

**ANÁLISIS DE EVENTOS DE MAREJADAS EN LAS COSTAS DE CHILE**

- Ref: %Glosario de Mareas y Corrientes+SHOA pub. 3013, Segunda Edición (1992).
- %Evaluation of Global Wind Power+ Christina Archer y Mark Jacobson, Universidad de Stanford, California US (2005).
- %Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile+ Dr. René Garreaud, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile (2011).
- %Estado Actual del Ciclo El Niño . La Niña y Pronóstico Climático para Chile+ Dirección Meteorológica de Chile (Informe mensual trimestral 2016).
- %SOLAS 74, Enmendado+, Capítulo V Seguridad a la Navegación, Regla 5 Servicio y Avisos Meteorológicos.
- 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.
- 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.
- Paskoff, R. 2010. Capítulo 9.1: Geomorfología de la costa de Chile. En Libro Geología marina de Chile. Díaz-Naveas, J., Frutos, J. (2010).
- Araya, J. 1979. Las incidencias cataclísmicas de las bravezas en la evolución de la costa de Chile central. Departamento de Geografía, Universidad de Chile.
- Beyá, I. y 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.

Rodrigo Vicente Campos Caba 2016, "Análisis de Marejadas Históricas y Recientes en las Costas de Chile", alumno tesista, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso; profesor titular José Beyá Marshall.

## INTRODUCCIÓN:

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 las costas de Chile (Paskoff, 2010). Los eventos de esta naturaleza 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 y Winckler, 2012).

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:** Generado en las latitudes medias del hemisferio Sur por el paso de sistemas ciclónicos (sistemas frontales). Este tipo de oleaje, en combinación con el mar de viento generado localmente, constituyen los eventos de mayor frecuencia que alcanzan a las costas de Chile.

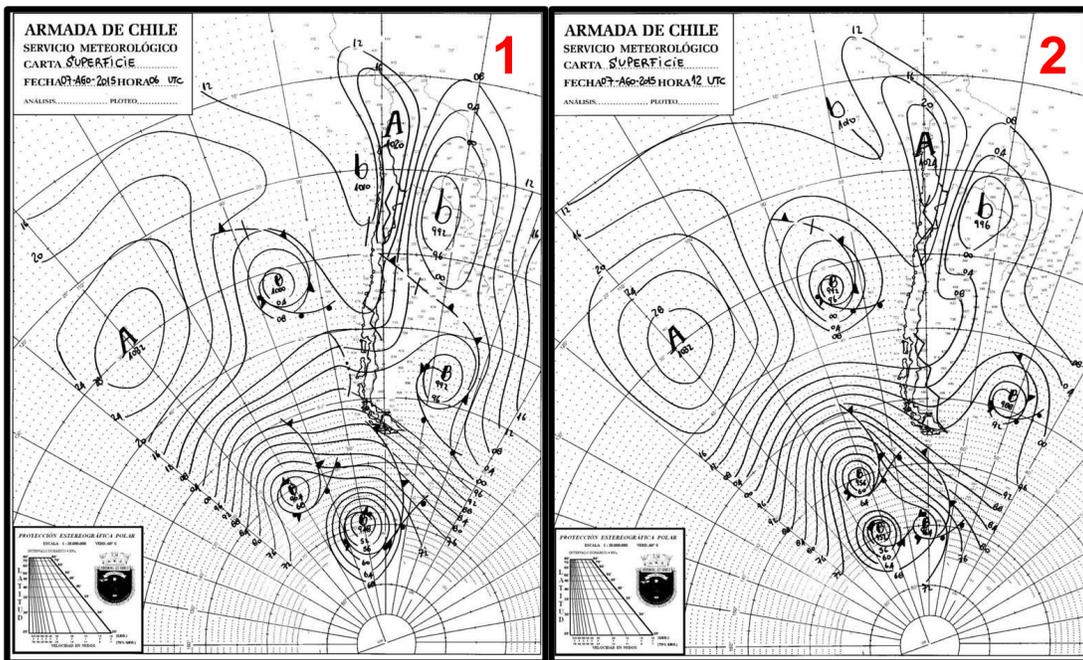
**Mar de fondo del Norte:** Generado en las latitudes medias del hemisferio Norte, el cual se propaga por aproximadamente 15.000 kms. para llegar a la costa chilena. En ocasiones menos frecuentes, se genera oleaje de ciclones tropicales que también incide desde el cuarto cuadrante en las costas de Chile, como el ciclón Gerry, que afectó a Samoa y Fuji, en enero de 2012 y que generó mar de fondo de dirección NW, alcanzando las costas del Litoral Central, en Chile.

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).

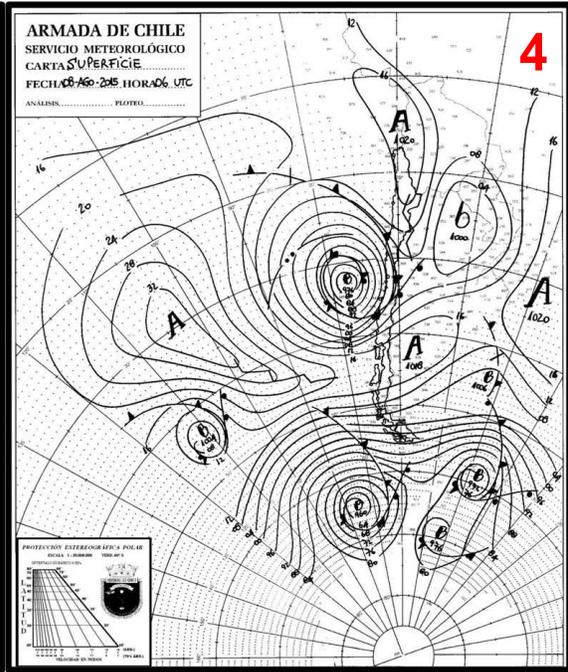
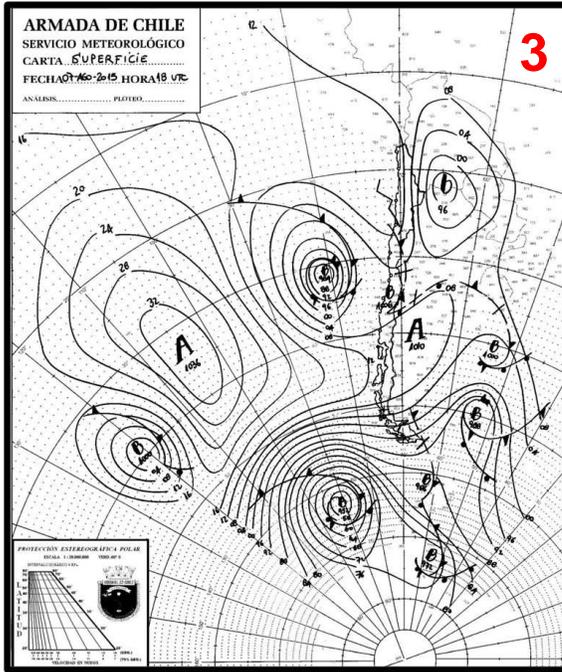
La altura de ola significativa promedio muestra que los valores para este parámetro varía entre 1,8 mts. para el extremo Norte (XV región) y 2,8 mts. Centro-Sur (XIV región). Esto concuerda con lo establecido por Cruz et al. (2009), quienes concluyen que el clima de oleaje en el Sur de Chile es más energético en comparación a la zona Norte.

Para las marejadas que producen daños se esperan alturas de ola por sobre los 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.

Un episodio reciente con grandes daños 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. Alturas de ola de hasta 10 metros provocaron diversos daños incluyendo inundación de viviendas, personas fallecidas, suspensión de operaciones portuarias, ferroviarias, daños a infraestructura pública y privada (latercera.com, 09/08/2015). En la Figura 1 se aprecian algunos de los daños producidos en distintos puntos de la V región para el evento mencionado.

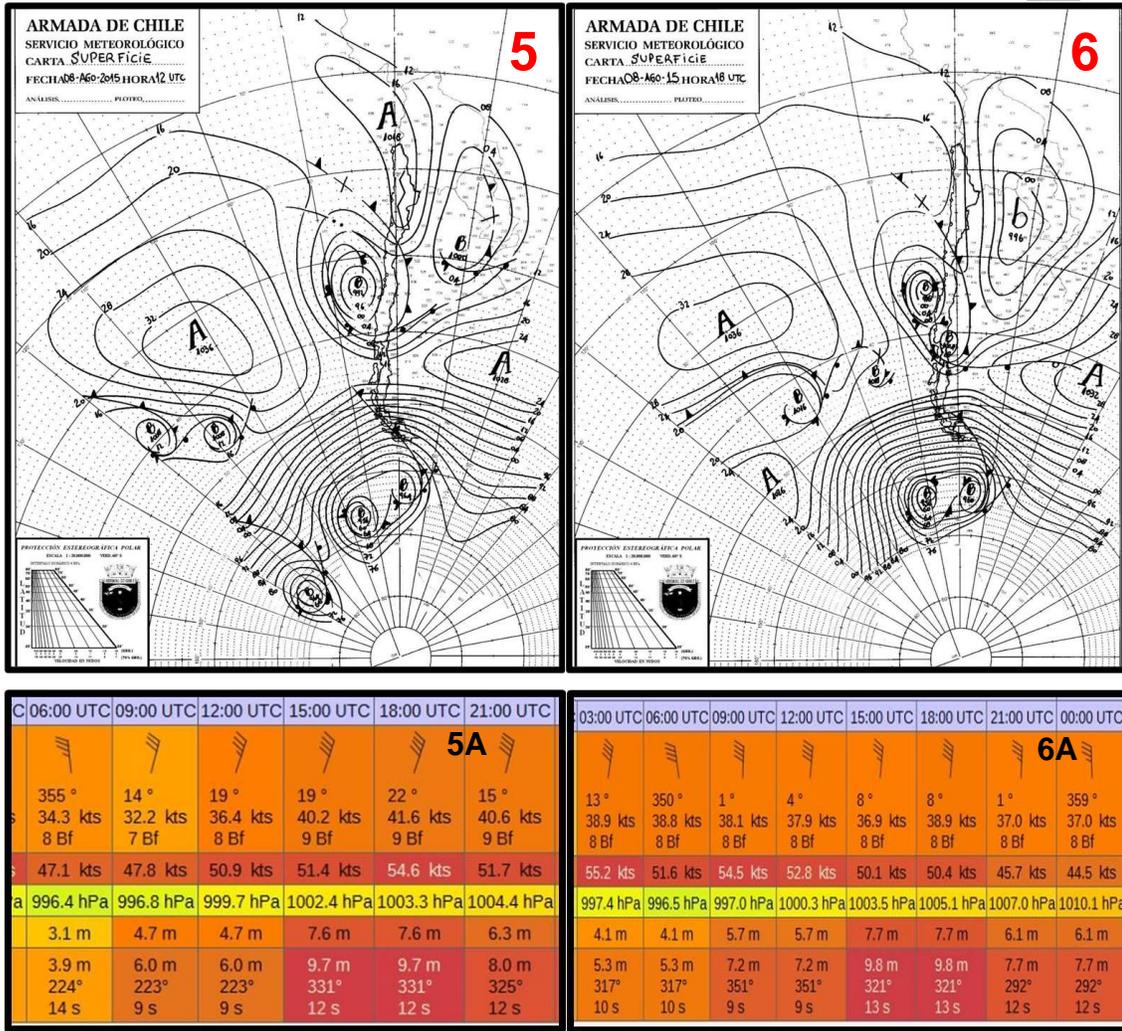


vie 2015-08-07								sáb 2015-08-08									
Sol Luna		☀ 12:15 UTC ☿ 23:01 UTC				☾ 06:04 UTC ☿ 17:18 UTC 50%				1A		2A					
		06:00 UTC	09:00 UTC	12:00 UTC	15:00 UTC	18:00 UTC	21:00 UTC	00:00 UTC	03:00 UTC	09:00 UTC	12:00 UTC	15:00 UTC	18:00 UTC	21:00 UTC	00:00 UTC	03:00 UTC	
Viento (10 m)		4° 28.5 kts 7 Bf	305° 28.1 kts 7 Bf	254° 20.5 kts 5 Bf	190° 47.4 kts 9 Bf	193° 41.5 kts 9 Bf	193° 39.3 kts 8 Bf	194° 37.7 kts 8 Bf		15° 20.3 kts 5 Bf	8° 33.2 kts 7 Bf	314° 26.0 kts 6 Bf	324° 14.6 kts 4 Bf	179° 33.8 kts 8 Bf	191° 51.2 kts 10 Bf	194° 45.1 kts 9 Bf	
Racha de viento		35.7 kts	34.1 kts	24.1 kts	55.6 kts	48.3 kts	45.7 kts	43.9 kts		24.3 kts	40.6 kts	32.5 kts	16.8 kts	35.8 kts	62.2 kts	54.3 kts	
Presión (MSL)		1002.8 hPa	996.9 hPa	995.1 hPa	999.8 hPa	1005.4 hPa	1008.7 hPa	1011.1 hPa		1002.8 hPa	997.5 hPa	992.2 hPa	988.6 hPa	989.0 hPa	993.9 hPa	1000.3 hPa	
Ola significativa		3.1 m	3.6 m	4.3 m	6.4 m	7.7 m	7.9 m	8.0 m		3.1 m	3.4 m	3.8 m	3.8 m	4.1 m	9.0 m	9.2 m	
Máxima ola		4.0 m 216° 17 s	4.6 m 213° 16 s	5.4 m 213° 16 s	8.1 m 215° 12 s	9.8 m 215° 12 s	10 m 204° 12 s	10 m 204° 12 s		3.9 m 214° 16 s	4.3 m 214° 16 s	4.8 m 213° 16 s	4.9 m 213° 16 s	5.1 m 215° 12 s	11 m 215° 12 s	12 m 206° 13 s	



15:00 UTC	18:00 UTC	21:00 UTC	00:00 UTC	03:00 UTC	06:00 UTC	09:00 UTC
31.0 kts	47.4 kts	30.7 kts	16.4 kts	23.0 kts	32.5 kts	53.2 kts
999.8 hPa	992.9 hPa	986.0 hPa	983.6 hPa	985.2 hPa	988.4 hPa	992.6 hPa
3.2 m	3.5 m	3.9 m	4.4 m	7.2 m	7.2 m	9.8 m
4.0 m	4.5 m	4.9 m	5.5 m	9.2 m	9.2 m	12 m
212°	212°	278°	278°	258°	258°	206°
16 s	16 s	11 s	11 s	12 s	12 s	14 s

03:00 UTC	06:00 UTC	09:00 UTC	12:00 UTC	15:00 UTC	18:00 UTC
54.9 kts	53.9 kts	54.3 kts	51.7 kts	48.3 kts	45.0 kts
998.6 hPa	997.8 hPa	998.5 hPa	1002.1 hPa	1005.6 hPa	1007.9 hPa
4.0 m	4.0 m	5.5 m	5.5 m	7.0 m	7.0 m
5.1 m	5.1 m	7.0 m	7.0 m	8.9 m	8.9 m
234°	234°	335°	335°	290°	290°
14 s	14 s	9 s	9 s	13 s	13 s



**Figuras 1, 2, 1A, 2A, 3, 4, 3A, 4A, 5, 6, 5A y 6A.** Imágenes muestran la secuencia de cartas meteorológicas de superficie, desde las 06 UTC (03:00 Hora Local) del día viernes 07 de agosto, a las 18:00 UTC (15:00 Hora Local del 08 de agosto de 2015 y, la correspondiente proyección de modelamiento numérico de olas y de parámetros atmosféricos, del modelo GFS (Global Forecast System), de parámetros de olas del modelo WW3 (Wave Watch III).

Las cartas meteorológicas de superficie (Figuras 1, 2, 3, 4, 5 y 6) muestran el desarrollo de un sistema frontal, que inicialmente, describe una baja presión asociada al sistema frontal de 1000 héctopascales, ubicada al norweste del Archipiélago de Juan Fernández, que recorrió aproximadamente 380 millas náuticas, a una velocidad promedio de 15 nudos, desde esa posición (32° Sur y 85° Weste), hasta impactar las costas del Litoral Central, con un mínimo de presión atmosférica a nivel del mar de 980 héctopascales, 24 horas después, en la madrugada del 8 de agosto de 2015. Registro de presión asociada a una depresión de un sistema frontal en estas latitudes, a la cuadra de la Región de Valparaíso, con un descenso de la presión atmosférica a nivel del mar, de 24 héctopascales en 24 horas; momento en el cual el sistema frontal

alcanzó su máximo desarrollo y madurez, en cuanto a los vientos máximos y mayor altura de las olas.

La protección del modelo GFS y WW3, visualizado a través del programa Zygrib, mostró en forma adelantada las condiciones de dirección e intensidad del viento y las respectivas rachas del viento; las variaciones de la presión atmosférica a nivel del mar, ola significativa, olas máxima, periodo del mar de fondo y, dirección promedio del mar de fondo; las cuales fueron coincidentes con las condiciones reales medidas en estaciones meteorológicas costeras y en la boya Watch Keeper, fondeada a 9,6 millas náuticas al weste de Punta Ángeles en Valparaíso. Proyecciones meteorológicas que mostraban, en forma adelantada viento de componente norte entre 40/45 nudos y rachas de 55 nudos y, condiciones de oleaje con alturas de 5 a 7 metros, con máximos de 10 metros.

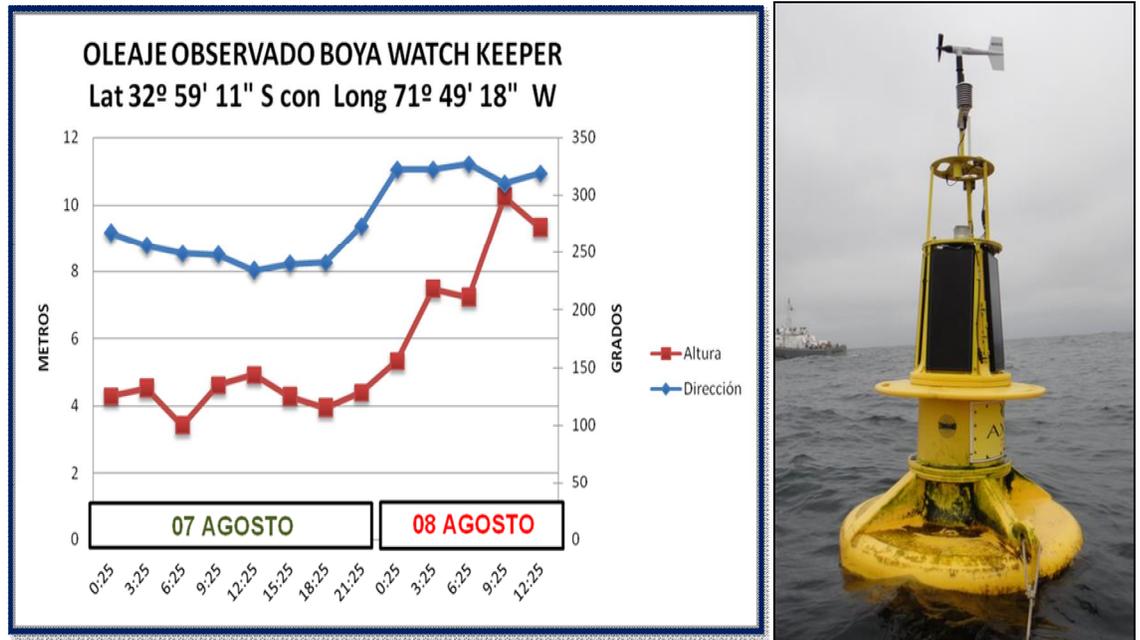


**Figura 7.** Imagen muestra display de anemómetro de Faro Panul, en San Antonio, a las 03:20 Hora Local, del sábado 8 de agosto de 2015, que registra viento promedio de dirección Norte/Noreste de 40 nudos (74 Kms/hora), una racha de 96 nudos (177 Kms/hora).

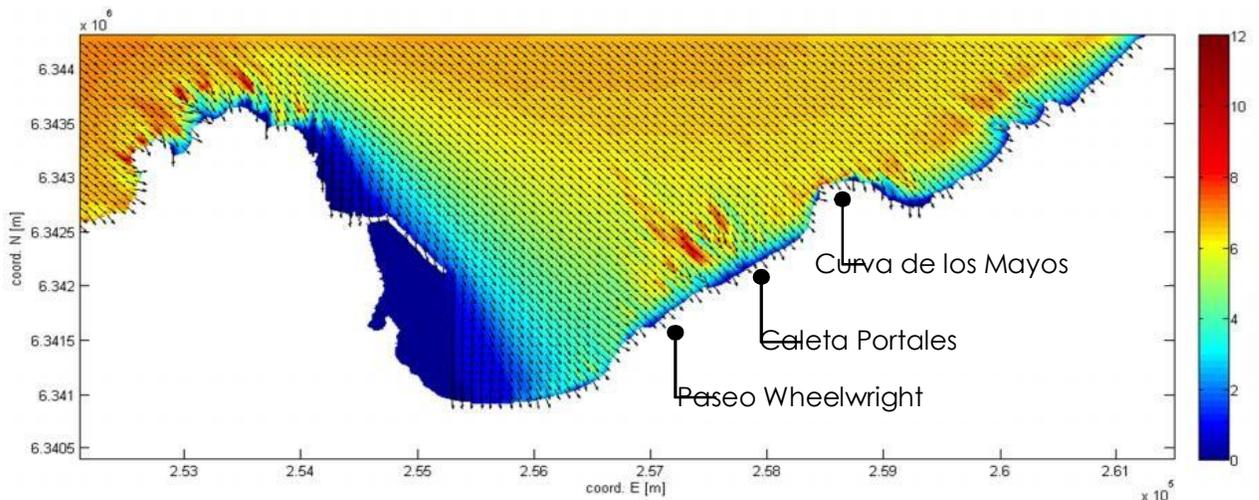


**Figura 8.** (A) Valparaíso: Marejada azotando sector El Caleuche y daños en vía férrea (theclinic.cl, 08/08/2015), (B) Viña del Mar: Daños sector Avenida Perú (puranoticia.cl, 08/08/2015), (C) Valparaíso: Daños muelle Caleta Portales (soychile.cl, 08/08/2015), (D) Viña del Mar: Sobrepasso y daños restaurant Tierra de Fuego, sector Playa Acapulco (elepicentro.cl, 08/08/2015)

**Figuras 9 y 10.** Imágenes de Registro instrumental y de la boya Watch Keeper del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), posicionada a 9,6 millas náuticas al weste de Faro Punta Ángeles, Valparaíso, fondeada en 480 metros, con alturas de las olas desde 3,41 metros a las 6:25 hora local, hasta 10,23 metros, como altura máxima, el 8 de agosto de 2015, a las 09:25 hora local.



**Figura 11.** Imagen Evento 8 de agosto de 2015, en Litoral Central, muestra Altura de ola significativa, en mts., en el sector sur de la Bahía de Valparaíso para estado de mar de  $H_s = 7,23$  mts.,  $T_p = 13,3$  seg. y dirección  $310^\circ$ . (Patricio Winckler, Manuel Contreras, Jesé Beyá y Mauricio Molina, 2015)



Otros casos relevantes para los que se registran daños corresponden a las marejadas de 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, aunque no existe un documento que compile toda esta información.

En tiempos pasados 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 en Chile, observando durante 3 meses en Ilo (ciudad al SW de Perú) las bravesas de mar. Feuillé concluye que éstas siempre ocurrían en los días cercanos a las sicigias de la Luna, cuando la diferencia de las declinaciones del Sol y la Luna es pequeña.

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 el autor como una de las posibles causantes de daños en presencia de eventos extremos de oleaje en las costas chilenas.

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. Araya (1979) señala que *%la costa chilena ha sufrido de ataques episódicos e incidentales debido a bravesas 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 kms. 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. En todos los casos estudiados el oleaje tuvo efectos bastante destructores sobre la infraestructura portuaria, defensas costeras y caminos.

Beyá y 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.

La preocupación por el fenómeno de las Marejadas y su impacto en el borde costero, los oportunos avisos y su difusión por los medios de comunicación, han permitido contribuir a la salvaguarda de la vida humana en el mar; sin embargo, se debe lamentar la pérdida de vidas de personas, que corrieron riesgos innecesarios, además de millonarios destrozos y pérdidas económicas.

1. Origen de las olas:

a) Mareas y corrientes por gravedad

Movimiento de ascenso y descenso de la superficie del océano, que ocurren dos veces al día, producidos por la atracción gravitacional de la Luna (y en menor medida del Sol).

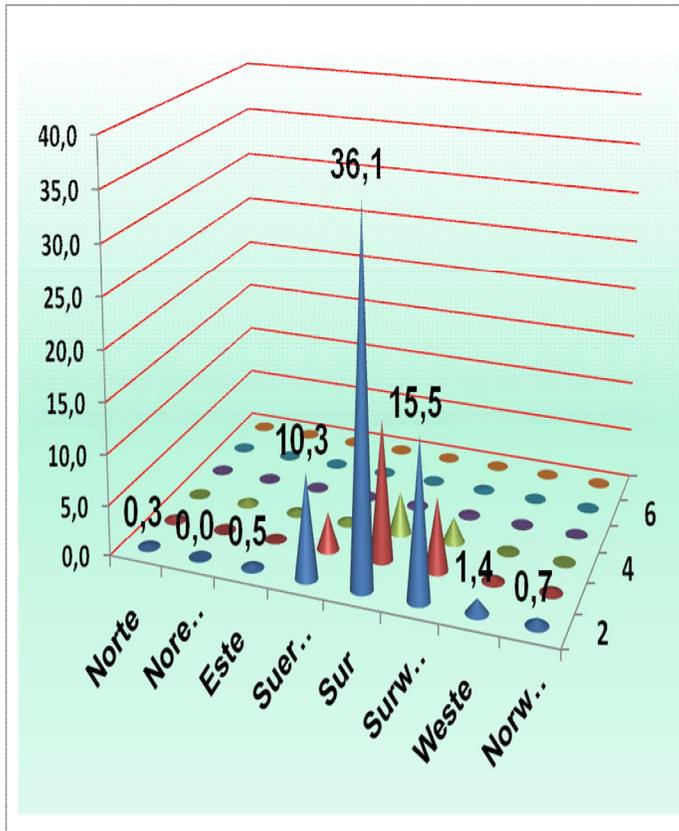
Al ser un efecto de origen astronómico, es posible calcular con adecuada precisión, tanto el horario de ocurrencia (aproximadamente cada seis horas y media), como su amplitud, siendo mayor en Luna Llena y Nueva (mareas vivas) y menor en cuadraturas (menguante o creciente, mareas muertas).

En la entrada de algunas bahías y canales, se puede crear un flujo llenante o vaciante, que produce oleaje y corrientes locales, dificultando el gobierno y seguridad de la navegación de las naves, así como el uso del borde costero.

b) Marejadas por acción del viento

La desigual distribución de la radiación solar sobre la superficie terrestre, es compensada por los gases de efecto invernadero en la atmósfera, a través del transporte de calor entre el Ecuador y los Polos.

Las diferencias de presión y temperatura sobre la superficie terrestre generan el viento, que en la interfase del aire con el océano, efectúa una transferencia de energía cinética a energía potencial, desarrollando un oleaje que dependerá de la duración (persistencia), intensidad y dirección del viento, así como el tamaño del área sobre la que ejerce su fuerza (condiciones necesarias para el denominado Fetch).



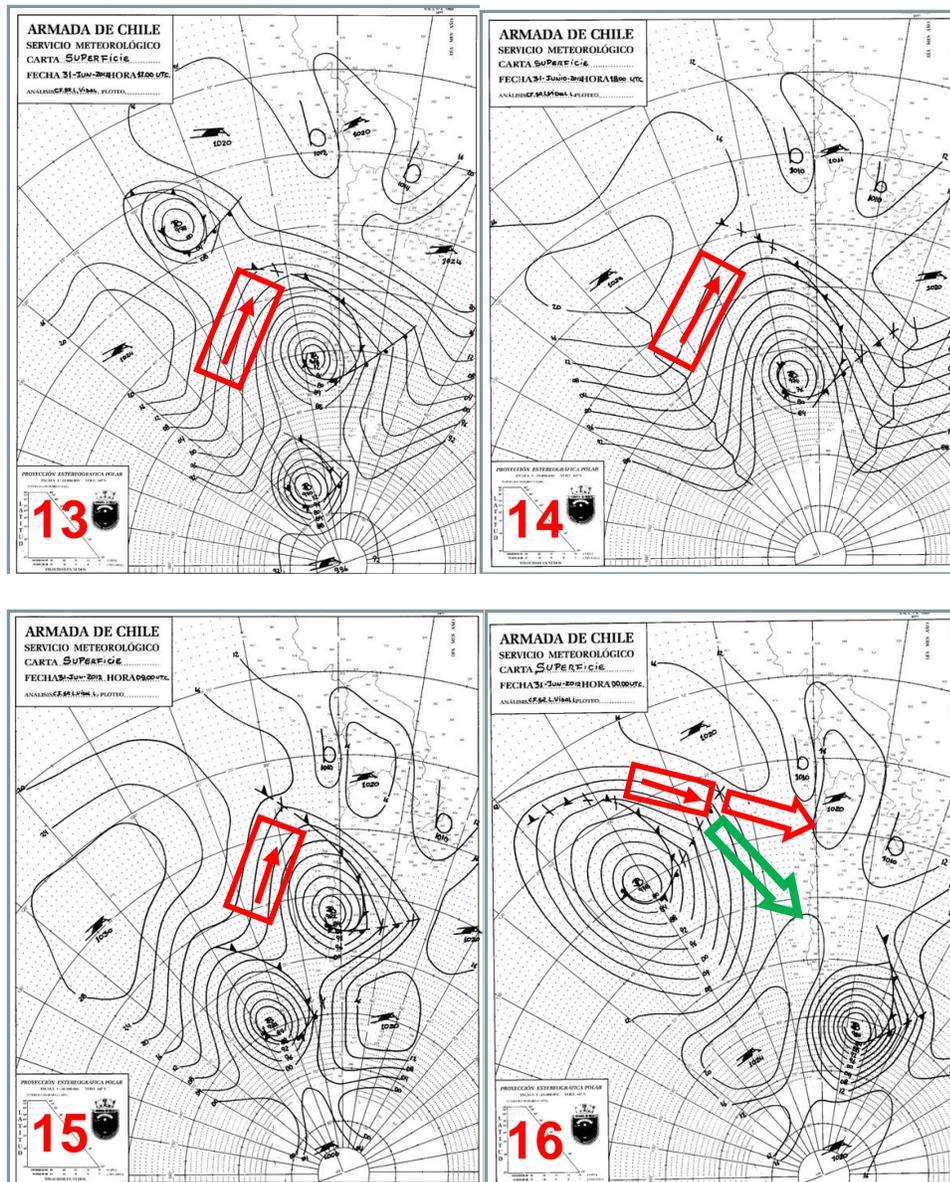
**Figura 12.** Distribución porcentual del mar de fondo que se genera en el área oceánica frente a las costas del Litoral Central y Norte.

Este proceso se verifica a nivel local, a través del ciclo diario de viento y oleaje (con mayor intensidad durante las tardes, asociado al predominio del Anticiclón Semipermanente del Océano Pacífico Sur) o de sus variaciones estacionales (como el paso intermitente de los Sistemas Frontales y la marcada influencia de la Vaguada Costera).

Estacionalmente el Anticiclón Semipermanente del Océano Pacífico Sur, se mueve latitudinalmente; en verano en el Hemisferio Sur, se desplaza hacia el sur, entre 500 a 600 kms., posicionando su centro a la altura de la región del Biobío, generando un bloqueo natural de los sistemas frontales, que durante todo el año siguen afectando el Litoral Sur y Austral; condición que sigue afectando desde el Golfo de Arauco al Sur.

Durante el invierno en el Hemisferio Sur, el Semipermanente del Océano Pacífico Sur posiciona su centro a la altura de la Región de Valparaíso, permitiendo que los sistemas frontales afecten con actividad e intensidad hasta el Litoral Central e incluso hasta la región de Coquimbo en algunas ocasiones.

La condición tipo que generan eventos de marejadas en las costas de Chile, se originan después del paso de sistemas frontales en el mar sur austral, en la condición de inestabilidad postfrontal, cuando el Anticiclón Semipermanente del Océano Pacífico Sur, se proyecta en forma de cuña hacia el sur, en ese lugar se generan fuertes vientos de dirección Sur/Surweste, que superan los 50 nudos, desarrollando un máximo de olas de mar de viento, que superan los 6 a 7 mts. de altura. Una vez que esas olas abandonan su área de generación (Fetch), ahora como mar de fondo, comienzan a desplazarse secuencialmente de sur a norte, afectando las regiones de Aysén, Los Lagos, Los Ríos, la Araucanía, Biobío hasta alcanzar las costas del Litoral Central, Archipiélago de Juan Fernández, Litoral Norte e incluso cuando los sistemas de olas son muy energéticos, de igual forma afectan las costas de Perú, Ecuador, Colombia, Panamá y El Salvador.

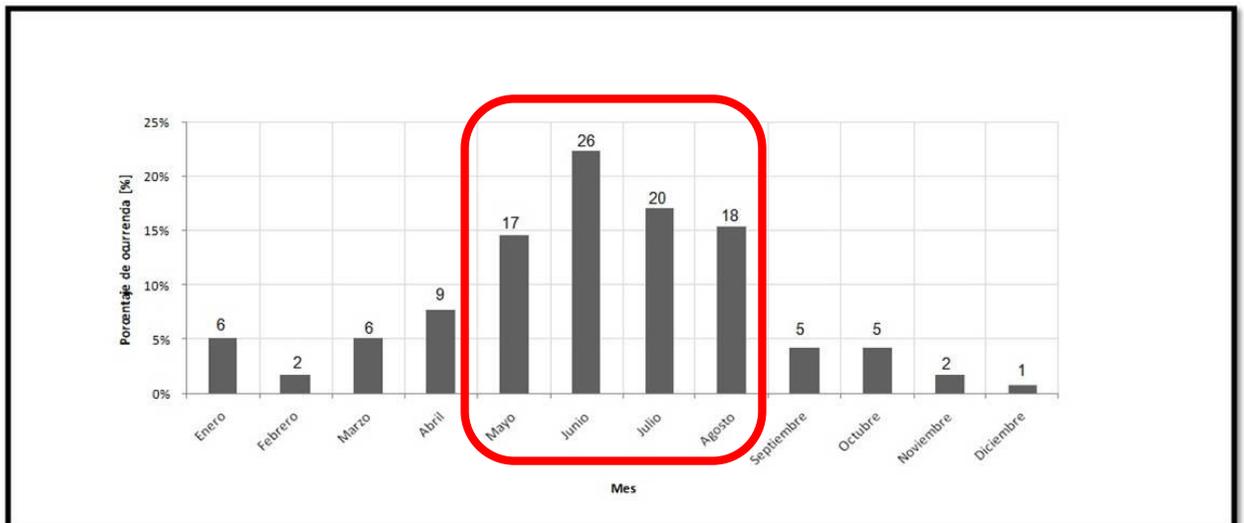


Figuras 13, 14 15 y 16. Las imágenes muestran las configuraciones isobáticas tipos, de áreas de generación de olas de mar de viento (Fetch).

Las primeras tres imágenes (13, 14 y 15), describen tres áreas de generación de olas de mar de viento, señaladas en las cartas meteorológicas de superficie, con triángulos rojos, con flechas del mismo color al centro, que indican la dirección del viento, con una condición de marcado gradiente barométrico, que muestra una condición de inestabilidad postfrontal, asociada a la proyección del Anticiclón Semipermanente del Océano Pacífico sur, que se proyecta hacia el sur. La imagen 16, muestra un sistema frontal desarrollado, ubicado frente a la costa del Litoral Central, que muestra una trayectoria habitual de desplazamiento de baja presión (fecha color verde), que impactan las costas del Litoral sur o austral y, en el menor de los casos, una flecha roja que muestra el movimiento del sistema frontal paralelo a la latitud, en una trayectoria de Este a Oeste, impactando directamente en las costas del Litoral central de Chile; como lo ocurrido el 8 de agosto de 2015.

Las grandes olas que se desarrollan en alta mar, no están sujetas a las limitaciones propias de aguas someras y cercanías de costa, por lo que pueden alcanzar alturas superiores a los 10-15 metros, según la intensidad de los vientos que se registren en los bordes de un Centro de Alta Presión (margen anticiclónico) o de Baja presión atmosférica (asociado a una condición de temporal o hasta un ciclón tropical).

Estas olas, al abandonar la zona de generación, van perdiendo altura pero aumentando su longitud (y por ende su período), siendo capaces de recorrer miles de kilómetros, atraviesan gran parte del Océano Pacífico y al llegar a la costa, rompen con mucha energía.



**Figura 17.** Imagen de distribución mensual eventos de marejadas que produjeron daños (valores sobre las barras indican la cantidad de eventos identificados para cada mes, Rodrigo Campos, José Beyá y Manuel Mena, XXII Congreso de Ingeniería Hidráulica, octubre 2015).

Rodrigo Campos, José Beyá y Manuel Mena, en el XXII Congreso de Ingeniería Hidráulica, octubre 2015. 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 de European Research Area-European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), que presenta una estadística desde 1979 a la fecha, se realizó una selección de fechas de posibles eventos de marejadas con daños. Los parámetros presentes en esta base de datos ERA-Interim corresponden a altura significativa ( $HS$ ), dirección media ( $Dm$ ) y periodo medio ( $Tm$ ) del oleaje en aguas profundas cada 6 horas, que muestra la Figura 17.

En cuanto a la distribución mensual de marejadas, la Figura 17 muestra que la mayor cantidad de eventos ocurren entre los meses de Mayo y Agosto, alcanzando su máximo en 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 y Romero, 1977; NOAA, 2004). En Chile, principalmente en la zona central, se producen temporales asociados a sistemas frontales 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).

c) Maremotos de origen sísmico.

El movimiento de las placas tectónicas, así como la ruptura del fondo marino.

Nuestro país, ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico.

Sistema de Alarma de Maremotos SHOA, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI).

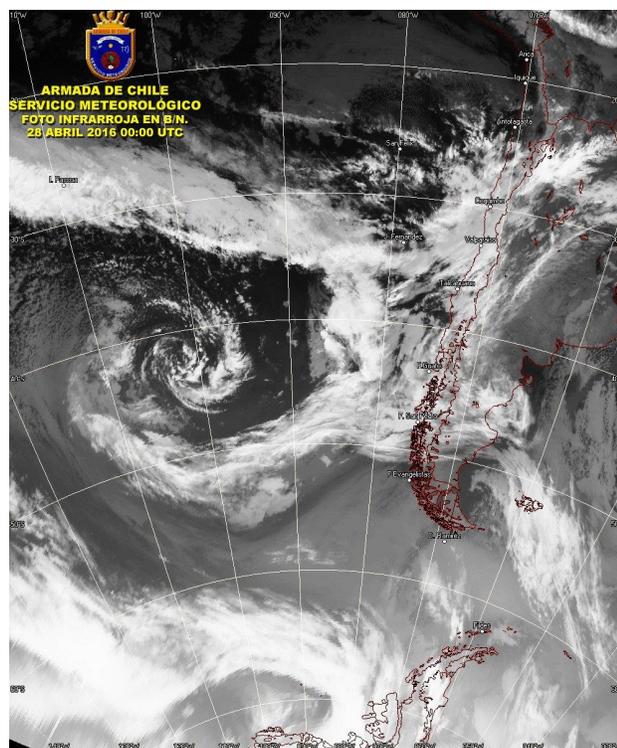
2. Predicción y Monitoreo del Oleaje.

a) Imágenes Satelitales:

Capacidad de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA su sigla en inglés) Geostationary Operational Environmental Satellite(GOES), satélite geoestacionario GOES-13 ubicado en  $75^\circ$  Weste, sobre el Ecuador, a una altura de 36.000 Km de altitud, con la capacidad de identificar centros de acción, sistemas frontales, vaguadas costeras, depresiones, tormentas tropicales, ciclones, huracanes y tifones.

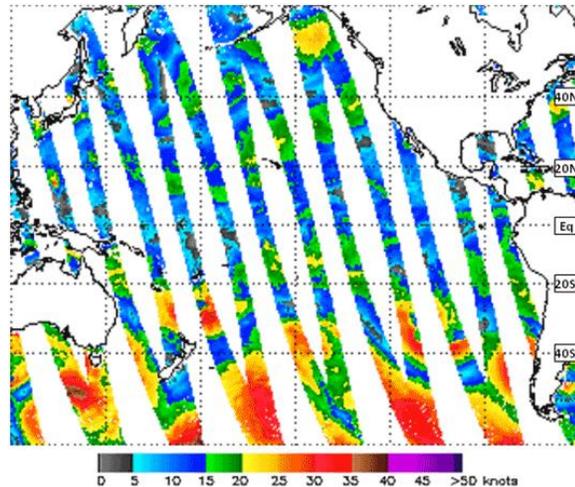


**Figura 18.** El huracán Katrina fue uno de los más destructivos y el que causó más víctimas mortales de la temporada de huracanes en el Atlántico de 2005.



**Figura 19.** Imagen satelital Goes-13 infrarrojo, que muestra sistema frontal, en fase de oclusión y disipación.

Con diferentes canales del espectro radiométrico en satélites de órbita polar y oblicua, permiten a la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera (NOAA) determinar la altimetría promedio y el movimiento de las nubes, deduciendo la intensidad de los vientos a nivel global y las olas generadas en cada uno de los Fetch.

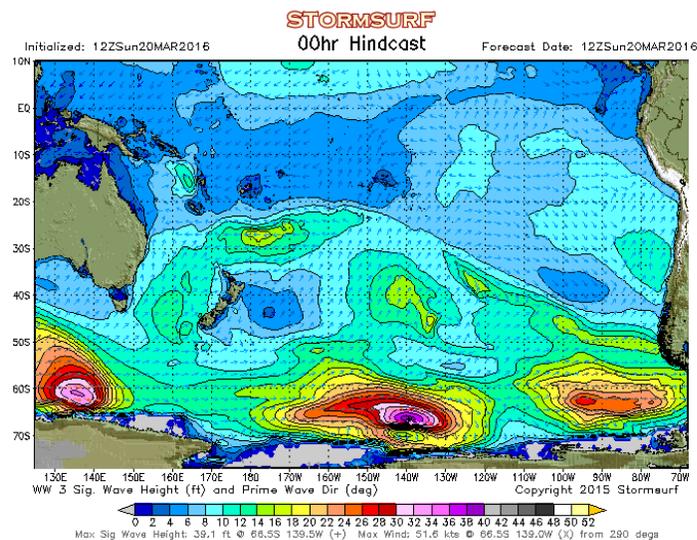


**Figura 20.** Imagen de viento medido por satélite Ascát

b) Modelamiento computacional:

NOAA Wave Watch III incorpora estas mediciones al Global Forecast System (GFS) y The Weather Research & Forecasting Model (WRF).

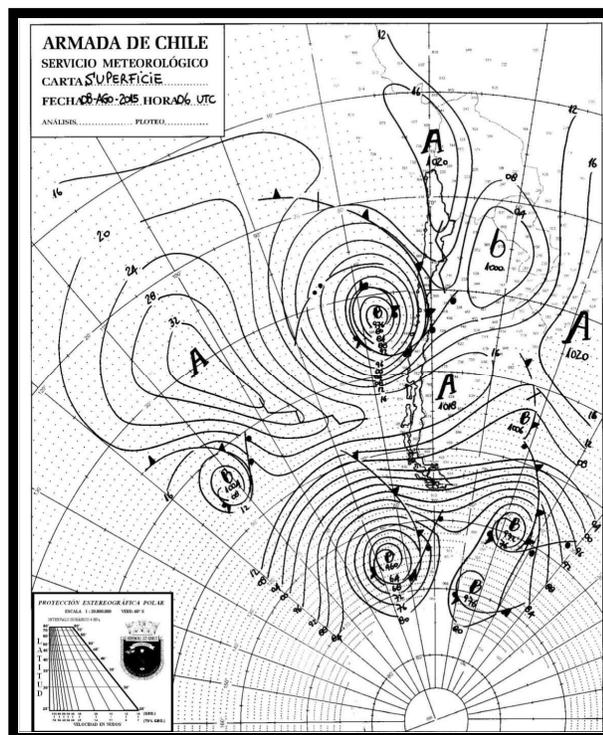
Los Centros de Análisis dependientes del Servicio Meteorológico de la Armada (SMA) utilizan esta información y otras salidas disponibles, para la confección de los pronósticos diarios de tiempo marítimo, tanto en el área oceánica como sectores costeros.



**Figura 21.** Imagen de modelo de olas Wave Watch III, a través de [www.stormsurf.com](http://www.stormsurf.com)

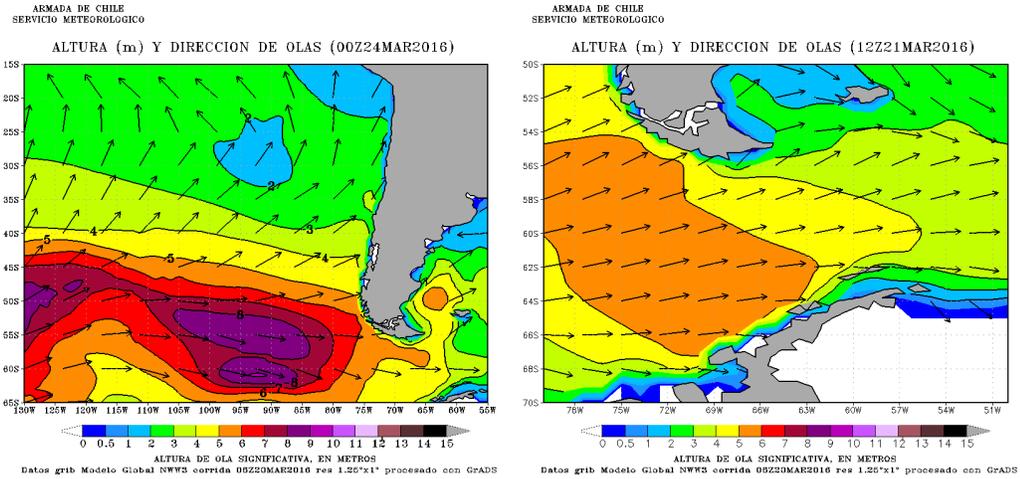
A través del tiempo, se han establecido ciertos criterios para la emisión de Avisos Especiales, de Mal Tiempo, Temporal y Marejadas; según se alcancen determinados valores de intensidad y dirección del viento, altura, dirección y período de las olas.

Por ejemplo, si en Valparaíso se espera que al comenzar el día, el viento sea de dirección Sur con 10-15 nudos, aumentando por la tarde a 25-30 rachas 40 nudos y el estado del mar cambie de rizada, aumentando hasta marejada; todos estos parámetros se incluyen dentro del pronóstico meteorológico marítimo normal, dado que la mayor parte de la bahía se encuentra protegida de este tipo de condiciones. Sin embargo, si el viento soplara desde el Norte y las olas vinieran de esa dirección, correspondería a un Aviso de Mal Tiempo.



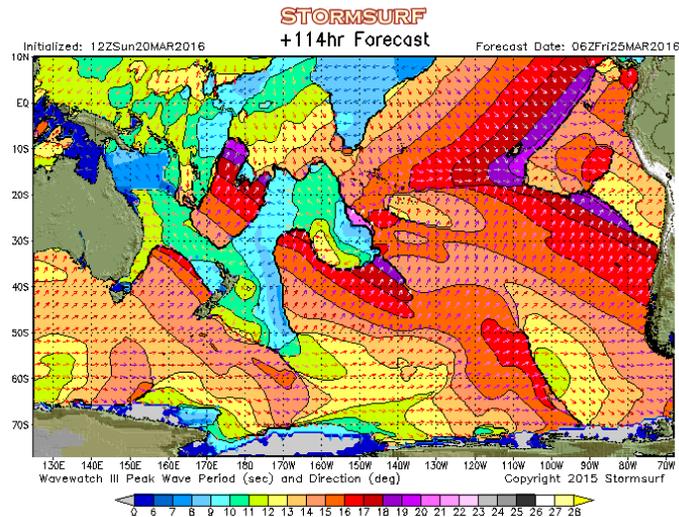
**Figura 22.** Imagen de carta meteorológica de superficie elaborada por el Centro Meteorológico Marítimo de Valparaíso, correspondiente al 8 de agosto de 2015, a las (06 UTC) 03:00 hora local.

Asimismo, cuando el oleaje viaja miles de kilómetros, desde una zona que fue afectada por fuerte viento y oleaje, a otra que permanecía en calma; se envía un Aviso de Marejadas, con el fin que se tomen las medidas necesarias para la seguridad de la navegación y operaciones portuarias, actividades de pesca, buceo, deportes náuticos, recolección de orilla y recreativas.



**Figuras 23 y 24.** Imágenes de modelamiento numérico de altura y dirección de las olas frente a las costas de Chile y, en específico del mar austral, elaborado por el Servicio Meteorológico de la Armada.

En caso que las olas tengan un período extenso (superior a 18 segundos), provengan de dirección Norte, con una altura de 3-4 metros y/o coincidan con las mareas de sicigia, se modifica el texto y se indica como Aviso de **Marejadas Anormales+** (sus efectos serán superiores al promedio, con eventuales daños a las infraestructuras costeras y mayor peligro para las personas que realizan algún tipo de actividad; ya sea, laboral, deportiva o recreativa).

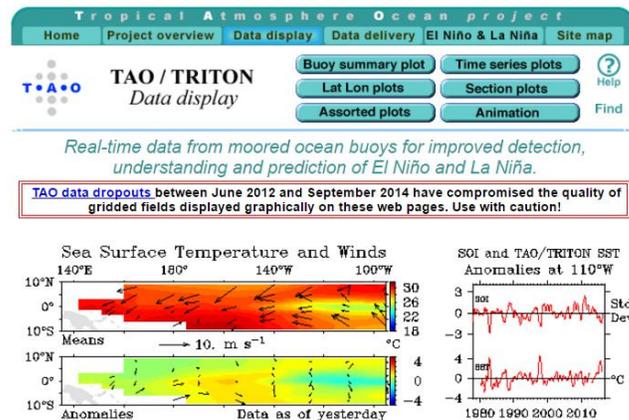


**Figura 25.** Imagen de modelamiento numérico Wave Watch III, de periodos de las olas en la cuenca del Océano Pacífico Sur, a través de [www.stormsurf.com](http://www.stormsurf.com)

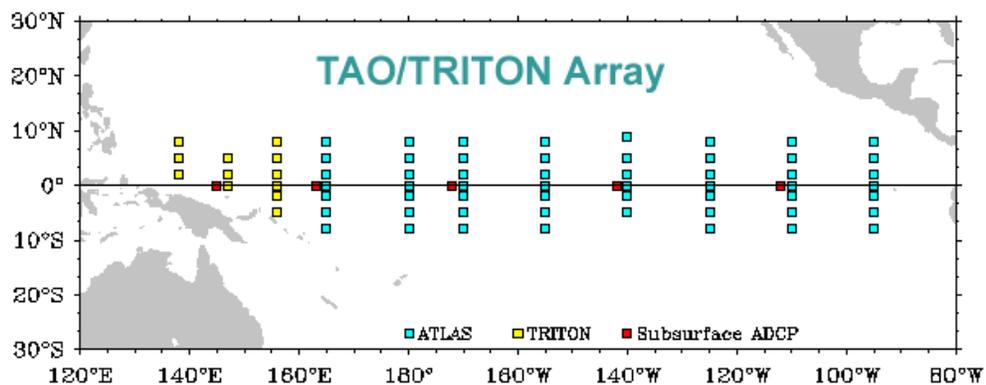
## c) Boyas y buques voluntarios.

Para el monitoreo de las condiciones en alta mar, los países miembros de la OMM disponen de boyas medidoras de oleaje y la colaboración de buques voluntarios de observación meteorológica, siendo el Océano Pacífico Sur Este, una de las regiones que concita el mayor interés en la investigación científica, dada su gran extensión y la escasez de datos disponibles en tiempo real.

Para el monitoreo de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), evento climático natural en el Océano pacífico ecuatorial Central (Maturana 2004), se realiza a través del Proyecto de Vigilancia Oceanográfica y Atmosférica TAO/Tritón, que considera una matriz de 70 boyas fondeadas en la franja del Océano Pacífico Ecuatorial desde la costa de América hasta las costas de Australia.



**Figura 26.** Imagen de página web del Proyecto de Vigilancia Oceanográfica y Atmosférica TAO/Tritón. A través de [www.pmel.noaa.gov/tao/jsdisplay/](http://www.pmel.noaa.gov/tao/jsdisplay/)



**Figura 27.** Matriz de boyas de Proyecto Tao/Tritón

## d) Reportes locales.

Las Autoridades Marítimas informan las condiciones meteorológicas para el cierre de los puertos y otras medidas preventivas adoptadas, replicando los comunicados de prensa a través de los medios de comunicación; quienes difunden las informaciones al público, utilizando también las redes sociales, que incluyen las recomendaciones, reportajes, fotos y videos del evento, casi en tiempo real.



**Figura 28.** Imagen de twitter del Servicio Meteorológico de la Armada, en la difusión de Aviso de Marejadas y las horas de pleamar, identificando las horas de mayor intensidad del evento.

## 3. Tendencias Actuales y Futuras.

## a) Cambios en el borde costero.

La construcción de caminos, paseos y desarrollo inmobiliario, sobre las playas, humedales y roqueríos, así como nuevas obras portuarias y canalización de ríos modifican las condiciones marítimas costeras, aumentando el grado de exposición y vulnerabilidad de diferentes tipos de público, que se han acercado hacia el mar.



**Figura 29.** Imagen de construcción de Hotel Punta Piqueros siendo afectado por evento de Marejadas.

Otros procesos naturales también han modificado las costas, como la pérdida de grandes cantidades de arena durante las marejadas de invierno o el hundimiento y levantamiento del terreno por efecto de los terremotos.



**Figura 30.** Imagen socavamiento sector playa Acapulco, donde se encontraban los módulos y puestos de feria artesanal.



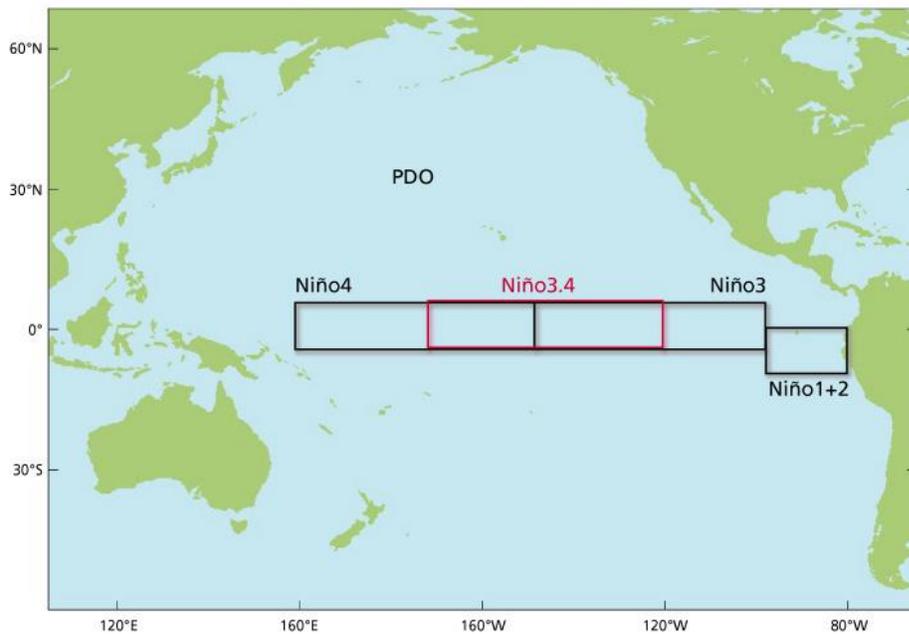
**Figura 31.** Imagen de Avenida Perú; antes había una extensa playa, ahora un enrocado y desplazamiento hacia el oeste del borde costero.



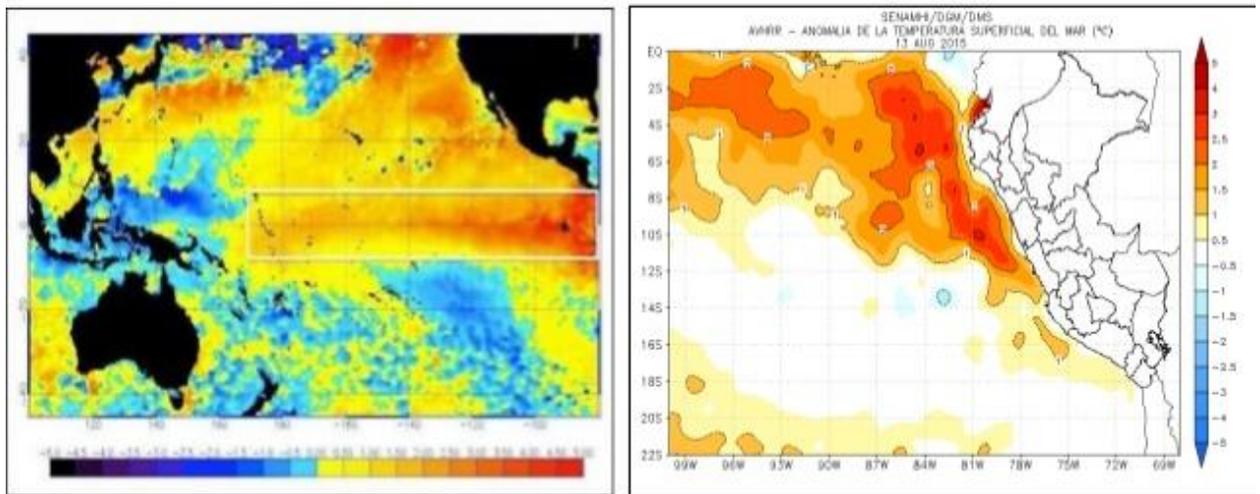
**Figura 32.** Imagen de playa Caleta Abarca, antes con muelle proyectándose hacia el mar. Ahora, después del temporal del 8 de agosto de 2015, quedan a la vista los cimientos de las columnas de antiguo muelle.

b) Variabilidad climática.

El fenómeno de El Niño en su máximo desarrollo durante el invierno del hemisferio Norte.



**Figura 33.** Imagen muestra áreas para monitoreo de la variabilidad climática El Niño Oscilación del Sur (ENOS), siendo referencia para la identificación de eventos cálidos El Niño y eventos fríos La Niña, en las costas de Chile, el área Niño 3.4.



**Figura 34.** Imagen de temperatura superficial y anomalías del agua de mar, en el Océano Pacífico Norte, una fase madura del evento El Niño 2015-2016.

A nivel mundial, el aumento de la temperatura ecuatorial, implica un incremento también de los vientos superficiales, registrándose mayor actividad ciclónica (en frecuencia e intensidad), tanto de los ciclones tropicales (tifones y huracanes) como de los frentes polares (sistemas frontales y temporales).

Otro de los efectos del Calentamiento Global supone el aumento del nivel del mar, aproximadamente en 20 cm. durante el último siglo, factor que no incidiría mayormente en costas profundas y acantiladas, pero sí en bahías abiertas y someras, como se ha visto en las playas y costaneras.

c) Registro de eventos.

La estadística comparada del Centro Meteorológico Marítimo de Valparaíso entre los años 2006-2015 muestra una relativa estacionalidad (con máximos en invierno y verano), pero con un marcado aumento en la cantidad de los eventos de marejadas, contando con varios casos de excepcional fuerza, que llegaron a ser considerados como **anormales** (categoría que fue implementada a contar del año 2012).



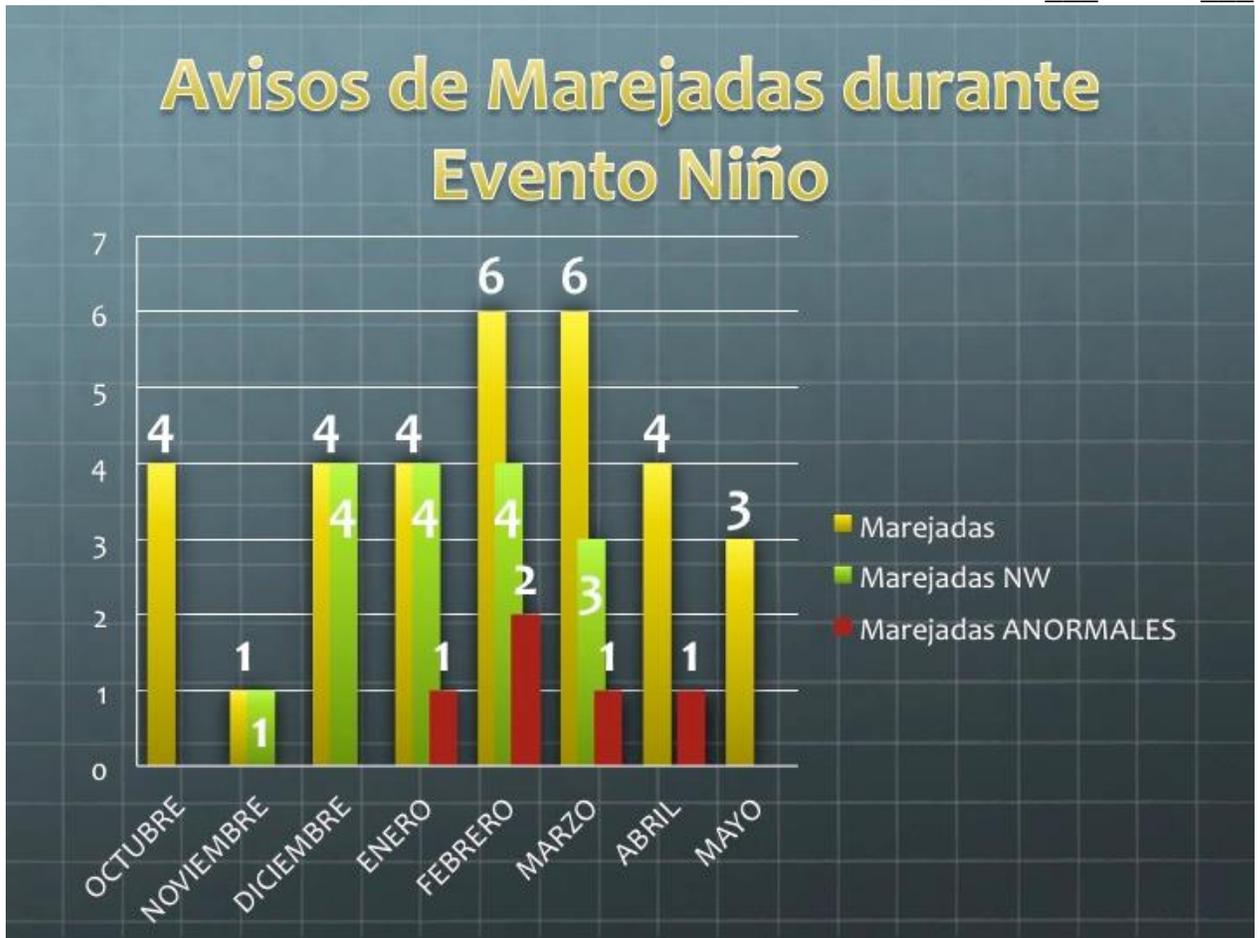
**Figura 35.** Imagen de estadística de número de eventos por año, del 2006 al 2016.

Para contextualizar el tema de las marejadas, que afectan las costas de Chile, el presente gráfico muestra la estadística dura de eventos de marejadas por año desde el 2006 al 2015, generando un promedio anual de 32,1 incluyendo información del año 2016 a la fecha.



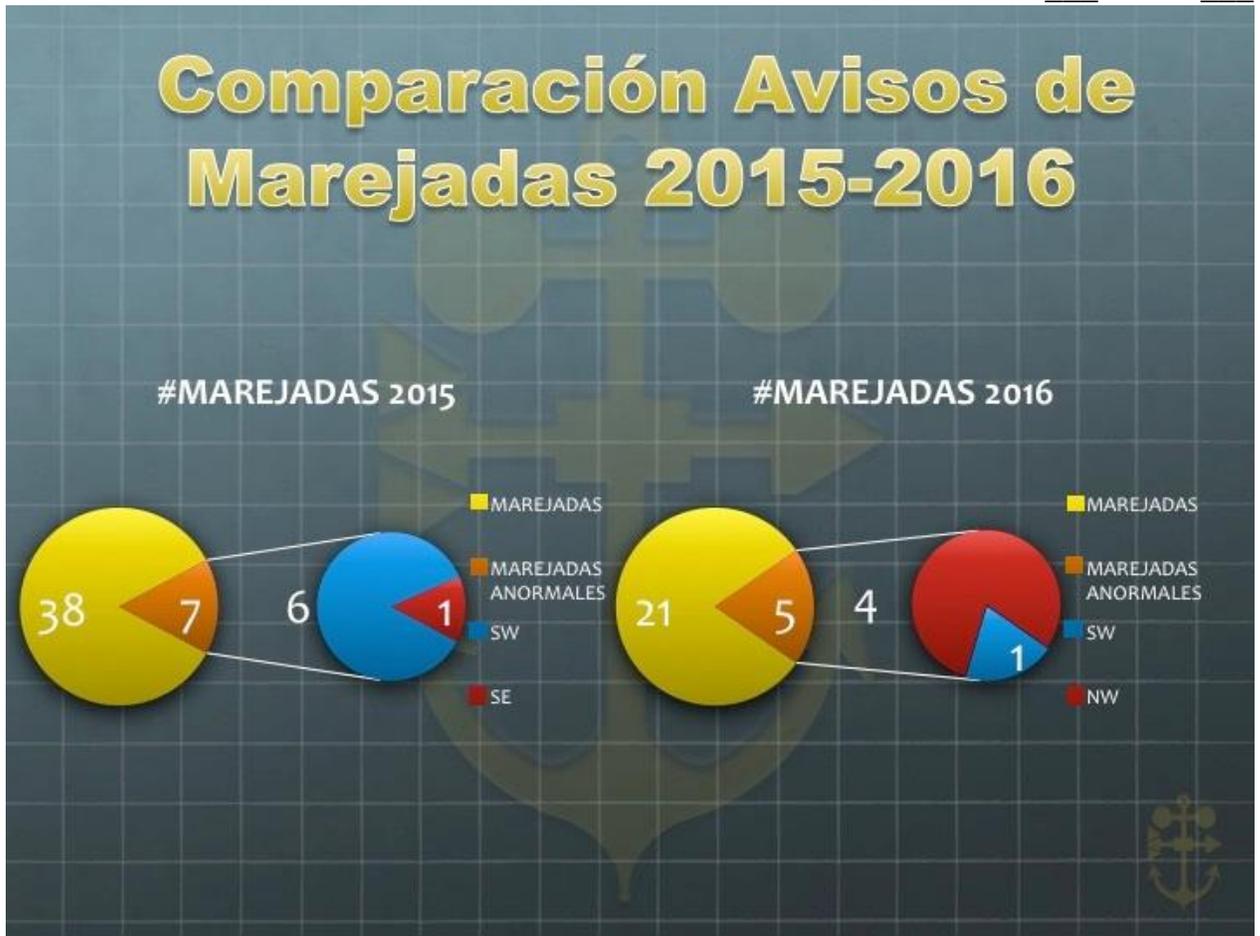
**Figura 36.** Imagen de Estadística de eventos de marejadas año 2015, diferenciando entre total eventos por mes diferenciados por eventos del SW, NW y Eventos de Marejadas Anormales.

La estadística de marejadas del año 2015, muestra en el mes de noviembre y diciembre los primeros indicios de eventos de mar de fondo del NW, barra de color celeste, que identifican 1 evento en noviembre y 4 episodios en diciembre, que fueron categorizados como Eventos de Marejadas, que no generaron mayores problemas en el Borde Costero del Litoral Norte y Central.



**Figura 37.** Imagen de Total de eventos de marejadas desde mes de octubre 2015 a abril 2016, diferenciando total eventos por mes, marejadas del NW y marejadas anormales.

El gráfico muestra claramente un aumento explosivo de eventos de Marejadas con mar de fondo de dirección NW, 1 en el mes de noviembre, 4 en diciembre, 4 en enero, 4 febrero y 1 en marzo. De los eventos de marejadas del NW, 4 de ellos fueron categorizados como Eventos de Marejadas Anormales.



**Figura 38.** Imagen muestra detalle de eventos de marejadas año 2015 y 2016.

La figura 38 muestra el detalle de eventos de marejadas registrados el año 2015, que totalizó 45 eventos, desglosados en 38 eventos categorizados como %Marejadas+ y 7 categorizados como %Marejadas Anormales+; total de eventos que superaron en un 40% al promedio anual, del período 2006-2015, de 32 eventos. De los 45 eventos registrados el año 2015; seis fueron categorizados como Marejadas Anormales, de los cuales 5, con mar de fondo del SW y uno del SE, que afectó a Isla de Pascua. Durante el año 2015 no se registraron eventos de Marejadas Anormales, con mar de fondo del NW.

Sin embargo, el detalle de los eventos registrados el año 2016, a la fecha 09 de junio, registra un total de 25 eventos, de los cuales excepcionalmente 5 de ellos han sido categorizados como evento de %Marejadas Anormales+. El detalle de los 5 eventos de Marejadas Anormales, muestran 4, con mar de fondo del NW, 1 en enero, 2 en febrero y 1 a comienzos de marzo. El quinto evento de Marejadas Anormales afectó con mar de fondo del SW a Isla de Pascua en el mes de Abril.

Aclaración sobre categorización de los eventos de Marejadas:

1. Evento de Marejadas: Generan rompiente en el borde costero, que no sobrepasan la línea de la costa.
2. Evento de Marejadas Anormales: Generan fuerte rompiente en el borde costero, potenciales daños a la infraestructura e inundaciones costeras.

CRITERIOS PARA LA EMISIÓN DE AVISOS DE MAREJADAS				
ORIGEN DEL MAR DE FONDO	DIRECCIÓN DE LAS OLAS OCEÁNICAS	ALTURA DE LAS OLAS EN METROS	PERIODO DE LAS OLAS EN SEGUNDOS	OBSERVACIÓN
OCÉANO PACÍFICO SUR O CAMPO LEJANO	SURWESTE/WESTE	$\geq 3,0$ Ó $4,0$	NO CONSIDERADO	SE PROYECTAN EN FORMA DE ABANICO, BUSCANDO LA PERPENDICULARIDAD DE LA COSTA
CAMPO LEJANO	NORWESTE	$> 1,8$ E $< 2,5$	$< 18$	OLAS INGRESAN DIRECTAMENTE AL INTERIOR DE BAHÍAS

CRITERIOS PARA LA EMISIÓN DE AVISOS DE MAREJADAS ANORMALES				
ORIGEN DEL MAR DE FONDO	DIRECCIÓN DE LAS OLAS OCEÁNICAS	ALTURA DE LAS OLAS EN METROS	PERIODO DE LAS OLAS EN SEGUNDOS	OBSERVACIÓN
OCÉANO PACÍFICO SUR O CAMPO LEJANO	SURWESTE/WESTE	$\geq 4,0$ Ó $6,0$	NO CONSIDERADO	SE PROYECTAN EN FORMA DE ABANICO, BUSCANDO LA PERPENDICULARIDAD DE LA COSTA, GENERANDO POTENCIALES DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA COSTERA.
CAMPO LEJANO	NORWESTE	$\geq 2,5$	$> 14$ y $< 18$	OLAS INGRESAN DIRECTAMENTE AL INTERIOR DE BAHÍAS, GENERANDO POTENCIALES DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA COSTERA. SOBREPASAN LA LÍNEA DE COSTA. GENERAN INUNDACIONES.
CAMPO LEJANO	NORWESTE	$\geq 2,0$	$\geq 18$	OLAS INGRESAN DIRECTAMENTE AL INTERIOR DE BAHÍAS, GENERANDO POTENCIALES DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA COSTERA. SOBREPASAN LA LÍNEA DE COSTA. GENERAN INUNDACIONES.

**Figura 39.** Imagen con criterios para la emisión de Avisos de Marejadas y Marejadas Anormales.

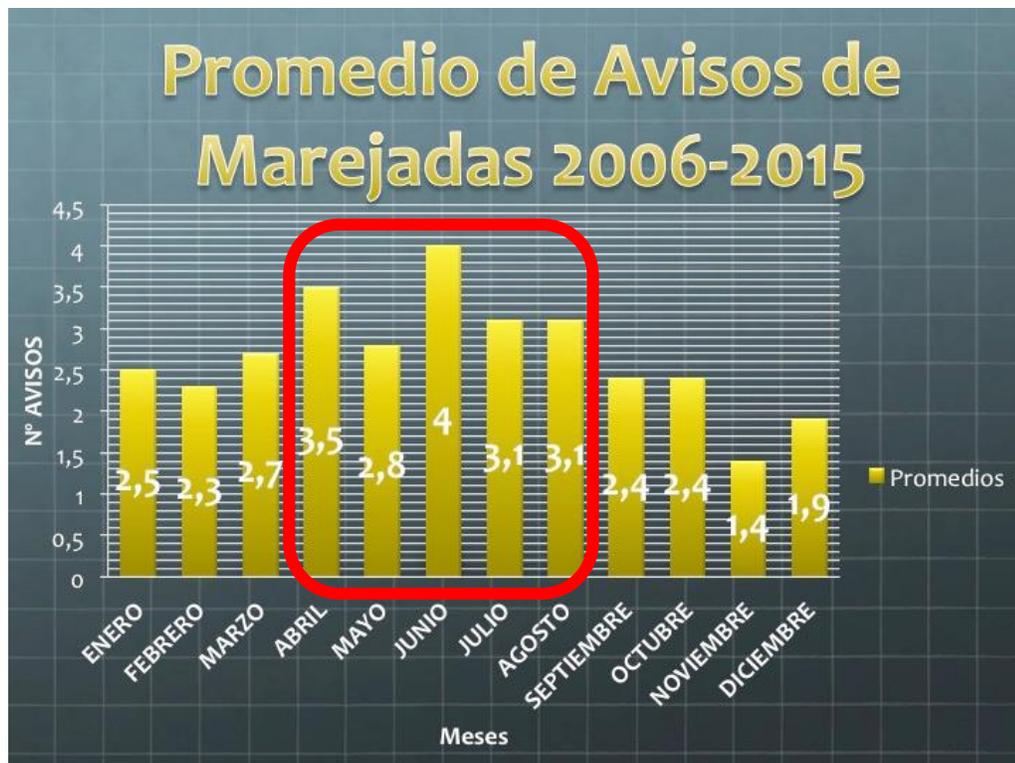
Las características del invierno boreal de diciembre de 2015 a marzo de 2016, coincidió con máxima intensidad de evento El Niño 2015-2016, que fue categorizado como Muy Fuerte, sólo comparado con los Eventos El Niño de los años 1982-1983 y 1997-1998.

La intensificación de los sistemas frontales que afectaron la cuenca del Océano Pacífico Norte, se iniciaba en un circuito en la costa Este de la Isla de Hokkaido, en Japón, en un tránsito Este-West, cruzando al sur de la Península de Kamchatka, en Rusia, luego al sur de las Islas Aleutianas, hasta impactar las costas de Alaska, Canadá y Estados Unidos. En el PostFrontal de esas tormentas, se generaron fuertes vientos de dirección Norte/Norweste de 50 a 70 nudos, Mar de Viento (sea) que alcanzaron alturas de 12 a 14 metros y posterior Mar de Fondo (swell) de dirección Norweste, que recorrió más de 15.000 kms, alcanzando las costas de Sudamérica y en particular las costas del Litoral Norte y Central de Chile.

Esta condición excepcional generó 4 eventos de Marejadas Anormales del NW, los meses de enero (1 evento), febrero (2 eventos) y marzo (1 evento), detallados en las Figuras 37 y 38. Los registros del año 2006 a la fecha no habían identificado eventos de estas características los meses de enero, febrero y marzo.

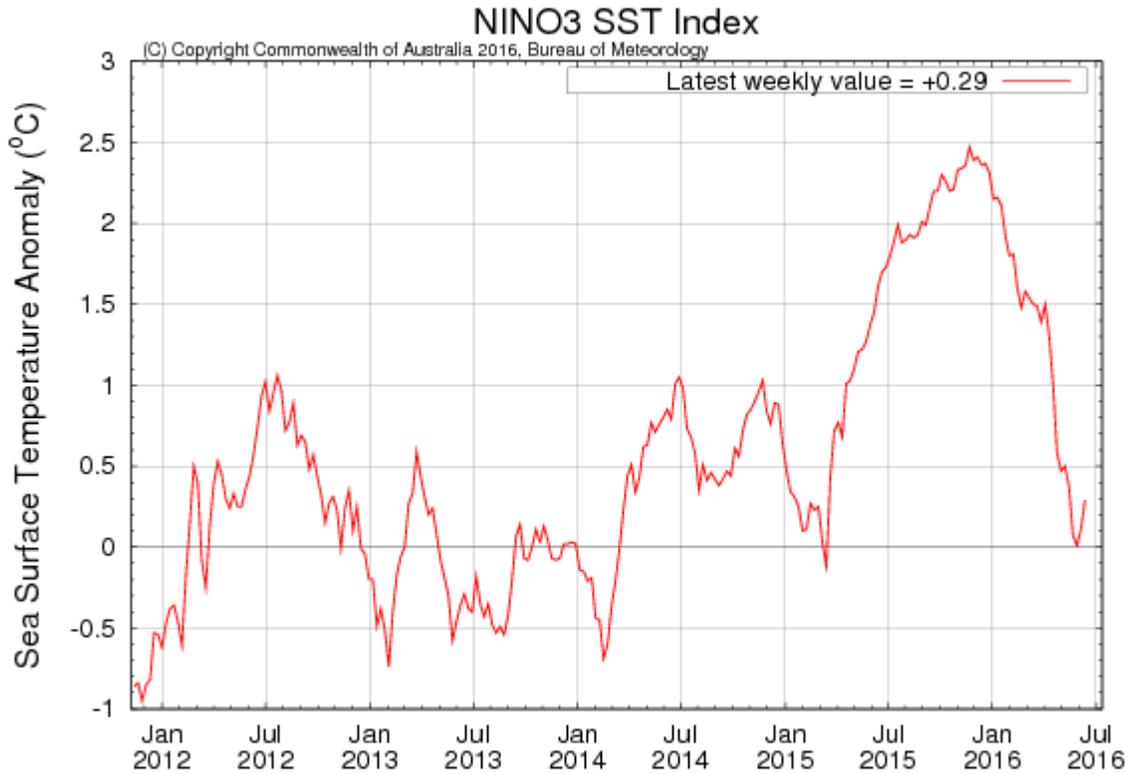
## LAS MAREJADAS LLEGARON PARA QUEDARSE, CONCLUSIONES Y PROYECCIONES:

1. Los 26 eventos de marejadas registrados a la fecha, año 2016 y, considerando el mayor promedio de ocurrencia en los meses de mayo, junio, julio y agosto, sumado a la estadística descrita en la Figura 17, permite proyectar un aumento de eventos de marejadas del Surweste, que a diciembre del año 2016, superarán el promedio anual de 32,1 eventos por año.

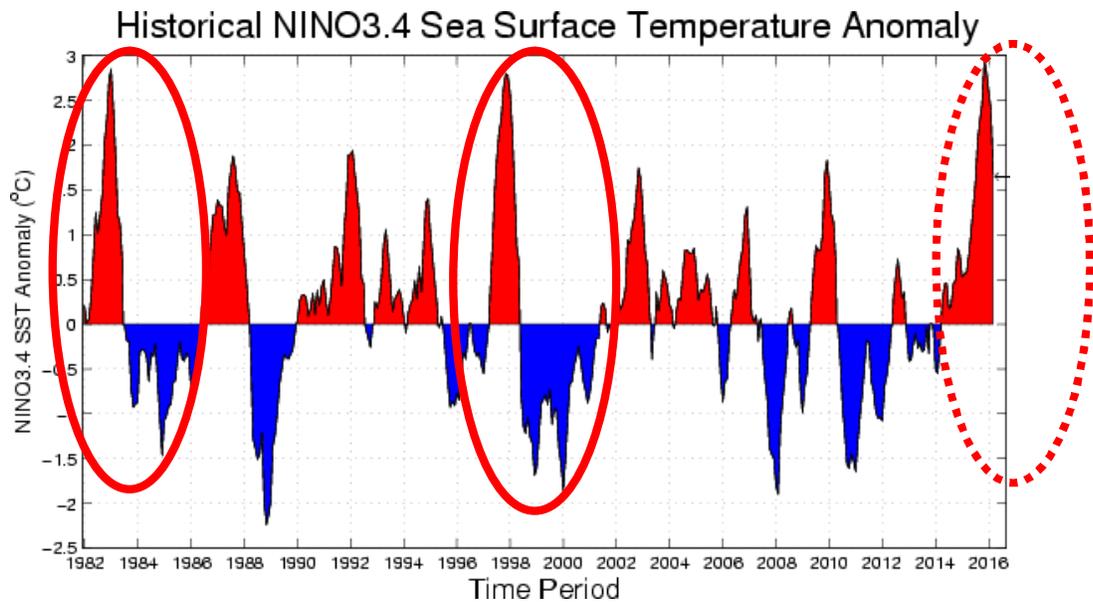


**Figura 40.** Imagen muestra mayor promedio de ocurrencia de eventos de marejadas, en los meses de abril a agosto, asociado a mayor actividad en cuanto a ocurrencia de sistemas frontales en el mar sur austral.

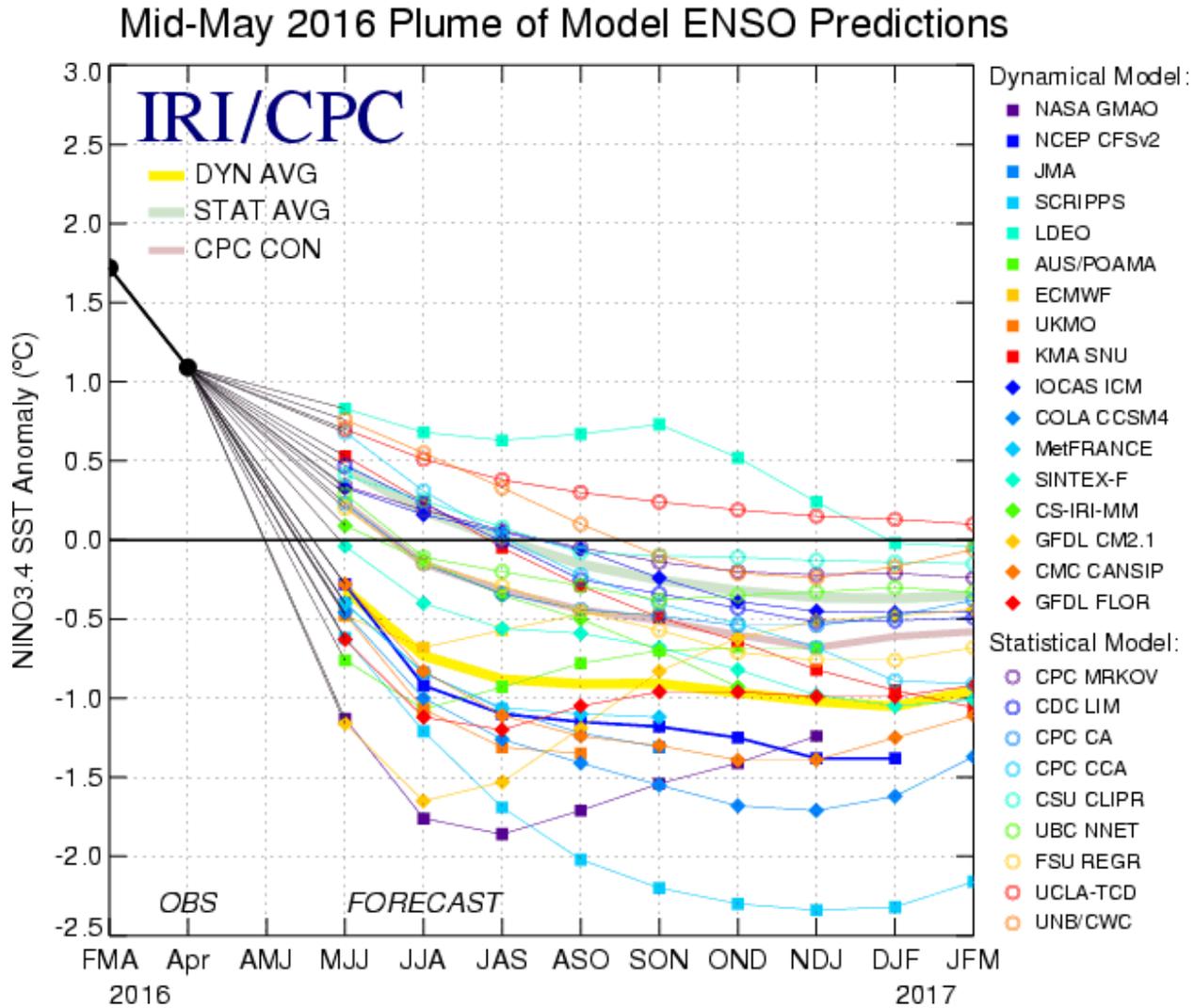
2. Respecto de los eventos categorizados como **Marejadas Anormales+**, con mar de fondo de dirección Norweste, debiera haber una disminución sustancial, considerando que el evento El Niño 2015-2016, se encuentra en una fase de decaimiento, previéndose que en los primeros meses del invierno del Hemisferio Sur (junio-julio), debiera estar en una fase neutra.



**Figura 41.** Imagen la variación semanal de la temperatura superficial del agua de mar en la franja ecuatorial El Niño 3.4, referencial para las costas de Chile. Actualizada al 12 de junio de 2016, con una anomalía de +0,29°C.



**Figura 42.** Imagen muestra los eventos El Niño 1982-1983, 1997-1998, categorizados desde 1950 a la fecha como eventos Muy Fuertes, que posteriormente se generaron eventos fríos La Niña muy intensos, identificados en los óvalos rojos. Y el evento del 2015-2016, que se prevé según los pronósticos climáticos, en el segundo semestre 2016, destacado con óvalo color rojo segmentado, el desarrollo un evento frío La Niña.



**Figura 43.** Imagen de pronóstico estacional Evento El Niño y proyecciones futuras de pronósticos dinámicos y estadísticos.

3. Los pronósticos climáticos estacionales prevén que en el segundo semestre del presente año, debiéramos pasar a una fase fría, evento La Niña, como sucedió en los años 1982-1983 y 1997-1998. Por lo tanto la influencia del evento El Niño para el invierno 2016-2017, en el Hemisferio Norte no estará presente; en consecuencia, menor probabilidad de ocurrencia de Eventos de Marejadas Anormales+con mar de fondo del Norweste.

Valparaíso 13 de junio de 2016

FIRMADO

**LUIS VIDAL LEMA  
CAPITÁN DE FRAGATA OM  
JEFE DEL SERVICIO METEOROLÓGICO DE LA ARMADA**