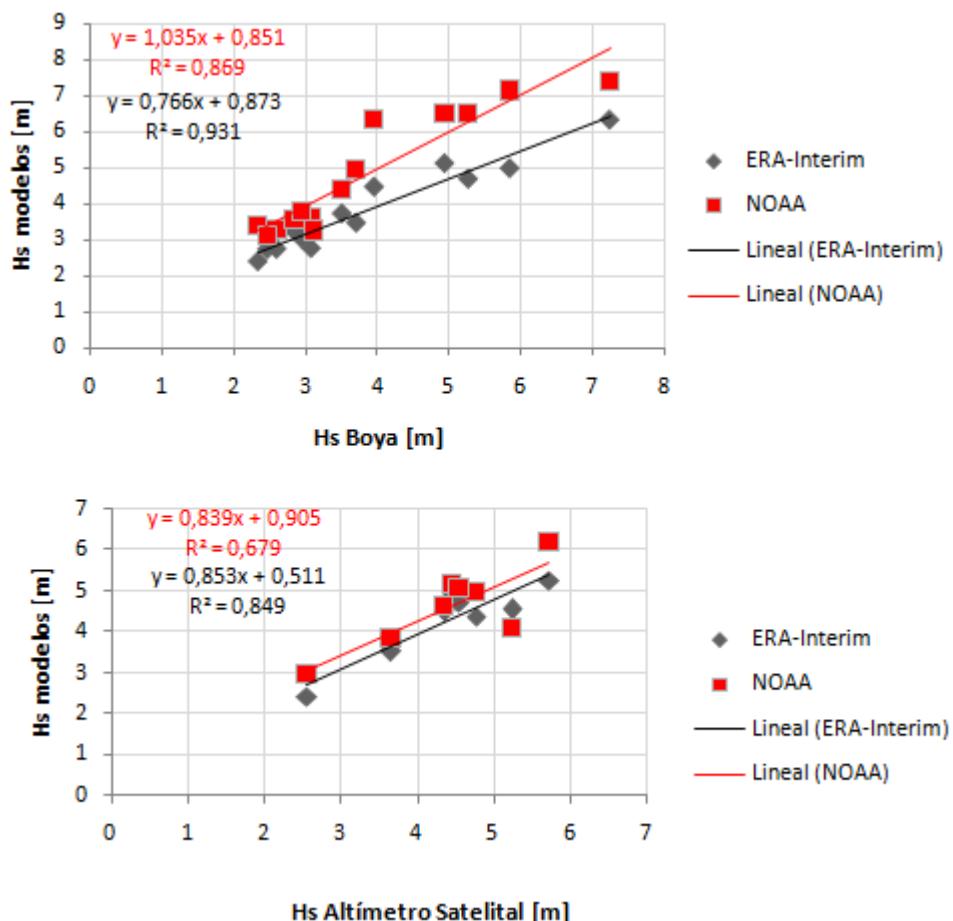


Figura 6-6: Comparación H_s entre modelos de oleaje y mediciones. Arriba: comparación con boyas; Abajo: comparación con altímetro satelital (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados de las comparaciones realizadas y los cálculos de intervalos de confianza con 95% presentes en la Tabla 6-2, indican que los mejores ajustes se obtienen al comparar los sistemas de medición con la base de datos ERA-Interim, esto debido a que los errores medios son menores y se obtiene una banda de confianza más ajustada entre la base de datos mencionada y los sistemas de mediciones.

Tabla 6-2: Error medio (medición-modelo) y banda de confianza H_s entre mediciones y modelos de oleaje.

Error medio H_s [m] \pm Banda de confianza [m]		
	Altímetro satelital	Boya
ERA-Interim	0,14 \pm 0,74	0,02 \pm 0,89
NOAA	-0,19 \pm 1,14	-0,99 \pm 1,15

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 PERIODO

Las comparaciones fueron realizadas considerando el periodo medio de oleaje (T_m) en los eventos de marejadas. Esto fue efectuado entre boyas oceanográficas y los modelos NOAA y ERA-Interim, lo cual se aprecia en las Figuras 6-7, 6-8 y 6-9. La base de datos NOAA y las mediciones de boyas de los años 2010 y 2015 presentan información de oleaje con periodo *peak* (T_p). Dado esto, para la obtención de T_m se utilizó la siguiente relación:

$$T_m = \frac{T_p}{1,1}$$

Del mismo modo que se pudo apreciar en las comparaciones de altura significativa, la base de datos NOAA presenta una tendencia a indicar valores superiores de periodo medio a los medidos por los sistemas de boyas, mientras que el modelo ERA-Interim tiende a subestimar los valores de mediciones.

Al analizar las series de tiempo de los eventos de marejadas, se aprecian niveles máximos de periodo en los días cercanos al evento de marejadas, los cuales no se distinguen a simple vista como lo visualizado en las comparaciones de altura significativa. Este comportamiento se identifica en los eventos de julio 1987, junio 2010, agosto 2010 y julio 2013.

Las series de tiempo de las mediciones de boyas muestran ascensos y descensos en los valores de periodo que no son representados de la mejor forma por los modelos de oleaje, los cuales presentan series de datos más bien suavizados. Esto queda en evidencia en los eventos A) y C) de la Figura 6-8, con descensos abruptos en el valor de T_m medido por las boyas en los días cercanos al evento de marejadas en los cuales se encontraron registros de daños, mientras que los modelos muestran cambios pero no de una forma tan notoria como el sistema de medición.

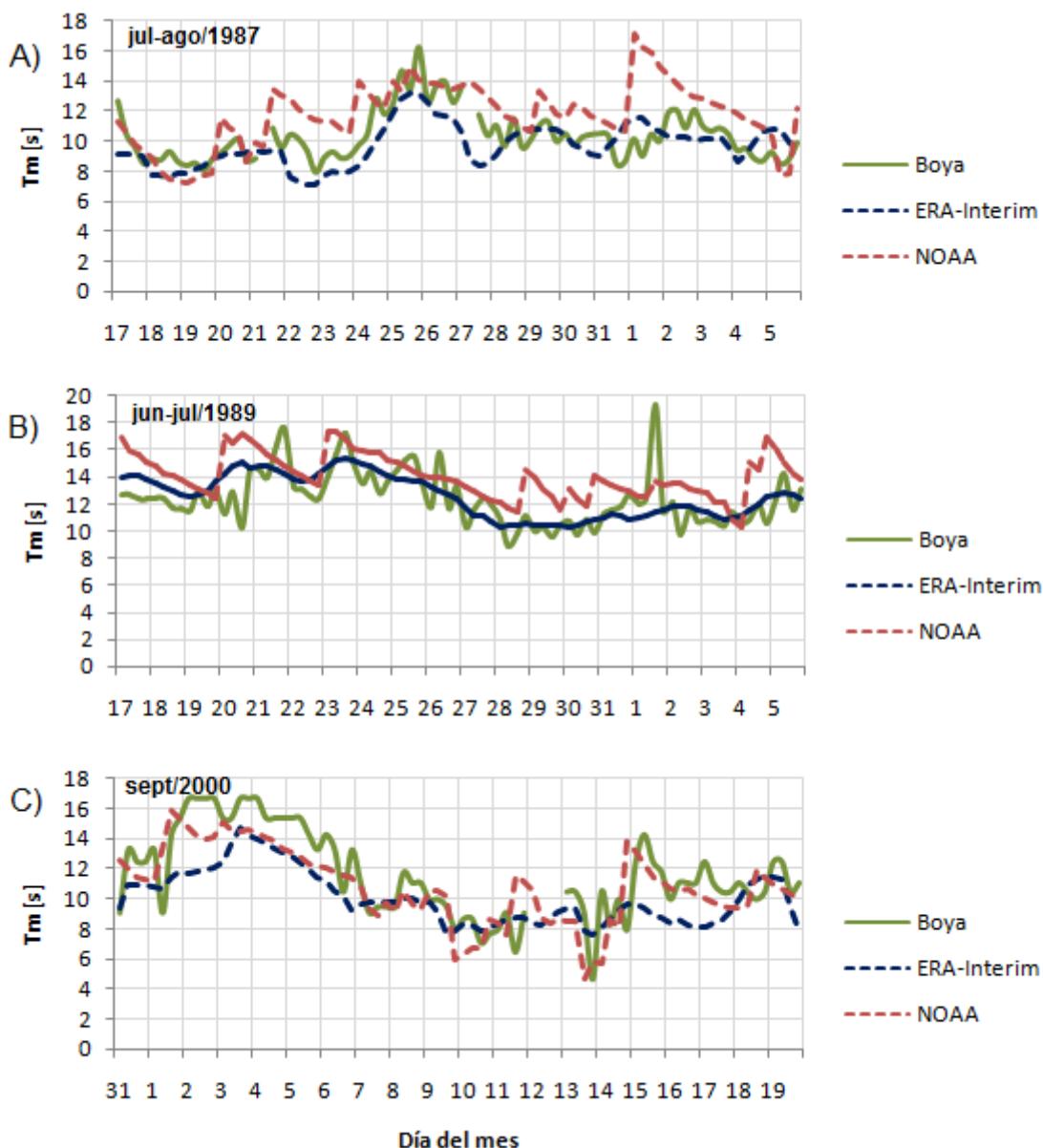


Figura 6-7: Series de tiempo de T_m de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) I región, 27/07/1987; B) XV región, 26 y 28/06/1989 y C) V región, 10/09/2000 (Fuente: Elaboración propia).

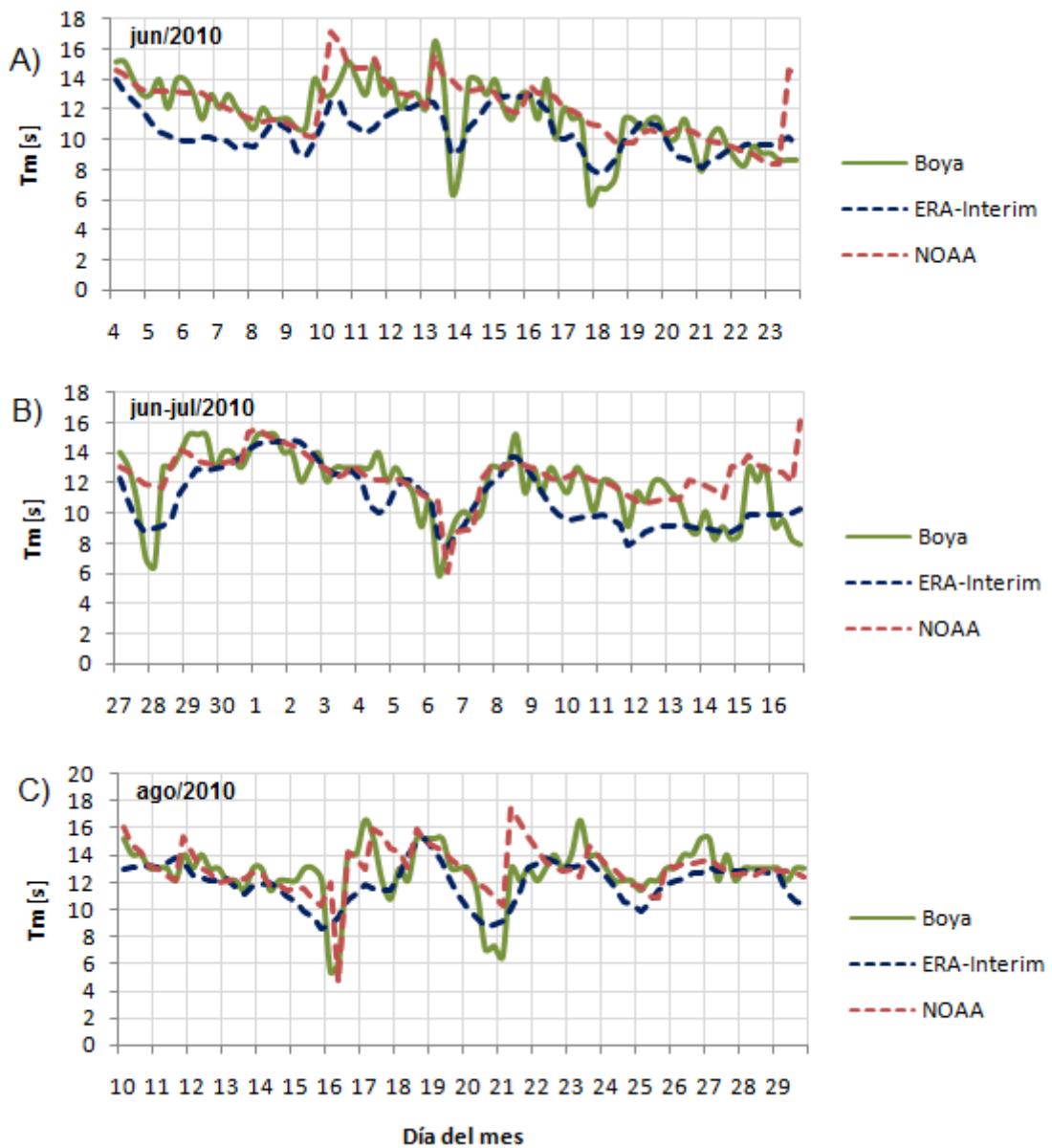


Figura 6-8: Series de tiempo de T_m de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 13 y 15/06/2010; B) 05/07/2010 y C) 19 y 24/08/2010, V región (Fuente: Elaboración propia).

En el evento de julio 2013 (Figura 6-9) se aprecia que las mediciones de boyas presentan valores inferiores a los modelos a lo largo de toda la serie, lo cual no se visualiza en los demás eventos analizados, ya que como se mencionó anteriormente el modelo ERA-Interim presenta tendencia a mantener valores inferiores de periodo medio en comparación a las mediciones de boyas y la base de datos NOAA.

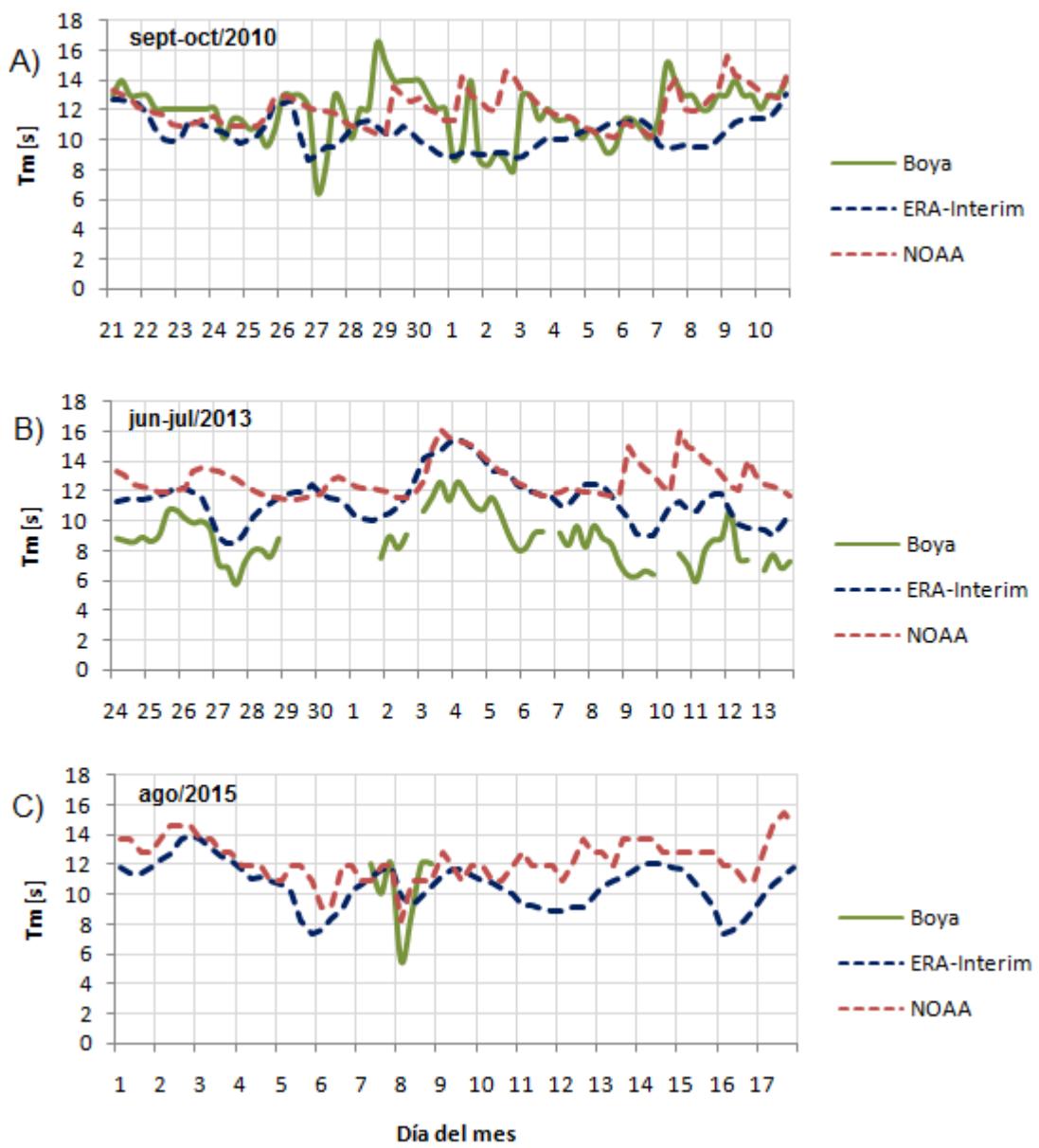


Figura 6-9: Series de tiempo de T_m de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 30/09/2010; B) 03 y 04/07/2013 y C) 08/08/2015, V región (Fuente: Elaboración propia).

Las mediciones de periodo en el evento de agosto 2015 (evento C, Figura 6-9) presentan una fuerte disminución a medida que se aproxima al máximo valor de H_s visualizado en la Figura 6-5. La base de datos NOAA es la que representa de mejor forma este descenso, indicando un valor mínimo cercano a 8 [s]. Aún así no alcanza el valor mínimo medido por la boyas, el cual es menor a 6 [s].

Las comparaciones para los valores de periodo no presentan correlaciones tan altas como lo obtenido para la altura significativa de oleaje. El mejor ajuste se obtiene con la base de datos NOAA, con un coeficiente de determinación inferior a 0,5 (Figura 6-10).

En el rango entre 8 y 9 [s] de T_m medido por las boyas, el modelo ERA presenta una línea de tendencia superior a la base de datos NOAA. Esta última, luego de los 10 [s], muestra una tendencia a mantener valores superiores.

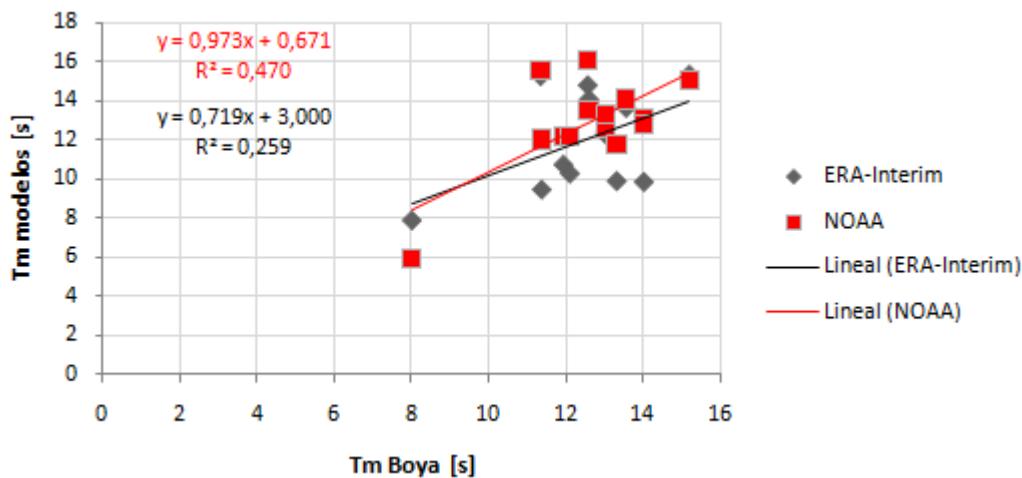


Figura 6-10: Comparación T_m entre boyas y modelos de oleaje (Fuente: Elaboración propia).

Los cálculos de intervalos de confianza (Tabla 6-3) indican un error medio de -0,34 [s] con la base de datos NOAA, lo cual comprueba que este modelo presenta valores de periodo medio superiores al sistema de medición. Adicionalmente, la banda de confianza obtenida para el modelo NOAA es inferior a los 4 [s].

Tabla 6-3: Error medio (medición-modelo) y banda de confianza T_m entre modelos de oleaje y mediciones.

Error medio T_m [s] \pm Banda de confianza [s]	
ERA-Interim	0,52 \pm 4,14
NOAA	-0,34 \pm 3,43

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 DIRECCIÓN

Como se puede apreciar en las series de tiempo de direcciones de eventos de marejadas (Figuras 6-11, 6-12 y 6-13), para las mediciones de boyas se presentan casos con información de dirección media (D_m) y otros casos con dirección *peak* (D_p), esto se debe principalmente a la disponibilidad de información. Para las base de datos NOAA y ERA-Interim se cuenta con D_p y D_m respectivamente en todas las series que se exponen.

Para los eventos de julio 1987 (I región) y junio 1989 (XV región) no se dispone con información de las direcciones de oleaje medido por boyas, por lo tanto las series de tiempo de marejadas elaboradas corresponden a los eventos posteriores al año 2000.

Las series de tiempo permiten identificar aumentos notorios con máximos niveles de dirección en gran parte de los eventos analizados. Estos niveles máximos están asociados a intervalos de tiempo en los cuales las condiciones de oleaje que arriban a las costas de Chile se presentan con direcciones más cercanas al Norte. Como se podrá ver en los análisis de las secciones 6.3.1 y 6.3.2, oleaje con dirección más al Norte presenta una tendencia a generar daños o impactos importantes en las costas chilenas. Esto se debe a la exposición geográfica que presenta la costa chilena desde la dirección mencionada.

Las comparaciones muestran que, en general, las mediciones de boyas presentan mayores valores de dirección en comparación a los modelos de oleaje considerados. El modelo NOAA indica los menores valores de dirección, específicamente en los eventos B) de Figura 6-11 y 6-12 y evento A) de Figura 6-13, en los cuales el modelo mencionado no representa los cambios que se producen en las mediciones de boyas, manteniendo una serie de datos que no presenta aumentos o descensos significativos.

El evento de junio 2010 (Figura 6-11) presenta valores máximos antes, durante y después del día en el cual se encontraron registros de daños. Para el evento mencionado se identificaron cierres de puerto los días 13 y 15 de junio.

Los eventos de la Figura 6-12 presentan valores máximos de dirección el día 16, pero los registros de daños fueron encontrados para los días 19, 21 y 24 con sobrepaso en estructuras de protección, una persona fallecida y cierres de puertos.

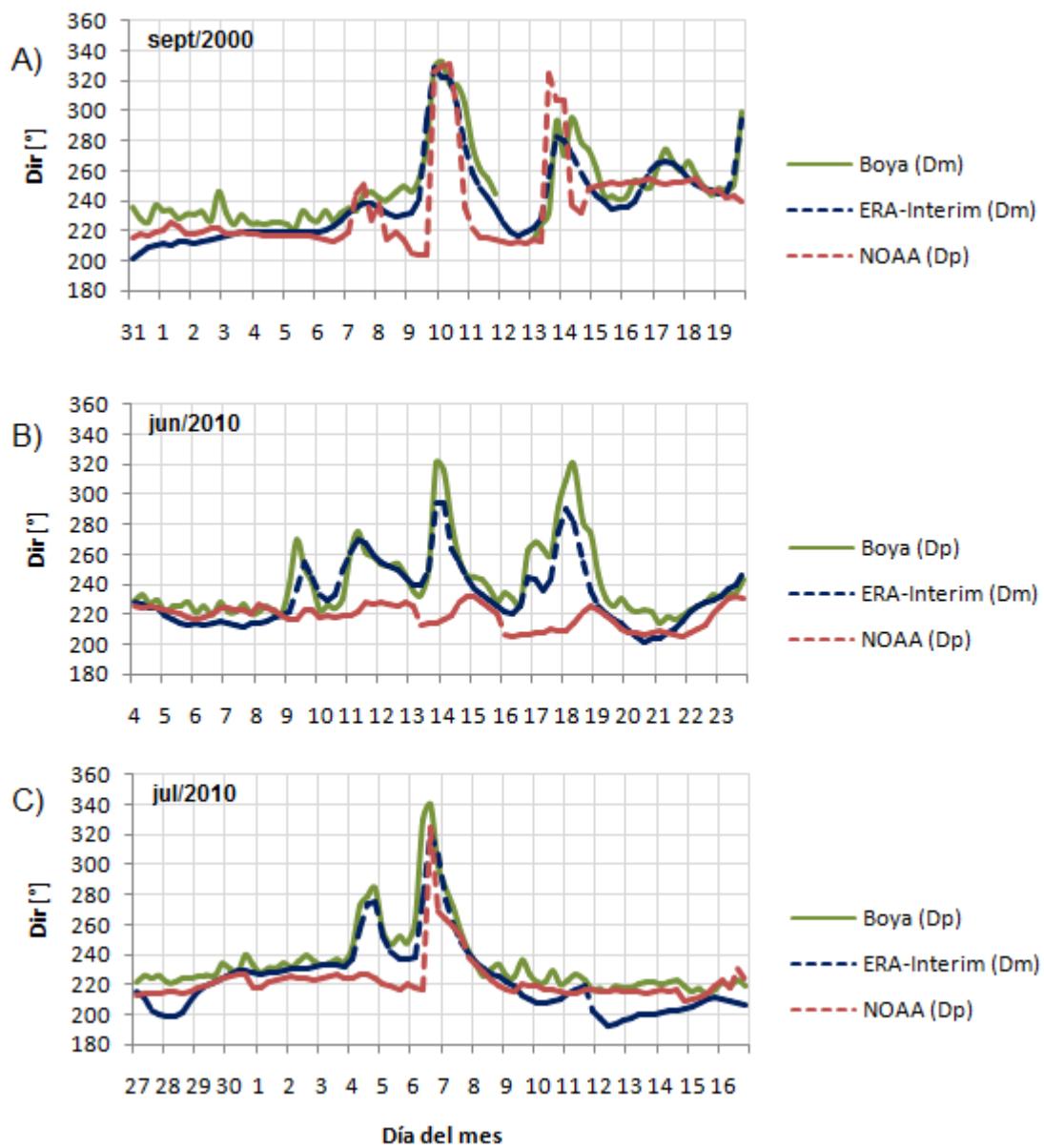


Figura 6-11: Series de tiempo de dirección de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 10/09/2000; B) 13 y 15/06/2010 y C) 05/07/2010, V región (Fuente: Elaboración propia).

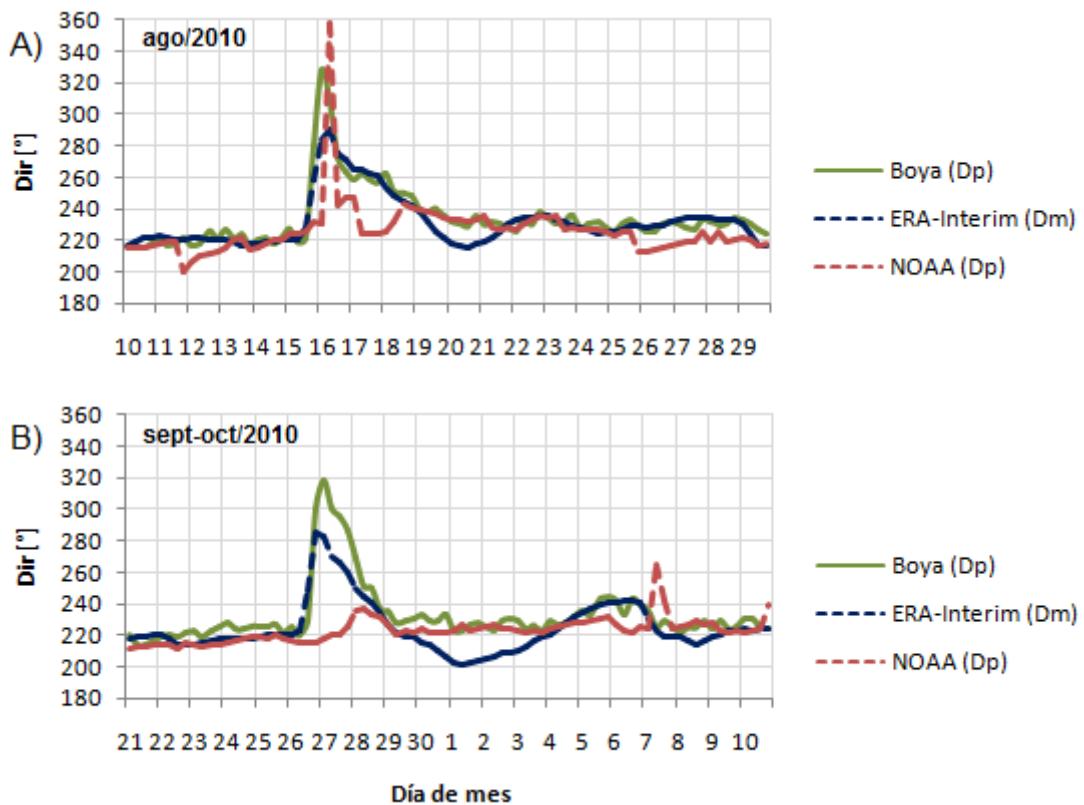


Figura 6-12: Series de tiempo de dirección de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 19 y 24/08/2010 y B) 30/09/2010, V región (Fuente: Elaboración propia).

Los días 27 de junio y 09 de julio, días previos y posteriores al evento del 03 de julio del 2013 (Figura 6-13), presentan aumentos en los valores de dirección en las mediciones de boyas y el modelo ERA-Interim, mientras el modelo NOAA no representa estos cambios significativos. En los días mencionados no se encontraron registros de daños.

Debido a la fuente de información de la base de datos NOAA-WAVEWATCH III para el evento de agosto 2015, se aprecia un comportamiento escalonado de la serie de datos. Para este evento se aprecian niveles máximos de dirección los días 6 y 8, en los cuales se produjeron severos daños a infraestructura pública y privada en la V región. En las secciones 6.3.1 y 6.4 se describen en detalle los daños generados en este evento.

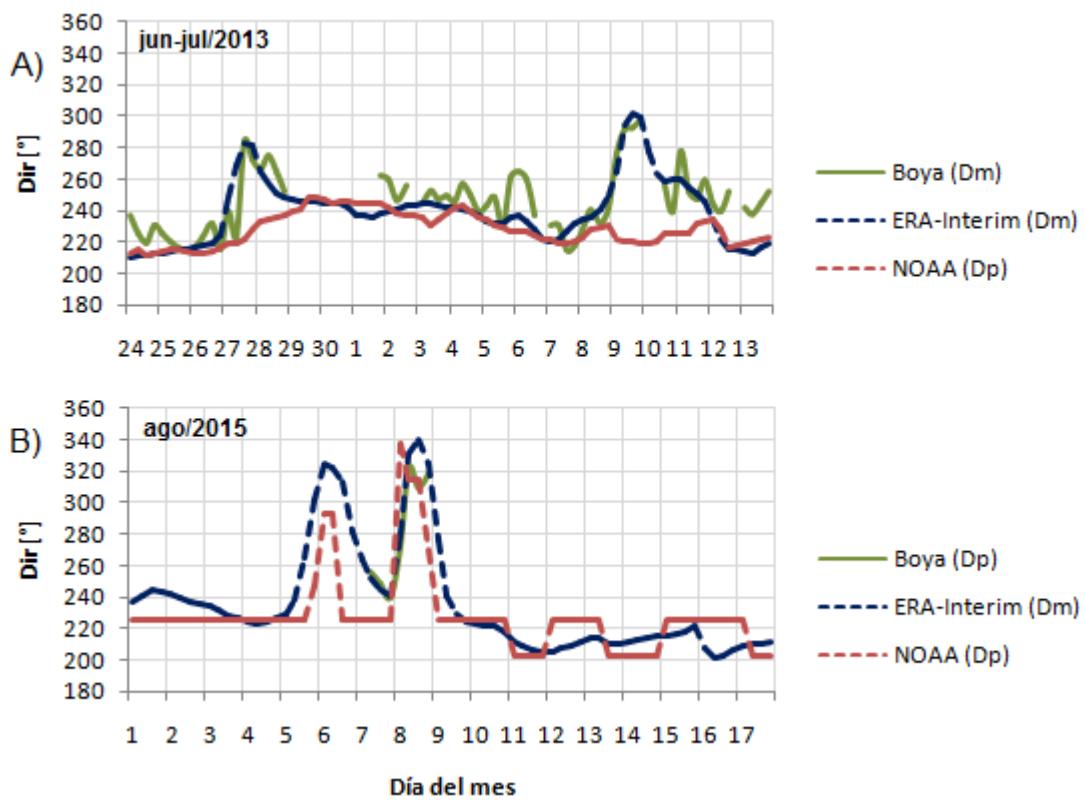


Figura 6-13: Series de tiempo de dirección de marejadas con modelos de oleaje y boyas SHOA. A) 03 y 04/07/2013 y B) 08/08/2015, V región (Fuente: Elaboración propia).

En la Tabla 6-4 se exponen los intervalos de confianza elaborados para las direcciones. El menor error medio se obtiene con la base de datos ERA-Interim, con un valor inferior a 4 [°] y una banda de confianza cercana a 24 [°].

Tabla 6-4: Error medio (medición-modelo) y banda de confianza D_m entre modelos de oleaje y mediciones.

	Error medio D_m [°] \pm Banda de confianza [°]
ERA-Interim	$3,37 \pm 24,35$
NOAA	$11,82 \pm 34,33$

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-14 se aprecia que la base de datos ERA-Interim presenta una línea de tendencia superior al modelo NOAA. Adicionalmente, con el modelo ERA se obtiene el mejor ajuste de dirección de oleaje, con un coeficiente de determinación superior a 0,9.

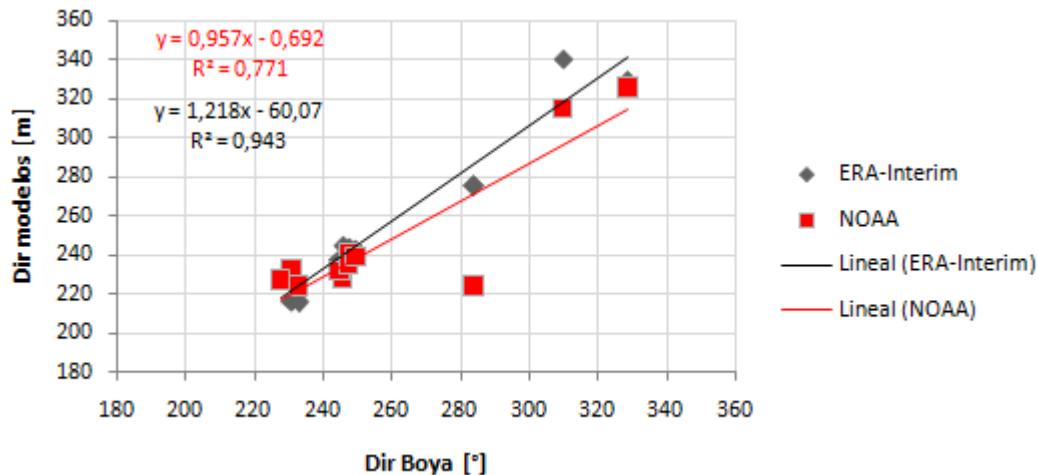


Figura 6-14: Comparación D_m entre boyas y modelos de oleaje (Fuente: Elaboración propia).

Con los resultados de comparaciones antes expuestos y dada la importancia que tienen la altura y dirección de oleaje en el diseño de obras marítimas, se procede a utilizar la base de datos ERA-Interim para realizar los análisis de condiciones de oleaje en los eventos de marejadas identificados, los cuales se presentan a continuación.

6.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PARÁMETROS DE OLEAJE DE MAREJADAS

En la Tabla 6-5 se exponen los resultados para valores promedios, máximos y mínimos de los parámetros de oleaje y potencia de las marejadas que producen daños para cada una de las regiones en estudio. Cabe destacar que los valores máximos y mínimos de H_s no son asociados a los máximos y mínimos de T_m .

Los valores más altos de H_s se alcanzan en las zonas centro y sur del país, específicamente en las regiones V, VIII, IX y XIV, presentándose el mayor promedio en la IX región con 4,79 [m] de altura significativa. Para estas regiones, los máximos valores del parámetro mencionado se alcanzan para los eventos de agosto 2015 (regiones IV y V), mayo de 2013 (IX región) y junio de 1994 (XIV región).

En la zona centro-sur del país (regiones IV a XIV), las marejadas con daños alcanzan T_m máximos en un rango mayor al sector norte (regiones XV, I, II y III). Para la primera zona mencionada, estos eventos se presentan para direcciones menos frecuentes en comparación a las condiciones de oleaje reinante en Chile, alcanzando la dirección NNW.

Al analizar las regiones que han presentado los mayores valores de potencia en un evento de marejada, no hay total coincidencia con las zonas de máximos H_s , lo cual deja en evidencia la importancia de cuantificar este parámetro. En este caso, los valores más elevados se presentan en las regiones VII, VIII, IX (julio 2013) y XIV (junio 1994). Al igual que con altura significativa, el mayor promedio de potencia se obtiene en la IX región con 177 [kW/m].

Tabla 6-5: Promedio y rango máximo y mínimo de H_s , T_m , D_m y Potencia de marejadas que produjeron daños por región (de norte a sur).

Región	H_s [m]	T_m [s]	D_m [°]	Potencia [kW/m]
	Media (Máx. – Mín)			
XV	2,91 (3,82 – 1,90)	13,6 (16,6 – 10,7)	221 (229 – 213)	71 (139 – 23)
I	2,71 (3,49 – 1,56)	13,5 (16,4 – 10,7)	224 (243 – 212)	61 (113 – 15)
II	2,98 (4,27 – 1,97)	13,0 (16,3 – 9,5)	225 (261 – 213)	71 (171 – 25)
III	3,06 (4,26 – 1,92)	12,0 (15,7 – 9,1)	244 (281 – 227)	74 (138 – 24)
IV	3,30 (5,37 – 1,86)	11,2 (15,9 – 8,6)	244 (317 – 205)	76 (195 – 22)
V	3,41 (6,34 – 1,64)	10,9 (15,3 – 7,6)	262 (343 – 200)	79 (232 – 17)
VI	3,30 (5,11 – 2,45)	11,1 (12,3 – 9,8)	235 (255 – 218)	79 (182 – 35)
VII	3,90 (5,30 – 2,04)	11,8 (15,8 – 9,2)	262 (323 – 231)	110 (244 – 25)
VIII	3,99 (5,68 – 2,45)	10,9 (15,7 – 7,5)	273 (345 – 207)	107 (246 – 35)
IX	4,79 (6,24 – 3,35)	12,8 (15,6 – 10,5)	248 (272 – 213)	177 (305 – 83)
XIV	4,22 (7,77 – 2,10)	10,5 (13,9 – 8,3)	269 (338 – 215)	121 (423 – 22)

Fuente: Adaptado de Campos **et al.**, 2015.

A pesar de identificar que los valores máximos de altura significativa y potencia han ocurrido en diferentes regiones del país, para establecer los eventos y zonas que han presentado los mayores niveles de daños en eventos de marejadas, es necesario incluir el parámetro de dirección de oleaje. Para esto, en las secciones a continuación, se analizan las condiciones de oleaje bajo las cuales se han generado los diferentes tipos de daños o impactos a lo largo de la zona de estudio.

6.3.1 CONDICIONES DE OLEAJE POR TIPO DE DAÑOS Y/O IMPACTOS

Los análisis de las condiciones de oleaje bajo los cuales se presentan los diferentes tipos de daños e impactos se han llevado a cabo separando la extensión territorial del estudio en tres zonas diferentes: norte (regiones XV, I, II y III), centro (regiones IV, V, VI, y VII) y sur (regiones VIII, IX y XIV). Los valores promedio de parámetros de oleaje y potencia por tipo de daño se exponen en la Tabla 6-6.

Para los análisis que se presentan, los tipos de daños han sido separados en las siguientes categorías:

Daños estructurales: Sobre pasos, daños a infraestructura costera y daños a locales comerciales y viviendas.

Impactos: Cierres de puertos, daños a embarcaciones, daños a integridad física humana y otro tipo de daños.

Los tipos de daños que se presentan para mayores valores de H_s y potencia corresponden a los relacionados con la interacción de las marejadas con obras en el borde costero, específicamente daño a infraestructura costera y daño a locales comerciales o viviendas.

Por otra parte, para menores valores de altura significativa y potencia se presentan daños a la integridad física humana y otro tipo de daños. Para este último caso, se incluyen efectos como evacuación de viviendas, erosión de playas, impedimento de atraque de buques, impedimento de búsqueda de personas afectadas y comunidades aisladas.

Como se mencionó en la sección 5.3, el daño a integridad física humana está condicionado por la decisión de las personas a arriesgarse frente a las condiciones adversas de oleaje. Debido a esto, se han considerado los cierres de puertos dentro de los impactos que se producen para valores inferiores de H_s y potencia, principalmente para las zonas norte y centro. Asimismo, como se podrá ver en secciones posteriores, corresponde al tipo de impacto que ocurre con mayor frecuencia debido a que se presenta para condiciones de oleaje menos extremas.

A continuación, se exponen rosas de oleaje para cada una de las zonas mencionadas con el fin de relacionar la altura significativa de oleaje y potencia con los rangos de direcciones que presentan daños, con lo cual se puede apreciar que la dirección tiene una influencia importante en la generación de daños, específicamente para el oleaje proveniente del cuarto cuadrante con baja altura significativa. Se ha considerado una escala variable con el fin de visualizar de mejor forma los resultados para cada una de las zonas en estudio.

Tabla 6-6: Promedio de H_s , T_m , D_m y Potencia por tipo de daño o impacto para zonas norte, centro y sur.

		Promedio				
		Tipo de daño o impacto	H_s [m]	T_m [s]	D_m [°]	P [kW/m]
Zona Norte (regiones XV, I, II y III)	Sobrepasos	3,44	14,4	223	101	
	Daño a infraestructura costera	3,70	14,7	227	118	
	Daño a locales comerciales o viviendas	3,08	14,7	232	84	
	Cierres de puertos	2,78	13,1	225	63	
	Daño a embarcaciones	3,04	12,9	230	73	
	Daño a integridad física humana	2,72	12,5	228	57	
	Otro tipo de daño	3,31	14,1	224	92	
Zona Centro (regiones IV, V, VI y VII)	Sobrepasos	3,97	11,9	264	115	
	Daño a infraestructura costera	3,74	11,4	256	102	
	Daño a locales comerciales o viviendas	4,33	12,6	257	145	
	Cierres de puertos	3,43	10,7	262	79	
	Daño a embarcaciones	3,73	10,5	277	88	
	Daño a integridad física humana	3,17	10,3	247	66	
	Otro tipo de daño	3,83	10,9	267	99	
Zona Sur (regiones VIII, IX y XIV)	Sobrepasos	4,04	11,9	252	120	
	Daño a infraestructura costera	4,60	12,4	255	152	
	Daño a locales comerciales o viviendas	5,10	12,8	263	195	
	Cierres de puertos	4,02	10,4	276	106	
	Daño a embarcaciones	4,45	10,4	286	128	
	Daño a integridad física humana	3,89	11,1	263	106	
	Otro tipo de daño	3,69	10,9	256	92	

Fuente: Elaboración propia.

Zona norte (regiones XV, I, II y III)

Todos los daños estructurales identificados se presentan para direcciones del tercer cuadrante, específicamente en un rango de direcciones medias entre 212° y 261° (Figura 6-15). La dirección máxima del intervalo mencionado, está ligada a un evento con altura significativa de 1,97 [m] ocurrido en enero del año 2006. Esto provocó principalmente daños a locales comerciales en la ciudad de Antofagasta²⁵. Para este evento, la base de datos NOAA indica 21,7 [s] de T_p y 303° de D_p , lo cual explicaría la ocurrencia de los daños mencionados debido al alto valor de periodo y la dirección de incidencia de oleaje desde el cuarto cuadrante, zona desde la cual la costa chilena se encuentra expuesta (análisis de influencia de dirección de oleaje en la ocurrencia de daños en sección 6.3.2)

Uno de los eventos con mayores daños registrados ocurrió en julio del año 2013. Para este episodio se presentaron sobrepasos con posterior suspensión de tránsito vehicular en costanera y daños de consideración en el molo de abrigo del puerto de Antofagasta²⁶ (ANFPORT, 2013). Los parámetros obtenidos de la base de datos ERA-Interim indican condiciones de oleaje de aguas profundas provenientes de dirección media 229° , con 4,28 [m] de H_s y 16,3 [s] de T_m , generando 171 [kW/m] de potencia.

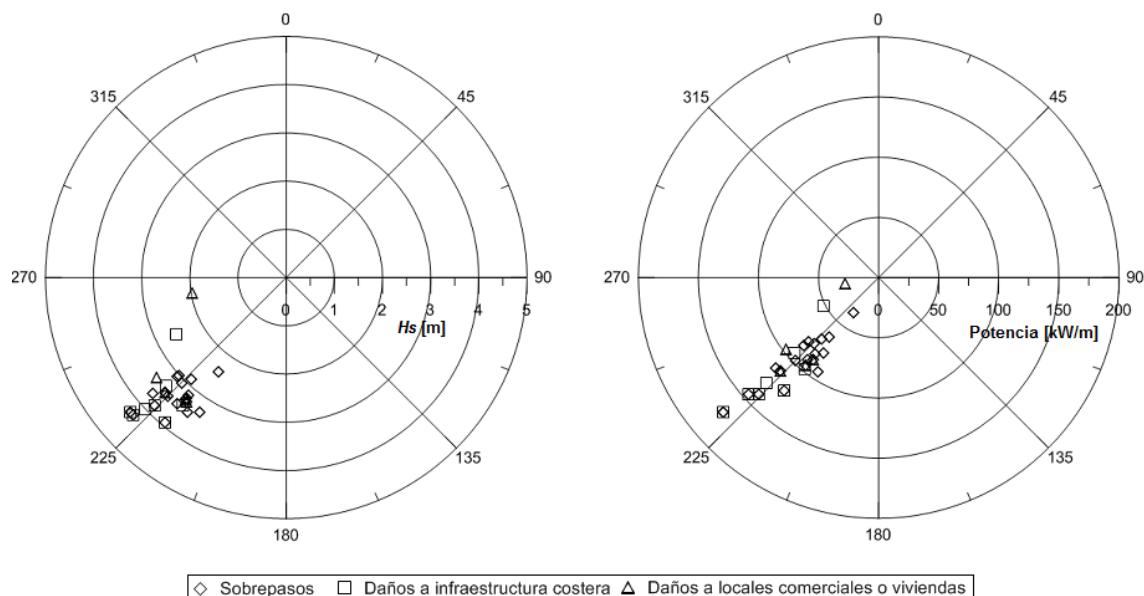


Figura 6-15: Rosas de oleaje de daños estructurales, zona norte (Fuente: Elaboración propia).

²⁵ El Mercurio *online*. Disponible en [\[http://www.emol.com/noticias/nacional/2006/01/03/206721/dos-victimas-dejan-fuertes-marejadas-en-litoral-norte-y-central.html\]](http://www.emol.com/noticias/nacional/2006/01/03/206721/dos-victimas-dejan-fuertes-marejadas-en-litoral-norte-y-central.html). Accesada 31 de diciembre de 2015.

²⁶ Radio Biobío *online*. Disponible en [\[http://www.biobiochile.cl/2013/07/04/transito-suspendido-inundaciones-y-cierre-de-puertos-provoca-fuerte-oleaje-en-el-norte-del-pais.shtml\]](http://www.biobiochile.cl/2013/07/04/transito-suspendido-inundaciones-y-cierre-de-puertos-provoca-fuerte-oleaje-en-el-norte-del-pais.shtml). Accesada 31 de diciembre de 2015.

Un evento con características similares en cuanto a parámetros de oleajes se presentó en agosto 2015. La diferencia entre este evento y el mencionado anteriormente para el año 2013, se encuentra en un menor valor de T_m para el del 2015, lo cual provoca una disminución en el valor de potencia. Para este último evento se generaron sobrepasos en Antofagasta y socavón en camino acceso a Taltal (SERNAGEOMIN, 2015).

Resultados similares a los mencionados para los daños estructurales se obtienen para la categoría de impactos (Figura 6-16). La principal diferencia se identifica en la dirección de la cual provienen los eventos, ya que para el caso de los impactos, estos comienzan a aproximarse a direcciones del cuarto cuadrante. En relación a esto, se logró identificar un evento que produjo gran daño a embarcaciones en Caldera, en agosto del año 1997. El reporte de prensa de la fecha describe que “cerca de una treintena de pequeñas y medianas embarcaciones resultaron varadas y destrozadas” (Chañarcillo, 18/08/1997). Dicho evento corresponde al proveniente desde la dirección media más cercana al Norte para esta zona (281°), con valores de 2,98 [m] de altura significativa, 9 [s] de periodo medio y 46 [kW/m] de potencia. Si bien, no corresponden a parámetros de oleaje considerados como extremos, la dirección de incidencia explicaría la cantidad de daño descrito.

El impacto más frecuente identificado corresponde a cierres de puertos, principalmente en las regiones XV, I y II, las cuales en comparación de la III región presentan un mayor desarrollo del sector costero. Además, se identifican impactos con altos valores de potencia los cuales están ligados a eventos que a su vez generaron daños estructurales.

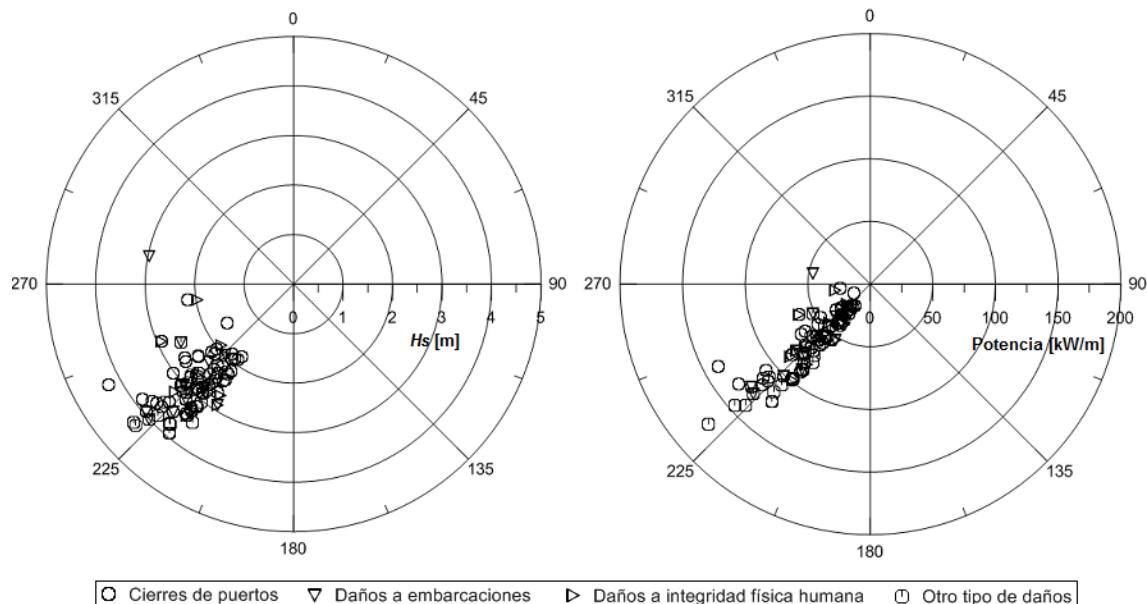


Figura 6-16: Rosas de oleaje de impactos, zona norte (Fuente: Elaboración propia).

Zona centro (regiones IV, V, VI y VII)

Se comienzan a distinguir diferencias para los daños a estructuras, principalmente en las direcciones desde las cuales inciden los eventos de marejadas. Como se puede apreciar en la Figura 6-17, se identificó una cantidad considerable de eventos con daños a infraestructura costera provenientes desde el cuarto cuadrante, alcanzando direcciones que se encuentran en un rango entre SSW y NNW.

El evento identificado que presentó la dirección más cercana al Norte generó diversos daños en Parque Juan de Saavedra de Valparaíso, en julio de 1987 (El Mercurio de Valparaíso, 12/07/1987). Los parámetros obtenidos indican condiciones de oleaje provenientes desde la dirección media 343°.

En agosto de 2015, la combinación de oleaje con 229 [kW/m] de potencia y D_m de 342° provocó severos daños a locales comerciales e infraestructura costera pública y privada en la región de Valparaíso (El Mercurio de Valparaíso, 09/08/2015). Este evento corresponde al más dañino y con mayor valor de altura significativa identificado para la zona central.

Se identificó un evento que provocó daño estructural con bajo valor de H_s y dirección SW en septiembre del año 2000. Los parámetros de oleaje para este evento son frecuentes en Chile, pero el daño mencionado se produjo debido al varamiento de una embarcación en la bahía, la cual destruyó el muelle de pescadores de Caleta Portales en Valparaíso²⁷.

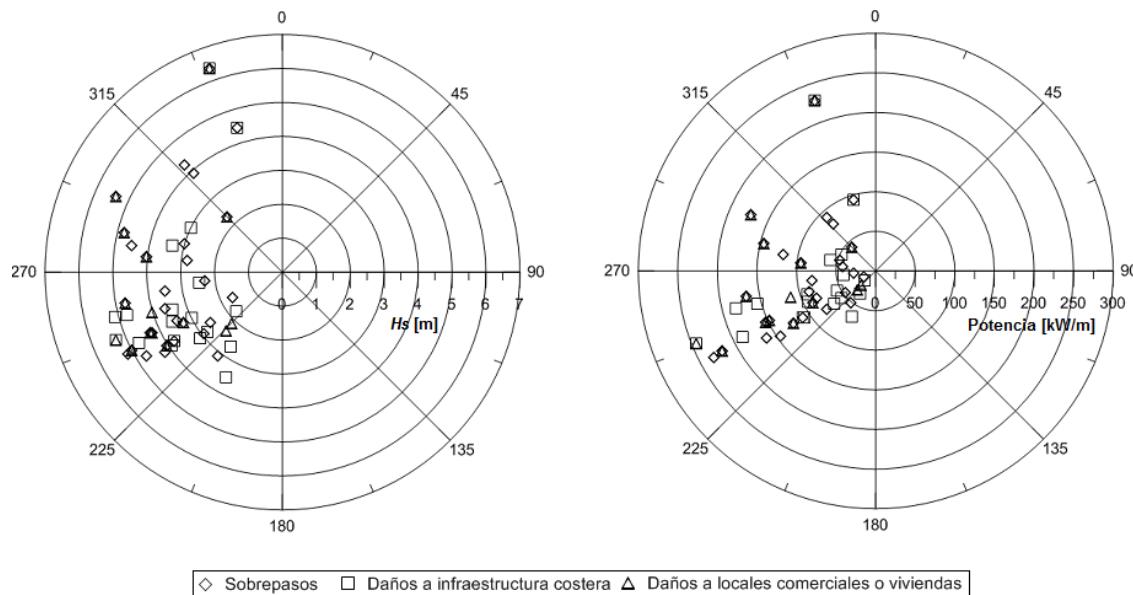


Figura 6-17: Rosa de oleaje de daños estructurales, zona centro (Fuente: Elaboración propia).

²⁷ El Mercurio de Valparaíso online. Disponible en [http://www.mercuriovalpo.cl/site/edic/20020603205825/pags/20020603235152.html]. Accesada 2 de enero de 2016.

El mayor valor de potencia se alcanza en la VII región para el evento de julio 2013, en el cual se produjeron daños de consideración en el muelle Maguellines (Constitución), daños a locales comerciales y familias anegadas por inundación de viviendas.

Al igual que en la zona Norte, el impacto más frecuente corresponde a cierres de puertos, los cuales se lograron identificar principalmente en las ciudades de Valparaíso, San Antonio y Quintero. Como se puede ver en la Figura 6-18, este tipo de efecto se presenta desde todas las direcciones desde las cuales se identificaron eventos y para diversos valores de H_s .

El tipo de impacto que se ha presentado para condiciones más extremas de oleaje corresponde a aquellos dentro del grupo de otro tipo de daños, específicamente calles anegadas, automóviles arrastrados y servicios de transporte urbano alcanzados por oleaje. Cabe destacar que estos daños generalmente ocurren en conjunto con algunos daños estructurales debido a condiciones de oleaje más adversas.

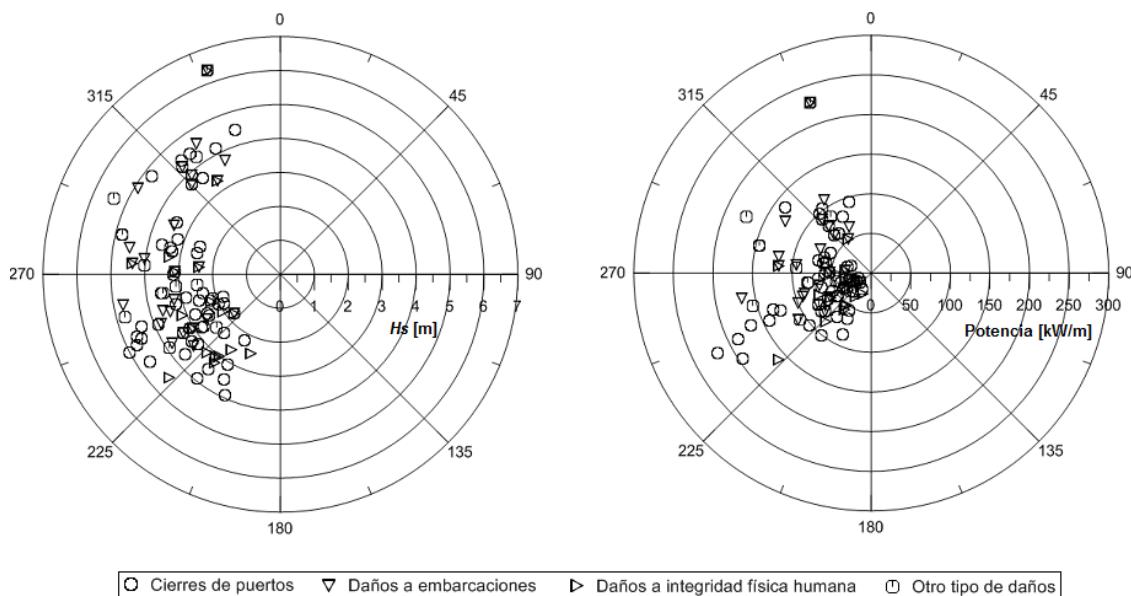


Figura 6-18: Rosas de oleaje de impactos, zona centro (Fuente: Elaboración propia).

Zona sur (regiones VIII, IX y XIV)

De forma similar a lo observado en la zona central, en el sector sur se identificaron eventos que se encuentran en el tercer y cuarto cuadrante, específicamente entre direcciones medias 213° y 338° . En la Figura 6-19 se aprecia que se encontró poca presencia de daños estructurales, los cuales se presentan principalmente entre las direcciones SW y W.

Para esta zona, entre todos los eventos de marejadas con daños identificados para el estudio, se encuentra el evento con mayor altura significativa y potencia. A pesar de poseer estas características, no produjo daño a infraestructura costera y sólo se identificó cierre de puerto de Corral (Diario Austral de Chile, 24/06/1997). La explicación se encontraría en que la dirección de incidencia corresponde a una de las más frecuentes en Chile. Además, la zona afectada se encuentra geográficamente abrigada para aquella dirección de incidencia y no existe presencia considerable de infraestructura costera expuesta a oleaje oceánico.

Se encontró un evento proveniente del cuarto cuadrante que se aprecia alejado de los demás, ubicándose en las cercanías de la dirección NNW con 62 [kW/m] de potencia, en el cual se produjo daño a viviendas en Penco (VIII región) en julio de 1996 (La Estrella de Concepción, 05/07/1996).

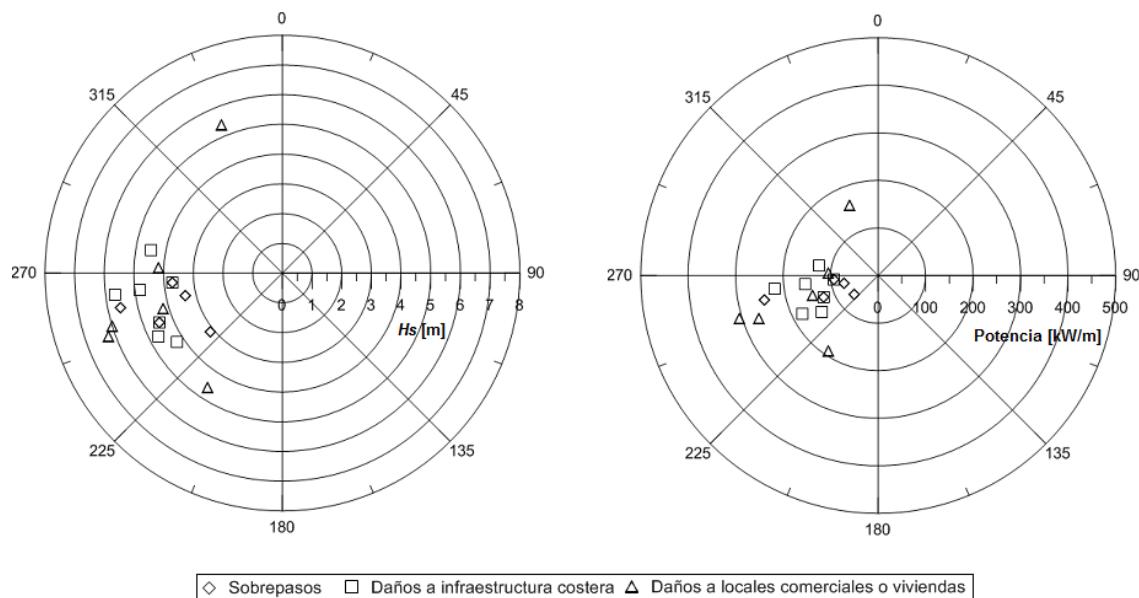


Figura 6-19: Rosas de oleaje de daño estructural, zona sur (Fuente: Elaboración propia).

Al contrario que los daños estructurales, en la Figura 6-20 se puede ver que se identificó una cantidad considerable de impactos provenientes desde el cuarto cuadrante. Gran parte de estos se encuentran concentrados en un rango de potencia entre 50 y 200 [kW/m], provenientes principalmente de direcciones medias entre 225° y 315°. En promedio, el impacto que se presenta para las condiciones más adversas de oleaje corresponde al daño a embarcaciones, lo cual ocurre con mayor frecuencia en la VIII región. El decreto de cierres de puerto fue el impacto que se detectó con mayor ocurrencia, en las instalaciones portuarias de Talcahuano, San Vicente y Corral.

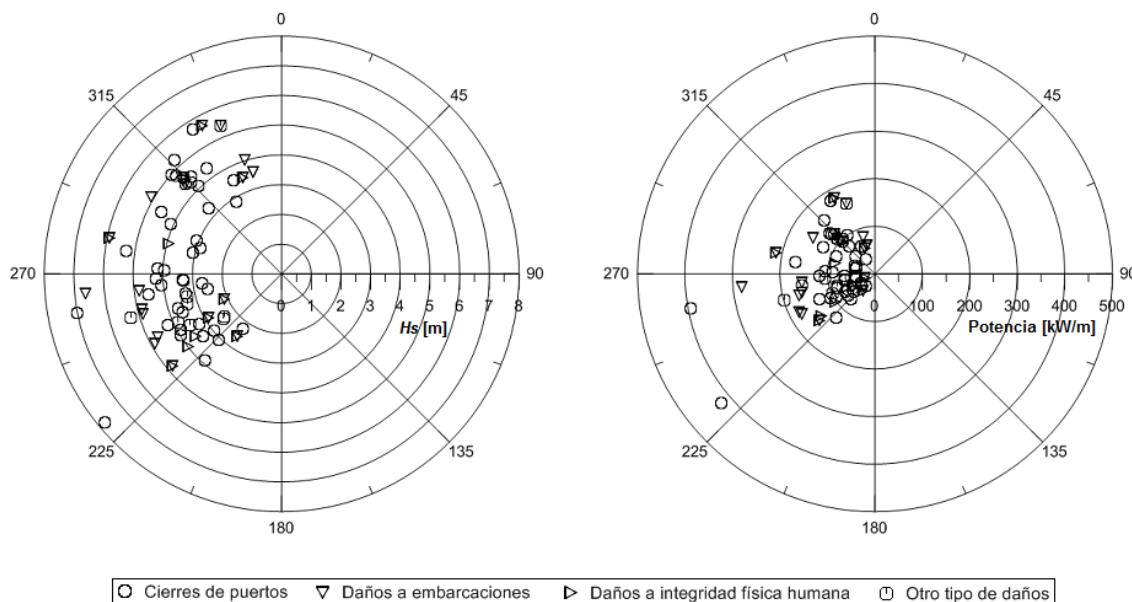


Figura 6-20: Rosas de oleaje de impactos, zona sur (Fuente: Elaboración propia).

En comparación con los demás sectores ya analizados, para la zona sur se aprecia que todos los tipos de impactos provienen de diferentes direcciones. Esto indica que no existe un patrón direccional para los tipos de daños considerados como impactos, los cuales se puede esperar que ocurran en el intervalo de direcciones medias ya mencionado.

6.3.2 ÍNDICE NORMALIZADO DE DAÑOS A INFRAESTRUCTURA COSTERA

Los valores de las alturas de ola con periodo de retorno de 50 años (H_{50}^*) calculadas por región y para cada sub-cardinal se exponen en la Tabla 6-7. Estos valores fueron utilizados para la normalización del parámetro de altura de oleaje (para definición de índices normalizados de daños y parámetros de oleaje revisar sección 5.3). Las regiones en las cuales no se presentan valores de H_{50}^* , se debe a que no se detectaron marejadas con daños y/o impactos provenientes de aquellas direcciones, por lo tanto no se calculó la altura de retorno de 50 años en esos sub-cardinales.

Tabla 6-7: Valores de H_{50}^* [m] por región y para cada sub-cardinal.

Región	180-225 [°]	225-270 [°]	270-315 [°]	315-360 [°]
XV	4,05	4,18	-	-
I	3,97	3,98	-	-
II	4,59	4,43	-	-
III	5,36	4,95	3,71	-
IV	5,70	5,25	4,07	-
V	5,56	5,65	5,25	5,14
VI	-	5,31	-	-
VII	-	5,87	5,90	6,20
VIII	5,98	6,60	6,45	7,10
IX	-	6,90	7,74	7,46
XIV	6,60	7,73	7,65	7,23

Fuente: Elaboración propia.

Para la relación H_s/H_{50}^* se obtiene que la mayor cantidad de daños ocurren en un intervalo entre 0,4 y 1, con un promedio de 0,65 (Figura 6-21). Los efectos de sobrepasos se encuentran para un valor mínimo de 0,27 en la relación y daño a locales comerciales o viviendas desde 0,41. Los daños a infraestructura costera se presentan para valores superiores a 0,5 indicando que este tipo de daño ocurre para mayores alturas de ola. Estos valores muestran que los efectos de las marejadas se pueden producir para condiciones bastante menos energéticas que las utilizadas típicamente para el diseño de estructuras costeras.

El máximo valor del índice normalizado se alcanza en el evento de agosto del 2015, es por esto que se aprecian los tres tipos de daño superpuestos y con valor unitario. Junto con esto, el valor de H_{50}^* es superado en este evento en las regiones II, IV y V.

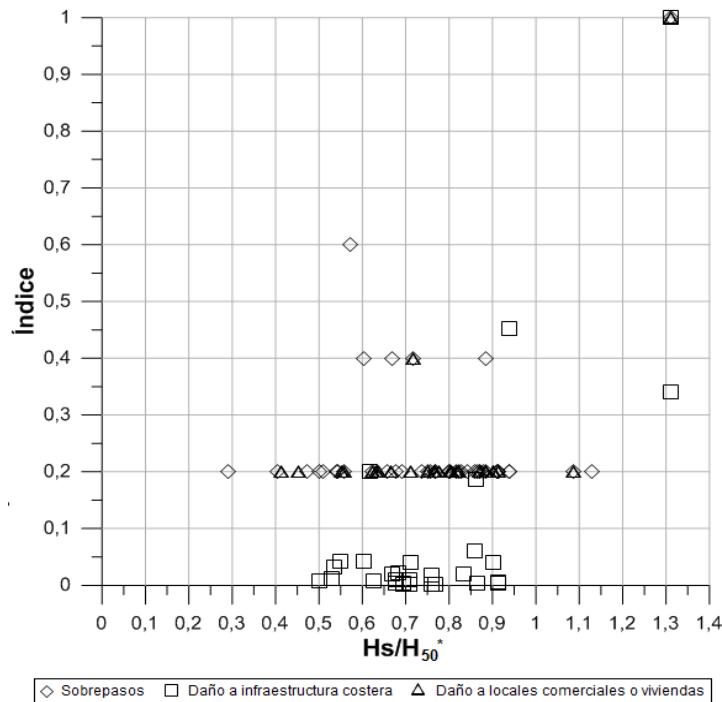


Figura 6-21: Relación H_s/H_{50}^* para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños (Fuente: Adaptado de Campos **et al.**, 2015).

En la Figura 6-22 se aprecia que la mayor cantidad de daños se producen para valores superiores a 2 en la relación $P_m/P_{promedio}$, con un promedio de 3,88. A pesar de esto, se encontraron registros de sobrepasos y daños a locales comerciales y viviendas producidos por condiciones de oleaje menos energético, los cuales poseen un valor inferior a 1 en la relación. Por otra parte, los mayores valores de este indicador se alcanzan en el evento de agosto 2015 en las regiones IV y V, alcanzando valores superiores a 10 veces la potencia promedio en las regiones mencionadas. El tipo de daño que alcanza el mayor promedio para $P_m/P_{promedio}$ corresponde al daño a locales comerciales y viviendas, con un valor promedio de 4,13 en la relación.

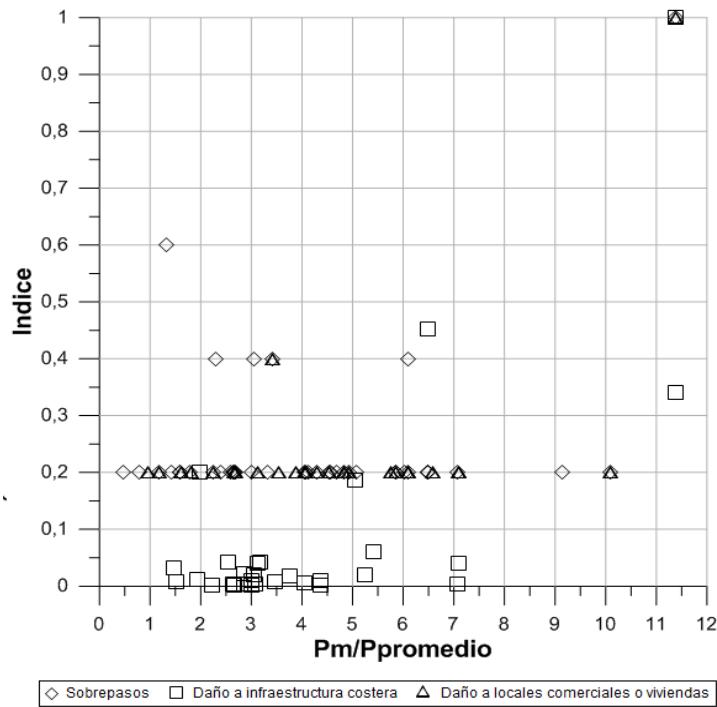


Figura 6-22: Relación $P_m/P_{promedio}$ para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños (Fuente: Adaptado de Campos *et al.*, 2015).

La relación elaborada para los períodos medios del oleaje (Figura 6-23) indica que gran parte de los daños se producen para condiciones con valores superiores al promedio de largo plazo de dicho parámetro para cada zona. A pesar de esto, para todos los tipos de daños existen casos con valores menores a 1 en la relación $T_m/T_{promedio}$, de los cuales sólo dos corresponden a daños a obras costeras.

A diferencia de las relaciones de altura y potencia, el evento con el mayor valor en el índice normalizado de daños para los períodos de oleaje se presenta en la IV región en julio 2013, con daño a obras marítimas.

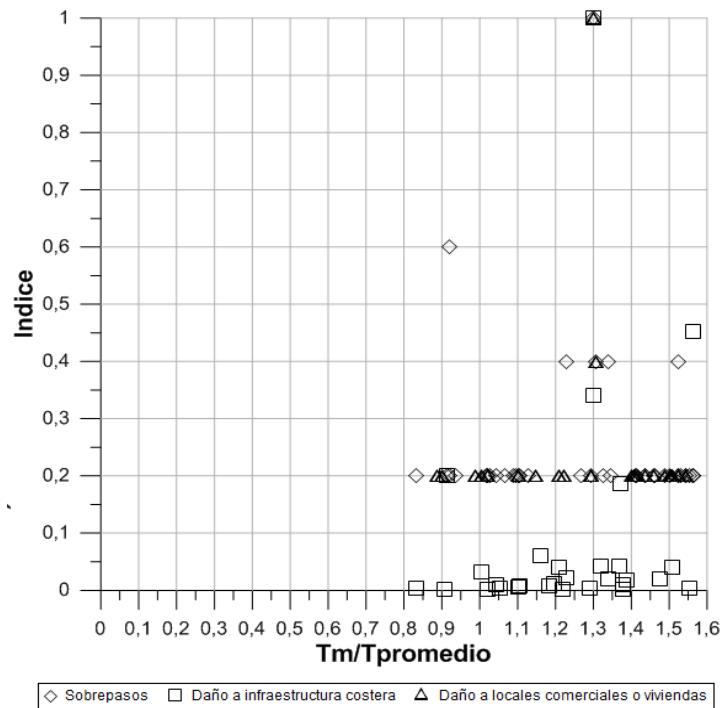


Figura 6-23: Relación $T_m/T_{promedio}$ para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños (Fuente: Adaptado de Campos **et al.**, 2015).

Como se pudo apreciar en la sección 6.3.1, existen diversos casos en los cuales oleaje más cercano al Norte produce daños sin presentar grandes valores de altura de ola. En la Figura 6-24 se aprecia que gran parte de los daños se ubican para valores superiores a 0 en la relación $D_m/D_{promedio}$, lo cual indica que gran parte de los daños se producen para condiciones de oleaje con valores más cercanos al Norte.

La influencia de la dirección del oleaje sobre los daños y/o impactos de las marejadas se debe a que las obras marítimas que se encuentran abrigadas para la dirección reinante están generalmente diseñadas para niveles energéticos menores que las estructuras expuestas al oleaje más frecuente. Un claro ejemplo de esto es la ubicación de algunos de los recintos portuarios del país, los cuales se encuentran orientados hacia el Norte quedando abrigados del mar de viento y fondo del sur pero expuestos al oleaje del norte (Scott **et al.**, 2002).

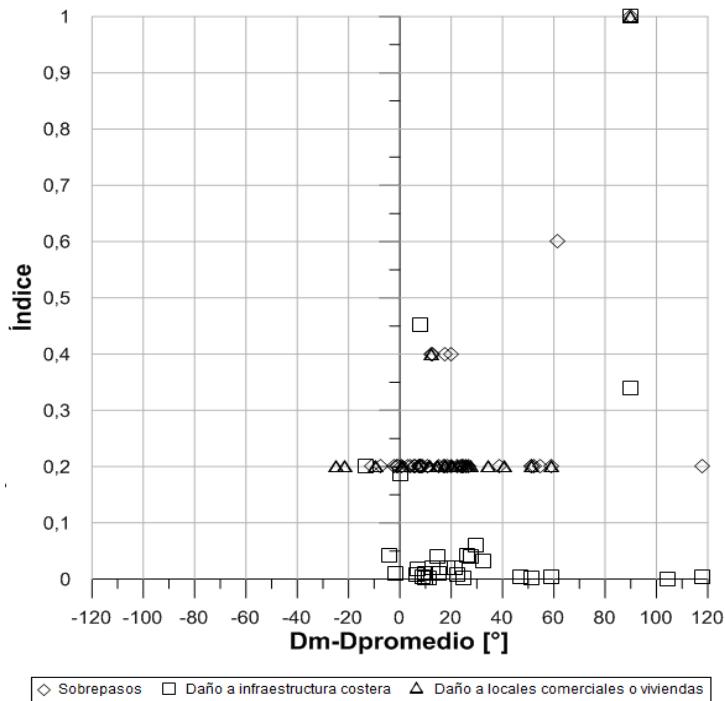


Figura 6-24: Relación D_m/D_{promedio} para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños (Fuente: Adaptado de Campos *et al.*, 2015).

Los resultados de índice normalizado de daños y de parámetros de oleaje indican que en presencia de condiciones de oleaje con direcciones superiores a la dirección media en las zonas estudio, es probable que se presenten sobrepasos de estructuras de protección, daños a la infraestructura costera y/o daño a locales comerciales y viviendas, incluso cuando las alturas de ola no sean excepcionales o con valores inferiores a la altura de retorno de 50 años.

6.4 CATASTRO DE DAÑOS E IMPACTOS

La mayor cantidad de daños e impactos por marejadas se encontraron en las regiones V y VIII. Estas zonas se encuentran dentro de las principales áreas metropolitanas de Chile (INE, 2014), lo cual se relaciona directamente con una mayor cantidad de habitantes y un mayor desarrollo de infraestructura, la que en el caso de sectores costeros corresponde a una mayor inversión en obras marítimas y portuarias. En la Tabla 6-8 se muestra la información para las zonas metropolitanas del país.

Tabla 6-8: Principales áreas metropolitanas de Chile.

Denominación	Región	Habitantes [miles de personas]	Superficie [km ²] ²⁸	Densidad [Hab/km ²]
Gran Santiago	R. Metropolitana	7.228,6	15.403,2	469,3
Gran Concepción	VIII región	2.100, 5	37.068,7	56,7
Gran Valparaíso	V región	1.808,3	16.396,1	110,3

Fuente: INE, 2014.

Junto con las regiones mencionadas, dentro de las principales ciudades costeras de Chile se encuentran Antofagasta y La Serena (Tabla 6-9). En todos estos sectores se logró identificar una cantidad importante de eventos de marejadas, lo cual deja en evidencia la relación que existe entre el desarrollo del borde costero y el registro de daños encontrados.

Tabla 6-9: Principales ciudades costeras de Chile en estudio. Proyecciones basadas en población de CENSO 2002.

Ciudad	Cantidad de habitantes
Arica	157.568
Iquique	181.773
Antofagasta	390.832
Copiapó	202.749
La Serena	209.651
Coquimbo	106.492
Viña del Mar	288.329
Valparaíso	249.897
Talcahuano	113.181
Valdivia	138.970

Fuente: Adaptado de Undata con información de UNSD Demographic Statistics y United Nations Statistics Division²⁸.

²⁸ Disponible en [\[http://data.un.org\]](http://data.un.org). Accesada 31 de diciembre de 2015.

En la Tabla 6-10 se expone la cantidad de registros encontrados por cada uno de los tipos de daños e impactos analizados en las regiones consideradas en el estudio. Como se mencionó anteriormente, en las regiones V y VIII se identificó la mayor cantidad de registro daños. Por otra parte, las regiones VI y IX corresponden a los sectores en los cuales se encontró la menor cantidad de daños registrados por eventos de marejadas. Esto se debe principalmente a una menor presencia de infraestructura costera expuesta a oleaje oceánico en estos lugares.

Tabla 6-10: Cantidad total de tipos de daños o impactos identificados por región. Valores indican cantidad de veces que se identificaron los tipos de daños e impactos.

Región	Sobrepaso [cantidad]	Daño a infraestructura costera [cantidad]	Daño a locales comerciales y viviendas [veces]	Cierres de puertos [veces]	Daño a embarcaciones [cantidad]	Daño a integridad física humana [cantidad]	Otro tipo de daños [veces]
XV	8	2	1	15	38	0	8
I	8	2	2	18	13	3	6
II	12	12	2	23	20	14	9
III	0	4	0	5	42	8	1
IV	6	5	7	17	82	8	4
V	43	24	17	35	291	99	25
VI	1	1	0	0	0	1	1
VII	3	3	4	6	5	7	2
VIII	6	13	9	22	98	37	8
IX	0	0	4	1	1	0	3
XIV	1	3	0	21	10	31	3

Fuente: Elaboración propia.

Un episodio reciente con grandes perjuicios se presentó en agosto del año 2015, el cual afectó las zonas costeras desde la región del Biobío hasta la región de Coquimbo, presentando los mayores impactos en la región de Valparaíso (Figura 6-25). Alturas de ola de hasta 10 [m] provocaron diversos daños, incluyendo inundación de viviendas, personas fallecidas, suspensión de operaciones portuarias, daños a infraestructura pública y privada, entre otros²⁹. Este evento también fue analizado por Winckler **et al.**, 2015, describiendo los tipos de daños en diversos punto de la V región.



Figura 6-25: Daños marejada 08 de agosto de 2015. (A) Valparaíso: Daños sector Caleta Portales, (B) Viña del Mar: Marejada azotando sector Faro Punta Condell y daños en vía férrea, (C) Viña del Mar: Sobrepuerto y daños restaurante Tierra de Fuego, sector Playa Acapulco y (D) Concón: Daños obras de protección club de Yates de Higuerillas, 08 de agosto de 2015 (Fuente: Campos **et al.**, 2015)

Con daños de características similares, en julio del año 2013, se vieron afectadas las zonas costeras desde la región de Aysén hasta la región de Arica y Parinacota, llegando incluso hasta el límite con Perú³⁰. Las alturas de ola registradas fueron entre 4 y 8 [m], provocando los daños que se exponen en la Figura 6-26.

²⁹Diario La Tercera *online*. Disponible en [<http://www.latercera.com/noticia/deportes/polideportes/2015/08/732-642225-9-la-fuerza-del-mar-vence-a-los-surfistas-en-arica.shtml>]. Accesada 30 de diciembre de 2015.

³⁰Diario La Tercera *online*. Disponible en [<http://www.latercera.com/noticia/nacional/2013/07/680-531531-9-marejadas-afectan-con-fuerza-a-siete-regiones-del-pais-y-continuaran-hasta-el.shtml>]. Accesada 30 de diciembre de 2015.



Figura 6-26: Daños marejada 03 de julio de 2013. A) Iquique: Inundación Av. Arturo Prat en cercanías al museo Corbeta Esmeralda, B) Antofagasta: Daños molo de abrigo, C) Reñaca: Inundación Av. Borgoño y D) Maguillines: Muelle Maguillines azotado por marejadas, 3 y 4 de julio de 2013 (Fuente: www.peru21.pe, 04/07/2013, [El Mercurio de Antofagasta](http://www.elmercurio.cl), 16/07/2013, www.latercera.com, 04/07/2013 y storify.com, 04/07/2013 respectivamente).

A continuación, se describe con mayor detalle lo encontrado para cada uno de los tipos de daños e impactos en estudio, en base a lo expuesto en la Tabla 6-10.

6.4.1 SOBREPASOS

La mayor cantidad de daños por sobrepasos se obtuvo para la V región, le siguen en una menor cantidad las regiones XV, I y II. En las regiones III y IX no se encontraron registros de sobrepasos y en las regiones VI y XIV sólo un caso en cada una de ellas.

Este tipo de efecto se produce principalmente sobre muros de contención en costaneras y obras de abrigo de instalaciones portuarias. Dependiendo de las condiciones de oleaje, los sobrepasos pueden tener consecuencias como cortes de tránsito en caminos costeros, dañar diversos tipos de obras civiles que se encuentran en la parte posterior de las protecciones o generar inundaciones en calles, locales comerciales y viviendas. Específicamente para la región de Valparaíso, gran parte de los sobrepasos fueron identificados en paseos costeros de Viña del Mar y en menor cantidad en las instalaciones del puerto de Valparaíso.

6.4.2 DAÑO A INFRAESTRUCTURA COSTERA

La recopilación de información sobre los costos estimados para la reposición de las obras costeras dañadas expuesta en las Tablas 6-11, 6-12 y 6-13 permite establecer que la V región presenta el mayor costo asociado a reparación de infraestructura, principalmente en infraestructura de paseos costeros en Viña del Mar y Reñaca junto con obras portuarias en Valparaíso. El 8 de agosto del 2015, se produjeron grandes daños en diferentes puntos a lo largo de la zona costera entre Valparaíso y Concón. Los costos para reparar todos los perjuicios fueron declarados con un valor aproximado de 5.000 millones en el sector público y 1.830 millones de pesos en sector privado (El Mercurio de Valparaíso, 12/08/2015), haciendo de este el caso de daño a infraestructura costera con el mayor impacto económico dentro de los eventos identificados, el que presenta el mayor valor en las relaciones H_S/H_{50}^* y $P_m/P_{promedio}$ dentro de los daños a obras (sección 6.3.2) y proveniente de una dirección cercana al NW.

Otros casos destacados de daño a infraestructura costera se presentaron en Antofagasta (3 de julio de 2013), Chañaral (9 de agosto de 1929) y Coquimbo (13 de marzo de 2011), en todos ellos los costos asociados superan los mil millones de pesos.

Como se puede apreciar en la Tabla 6-11, para el evento de agosto de 1965 se encontraron registros de daños en varios puntos del país, específicamente en las regiones II, III, IV, V y VIII, los cuales tuvieron efectos destructores en diversas estructuras costeras. Los costos asociados a la reparación de cada una de las obras dañadas no han logrado ser establecidos. Los registros de archivos de periódicos indican que el Ministerios de Obras Públicas estimó los costos en 40 mil millones de pesos de la época, lo cual incluye reparación de caminos, puentes, terraplenes, puertos y molos a lo largo del país (El Sur, 13/08/1965). En la V región, los daños municipales fueron evaluados en 2.000 millones de pesos de la época (Estrella de Valparaíso, 11/08/1965).

Los costos estimados de daños por marejadas identificados para el año 2015 alcanzan una cifra de \$6.960.000.000, incluyendo obras públicas y privadas. Al comparar esto con la inversión realizada por la Dirección de Obras Portuarias para el año 2014, la cual es cercana a 56 mil millones de pesos (DOP-MOP, 2014), se obtiene que los daños generados corresponden a un 12,5%.

Cabe destacar que las obras ejecutadas por la DOP producto de las marejadas de agosto del 2015 fueron cuatro y todas en la V región, específicamente en Valparaíso (Caleta Portales y Av. Altamirano), Viña del Mar (Av. La Marina) y Horcón e Higuerillas. Las obras en conjunto alcanzan una suma de \$990.163.000³¹.

³¹ Pozo, Pablo. Ingeniero de proyectos Dirección de Obras Portuarias. Comunicación personal, 01 de febrero de 2016.

Tabla 6-11: Fecha, parámetros de oleaje, lugar, efecto y costo estimado por daños a infraestructura costera.

Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm [°]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado
4	Junio	1924				II	Pisagua	Destrucción total muelle 4 perteneciente a la compañía salitrera Aguada.	250.000
4	Junio	1924				II	Antofagasta	Destrucción de 30 [m] de parapeto en molo del puerto.	160.000
8	Junio	1924				III	Chañaral	Destrucción malecón y mitad muelle Casa Francesa.	400.000
9	Agosto	1929				III	Chañaral	Destrucción del malecón fiscal del puerto.	1.200.000
9	Agosto	1929				II	Antofagasta	Destrucción de obras marítimas del puerto.	600.000
14	Agosto	1941				V	Valparaíso	Daños en las obras del puerto.	600.000
10	Agosto	1965				IV	Coquimbo	En el muelle de la industria pesquera San José de Coquimbo los embates del mar destruyeron 100 [m] de muelle.	
10	Agosto	1965				V	Valparaíso y Viña del Mar	Sobrepaso y daños en Av. Perú. Socavón en Av. La Marina. Destrucción cuartel de 4 ^a cia de bomberos. Daños en muros de sanatorio en 15 Norte. Destrucción de defensas balneario Recreo, olas barrieron el embarcadero y las dependencias de la institución.	
10	Agosto	1965				VIII	Coronel, Lota, Dichato y Tomé	Todas las caletas ubicadas entre Coronel y Lota (zonas más afectadas) fueron prácticamente barridas. En Dichato, un muelle de 130 [m] destruido. En el sector de playa El Morro, las olas destruyeron parte de la balaustre que existe en ese sector.	
10	Agosto	1965				VIII	Talcahuano y Tumbes	Destruída planta ballenera de la firma Macaya Hnos. ubicada en caleta Chome (pérdida estimadas en 150 millones de la época según sus dueños). En Tumbes, el fuerte oleaje destruyó los muros de defensas construidos por los pescadores.	
11	Agosto	1965				II	Antofagasta	En Antofagasta, las olas destruyeron el faro, 500 [m] de la nueva Avenida Costera, más de 300 [m] de la vía férrea, cables de alta tensión y oficinas ubicadas en el puerto. Daños materiales sufridos en el puerto y zona costera alcanzarían 500 millones de pesos de la época.	
11	Agosto	1965				III	Chañaral	Daños en el muelle de la cía. Minera Sta. Fe y en el puerto mecanizado destruyendo algunas oficinas de embarque.	
11	Agosto	1965				IV	Coquimbo	Destrozado el rompeolas de Guayacán en el puerto de Coquimbo.	
11	Agosto	1965				VIII	Talcahuano y Tomé	Desaparece balneario El Morro: la violenta marejada barrió prácticamente con la playa, destruyendo muros de contención y parte del casino del balneario. En Tomé se hundió el muelle antiguo, también se dañó la losa de acceso al muelle fiscal.	
12	Agosto	1965				VIII	Talcahuano	Muelle de la firma Alimar con graves daños.	
13	Agosto	1965				V	Concón	Con daños resultó el instituto de Biología Marina de Montemar: vidrios rotos, parte baja inundada y dos laboratorios dañados. Playa Amarilla: daños materiales por 500 millones de pesos de la época debido a destrucción de escaleras de acceso, destrucción parcial de la pérgola del restaurante, destrucción de las cabinas, rotura de los servicios de agua potable y de alcantarillado, pérdida de una serie de equipos y artefactos públicos.	

Fuente: Adaptado de Campos **et al.**, 2015.

Tabla 6-12: Fecha, parámetros de oleaje, lugar, efecto y costo estimado por daños a infraestructura costera (continuación).

Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm [°]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado
25	Julio	1968				V	Viña del Mar	Daños en Av. Perú y La Marina.	7.000
2	Febrero	1983	2,47	11,6	263	IV	Coquimbo	Muelle Club de Yates La Herradura destruido por marejadas.	
9	Marzo	1983	2,56	13,7	243	I	Iquique	Destrucción de 50 metros del muelle del recinto naval.	105.000
26	Agosto	1983	-	-	-	XV	Arica	Una solución definitiva a graves daños ocasionados por las marejadas a la costanera Comandante San Martín esperan dar las autoridades a través de un nuevo proyecto. Son 86 millones para mejorar costanera sur y 18 millones para ex isla El Alacrán (millones de la época).	1.604.000
1	Mayo	1986	3,78	13,4	238	V	Valparaíso	Defensas costeras dañadas en Av. Altamirano.	104.000
20	Mayo	1986	3,56	12,9	246	IV	La Serena	Oleaje erosionó base de Faro Ornamental de La Serena y en la madrugada los dos torreones que dan hacia el poniente cedieron hundiéndose varios centímetros.	15.000
7	Mayo	1987	3,01	10,0	258	V	Valparaíso	Daños menores en costanera de Valparaíso.	160.000
12	Julio	1987	4,45	8,3	343	V	Valparaíso	Diversos daños en parque costero Juan de Saavedra, algunas veredas destruidas.	17.000
13	Julio	1987	3,90	9,1	329	V	Valparaíso	Daños en asfalto de muelle Pratt.	3.000
24	Agosto	1992	3,42	14,6	219	I	Iquique	Daños en los avances de emisario.	936.000
24	Agosto	1992	3,92	13,90	220,00	II	Antofagasta	Daños en defensas costeras.	
7	Mayo	1993	4,46	10,7	248	VIII	Licu	El fuerte oleaje derribó un muro de contención.	50.000
12	Agosto	1994	4,24	13,7	237	XIV	Corral	Construirán enrocado en el sector La Aguada-Corral. En uno de los últimos temporales ocurridos en la zona, la fuerza de las olas barrió con el terraplén del camino, sacando piedras y material.	208.000
14	Agosto	1996	4,84	11,5	263	XIV	Corral	Destrucción de una parte del muelle que se encontraba en construcción.	42.000
21	Junio	1997	5,68	11,9	263	VIII	Caleta El Maule.	Fisuras en muro de contención.	300.965
24	Junio	1997	4,01	13,9	227	III	Chañaral	Daños en muelle de la planta pesquera Chañaral, pérdida del motor generador, bomba, tablero eléctrico y bote auxiliar.	
24	Junio	1997	5,11	12,2	255	VI	Rapel	Explanada para botes de caleta La Boca de Rapel socavada por marejadas, quebrada en 5 partes.	
24	Junio	1997	4,74	12,1	255	VII	Constitución	En caleta Maguillines destrucción de 10 cajas de pescadores. La caleta Pellines afectada por marejadas.	

Fuente: Adaptado de Campos **et al.**, 2015.

Tabla 6-13: Fecha, parámetros de oleaje, lugar, efecto y costo estimado por daños a infraestructura costera (final).

Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm [°]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado
9	Septiembre	2000	1,77	10,0	230	V	Valparaíso	Se produjo el varamiento del mercante Avon, en un episodio que se tradujo en la destrucción del muelle de pescadores de caleta Portales.	1.200.000
13	Junio	2003	3,41	13,7	251	V	Valparaíso	En caleta El Membrillo se dañó el muelle e inundaron obras de remodelación.	210.000
18	Junio	2003	2,83	11,8	231	V	Valparaíso y Viña del Mar	Socavones en calles y avenidas.	40.000
	Mayo	2008				VIII	Lebu	Colapso de cerca de 300 [m] lineales del paseo Costa Mar de Lebu. Se mencionan deficiencias e irregularidades en procesos de construcción. No se especifica fecha de marejada.	1.000.000
14	Junio	2010	4,48	10,9	280	VIII	Coronel	Inclinaciones de tierra.	20.000
13	Marzo	2011	3,52	9,1	208	IV	Coquimbo	Daños en costanera.	1.000.000
18	Junio	2011	4,79	11,0	284	V	Maitencillo	Destrucción de borde costero y locales comerciales en playa El Abanico.	25.000
10	Agosto	2011	3,36	14,6	228	II	Antofagasta	En el sector de Villa Azul, las olas derribaron un muro de contención.	90.000
16	Agosto	2012	4,03	10,2	276	V	Reñaca	Daños en restaurant Terrazas de Alfredo.	5.000
17	Agosto	2012	4,02	12,1	253	V	Viña del Mar	Pérdidas en daños municipales.	200.000
29	Mayo	2013	3,92	12,2	237	V	Viña del Mar	Daños en Av. Perú.	10.000
3	Julio	2013	4,71	14,8	244	V	Reñaca	Daños públicos en Reñaca.	100.000
4	Julio	2013	4,16	16,4	229	II	Antofagasta	Daños de consideración en el molo de abrigo, el cual sufrió deslizamiento de rocas, socavamiento de material y caída de muro de contención de olas en el brazo perpendicular a la costanera y de bloques en el sector del faro. La escollera de protección tuvo perdida de roca en las bases de soporte y presenta desalineamiento de su eje longitudinal.	2.264.734
4	Julio	2013	5,30	15,2	248	VII	Constitución	Daños en muelle Maguillines.	200.000
4	Julio	2013	3,82	16,6	226	XV	Arica	La fuerza del mar envió las protecciones costeras hacia el pavimento del camino.	19.000
31	Enero	2014	2,68	8,4	215	V	Viña del Mar	Olas derriban poste de luz en Av. Perú.	3.800
1	Abril	2014	3,10	12,1	231	VII	Pelluhue	Memorial del 27F cae en Pelluhue.	55.000
2	Julio	2014	4,69	14,2	243	VIII	Cobquecura	Daño a puente camino costero en Cobquecura.	50.000
2	Julio	2014	4,69	14,2	243	VIII	Coronel	Embarcación golpea muelle peatonal produciendo daños.	12.000
6	Agosto	2015	3,71	11,8	265	XIV	Lago Ranco	Marejadas destruyeron costanera.	100.000
8	Agosto	2015	4,27	13,9	228	II	Taltal	Socavón a causa de marejadas en el acceso Taltal por la Ruta 1 a Paposo en kilómetro 25.	110.000
8	Agosto	2015	6,36	9,9	340	V	Viña del Mar	Desplazamiento de unidades de coraza en protección club de Yates de Recreo, destrucción de club de submarinistas de Valparaíso. Colapso de rompeolas principal en 3 secciones en club de Yates de Higuerillas. Daños en restaurant Tierra de Fuego, Amura y Chez Gerald.	1.830.000
8	Agosto	2015	6,36	9,9	340	V	Valparaíso y Viña del Mar	Diversos daños a infraestructura costera en playa Las Torpederas, caleta Portales, Laguna Verde, caleta El Membrillo, paseo Juan de Saavedra, paseo Wheelwright, paseo costero de Viña del Mar (entre muelle Vergara y Playa del Deporte) y Av. La Marina.	5.000.000
15	Diciembre	2015	2,30	17,0	315	V	Viña del Mar	Daños en café Amura.	20.000

Fuente: Adaptado de Campos **et al.**, 2015.

6.4.3 DAÑOS A LOCALES COMERCIALES Y VIVIENDAS

Al igual que los daños descritos anteriormente, la zona más afectada por daños a locales comerciales es la región de Valparaíso, específicamente en el comercio ubicado en Concón, Reñaca y Viña del Mar. También se encontró una cantidad considerable de casos en la IV región, en la cual el registro de daños fue principalmente en la ciudad de La Serena.

Para la ocurrencia de viviendas dañadas, la mayor cantidad de registros fueron encontrados en las regiones VII y VIII, sectores para los cuales prácticamente no se identificó daño a locales comerciales. El evento en el cual se produjo el mayor a daño a viviendas se presentó en agosto de 1965, en el cual el mar destrozó 30 casas (20 en caleta El Morro y 10 en Pueblo Hundido, VIII región), 1 escuela y además inundó otras 300 viviendas en población Lo Rojas de Coronel (El Sur, 10 y 11/08/1965).



Figura 6-27: Daño a viviendas en la VIII región, evento del 08 de agosto de 1965 (Fuente: Biblioteca Nacional de Chile).

6.4.4 CIERRES DE PUERTOS

Como se ha comentado, los cierres de puertos corresponden al efecto o impacto que se presenta con mayor frecuencia en eventos de marejadas. La autoridad encargada para decretar los cierres es el Capitán de Puerto, quien basa su decisión mediante el pronóstico de tiempo marítimo para 3 días y actualizado cada 12 horas, entregado por el Centro Meteorológico pertinente. Cuando los pronósticos indican posibles marejadas en la bahía, el Capitán de Puerto se comunica con los capitanes de buques que se encuentren en mar abierto para verificar condiciones de viento y oleaje. Una vez que se han confirmado estas dos fuentes de información, se realiza una inspección en terreno hasta una profundidad que permita apreciar el estado del mar sin presencia considerable de obras de protección, embarcándose en una nave perteneciente a la Armada de Chile. Si esta última verificación indica que se cumplen las condiciones mínimas de oleaje para realizar el cierre de puerto, se emite un boletín informativo a la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), clubes de yates, empresas portuarias, agencias navieras, caletas pesqueras y todas las entidades bajo la jurisdicción de la capitanía de puerto de la zona para que establezcan el protocolo a seguir³².

En la Tabla 6-14 se expone la cantidad aproximada de dinero que dejan de recibir las diferentes empresas portuarias debido a la suspensión de sus operaciones durante 1 día. Los valores calculados indican que la zona más afectada por cierres de puerto corresponde a la V región. Esto se debe a la presencia de los puertos de San Antonio (PCE y STI) y Valparaíso (TCVAL y TPS), los cuales en conjunto dejan de percibir 445 millones de pesos por día aproximadamente.

En la zona norte y sur del país destacan los puertos de Antofagasta y San Vicente respectivamente, a los cuales dejan de ingresar cifras cercanas y superiores a 180 millones por efecto de cierre.

Cabe destacar que a lo largo de la costa chilena se encuentran puertos como Patache, Mejillones, Tocopilla, Quintero, entre otros, los cuales no se encuentran expuestos en la Tabla 6-14 debido a que no se logró establecer la cantidad de dinero que dejan de percibir por suspensión de sus operaciones.

³² Saavedra, Nelson. Capitán de Puerto de Valparaíso. Entrevista realizada el 29 de julio de 2015 en Capitanía de Puerto de Valparaíso. Entrevistador: Rodrigo Campos.

Tabla 6-14: Región, empresa portuaria y costo diario asociado a cierre de puerto por un día en regiones en estudio.

Región	Empresa portuaria	Costo diario [CLP\$]
XV	Terminal Puerto Arica (TPA)	102.588.362
I	Empresa Portuaria Iquique (EPI)	28.445.478
I	Iquique Terminal Internacional (ITI)	66.059.284
II	Antofagasta Terminal Internacional (ATI)	184.344.790
IV	Terminal Puerto Coquimbo (TPC)	88.105.809
V	Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL)	24.116.155
V	Terminal Pacífico Sur (TPS)	208.688.096
V	Puerto Central (PCE)	26.845.014
V	San Antonio Terminal Internacional (STI)	185.903.250
VIII	Empresa Portuaria Talcahuano-San Vicente (TSV)	18.145.146
VIII	San Vicente Terminal Internacional (SVTI)	175.128.550
XIV	Puerto de Corral	24.997.089

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar en detalle la zona más afectada por cierres de puertos, es necesario tener en consideración las capitanías dentro de cada una de las Gobernaciones Marítimas de las regiones en estudio, las cuales se exponen en la Tabla 6-15. La Gobernación Marítima de Talcahuano tiene jurisdicción sobre la mayor cantidad de capitanías, incluyendo Constitución en la VII región. Por lo tanto, cuando se establecen cierres para toda la Gobernación, en la VIII región se deben suspender operaciones en una mayor cantidad de sitios con operaciones marítimo/portuarias.

Tabla 6-15: Gobernaciones Marítimas y Capitanías de Puerto en las regiones del estudio.

Región	Gobernación Marítima	Capitanía
XV	Arica	Arica
I	Iquique	Iquique y Patache
II	Antofagasta	Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla
III	Caldera	Caldera, Chañaral y Huasco
IV	Coquimbo	Coquimbo, Los Vilos y Tongoy
V	Valparaíso	Juan Fernández, Quintero y Valparaíso
	San Antonio	Algarrobo, Pichilemu, Rapel y San Antonio
VIII	Talcahuano	Constitución, Coronel, Lebu, Lirquén-Tomé, Lota, San Vicente y Talcahuano
XIV	Valdivia	Carahue, Corral, Lago Ranco, Panguipulli, Valdivia y Villarrica

Fuente: Adaptado de DIRECTEMAR³³.

Para establecer finalmente los verdaderos impactos de los cierres de puertos en cada una de las regiones, se debe contar con información detallada de los puertos y sitios de atraque afectados en todas las Gobernaciones Marítimas. Esto permitiría relacionar por completo la cantidad de dinero que deja de ingresar a las diferentes entidades involucradas en la suspensión de operaciones portuarias por eventos de marejadas.

6.4.5 DAÑOS A EMBARCACIONES

Los registros encontrados para los diferentes tipos de daños e impactos indican que se ha generado una cantidad importante de daños a embarcaciones, principalmente en las regiones IV, V y VIII.

En la V región se encontraron registros de una cantidad de embarcaciones dañadas muy superior al de los demás sectores en estudio (Tabla 6-10). Esto se debe a que en el periodo de tiempo entre los años 1823 y 1977 se encontraron principalmente registros para la región y tipo de daño mencionado.

Del total de embarcaciones dañadas, el 50% corresponde a daño de embarcaciones menores, mientras que en menor cantidad se encontró destrucción o naufragio de

³³ Disponible en [\[www.directemar.cl\]](http://www.directemar.cl). Accesada 24 de enero de 2016.

embarcaciones mayores (Figura 6-28). Es importante señalar que para un mismo evento de marejadas se puede generar daño a una gran cantidad de embarcaciones, como lo ocurrido en las regiones IV y V en agosto de 1965, evento en el cual se dañaron más de 50 embarcaciones en cada una de las regiones mencionadas (El Día, 11/08/1965; El Mercurio de Valparaíso, 08/08/1965). Esto no implica que sea el tipo de daño más recurrente, ya que como se pudo apreciar anteriormente, el impacto más frecuente a lo largo de las zonas en estudio corresponde a cierres de puertos.

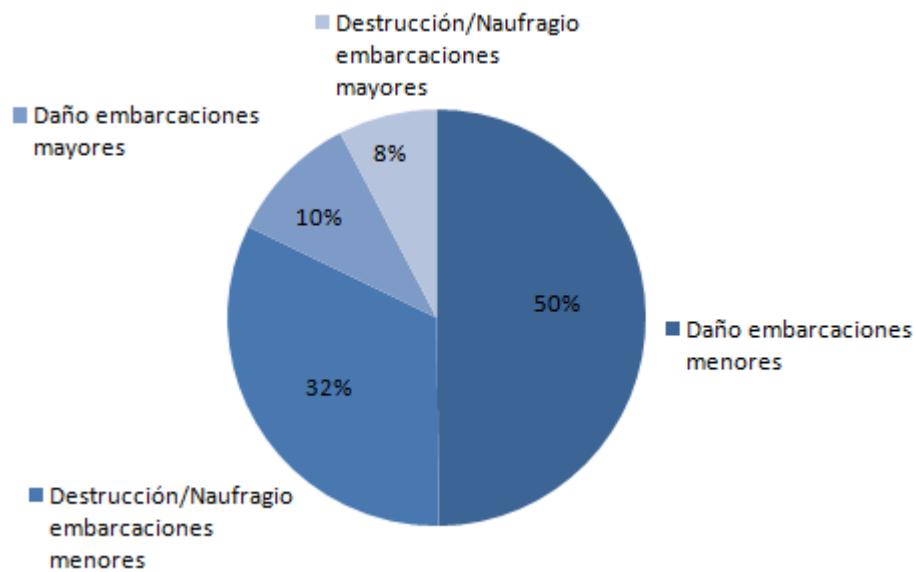


Figura 6-28: Distribución de nivel de daño a embarcaciones (Fuente: Elaboración propia).

6.4.6 DAÑO A INTEGRIDAD FÍSICA HUMANA

En la Figura 6-29 se muestran los resultados obtenidos para daño a integridad física humana. Se aprecia que las personas más afectadas son trabajadores del área pesquera, los cuales presentan la mayor tasa de mortalidad. Los civiles lesionados corresponden a la segunda mayor consecuencia sobre la integridad física humana. Según los registros obtenidos, gran parte de lesiones y muertes de civiles se han producido por imprudencia de las personas, las cuales deciden exponerse a las condiciones de marejadas a pesar de los diversos avisos preventivos que se emiten en presencia de estos eventos.

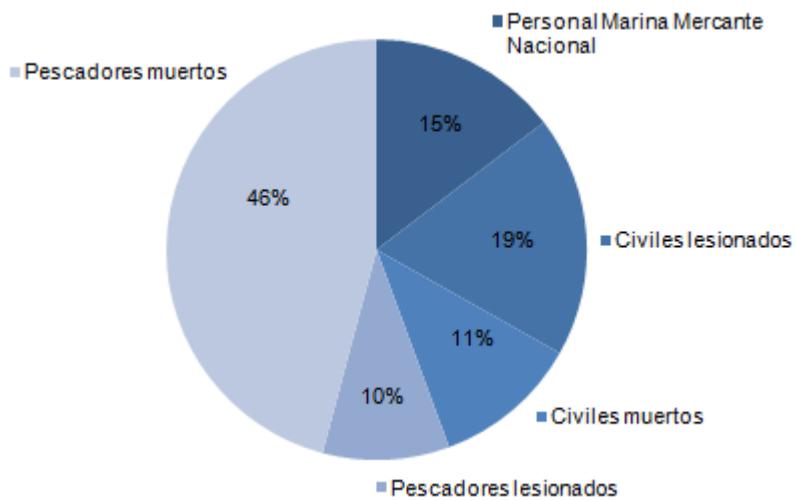


Figura 6-29: Distribución de tipos de daños a integridad física (Fuente: Elaboración propia).

Las víctimas fatales de personal de la Marina Mercante Nacional, dentro de las cuales se encontraba personal marítimo y oficiales (de puente y máquinas) fueron identificadas en un evento ocurrido en julio de 1987, en el cual se produjo el naufragio del barco mercante “Alborada” frente a las costas de San Vicente (VIII región). En la embarcación navegaban 37 tripulantes, de los cuales 30 fallecieron en el lugar (El Mercurio de Calama, 25/07/1987).

6.4.7 OTRO TIPO DE DAÑOS

Dentro de la categoría “Otro tipo de daños” se encontraron principalmente casos de embarcaciones que deben salir a la gira por no poder recalcar en puerto y cortes de tránsito en caminos cercanos a la costa, los cuales están ligados al sobrepuerto de obras de protección. En este grupo también se incluyó erosión de playas, efecto que a pesar de ocurrir con frecuencia en eventos de marejadas, presenta baja cantidad de casos documentados por la prensa. Esto no permitió definir una categoría de daño sólo para erosión de playas por marejadas.

6.5 DEFINICIÓN DE ESCALA DE MAGNITUD DE INTENSIDAD DE DAÑOS POR MAREJADAS

La elaboración de la escala de magnitud de intensidad de daños por marejadas (Escala de Campos) permite categorizar los daños e impactos ocurridos en este tipo de eventos de oleaje en las costas de Chile. Las descripciones de cada una de las categorías consideradas se presentan en la Tabla 6-16.

Tabla 6-16: Descripción de categorías Escala de Campos.

Categoría	Descripción
1	Cierres de puertos y resguardo de embarcaciones. Suspensión de: faenas de buceo (deportivo y/o comercial), recolección de orilla (mariscadores y alqueros), deportes náuticos (natación, surf, vela, entre otros) y playas no aptas para el baño.
2	Cierres de puertos. Daño a embarcaciones menores. Precaución a tránsito de peatones en sectores costeros.
3	Cierres de puertos. Daño a todo tipo de embarcaciones con pérdida o naufragio de embarcaciones menores. Sobrepasso en estructuras con posible inundación en locales comerciales, viviendas y otras instalaciones cercanas a borde costero.
4	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de embarcaciones menores y graves daños a embarcaciones mayores. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas y otras instalaciones cercanas al borde costero, además de posibles cortes de tránsito en caminos costeros. Daños menores a infraestructuras costeras, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas la línea de costa.
5	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de todo tipo de embarcaciones. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas, otras instalaciones y cortes de tránsito en sectores costeros. Daños mayores a infraestructuras costeras, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas a la línea de costa.
6	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de todo tipo de embarcaciones. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas, otras instalaciones y cortes de tránsito en sectores costero. Graves daños a infraestructura costera, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas a la línea de costa.
7	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de todo tipo de embarcaciones. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas, otras instalaciones y cortes de tránsito en sectores costeros. Destrucción de infraestructuras costeras, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas a la línea de costa.

Fuente: Elaboración propia.

Dada la similitud presente en las descripciones entre las categorías 4, 5, 6 y 7, en la Tabla 6-17 se exponen ejemplos de eventos de marejadas con sus respectivas descripciones de daños para las categorías mencionadas.

Tabla 6-17: Ejemplos de eventos con categorías 4, 5, 6 y 7 en Escala de Campos.

Categoría	Fecha	Localidad	Descripción de daños
4	27/05/1985	Arica	Temporal marítimo en costa ariqueña. Cierre de puerto y embarcaciones a la gira. Sobre pasos en el Alacrán, balneario El Lauro, La Lisera, playa Arenillas Negras. Inundación en restaurantes, daños en diversos sectores costeros y desprendimientos de tierra por erosión.
5	02/02/1983	Coquimbo	Muelle club de Yates La Herradura con daños por marejadas con una persona con lesiones físicas. Una embarcación cortó amarras en el puerto.
6	03/07/2013	Antofagasta	Daños de consideración en el molo de abrigo, el cual sufrió deslizamiento de rocas, socavamiento de material y caída de muro de contención de olas en el brazo perpendicular a la costanera y de bloques en el sector del faro. La escollera de protección tuvo perdida de roca en las bases de soporte y presenta desalineamiento de su eje longitudinal.
7	08/08/2015	Valparaíso/Viña del Mar	Desplazamiento de unidades de coraza en protección club de Yates de Recreo y destrucción de club de submarinistas de Valparaíso. Colapso de rompeolas principal en 3 secciones en club de Yates de Higuerillas. Daños en restaurantes Tierra de Fuego, Amura y Chez Gerald. Diversos daños a infraestructura costera en playa Las Torpederas, caleta Portales, Laguna Verde, caleta El Membrillo, paseo Juan de Saavedra, paseo Wheelwright, paseo costero de Viña del Mar (entre muelle Vergara y Playa del Deporte) y Av. La Marina.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6-18 se exponen los diez eventos más intensos según los registros encontrados y categorizados según la Escala de Campos, ordenados por intensidad o nivel de daño. Se aprecia que con la escala de daños elaborada es posible categorizar cada una de las zonas afectadas en un mismo evento, logrando identificar las regiones que presentan registros de eventos de marejadas con los efectos más dañinos.

Tabla 6-18: Diez eventos de marejadas categorizados con Escala de Campos.

Fecha	Regiones afectadas y daños registrados	Categoría
10/08/1965	XV: Cierre de puerto; II: Sobre pasos en diversos puntos, daños a infraestructura costera, 7 embarcaciones dañadas, daño a integridad física humana; III: Daño infraestructura costera, 2 embarcaciones dañadas; IV: Daño a infraestructura costera, cierre de puerto, 58 embarcaciones dañadas, otro tipo de daños; V: Sobre pasos, daño a infraestructura costera, daño a locales comerciales y viviendas, cierres de puertos, daño a embarcaciones, daño a integridad física humana, otro tipo de daños; VIII: Sobre pasos, daño a infraestructura costera, daño a locales comerciales y viviendas, cierres de puertos, daño a embarcaciones.	XV: 1; II: 6; III: 5; IV: 7; V: 7; VIII: 7.
08/08/2015	XV: Otro tipo de daños; II: Joven arrastrado por olas mientras pescaba, sobre paso y suspensión de tránsito, socavón camino a Taltal; IV: Cierre de puerto, sobre paso, daño a locales comerciales, resguardo de embarcaciones; V: Sobre pasos, daños a infraestructura costera, múltiples daños a obras públicas y privadas entre Valparaíso y Viña del Mar, cierre de puertos, 60 embarcaciones dañadas, daños a locales comerciales, 2 personas fallecidas, rescate de personas en embarcaciones, pescadores afectados, otro tipo de daños; IX: Destrucción de muro de contención natural; XIV: Sobre paso y destrucción de costanera en Lago Ranco.	XV: 3; II: 4; IV: 4; V: 7; IX: 5; XIV: 5
03 y 04/07/2013	XV: Sobre paso, movimiento de unidades de coraza, desvíos de tránsito; I: Sobre paso y corte de tránsito, daño a locales comerciales y viviendas, cierre de puerto; II: 4 personas lesionadas, Sobre paso, cortes de tránsito, daños de consideración en molo del puerto, autos arrastrados por olas; III: Cierre de puertos; IV: Cierre de puertos en toda la región; V: Daños a locales comerciales en Reñaca, cierre de puertos, sobre paso en Av. Borgoño, sobre pasos en Santo Domingo y Cartagena; VII: Inundaciones por sobre paso, daño a viviendas, 4 embarcaciones caen al mar sin ser recuperadas, daño a locales comerciales, daños en muelle Maguillenes; VIII: Aneamiento por sobre paso; IX: Daño a viviendas.	XV: 4; I: 4; II: 6; III: 1; IV: 1; V: 5; VII: 5; VIII: 4; IX: 4
04 a 08/06/1924	XV: Sobre paso y 23 lanchas a pique; I: Destrucción de lanchón y 5 botes a garete; II: Destrucción de muelle en Pisagua, destrucción de 30 [m] de molo en Antofagasta; III: Destrucción malecón y muelle casa Francesa, pérdidas de 2 lanchas y 2 botes; IV: 2 lanchas varadas, sobre paso en La Serena y Los Vilos.	XV: 4; I: 3; II: 5; III: 5; IV: 3
09/08/1929	II: Daño infraestructura costera; III: Daño infraestructura costera; V: Daño a locales comerciales y viviendas.	II: 5; III: 6; V: 4
01 a 03/05/1986	I: Naves a la gira; II: Destrucción de falucho y muerte de 3 pescadores; III: 3 pescadores muertos; IV: Cuantiosos daños en sectores vecinos a playas; V: Sobre pasos, daños a infraestructura costera, 2 embarcaciones dañadas, daño a locales comerciales; VIII: Viviendas damnificadas.	I: 2; II: 3; IV: 4; V: 4; VIII: 4
20 y 24/06/1997	I: Obrero ebrio fallece; II: Sobre paso; III: Daño a infraestructura costera, daño a 5 embarcaciones y otro tipo de daños; IV: Cierre de puerto; V: Cierre de puerto, 11 embarcaciones dañadas y otro tipo de daños; VI: Explanada socavada; VII: Destrucción de casetas de pescadores y otro tipo de daños; VIII: Embarcación arrastrada y rescatada, fisura en muro de contención, 13 embarcaciones dañadas.	I: 1; II: 3; III: 4; IV: 1; V: 3; VI: 4; VII: 4; VIII: 4
08 a 15/08/2011	XV: Cierre de puerto; I: Surfista desaparecido; II: Sobre paso, Daño a embarcaciones, cierre de puertos; IV: Cierre de puerto, daño a locales comerciales; V: Sobre paso, daño a locales comerciales, ola impacta microbús con dos pasajeros lesionados.	XV: 1; II: 4; IV: 3; V: 4
22/05/1940	V: Naufragio de dique flotante "Valparaíso II". Se dio vuelta de campana debido a un fuerte temporal.	V: 5
26/05/1915	V: Se hunde viejo dique flotante "Valparaíso" debido a un fuerte temporal.	V: 5

Fuente: Elaboración propia.

Se ha logrado identificar que los eventos que produjeron mayores daños (categoría 7) dentro de todo el registro encontrado ocurrieron en 1965 y 2015. Ambos se presentaron el mes de agosto, lo cual coincide con un periodo de retorno cercano a 50 años entre ambos episodios. El evento de 1965 avanzó de Sur a Norte, específicamente desde las regiones VIII a XV. Los registros de prensa de aquella época indican que fue uno de los temporales de viento y lluvia más violentos de las últimas décadas (El Día, 10/08/1965). Junto con esto, se menciona que los efectos fueron devastadores, estimándose sus daños superiores a los que causó el terremoto del 28 de marzo de aquel año (La Estrella de Valparaíso, 12/08/1965). En la escala elaborada, este evento alcanzó categoría 7 en las regiones IV, V y VIII.

El evento del año 2015 afectó las zonas costeras desde la región del Biobío hasta la región de Coquimbo, presentando los mayores impactos en la región de Valparaíso, sector en el cual según Escala de Campos el evento alcanzó categoría 7. Alturas de ola de hasta 10 metros provocaron diversos daños, incluyendo inundación de viviendas, personas fallecidas, suspensión de operaciones portuarias y daños a infraestructura costera pública y privada³⁴.

Otros eventos con graves daños, específicamente con categoría 6, se presentaron en agosto de 1929 (III región) y julio de 2013 (II región). El primero tuvo las mayores consecuencias en la costa norte del país (Rodríguez, 1937), mientras que el segundo afectó las zonas costeras desde la región de Aysén hasta la región de Arica y Parinacota, llegando incluso hasta el límite con Perú³⁵. En ambos episodios se produjeron severos daños en obras de protección portuaria.

En la Figura 6-30 se presenta un mapa regional de Chile con la cantidad de eventos sobre categoría 4 que han ocurrido en cada uno de los sectores en estudio. Se ha considerado desde esta categoría ya que, según Escala de Campos, es desde la cual se comienzan a presentar daños a infraestructura costera, locales comerciales y viviendas. Junto con esto, se logran visualizar con mayor claridad los eventos más extremos registrados.

Se obtiene que la mayor cantidad de eventos de marejadas sobre categoría 4 han ocurrido en la V región. Adicionalmente, la región de Valparaíso se ha visto afectada por los dos eventos con mayores daños, los cuales corresponden a los mencionados en agosto de 1965 y 2015.

En la zona norte los mayores daños medidos según la Escala de Campos se presentan en la II región, específicamente en la ciudad de Antofagasta, con dos eventos categoría 6. En la zona centro, además de la V región, destaca la IV región con un evento categoría 7 y diversos casos con categoría 4. Finalmente, en la zona sur, la VIII región del Biobío es en la cual se han identificado la mayor cantidad de daños por marejadas, presentando los mayores impactos en el evento del año 1965.

³⁴La Tercera *online*. Disponible en [<http://www.latercera.com/noticia/deportes/polideportes/2015/08/732-642225-9-la-fuerza-del-mar-vence-a-los-surfistas-en-arica.shtml>]. Accesada 31 de diciembre de 2015.

³⁵La Tercera *online*. [<http://www.latercera.com/noticia/nacional/2013/07/680-531531-9-marejadas-afectan-con-fuerza-a-siete-regiones-del-pais-y-continuaran-hasta-el.shtml>] Accesada 31 de diciembre de 2015.

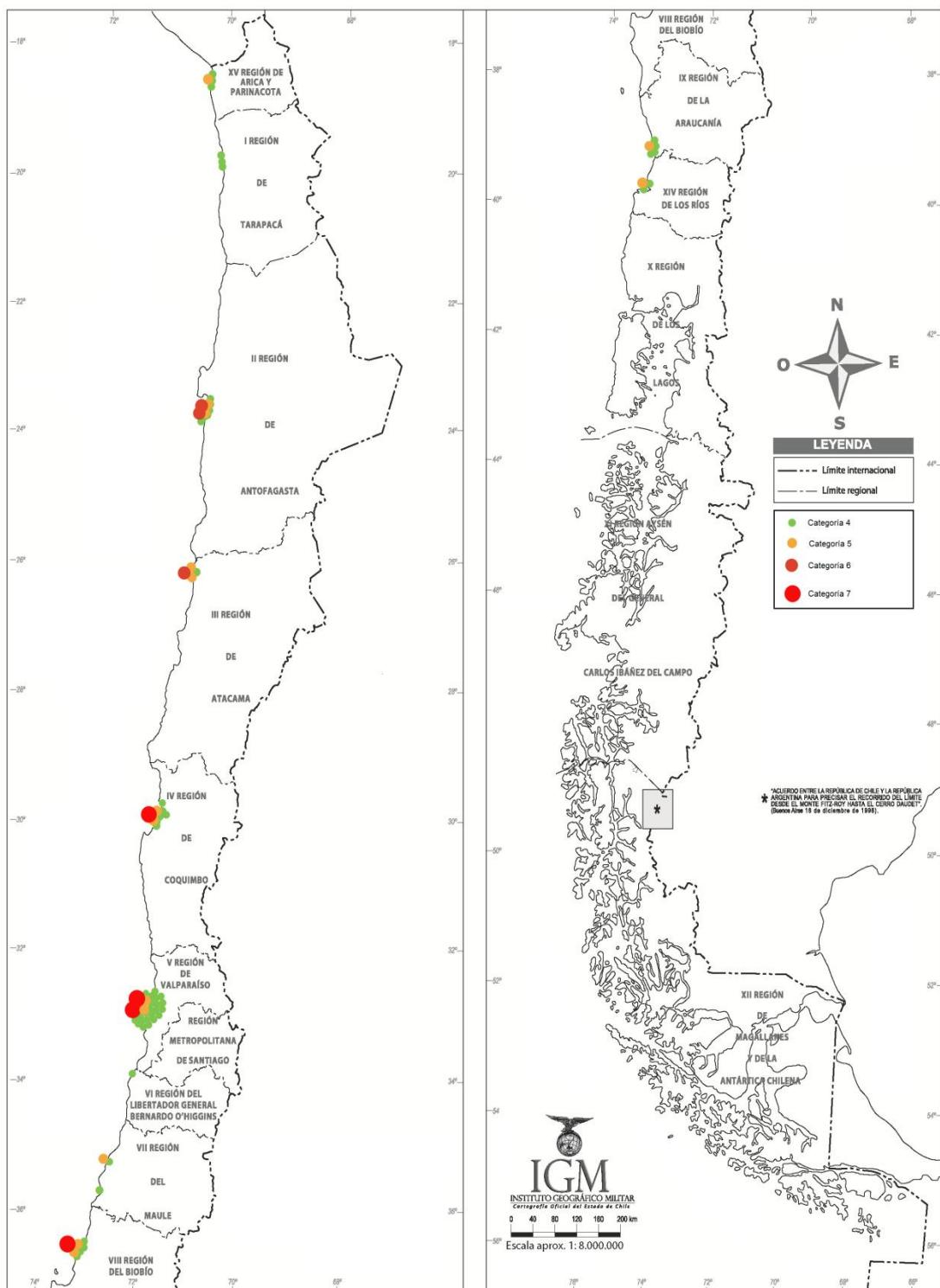


Figura 6-30: Cantidad de eventos de marejadas por región sobre categoría 4 en Escala de Campos (Fuente: Elaboración propia).

6.5.1 INCIDENCIA DE DAÑOS E IMPACTOS SEGÚN PARÁMETROS DE OLEAJE

Se ha determinado la incidencia de daños según los registros de daños en eventos de marejadas encontrados para rangos de altura significativa y periodo medio por subcardinales de dirección media, comparado con tablas de incidencia de oleaje de toda la base de datos ERA-Interim. Esto se ha realizado utilizando la información de oleaje entre 1979 y 2015 en las regiones II, V y VIII en representación de las zonas norte, centro y sur respectivamente.

En las tablas que se exponen a continuación, los valores se encuentran expresados en porcentaje y los daños se identifican según las siguientes letras en superíndices: a: Sobre pasos; b: Daño a infraestructura costera; c: Daño a locales comerciales y viviendas; d: Cierre de puertos; e: Daño a embarcaciones; f: Daño a integridad física humana y g: Otro tipo de daños.

Zona norte (regiones XV, I, II, III)

En el rango de direcciones medias de 180 a 225 [°] (Tabla 6-19) los daños se comienzan a presentar para valores de H_s superiores a 1,5 [m] y periodos medios entre 10 y 14 [s]. Para el menor rango de altura significativa del cual se encontró incidencia de daños, se presentan cierres de puertos, daño a embarcaciones y daño a integridad física humana. En el intervalo de direcciones mencionado, los daños a infraestructura costera comienzan a ocurrir sobre los 3,0 [m] de altura significativa y periodos medios sobre 14 [s]. Los daños con mayor probabilidad de ocurrencia expuestos en la Tabla 6-19 corresponden a sobre pasos y cierres de puertos.

Para el sub-cuadrante de direcciones entre 225 y 270 [°] expuesto en la Tabla 6-20, se identifica que las mayores probabilidades de incidencia registradas corresponden a daños a infraestructura costera, específicamente en el rango entre 4,0 y 4,5 [m] de H_s , en el cual se obtienen porcentajes de ocurrencia de sobre paso y daño a infraestructura costera de 50 y 100% en el rango de periodos entre 12 y 18 [s]. También se identifica la incidencia de condiciones de oleaje que ocasionan cierres de puertos, daño a embarcaciones y otro tipo de daños para los intervalos de H_s y T_m mencionados.

Dado que se ha utilizado la información de oleaje de la II región para representar lo encontrado en la zona norte, no se obtiene información de incidencia de daños para direcciones más cercanas al Norte.

Tabla 6-19: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 180-225 [°], zona norte.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0				0,04 ^d 0,01 ^e 0,01 ^f	0,58 ^d			
2,0 - 2,5				0,01 ^a 0,08 ^d	0,20 ^d 0,05 ^g	2,56 ^d		
2,5 - 3,0			0,12 ^d 0,12 ^f	0,05 ^d 0,05 ^e 0,05 ^f	0,35 ^d 0,06 ^e 0,12 ^g	0,83 ^a 1,67 ^d 0,83 ^g		
3,0 - 3,5				0,48 ^a 0,24 ^g	0,66 ^a 0,66 ^d 0,44 ^e 0,22 ^f 0,87 ^g	3,08 ^a 0,77 ^b 0,77 ^c 3,85 ^d 0,77 ^f 0,77 ^g		
3,5 - 4,0					1,56 ^a 1,56 ^b 1,56 ^d 3,13 ^g	2,70 ^d 2,70 ^e 2,70 ^g		
4,0 - 4,5								
4,5 - 5,0								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-20: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona norte.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0				0,02 ^d 0,02 ^f	0,21 ^c 0,21 ^f			
2,0 - 2,5			0,46 ^d	0,10 ^d	0,06 ^d 0,06 ^e	8,33 ^d		
2,5 - 3,0				0,44 ^d 0,44 ^f	0,19 ^b 0,58 ^d 0,19 ^e 0,19 ^f 0,58 ^g	3,92 ^d 1,96 ^g		
3,0 - 3,5					2,60 ^d	5,56 ^a 2,78 ^b 2,78 ^c 2,78 ^d 2,78 ^e 5,56 ^f 2,78 ^g		
3,5 - 4,0					5,00 ^d	4,35 ^a 17,39 ^d 4,35 ^e 4,35 ^g		
4,0 - 4,5					50,00 ^a 100,00 ^b 50,00 ^d 50,00 ^e 100,00 ^g	100,00 ^a 50,00 ^b 100,00 ^g		
4,5 - 5,0								

Fuente: Elaboración propia.

Zona centro (regiones IV, V, VI y VII)

La Tabla 6-21 muestra la información de incidencia de daños para el rango de direcciones 180-225 [°], en la cual se puede apreciar que se encontraron pocos registros de daños con incidencia desde este sub-cardinal. Aún así se identificaron daños a infraestructura costera en los intervalos de altura significativa 2,5-3,0 [m] y 3,5-4,0 [m], ambos en el rango de periodo medio entre 8 y 10 [s]. El mayor porcentaje de incidencia se presenta en el intervalo de H_s entre 3,0 y 3,5 [m] y periodos entre 14 y 16 [s] con daño a integridad física humana.

Tabla 6-21: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 180-225 [°], zona centro.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 – 2,0								
2,0 - 2,5		0,06 ^f	0,02 ^c 0,02 ^d	0,05 ^c 0,05 ^d				
2,5 – 3,0			0,02 ^b 0,02 ^f					
3,0 - 3,5			0,14 ^f	0,06 ^d		3,70 ^f		
3,5 – 4,0			0,12 ^a 0,12 ^b 0,36 ^d		0,14 ^d			
4,0 - 4,5								
4,5 – 5,0								
5,0 - 5,5								
5,5 – 6,0								
6,0 - 6,5								

Fuente: Elaboración propia.

En las Tablas 6-22 y 6-23 se aprecia un aumento en la cantidad de incidencia de daños para condiciones de oleaje provenientes desde direcciones medias 225 a 270 [°]. Los daños identificados se presentan a partir de valores de altura significativa de ola en un rango entre 1,5 y 2,0 [m]. En este intervalo de H_s , se encontraron sobrepasos y daños a infraestructura costera para oleaje con periodo medio entre 10 y 12 [s], con una probabilidad de incidencia de 0,03%. En el rango de H_s entre 4,5 y 5,0 [m] se obtienen porcentajes importantes en la incidencia de daños, con probabilidad de ocurrencia de sobrepasos superior a 10%. Para las alturas de ola entre 5,0 y 5,5 [m] y rango de periodos de 12 a 14 [s], se presenta una probabilidad de ocurrencia de daño a infraestructura costera de 20%. En el mismo intervalo de H_s mencionado, pero con periodos entre 14 y 16 [s], hay valores de incidencia superiores a 42% para sobrepasos y daño a locales comerciales y viviendas.

En el rango de direcciones de 270 a 315 [°] (Tabla 6-24) se identificó incidencia de daños en un rango de valores de altura significativa entre 2,0 y 5,5 [m]. Se obtiene que los daños a infraestructura costera se han presentado desde valores de H_s entre 2,5 y 3,0 [m]. Desde los 4,0 [m] de H_s y rangos de periodos entre 8 y 12 [s] se encontró incidencia importante de daños, principalmente sobrepasos, daño a locales comerciales y viviendas y daño a embarcaciones. En el rango de altura significativa entre 5,0 y 5,5 [m] y periodo medio entre 10 y 12 [s], se obtiene un 50% de probabilidad de ocurrencia de sobrepasos, daños a locales comerciales y viviendas y otro tipo de daños.

En Tabla 6-25, para el intervalo de direcciones entre 315 y 360 [°] se encuentra el episodio extremo de agosto 2015, el cual comparado con la data ERA-Interim presenta una incidencia de 100% para todos los tipos de daños considerados, lo cual se aprecia para el rango de altura significativa de ola entre 6,0 y 6,5 [m] y de periodo medio de 8 a 10 [s]. En el intervalo de H_s entre 4,0 y 4,5 [m] se obtiene una incidencia importante de cierres de puerto (33,33%), sobrepasos (13,33%), daños a infraestructura costera, daños a embarcaciones y otro tipo de daños (todos con 6,67% de probabilidad de ocurrencia). Otro tipo de daño con incidencia importante en este intervalo de direcciones corresponde a daño a embarcaciones, con probabilidad de ocurrencia de 25%.

Tabla 6-22: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona centro.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0			0,04 ^d	0,03 ^a 0,03 ^b 0,06 ^d 0,03 ^e 0,03 ^f				
2,0 - 2,5			0,05 ^a 0,05 ^f 0,05 ^g	0,02 ^b 0,10 ^d 0,02 ^f 0,04 ^g				
2,5 - 3,0			0,17 ^d	0,08 ^b 0,08 ^d 0,04 ^e	0,09 ^a 0,18 ^d	1,96 ^a		
3,0 - 3,5				0,24 ^d 0,24 ^e 0,12 ^f	0,13 ^a 0,27 ^b 0,40 ^d 0,40 ^e 0,13 ^f 0,40 ^g	1,56 ^a 1,56 ^c		
3,5 - 4,0				1,27 ^a 0,63 ^d 1,27 ^e 0,63 ^g	0,34 ^a 1,01 ^b 0,34 ^d 0,34 ^e 0,34 ^g	1,67 ^d		
4,0 - 4,5					1,15 ^a 2,30 ^c 2,30 ^d 1,15 ^f	7,69 ^a 5,13 ^c		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-23: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona centro (continuación).

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
4,5 - 5,0					10,53 ^a 5,26 ^b 5,26 ^c 5,26 ^d 5,26 ^e 5,26 ^g	6,26 ^b 12,50 ^d		
5,0 - 5,5					20,00 ^b	42,86 ^a 14,29 ^b 42,86 ^c 14,29 ^d		
5,5 - 6,0								
6,0 - 6,5								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-24: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 270-315 [°], zona centro.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0								
2,0 - 2,5		1,67 ^d	0,51 ^e 0,51 ^f					
2,5 - 3,0			0,98 ^a 0,49 ^b 0,49 ^d					
3,0 - 3,5			0,59 ^b 1,78 ^d 0,59 ^e 1,18 ^f	10,00 ^d 3,33 ^e				
3,5 - 4,0			2,13 ^d					
4,0 - 4,5				10,00 ^a 5,00 ^c 10,00 ^e 5,00 ^f 5,00 ^g				
4,5 - 5,0			33,33 ^e	25,00 ^a 12,50 ^c 25,00 ^d 12,50 ^e 12,50 ^g				
5,0 - 5,5				50,00 ^a 50,00 ^c 50,00 ^g				
5,5 - 6,0								
6,0 - 6,5								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-25: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 315-360 [°], zona centro.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0								
2,0 - 2,5								
2,5 - 3,0								
3,0 - 3,5			4,76 ^e 4,76 ^f					
3,5 - 4,0			3,23 ^a 9,68 ^d 9,68 ^e					
4,0 - 4,5			13,33 ^a 6,67 ^b 33,33 ^d 6,67 ^e 6,67 ^g					
4,5 - 5,0			25,00 ^e					
5,0 - 5,5								
5,5 - 6,0								
6,0 - 6,5			100,00 ^a 100,00 ^b 100,00 ^c 100,00 ^d 100,00 ^e 100,00 ^f 100,00 ^g					

Fuente: Elaboración propia.

Zona sur (regiones VIII, IX y XIV)

Se ha identificado poca incidencia de daños para el rango de direcciones de 180 a 225 [°] expuestos en la Tabla 6-26, aún así se encontraron registros de cierres de puertos para bajos valores de altura significativa (2,0 a 2,5 [m]). El daño a locales comerciales y viviendas se presenta con la mayor probabilidad de ocurrencia en este rango de direcciones, con 9,09% para valores de H_s entre 4,5 y 5,0 [m].

Tabla 6-26: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 180-225 [°], zona sur.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0								
2,0 - 2,5				0,08 ^a				
2,5 - 3,0				0,06 ^e 0,06 ^f				
3,0 - 3,5					0,26 ^d			
3,5 - 4,0						3,33 ^d		
4,0 - 4,5								
4,5 - 5,0						9,09 ^c		
5,0 - 5,5								
5,5 - 6,0								
6,0 - 6,5								

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6-27 se aprecia que aumenta considerablemente la incidencia de daños para direcciones medias de oleaje entre 225 y 270 [°], esto en comparación a lo expuesto en el rango anterior. Los daños ocurren en un amplio intervalo de H_s , específicamente entre 2,0 y 6,5 [m]. Se presentan daños a infraestructura costera desde 3,5 [m] de H_s , llegando a una probabilidad de ocurrencia del 50% en el rango de 5,5 a 6 [m] de este parámetro. Los registros encontrados indican incidencia de daños de 100% para daño a locales comerciales y viviendas en el intervalo de 6,0 a 6,5 [m] de H_s , con períodos de 10 a 16 [s]. Es importante destacar que la mayor parte de los daños a infraestructura costera identificados en la zona sur provienen desde este rango de direcciones.

Tabla 6-27: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 225-270 [°], zona sur.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,0 - 1,5								
1,5 - 2,0								
2,0 - 2,5			0,03 ^e 0,03 ^f	0,03 ^g				
2,5 - 3,0			0,08 ^d	0,04 ^d 0,02 ^e 0,02 ^f				
3,0 - 3,5				0,10 ^a 0,20 ^d 0,05 ^g	0,07 ^d 0,07 ^g			
3,5 - 4,0			1,30 ^g	0,15 ^a 0,15 ^b 0,45 ^d 0,15 ^g	0,14 ^d 0,14 ^f	1,39 ^f		
4,0 - 4,5				0,48 ^a 0,48 ^b 0,96 ^d	0,38 ^b 0,38 ^d	1,54 ^c		
4,5 - 5,0				1,35 ^b 4,05 ^e 1,35 ^f	0,96 ^d 1,92 ^e	5,71 ^b 2,86 ^e		
5,0 - 5,5						2,86 ^g		
5,5 - 6,0				50,00 ^b	6,67 ^a			
6,0 - 6,5				100,00 ^c		100,00 ^c		

Fuente: Elaboración propia.

La mayor probabilidad de incidencia de daños para condiciones de oleaje de direcciones entre 270 y 315 [°] se encuentra para valores de H_s superiores a 4,0 [m] (Tabla 6-28). En este sub-cardinal, los daños o impactos con la mayor probabilidad de ocurrencia son los cierres de puertos y daño a embarcaciones, con porcentajes máximos de incidencia de 13,64 y 8,33% respectivamente.

Tabla 6-28: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 270-315 [°], zona sur.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0								
2,0 - 2,5								
2,5 - 3,0			0,17 ^d					
3,0 - 3,5			0,67 ^d					
3,5 - 4,0			0,45 ^d 0,45 ^f					
4,0 - 4,5			2,47 ^d 1,23 ^e	1,18 ^b 1,18 ^d				
4,5 - 5,0			13,64 ^d 9,09 ^e	1,72 ^c 1,72 ^d				
5,0 - 5,5				3,57 ^d 3,57 ^e				
5,5 - 6,0				8,33 ^e 8,33 ^f				
6,0 - 6,5								

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6-29 se aprecia que se ha obtenido un porcentaje importante de incidencia de daños a locales comerciales y viviendas, cierres de puertos, daños a embarcaciones, daño a integridad física humana y otro tipo de daños en el rango de altura significativa de ola entre 5,5 y 6,0 [m] y direcciones medias de 315 a 360 [°], con una probabilidad de ocurrencia de 50% para todos los daños mencionados. Los daños identificados se presentan casi en su totalidad en el rango de periodo medio entre 8 y 10 [s].

Tabla 6-29: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 315-360 [°], zona sur.

H_s [m]/ T_m [s]	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,0 - 1,5								
1,5 - 2,0								
2,0 - 2,5								
2,5 - 3,0		1,89 ^d						
3,0 - 3,5			1,79 ^e					
3,5 - 4,0			1,61 ^d 3,23 ^e 1,61 ^f					
4,0 - 4,5			8,70 ^d 2,17 ^e					
4,5 - 5,0								
5,0 - 5,5			6,67 ^d 6,67 ^e					
5,5 - 6,0			50,00 ^c 50,00 ^d 50,00 ^e 50,00 ^f 50,00 ^g					
6,0 - 6,5								

Fuente: Elaboración propia.

6.5.2 INCIDENCIA DE DAÑOS SEGÚN ÍNDICES DE OSCILACIONES CLIMÁTICAS

Al comparar la cantidad de eventos anuales con la oscilación climática ENOS (Figura 6-31), el índice MEI indica que los años en los cuales se supera la cantidad promedio de eventos de marejadas indicados en la sección 6.1, la oscilación se encontraba en su fase cálida. Esto se puede apreciar en los años 1983, 1986, 1993-1995, 1997-1998, 2012, 2014 y 2015. La disminución de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico en la fase positiva o cálida de ENOS, más conocida como El Niño, facilita condiciones de generación de fuertes temporales y precipitaciones en territorio chileno (Maturana **et al.**, 2004).

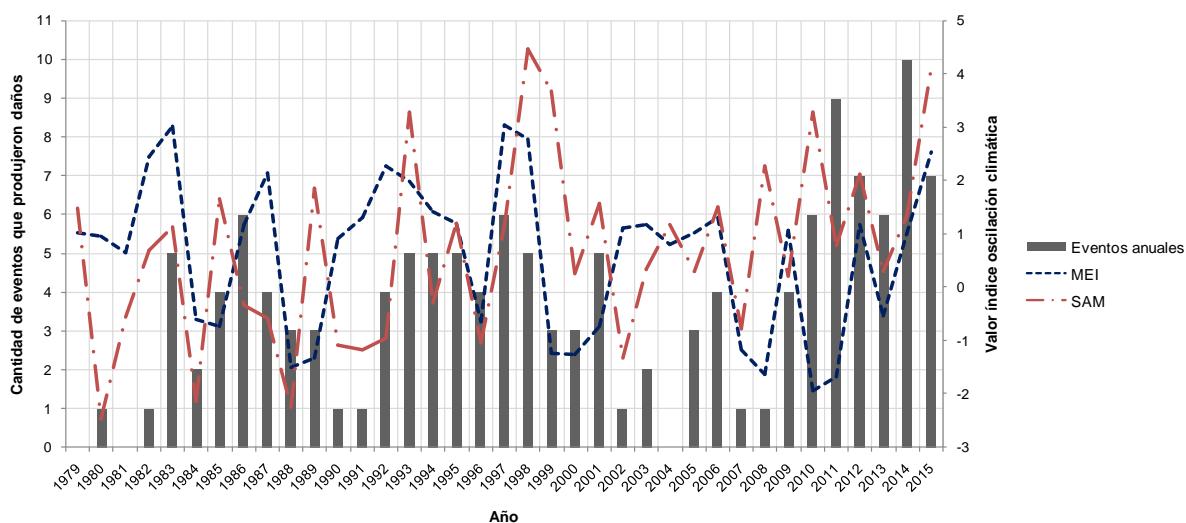


Figura 6-31: Distribución anual de eventos de marejadas con daños e impactos en las costas de Chile y máximos anuales de índices MEI y SAM, 1979-2015 (Fuente: Elaboración propia).

Existen períodos de tiempo en los cuales el valor positivo del MEI no es proporcional con la cantidad de eventos identificados, lo cual se visualiza en los intervalos 1990-1991 y 2002-2005. Para el periodo 2010-2015 no se presenta una relación clara con las fases del ENOS. Prueba de ello es lo que ocurre en los años 2010 y 2011, en los cuales se identificaron 6 y 9 eventos respectivamente en presencia de la fase fría del ENOS.

El índice SAM presenta un comportamiento similar a MEI, relacionando su fase positiva con años en los cuales se supera el promedio anual de eventos identificados. Esto se visualiza específicamente los años 1983, 1993, 1995, 1997-1998, 2001, 2010-2012, 2014 y 2015. La fase positiva de SAM genera fuertes vientos desde Australia hacia el este del Pacífico, generando campos de vientos hacia las costas de Chile (Gillet, **et al.**, 2006).

La diferencia se encuentra en los años 1990 y 1991, en los cuales SAM se presenta en su fase negativa, reflejando la disminución de eventos de marejadas en los años mencionados. Junto con esto, a diferencia de MEI, SAM se encuentra en su fase positiva el año 2010, logrando relacionarse con el aumento en la cantidad de eventos de marejadas. Este comportamiento no se repite el año 2011, en el cual SAM sigue estando en su fase positiva pero no se relaciona de la mejor forma con la cantidad de eventos encontrados para el año mencionado.

Ambos índices no indican una relación clara entre los eventos identificados en el periodo 2003 – 2005, en los cuales se tienen valores positivos en las fases de los fenómenos sin identificarse un aumento considerable en la cantidad de eventos.

En la Figura 6-32 se muestran las máximas categorías anuales de la escala de daños por marejadas elaborada desde el año 1979 y los valores de los índices MEI y SAM para los meses en los cuales ocurrieron los eventos máximos anuales. Los resultados obtenidos no indican una clara correlación entre las categorías de daños en la Escala de Campos y las fases de las oscilaciones climáticas consideradas a lo largo del periodo de tiempo expuesto en la figura mencionada.

Entre los años 1980 y 1989 el valor de MEI indica que los eventos con categoría 5 se presentan en la fase cálida del ENOS, y para eventos de categoría inferior el índice tiende a disminuir su valor. Por otra parte, al igual que lo observado en la Figura 6-31, entre los años 1990 y 1991 no se presentan grandes daños en la Escala de Campos mientras que MEI comienza a elevar su valor.

Los altos valores MEI en los años 1983 y 1997 no se relacionan directamente con la categorización obtenida con la escala de daños por marejadas, ya que los daños registrados no superan la categoría 5. De forma inversa, las categorías 5 y 6 obtenidas en los años 2011 y 2013 respectivamente, se presentan en meses con valores de fase fría del ENOS. Tampoco se logra relacionar de buena forma lo encontrado entre 2001-2002 y 2007-2009, dado que para estos periodos de tiempo se identificaron daños con baja categoría en la escala elaborada, pero el índice MEI no se presenta de forma clara en su fase negativa.

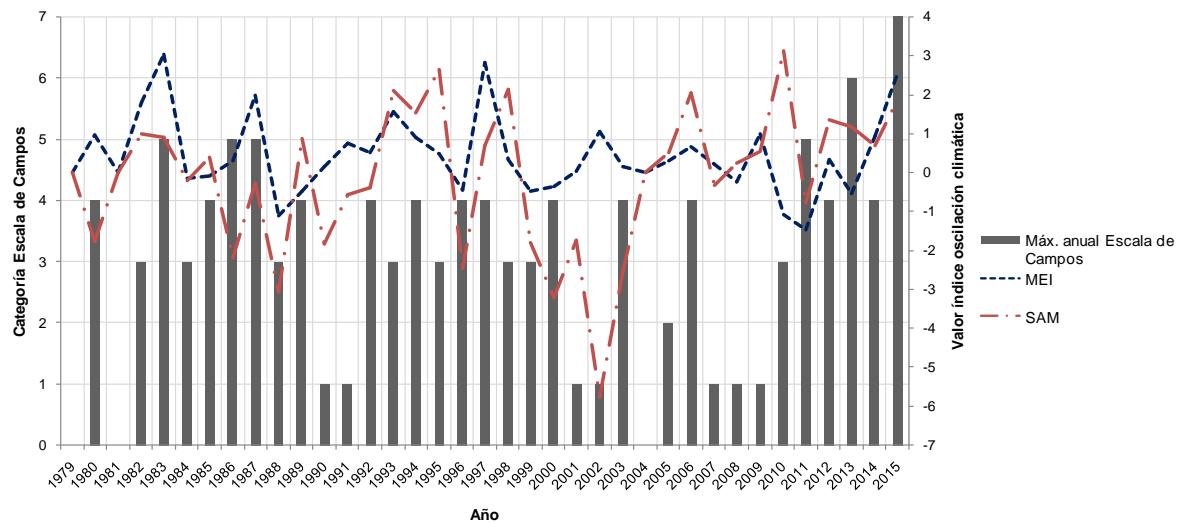


Figura 6-32: Máximos anuales en Escala de Campos e índices de oscilaciones climáticas, 1979-2015 (Fuente: Elaboración propia).

Para los dos eventos que registraron el mayor nivel de daños, se obtiene que el ENOS se encontraba en su fase cálida (El Niño), ya que en índice MEI presenta valores de 1,39 y 2,53 para los de eventos de agosto en 1965 y 2015 respectivamente (información para el año 1965 en Anexo 10-2).

El índice SAM presenta resultados opuestos a MEI en algunos períodos de tiempo. En 1990 refleja levemente la caída en la categoría de los eventos y en 1996 se produce una disminución importante en su valor, pero relacionado a un evento categoría 4. SAM también se vincula de buena forma con el valor de la Escala de Campos obtenido el año 2002, representando la disminución en categoría de daños. Estos resultados no se visualizan en los años 1986, 1996, 2000, 2001, 2005 y 2011 ya que no presentan correlaciones entre la fase positiva de la oscilación climática y la categoría máxima de daños alcanzada.

Al igual que con el índice MEI, con SAM no se aprecia una correlación en lo obtenido para el periodo 2007-2009, ya que los eventos con máximo daño anual en este intervalo de tiempo fueron clasificados con categoría 1, pero el valor del índice no presenta tendencia a disminuir.

El año 2010, SAM presenta el máximo valor entre todo el periodo de tiempo de la Figura 6-32, mientras que en Escala de Campos el evento máximo sólo alcanzó categoría 3. Por otra parte, en comparación a lo analizado con MEI, se obtiene una mejor relación para el nivel de daño del año 2013, ya que SAM está en su fase positiva para el evento con máximo daño. Adicionalmente, el valor de SAM refleja la disminución de categoría de daños desde el año 2013 a 2014.

Se obtienen resultados dispares en los eventos de categoría 7 en Escala de Campos. Para el evento de agosto de 1965, el índice SAM se encontraba en una fase que se puede considerar como neutra, presentando un valor de 0,08 para el mes y año mencionado (Anexo 10-2). En cambio, en el evento de agosto 2015, la oscilación climática estaba claramente en su fase positiva, con un valor de 1,86.

6.5.3 TENDENCIAS DE LARGO PLAZO

En la Tabla 6-30 se exponen las tendencias de largo plazo de altura significativa, periodo medio y dirección media entre los años 1979 y 2015, las cuales indican las variaciones de los parámetros de oleaje de forma anual. Se han utilizado como valores umbral los valores promedio de H_s por región expuestos en la Tabla 4-9. Los periodos medios y direcciones medias son los asociados a los valores de altura significativa en cada una de las regiones en estudio.

Tabla 6-30: Tendencia de largo plazo de H_s , T_m y D_m entre los años 1979 y 2015.

Región	H_s [m/año]	T_m [s/año]	D_m [°/año]
XV	0,004	0,007	-0,159
I	0,003	0,005	-0,228
II	0,004	0,002	-0,270
III	0,005	-0,001	-0,255
IV	0,004	0,006	-0,189
V	0,004	0,011	-0,166
VI	0,003	0,009	-0,208
VII	0,003	0,010	-0,186
VIII	0,003	0,014	-0,185
IX	0,003	0,015	-0,212
XIV	0,003	0,016	-0,201

Fuente: Elaboración propia.

Las tendencias obtenidas para la altura significativa de oleaje indican aumentos entre 0,003 y 0,005 [m/año] a lo largo de las regiones en estudio. Estos resultados indican que, de mantenerse esta tendencia, en los próximos 100 años el valor de H_s en las costas de Chile experimentará un aumento entre 0,3 y 0,5 [m], lo cual generaría eventos extremos de oleaje de mayor potencia interactuando con las diferentes obras del sector costero y alterando las actividades que en ella se realizan.

Del mismo modo, para el periodo medio de oleaje asociado al umbral de H_s , se espera que aumenten los valores de este parámetro, excepto en la III región en la cual se obtiene una tendencia negativa. En la zona norte (regiones XV, I, II y III) se obtiene un aumento promedio de 0,0033 [s/año], mientras que en las zonas centro (regiones IV, V, VI y VII) y sur (VIII, IX y XIV) se esperan incrementos mayores de T_m , con 0,009 [s/año] y 0,015 [s/año] respectivamente.

Las tendencias de dirección media asociadas a los valores umbral de altura significativa en cada región indican disminución de este parámetro por cada año. Como se analizó en secciones anteriores, en este estudio se ha identificado que en las costas chilenas las condiciones de oleaje provenientes desde direcciones más cercanas al Norte tienen una incidencia importante en la generación de daños. Si se considera que en promedio las tendencias obtenidas son de -0,205 [°/año] a lo largo de la costa, esto indica que en los próximos 100 años la dirección media de oleaje en Chile disminuirá 20,5 [°] aproximadamente, pero con condiciones de oleaje de mayor altura. Por lo tanto, no se puede establecer con certeza que la disminución en el valor de D_m se traduzca en eventos de marejadas con una menor cantidad de daños e impactos asociados.

A modo de ejemplo, en las Figuras 6-33, 6-34 y 6-35 se presentan gráficos de tendencias obtenidos en las regiones II, V y VIII en representación de las zonas norte, centro y sur respectivamente. Esto permite visualizar la forma en que aumenta H_s y T_m y disminuye D_m a lo largo del tiempo.

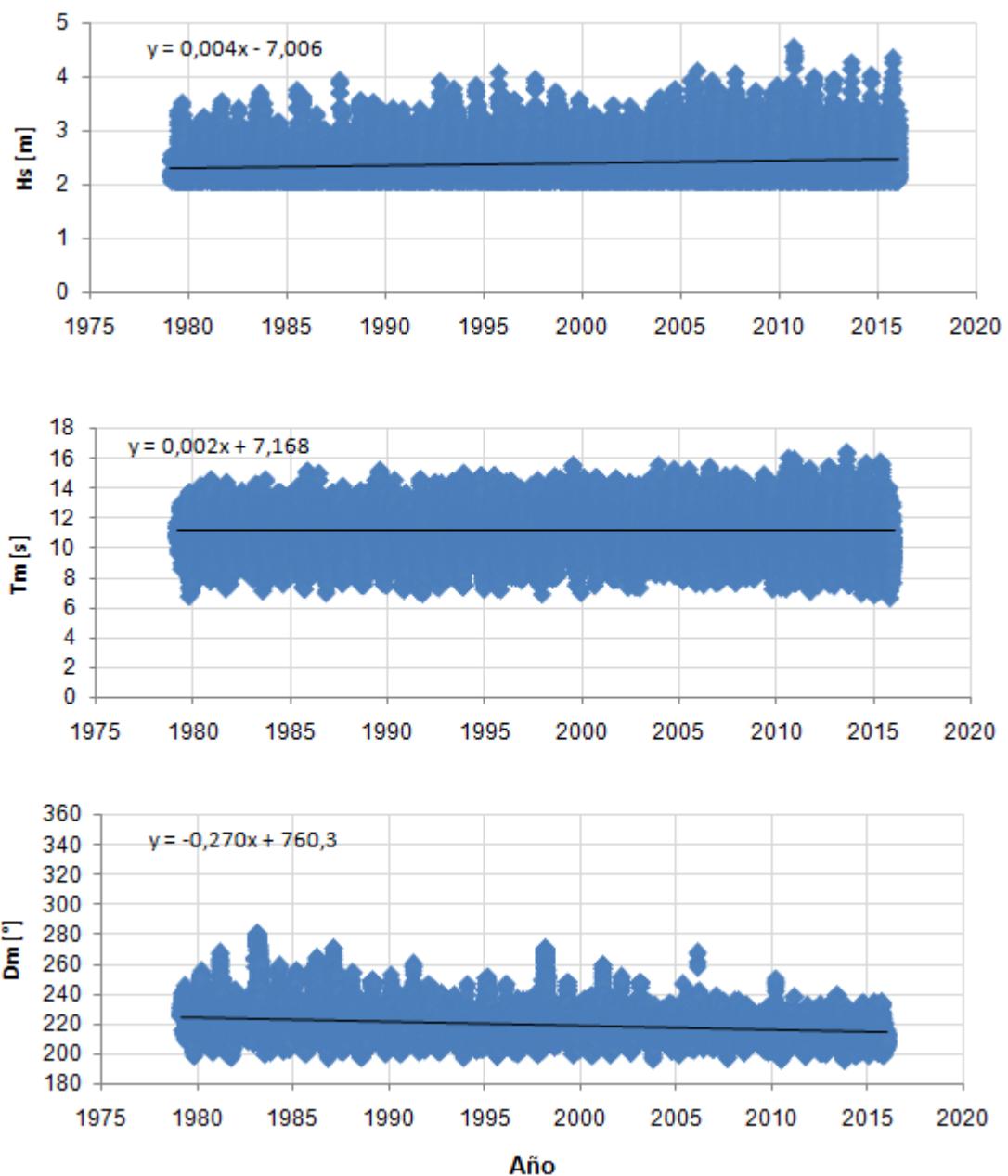


Figura 6-33: Tendencia de largo plazo H_s , T_m y D_m entre 1979 y 2015, II región (Fuente: Elaboración propia).

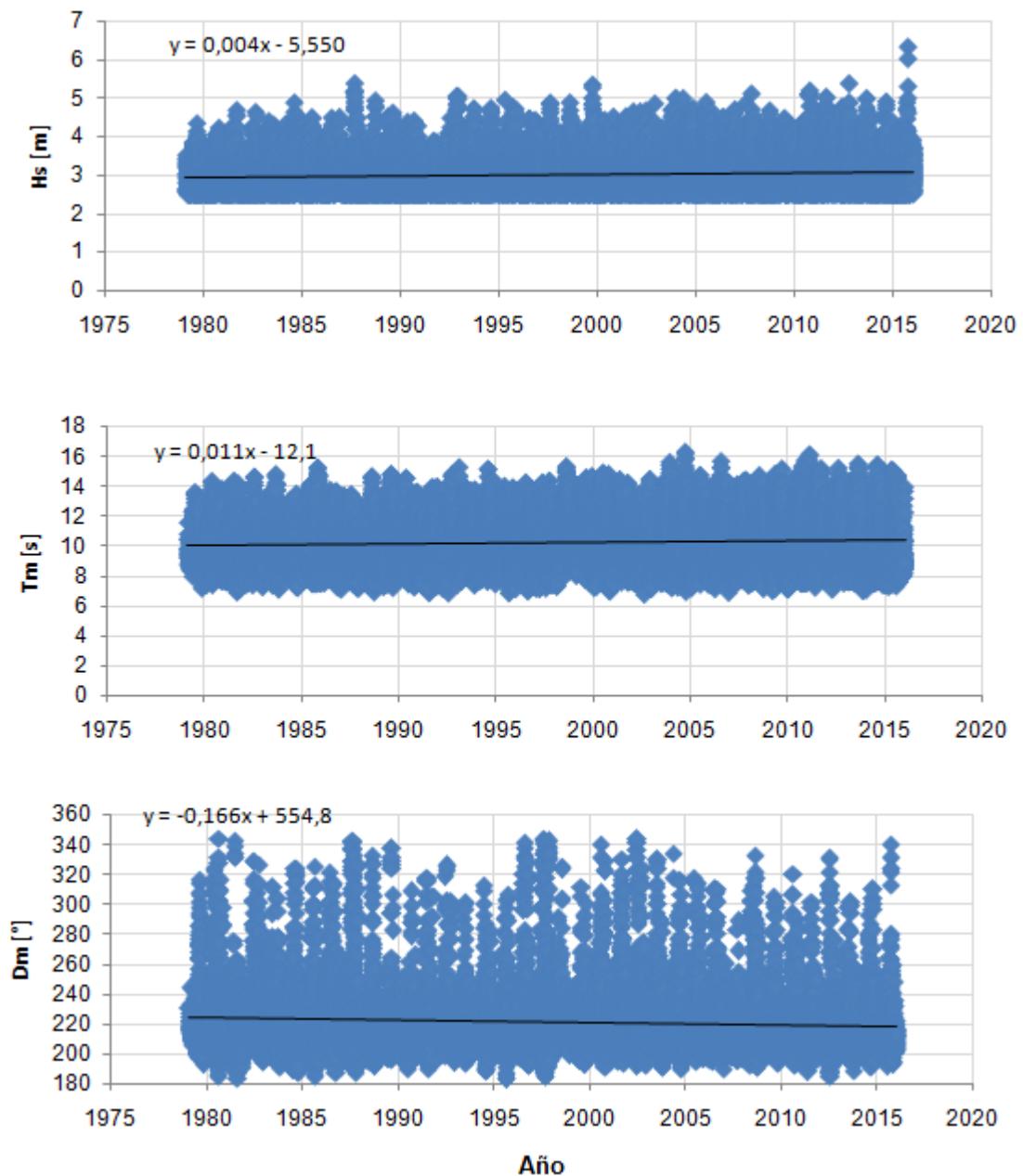


Figura 6-34: Tendencia de largo plazo H_s , T_m y D_m entre 1979 y 2015, V región (Fuente: Elaboración propia).

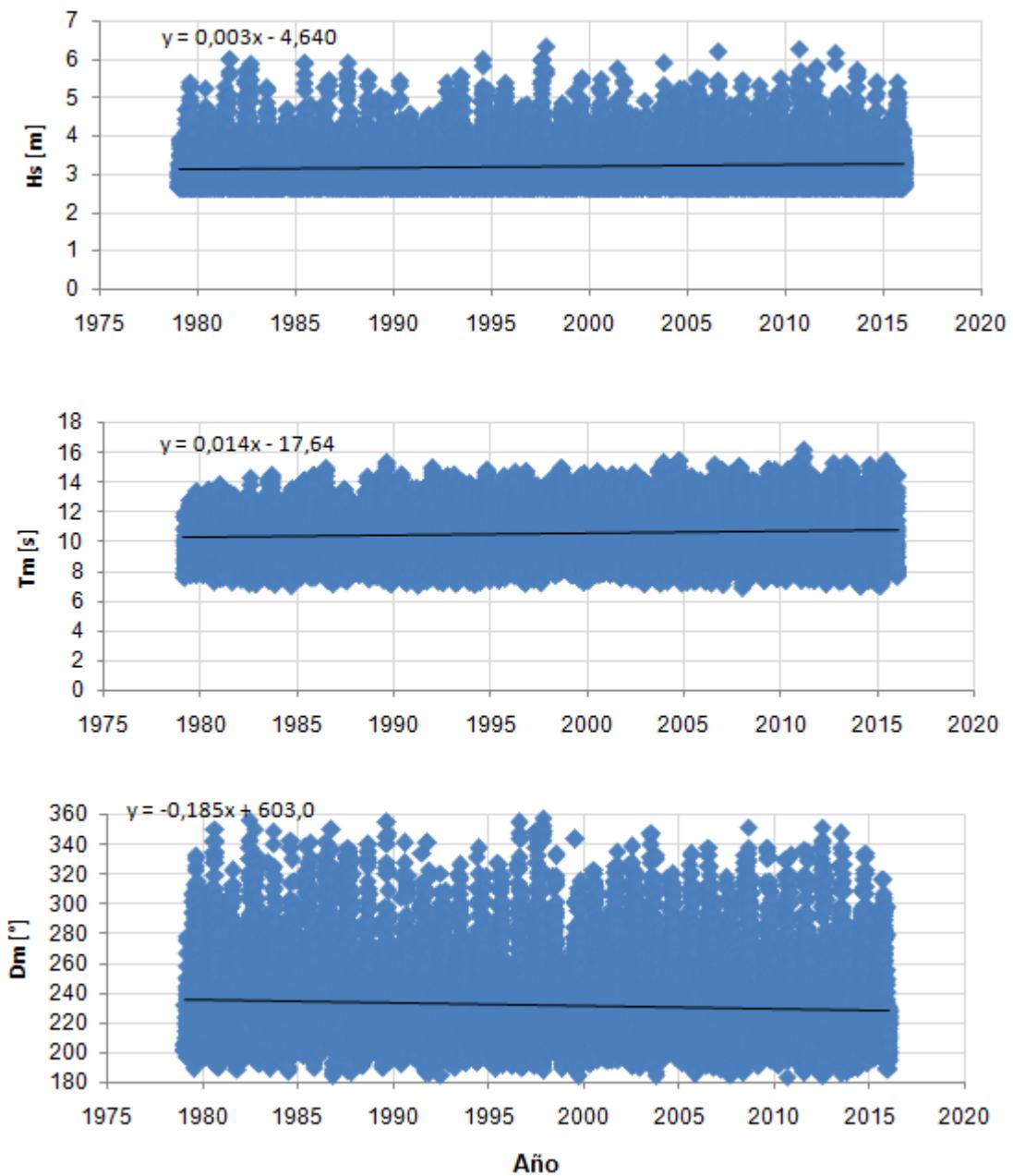


Figura 6-35: Tendencia de largo plazo H_s , T_m y D_m entre 1979 y 2015, VIII región (Fuente: Elaboración propia).

Con los registros encontrados de eventos anuales de marejadas que generan daños entre 1979 y 2015 (Figura 6-36), se obtiene una tendencia de largo plazo que indica un aumento de 0,111 [eventos/año], lo cual significa que en los próximos 100 años se deberían presentar de forma adicional 11 [eventos/año] que generen algún tipo de daño o impacto en las costas de Chile. Esto se relaciona directamente con los incrementos de H_s mencionados anteriormente, ya que condiciones de oleaje con mayor valor de altura significativa de ola aumentarían la frecuencia con la que ocurren eventos de marejadas capaces de generar daños en la línea de costa.

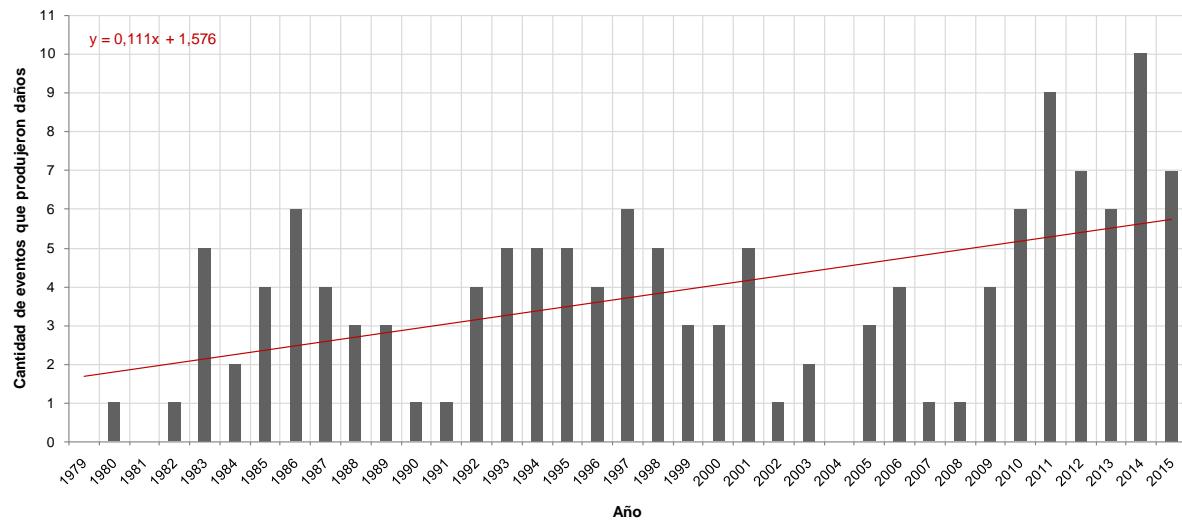


Figura 6-36: Tendencia de largo plazo de la cantidad de eventos de marejadas con daños registrados, 1979-2015
(Elaboración propia).

La Figura 6-37 muestra la máxima categoría anual asignada a los eventos de marejadas con daños según la Escala de Campos, entre los años 1979 y 2015. Al igual que lo analizado en la cantidad anual de eventos, a lo largo del tiempo se presenta una tendencia a aumentar la categoría o nivel de daños que ocurren en eventos de marejadas. Se aprecia que desde el año 2010 se produjo un notorio incremento en la categorización de daños, con eventos categoría 5, 6 y 7 en los años 2011, 2013 y 2015 respectivamente.

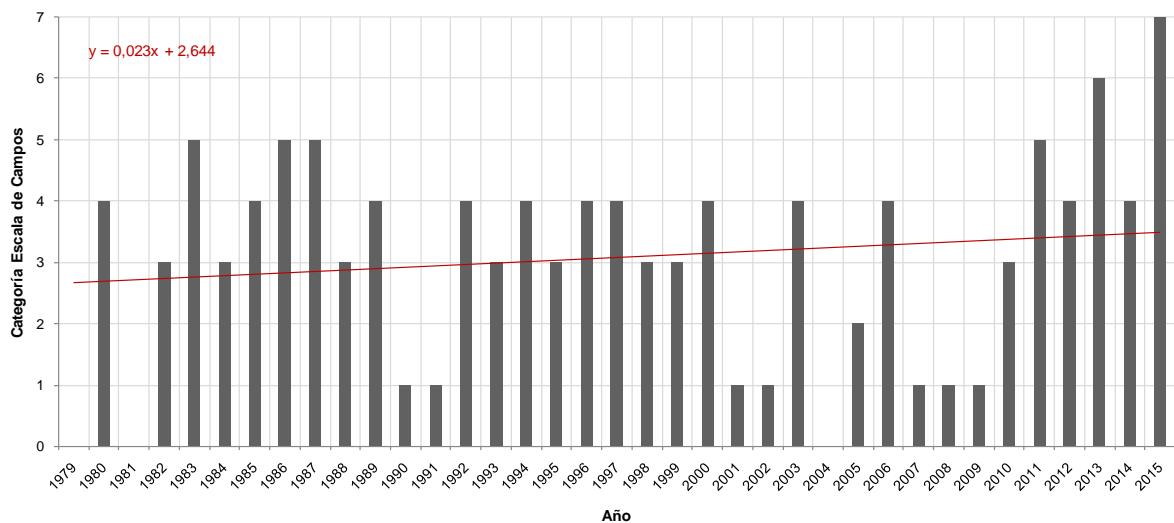


Figura 6-37: Tendencia de largo plazo de máximos anuales en Escala de Campos, 1979-2015 (Fuente: Elaboración propia).

Cabe destacar que con los años ha aumentado la inversión pública y privada en el sector marítimo y portuario, lo cual se traduce en la construcción de una mayor cantidad de obras costeras las cuales pueden resultar con distintos niveles de daños en eventos de marejadas. Esto genera un mayor registro de daños los cuales han sido categorizados en la Escala de Campos.

7 DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados expuestos en este estudio se desprenden los siguientes puntos a modo de discusión:

Una cantidad importante de registros de daños fueron identificados entre los años 2010 y 2015, esto debido a la disponibilidad de información en sitios de internet que permiten realizar búsquedas en sitios gubernamentales, periódicos nacionales y regionales y diferentes blogs informativos.

La metodología utilizada tiene inherente una incertidumbre en la identificación de las marejadas. Es posible que algunos impactos no hayan podido ser detectados a pesar del análisis exhaustivo realizado para las bases de datos de marejadas de la Armada de Chile y Era-Interim y la búsqueda de artículos de prensa.

Cabe destacar que también existe incertidumbre en los parámetros de oleaje, ya que estos dependen de la base a datos a utilizar. Esto fue cuantificado en la sección 6.2 comparando los parámetros de oleaje entregados por modelos *hindcasting* y sistemas de medición. En relación a esto, las comparaciones y ajustes entre los modelos de oleaje NOAA y ERA-Interim con mediciones de altímetro satelital y boyas del SHOA son específicamente para eventos de marejadas identificados dentro de este estudio, no representan el análisis de todo el clima de oleaje de las bases de datos.

El desarrollo de infraestructura costera y portuaria de las diferentes zonas en estudio ha resultado tener gran importancia al encontrarse mayor cantidad de registros de daños indicados en la prensa. Esto permite realizar una caracterización de los parámetros de oleaje en aguas profundas y una evaluación de daños con una mayor cantidad de información. Esto se refleja en la información obtenida principalmente para las regiones V y VIII.

La estimación de costos por reparación de infraestructura costera dañada también constituye una aproximación que tiene una incertidumbre asociada. Contar con fuentes oficiales de información, como instituciones gubernamentales que mantengan un registro constante de este tipo de eventos, permitirían cuantificar esta información de mejor manera.

No se han establecido de forma detallada los impactos por cierres de puertos en las diferentes zonas en estudio, ya que se detectó que para determinar los reales efectos es necesario recopilar información detallada de cada una de las capitanías de puerto, aduanas, empresas portuarias y agencias navieras. Por lo tanto, este estudio se limita a analizar la cantidad de cierres de puertos decretados por eventos de marejadas y la cantidad de dinero que dejan de percibir las empresas portuarias de las cuales se logró recopilar información.

El presente trabajo corresponde a un primer esfuerzo en la cuantificación de los impactos de las marejadas en Chile. Para investigaciones futuras se recomienda:

Continuar con la recopilación de información de eventos de marejadas que producen daños o impactos en las costas de Chile, ya que en el mes de enero de 2016 ya han ocurrido eventos con diversos daños los cuales no se encuentran incluidos en este estudio³⁶.

Constituir una base de datos de oleaje confiable, de largo plazo y que represente de mejor forma las condiciones extremas. Esto permitiría reducir significativamente la incertidumbre de los parámetros de oleaje en marejadas y aportaría a un mejor entendimiento de las condiciones bajo las cuales se manifiestan estos fenómenos.

En relación al punto anterior, se recomienda la inclusión de análisis espectral de oleaje y mediciones de boyas en una mayor cantidad de eventos para lograr identificar características típicas que posean las marejadas en las costas de Chile.

Analizar la probabilidad conjunta de ocurrencia de daños con información de marea astronómica y meteorológica para identificar la relación que existe entre los niveles de daños registrados y las diferentes fases de marea en las cuales se producen.

Para analizar eventos previos al año 1979, se recomienda incluir la base de datos de oleaje ERA-20C, la cual consiste en el primer reanálisis atmosférico del siglo 20 con información entre los años 1900 y 2010³⁷.

Realizar análisis para cada una de las zonas costeras expuestas a oleaje oceánico incluyendo información de oleaje en aguas intermedias o cercanas a la costa.

Estudio con un mayor nivel de detalle sobre las tendencias de largo plazo de los parámetros de oleaje considerando las proyecciones de cambio climático, para lograr establecer los futuros impactos que puedan ocurrir.

Analizar de forma específica los efectos de los cierres de puertos ocasionados por marejadas, con información detallada de empresas portuarias, agencias navieras y todos los agentes involucrados que permitan establecer las zonas más afectadas abarcando todas las variables relacionadas a este tipo de impacto.

³⁶ La Tercera *online*. Disponible en [<http://www.latercera.com/noticia/nacional/2016/01/680-665386-9-marejadas-expertos-advierten-que-podrian-extenderse-hasta-marzo.shtml>]. Accesada 29 de enero de 2016.

Los Andes *online*. Disponible en [<http://www.losandes.com.ar/article/empeora-la-marejada-en-chile-destrozos-calle-principal-de-vina-cerrada-y-prohibicion-de-acercarse-al-mar>]. Accesada 29 de enero de 2016.

³⁷ ECMWF-ERA 20C. Disponible en [<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-20c>]. Accesada 29 de enero de 2016.

8 CONCLUSIONES

La distribución anual de la cantidad de eventos de marejadas identificados muestra que existen ventanas de tiempo con duración aproximada de 6 años en las cuales se identificó una mayor cantidad de eventos. Al comparar esto con los índices de oscilaciones climáticas MEI y SAM, se obtiene que en general existe una relación entre los años en los cuales se supera la cantidad promedio anual de eventos y la fase positiva de las oscilaciones.

Los análisis estadísticos para los eventos de marejadas con daños identificados muestran que éstos se presentan con mayor frecuencia durante los meses de mayo y agosto, con ocurrencia máxima en el mes de junio. Los mayores promedios de altura de ola significativa de marejadas que producen daños se presentan en la zona sur del país (regiones VIII, IX y XIV) con valores sobre los 4 [m], periodos medios de 10 a 13 [s] y direcciones medias entre WSW y W.

Los valores de dirección media en los eventos de marejadas con daños van en aumento en las zonas del país de norte a sur. En la zona norte los rangos de dirección varían entre SW y W, mientras que en las zonas centro y sur se alcanzan direcciones menos frecuentes en comparación al oleaje reinante en Chile, específicamente eventos provenientes desde la dirección NNW.

Los índices de daño normalizado elaborados muestran que no existe una clara relación entre las alturas de ola y la mayor generación de daños. Por otra parte, la relación de los índices de daños y la diferencia entre la dirección media de cada evento de marejadas y el promedio de las direcciones medias de toda la base de datos ERA-Interim, indica que el oleaje produce más impactos cuando proviene de direcciones más hacia el Norte que el promedio. Con los reportes de daños identificados, se obtiene que en Chile oleaje incidente desde el cuarto cuadrante tiene la capacidad de producir mayor cantidad de daños debido a que la orientación que tienen gran parte de las bahías se encuentran expuestas a aquellas direcciones. Un ejemplo de esto es que muchos de los puertos existentes en territorio chileno se encuentran orientados hacia el Norte y bien protegidos de oleaje proveniente desde el Sur (condición reinante en Chile), pero expuestos a condiciones incidentes desde el Norte.

Los daños generados por marejadas se producen para un amplio rango de valores de la potencia del oleaje, donde se puede alcanzar valores que superan 10 veces la potencia promedio y la mayor cantidad de daños se producen para potencias superiores a 2 veces el promedio. Como es de esperarse, la relación de los índices de daños con las alturas y potencias normalizadas presentan tendencias similares.

La información de incidencia de daños según parámetros de oleaje indica que los daños por marejadas se presentan en un rango de periodos medios entre 8 y 16 [s]. Adicionalmente, la probabilidad de ocurrencia de daños aumenta para oleaje proveniente desde direcciones más cercanas al Norte. Con los registros de daños encontrados y la información de oleaje analizada, se establece que en presencia de condiciones de oleaje con altura significativa de

ola mínima entre 3,5 y 4,0 [m], proveniente desde direcciones medias iguales o mayores a 270 [°], es probable que se produzcan daños de consideración en sectores costeros, con sobrepasos, daño a infraestructura costera y daños a locales comerciales y viviendas.

En todas las zonas en estudio el impacto más frecuente corresponde a cierres de puerto. En este contexto, con la información recopilada de las diferentes empresas portuarias, se obtiene que monetariamente la V región es la que presenta mayores costos por efecto de suspender sus operaciones.

Se encontró una gran cantidad de embarcaciones dañadas, dentro de las cuales el daño a embarcaciones menores abarca el 83% del total de naves encontradas con daños. Asociado a esto, se identificó que la mayor cantidad de personas afectadas son pescadores, quienes presentan la mayor tasa de mortalidad debido a eventos de marejadas.

El daño a infraestructura costera, locales comerciales y viviendas ocurre para los mayores valores promedio de H_s y potencia. La V región presenta un mayor registro en la cantidad de infraestructura costera dañada y los mayores costos asociados a la reparación de obras. En la zona norte, específicamente en Antofagasta, Chañaral y Coquimbo, también se presentan costos elevados por daños a infraestructura, en los cuales los perjuicios económicos superan los mil millones de pesos.

El porcentaje obtenido entre los costos por daños el año 2015 y la inversión realizada por la Dirección de Obras Portuarias el año 2014, representa un valor considerable tomando en cuenta que es un costo que se debe asumir junto con todas las demás obras que se pretenden ejecutar.

La escala de magnitud de impacto de daños por marejadas (Escala de Campos) ha permitido categorizar los eventos de marejadas con daños, logrando identificar que los eventos más dañinos se han presentado con un periodo de retorno cercano a los 50 años, en agosto de los años 1965 y 2015.

En general, no se ha encontrado una relación clara entre los eventos de categoría máxima anual en la Escala de Campos y las fases de las oscilaciones climáticas ENOS y SAM. Los dos eventos más dañinos se presentaron en fase de El Niño, con valor de 1,39 en 1965 y 2,53 en 2015 en índice MEI. Para el índice SAM, el evento de 1965 se encontraba en una fase que se puede considerar neutra, mientras que en 2015 los daños ocurrieron bajo fase positiva.

Las tendencias de largo plazo en la extensión territorial considerada indican aumentos entre 0,003 y 0,005 [m/año] en el valor de altura significativa, entre los años 1979 y 2015. Del mismo modo, la cantidad anual de eventos y las categorías máximas anuales en la Escala de Campos indican que los eventos de marejadas van en aumento en cuanto a cantidad e intensidad.

9 REFERENCIAS

- Ahlonsou, E., Ding, Y. & Schimel, D. 2001. Climate change 2001: The scientific basis.
- Araya, J. 1979. Las Incidencias Cataclismáticas de las Bravezas en la Evolución de la Costa de Chile Central. Departamento de Geografía, Universidad de Chile.
- Australian Government, Bureau of Meteorology 2012. Record-breaking La Niña events.
- Baart, F., Bakker, M., van Dongeren, A., den Heijer, C., van Heteren, S., Smit, M., van Koningsveld, M. & Pool, A. 2011. Using 18th century storm-surge data from the Dutch Coast to improve the confidence in flood-risk estimates. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuente, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., Uppala, S. & Simmons, A. 2011. The ERA-Interim archive, Version 2.0.
- Beyá, I. & Beyá, J. 2013. Variación del Parámetro de Acentuación del Máximo del Espectro Sintético JONSWAP Ajustado a Mediciones de Oleaje Frente a las Costas de Chile Central. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXI Congreso Chileno de Hidráulica.
- Beyá, J. & Winckler, P. 2012. Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis. XII Jornadas Francisco Javier Domínguez. SOCHID, Chile.
- Bretschneider, C. L. 1952. The Generation and Wind Waves in Deep Water. American Geophysical Union, Vol. 33, Number 3.
- Brito, J. L. 2009. Catástrofes Históricas Naturales y Causadas por el Hombre Ocurridas en el Territorio de San Antonio entre 1556 y el 2008.
- Caballero, M., Lozano, S. & Ortega, B. 2007. Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: Una Perspectiva desde las Ciencias de la Tierra. Revista Digital Universitaria, Volumen 8, Número 10.
- Cahill, B. & Lewis, T. 2014. Wave period ratios and the calculation of wave power. *Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium*.
- Campos, R., Beyá, J. & Mena, M. 2015. Cuantificación de los Daños Históricos a Infraestructura Costera por Marejadas en las Costas de Chile. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Chañarcillo. Copiapó: Sociedad periodística El Chañaral, 1991.
- Chawla, A., Spindler, D. & Tolman, H. 2011. WAVEWATCH III Hindcasts with Re-analysis winds. Initial report on model setup. Environmental Modeling center, Marine Modeling and Analysis Branch.

- Chawla, A., Spindler, D. & Tolman, H. 2012. 30 Year Wave Hindcasts using WAVEWATCH III with CFSR winds. Environmental Modeling center, Marine Modeling and Analysis Branch.
- Coastal Engineering Manual 2002. Part II, Chapter 1: Water Wave Mechanics.
- Coastal Engineering Manual 2003. Part II, Chapter 2: Meteorology and Wave Climate.
- Coastal Engineering Manual 2006. Part II, Chapter 5: Water Levels and Long Waves.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe 2012. La Economía del Cambio Climático en Chile.
- Cruz, J. 2008. Ocean wave energy, current status and perspectives. Springer Series in Green Energy and Technology.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Murray, S. & Wheeler, D. 2009. Climate Change and the Future Impacts of Storm-Surge Disasters in Developing Countries. Center for Global Development.
- Dean, R. & Dalrymple, R. 2001. Coastal Processes with Engineering Applications. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.
- Del Canto, S. & Paskoff, R. 1983. Características y evolución geomorfológica actual de algunas playas de Chile central, entre Valparaíso y San Antonio (V Región). Revista de Geografía Norte Grande, 10: 31-45.
- Dirección de Obras Portuarias 2009. Política de Infraestructura Portuaria y Costera al 2020.
- Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas (DOP-MOP) 2014. Balance de gestión integral año 2014.
- Dirección Meteorológica de Chile, Subdirección Climatología y Meteorología Aplicada s.f. Sistemas Frontales.
- El Centro. Talca: Alnor, 1989.
- El Día. La Serena: P. Vega, 1944.
- El Diario Austral. Valdivia: Sociedad periodística Araucanía, 1982.
- El Mercurio de Antofagasta. Antofagasta: Empresa periodística El Norte, 1906.
- El Mercurio de Calama. Calama: Empresa periodística El Norte, 1968.
- El Mercurio de Valparaíso. Valparaíso: [s.n.], 1827.
- El Rancagüino. Rancagua: [s.n.], 1938.
- El Sur. Concepción: [s.n.], 1882.

- Empresa Portuaria de Antofagasta (ANFPORT) 2013. Memoria anual año 2013.
- Estrada, M. 2001. Cambio climático global: causas y consecuencias. Revista de información y análisis numérico, Vol. 16.
- Estrella de Arica. Arica: Empresa periodística El Norte, 1976.
- Estrella de Concepción. Concepción: Empresa Diario El Sur, 1995.
- Estrella de Iquique. Iquique: Empresa periodística El Norte, 1966.
- Estuardo, G. 2012. Estadística y Probabilidades. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Figueroa, R., Riquelme, D. & San Martín, C. s.f. Definiciones y Conceptos Básicos de la Ingeniería Marítima y Portuaria.
- Garreaud, R. 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. Revista Tierra Adentro, No. 93.
- Gillet, N., Kell, T. & Jones, P. 2006. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. Geophysical Research Letters, Vol. 33.
- González, M. 2009. Análisis de los Desastres Socio-Culturales en la Ciudad de Valparaíso (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Chile.
- Goosse, H., Barriat, P., Lefebvre, W., Loutre, M. & Zunz, V. 2010. Introduction to climate dynamics and climate modeling.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W. & Walden, H. 1973. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutches Hydrographisches Institut, Hamburg.
- Hidalgo, H., Gallardo, A., Beyá, J. & Esparza C. 2015. Calibración del Modelo WAVEWATCH III para las Costas de Chile. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Holthuijsen, L. 2007. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press.
- Houghton, D. 2002. Introduction to Climate Change: Lecture Notes for Meteorologists. World Meteorological Organization, No. 926.
- Imprenta Victoria 1927. Valparaíso en 1827.
- Instituto Nacional de Estadísticas 2003. Resultados Generales CENSO 2002.

Instituto Nacional de Estadísticas 2010. Medio Ambiente, Informe Anual 2010.

Instituto Nacional de Estadísticas 2014. Compendio Estadístico 2014.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-6-5.html [accesada 29 de diciembre de 2015].

Inzunza, J. s.f. Biofísica: Climatología. Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

Izaguirre, C. 2010. Estudio de la Variabilidad Climática de Valores Extremos de Oleaje (tesis doctoral). Universidad de Cantabria, España.

Kiehl, J., Trenberth, E. 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.

Liu, Z. & Frigaard, P. 2001. Generation and Analysis of Random Waves. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning. Instituttet for Vand, Jord og Miljoteknik, Aalborg Universitet.

Mantua, N., Hare, S., Zhang, Y., Wallace, J. & Francis, C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production.

Marshall, G. 2003. Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses. Journal of Climate, Vol. 16.

Martin, C. s.f. Los Diques Flotantes de Valparaíso.

Martínez, J. & Fernández, A. 2004. Cambio climático: una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México.

Maturana, J., Bello, M. & Manley, M. 2004. Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Departamento de Oceanografía.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) 1996. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos.

Molina, M. 2011. Estudio No Estacionario de Clima Medio de Oleaje en la Costa Central de Chile (tesis de pregrado). Universidad de Valparaíso, Chile.

Monárdez, P., Acuña, H. y Scott, D. 2008. Evaluation of the Potential of Wave Energy in Chile. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2008. Estoril, Portugal.

- National Aeronautics and Space Administration 2015. Global Climate Change, Vital Signs of the Planet. <http://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/> [accesada 29 de Diciembre de 2015].
- National Climatic Data Center 2003. A Climatology of 1980-2003 Extreme Weather and Climate Events. U.S. Department of Commerce.
- National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory 2015. Multivariate ENSO Index (MEI) <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/index.html> [accesada 29 de Diciembre de 2015].
- National Oceanic & Atmospheric Administration, Hurricane Research Division (NOAA) 2004. ¿Qué es un ciclón extratropical? http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A7_esp.html [accesada 8 de Agosto de 2015].
- National Weather Service-National Centers for Environmental Prediction e Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad 2015. El Niño/Oscilación del Sur, Discusión Diagnóstica.
- Needham, H. & Keim, B. 2011. Storm Surge: Physical Processes and an Impact Scale. Recent Hurricane Research-Climate, Dynamics and Societal Impacts.
- Organización Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) 1997. Informe Consolidado Temporales Junio 1997.
- Organización Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) 2001. Temporales del Siglo XX.
- Ortega, M, Minguito, M & Moñino, A 2012. Oscilaciones de largo período: Marea meteorológica. Grupo de dinámica de flujos ambientales, Universidad de Granada.
- Paskoff, R. 2010. Capítulo 9.1: Geomorfología de la costa de Chile. En. Geología marina de Chile. Díaz-Naveas, J., Frutos, J. (2010).
- Pontificia Universidad Católica de Chile s. f. Dinámica de los Océanos: Las marejadas o bravezas. Revisado última vez 21 de Mayo de 2013, http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h624.html
- Proyecto LATin 2011. Introducción al estudio de fuentes renovables de energía. <http://escritura.proyectolatin.org/introduccion-al-estudio-de-fuentes-renovables-de-energia/prologo-e-introduccion/> [accesada 29 de Diciembre de 2015].
- Red Iberoamericana 2009. La Gestión del Litoral Chileno: Un Diagnóstico. Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.

- Reyes, E. y Romero, H. 1977. Climatología e interacción océano-atmósfera en la bahía de Valparaíso. Revista Biología Marina, Departamento de Oceanología, Universidad de Chile, 16 (2): 125-159.
- Reyes, J, Benavente, J, Gracia, F & López-Aguayo, F 1996. Efecto de los temporales sobre las playas de la bahía de Cádiz. Sociedad Española de Geomorfología.
- Risk Management Solutions 2003. 1953 U.K. Floods Retrospective.
- Rodríguez, J. A. 1937. Fenómeno oceánico ocurrido en la costa Norte. Anuario Hidrográfico Marítimo de Chile n°36: 169-179.
- Rojas, C 2001. Eventos naturales extremos durante el siglo XX en la provincia de Valdivia, Sur de Chile. Instituto de Geociencias, Universidad Austral de Chile.
- Santibáñez, J. 1928. Una braveza de mar en la costa de Chile. Anuario Hidrográfico Marítimo de Chile n°34: 615-656.
- Sarochar, H. 2013. Introducción a la Meteorología General. Universidad Nacional de la Plata.
- Schott, T., Landsea, C., Hafele, G., Lorens, J., Taylor, A., Thurm, H., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. 2012. The Saffir-Simpson Hurricane Scale.
- Scott, D., Resio, D. y Pantoja, C. 2002. Swell Propagation and Nearshore Wave Climate. Documento de la base de datos del Coastal Hydraulics Laboratory (CHL) USACE.
- Servicio de Empresas (SEP), Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. <http://www.sepchile.cl> [accesada 11 de Agosto de 2015].
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile 1992. Glosario de Marea y Corrientes, 2° Edición. Publicación 3013.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile 1999. Instrucciones Oceanográficas N°2: Método Oficial para el Cálculo de los Valores No Armónicos de la Marea, 2° Edición. Publicación 3202.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile 2005. Instrucciones Oceanográficas N°1: Especificaciones Técnicas para Mediciones y Análisis Oceanográficos, 3° Edición. Publicación 3201.
- Servicio Nacional de Geología y Minería 2015. Registro de los principales desastres de origen geológico en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados entre 1980 y 2015.
- Silva, R. 2005. Análisis y descripción estadística del oleaje. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Sverdrup, H. U. 1942. Oceanography for Meteorologists. New York: Prentice-Hall.
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. & Fleming, R. 1942. The oceans: Their physics, chemistry and general biology. New York: Prentice-Hall.
- Sverdrup, H. U. & Munk, W. 1947. Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting. United States Navy Department, Hydrographic Ofice.
- The Open University 1999. Waves, Tides and Shallow Water Processes, 2° Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Thompson, D. & Wallace, J. 2000. Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. *Journal of Climate*, Vol. 13.
- Tolman, H. & Chalikov, D. 1996. Source Terms in a Third-Generation Wind Wave Model. Ocean Modeling Branch, Environmental Modeling Center, NOAA/NCEP, Camp Spring, Maryland.
- Tolman, H. & the WAVEWATCH III Development Group 2014. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. Environmental Modeling center, Marine Modeling and Analysis Branch.
- Trenberth, K. 1997. The Definition of El Niño. National Center of Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Center for Operational Oceanographic Products and Services 2000. Tide and current glossary.
- Union of Concerned Scientists 2013. Causes of Sea Level Rise.
- Universidad de Cantabria (UNICAN) 2000. Documento de referencia Volumen I: Dinámicas. Grupo de Oceanografía y de Costas.
- University Corporation for Atmospheric Research 2015. Cycles, Dipoles and Oscillations. <https://www2.ucar.edu/for-staff/update/cycles-dipoles-and-oscillations> [accesada 29 de Diciembre de 2015].
- Voituriez, B. & Jacques, G. 2000. El Niño: realidad y ficción. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Wang, S., Huang, J., He, Y. & Guan, Y. 2014. Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on Global Land Dry-Wet Changes.
- Winckler, P., Contreras, M., Beyá, J. & Molina, M. 2015. El Temporal del 8 de Agosto de 2015 en la Bahía de Valparaíso. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

10 ANEXOS

Tabla 10-1: Registro de daños por marejadas identificados, 1823-2015.

Día	Mes	Año	Región	Lugar	Efecto
10	Junio	1823	V	Valparaíso	Temporal en Valparaíso que ocasionó inmensos daños y que trajo a tierra 16 buques mercantes de los 60 que había en la rada.
8	Junio	1827	V	Valparaíso	Temporal que afectó a gran parte del país. Tres buques arrojados a la playa por el viento del Norte. Se menciona como "el más formidable y destructor que se hubiera experimentado en Chile". El mercante Valdivia garreó sus anclas y se estrelló contra la proa de la corbeta rompiéndole el bauprés.
7	Junio	1847	V	Valparaíso	Se varó bergatín Eduard Marie en actual plaza Aníbal Pinto.
8	Julio	1851	V	Valparaíso	Destrucción del paquebote americano Betty Bliss estrellándose contra los peñascos de la playa que daban frente a los escombros del incendio del 15 de Diciembre de 1850, en el terreno del señor Josué Waddington, cuya muralla desde la Cueva del Chivato (actual subida Concepción) hasta la casa que ocupa la comisaría y la administración de correos ha sido también víctima de las olas. En el Castillo se varó el bergatín Novión y el vapor Perú.
30	Marzo	1853	V	Valparaíso	Se hunden los bergatines Cadete, California Dorada y Lord Cochrane.
14	Julio	1855	XIV	Corral	Barca Adela Martínez se hunde frente a corral por temporal.
7	Junio	1862	V	Valparaíso	Dique flotante de Nicolás F. Tietgen se hunde en la bahía.
	Mayo	1871	V	Viña del Mar	Vapor de la república de Arauco varado en Viña del Mar.
10	Agosto	1872	V	Valparaíso	Temporal en Valparaíso. Vapor Ville de Bordeaux echa a pique la fragata Deva y el bergatín Pascualita.
24	Mayo	1875	V	Valparaíso	Ex corbeta Esmeralda se varó frente a actual Av. Francia. También se varó la barca Julio Bordes y se hunden los veleros Trujillo y Ejeric.
25	Abril	1877	V	Valparaíso	Con temporal en Valparaíso se registran 76 [mm] de agua caída y 102 [mm] en Santiago. Marejadas sobre malecón.
31	Mayo	1878	V	Valparaíso	Se pierden al menos 15 veleros en el puerto.
26	Junio	1881	V	Valparaíso	Con temporal en Valparaíso se varó la barca Delfian en el sector del Almendral (actual muelle Barón).
25	Abril	1884	V	San Antonio	Buque Aconcagua naufraga frente a las costas de San Antonio con fuertes marejadas.
11	Junio	1886	V	Valparaíso	Se varan barca Pondicherry y vapor Guaicurú.
14	Junio	1888	V	Valparaíso	Bergantín Elisa se varó durante un fuerte temporal.

24	Mayo	1891	V	San Antonio	Con temporal en San Antonio naufragó el buque de carga Natalia.
6	Julio	1891	V	Valparaíso	Se producen al menos ocho naufragios de buques.
15	Agosto	1899	V	Valparaíso	Fuerte temporal en la bahía de Valparaíso causa inundaciones y corte de vías férreas.
14	Agosto	1900	V	Valparaíso	Temporal en la bahía de Valparaíso. La chata Julia colisiona y hunde al ex vapor Toltén.
2	Junio	1903	V	Valparaíso	Se hunden ex vapor Huanay, buque de pasajeros Arequipa y dos veleros. Durante el mismo temporal se hunde también la draga Holanda y otras embarcaciones menores.
1	Junio	1904	V	Valparaíso	Se varan velero Chivilingo, la barca John y fragata Floylesdale.
8	Junio	1904	V	Valparaíso	Durante otro temporal en Valparaíso velero Yosemite naufraga frente a Punta Curaumilla en Launa Verde.
		1907	V	Valparaíso	Fuerte oleaje en malecón por temporal en Valparaíso.
	Mayo	1905	V	Valparaíso	Cierre de puerto.
31	Mayo	1906	V	Valparaíso	Se hunde la barca Brenda frente al puerto de Valparaíso.
10	Agosto	1908	V	Valparaíso	Vapor Bessie vara contra la costa durante otro violento temporal de invierno: los llamados "nortazos".
22	Agosto	1908	IX	Toltén	Barca Hydra se vara frente a la bahía de Toltén durante un temporal.
3	Abril	1911	V		Fuerte temporal rompe los mástiles de la barca Bonneveine que llega en remolque hasta San Antonio.
21	Junio	1911	I y II		Zozobraron lanchas, botes, chalupas y un buque cargado con 100 toneladas de salitre y quinientas de carbón.
25	Junio	1913	V	Valparaíso	Barca Calbuco es varada en Valparaíso para evitar su naufragio durante temporal.
26	Mayo	1915	V	Valparaíso	Con un tremendo temporal se hunde el viejo dique flotante de madera "Valparaíso" construido en el año 1864.
6	Julio	1916	V	Horcón	Remolcador SVIP se pierde frente a las costas de Horcón durante un temporal.
	Mayo	1919	V	Valparaíso	Numerosas naves se fueron a pique y al menos 20 tripulantes perecieron. Entre los grandes vapores que se hundieron estaban El Tanis y El Sais, varios veleros de cuatro palos como El Pelikan y sobre un centenar de lanchas y otras embarcaciones menores.
7	Junio	1919	V	Valparaíso	Naufragio del velero Ricardo Orchard.
11	Julio	1919	V	Valparaíso	Uno de los grandes temporales en Valparaíso. Más de 30 buques se fueron a pique o quedaron varados en distintos puntos.
12	Agosto	1919	V	Valparaíso	Veleros Petschili y Posorja varan en sector Barón.
21	Enero	1921	V	Valparaíso	Se hunde dique Santiago a consecuencia de la violencia de un temporal que azotó a la bahía y a la ciudad.

28	Agosto	1922	IV	Coquimbo	Naufragio de ex vapor Itata (CSAV) durante un temporal en Coquimbo.
4	Junio	1924	II	Pisagua	Pisagua: destrucción total muelle 4 perteneciente a la compañía salitrera Aguada.
4	Junio	1924	II	Antofagasta	Destrucción de 30 [m] de parapeto en molo del puerto.
4	Junio	1924	IV	Los Vilos	"Fuéreronse dos lanchas al garete, varándose en la playa de Quelén y una balandra llamada "Sorlez". Las más altas mareas llegaron a más de 50 [m] fuera del límite conocido.
5	Junio	1924	XV	Arica	"Se experimentó marea extraordinaria, saliendo el mar hasta el parque de los edificios, produciendo grandes perjuicios. Se han ido a pique, en el fondeadero, 4 lanchas de carga y a la playa 19".
5	Junio	1924	I	Tocopilla	Se destruyó un lanchón y se fueron a garete 5 botes.
6	Junio	1924	IV	Los Vilos	Mareas alcanzaron más o menos 50 [m] más afuera de su límite normal, levantándose en playas de Quelén 6 [m] de altura.
8	Junio	1924	III	Chañaral	"Desde el 3 principió alta marea, declarándose recio temporal el 4, cesando el 5, causando pérdidas considerables, destrucción malecón, pérdida de 2 lanchas, 2 botes y mitad muelle Casa Francesa
25	Junio	1924	V	Quintero	Buque de carga Arauco se hunde al Norte de Quintero con fuerte temporal.
10	Junio	1926	V	Valparaíso	Ex vapor Miramar se vara. Naufragio de la barca Don Roberto durante un temporal.
1	Junio	1928	V	Valparaíso	Vapor Arrayán y carguero Bet Chala se varan en playa Chacabuco.
6	Julio	1928	VIII	Lebu	Ex transporte Angamos se hunde durante un temporal frente a las costas de Lebu.
30	Enero	1929	V	Valparaíso	Temporal en Valparaíso, se hunden 4 buques: Concepción, Ilo, Rotterdam y Westerlide.
9	Agosto	1929	II	Antofagasta	Destrucción de obras marítimas del puerto.
9	Agosto	1929	III	Chañaral	En Chañaral se destruyó el malecón fiscal del puerto.
9	Agosto	1929	V	Viña del Mar	Olas desalojaron el campamento de la firma Parsons y algunas casas vecinas.
5	Septiembre	1938	V	Quintero	Buque de carga Araucanía se hunde con temporal frente a bahía de Quintero.
22	Mayo	1940	V	Valparaíso	Durante inmenso temporal el dique flotante Valparaíso II se da vuelta de campana y se hunde con el vapor Chile en su interior.
15	Agosto	1941	V	Valparaíso	Daños en las obras del puerto.
6	Agosto	1944	V	Valparaíso	Naufragio de naves.
3	Febrero	1945	V	Valparaíso	Naufragio de 5 faluchos.
5	Mayo	1948	XV	Arica	Sesenta lanchones quedaron al garete. Diez buques cargados se hundieron.

	Junio	1951	V	Valparaíso	Zozobra en Valparaíso el yate San Miguel y se hundieron una veintena de faluchos.
	Mayo	1952	V	Valparaíso	En Valparaíso, los destrozos los sufrieron los faluchos y barcos.
23	Mayo	1953	V	Valparaíso	Dos yates, dos remolcadores y un petrolero naufragó. La Av. Libertad en Viña del Mar resultó totalmente inundada.
27	Mayo	1953	V	Valparaíso	Remolcador Mataquito se pierde durante un temporal.
18	Agosto	1953	V	Valparaíso	Se hundió el remolcador, se estrellaron 6 faluchos y se inundaron las instalaciones de la refinería de petróleo.
26	Mayo	1957	V	Valparaíso	Balsa Tahiti Nui suelta remolque con temporal y se hunde.
27	Junio	1963	V	Valparaíso	Temporal en la quinta región, el mar inundó la Av. Perú. Se varan los buques Algarrobo en muelle Barón y Naguilan en caleta Portales.
8	Agosto	1965	VIII		Puertos de Talcahuano, Lirquén y San Vicente cerrados. Viento alcanzó 80 [km/h]
9	Agosto	1965			Temporal como no se ha visto en años. Vientos huracanados se desplazaron hacia Valparaíso e Isla Juan Fernández, en esta última el temporal tuvo grado 10.
10	Agosto	1965	VIII		Destruida planta ballenera de la firma Macaya Hnos. ubicada en caleta Chome (pérdida estimadas en 150 millones según sus dueños). Un falucho, propiedad de la empresa portuaria, se hundió cargado con 20 tambores de aceite para motor. El mar inundó casas en Tumbes: El fuerte oleaje, junto con destruir los muros de defensas construidos por los pescadores, hundió dos lanchas pesqueras y causó daños en viviendas las cuales fueron evacuadas. Sobre pasos. Mar se llevó una escuela en caleta El Morro (Lota). Radioestación de la Fuerza Aérea de Hualpencillo indicó que viento alcanzó rachas de 112 [km/h].
10	Agosto	1965	V		Sobre pasos y daños en Av. Perú. Familias evacuadas. Suspensión de trenes (socavón en vía férrea) y autobuses. Socavón en Av. La Marina. Miramar inundado en parte baja. Destrucción cuartel de 4º cía. de bomberos. Daños en muros de sanatorio en 15 Norte, pacientes fueron a otro dormitorio. Destrucción de defensas balneario Recreo y el club de Yates olas barrieron el embarcadero y las dependencias de la institución.
10	Agosto	1965	VIII		El mar se llevó 30 casas (20 en caleta El Morro y 10 en Pueblo Hundido en Lota). Todas las caletas ubicadas entre Coronel y Lota (zonas más afectadas) fueron prácticamente barridas. "Olas de 30 metros de altura arrastraban todo lo que encontraban a su paso". Más de 300 casas quedaron totalmente destruidas. Más de 70 personas sin hogar en Dichato. 13 familias damnificadas, un muelle de 130 [m] destruido y una lancha a motor perdida. También se vio afectado el muelle nuevo. El jefe de aduana, Mario Vera Ríos, informó que las defensas habían comenzado a soltarse y que la garita ubicada en el cabezo de atraque estaba próxima a caer. En el sector de playa El Morro las olas avanzaron 10 [m] más de lo normal y destruyendo parte de la balaustrada que existe en ese sector. El agua está empezando a socavar el muro de defensa ubicado frente al hotel.
10	Agosto	1965	IV		Muerte y destrucción originada temporal. Se dice que fue entre Coquimbo y Pto. Montt. Fue de Sur a Norte. En la playa El Faro el alto oleaje alcanzó a llegar hasta muy cerca de la hostería Neptuno, produciendo con ello anegamiento de un amplio sector.

					Lo mismo pasó en Peñuelas, donde el agua de mar llegó hasta las primeras cabinas que fueron evacuadas. Cierre de puerto. En el muelle de la industria pesquera San José de Coquimbo, los embates del mar destruyeron 100 [m] de muelle y dos operarios de esta industria escaparon de la muerte. Naufragó falucho, dos se salván y un desaparecido. "Uno de los temporales de viento y lluvia más destructor de los últimos 25 años".
10	Agosto	1965	III	Huasco	Desde el puerto se informó que un bote pesquero naufragó muriendo su ocupante.
11	Agosto	1965	IV		Coquimbo: 17 embarcaciones pesqueras desaparecidas y 37 en pésimas condiciones. Gremio de pescadores estima daños entre 60 a 70 mil escudos. Compañía pesquera San José estima daños en 400 mil escudos (marejadas rompieron casi por completo el rompeolas formado por dados de cemento con fierro. Quedó completamente destruido por lo que habría que hacer uno nuevo); Los Vilos: hubo destrozo en una extensión de 30 [m] del molo de pescadores y en la caleta de Pichidangui resultó con el muelle de pescadores destruido. Cierre de puerto.
11	Agosto	1965	VIII		En Coronel, el mar inundó más de 300 casas de la población Lo Rojas, los habitantes fueron trasladados a escuelas y a la guarnición militar. En Tomé se hundió el muelle antiguo y una decena de familias fue evacuada a escuelas de Dichato; Tomé: otro sector afectado (además de El Morro) fue la explanada. El agua llegó hasta la vía férrea y destruyeron las bases de un alto designado a la venta de pescado y marisco. Demolerán todo para evitar accidentes. También se dañó la losa de acceso al muelle fiscal; Isla Sta. María: 12 embarcaciones hundidas y viviendas dañadas. Daños en instalación eléctrica.
11	Agosto	1965	II	Antofagasta	En Antofagasta, las olas alcanzaron quince metros de altura, destruyendo el faro, 500 mts de la nueva Avenida Costera, más de 300 mts de la vía férrea, cables de alta tensión y oficinas ubicadas en el puerto; una goleta de la Universidad del Norte encalló en los roqueríos. Diario El Sur: hundimiento de 7 embarcaciones pesqueras. Una gigantesca ola pasó sobre el molo de abrigo inundando los sitios 1 al 5 causando daños a la carga almacenada, especialmente en sacos de harina de pescado, madera y otras mercancías. Se destruyeron dos oficinas en el lugar y el administrador del vapor mercante noruego "Nopalvende" se encuentra desaparecido, temiéndose que haya caído al mar. Daños materiales sufridos en el puerto y zona costera alcanzarían 500 mill de pesos (El Día, 10/08/1965)
11	Agosto	1965	VIII		San Vicente: un pesquero y dos barcos, además de otras dos embarcaciones menores, fueron arrojados violentamente a la playa; Desaparece balneario El Morro: la violenta marejada barrió prácticamente con la playa, destruyendo muros de contención y parte del casino del balneario.
11	Agosto	1965	IV		Varios faluchos y remolcadores se destruyeron, lo mismo que el rompeolas de Guayacán en el puerto de Coquimbo. La Serena: todos los habitantes del litoral han sido trasladados al interior; Los Vilos: quedaron destruidos dos faluchos y remolcadores al cortar amarras y chocar contra rocas.
11	Agosto	1965	III	Chañaral	Daños en el muelle de la cía. Minera Sta. Fe y en el puerto mecanizado destruyendo algunas oficinas de embarque. El vapor "Dioner" de la cía. Minera se estrelló contra el muelle resultando con daños de consideración y destruyendo la planta resecadora de agua. En el puerto de la Andes Cooper un falucho cargado con 2 [ton] de cobre en barras se hundió y varias otras embarcaciones quedaron varadas en la playa.

11	Agosto	1965	V		San Antonio: al menos 1600 personas evacuadas; Quintero: un helicóptero de la base aeronaval de El Belloto efectuó ayer una arriesgada maniobra para abastecer de víveres a las goletas de altamar "Elbe", "Glue", "Khan", "Goden Wind", "Hechi" y "Francisca", las cuales se hayan campeando el temporal desde hace 48 hrs., sin alimento ni agua; Valparaíso: un helicóptero del servicio aéreo de rescate salvó ayer a 2 pescadores.
11	Agosto	1965	V		Daños municipales superan los 2000 millones de pesos. Se menciona que los sectores más afectados son Av. Perú, Av. San Martín, Recreo y Av. España.
11	Agosto	1965	III	Huasco	Un pescador murió ahogado, otro se salvó.
12	Agosto	1965	VIII	San Vicente	Dos lanchas destruidas. Muelle de la firma Alimar con graves daños.
12	Agosto	1965	V		"... sus efectos han sido devastadores, estimándose sus daños superiores a los que causó el terremoto del 28 de marzo pasado" (pág. 4). Un nuevo enrocado harán en Av. Perú: se menciona que el enrocado estaba en mal estado y que por eso el oleaje golpeaba directo en calles o edificios.
12	Agosto	1965	XV	Arica	Cierre de puerto.
12	Agosto	1965			90% del territorio sufrió destrozos por temporal. "Peor que un terremoto". Gobierno estima daños en 35 mil mill de pesos.
13	Agosto	1965			Ministro de Obras Públicas evaluó en 40 millones de escudos los daños (considera: caminos, puentes, terraplenes, puertos y molos).
13	Agosto	1965	V		Con daños resultó el instituto de Biología Marina de Montemar: vidrios rotos, parte baja inundada y dos laboratorios dañados. Daños no han sido evaluados; Playa Amarilla: daños materiales por 500 millones de pesos: destrucción de escaleras de acceso, destrucción parcial de la pérgola del restaurante, destrucción de las cabinas, rotura de los servicios de agua potable y de alcantarillado, pérdida de una serie de equipos y artefactos públicos.
25	Julio	1968	V	Valparaíso	Caleta El Membrillo: 14 botes pescadores destruidos, más casetas en que se guardan implementos de pesca.
25	Julio	1968	V	Iloca	Marea alcanzó proximidades ubicadas al Norte de la población.
25	Julio	1968	V	Cartagena	Daños caserío ribera
25	Julio	1968	V	El Tabo	Daños caserío ribera
25	Julio	1968	V	El Quisco	Daños caserío ribera
25	Julio	1968	V	Algarrobo	Daños caserío ribera
25	Julio	1968	V	Viña del Mar	Daños en Av. Perú y La Marina. Camino Viña-Concón intransitable.
25	Julio	1968	V	Quintero	Daños en casas e industrias ubicadas en la ribera.
28	Mayo	1972	VIII	Penco	Marejadas en Cerro Verde, cerca de Penco.
26	Mayo	1976	VIII		Cierre de puerto en Talcahuano y San Vicente.

26	Mayo	1976	V	Valparaíso	Cierre de puerto.
26	Mayo	1976	II		Cierre de puerto en Guayacán y Coquimbo.
2	Mayo	1977	IV	Coquimbo	Pesquero Zorba se vuelca frente a las costas de Coquimbo.
15	Abril	1980	V	Valparaíso	18 pescadores resultaron muertos al naufragar sus embarcaciones.
12	Agosto	1982	V	Valparaíso	Remolcador Rostro se vara en playa Placeres durante un temporal.
2	Febrero	1983	IV		Muelle La Herradura destruido por marejadas (muelle club de Yates, 1 damnificado). Un lobo de mar muerto por marejada que lo azotó contra roquerío. Nave cortó amarras.
5	Febrero	1983	IV		Corriente de marejadas arrastra restos de avión el cual se estrelló en el mar el 15 de febrero de 1980.
1	Marzo	1983	II		Marejadas en puerto de Mejillones. Cierre de puerto en Antofagasta (noticia dice: después de tres días sin movimiento, ayer se reanudaron las faenas en el puerto de Antofagasta).
9	Marzo	1983	I	Iquique	La marejada de ayer no sólo se "tragó" un galpón que guardaba material de maniobra de la Armada, también destruyó 50 metros del muelle del recinto naval, partió en dos una chalupa ballenera que estaba arriba del desembarcadero y varó algunas boyas de la industria pesquera.
10	Marzo	1983	IV	Coquimbo	Fuertes marejadas, pero sin reporte de daños.
5	Mayo	1983	II	Antofagasta	Sobrepasos en el Paseo del Mar y el sector del puerto (oleaje sobrepasó muro de contención). Se impidieron faenas pescaderas.
13	Agosto	1983	IV		Ola gigante volcó bote muriendo dos pescadores en desembocadura del Limarí. Un tercero salvó a nado.
26	Agosto	1983	XV	Arica	Una solución definitiva a graves daños ocasionados por las marejadas a la costanera Comandante San Martín esperan dar las autoridades a través de un nuevo proyecto. Son 86 millones para mejorar costanera sur y 18 millones para ex isla El Alacrán.
2	Julio	1984	IV	Coquimbo	Fuerte temporal. Primera lluvia '84. Varó pesquero "Tamarugo" por mar gruesa a la altura de calle Garriga. Viento norte de hasta 24 nudos. También dos faluchos pesqueros quedaron a la deriva.
4	Julio	1984	I	Iquique	Dos embarcaciones pesqueras y una panga vararon frente al sector de la Puntilla debido a la bravura de mar.
5	Julio	1984	IV	Coquimbo	Faenas marítimas suspendidas en Coquimbo
5	Julio	1984	V	Valparaíso	Yate perdido (estaba fondeado en club de Yates de Recreo).
6	Julio	1984	V	Valparaíso	Violentas marejadas. Cierre de puerto.
7	Julio	1984	II	Antofagasta	Fuerte oleaje en la costa de Antofagasta. Puerto cerrado.
11	Julio	1984	IV		4 embarcaciones menores y dos faluchos fueron varados por fuerte temporal ayer. Cierre de puerto. Se varó un pesquero. Sobrepuoso.

17	Julio	1984	IV	Coquimbo	Catástrofe: cuatro embarcaciones menores y dos faluchos fueron varados por el fuerte temporal.
17	Julio	1984	XIV	Corral	Puerto de Corral cerrado para todo tipo de embarcaciones
25	Marzo	1985	VIII		Puertos cerrados en la VIII por tercer día consecutivo.
27	Mayo	1985	XV	Arica	Temporal marítimo en costa ariqueña. Emergencia en el puerto. Naves a la gira y daños en locales comerciales. Sobrepasos en el Alacrán, balneario el Laicho, la Lisera, playa Arenillas Negras. Inundación en restaurantes, daños en diversos sectores costeros, desprendimiento de tierra por erosión. Cierre de puerto, naves a la gira, prohibición de zarpe.
27	Mayo	1985	I	Iquique	Catástrofe en Iquique. Olas alcanzaron alturas de 7 a 8 [m] y provocaron daños en zonas públicas y privadas. Se suspendió tránsito en zonas cercanas a la costa. Las calles quedaron regadas de inmensas costras y rocas de gran tamaño arrastradas por las olas. Sobrepaso frente a gobernación Marítima.
27	Mayo	1985	II		Ola arrastró a 10 competidores de campeonato de pesca.
28	Mayo	1985	XV	Arica	Tres botes desaparecidos.
28	Mayo	1985	II		Puerto cerrado en Antofagasta y Tocopilla.
2	Septiembre	1985	XV	Arica	Gigantescas olas afectan desde el viernes el litoral. Mercantes rompieron amarras y salieron a la gira. Alerta en el puerto. Olas que alcanzan hasta 2 [m].
12	Septiembre	1985	XV	Arica	Gigantescas olas azotan litoral ariqueño desde 48 hrs. Sobrepasos en sector La Isla.
21	Abril	1986	VIII		Cierre de puerto para toda la Gobernación Marítima.
21	Abril	1986	V	Valparaíso	Goleta de 140 [ton] llamada "Chechita" naufragó esta mañana en la costanera (cerca de Bellavista).
1	Mayo	1986	V		Defensas costeras dañadas en Av. Altamirano. Inundación en cercanía de caleta El Membrillo y destrucción de dos bongos. El mar penetró en Maitencillo y cubrió totalmente las playas. En el sector de laguna el mar penetró sobre pasando defensas y cubriendo calles.
1	Mayo	1986	III	Caldera	3 pescadores muertos.
1	Mayo	1986	IV		Cuantiosos daños en sectores vecinos a las playas de La Serena y Coquimbo.
1	Mayo	1986	II		3 pescadores muertos. Violenta marejada destrozó falucho en la entrada del terminal pesquero.
3	Mayo	1986	I		Marejada azotó todo el litoral. Mercantes permanecen a la gira. Naves menores con prohibición de salir a faenas.
3	Mayo	1986	V	Viña del Mar	Olas pasaron sobre el techo de restaurant Cochoa inundándolo completamente. Destrucción total de local concesionado en sector 2 de Reñaca.
3	Mayo	1986	VIII	Talcahuano	41 damnificados en Talcahuano
20	Mayo	1986	XV	Arica	Naves salieron a la gira, mientras que en terminal pesquero se hundieron dos embarcaciones y otras sufrieron daños.

20	Mayo	1986	II	Antofagasta	Cierre de puerto.
20	Mayo	1986	IV	Coquimbo	Olas erosionan faro ornamental: oleaje erosionó base de Faro Ornamental de La Serena y ayer en la madrugada los dos torreones que dan hacia el poniente cedieron hundiéndose varios centímetros.
21	Mayo	1986	XIV	Corral	Cerrado el puerto de Corral.
28	Mayo	1986	V		Buque científico Itzumi se hunde en la bahía de Valparaíso. En San Antonio pérdida del ancla de un buque (7 ton de peso). Sobre pasos en Av. Perú.
28	Mayo	1986	VIII	Talcahuano	Puerto cerrado en Talcahuano para naves menores.
11	Junio	1986	XIV	Corral	Puerto cerrado.
14	Junio	1986	V	Valparaíso	Puerto cerrado para embarcaciones menores. Bongo pesquero, con una persona a bordo que no habría recalado en lugar seguro y que, por tanto, se encontraría perdido.
21	Agosto	1986	V	Valparaíso	Las condiciones de mal tiempo obligaron a la autoridad marítima a izar la señal de tiempo variable y a cerrar el puerto de Valparaíso a todo tipo de embarcación.
21	Agosto	1986	XIV	Corral	Cierre de puerto.
7	Mayo	1987	V	Valparaíso	Daños menores en costanera de Valparaíso y el buque científico de Taiwan "Hai Kung" debió trasladarse del sitio 9, en muelle Barón, al sitio 1.
8	Mayo	1987	XIV		8 pescadores desaparecidos. Se encontró un cadáver. Fue frente a Chaiguín.
9	Mayo	1987	XIV		Se encontraron otros dos cuerpos de pescadores. Quedan 6 desaparecidos. Eran pescadores artesanales. La lancha fue encontrada destrozada en unos roqueríos. No se encontraron más cuerpos (se hizo seguimiento de noticia).
10	Julio	1987	XIV	Corral	Puerto de Corral permanece cerrado desde el Miércoles a las 16 hrs. (10 es Viernes).
12	Julio	1987	V	Valparaíso	Diversos daños en parque costero Juan de Saavedra provocó el fuerte oleaje que se registró en Valparaíso desde la madrugada del día 11, algunas veredas destruidas por oleaje. Cierre de puerto
13	Julio	1987	V	Valparaíso	Daños en asfalto en muelle Pratt.
14	Julio	1987	V	Quintero	Naufragio en Quintero. Sobreviven 3 pero 4 están desaparecidos. Se dice que es muy difícil hallar vivos a los que faltan.
16	Julio	1987	VIII		Gran frente de mal tiempo en el país. Puerto cerrado en la octava.
25	Julio	1987	VIII	San Vicente	Barco mercante "Alborada" de la Armada de Chile naufragó a consecuencia de un temporal. 30 víctimas fatales de las 37 que tripulaban.
26	Julio	1987	II	Antofagasta	Marejadas en Taltal. 12 embarcaciones aisladas en el mar, de las cuales 4 se encuentran desaparecidas y anegado 40% del puerto debido al agua caída.
26	Julio	1987	II		Cierre de puerto en Antofagasta y Taltal

26	Julio	1987	III		Cierre de puerto de Chañaral.
26	Julio	1987	IV		Cierre de puerto en Coquimbo.
26	Julio	1987	XV	Arica	Puerto cerrado. Mercante peruano "Luis Banchero" cortó espías quedando a merced del fuerte oleaje. Nave debió abandonar puerto.
27	Julio	1987	I	Iquique	Olas de 3 metros. Defensas costeras no fueron suficientes y el mar penetró en algunas calles.
10	Agosto	1987	V		Alturas de más de 12 [m] alcanzaron las marejadas al reventar en la tarde de ayer contra los bordes de la costanera, en el sector portuario de Valparaíso. Suspendido tráfico para naves menores, mientras que varias naves mercantes debieron salir a la gira para capear la intensidad del temporal.
25	Junio	1988	XIV		Encuentran restos de embarcación que desaparición el lunes (25 es sábado). La navegaban 3 pescadores, se salvó el patrón (2 muertos). El bote se volcó debido al fuerte oleaje del sector.
27	Julio	1988	VIII		Frente de mal tiempo: Armada ordenó cerrar los puertos de toda la Gobernación Marítima.
12	Agosto	1988	V	Valparaíso	Puerto cerrado.
15	Agosto	1988	I		Marejada azotó sector costero. Varó una embarcación pesquera y otras cortaron espías. Puerto cerrado.
18	Junio	1989	I	Iquique	Autoridad marítima ordenó el cierre del puerto para tránsito de embarcaciones menores y el refuerzo de espías y elementos de maniobra a naves de mayor tonelaje.
26	Junio	1989	XV	Arica	Mercante volcó cinta transportadora. Fue golpeada casualmente por la pluma o grúa del mercante de bandera chipriota "Trust". El incidente fue originado por una marejada que cortó las amarras del buque.
28	Junio	1989	XV	Arica	Puerto cerrado en un 100%. Sobre pasos en costanera.
26	Julio	1989	V	Valparaíso	Ocho muertos en naufragio de buque "Puerto Hanga Roa" esta noche en Valparaíso (se salvaron 5 tripulantes). El buque estaba al garete en el peor temporal de los últimos años.
28	Julio	1989	V	Valparaíso	Daños en el pavimento de muelle costanera. Se trabaja en el despeje de los desechos que dejó el mar y con maquinaria pesada se retiraban los adoquines sueltos que quedaron después de la tormenta.
16	Julio	1990	V	Valparaíso	Cierre de puerto.
14	Agosto	1991	XIV	Corral	Puerto cerrado para todo tipo de embarcaciones.
3	Mayo	1992	XIV		Río Valdivia y bahía de Corral cerrados durante la tarde de ayer. Fuertes vientos de hasta 100 [km/h].
5	Mayo	1992	V	Valparaíso	Puerto cerrado.
11	Mayo	1992	V	Valparaíso	Fuerte temporal obliga a cerrar puerto en Valparaíso.
24	Agosto	1992	II		Daños en defensas costeras y zozobra. Cierre de puerto; olas superaron los 5 [m] de altura y costanera quedó tapizada de piedras. Fue en el litoral de la bahía San Jorge. El sector más

					afectado fue entre el puerto y calle Antonio Poupin. Sobrepasos. No se especifican daños, debe haber sido movimiento de rocas.
24	Agosto	1992	I	Iquique	Gobernación marítima cerró puerto para todo tipo de embarcaciones. No se registran casos de emergencia. El fuerte oleaje dañó los avances de emisario (obra tiene un costo de dos mil 600 millones).
30	Agosto	1992	V	Valparaíso	Oleaje cubrió restos de gabarra.- El fuerte oleaje que afectó ayer a la costa de la zona cubrió prácticamente los restos de la gabarra "Albacora", la que está siendo desguazada en el sector de Portales. No hay cierre de puerto.
31	Agosto	1992	V	Valparaíso	Puerto cerrado el día 30 para naves menores.
14	Abril	1993	VIII		Pescador artesanal muere al ser alcanzado por una espía que se cortó cuando trabajaba en el intento de zafar su lancha. La autoridad marítima había aconsejado no realizar la maniobra por riesgo, hasta que mejoraran las condiciones del tiempo.
7	Mayo	1993	VIII	Llico y Tubul	Marejadas amenazan caletas de Arauco. Amenazas en varias viviendas cercanas al mar provocan las fuertes marejadas registradas ayer en medio de un temporal, en las caletas de Las Peñas y Tubul, en la comunidad de Arauco. En la primera, cerca de Llico, el fuerte oleaje derribó un muro de contención. En Tubul, la alta marea y la subida del río, puso en riesgo 10 viviendas ubicadas a pocos metros.
8	Mayo	1993	VII	Cauquenes y Pelluhue.	Fuertes marejadas en Cauquenes por frente de mal tiempo. Marejadas en Pelluhue, llegando a romper el oleaje el camino en el lugar denominado "Piedra de El Buque", sin que afortunadamente se cortara. No se mencionan daños.
20	Mayo	1993	III		Cerrado el puerto de Huasco. Debido a la fuerte marejada y vientos que azotaron ayer al litoral atacameño, se varó la goleta "Doña Kata" que navegaba desde Coronel hasta el puerto de Caldera. Un muerto y otro desaparecido en faenas pesqueras debido a que embarcación volcó porque no se dieron cuenta de la marejada.
21	Mayo	1993	XV	Arica	Naves a la gira en medio de neblina y marejadas. Cierre de puerto.
1	Julio	1993	XIV	Corral	Durante la tarde de ayer se intensificó el viento lo cual provocó un aumento en las marejadas. Esto impidió al "Vori" llegar al muelle.
5	Septiembre	1993	V		Intensas marejadas se registraron ayer en el litoral de la zona. El fenómeno había sido anunciado por la autoridad marítima el viernes por la noche. Sobrepasos en Av. Altamirano (Viña) y Av. Perú (Viña).
20	Junio	1994	XV	Arica	Marejadas en sector Chinchorro. Mar casi llega al borde de locales turísticos. Puerto cerrado por tercer día consecutivo (se menciona que lo normal son dos días).
21	Junio	1994	XV	Arica	Cierre de puerto. Inundación en local "Donde Aliro" sin causar daños. Erosión en playa el Chinchorro.
22	Junio	1994	XIV		Mal tiempo agrava aislamiento costero. Problemas de aislamiento al que se ven expuestos los habitantes de Amargos, San Carlos y el sector costero de la comuna de Corral.
24	Junio	1994	XIV	Corral	Puerto cerrado.

30	Junio	1994	V	Valparaíso	En el molo, costanera y Bellavista el mar sobre pasó las defensas.
19	Julio	1994	XIV	Corral	Se mantiene cerrada la bahía en Corral.
20	Julio	1994	VII	La Pesca	Grandes marejadas pusieron en peligro escuela de la localidad de La Pesca y a algunas viviendas de veraneo cercanas a la desembocadura del río Mataquito. No se registran daños.
12	Agosto	1994	XIV		Construirán enrocado en el sector La Aguada-Corral. En uno de los últimos temporales ocurridos en la zona, la fuerza de las olas barrió con el terraplén del camino, sacando piedras y material.
24	Septiembre	1994	XIV	Corral	Cerrado el puerto de Corral.
28	Abril	1995	XIV	Corral	Marejada hundió lanchas en la bahía: sólo un tripulante sobrevivió. Cuatro pescadores muertos. Salieron de noche a pesar de que se les negó el zarpe.
18	Mayo	1995	II		Cierran caletas de la zona por fuerte marejada. Sobrepaso en Av. Grecia, donde oleaje depositó piedras y otros escombros (no se alteró tránsito vehicular).
18	Mayo	1995	I		11 deportistas y curiosos fueron rescatados del oleaje. Cierre de puerto. Rompeolas que protege bahía fue sobrepasado. Piscina Godoy anegada.
10	Junio	1995	VIII	San Vicente	Temporal varó 3 mercantes en la región. Draga se volteó en San Vicente. 9 embarcaciones artesanales hundidas y otras 8 dañadas. Temporal tuvo una duración de 6 horas.
10	Junio	1995	XIV		El barco "Santa Adriana" soltó amarras e inexplicablemente quedó varado en la playa del costado Sur del muelle de pasajeros (Niebla). Los embates del mar provocaron cuantiosos daños en el casco y superestructura de la embarcación, que posiblemente no volverá a navegar.
14	Junio	1995	XIV		La lancha a motor "Doña Sofía" se encuentra desaparecida desde el pasado Jueves 8 del presente y hasta el momento nada se sabe de sus cinco tripulantes. (Se hizo un seguimiento de esta noticia y finalmente sólo se encontraron restos de la nave).
21	Junio	1995	XIV		Fuertes marejadas en la bahía obligaron a la Capitanía de Puerto a cerrar el movimiento de embarcaciones, quedando aislado el puerto por la vía fluvial.
23	Julio	1995	VIII		Dos mercantes cortaron sus amarras por temporal. Rachas de vientos obligaron al cierre de los puertos. Todas las faenas portuarias fueron suspendidas y prohibido el zarpe de embarcaciones menores.
12	Junio	1996	VII		Cierre de puerto en Constitución
12	Junio	1996	VIII		La Gobernación Marítima de Talcahuano, con jurisdicción desde Constitución a Lebu, mantenía cerrados todos los puertos para todo tipo de embarcación debido al frente de mal tiempo. Viento alcanzó ráfagas de hasta 45 nudos. En Isla Mocha se hundió una lancha sin ocupantes debido al fuerte viento (estaba fondeada para reparaciones).
5	Julio	1996	VIII	Talcahuano	Se hunden 11 botes, 3 pesqueros y varan 2 mercantes.
5	Julio	1996	VIII	Penco	Olas arrastraron botes que estaban en la playa. Oleaje llegó a las cercanías de Cerro Verde poniendo en peligro viviendas cercanas.

					3 de 11 lanchas fueron destruidas. Dos muelles en la comuna fueron cerrados.
9	Agosto	1996	XIV	Corral	Bahía cerrada para embarcaciones menores.
14	Agosto	1996	XIV	Corral	Tres lanchas volcadas. Fuerte oleaje incluso destruyó una parte del muelle que se encuentra en construcción.
23	Abril	1997	VIII		Fuerte temporal. Puerto de San Vicente cerrado para embarcaciones menores desde el Lunes (23 es Miércoles). En la capitánía de Coronel se indicó que el puerto estaba cerrado para todo tipo de embarcaciones.
23	Abril	1997	XIV	Corral	Puerto de Corral cerrado para todo tipo de embarcaciones
2	Mayo	1997	II	Chimbarongo	Dos muertos en Chimbarongo, estaban mariscando entre La Gruta y La Chimba.
4	Junio	1997	VIII		Lancha "Buena Fe" fue atacada por oleaje, el cual rompió vidrios y hundió la nave. Tripulantes fueron rescatados. El mar alcanzó viviendas de Santa Clara y pobladores fueron evacuados. Encalló nave pontón "Mejillones", que quedó varada frente al gimnasio La Tortuga, mientras que el "Zuiderster-7" quedó a medio hundirse.
4	Junio	1997	IV	Coquimbo	Fuerte temporal. Cerrado el puerto para el zarpe de embarcaciones menores.
4	Junio	1997	V	Valparaíso	Temporal afectó a puerto de Valparaíso (suspensión de zarpes). El primer temporal que se registra en Valparaíso desde hace 3 años.
5	Junio	1997	V		Dos embarcaciones quedaron sin gobierno.
5	Junio	1997	VII		Nave "Neptuno" (perteneciente a la VII región). 1 muerto y 6 desaparecidos.
10	Junio	1997	V	Valparaíso	Sobrepaso en Av. Perú pero sin problemas.
12	Junio	1997	VIII		Embarcaciones resguardadas por marejadas.
12	Junio	1997	V		Hundimiento total de una lancha. Fue la única perdida.
13	Junio	1997	III		Cierre de puerto debido a marejadas ocasionadas por frente de mal tiempo.
20	Junio	1997	VIII		Embarcación arrastrada por fuertes marejadas es rescatada por Gobernación Marítima.
21	Junio	1997	VIII		Caleta El Maule, alcalde René Carvajal: "Debido a las últimas lluvias, el mar ha avanzado cerca de tres metros, en una extensión de 500, hacia el interior del sector de Maule, frente al casino y la caleta de pescadores. Fisuras en muro de contención."
23	Junio	1997	I	Iquique	Obrero (ebrio) muere ahogado en playa Bellavista al ser arrastrado por fuerte oleaje.
24	Junio	1997	VIII		Una lancha hundida en caleta Lebu (irrecuperable), daños menores en varias embarcaciones artesanales. 12 botes hundidos (reflotados) en caleta Lo Rojas de Coronel.
24	Junio	1997	V		Fuertes marejadas impiden zarpe de pescadores artesanales. Un bote hundido en Algarrobo (contado anteriormente) y 6 en caleta Puertecito (reflotados), dos lanchas varadas en caleta Quinteros (contadas antes) y una (reflotada) en el muelle Sudamericana de

					Valparaíso. En caleta Montemar 4 botes destruidos y redes partidas.
24	Junio	1997	III		Una embarcación destruida en puerto de Chañaral y otra hundida con recuperación. Daños en muelle de la planta pesquera Chañaral, pérdida del motor generador, bomba, tablero eléctrico y bote auxiliar. Un bote hundido (con posibilidad de recuperación) en caleta Pan de Azúcar. En Huasco dos embarcaciones destruidas. Daños en cultivos marinos Flamenco.
24	Junio	1997	II		Fuertes marejadas, en una imagen se aprecia sobrepaso en recinto portuario. Mareógrafo de la Armada detectó olas de hasta 1,5 [m] de altura.
24	Junio	1997	IV	Coquimbo	Puerto cerrado.
24	Junio	1997	VI		Explanada para botes de caleta La Boca de Rapel socavada por marejadas, quebrada en 5 partes.
24	Junio	1997	VII		En caleta Maguillenes destrucción de 10 cajetas de pescadores. La caleta Pellines afectada por marejadas.
18	Agosto	1997	III	Caldera	En Caldera, el viento y el oleaje afectaron algunas embarcaciones las que se vararon y resultaron con daños. ("Cerca de una treintena de pequeñas y medianas embarcaciones resultaron varadas y destrozadas"). La Estrella de Valparaíso dice: entre Chañaral y Caldera temporal hundió una docena de embarcaciones.
18	Agosto	1997	V	Valparaíso	Embarcación estrellada entre Bellavista y Francia. Sobre pasos en el sector. En Valparaíso las fuertes marejadas hicieron zozobrar la goleta Charles Darwin y a 4 bongos pesqueros. Cierre de puerto.
19	Agosto	1997	II	Antofagasta	Sobre pasos en molo de abrigo.
19	Agosto	1997	IV		En el balneario de Guanaqueros varó el 90% de las embarcaciones de pesca artesanal.
20	Agosto	1997	I		Horrible muerte de pescador: marejada destruyó la embarcación.
7	Abril	1998	VIII		Dos pescadores muertos y otro desaparecido. La embarcación se volcó debido a condiciones de viento y oleaje del fin de semana (7 es martes).
11	Mayo	1998	VIII		Condiciones climáticas adversas obligaron a cerrar los puertos de la zona el Sábado (11 es Lunes) y se abrieron el Domingo.
22	Junio	1998	II		Violenta marejada: cierre de puerto y mueren dos personas.
1	Julio	1998	VIII	Cobquecura	Marejadas dificultan búsqueda de niña que se ahogó en Cobquecura. Un fenómeno de marejadas caracterizado por fuertes corrientes marinas y olas que alcanzan una altura entre 3 y 5 metros ha entorpecido las labores de rebusca del cuerpo de la menor de 13 años de edad, quien pareciera ahogada el Domingo pasado en el sector de Iglesia de Piedra.
4	Julio	1998	VIII	Lota	Encallamiento de un barco pesquero en Puerto Nuevo. No se confirma que sea por marejadas pero se menciona mal tiempo.
21	Julio	1998	VIII		Lluvias y vientos obligan a cerrar puertos locales. Embarcaciones menores no pueden recalcar ni zarpar y algunas de las naves mayores que estaban a la gira salieron a altamar a capear el mal tiempo.

2	Junio	1999	I	Iquique	Cierre de puerto por marejadas. Dos naves quedaron a la gira hasta que mejoren las condiciones climáticas. Sobrepasos (se ve en una imagen).
21	Junio	1999	VIII		Cierre de todos los puertos de la Gobernación Marítima.
21	Junio	1999	VII		Cierre de puerto.
3	Julio	1999	VIII	Lota	Con el mal tiempo varó nave pesquera. Sus 13 tripulantes salvaron ilesos. El fuerte oleaje o la rotura de las cadenas pueden haber provocado el varamiento del "Costa Grande 2". El hecho se registró a las 21 horas del Jueves (3 es Sábado).
12	Junio	2000	VIII		Cierre de puertos en Talcahuano, Penco, Lirquén, Lota, Coronel y Lebu.
27	Junio	2000	V	Valparaíso	Cierre de puerto.
9	Septiembre	2000	V		Bote pesquero naufragó con tres tripulantes (dos rescatados y uno fallece de hipotermia). Cierre de puertos en Valparaíso y San Antonio. Se produjo el varamiento del mercante Avon, en un episodio que se tradujo en la destrucción del muelle de pescadores de caleta Portales ("además de la pérdida del buque significó la destrucción del muelle de pescadores, el que debió ser reconstruido a un alto costo").
9	Septiembre	2000	VIII		Cierre de puertos e inundaciones.
9	Enero	2001	XIV	Corral	Cierre de puerto.
10	Marzo	2001	XIV	Corral	Cierre de puerto.
28	Mayo	2001	V		Cierre de puerto en San Antonio, Quintero y Valparaíso.
28	Mayo	2001	VII	Constitución	Cierre de puerto en Constitución.
28	Mayo	2001	VIII		Cierre de puerto en Talcahuano, Lirquén y Penco.
28	Mayo	2001	XIV	Corral	Cierre de puerto.
4	Julio	2001	V	Valparaíso	Mal tiempo complica búsqueda de dos jóvenes profesionales.
30	Julio	2001	XIV	Corral	Cierre de puerto en Corral.
31	Julio	2001	V		Cierre de puerto en la región
11	Octubre	2002	XIV	Corral	Cierre de puerto de Corral para embarcaciones menores.
13	Junio	2003	V	Valparaíso	En caleta El Membrillo se dañó el muelle e inundaron obras de remodelación y se dañaron 5 embarcaciones
13	Junio	2003	IV	La Serena	En La Serena, se dañaron restaurantes debido a que marejadas avanzaron 15 [m] desde el borde costero.
14	Junio	2003	II	Antofagasta	Olas de hasta 6 metros destruyeron locales de comida rápida y negocios que ofrecen paseos en lancha instalados en la orilla del mar, además de dañar instalaciones de la caleta de pescadores.
14	Junio	2003	V	Valparaíso	Cierre de puerto de Valparaíso.
14	Junio	2003	VIII		Cierre de puertos.

18	Junio	2003	VII		Cierre de puerto en Constitución
18	Junio	2003	V		Socavones en calles y avenidas de Valparaíso y Viña de Mar.
18	Junio	2003	VIII		Cierre de puertos.
18	Junio	2003	XIV		Cierre de puerto en Corral.
4	Agosto	2005	XIV	Corral	En Corral naufragó la motonave "Porvenir", sin producir víctimas. Personal de la Armada logró rescatar a los tripulantes que naufragó y finalmente encalló en el sector de Corral a causa de fuerte temporal.
18	Agosto	2005	V		Autoridad marítima mantuvo cerrados los puertos de San Antonio, Valparaíso y Quinteros.
2	Octubre	2005	V		Cierre de puerto para todo tipo de embarcaciones. Puertos de San Antonio y Quintero cerrado para embarcaciones menores.
3	Enero	2006	II	Tocopilla	Niño de 9 años muere ahogado en Tocopilla al ser arrastrado mientras jugaba en la arena. En Antofagasta se inició la labor de reparación de ocho puestos de venta de productos del mar y dos locales de comida en Coloso destruidos por olas de hasta dos metros de altura.
3	Enero	2006	V	Con-con	Adulto desaparecido
12	Febrero	2006	VIII		Intensas marejadas. No se registran daños.
13	Febrero	2006	V	Valparaíso	Muerto que cae al mar en sector rocoso cercano a castillo Wulff.
13	Febrero	2006	VI	Navidad	Un muerto en sector rocoso de playa las Matanzas.
8	Junio	2006	II		Cierre de puertos para todo tipo de embarcación en toda la región.
8	Junio	2006	IV	La Serena	El fuerte oleaje hizo que el agua penetrara en Av. Del Mar y derribó algunas instalaciones playeras menores.
17	Junio	2006	II	Tocopilla	Marejadas devastaron playa artificial del balneario playa Covadonga.
9	Abril	2007	XV	Arica	Cierre de puerto para embarcaciones menores.
	Mayo	2008	VIII	Lebu	Colapso de cerca de 300 [m] lineales del paseo Costa Mar de Lebu. Se mencionan irregularidades de construcción. No se especifica fecha de la marejada que produjo el daño.
12	Julio	2008	V		Cierre de puertos en Valparaíso, San Antonio y Quintero.
16	Junio	2009	XIV		Cierre de puertos de Valdivia y Corral.
20	Junio	2009	V		Cierre de puertos en Valparaíso, San Antonio y Quintero.
21	Julio	2009	XV	Arica	Puerto de Arica cerrado para naves menores.
21	Julio	2009	I	Iquique	Puerto clausurado para naves mayores
21	Julio	2009	II	Tal-tal	Puerto de Tal-tal cerrado para naves menores dentro y fuera de la bahía por clima variable.
24	Octubre	2009	VIII	Lebu	Lebu cerrado

20	Mayo	2010	II	Antofagasta	Suspenden visitas a fragata Pratt
13	Junio	2010	V		Cierre de los puertos de Algarrobo, Valparaíso, San Antonio y Quintero
13	Junio	2010	VIII	Llico	Uno de los vecinos del lugar indicó que su preocupación por las fuertes marejadas que han producido que las olas lleguen hasta donde se encuentra ubicada la imagen de San Pedro, el patrono de los pescadores, situación que hace años no se daba.
14	Junio	2010	VIII	Coronel	Temporal que provocó fuertes marejadas, además de inclinaciones en la tierra.
15	Junio	2010	V		Cierre de puertos en Valparaíso, San Antonio y Quintero.
6	Julio	2010	V		Buque "Cerro Alegre" encalla frente a Av. Errázuriz, cerca de estación Francia aprox. (en el lugar también se presentó sobrepuerto en estructura portuaria).
19	Agosto	2010	V	Valparaíso	El fenómeno se extiende desde la zona oceánica, donde los vientos persistentes han generado olas que se desplazan a las costas en forma de marejadas y rompientes costeras. El agua ha llegado a zonas de arena y sobrepuerto niveles de muelles.
21	Agosto	2010	V		Cadáver encontrado víctima de marejadas.
24	Agosto	2010	V	Quintero	Cierre de bahía de Quintero provoca perjuicios económicos en pescadores artesanales.
30	Septiembre	2010	V	Valparaíso	Precauciones a pescadores y transeúntes. Puerto sigue abierto.
23	Octubre	2010	I	Iquique	Cierre de puerto.
23	Octubre	2010	XV	Arica	Cierre de puerto para Arica.
29	Octubre	2010	V	Valparaíso	La Capitanía de Puerto de Valparaíso decidió suspender la travesía Moonlight Kayak Adventure, que iba a realizarse este sábado partiendo desde el muelle Vergara en dirección al muelle Barón.
10	Noviembre	2010	IV	Coquimbo	Puerto cerrado para embarcaciones menores
3	Enero	2011	VII	Duao	Olas llegan a la plaza de Duao.
31	Enero	2011	VIII	Cobquecura	Turistas empresario de 38 años y su sobrina de 17 arrastrados por una ola en Cobquecura.
6	Marzo	2011	V	Valparaíso	Rescatan a menor en playa ancha
12	Marzo	2011	VI	Cardenal Caro	En la localidad de Cardenal Caro el mar entró 70 metros desde la línea de la playa.
12	Marzo	2011	V		Autoridades reportaron variaciones de tres metros en el nivel de las mareas, mientras que en Algarrobo el mar se recogió unos 30 metros.
12	Marzo	2011	VIII	Dichato	Mar entró más de 100 metros desde la línea de playa
13	Marzo	2011	IV		Puerto de Coquimbo y caletas del litoral cerrado. Daños en costanera.
23	Abril	2011	V	Zapallar	Turista andaba con amigos, resbaló en una roca y posteriormente

					cayó al mar arrastrado por la marejada que se presentaba en la zona.
8	Junio	2011	V	Valparaíso	Fuertes marejadas arrojan algas sobre la costanera de Reñaca. Duración de 4 días.
9	Junio	2011	XIV		El mal tiempo obligó a cerrar para embarcaciones menores el Puerto de Corral, Bahía de Corral y Bahía de Mehuín.
18	Junio	2011	V		Cierre de puertos en Valparaíso, San Antonio y Quintero. Rotura de vidrios en gimnasio de Hotel Sheraton.
18	Junio	2011	V	Valparaíso	La ola de una marejada alcanzó el Metro Regional de Valparaíso, al pasar la estación Recreo.
14	Julio	2011	V	Valparaíso	Cierre del puerto. Mientras que las caletas de Valparaíso, suspendieron los zarpes por lo que las embarcaciones menores se encuentran a la espera que pase este frente de mal tiempo.
8	Agosto	2011	IV		Cierre de puerto y daños menores en locales.
10	Agosto	2011	II	Antofagasta	En el sector de Villa Azul, las olas derribaron un muro de contención. No hubo personas lesionadas.
11	Agosto	2011	II	Antofagasta	Cierre de puertos en Tocopilla y Antofagasta. Oleaje sobre pasó muro de contención en costanera.
11	Agosto	2011	V	Reñaca	El oleaje sobre pasó la playa, cruzó la calle e ingresó al restorán (Las Terrazas de Alfredo), arrastrando gran cantidad de arena y algas que quedaron esparcidas por el lugar.
11	Agosto	2011	I		Destrucción embarcaciones pesqueras - Inundación Av. Arturo Pratt - Duración de Jueves a Domingo
13	Agosto	2011	I	Iquique	Joven surfista desaparecido en Punta Cavancha.
13	Agosto	2011	XV	Arica	Puerto cerrado para todo tipo de naves.
14	Agosto	2011	V	Valparaíso	Ola de gran altura impacta a microbús (sector Caleta El Membrillo). Dos pasajeros lesionados.
14	Agosto	2011	IV	Coquimbo	Continúa cerrado el puerto en Coquimbo.
15	Agosto	2011	I	Iquique	Continúan cerrados puertos de Iquique y Patache.
5	Mayo	2012	I	Iquique	Cierre de puerto.
5	Mayo	2012	XV	Arica	Cierre de puerto y se suspenden faenas de buceo.
5	Mayo	2012	II	Antofagasta	Cierre de puerto.
26	Mayo	2012	VIII	Talcahuano	Daño a embarcaciones.
27	Mayo	2012	VII		Todas las recaladas en Constitución suspendidas.
30	Junio	2012	VII		Cierre de puerto en Constitución
30	Junio	2012	VIII	Zona sur	Más de 20 capitánías de la zona sur cerradas.
2	Agosto	2012	II	Tocopilla	Fuertes marejadas obligan a cerrar el puerto para embarcaciones Menores a 25 toneladas, dentro y fuera de la bahía, además de la paralización de obras portuarias y faenas de buceo.

16	Agosto	2012	II	Antofagasta	Cierre del Puerto de Antofagasta para naves mayores, también la Armada decreto cerrar el Puerto de Tocopilla.
16	Agosto	2012	V	Viña del Mar	Daño a locales comerciales del borde costero de Viña del Mar. Afectó nuevamente al restaurant Terraza de Alfredo de Reñaca que quedó prácticamente inundado.
16	Agosto	2012	V	Valparaíso	Avenida Altamirano inundada.
16	Agosto	2012	V	San Antonio	Barco encalla en San Antonio, sus 24 tripulantes son rescatados.
17	Agosto	2012	I		Cierre de puertos en Iquique y Patache.
17	Agosto	2012	V	Viña del mar	La alcaldesa de Viña del Mar, Virginia Reginato, estimó en 200 millones de pesos las pérdidas en bienes municipales registrados tras los daños que dejaron las marejadas en el borde costero.
22	Agosto	2012	V	Valparaíso	Intensas lluvias y marejadas tras un sistema frontal.
23	Agosto	2012	IV		En la Región de Coquimbo los puertos de Coquimbo, Tongoy y Los Vilos cerrados para naves menores.
23	Agosto	2012	V	Quintero	Puerto cerrado.
20	Diciembre	2012	II	Antofagasta	Puerto cerrado para embarcaciones menores a 25 toneladas dentro y fuera de la bahía. Paralización de obras portuarias y buceo.
27	Enero	2013	V		El agua alcanzó en varias oportunidades las calzadas de las rutas cercanas a las rompientes.
8	Abril	2013	IX	Nigüe	Una casa resultó destruida y otra anegada, lo que hizo que se evacuaran 9 personas.
28	Mayo	2013	IV	Coquimbo	Puertos de Coquimbo, Tongoy y Los Vilos cerrados.
28	Mayo	2013	V	Valparaíso	Fuertes marejadas y 106 milímetros de agua caída registra la región de Valparaíso en las últimas 24 horas. Varios daños.
28	Mayo	2013	V		En Viña del Mar generó preocupación durante la tarde el descubrimiento de grietas en la calzada de un sector de avenida Perú.
28	Mayo	2013	IX	Toltén	Marejadas obligan a evacuar 9 personas. Puerto Carahue cerrado y se impide navegación en río Imperial y lago Budi.
29	Mayo	2013	V	Valparaíso	Marejadas dañan avenida Perú y se suspende tránsito de vehículos.
29	Mayo	2013	IX	Toltén	40 personas afectadas
3	Julio	2013	VII	Constitución	En Constitución 4 embarcaciones caen al mar sin ser recuperadas.
3	Julio	2013	II	Antofagasta	4 Personas lesionadas en Antofagasta y anegamientos en varios puntos del país.
3	Julio	2013	VII	El Maule	Inundaciones y evacuación preventiva de viviendas.
3	Julio	2013	V	Valparaíso	Problemas en infraestructura de operadores y concesionarios (daños públicos en Reñaca por marejadas).

3	Julio	2013	VIII	Cobquecura	Anegamiento por marejadas que superan muro de contención.
3	Julio	2013	IX	Toltén	13 personas evacuadas de forma preventiva.
3	Julio	2013	V	San Antonio	Puerto de San Antonio cerrado.
3	Julio	2013	VII	Iloca	Inundación en 4 viviendas en Iloca
4	Julio	2013	IV		Cierre de puertos en la región.
4	Julio	2013	I	Iquique	Oleaje traspasó costanera obligando a cortar tránsito del sector. Inundaciones de casas y daños a feriantes.
4	Julio	2013	XV	Arica	La fuerza del mar envió las protecciones costeras hacia el pavimento del camino, lo que obligó a desvíos temporales para limpiar la zona.
4	Julio	2013	III	Atacama	Cierre de puertos para todo tipo de embarcaciones
4	Julio	2013	II	Antofagasta	Cortes de tránsito, como ocurrió en el caso de la calzada que va desde el bañero municipal y el puerto, y también con la calle Ongolmo en las cercanías de la costa.
4	Julio	2013	II	Antofagasta	Daños de consideración en el molo de abrigo, el cual sufrió deslizamiento de rocas, socavamiento de material y caída de muro de contención de olas en el brazo perpendicular a la costanera y de bloques en el sector del faro. La escollera de protección tuvo perdida de roca en las bases de soporte y presenta desalineamiento de su eje longitudinal.
4	Julio	2013	V	Reñaca	Sobrepaso en Reñaca (Av. Borgoño) afectando locales comerciales.
4	Julio	2013	VII		En Licantén ocho viviendas anegadas con 32 damnificados. En Iloca se inundaron dos restaurantes y un inmueble.
4	Julio	2013	I	Iquique	La Avenida Arturo Prat, que conecta el centro con la zona porteña, debió suspender el libre acceso de los vehículos por su inundación. Además, cierre de los puertos para todo tipo de embarcación.
4	Julio	2013	II	Antofagasta	Vehículos arrastrados por marejadas que superan costanera.
4	Julio	2013	V	San Antonio	Puerto de San Antonio cerrado
4	Julio	2013	V		Sobrepaso en Santo Domingo y Cartagena afectando a quioscos.
4	Julio	2013	VII		En Duao el agua inundó una sala de espera en la posta del sector. Cerca de 100 personas fueron evacuadas del sector de Lobería y Taucú, en Cobquecura, pues el agua ingresó a 40 inmuebles ubicados a 70 metros de la playa. Daños en muelle Maguillines
13	Septiembre	2013	II	Antofagasta	Cierre de puertos en Tocopilla y Antofagasta.
4	Noviembre	2013	VIII	Tirúa	Marejadas impiden búsqueda de avioneta caída frente cerca de Isla Mocha.
31	Enero	2014	I		Puertos cerrados en Mejillones y Patache.

31	Enero	2014	V	Viña del Mar	Olas derriban poste en Av. Perú.
31	Enero	2014			18 Personas rescatadas en Concón.
11	Marzo	2014	I	Iquique y Patache	Cierre de puerto.
11	Marzo	2014	XV	Arica	Cierre de puerto.
11	Marzo	2014	II	Tocopilla	Cierre de puerto
11	Marzo	2014	IV	Coquimbo	Cierre de puerto para Coquimbo y Los Vilos.
1	Abril	2014	VII	Pelluhue	Memorial de 27F cae en Pelluhue.
25	Abril	2014	II	Antofagasta	Cierre de puerto para embarcaciones menores a 25 ton.
5	Mayo	2014	IX		Inundaciones en sectores para turistas.
29	Mayo	2014	V	Viña del Mar	Sobrepaso en Av. Perú
3	Junio	2014	V		Joven cae al mar debido a marejadas (fue para rescatar a su polola)
24	Junio	2014	I	Patache	Cierre de puerto.
24	Junio	2014	II		Cierre de puertos para Tocopilla y Antofagasta.
1	Julio	2014	IX		Dos familias evacuadas y el corte total de la ruta entre Nigue Norte y Sur debido a socavación por oleaje.
2	Julio	2014	VIII	Coronel	En Coronel seis embarcaciones dañadas (una con pérdida total que daño muelle peatonal). En Isla Mocha 4 botes quedaron semi hundidos.
2	Julio	2014	XV	Arica	Cierre de puerto
2	Julio	2014	I		Cierre de puertos para Iquique y Patache.
2	Julio	2014	II		Puertos cerrados para Tocopilla y Antofagasta.
2	Julio	2014	VIII	Cobquecura	Daño a puente camino costero en Cobquecura.
4	Agosto	2014	I	Patache	Cierre de puerto.
4	Agosto	2014	XV	Arica	Cierre de puerto.
4	Agosto	2014	II		Cierre de puerto para Antofagasta y Tocopilla.
4	Agosto	2014	IV	Coquimbo	Cierre de puerto para Coquimbo y Los Vilos.
4	Agosto	2014	III	Chañaral	Cierre de puerto.
4	Agosto	2014	V	Quintero y San Antonio	Cierre de puerto.
4	Agosto	2014	VIII	Lebu y Lirquén	Cierre de puerto.

5	Enero	2015	XIV	Mehuín	Marejadas dificultan búsqueda de niños que cayeron al mar.
9	Febrero	2015	IV		Mujer rescatada y joven desaparecido por marejadas en caleta San Pedro, al Norte de La Serena.
26	Marzo	2015	I		Cierre de puertos en Iquique y Patache.
26	Marzo	2015	II	Antofagasta	Cierre de puerto.
1	Mayo	2015	I	Iquique	Sobrepuerto principalmente en el sector El Morro. Oleaje llega a cercanías de viviendas.
9	Mayo	2015	V	Viña del Mar	Tres personas lesionadas al caer a roquerío mientras paseaban en sector Las Salinas.
15	Mayo	2015	VI		Caletas pesqueras de Pichilemu, Bucalemu y Matanzas se encuentran cerradas.
1	Agosto	2015	II	Antofagasta	Joven de 18 años arrastrado por las olas mientras pescaba junto a su familia en sector Caleta Chimba.
3	Agosto	2015	IX	Toltén	Marejadas destruyen muro de contención natural.
4	Agosto	2015	XV	Arica	Inicio de campeonato de surf se corre un día por fuertes marejadas.
6	Agosto	2015	XIV	Lago Ranco	Marejadas destruyeron costanera.
6	Agosto	2015	IV	Coquimbo	Cierre de puerto.
8	Agosto	2015	V		Cierres de puerto. Se estiman 60 embarcaciones dañadas en total. Edificios inundados y locales comerciales destruidos (Tierra del Fuego, Amura, Chez Gerald). Inundación Sheraton. Un muerto en Higuerillas, Dos rescates de personas en embarcaciones y otra persona rescatada en Recreo. Calles anegadas, autos arrastrados, suspensión servicio del metro, se estiman 500 pescadores afectados, se tuvo que suspender matrimonio que se haría en Círculo de Aviación Naval (Recreo).
8	Agosto	2015	II	Antofagasta	Marejadas obligan a cerrar la costanera. Tránsito suspendido.
8	Agosto	2015	IV	Coquimbo	Sobrepuerto, daño a locales y pescadores debieron subir sus embarcaciones a calzada para evitar posibles daños.
8	Agosto	2015	V		Sobrepuertos en Av. Perú, Av. La Marina, Av. Altamirano, Recreo e Higuerillas.
8	Agosto	2015	V		Desplazamiento de unidades de coraza en protección club de Yates de Recreo, destrucción de club de submarinistas de Valparaíso. Colapso de rompeolas principal en 3 secciones en club de Yates de Higuerillas.
8	Agosto	2015	V		Portales: daño a grúa que levanta embarcaciones. Daño del muelle es del 50%, pérdida de losa del cabezal; Laguna Verde con problemas eléctricos y socavón de 4 a 5 [m]; El Membrillo daños menores; El Manzano problemas de iluminación, filtración de aguas lluvia y requiere reemplazo de cubierta y pintura; Paseo Juan de Saavedra daños en 150 [m], lo que requiere levantar muros y enrocado de protección; Paseo Wheelwright perdió todo el deck de madera; El mayor daño se registró en el parque costero de Viña, entre muelle Vergara y playa del Deporte, donde el intenso oleaje destruyó 800 [m] de muros de contención y todo el

					mobiliario urbano; Socavón en Av. La Marina frente al club Árabe es de 140 [m ²] con una extensión de 15 a 20 [m]; Daños en Torpederas.
8	Agosto	2015	II		Socavón a causa de marejadas en el acceso Taltal por la ruta 1 a Paposo en km 25.
9	Agosto	2015	XV		Se suspende final de campeonato de surf.
15	Diciembre	2015	V	Viña del Mar	Sobrepasos, daño en café Amura. Una persona afectada que se le ocurrió acercarse al mar en Av. Perú. Lo buscaron y al final estaba en su casa en Quilpué.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10-2: Cantidad de eventos identificados entre 1823 y 1977, con categoría máxima anual en Escala de Campos e índices MEI y SAM.

Año	Cantidad de Eventos	MEI máximo anual	SAM máx. anual	Categoría máx. en Escala de Campos	MEI relacionado a categoría máx.	SAM relacionado a categoría máx.
1823	1			3		
1827	1			2		
1847	1			3		
1851	1			3		
1853	1			3		
1855	1			3		
1862	1			5		
1871	1			3		
1872	1			3		
1875	1			3		
1877	1			2		
1878	1			3		
1881	1			3		
1884	1			5		
1886	1			3		
1888	1			2		
1891	2			5		
1899	1			4		

1900	1			3		
1903	1			5		
1904	2			3		
1905	2			2		
1906	1			4		
1908	2			3		
1911	2			3		
1913	1			2		
1915	1			5		
1916	1			4		
1919	4			4		
1921	1			5		
1922	1			4		
1924	2			5		
1926	1			4		
1928	2			5		
1929	2			6		
1938	1			5		
1940	1			5		
1941	1			5		
1944	1			4		
1945	1			3		
1948	1			5		
1951	1	-1,21		3	0,66	
1952	1	-0,68		4	-0,68	
1953	3	0,78		3	0,48	
1957	1	1,20	-4,24	3	0,75	-2,50
1963	1	0,86	0,71	3	0,39	1,82
1965	0	1,43	-1,52	7	1,40	0,08
1968	1	-1,09	-2,65	5	-0,10	1,60
1972	1	1,83	-2,72	1	1,11	-0,09

1976	1	-1,63	-0,43	1	0,33	1,75
1977	1	0,99	-2,04	2	0,44	-0,77

Fuente: Elaboración propia.