

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS
SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



PROVINCIA DEL CHUBUT

**CARACTERIZACIÓN DEL TEMPORAL
OCURRIDO EN PUERTO MADRYN (CHUBUT)
EN EL MES DE ABRIL DE 2014**

Octubre, 2014

Informe LHA- 349-01-14

LABORATORIO DE HIDRAULICA

CARACTERIZACIÓN DEL TEMPORAL OCURRIDO EN PUERTO MADRYN (CHUBUT) EN EL MES DE ABRIL DE 2014

RESUMEN

Se presenta una evaluación de la altura de ola probable ocurrida en el Muelle Almirante Storni, en la ciudad de Puerto Madryn (Provincia del Chubut) en oportunidad de un intenso temporal acontecido en el Golfo Nuevo en abril de 2014. Se realiza una interpretación estadística de los datos disponibles y a partir de ello, una estimación del período de retorno del evento.

PALABRAS CLAVE

Olas – vientos - modelación matemática – Golfo Nuevo - Puerto Madryn

Informe	LHA-349-01-14
Fecha	Octubre, 2014
PROYECTO	1300
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección General de Infraestructura

INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

Presidente
Vicepresidente

Dr. Raúl A. LOPARDO
Ing. Oscar N. BRONZINA

Gerente de Programas y Proyectos

Ing. Jorge A. MAZA

Laboratorio de Hidráulica

Director

Ing. Julio De LIO

Jefe del Programa de Hidráulica Marítima

Ing. Roberto D. CASTELLANO

Informe Producido por

Ing. Roberto D. CASTELLANO

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Nicolás Tomazin

Lic. Carlos Haspert

Arq. Sebastián Peralta

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION	1
2	OBJETIVOS.....	2
3	METODOLOGIA	3
4	INFORMACION DE BASE.....	4
4.1	Planos de referencia altimétricos	4
4.2	Batimetría.....	5
4.3	Nivel del Mar.....	6
4.4	Vientos	7
5	SIMULACION NUMERICA	12
5.1	Modelo SWAN	12
5.2	Implementación	12
5.3	Resultados	13
6	ANALISIS ESTADISTICO	15
6.1	Evaluación del período de retorno T_r correspondiente al temporal	15
6.2	Metodología de ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidades	15
6.3	Procedimiento del ajuste de datos.....	16
6.4	Resultados	18
7	CONCLUSIONES	22

Anexo I – Campos de viento durante el desarrollo del evento

Anexo II – Modelo Matemático SWAN

CARACTERIZACION DEL TEMPORAL OCURRIDO EN PUERTO MADRYN (Provincia del Chubut) EN EL MES DE ABRIL DE 2014

Octubre, 2014

1 INTRODUCCION

El día 7 de Abril de 2014, aproximadamente a las 19:00 horas, comenzó a desarrollarse una intensa sudestada en el Golfo Nuevo, afectando particularmente embarcaciones amarradas en el Muelle Almirante Storni de la ciudad de Puerto Madryn.

Como consecuencia de ello siete buques cortaron cabos ocasionando cuantiosos daños en los distintos sistemas de defensas del Sitio N° 5 y, sobre todo, en la supra-estructura del viaducto principal del Muelle Almirante Storni. Los buques que cortaron cabos quedaron varados algunos contra el viaducto, otros en segunda andana y otros en la playa, sin contacto con el viaducto

Dadas las características extraordinarias del evento acaecido, la Dirección de Puertos de la Provincia del Chubut ha requerido al INA el análisis de la situación hidrometeorológica ocurrida, la estimación de las olas que se presentaron en el muelle Storni y la estimación del periodo de retorno del evento.

La tarea encomendada se realiza mediante Acta Complementaria N° 12 al Convenio Marco suscrito en 2002 y renovado en 2007 y 2013.



2 OBJETIVOS

El presente estudio estuvo dirigido a estimar la altura de ola ocurrida en el entorno del Muelle Almirante Storni como consecuencia de un intenso temporal de viento que se desarrolló en el Golfo Nuevo en abril de 2014.

A partir de consideraciones estadísticas aplicadas a los vientos que generaron el intenso oleaje, se estima un período de retorno para el evento ocurrido.

3 METODOLOGIA

Se realizaron simulaciones numéricas de la generación y propagación del oleaje mediante el modelo matemático SWAN (**ANEXO I**) para evaluar el desarrollo del evento y computar altura de ola en el entorno del Muelle Almirante Storni. El modelo requiere de la utilización de datos de vientos y de la construcción de un mapa digital del lecho marino en el área de generación y propagación del oleaje, en este caso el Golfo Nuevo.

La caracterización de la intensidad del evento y la estimación de su período de retorno se realizó mediante la aplicación de modelos de distribución de valores extremos partir de los datos de viento correspondientes al período 1979 - 2014.

4 INFORMACION DE BASE

Para el modelo matemático SWAN la información de base utilizada es la de vientos en las horas en que se desarrolló el temporal. Esa información constituye la forzante del modelo; se requiere además conocer las profundidades en la región de cálculo, en este caso el Golfo Nuevo. Esto se obtuvo a partir de relevamientos batimétricos del Golfo Nuevo (profundidades bajo un plano de referencia), y el nivel del mar (alturas del mar sobre un plano de referencia). Para esta última variable se consideró la marea astronómica predicha para las fechas analizadas, al no disponerse de información más fehaciente (registros directos) que permitiera incorporar el efecto de apilamiento producido por el viento.

Para el análisis estadístico se requiere de una base de datos extensa. En este caso se recurrió a una fuente de información que permitió disponer de datos históricos de 35 años.

De acuerdo a lo expresado se utilizó la siguiente información de base:

4.1 Planos de referencia altimétricos

En la **Figura 1** se muestra la relación entre los planos de referencia.

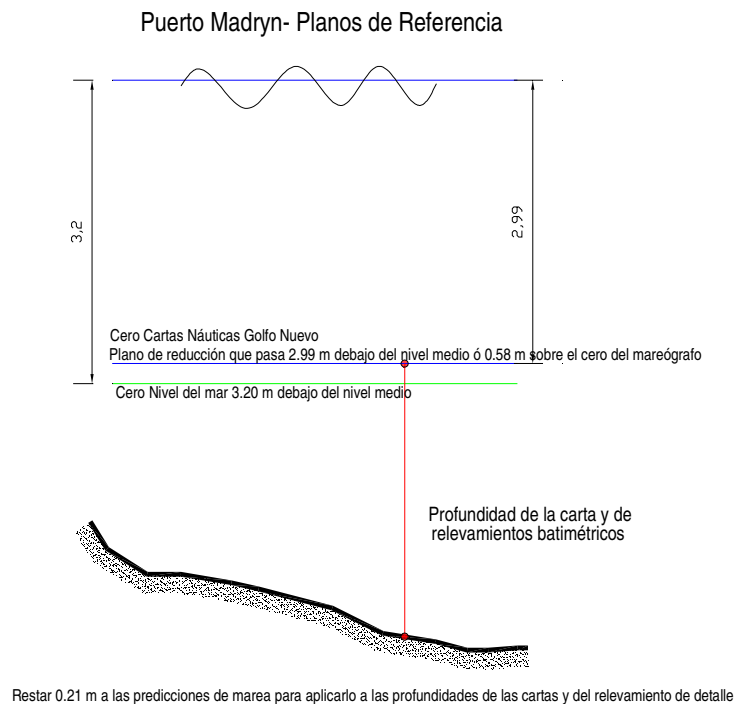


Figura 1 – Planos de referencia altimétricos

4.2 Batimetría

Las profundidades se obtuvieron de Cartas Náuticas publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval (H-218 y 92) y relevamientos de detalle en la zona de los muelles Norte y Sur, según el siguiente detalle:

- a) Carta H-218 – Golfo Nuevo. Escala 1:110.000
- b) Carta 92 – Golfo Nuevo – Puerto Madryn. Escala 1:40.000
- c) Relevamiento SHN abril 2013 escala 1:5000, en torno del Muelle Storni. Las dimensiones de relevamiento son aproximadamente 2600 m perpendiculares a la costa y 2000 m ancho (aproximadamente 1000 m hacia cada lado del eje del muelle). Las profundidades están

expresadas en m y referidas al plano que se halla 0.57 m sobre el cero del mareógrafo. En extremo del muelle la profundidad alcanza aproximadamente 16,50m.

4.3 Nivel del Mar

La marea astronómica se obtuvo de la Tabla de Mareas pronosticadas publicada por SHN – año 2014:

CARTA ARGENTINA H-264

Lat	42°46' S
Lon	65°02' W
HUSO HORARIO	+3
REGIMEN DE MAREA	Semidiurno
ESTABLECIMIENTO DE PUERTO MEVI h 35min	
NIVEL MEDIO	3,20 m

Las alturas están referidas al plano de reducción que pasa 3,20 m debajo del nivel medio. Para utilizar la carta náutica de referencia H-264, donde se indica que el nivel medio de Puerto Madryn pasa 2,99 sobre el plano de reducción, se les debe restar a esas predicciones 0,21 m para aplicarlos a los sondeos indicados en la misma.

ALTURAS EN m SOBRE EL PLANO DE REDUCCIÓN,
CORRESPONDIENTES A LA OPREDICCIÓN 2014

PLEAMAR		BAJAMAR		AMPLITUD	
Maxima	Media	Mas baja	Media	Maxima	Media
6,09	5,21	0,02	1,08	5,86	4,13

Tabla 1 – Marea astronómica en Puerto Madryn

El historial de niveles (marea astronómica) para el periodo analizado se muestra en la **Figura 2**, y fue obtenido a partir de interpolación mediante funciones sinusoidales, entre valores de pleamar y bajamar con un paso de tiempo de 1 hora.

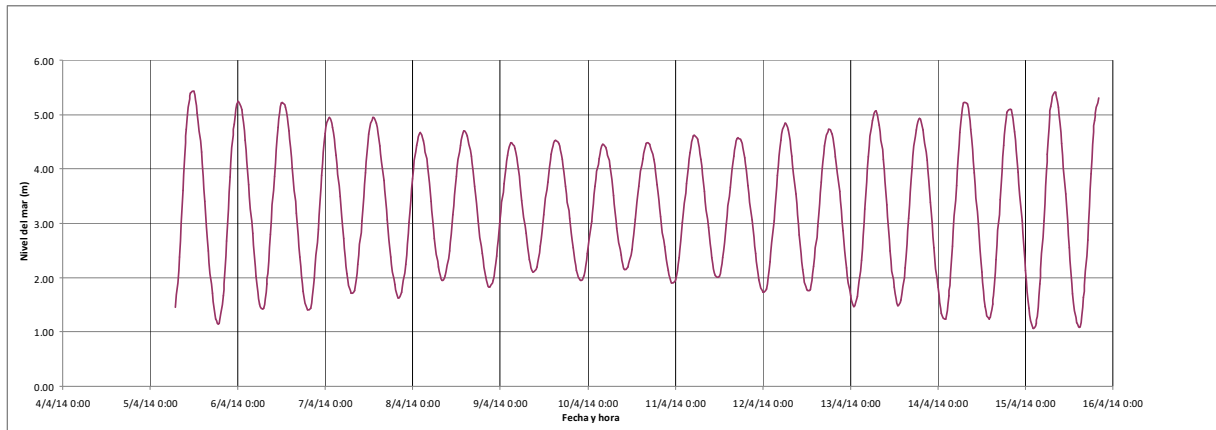


Figura 2 – Nivel del mar (marea astronómica) durante el evento de abril 2014

No existiendo registros directos del nivel del mar, no resultó posible hacer una caracterización más realista de esta variable (afectado por el efecto de apilamiento inducido por el viento); sin embargo, aunque este efecto pueda ser significativo en el área costera, se asumió la hipótesis de que posiblemente no afecta de manera significativa el proceso de generación sobre toda el área del golfo, ni de propagación de las olas (a través de los coeficientes de refracción y bajío) en el entorno del Muelle Storni.

4.4 Vientos

Se utilizaron dos fuentes de información:

a) Registros de la estación meteorológica ubicada en Puerto Madryn 42.7 S - 65.0 W (<http://meteorologia.appm.com.ar>). La estación se halla a 34 m sobre el nivel del mar. En este caso la información disponible (velocidad del viento y dirección) es cada 5 minutos, lo que permite una descripción detallada del evento.

b) Una segunda fuente de información está provista por el *European Center for Midrange Weather Forecast* (ECMWF).

Esta base de datos provee vientos sobre una grilla global de alta resolución, de hasta $0,125^\circ$. Para el presente estudio se dispuso de las series de tiempo de intensidad y dirección del viento (4 datos diarios) desde el 1/1/1979 al 30/06/2014, es decir una serie cercana a los 35 años de extensión.

La información utilizada se corresponde a una matriz de 77 nodos indicados en la **Figura 3**.



Figura 3 – Grilla de nodos de datos de viento (ECMWF)

Si bien la resolución temporal es pobre (un dato cada 6 horas) permite evaluar la distribución espacial del evento, y sobre todo se extiende a lo largo de 35 años lo que permitió abordar un análisis estadístico del evento ocurrido. Ese análisis se realizó para los datos correspondientes al nodo de la grilla indicado en la **Figura 4**, ubicado en la latitud $42,75^\circ\text{S}$ y longitud $295,375^\circ\text{E}$.



Figura 4 – Nodo de la grilla global ECMWF para análisis estadístico

Debe recordarse que los vientos ECMWF son medios en 6 horas. Todos los datos ECMWF corresponden a 10 m de altura sobre el nivel del mar; en particular el nodo utilizado para la comparación (**Figura 4**) y el análisis estadístico se halla ubicado en aguas abiertas. En tanto que los datos correspondientes a la estación Madryn han sido obtenidos a 34 m sobre el nivel del mar, y por su ubicación, se trata de una estación terrestre. Así, los datos de ambas fuentes de información no son estrictamente comparables, no obstante lo cual puede advertirse una razonable concordancia entre ambas fuentes de información.

Los modelos de generación de oleaje utilizan el viento definido a 10 m de altura sobre la superficie. Los datos de la estación Madryn fueron utilizados de manera directa, sin efectuar ninguna corrección ya fuera por altura del instrumento como por ubicación (sobre tierra o sobre aguas abiertas) para la simulación numérica de la evolución del temporal mediante el modelo SWAN.

Una evaluación de esas correcciones, aunque posible, se consideró innecesaria para la aplicación práctica requerida y fuera de los alcances de este estudio. Cabe sin embargo suponer que ambas correcciones actúan en forma opuesta y podrían tender a compensarse.

La **Figura 5** incorpora ambas fuentes de información. En primer lugar permite notar un incremento significativo de la intensidad del viento al finalizar el tercer día (7 de abril), alcanzando el viento velocidades que superaron los 10 m/s desde el día 7/4 a las 18:45 hasta el día 8/4 a las 11:30, con un máximo que alcanzó los 17 a 17,5 m/s (60 a 64 Km/h) entre las 8:00 y las 8:40 del día 8 de abril. Durante todo este tiempo el viento sopló en forma sostenida de dirección SE (135°).

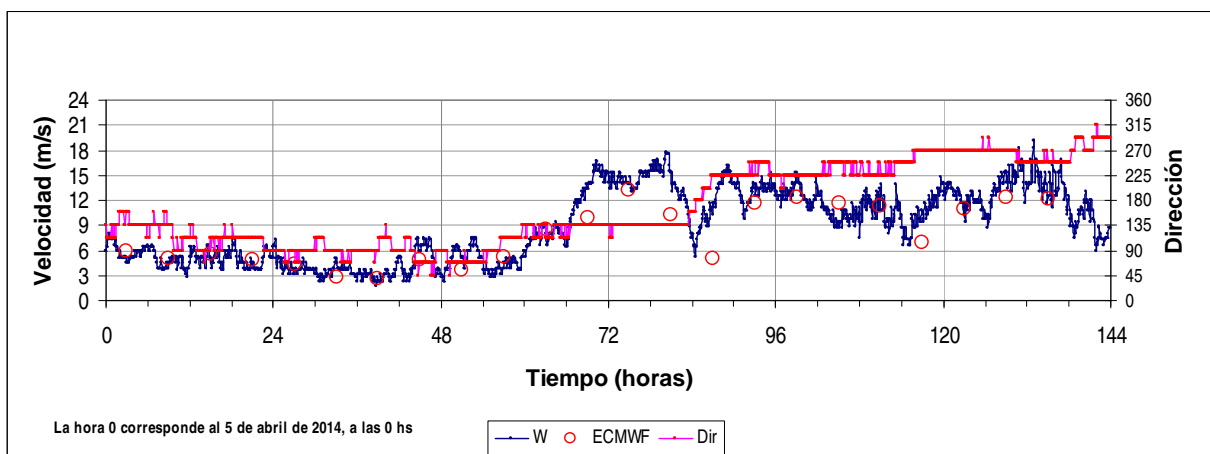


Figura 5 – Vientos registrados en la Estación Puerto Madryn y del modelo global del ECMWF

A partir de los datos de ECMWF se construyeron los campos de vectores de viento. En la **Figura 6** se muestran los campos correspondientes al día 8/4 a la hora 3:00 AM, próximo al momento más intenso del evento. Puede advertirse un incremento en la intensidad del viento para las regiones más orientales del área estudiada, correspondientes a aguas abiertas.

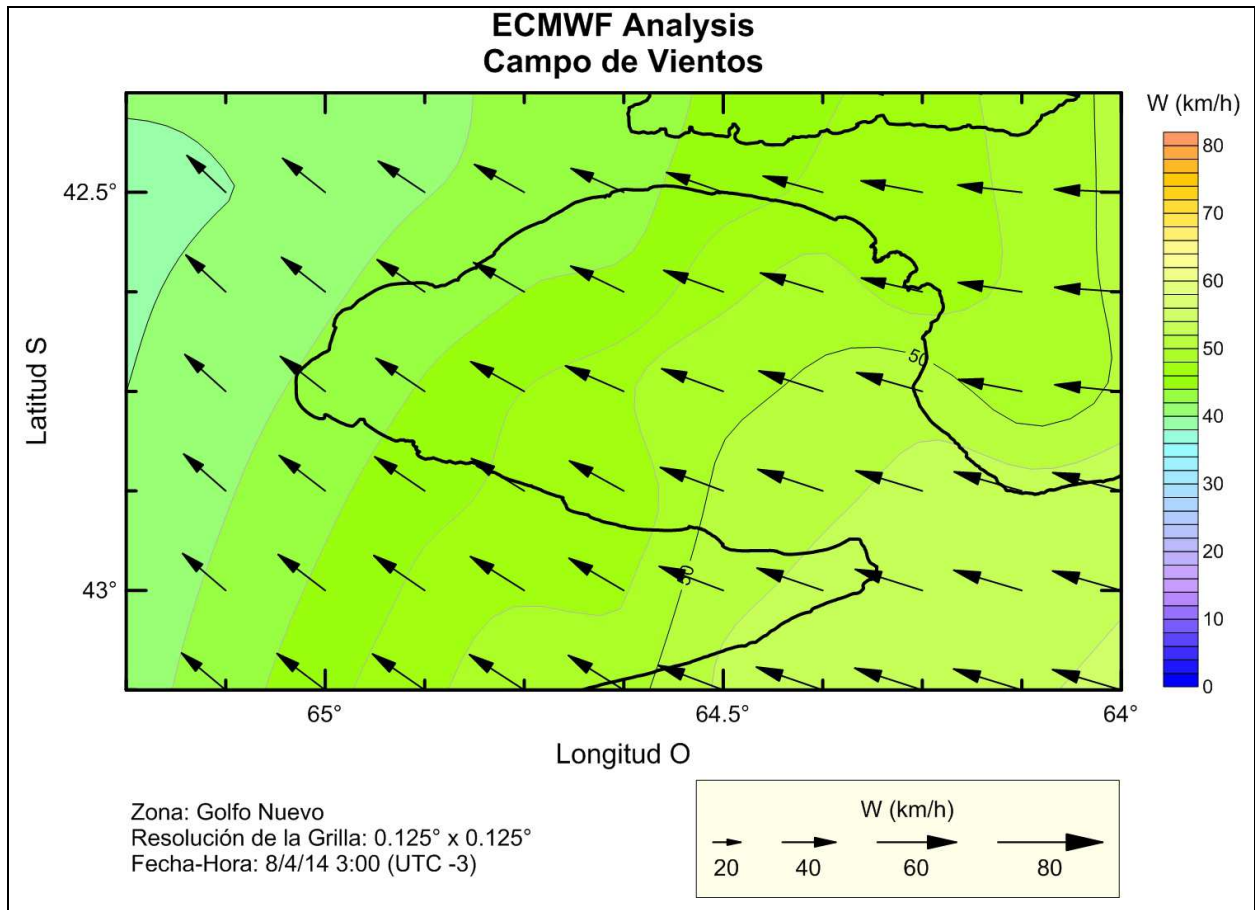


Figura 6 – Campos de viento para el 8 de abril a las 3:00 h

El conjunto completo de campos se ha incorporado en el **Anexo I**.

5 SIMULACION NUMERICA

5.1 Modelo SWAN

Para el desarrollo de la evaluación del oleaje se aplicó el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore, L.H. Holthuijsen, N. Booij y otros) desarrollado en Delft University of Technology, versión 40.41.

SWAN es un sistema computacional que permite calcular el desarrollo de oleaje por efecto de viento, y su propagación en áreas costeras donde se presentan interacciones importantes con el lecho marino, a través principalmente de efectos de fricción de fondo, refracción y bajío.

Una descripción del mismo se incorpora en el **Anexo II**.

5.2 Implementación

Se construyó en primera instancia un mapa digital del lecho marino a partir de la información batimétrica indicada en **4.2**.

La implementación del modelo requirió la construcción de una malla de cálculo estructurada, la cual abarcó toda la superficie del Golfo Nuevo, con un paso espacial $\Delta x=100\text{m}$ $\Delta y =100\text{ m}$; La cantidad de nodos incluidos en el dominio de cálculo resultó de 974.892 (1186 x 822).

La grilla computacional conforma un sistema cartesiano, coincidiendo el eje de abscisas con la dirección E-W y el de ordenadas con la dirección N-S. A cada nodo de la malla computacional le fue asignada una profundidad obtenida del mapa digital construido previamente.

Las simulaciones se llevaron a cabo en régimen no estacionario, con pasos de tiempo de 1 hora a partir del 7/4 a las 0 hs y hasta final del día 8/4. Se utilizaron los datos de viento de la estación Madryn. Su distribución espacial fue considerada uniforme en todo el dominio de cálculo.

Se incorporaron además los niveles de marea astronómica correspondientes a cada paso de tiempo de la simulación. Los resultados de la modelación se indicaron sobre toda la región de cálculo (118,6 Km x 82 Km) y en particular sobre los puntos de control ubicados a lo largo del Muelle Almirante Storni.

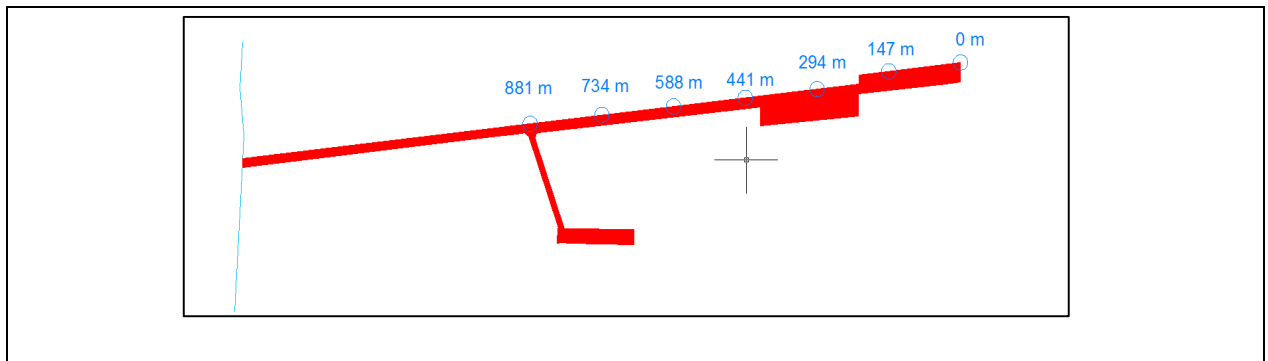


Figura 7 - Puntos de control a lo largo del muelle. Se indican las progresivas desde el extremo del muelle.

5.3 Resultados

En la **Figura 8** se presentan las olas calculadas con datos de viento de estación meteorológica Madryn, en el momento de mayor intensidad del temporal.



Figura 8 – Curvas de isoamplitud de altura de ola (H_s) en m, en la región de cálculo.

La **Figura 9** muestra la distribución de altura de ola significativa para distintas posiciones del muelle a lo largo de todo el desarrollo del evento.

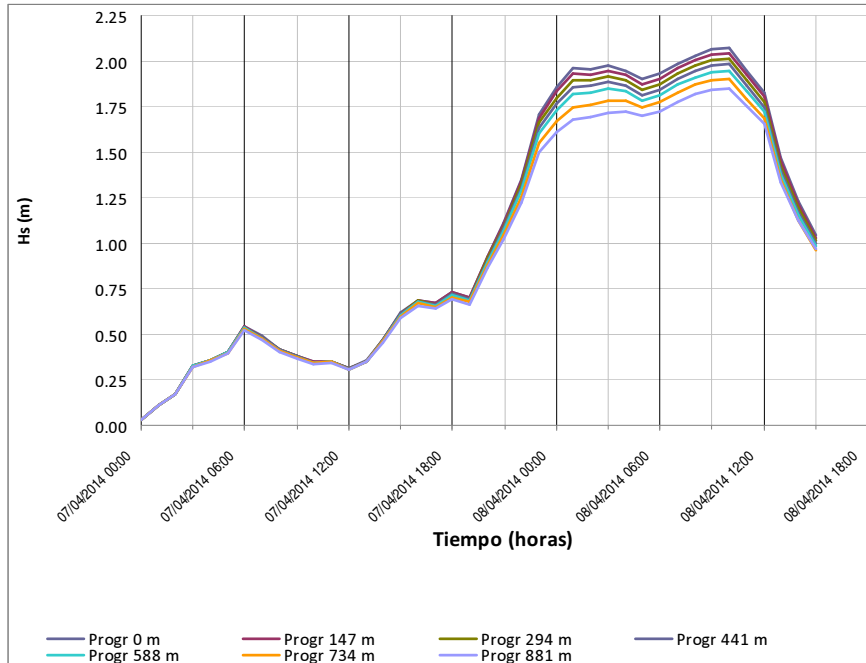


Figura 9 – Distribución de altura de ola significativa a lo largo del Muelle Almirante Storni.

Una síntesis de los máximos valores de altura de ola estimados e lo largo del Muelle Storni durante el desarrollo del temporal se indican en la **Tabla 2**.

Tabla 2 – Valores máximos de altura de ola significativa a lo largo del Muelle Storni

Progresiva (m)	0	147	294	441	588	734	881
Hs(m)	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9

6 ANALISIS ESTADISTICO

No se dispone de registros de oleaje por tiempos prolongados. Por esta razón, y dado que en el Golfo Nuevo, por tratarse de un cuerpo de agua cuasi cerrado, las mayores olas son generadas localmente por el viento, la caracterización del período de retorno del evento se abordó de manera indirecta, mediante el análisis estadístico de los vientos extremos en un lapso prolongado. En este caso basado en 35 años de datos de ECMWF (ver 4.4) en un nodo de la red global de coordenadas geográficas 42,75°S; 295,375°E, ubicado en el centro del Golfo Nuevo.

6.1 Evaluación del período de retorno T_r correspondiente al temporal

Se dispuso de una serie cronológica de valores de intensidad del viento y sobre esa base se realizó un análisis estadístico de valores extremos con el objetivo de estimar los valores de recurrencia correspondientes al evento ocurrido el día 8 de abril de 2014.

El propósito de este análisis fue la determinación de la relación intensidad del viento - período de retorno (T_r), correspondiente a los vientos de procedencia ESE, para la asignación del valor de recurrencia apropiado al evento analizado.

Los datos utilizados para este análisis corresponden a la serie de valores máximos anuales de intensidad de viento para la dirección ESE en el nodo antes indicado, obtenidos de la base de datos generada por los modelos globales, abarcando el período de tiempo comprendido entre Enero de 1979 y Junio de 2014.

6.2 Metodología de ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidades

La serie de datos obtenida de los registros fue considerada como una muestra acotada de una población donde la probabilidad de ocurrencia de un evento (en este caso que la intensidad del

viento alcance un cierto valor x) se describe por medio de una función de distribución de probabilidades $F(x)$ determinada.

De las distintas $F(x)$ existentes, utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos de olas, se seleccionó para este estudio la función de Gumbel

$$F(x) = \exp(-\exp(-(x-u)/\alpha))$$

Para el ajuste de los datos a la $F(x)$ se realizó la estimación de los parámetros de la función utilizando algoritmos numéricos basados en el Método de Máxima Verosimilitud. Una vez obtenida la función de ajuste, fue posible estimar el valor de la variable x que se encuentra asociado a distintos períodos de recurrencia T_r teniendo en cuenta que el período de retorno es la inversa de la probabilidad $F(x)$.

La bondad del ajuste se evaluó con la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Esta prueba se basa en la comparación entre la función teórica de ajuste $F(x)$ y la función de probabilidades acumuladas $S(x)$ construida con los datos de la muestra. El estadístico de la prueba es:

$$D = \max |S(x) - F(x)|$$

Si el valor de D (divergencia) supera un cierto el valor de la tabla del test, correspondiente a un nivel de significación α , escogido previamente, entonces la hipótesis del ajuste debe ser rechazada, es decir, la función $F(x)$ seleccionada no representa adecuadamente la distribución de la población de datos a la cual pertenece la muestra.

6.3 Procedimiento del ajuste de datos

La **Tabla 3** muestra la totalidad de los valores correspondientes a intensidades máximas anuales para cada dirección en el punto de análisis dentro del período de tiempo comprendido entre enero de 1979 y junio de 2014. Observando los valores promedio para cada dirección, resulta evidente que el ESE, desde donde soplaron los vientos más intensos que generaron el temporal del 8 de

abril, muestra (junto con el ENE) las intensidades más bajas en comparación con el resto de las direcciones.

Tabla 3. Valores máximos anuales de la intensidad del viento W (m/s)

Año	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	TOTALES
1979	13.6	11.9	10.8	9.7	7.5	8.4	9.9	11.0	14.7	16.5	13.9	15.8	13.6	11.2	11.7	13.6	16.5
1980	13.5	12.9	11.9	9.3	8.2	8.2	8.8	14.2	14.0	15.4	15.2	15.8	15.8	11.6	13.1	14.7	15.8
1981	12.7	11.5	12.0	9.5	8.8	7.0	8.3	10.0	13.8	14.2	14.1	15.8	14.0	11.0	15.0	13.4	15.8
1982	13.3	13.1	9.7	9.5	7.9	10.0	8.6	10.8	11.6	14.0	15.0	13.9	13.0	12.2	14.0	12.9	15.0
1983	13.4	11.5	7.7	8.3	13.3	13.4	12.0	11.8	13.0	17.8	14.0	14.7	11.8	10.2	12.6	14.1	17.8
1984	11.8	11.9	10.6	9.2	8.9	9.1	9.7	11.4	15.0	18.4	16.9	14.3	13.2	12.0	12.3	12.8	18.4
1985	12.8	10.4	9.9	8.9	9.7	9.2	10.8	12.6	13.5	16.4	14.6	14.0	14.4	12.0	12.4	14.3	16.4
1986	14.2	11.5	10.3	8.3	9.5	9.4	8.6	13.7	12.9	13.9	15.3	14.1	11.9	12.2	11.9	15.7	15.7
1987	13.7	11.5	10.8	9.6	8.6	10.3	13.3	11.9	14.1	14.8	17.7	14.4	10.2	11.2	12.7	15.6	17.7
1988	12.9	10.3	10.1	9.1	7.8	7.9	9.9	10.8	12.9	14.6	14.5	14.5	14.2	12.2	12.9	12.5	14.6
1989	13.4	12.4	10.3	9.4	8.4	7.6	8.3	11.0	12.3	14.8	15.9	17.9	13.8	11.0	10.5	14.8	17.9
1990	15.4	13.7	11.4	10.2	10.2	8.7	8.6	13.4	14.1	15.5	15.1	17.6	15.1	13.2	14.8	15.8	17.6
1991	12.6	13.5	10.2	14.0	14.6	8.3	10.2	10.2	13.7	17.8	14.5	15.0	13.0	13.5	11.5	13.5	17.8
1992	12.9	11.7	10.4	9.4	8.9	10.1	7.5	12.4	14.7	13.6	16.7	15.0	12.9	11.2	16.5	13.3	16.7
1993	16.0	11.5	10.3	8.2	8.3	9.0	9.1	12.0	13.4	13.7	17.9	16.4	14.1	11.1	15.1	12.7	17.9
1994	13.9	12.8	10.1	8.0	8.8	8.7	9.2	12.0	17.1	17.1	16.3	15.7	15.1	14.7	12.1	13.4	17.1
1995	13.6	12.2	10.7	8.9	9.3	12.3	9.6	11.4	12.4	14.4	18.7	16.0	13.4	10.9	14.0	14.0	18.7
1996	11.9	11.9	8.7	8.9	9.0	9.0	9.0	10.3	13.2	13.9	14.2	13.7	13.7	10.9	12.3	12.7	14.2
1997	14.8	12.3	11.4	9.3	10.6	11.5	11.2	14.3	12.7	17.4	16.8	19.6	15.1	11.5	14.5	14.8	19.6
1998	13.3	11.8	9.4	10.8	13.4	10.6	9.2	11.7	12.6	14.7	14.2	15.1	11.0	10.8	14.3	12.6	15.1
1999	13.6	11.8	10.9	8.6	7.9	10.1	8.6	11.6	13.1	15.0	14.9	17.3	12.5	10.5	12.8	13.2	17.3
2000	13.2	11.5	9.7	10.9	7.1	7.4	9.8	10.3	12.1	18.4	17.0	15.8	13.7	10.4	12.4	11.6	18.4
2001	13.1	11.8	10.1	8.9	7.4	11.0	10.9	10.1	13.9	15.1	15.5	15.0	15.9	13.5	12.7	14.4	15.9
2002	13.3	11.8	9.8	9.1	8.8	9.1	9.5	10.5	13.4	15.3	15.9	16.1	15.0	12.0	11.9	13.5	16.1
2003	14.4	11.6	10.3	10.6	7.8	7.2	6.7	12.6	17.6	19.1	18.1	15.6	13.2	14.1	14.8	14.1	19.1
2004	13.1	11.7	10.4	8.4	8.1	10.0	8.9	12.5	12.5	15.2	18.0	15.9	17.1	10.4	13.1	13.7	18.0
2005	13.7	10.2	9.9	11.2	8.6	8.6	8.9	13.7	13.2	19.1	17.9	17.1	12.8	14.2	12.2	14.1	19.1
2006	14.3	14.0	11.6	9.1	6.7	10.5	12.2	12.6	12.9	14.3	13.5	16.5	14.0	13.2	12.7	14.6	16.5
2007	13.0	10.8	9.7	8.6	7.4	9.1	11.2	10.8	13.9	15.2	14.0	14.1	12.2	11.3	12.0	12.8	15.2
2008	12.2	12.1	10.6	10.6	7.9	9.9	10.0	13.0	12.3	18.2	14.8	15.7	15.3	12.9	12.4	12.7	18.2
2009	12.7	11.7	9.3	7.8	7.4	9.2	9.2	11.6	17.4	15.8	16.7	14.6	15.2	13.3	13.0	14.6	17.4
2010	15.8	14.0	11.0	9.6	8.5	7.7	8.7	10.4	10.7	18.7	14.6	15.7	14.5	10.9	13.6	12.9	18.7
2011	14.1	13.1	10.0	9.3	6.5	7.0	8.2	10.9	13.1	14.0	16.9	13.6	14.6	11.3	13.0	12.3	16.9
2012	12.4	11.3	12.1	9.0	8.6	7.1	10.0	14.6	17.4	17.4	16.4	15.6	14.8	11.6	12.9	14.2	17.4
2013	12.8	11.4	11.0	9.4	9.5	8.3	9.6	11.7	16.2	17.1	16.1	14.7	12.4	12.9	13.5	13.6	17.1
2014	12.9	9.3	9.0	6.0	10.3	13.3	8.2	9.2	17.3	17.7	13.9	13.5	10.7	10.6	11.5	12.4	17.7
Promed	13.4	11.9	10.3	9.3	8.9	9.3	9.5	11.7	13.8	15.9	15.7	15.4	13.7	11.9	13.0	13.7	17.1

Por otra parte, analizando la serie cronológica de máximos anuales para la dirección ESE (**Figura 10**) se observa que el valor correspondiente al año 2014 ($W = 13.3$ m/s), determinado durante el temporal del 8 de abril se ubica muy por encima del promedio de máximos anuales ($W = 9.3$ m/s) correspondiente al período de tiempo analizado. Esto da un indicio importante sobre la característica de evento extremo que constituye el valor destacado en dicho temporal.

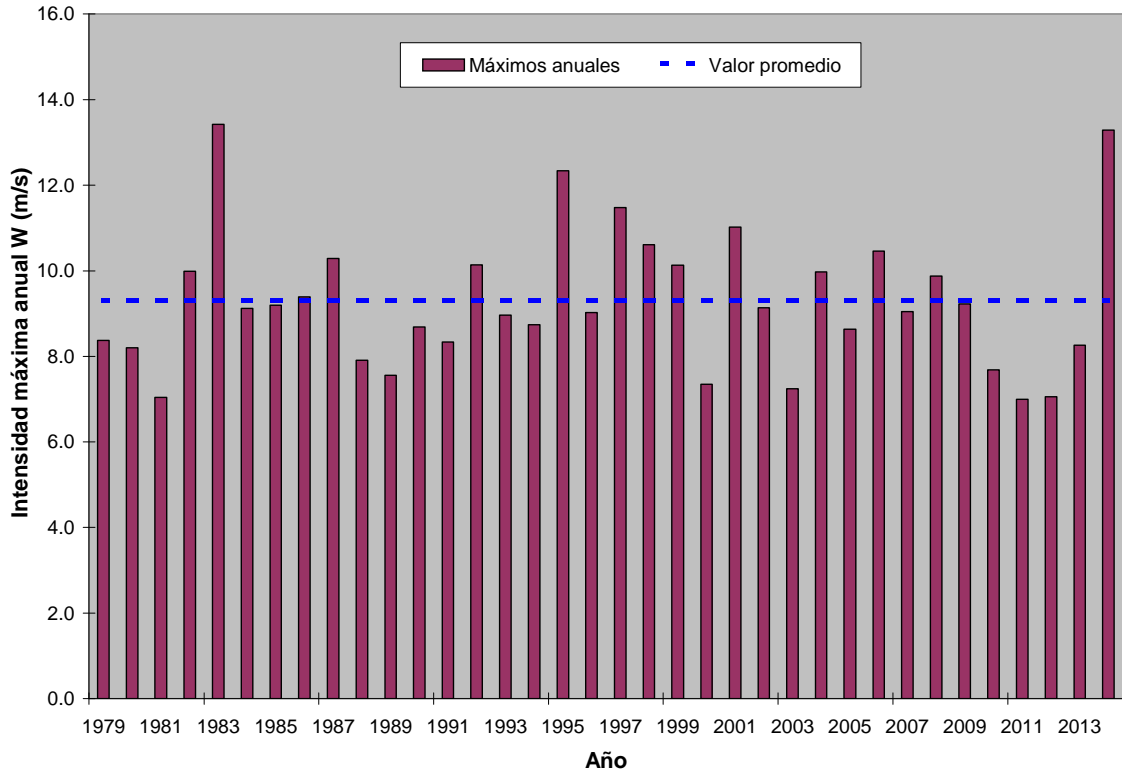


Figura 10. Serie cronológica de la intensidad del viento W (m/s) para la dirección ESE

La serie presentada en la **Figura 10** fue producto del procedimiento de ajuste para la estimación de los parámetros de la Función de Gumbel, para lo cual se aplicaron los algoritmos numéricos basados en el método de máxima verosimilitud.

6.4 Resultados

La **Tabla 4** presenta los resultados de dicho procedimiento señalando los valores estimados para los parámetros de la función de ajuste y el resultado del test de Kolmogorov-Smirnov utilizado para evaluar la bondad del mismo. El valor límite para el estadístico $D_{\alpha=0.05}$ se obtuvo de las tablas específicas del test, correspondiendo en este caso a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y una muestra de $n = 36$ datos.

Tabla 4. Resultados del ajuste para la serie de máximos anuales de ESE

Parámetros del ajuste	α	1.278
	u	8.544
	L máx. (verosimilitud)	-65.660
Test K-S	D max	0.164
	$D_{\alpha=0.05}$	0.221
	Resultado del Test	No se Rechaza H_0

Este resultado señala que la función propuestas puede ajustarse a las series datos observados dado que no es posible rechazar la hipótesis del ajuste H_0 para un nivel de significación de $\alpha = 0.05$.

La **Figura 11** muestra la gráfica de la relación Intensidad de Viento ESE – Período de retorno correspondiente al resultado obtenido por el ajuste de la Función de Distribución de probabilidades de Gumbel. Se destaca un buen grado de aproximación entre la función teórica $F(x)$ y los datos que constituyen la serie analizada, indicándose además el intervalo de confianza estimado para un nivel 95 %.

Ajuste de valores extremos - Viento ESE

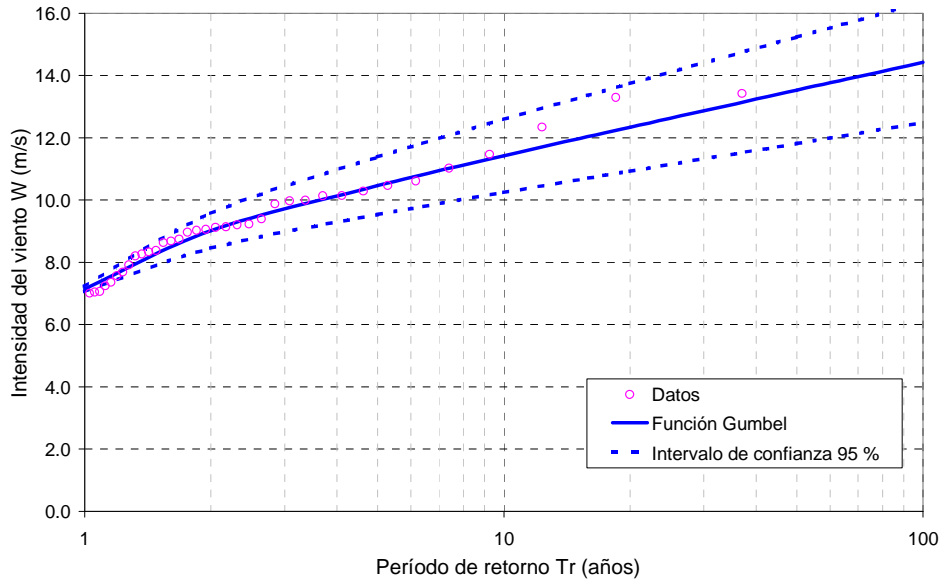


Figura 11 - Ajuste de máximos anuales (1979-2014) para la dirección ESE mediante la función de Gumbel

Utilizando la función ajustada se estimaron valores puntuales que representan distintas intensidades de viento para la dirección ESE asociadas a un período de retorno correspondiente. Este resultado se presenta en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Valores de W (m/s) para la dirección ESE asociados a distintos períodos de retorno Tr

Tr (años)	W (m/s) viento ESE
2	9.0
5	10.5
10	11.4
20	12.3
50	13.5
100	14.4



*Caracterización del temporal ocurrido en Puerto
Madryn (Provincia del Chubut) en el mes de abril de
2014*

De estos resultados surge que el evento ocurrido el 8 de abril, el cual de acuerdo a la serie de datos utilizada en este análisis tuvo una intensidad máxima de $W = 13.3$ m/s, se encuentra asociado a un período de retorno de $Tr = 43$ años.

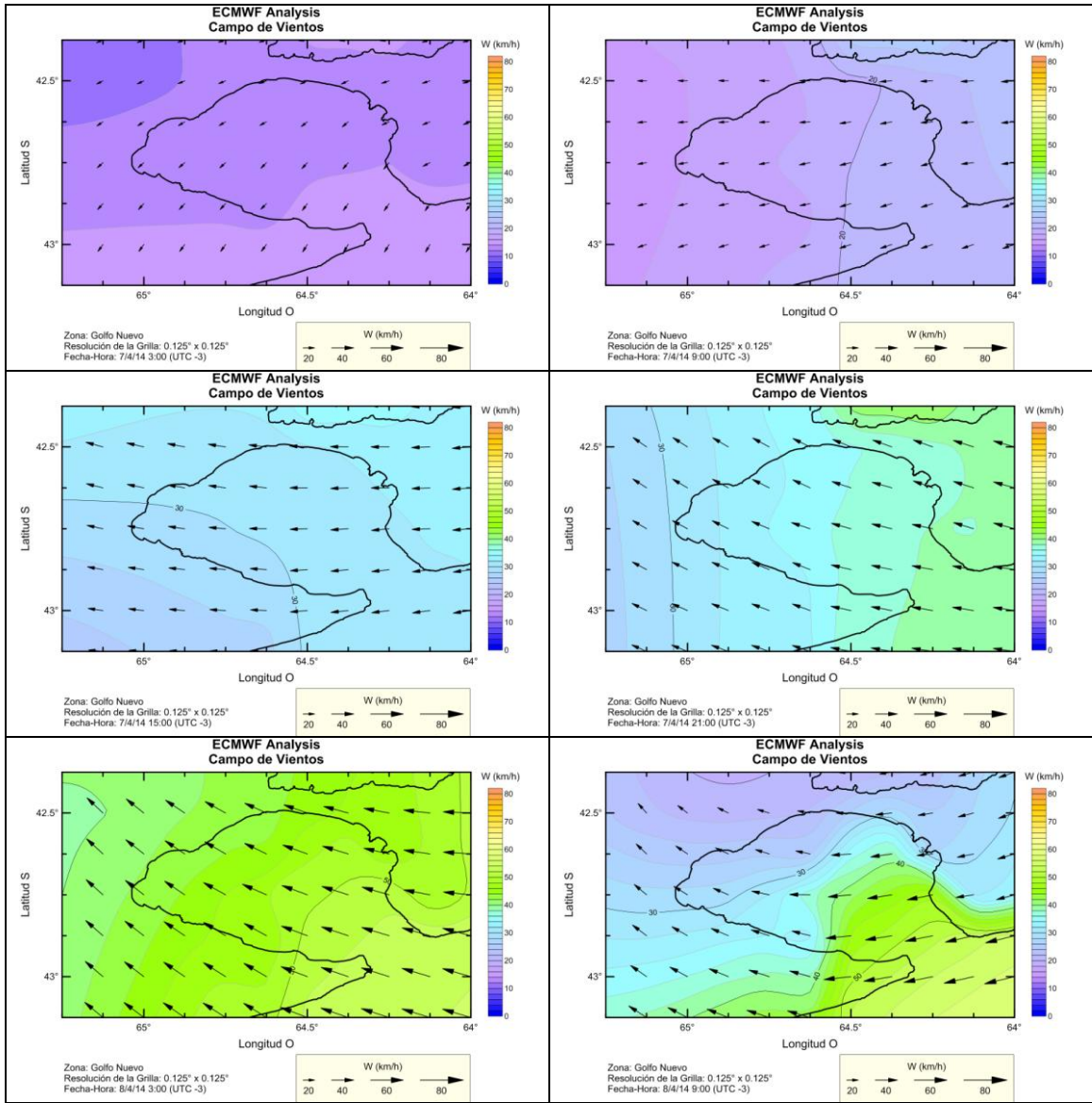
7 CONCLUSIONES

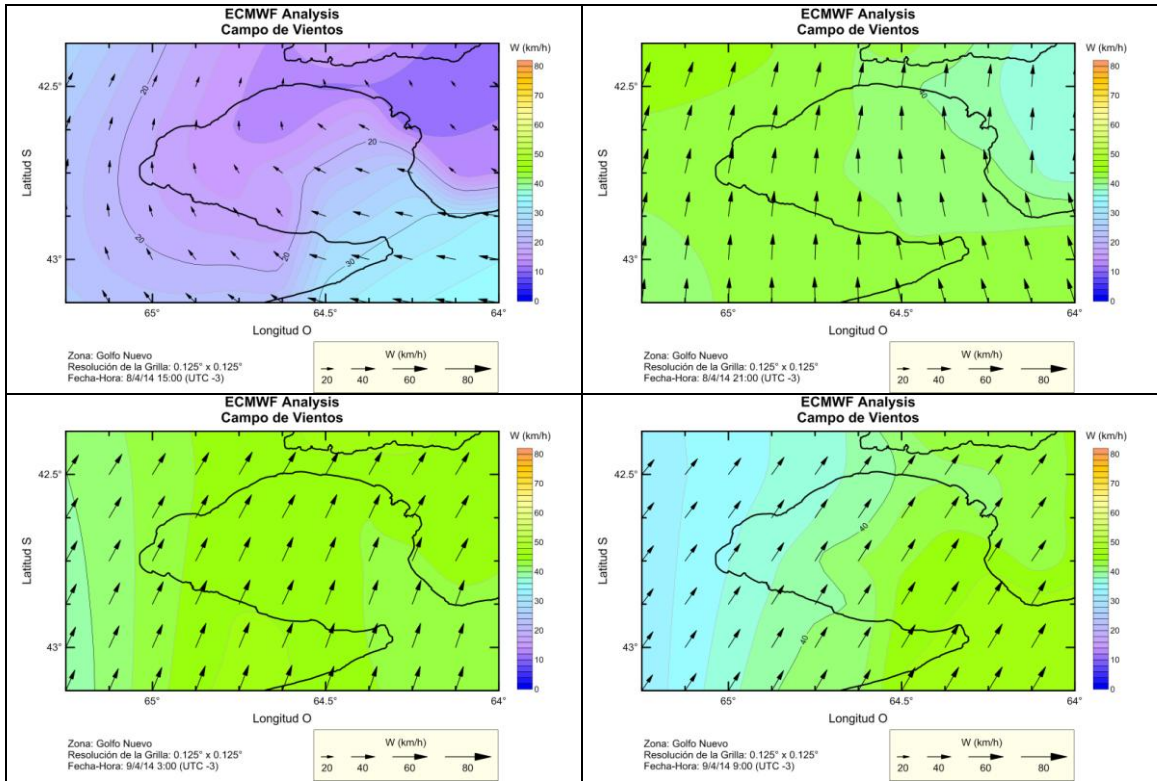
A partir de datos de viento registrados en Puerto Madryn se realizaron simulaciones numéricas de la generación y propagación de olas en el Golfo nuevo entre el 5 y el 19 de abril de 2014, mediante la aplicación del modelo matemático SWAN.

Los resultados indican que en el momento más intenso del temporal, en la mañana del 8 de abril de 2014, llegaron al Muelle Almirante Storni olas de altura significativa en el entorno de los 2 m.

Un análisis estadístico de vientos máximos anuales entre 1979 y 2014 mostró que el evento tuvo un período de retorno cercano a los 50 años.

ANEXO I





ANEXO II

El modelo SWAN es una herramienta utilizada ampliamente en el campo de la ingeniería de costas. En la bibliografía internacional se presentan numerosas aplicaciones de SWAN para la modelación del oleaje en zonas de costa marítima, lagos y estuarios.

En este capítulo se brinda una breve descripción de las características del modelo mencionado y se presentan algunos aspectos vinculados a su aplicación en este estudio.

El modelo SWAN permite la simulación de los siguientes procesos:

- Generación de olas por acción del viento
- Propagación a través del espacio físico.
- Refracción debida a la variación de la profundidad y corriente.
- Bajío debido a la variación de la profundidad y la corriente.
- Propagación de ola con corrientes opuestas.
- Disipación por descrestamiento (whitecapping).
- Disipación por rotura de ola inducida por la profundidad
- Disipación inducida por la fricción del fondo
- Interacción no lineal entre frecuencias del espectro en aguas profundas y someras.

SWAN es un modelo numérico que permite estimar los parámetros de oleaje en regiones costeras basándose en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas $N(\sigma, \theta)$, donde todos los procesos físicos están modelados explícitamente.

La densidad acción de ola se define como $N = E/\sigma$, donde E es la densidad energía (energía cinética más potencial por unidad de superficie), σ la frecuencia relativa y θ la dirección de propagación.

La ecuación de balance de la acción se escribe como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

El primer término a la izquierda expresa el cambio local en el tiempo de la densidad de acción de ola, el segundo y tercero representan la propagación de la densidad de acción en el espacio con velocidades C_x y C_y . El cuarto describe los cambios de la frecuencia relativa debido a cambios en profundidad o a corrientes. El quinto término es el cambio debido a refracción.

El término S del miembro derecho de la ecuación representa las fuentes y sumideros de energía y puede ser descrito como la suma de varios y diferentes procesos físicos:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

donde

- S_{in} es la energía transferida por el viento,
- S_{ds} es la disipación de energía
- S_{nl} representa la transferencia de energía entre olas por efectos no lineales.

El término de disipación S_{ds} consta a su vez de tres componentes principales:

- Las “crestas blancas” o *whitecapping*, pequeñas rompientes sobre las crestas de las olas que ocurren por un exceso de entrada de energía.
- La fricción con el fondo.
- La rompiente inducida por la disminución de la profundidad.

Las interacciones no lineales ola-ola son las responsables del intercambio de energía entre componentes de diferentes frecuencias del mismo espectro, y son las responsables de redistribuir la energía entre dichas componentes. En aguas profundas la transferencia de la energía se realiza desde el pico espectral ya sea a las frecuencias más altas o más bajas (obligando al pico espectral a desplazarse en uno u otro sentido), dependiendo ello de si el oleaje está siendo disipado o no por las “crestas blancas” (*whitecapping*). En aguas someras la interacción entre diferentes frecuencias transfiere energía de frecuencias bajas a altas, obligando así al pico espectral a disminuir su período.

La ecuación de balance (1) es una ecuación diferencial de primer orden, en la que las cinco variables independientes son tiempo t , las coordenadas espaciales x, y , la frecuencia relativa σ y la dirección de propagación θ . La variable dependiente a resolver es la densidad de acción de ola N .

La integración se implementa en un esquema en diferencias finitas, con paso de tiempo Δt (el mismo para los términos de propagación y el término fuente). El espacio geográfico se discretiza mediante una grilla de paso Δx y Δy . El espectro (direccional) se representa con una resolución $\Delta\theta$ en la dirección y una resolución constante $\Delta\sigma/\sigma$ en frecuencia.

La ecuación se resuelve mediante un esquema implícito que es incondicionalmente estable, lo que permite escoger pasos de tiempo prolongados. Puede ser de primer o segundo orden. El modelo está implementado en lenguaje FORTRAN.

Mayor información en:

<http://swanmodel.sourceforge.net/home.htm>