

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



PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO HIDRAULICO DE OBRAS PORTUARIAS EN EL LAGO PUELO

PARTE 1 - CLIMA DE OLAS

Mayo 2009

Informe LH-303-01-09

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO HIDRAULICO DE OBRAS PORTUARIAS
EN EL LAGO PUELO

PARTE 1 - CLIMA DE OLAS

RESUMEN

Como parte de los estudios relativos al proyecto de obras de amarre y abrigo en el Lago Puelo, se presenta una evaluación de las características de los vientos en el área, y la implementación y aplicación de un modelo matemático para la estimación del desarrollo del oleaje generado por acción del viento que sopla sobre el lago, en particular en los sitios de emplazamiento de las obras.

PALABRAS CLAVE

Vientos – Olas – Modelos matemáticos - Lago Puelo - Provincia del Chubut

Informe	LHA-303-01-09
Fecha	Mayo, 2009
PROYECTO	890
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección General de Puertos

INA
LABORATORIO DE HIDRAULICA

DIRECTOR

Ing. J.C. DE LIO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

Ing. R. D. CASTELLANO

Informe producido por

Ing. R. CÁCERES

Equipo de trabajo

Ing. N. TOMAZIN

Ing. R. A. CÁCERES

Sr. C. A. HASPERT

Sr. L. S. PERALTA

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	METODOLOGIA.....	4
4	DESCRIPCION GENERAL DEL AREA.....	5
5	DATOS DE BASE.....	7
5.1	Batimetría.....	7
5.2	Niveles del lago.....	8
5.3	Vientos.....	10
5.3.1	Fuentes de información.....	10
5.3.2	Análisis y selección de las fuentes de información.....	12
6	ESTADÍSTICA DE VIENTOS.....	20
7	ESTADÍSTICA DE VALORES EXTREMOS.....	26
7.1	Metodología de ajuste.....	26
7.2	Valores extremos por dirección.....	28
8	MODELACIÓN DEL OLEAJE EN EL LAGO.....	31
8.1	Escenarios.....	32
8.2	Resultados.....	34
9	CONCLUSIONES.....	39

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO HIDRAULICO DE OBRAS PORTUARIAS EN EL LAGO PUELO

PARTE 1 – CLIMA DE OLAS

Mayo, 2009

1 INTRODUCCION

El presente estudio se desarrolla a requerimiento de la DIRECCION GENERAL DE PUERTOS de la Secretaría de Infraestructura, Planeamiento y Servicios Públicos de la Provincia del CHUBUT.

El mismo se refiere al proyecto de tres muelles en el Lago Puelo, Provincia del Chubut. El Lago Puelo se ubica al norte de la Provincia del Chubut, aproximadamente en la Latitud S 42° 05' y Longitud W 71° 37', próximo a la frontera con Chile.

Tres muelles fueron construidos en el lago hacia 1980, ubicados uno en la cabecera norte, próximo a la localidad de Lago Puelo (Muelle Central), otro en El Turbio (cabecera Sur) y el tercero en Los Hitos (Cabecera Oeste).

La reparación o ampliación de estos muelles motiva la estimación del régimen de vientos y oleaje en esos sitios, la evaluación de aspectos funcionales de las obras de abrigo y también la caracterización (especialmente en el caso del Muelle Central) del transporte de sedimentos por acción de oleaje en el área costera.

La caracterización del clima de olas en el lago constituye la primera etapa de las tareas convenidas, y está destinada básicamente a definir las situaciones de oleaje frecuente y extremo a que resultarán expuestas las obras portuarias, para de esta manera, en una segunda instancia, probar la eficiencia hidráulica de las nuevas obras mediante simulación numérica y evaluar algunos aspectos náuticos vinculados a la operación de transbordadores.

Las tareas se han desarrollado en el Marco del Convenio Marco de Cooperación e Investigación suscripto con fecha 8 de Agosto de 2002, cuya vigencia ha sido renovada por cinco años el 9 de agosto de 2007, mediante la suscripción del Acta Complementaria N° 9.

Los objetivos y metodología para el desarrollo de esta Etapa del trabajo se detallan en los **Capítulos 2 y 3** respectivamente.

En el **Capítulo 4** se presente una breve descripción del área desde el punto de vista físico y particularmente con respecto a las variables de interés para este estudio.

En el **Capítulo 5** se muestra la información de base utilizada y en el **Capítulo 6** se realiza un análisis estadístico de las diversas fuentes de datos de viento.

En el **Capítulo 7** se presenta un análisis de valores extremos probables de viento a partir de la serie de datos disponible con el fin de establecer condiciones de diseño para las obras.

En el **Capítulo 8** se detalla la implementación de un modelo numérico de generación y propagación de oleaje y la metodología aplicada para caracterización del clima de olas resultante en los tres sitios de interés.

2 OBJETIVOS

Las tareas que abarca este estudio tienen como objetivo final la evaluación funcional desde el punto de vista hidráulico del proyecto de tres muelles en el Lago Puelo, dos de los cuales servirán como cabecera para la operación de transbordadores.

El estudio se ha desglosado en dos etapas. La primera de ellas, desarrollada en el presente Informe de Avance 1, consiste en la caracterización del clima de olas en el sitio de emplazamiento de las obras mediante la aplicación de un modelo matemático.

3 METODOLOGIA

En líneas generales, se mencionan las diferentes etapas que conforman la metodología aplicada para el desarrollo de este estudio. En la **Parte I - Clima de Olas**, que se presenta en este Informe se han desarrollado las siguientes tareas:

- Búsqueda y análisis de la información de base.
- Análisis de persistencia de vientos. Descripción estadística.
- Definición de escenarios para las simulaciones numéricas.
- La implementación de un modelo matemático (SWAN) de predicción de olas por acción del viento.
- Aplicación del modelo SWAN. Resultados preliminares

4 DESCRIPCION GENERAL DEL AREA

El Lago Puelo es un cuerpo de agua de origen glaciario. Está ubicado en el Noroeste de la provincia del Chubut en las coordenadas 42°10' S, 71°40' W, a una altura de 150 msnm.

El lago tiene una superficie de 47 Km², una longitud en la dirección N-S de 15 Km, un ancho promedio de 3,5 Km y un desarrollo de costa de 57 Km. El brazo E-W del lago alcanza una longitud de unos 9 Km. La profundidad máxima es de 180 m con una media de 111.4 m.

Los ríos Azul, El Turbio y Epuyén descargan sus aguas en el Lago Puelo en sus márgenes N, S y E respectivamente, mientras que el río Puelo, que nace en el extremo Oeste del lago, descarga sus aguas hacia el lago Inferior o Interior (República de Chile). (**Figura 4.1**).

El clima en el área es templado-frío. Las temperaturas medias anuales varían entre los 10° y los 12° centígrados. La amplitud térmica anual es considerable: las temperaturas medias alcanzan, según zonas, a 23° C y las mínimas medias, correspondientes a julio y agosto, llegan a 3° C.

Las mayores precipitaciones se producen en el sector cordillerano durante el otoño e invierno, gracias al aporte de los vientos húmedos del Pacífico. Éstas pueden ser en forma de lluvia o nieve y decrecen rápidamente hacia el este. En el límite internacional alcanzan 2000 mm y 40 Km hacia el Este se alcanzan 600 mm anuales aproximadamente¹.

¹ “Estudio de la Dinámica Fluviomorfológica del Río Azul”, Laboratorio de Hidráulica – INA, 2004.

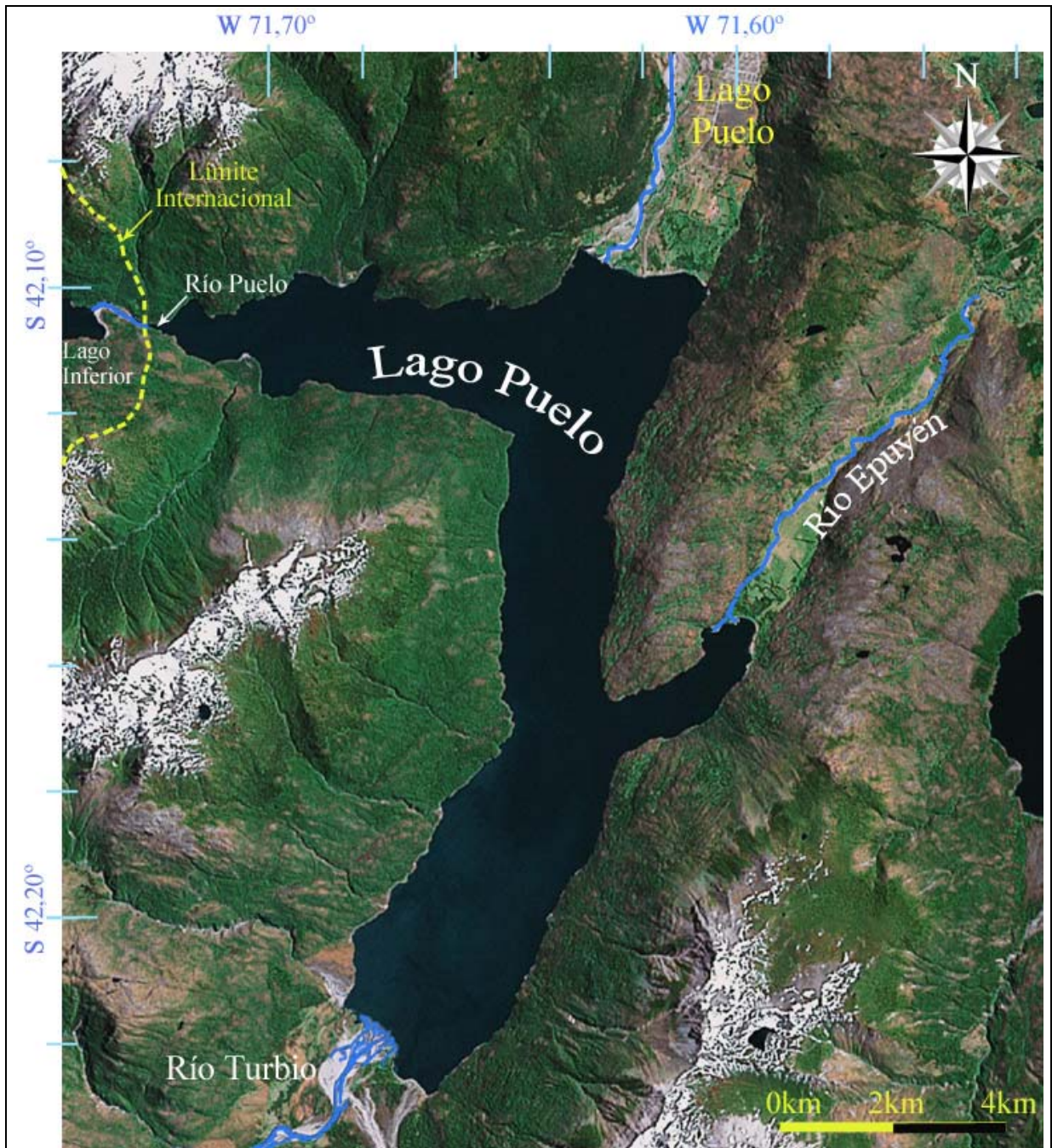


Figura 4.1. Ubicación general

5 DATOS DE BASE

La información de base para la realización del estudio está conformada por datos batimétricos y topográficos, datos de viento y de niveles del lago.

5.1 Batimetría

La información batimétrica en el área, necesaria para la realización de las simulaciones numéricas de propagación de oleaje, fue obtenida de cartografía publicada por servicios especializados y de relevamientos de detalle realizados para el proyecto de muelles:

- Carta topográfica “Lago Puelo” (Hojas 4372-4-2 y 4372-4-4). Levantamiento del año 1954 (IGM). Escala 1:50.000 y la equidistancia entre curvas de nivel es de 25m.
- Mapa batimétrico “La Puelo”. Informe Técnico N° 5, año 1988. Dpto. de Aguas Continentales (INIDEP)
- Relevamiento de detalle

El relevamiento de detalle fue realizado en el mes de enero de 2009 a requerimiento de la D.G.I.P. Los trabajos se dividieron en tres partes:

- Muelle principal del lago: se relevó paralelo a la costa, tanto en tierra como en agua, desde la línea del pelo del agua hasta pasados unos 30 m de la línea del veril.
- Muelle del Turbio: se relevó paralelo a la costa, tanto en tierra como en agua, desde la línea de veril hasta unos 50 m en agua y otros 50 m en tierra y desde el muelle existente hasta unos 300 m hacia el noroeste.
- Muelle Los Hitos: se relevó paralelo a la costa, tanto en tierra como en agua (desde la línea de veril hasta unos 50 m).

Para el relevamiento en tierra se utilizaron receptores geodésicos marca TRIMBLE modelo 4600LS, con colectora TSC1 por método cinemático y con post procesamiento. Para el relevamiento batimétrico se utilizó una ecosonda Hydrotrac gráfica digital.

5.2 Niveles del lago

Se dispone de una serie histórica de niveles diarios que abarca el período 1948 a 2008, determinada en el muelle de Lago Puelo. No se conoce por el momento la cota IGM del cero de la escala. En mayo de 1960 hubo un cambio en la escala desconociéndose igualmente la relación entre ambos. Para el período más prolongado referido a un único “cero”, comprendido entre el 9/6/1960 y el 31/11/2008, el valor medio de los registros es 1,88 m. El máximo es 6,73 m y el mínimo 0,69 m.

La **Figura 5.1** muestra la probabilidad de no excedencia de los niveles para el período indicado.

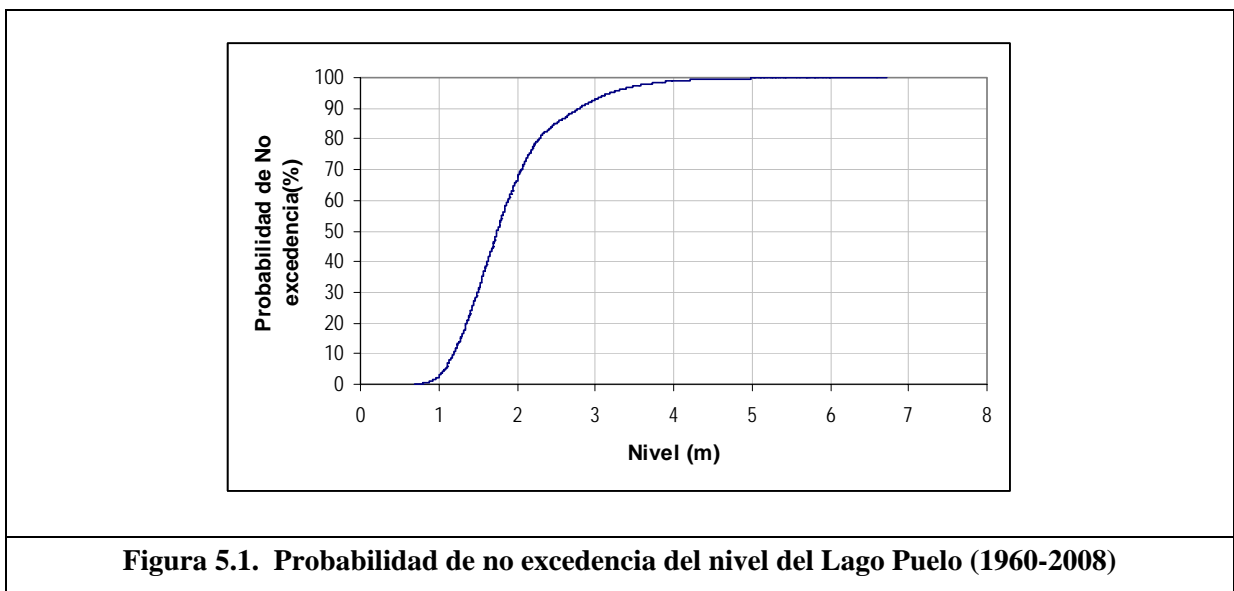


Figura 5.1. Probabilidad de no excedencia del nivel del Lago Puelo (1960-2008)

Un análisis de parte de ese registro (período 1967 – 1997)² se presenta en la **Tabla 5.1**, en la que se indican los valores medios, mínimos y máximos mensuales del mismo.

² “Proyecto de muelles Lago Puelo”, Roberto Nores Caballero, Enero 2008

Tabla 5.1: Valores medios, mínimos y máximos mensuales (PNLP 1967-1997)

Mes	Promedio	Mínimo	Máximo
ENE	1.87	1.2	3.79
FEB	1.64	1	3.19
MAR	1.35	0.83	2.94
ABR	1.46	0.69	4.83
MAY	1.84	0.48	4.98
JUN	1.90	0.87	7.30
JUL	1.88	0.75	6.73
AGO	1.79	0.9	5.98
SEP	1.77	1.02	4.41
OCT	1.78	1	3.59
NOV	1.99	1.14	3.84
DIC	2.04	1.05	5.25

Tabla 5.2: Resumen de niveles máximos anuales (1967-1997)

Dato	Año	Nivel
1	1997	6.73
2	1996	3.13
3	1995	5.37
4	1994	4.67
5	1993	5.6
6	1992	3.59
7	1991	5.25
8	1990	4.83
9	1989	3.71
10	1988	2.24
11	1987	4.64
12	1985	4.93
13	1984	2.89
14	1981	4.07
15	1979	5.98
16	1978	4.21
17	1977	7.30
18	1976	5.42
19	1975	3.81
20	1974	3.72
21	1973	4.06
22	1972	4.72
23	1971	4.28
24	1970	4
25	1969	4
26	1968	3.11
27	1967	4

5.3 Vientos

5.3.1 Fuentes de información

Se consultaron diversas fuentes de información en áreas cercanas a Lago Puelo. A continuación se indica la ubicación de las estaciones consideradas y el tipo de registro disponible.

Estación Meteorológica Esquel

El registro fue provisto por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y corresponde a la Estación Meteorológica N° 87803, “Esquel Aero”. La estación se encuentra ubicada a unos 95 Km hacia el Sudeste de Lago Puelo, en las coordenadas 42° 56’S - 71° 10’O con una altitud de 797 msnm.

La estación se halla operativa desde el 1/1/1970, habiendo iniciado los registros de variables meteorológicas con una frecuencia de 3 a 4 veces al día. A partir del 1/1/1991 los registros son horarios.

Base de datos NCEP/NCAR

NCEP/NCAR. NCEP es el *National Centers for Environmental Prediction* de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA). NCAR es el *National Center for Atmospheric Research*.

Los datos de la base³ no son observaciones directas sino el resultado de un análisis objetivo que combina distintas metodologías de observación y modelos numéricos. El resultado es un conjunto de datos distribuidos sobre una grilla global con resolución espacial 1,875° en longitud y 1,902° en latitud y una resolución temporal de 6 horas.

³ *The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project*. Kalnay et al., Bulletin of the American Meteorological Society 77, 1996

El nodo más cercano al área en estudio se ubica a unos 80 Km al Sudeste de Lago Puelo en las coordenadas 42° 51' 22'' S; 71° 15' 0'' W. La base de datos NCEP/NCAR, aunque de baja resolución, tiene la ventaja de cubrir un prolongado periodo de tiempo (de 1948 en adelante).

WindGURU

WindGURU⁴ es un servicio especializado en previsiones del tiempo para windsurfistas y kitesurfistas. Las predicciones están basados en el modelo numérico GFS (Global Forecast System). Este modelo fue desarrollado por NCEP. GFS se ejecuta cuatro veces al día (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC y 18 UTC).

Los datos que provee el servicio son: intensidad y dirección del viento a 10m de altura, temperatura, precipitación, porcentaje de nubosidad y olas (en sitios oceánicos). Es importante señalar que las previsiones disponibles en la página que WindGURU publica en Internet no son previsiones oficiales.

Estación Meteorológica Bolsón

El registro fue provisto por el servicio meteorológico Nacional de la Estación Meteorológica N° 87800, "El Bolsón Aero". La estación se encuentra ubicada a 19 Km al norte de Lago Puelo, en las coordenadas 41° 58'S - 71° 30'O con una altitud de 337 msnm. La estación registra datos meteorológicos desde el 20/5/1978. Los registros diarios producidos son de frecuencia variable (3 a 6 registros diarios) pero no son horarios. A partir de 9/9/1996 se registraron datos horarios de 9 a 24 hs.

Estación Meteorológica El Hoyo

La información disponible corresponde a la Estación Experimental Agroforestal El Hoyo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La estación se encuentra ubicada a 14 Km al oeste de Lago Puelo, en las coordenadas 42° 06' 19" S; 71° 27' 19" W con una altitud

⁴ WindGURU, Archivo Diario - GFS [web page], 2009. <http://www.windguru.cz/es/historie.php?model=gfs>

aproximada de 250 msnm. El registro corresponde al año 2008 y posee una frecuencia horaria.

Es importante señalar que la información generada en la estación es de carácter Agrometeorológico y mide las variables meteorológicas que interesan para las plantaciones en el lugar.

Anemómetro instalado en Lago Puelo Muelle Central

Abarca un breve período entre el 11/6/2008 al 16/1/2009. Se registraron cuatro valores diarios (0, 6, 12 y 18 horas). Los valores registrados son notablemente inferiores a otras fuentes de información.

5.3.2 Análisis y selección de las fuentes de información

El viento es un fenómeno meteorológico que se produce por las diferencias de presión debidas a las variaciones en la densidad del aire, consecuencia del desigual calentamiento solar, contenido del vapor de agua y debido a una redistribución de masa por la circulación de la atmósfera. Algunos factores que afectan estos procesos son la cercanía al océano y la topografía.

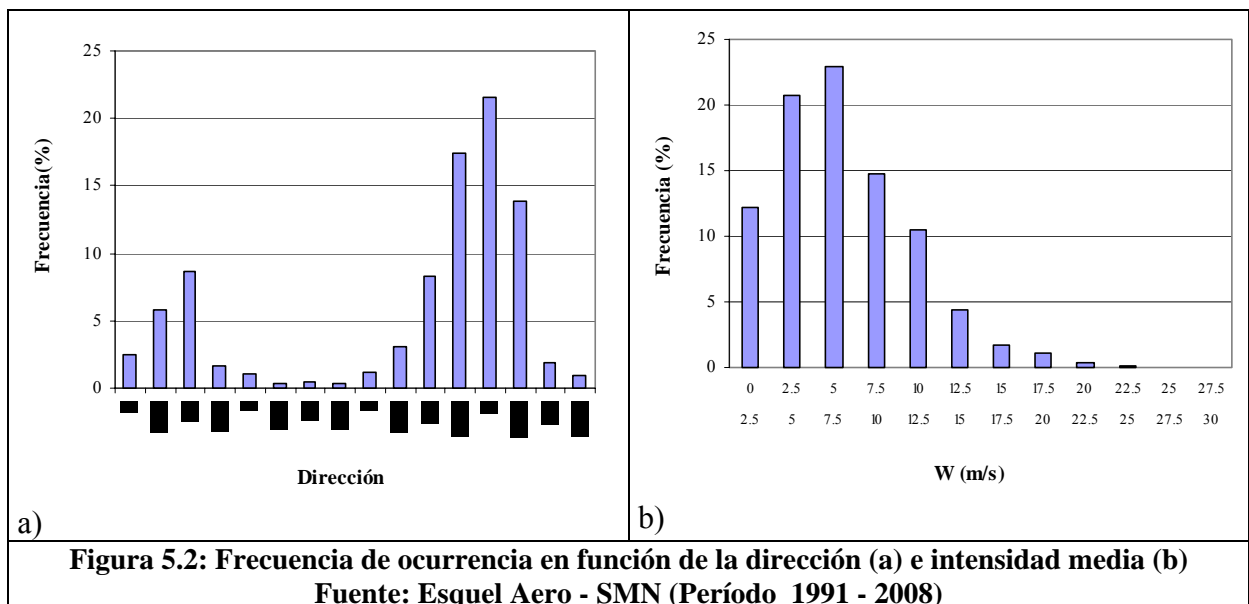
Lago Puelo se encuentra implantado en un área con relieve montañoso, intensamente modificado por la acción glaciaria. El lago ocupa un valle con una altura entre 200 y 300msnm. Es la región más baja del norte de la Patagonia y se encuentra a solo 200 Km del Océano Pacífico.

Estos factores hacen que el área del Lago Puelo presente un microclima particular y por ende la caracterización del viento no resulte simple. El efecto de barrera o confinamiento que provocan las cadenas montañosas, hacen que el patrón de distribución de frecuencia, intensidad y dirección del viento varíe según el punto estudiado.

En el presente apartado se realiza un breve análisis de la información de base disponible. Para cada una de las fuentes de datos se realizaron gráficos de frecuencia de ocurrencia por dirección y según distintos rangos de velocidad.

Estación Meteorológica Esquel

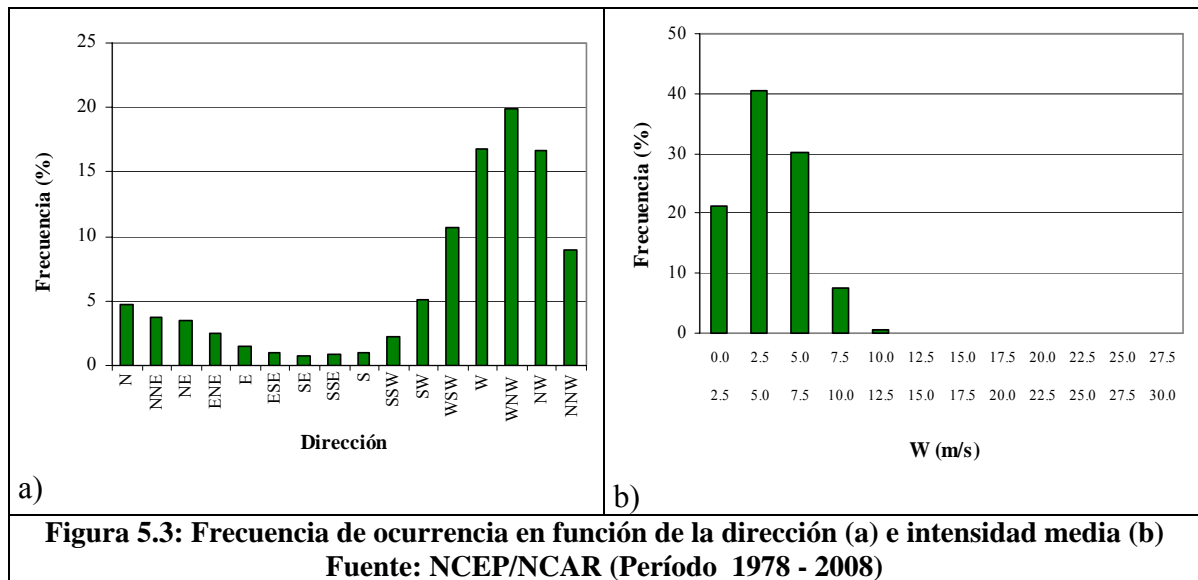
El registro de datos utilizado comprende el período 1991-2008 (18 años) con valores medidos cada una hora, habiéndose descartado el lapso en el que los datos no fueron horarios. En la **Figura 5.2** se presentan los gráficos de la frecuencia de ocurrencia en función de la dirección (a) e intensidad media (b).



En la **Figura 5.2a** se observa que los vientos predominantes provienen del W, WSW y WNW. En la **Figura 5.2b** las intensidades medias más frecuentes se encuentran entre 5 y 7.5m/s. Este patrón de distribución e intensidad es característico de la zona en estudio debido a la influencia de las masas de aire que ingresan al continente desde el Océano Pacífico.

Base de datos NCEP/NCAR

La base de datos NCEP/NCAR, evaluada para este estudio consiste en un registro de treinta años de información (período 1978-2008). En la **Figura 5.3** se presenta la frecuencia de ocurrencia en función de la dirección (a) e intensidad media (b).

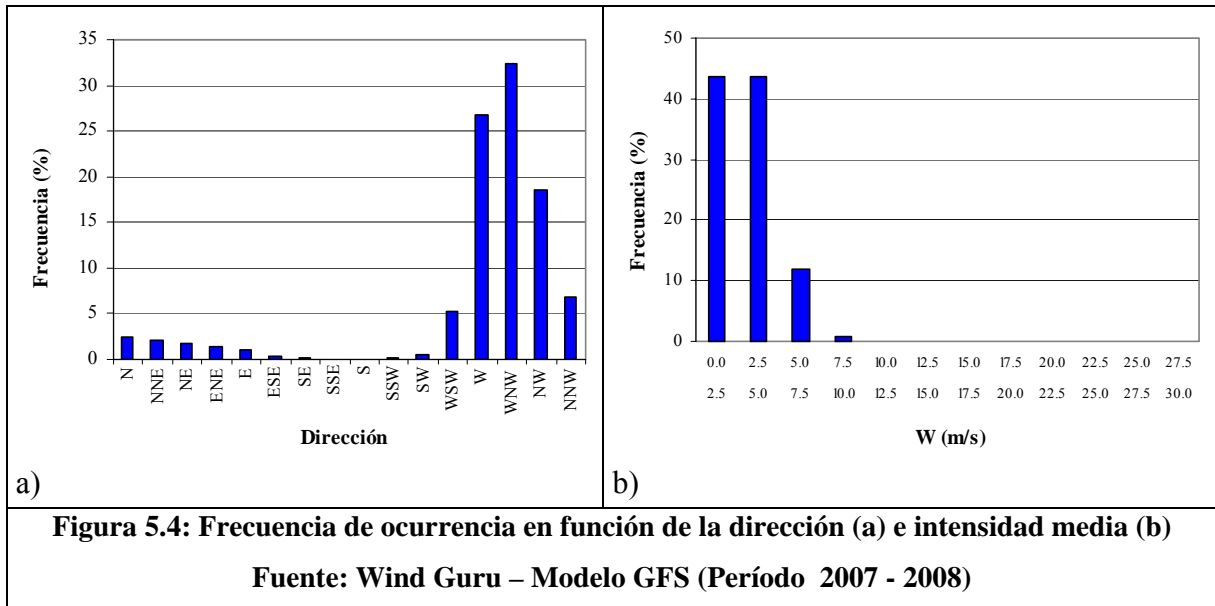


El patrón de vientos es muy similar al que presenta la base de datos en la estación Esquel Aero, aunque las intensidades medias son menores.

Es importante señalar que a pesar de presentar una serie más extensa (30 años) frente a la disponible de Esquel Aero (18 años), los datos provienen de modelos numéricos y no de valores medidos en el lugar.

WindGURU

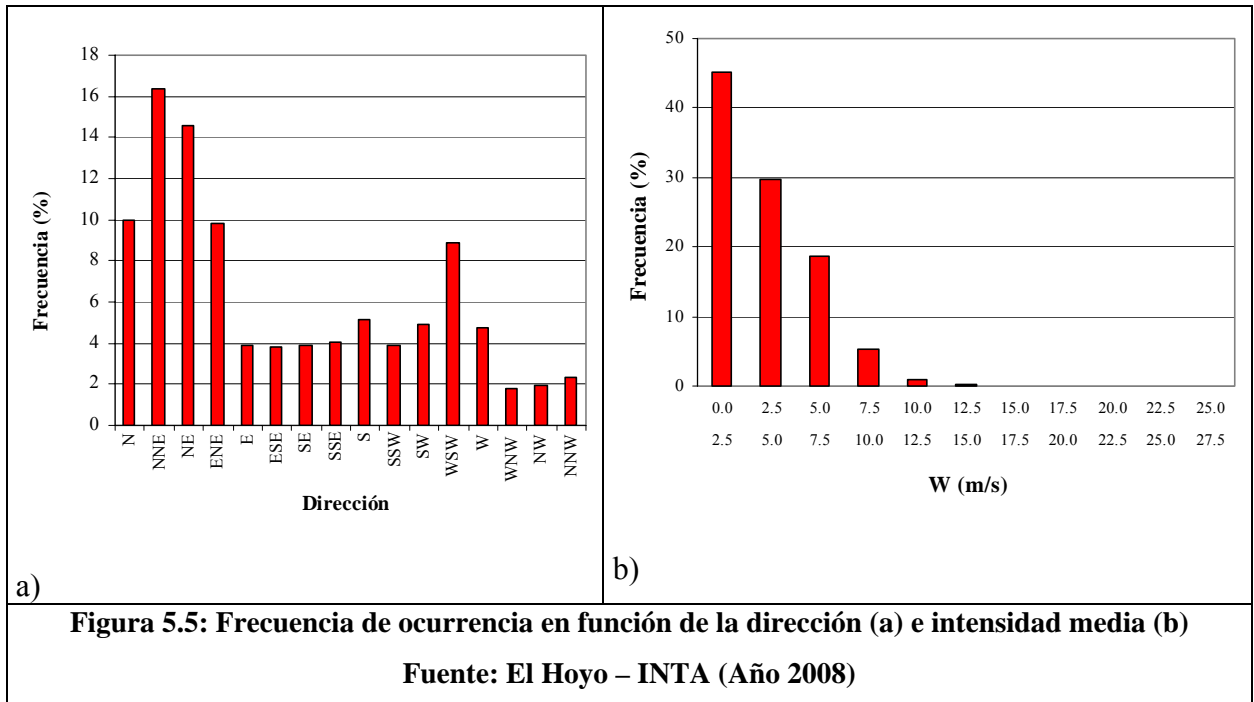
Se disponen de dos años de registro (2007 y 2008). En la **figura 5.3** se presenta la frecuencia de ocurrencia en función de la dirección (a) e intensidad media (b).



Los resultados obtenidos son similares a los presentados en la **Figura 5.3** dado que la base de datos que utiliza el modelo GFS es de NCEP/NCAR. Las diferencias entre los resultados se debe fundamentalmente al limitado registro disponible en esta fuente. Es posible igualmente que las previsiones de WindGuru para Lago Puelo se apoyen en interpolación de información de nodos próximos de la red global. Se observa también que las intensidades medias son significativamente menores a las presentadas en Esquel Aero.

Estación Meteorológica El Hoyo

En la **Figura 5.5** se presenta la frecuencia de ocurrencia en función de la dirección (a) e intensidad media (b).



En la **Figura 5.5a** se observa un patrón de frecuencia por dirección muy diferente al que presentaron las fuentes Esquel Aero, NCEP/NCAR y WindGURU. Los vientos predominantes son los que provienen del NNE y NE, mientras que los vientos del W presentan 11% menos de frecuencia de ocurrencia.

Esta diferencia se debe posiblemente a la influencia de la topografía en el sitio de medición. La estación Experimental del INTA se encuentra rodeada por grandes picos montañosos que modifican la circulación atmosférica. En la **figura 5.6** se presenta una planimetría general del área en estudio con la ubicación de dos estaciones meteorológicas cercanas a Lago Puelo.

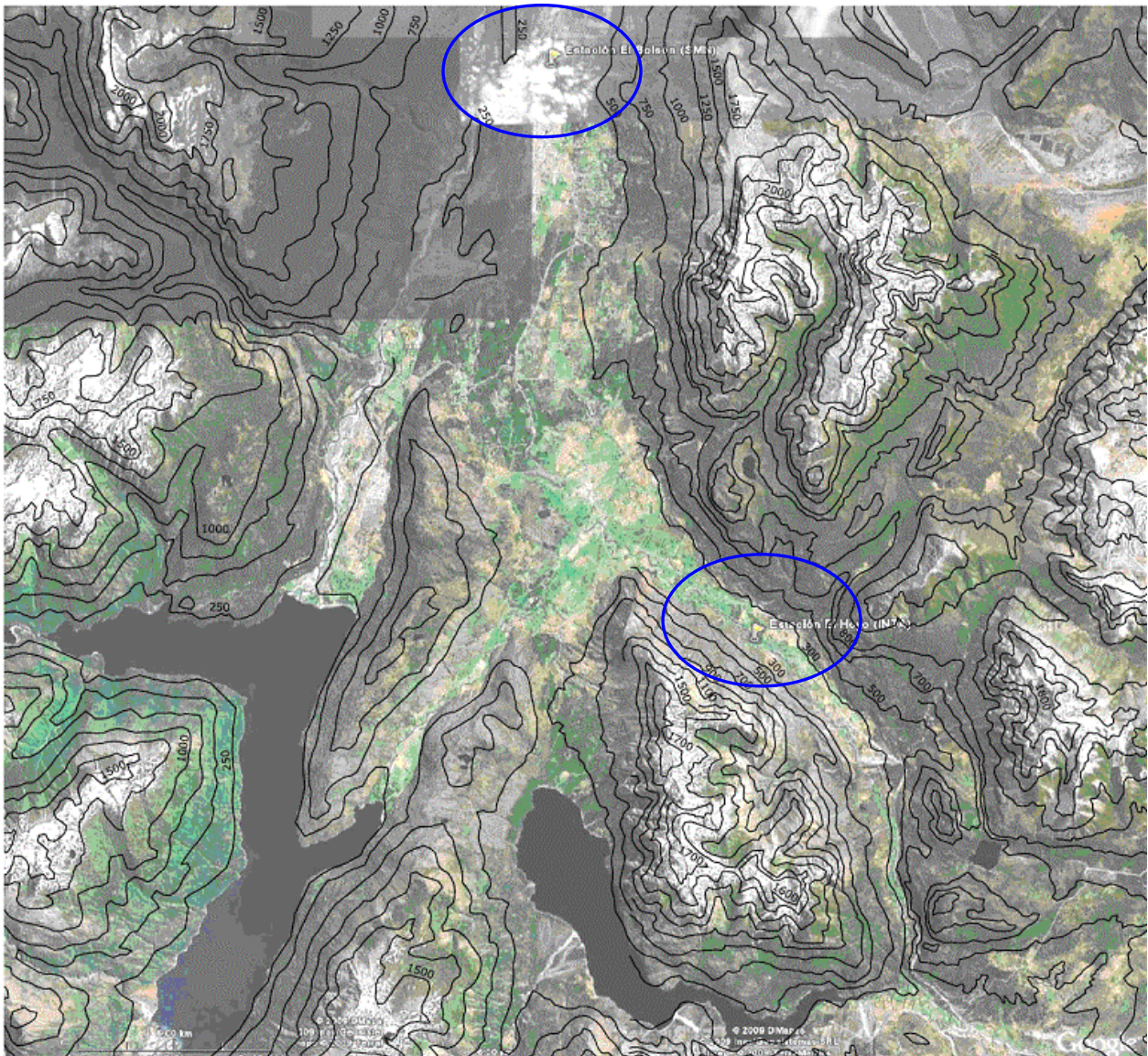


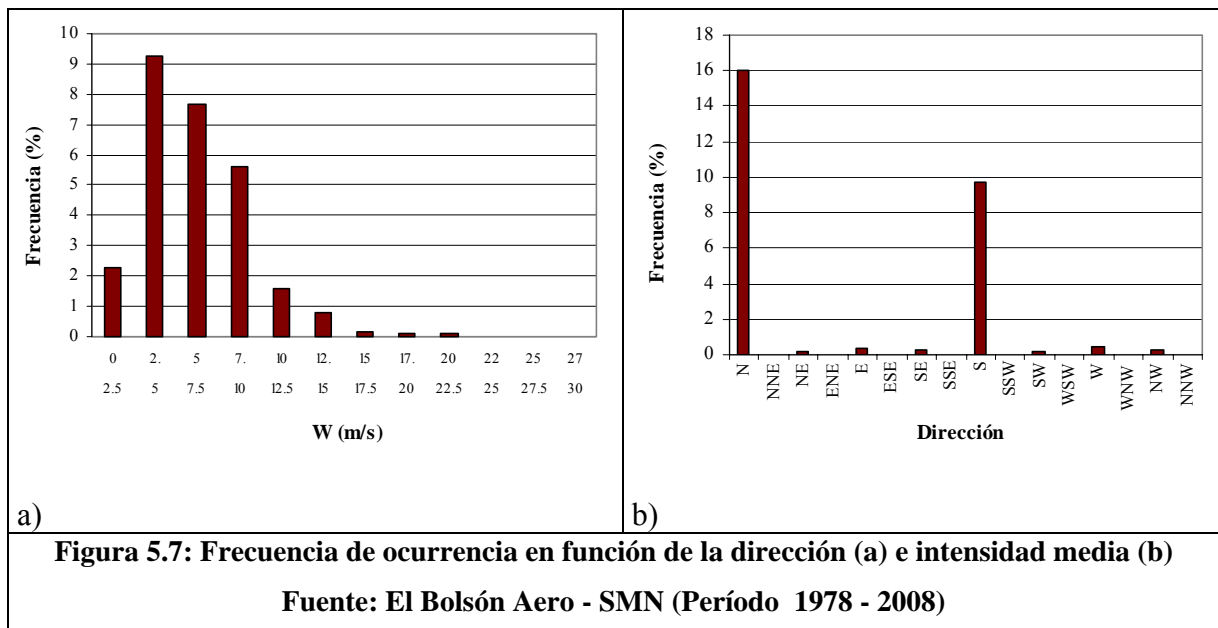
Figura 5.6: Topografía del área de estudio. Ubicación de las estaciones meteorológicas El Bolsón (SMN) y El Hoyo (INTA). Cotas referidas al cero IGM.

En cuanto a la intensidad media registrada (**Figura 5.5b**), debido a que las plantaciones están protegidas del viento por alamedas, las mediciones de la velocidad del viento pueden resultar afectadas por esta circunstancia, lo que puede explicar que muestren por lo general valores inferiores a las intensidades de viento esperadas en la región.

Estación Meteorológica Bolsón

El registro disponible abarca el período 1978-2008. A pesar de la heterogeneidad de los datos en lo referente a la frecuencia diaria de registro, se analizó la serie completa.

Resulta notoria la gran cantidad de registros con los valores $W = 0$, $dir = 0$, y que fueron considerados en este análisis como “calma”. Igualmente resulta llamativo que no haya datos faltantes o inválidos. La distribución frecuencial de la **Figura 5.7.a.** está referida al total de datos, de los cuales el 72,5% resultan valores de “calma”, si así se define la situación $W=0$, $dir=0$. De esta manera el gráfico de la figura indicada representa el 27,5% del total de datos. Más allá de esta circunstancia es notorio el predominio de vientos del sector N y del sector S (**Figura 5.7.b.**), lo que podría estar indicando una influencia de la topografía local (ver **Figura 5.6.**)

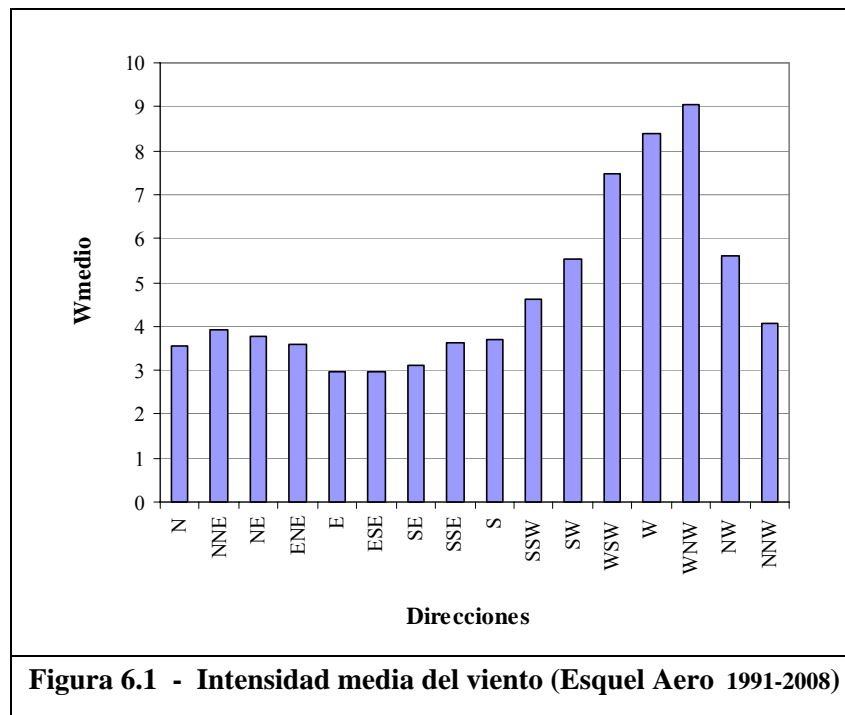


No siendo posible discriminar fehacientemente entre “calma” y “dato faltante”, se ha preferido no utilizar los datos de esta estación. En base al análisis realizado para cada una de las fuentes de información disponible, se prefirió utilizar los datos registrados en la estación meteorológica Esquel Aero, los que fueron utilizados para la estimación de los vientos que puedan producirse en Lago Puelo.

La elección se fundamenta en la extensión de la serie (18 años), la densidad del registro (1 dato horario), la homogeneidad de la serie, y las mínimas interrupciones de la misma. Por otra parte es importante destacar el hecho de que se trata de mediciones y no de estimaciones de modelos matemáticos globales (que tanto en el presente caso como en otras ubicaciones han mostrado una tendencia a subestimar la intensidad del viento), y que las mediciones se han efectuado siguiendo estándares del Servicio Meteorológico Nacional, quien proveyó de los datos. A pesar de la distancia que separa la estación de registro del Lago Puelo (95 Km), y de la presumiblemente fuerte influencia de la topografía, se consideró que esta serie es la más adecuada para realizar un análisis estadístico de aplicación para el proyecto.

6 ESTADÍSTICA DE VIENTOS

Se realizó una descripción estadística de los vientos de la región a partir de los datos registrados en la ciudad Esquel por el SMN. La presentación de los resultados se efectúa por medio de tablas y gráficos circulares (rosa de los vientos). En la **Figura 6.1.** se presenta el histograma de intensidad media de viento por dirección.



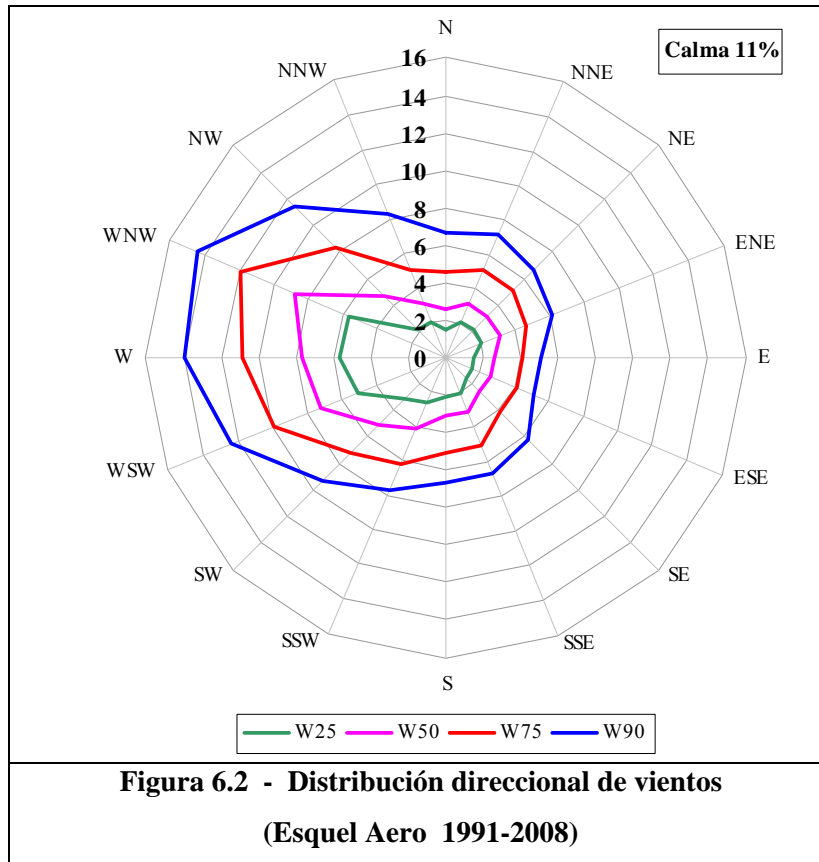
La **Tabla 6.1** muestra la distribución direccional del viento. La Tabla indica número de casos correspondiente a cada intervalo de dirección de 22,5° (16 sectores) y en intervalos de 2,5m/s de intensidad, para el período de 18 años comprendido entre el 1/1/91 y el 31/12 /08.

TABLA 6.1 - Distribución direccional del viento (Esquel Aero 1991-2008)

W (m/s)	Dirección																CALMA	TOTAL	TOTAL%
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW			
0 - 2.5	1429	2753	3748	829	755	286	263	167	557	820	1577	1403	1404	1144	782	478	16499	34894	23.2
2.5 - 5	1454	3215	5554	1077	633	213	247	193	663	1741	3827	4753	4092	2374	705	490	0	31231	20.8
5 - 7.5	623	1870	2739	461	198	73	85	104	405	1447	4174	8076	9008	4323	538	248	1	34373	22.9
7.5 - 10	197	560	677	119	41	11	24	20	75	408	1881	5603	7532	4593	363	111	0	22215	14.8
10 - 12.5	99	199	187	28	6	2	4	6	27	116	790	4036	5694	4225	300	52	0	15771	10.5
12.5 - 15	14	32	23	5	3	1	0	0	3	20	150	1420	2572	2230	102	9	0	6584	4.4
15 - 17.5	3	12	5	1	0	0	0	0	2	4	48	517	1096	888	41	5	0	2622	1.7
17.5 - 20	0	3	3	0	0	1	0	0	1	3	30	284	656	643	34	2	0	1660	1.1
20 - 22.5	0	2	0	0	0	0	0	2	0	1	7	70	222	235	7	1	0	547	0.4
22.5 - 25	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	8	41	64	114	4	1	0	235	0.2
25 - 27.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	14	24	0	0	0	45	0.0
27.5 - 30	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	10	10	1	0	0	25	0.0
30 - 32.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	3	0	1	0	7	0.0
32.5 - 35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	3	0.0
35 - 37.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0.0
37.5 - 40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
TOTAL	3820	8646	12936	2520	1636	588	623	492	1734	4564	12493	26213	32367	20807	2877	1398	16500	150214	100.0
TOTAL%	2.5	5.8	8.6	1.7	1.1	0.4	0.4	0.3	1.2	3.0	8.3	17.5	21.5	13.9	1.9	0.9	11.0	100.0	

El gráfico polar de la **Figura 6.2** presenta la intensidad del viento por dirección en 4 rangos de excedencia, 25, 50, 70 y 90%. Es decir, W25 es la intensidad del viento que indica que el 25% de los datos registrados se encuentran por debajo de ese valor.

Los valores presentados en la **Tabla 6.1** y en la **Figura 6.2** muestran el predominio de vientos procedentes de las direcciones W (36,05 %), WSW (17,5%) y WNW (13,9%) en la distribución anual de la frecuencia del viento.



La **Tabla 6.2** se muestran los valores máximos anuales en el período indicado, tanto por dirección como para todas las direcciones. Al pie de la **Tabla 6.2** y en la **Figura 6.3** se indican los promedios de máximos anuales y el máximo absoluto correspondiente a cada dirección.

TABLA 6.2 - Vientos máximos anuales (Esquel Aero 1991-2008)

AÑO	Dirección															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1991	17,0	20,6	12,3	9,3	7,7	14,4	10,3	11,3	12,3	14,4	24,7	28,8	23,7	25,7	14,9	15,4
1992	19,5	15,4	15,4	8,2	7,2	8,7	8,2	10,3	10,8	14,4	16,5	21,6	27,8	27,8	14,4	15,4
1993	12,3	12,3	13,4	12,3	9,3	5,1	6,7	7,7	10,3	18,5	20,6	27,8	23,7	27,8	17,5	18,5
1994	13,9	14,4	18,5	12,9	10,3	9,3	10,3	11,3	13,9	36,0	16,5	20,6	29,8	33,4	27,8	17,5
1995	12,9	13,4	13,9	13,4	13,4	11,3	12,3	6,2	11,3	17,0	16,5	22,6	28,8	30,9	22,6	14,4
1996	12,3	15,4	14,4	10,3	12,3	8,2	4,1	9,8	13,9	12,9	18,0	25,7	34,0	25,7	15,4	23,7
1997	12,9	13,4	13,9	9,3	5,1	10,3	10,3	10,8	10,3	14,4	18,5	28,8	26,8	25,7	17,0	9,3
1998	13,4	11,3	12,3	15,4	9,3	9,3	9,3	7,2	18,0	13,4	18,5	20,6	29,8	32,4	15,4	7,7
1999	11,3	18,5	13,4	9,3	9,3	6,2	8,2	7,2	10,3	17,5	24,7	26,8	23,7	22,1	18,0	10,3
2000	10,3	10,3	11,8	12,9	7,2	5,7	6,7	7,7	6,2	10,3	20,1	21,1	22,6	24,7	14,4	9,8
2001	23,2	12,9	13,9	9,3	10,3	8,2	9,3	5,7	7,2	11,3	13,4	14,4	22,1	26,8	15,9	15,9
2002	11,3	11,8	18,0	12,9	9,3	7,7	5,1	7,2	23,2	11,3	10,8	15,4	23,7	24,2	12,9	10,3
2003	9,3	13,4	13,4	11,3	13,9	5,1	8,2	8,2	11,3	10,8	13,9	22,6	23,2	24,7	14,4	7,7
2004	8,7	11,3	10,3	13,9	13,9	6,7	5,7	9,8	6,7	9,3	13,9	19,5	21,6	23,7	13,9	8,2
2005	7,2	12,9	10,8	10,3	9,3	7,2	6,2	9,8	11,3	13,9	12,3	16,5	21,1	22,1	10,3	9,3
2006	10,3	8,2	9,3	7,7	7,2	5,1	4,6	6,2	7,7	10,8	12,3	15,4	24,7	23,2	10,8	7,2
2007	7,2	7,7	8,7	8,7	7,7	4,1	8,7	5,1	8,7	11,3	13,9	16,5	22,6	22,1	22,1	4,6
2008	5,7	9,3	9,3	8,7	5,1	6,2	4,1	11,3	9,3	10,8	13,9	15,4	23,7	25,7	19,5	8,7
Max abs	23,2	20,6	18,5	15,4	13,9	14,4	12,3	11,3	23,2	36,0	24,7	28,8	34,0	33,4	27,8	23,7
Maxima Media	12,2	12,9	12,9	10,9	9,3	7,7	7,7	8,5	11,3	14,4	16,6	21,1	25,2	26,0	16,5	11,9
σ	4,37	3,27	2,73	2,27	2,70	2,59	2,41	2,08	4,14	6,01	4,05	4,91	3,52	3,37	4,32	4,96

Para establecer la **Tabla 6.2** se realizó un filtrado de los datos cronológicos, habiéndose eliminado siete datos que fueron considerados poco confiables. El criterio para su eliminación fue, en primer lugar el apartamiento del dato cuestionado del resto de los valores de cada serie direccional, reflejado en el valor del desvío standard indicado al pie de cada columna. A continuación la observación de la serie cronológica permitió advertir que los valores de intensidad y/o dirección en las horas previas y posteriores del registro no eran concordantes con el dato cuestionado. Los valores eliminados fueron los siguientes:

Tabla 6.3. registros de viento descartados para el análisis

Año	mes	día	hora	dir	W(m/s)
1992	10	28	22	ESE	28,3
1995	1	15	6	SW	30,9
1998	8	13	12	W	37,0
1999	11	14	2	ESE	19,5
1999	9	29	17	SSE	20,6
2006	7	15	14	SSE	20,6
2008	10	24	17	NNW	30,9

Los máximos anuales por dirección (absoluto de la serie y promedio en el período 1991-2008) se muestran en la **Figura 6.3**.

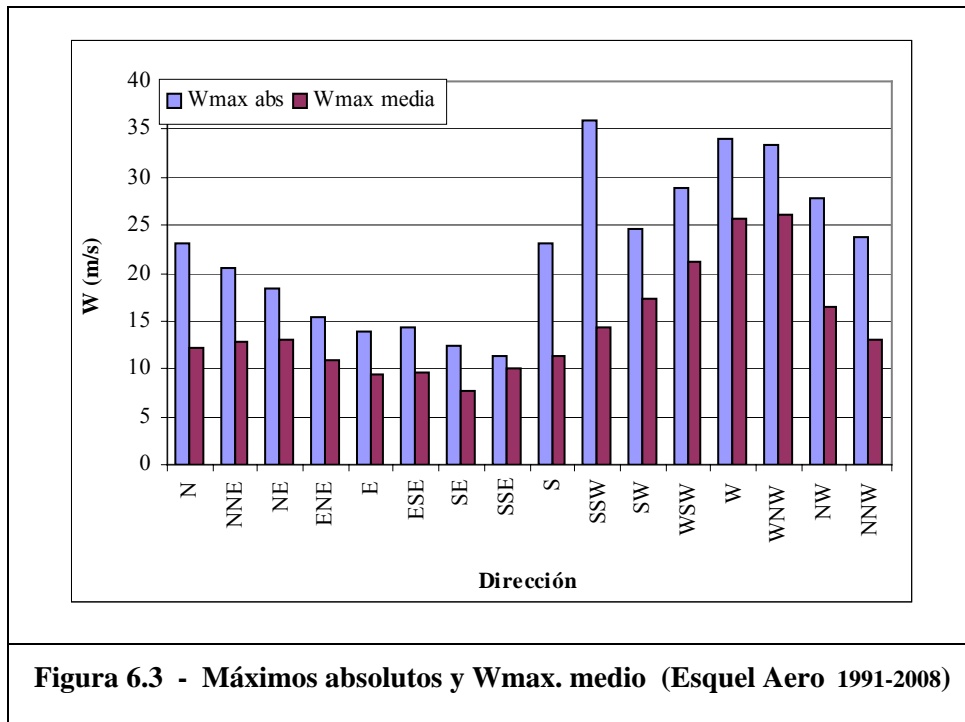
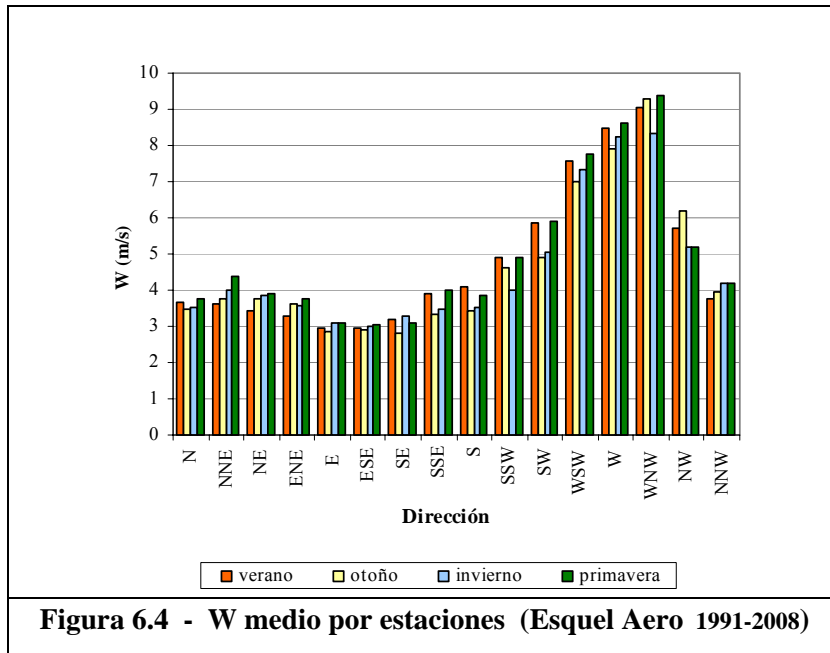


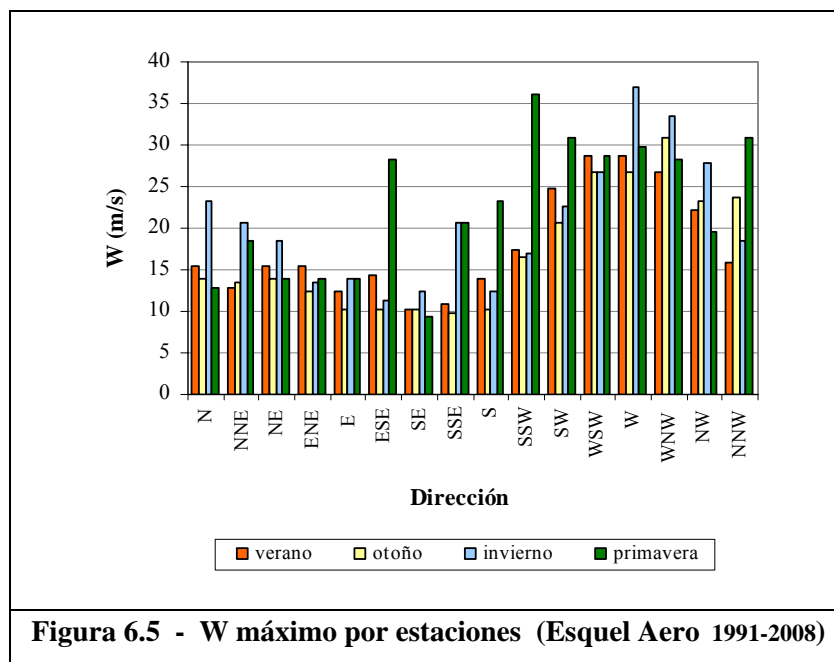
Figura 6.3 - Máximos absolutos y Wmax. medio (Esquel Aero 1991-2008)

La **Figura 6.4.** muestra que los vientos medios del SW son más intensos en primavera y verano que en otoño invierno. Para el sector NE los vientos más intensos son en la primavera. Los vientos medios del E y del SE son más intensos en invierno y primavera.

Sin embargo las variaciones estacionales no son significativas y las mayores diferencias entre los valores medios para cada estación respecto al medio anual, que se presentan para los vientos de los cuadrantes SW y NW son del orden del $\pm 10\%$.



Respecto a los valores máximos por estación, en la **Figura 6.5** se observa que en invierno y primavera se presentan la mayoría de los vientos extremos en el registro de datos observado.



7 ESTADÍSTICA DE VALORES EXTREMOS

El propósito de este análisis es la determinación de valores intensidad del viento (W) probables asociados a distintos períodos de retorno (Tr). Estos serán utilizados posteriormente para la estimación de valores máximos de altura de olas asociados a distintos períodos de retorno.

Los datos utilizados para este análisis corresponden a series valores máximos anuales de viento correspondientes al período de 18 años comprendido entre el 1 de Enero de 1991 y el 31 de Diciembre de 2008 (**Tabla 6.2**).

7.1 Metodología de ajuste

Hay básicamente tres aspectos a considerar para la realización del ajuste:

- Selección de la serie de datos
- Selección de una función de ajuste
- Selección del método de ajuste de los parámetros de la función

La serie de datos obtenida de los registros es considerada como una muestra acotada de una población donde la probabilidad de ocurrencia de un evento (en este caso que la intensidad del viento W alcance un cierto valor x_1) será descrita por medio de una función de distribución de probabilidades $F(x)$ determinada, donde F es la probabilidad de que una variable x no supere el valor X . $F(x)=P(x<X)$. La serie debe ser de valores considerados extremos.

De las distintas funciones existentes, utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos de viento, se seleccionaron para este estudio las siguientes:

Gumbel $F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x - \beta)))$ [7.1]

Weibull $F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - \varepsilon}{\alpha}\right)^c\right)$ [7.2]

La estimación de los parámetros de la función $F(x)$ se realiza a partir de los datos que constituyen la serie, utilizando distintos algoritmos numéricos basados en el método de los momentos y el método de máxima verosimilitud. Una vez establecida la función de ajuste, es 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.

La bondad del ajuste es evaluada con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que proporciona un indicador (divergencia) que permite establecer si el ajuste es aceptable o debe ser rechazado.

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:

$$D = \text{máx} |S(x) - F(x)| \quad [7.3]$$

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.

Una vez obtenida la función de ajuste F , es posible estimar el valor de la variable x que se encuentra asociado a una determinada probabilidad P , haciendo uso de la función inversa:

$$x = F^{-1}(P) \quad [7.4]$$

Según el caso, estas funciones inversas resultan:

Gumbel
$$x = \mu + \frac{1}{\alpha} [-\ln[-\ln(P)]] \quad [7.5]$$

En el caso de la distribución de *Weibull* de tres parámetros [7.2] resulta:

$$x = \varepsilon + \beta [-\ln(P)]^{1/\alpha} \quad [7.6]$$

Debe tenerse en cuenta que el período de retorno Tr se relaciona con la probabilidad según $Tr=1/P$.

7.2 Valores extremos por dirección

Con el fin de estimar los parámetros de ajuste de las funciones de Gumbel y de Weibull para las series de datos presentados en la **Tabla 6.2**, se aplicaron algoritmos numéricos basados en el método de máxima verosimilitud y método de los momentos según la convergencia de cada método para cada serie de datos por dirección. En la **Tabla 7.1** se presentan los resultados de dicho procedimiento, mostrando para cada una de las series analizadas, el valor estimado para los parámetros de la función de ajuste y el resultado del test de Kolmogorov-Smirnov utilizado para evaluar la bondad del mismo. Aunque la evaluación se realizó para ambas funciones (Weibull, Gumbel) sólo se indican los resultados de la función adoptada.

TABLA 7.1. Parámetros de ajuste para las funciones de valores extremos

Dirección	Función	Parámetro	D _{máx}
N	Gumbel	$\alpha= 0.299$ $\beta= 10.220$	0.1163
NNE	Gumbel	$\alpha= 0.366$ $\beta= 11.413$	0.1053
NE	Weibull	$c= 1.945$ $\alpha= 5.621$ $\varepsilon= 7.950$	0.11
ENE	Weibull	$c= 1.474$ $\alpha= 3.706$ $\varepsilon= 7.529$	0.1583
E	Gumbel	$\alpha= 0.4354$ $\beta= 8.0549$	0.1146
ESE	Weibull	$c= 1.592$ $\alpha= 4.495$ $\varepsilon= 3.679$	0.074
SE	Weibull	$c= 2.054$ $\alpha= 5.182$ $\varepsilon= 3.090$	0.1215
SSE	Weibull	$c= 3.612$ $\alpha= 7.503$ $\varepsilon= 1.727$	0.14
S	Weibull	$c= 1.247$ $\alpha= 5.525$ $\varepsilon= 6.091$	0.1206
SSW	Weibull	$c= 0.768$ $\alpha= 3.901$ $\varepsilon= 9.792$	0.1312
SW	Weibull	$c= 1.577$ $\alpha= 6.886$ $\varepsilon= 10.415$	0.155
WSW	Weibull	$c= 1.276$ $\alpha= 7.385$ $\varepsilon= 14.216$	0.1329
W	Weibull	$c= 1.121$ $\alpha= 4.285$ $\varepsilon= 21.066$	0.1710
WNW	Gumbel	$\alpha= 0.409$ $\beta= 24.560$	0.1327
NW	Weibull	$c= 1.613$ $\alpha= 7.469$ $\varepsilon= 9.800$	0.0972
NNW	Gumbel	$c= 0.268$ $\alpha= 9.667$	0.144

En la **Tabla 7.2.** se presentan los resultados obtenidos del análisis de valores extremos.

TABLA 7.2. Intensidades máximas del viento para distintos períodos de retorno

(Fuente: Esquel Aero 1991-2008)

Tr (años)	Velocidad (Km/h)															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	41.2	44.7	45.4	37.5	32.0	26.1	26.7	30.0	36.8	44.0	57.1	71.1	87.0	91.6	56.7	39.7
5	54.8	55.8	54.5	45.5	41.4	35.1	34.6	36.6	51.1	61.4	71.0	89.8	99.4	101.6	71.4	54.9
10	63.9	63.2	59.7	50.6	47.6	40.6	39.1	40.3	60.8	76.9	79.6	102.3	108.3	108.2	80.4	65.0
20	72.5	70.3	64.2	55.2	53.6	45.5	43.0	43.4	69.9	93.9	87.2	114.0	116.9	114.6	88.4	74.6
50	83.8	79.4	69.4	60.8	61.3	51.4	47.4	46.9	81.3	118.2	96.4	128.6	127.9	122.8	97.9	87.1
100	92.2	86.3	73.0	64.7	67.0	55.5	50.4	49.2	89.6	137.9	102.8	139.1	136.1	128.9	104.6	96.5

8 MODELACIÓN DEL OLEAJE EN EL LAGO

En este capítulo se presenta una breve descripción del modelo SWAN (Simulating **W**Aves Nearshore), desarrollado por Booij et al. (1996)⁵ para la modelación de la generación de olas por acción del viento y su propagación en zonas costeras y en cuerpos de agua cerrados.

Descripción del modelo utilizado

SWAN es un modelo numérico utilizado para realizar estimaciones de parámetros de ola, cuando se conocen la intensidad y dirección del viento que sopla sobre la superficie del agua, las profundidades del fondo (lecho), y otras condiciones.

El modelo se basa en una representación espectral de la ecuación de balance de acción de olas (o balance de energía en ausencia de corrientes) con todos los procesos físicos modelados explícitamente.

El modelo permite la simulación de los siguientes procesos:

- Propagación rectilínea 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.

Los siguientes procesos de generación y disipación de olas son representados por SWAN:

- Generación de olas por viento
- Disipación por descrestamiento (whitecapping)

⁵ “SWAN Cycle III version 40.51AB Implementation Manual” Delft University of Technology, 2007.

- 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.

Entre otras ventajas importantes de SWAN respecto de otros modelos, se puede citar la posibilidad de efectuar el cómputo de olas bajo campos de viento variables, y que los resultados de cada aplicación se encuentran expresados sobre una malla de cálculo, permitiendo de esta manera conocer un campo de olas distribuido en el espacio en lugar de un valor puntual.

En el **Anexo I** se presenta una descripción más completa del modelo SWAN.

8.1 Escenarios

A modo preliminar se modelaron escenarios de viento extremo, con nivel del lago $N = +188.15$ m (IGM). Cabe señalar que esta cota se corresponde con la del pelo de agua en el momento de efectuarse el relevamiento de detalle local en enero de 2009. Sin embargo, según lo indica la **Tabla 5.1**, los mayores niveles del lago se presentan entre mayo y agosto. Hasta tanto sea posible vincular los valores de nivel del lago de las **Tablas 5.1** y **5.2** con el 0 IGM, se ha adoptado la cota de la superficie del lago $N = +188,15$ m para la modelación.

En principio se han escogido vientos correspondientes a 100 años de periodo de retorno. El período de retorno permite de una manera simple incorporar la incertidumbre asociada al carácter aleatorio que presenta la intensidad del viento. Pero la seguridad de una estructura depende de la probabilidad de que la condición de diseño escogida sea superada durante su vida útil. La seguridad estructural que el proyectista asigna a la obra depende de consideraciones técnicas y económicas. Así, este enfoque podrá ser utilizado en etapas más avanzadas del proyecto.

Para cada uno de los sitios de emplazamiento de las obras (**Figura 8.1.**) se utilizó un viento de dirección alineado con la dirección de mayor fetch correspondiente a esa posición.

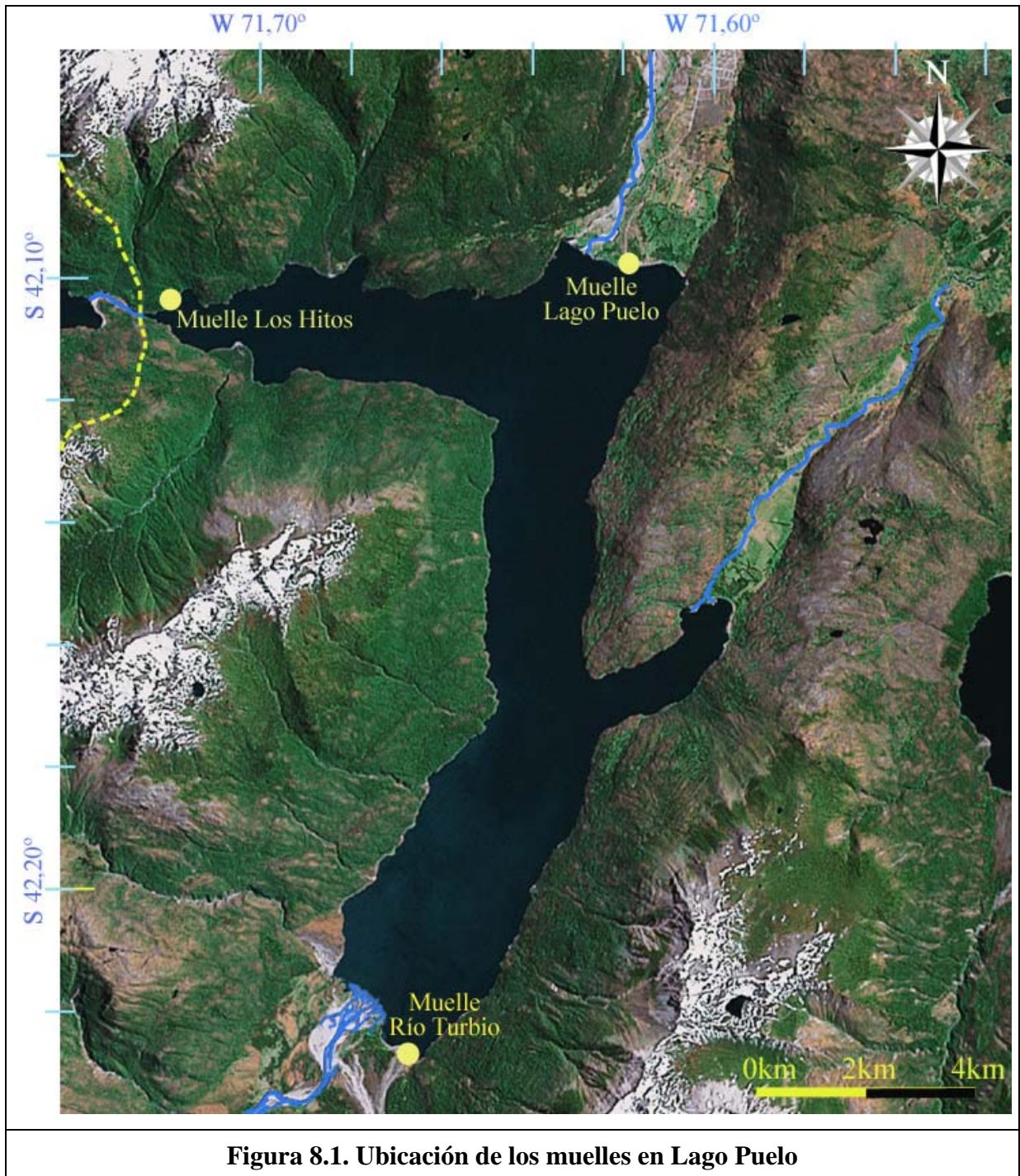


Figura 8.1. Ubicación de los muelles en Lago Puelo

Dada la variabilidad espacial del patrón de distribución de vientos, y habida cuenta de que la información utilizada corresponde a la estación Esquel (distante 95 Km del Lago) se evaluaron en cada caso dos direcciones aproximadamente alineadas con el eje del lago, a las que se asoció la máxima intensidad de viento.

En todos los casos el modelo matemático se utilizó en régimen permanente, es decir que no se ha tenido en cuenta la duración del viento. En un cuerpo de agua cerrado y de dimensiones relativamente pequeñas, es probable que esta hipótesis no se aparte mucho de la realidad. En cualquier caso se estará sobreestimando el oleaje generado.

Los escenarios simulados se indican en la **Tabla 8.1**.

Tabla 8.1. Escenarios de cálculo

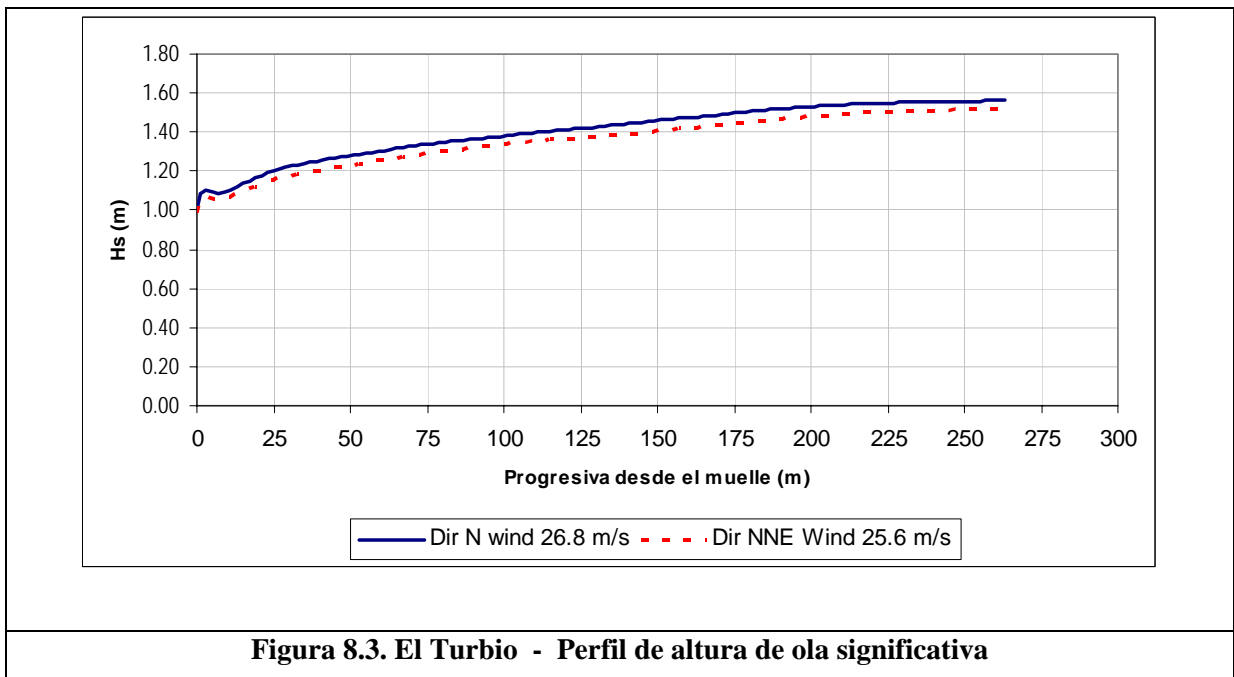
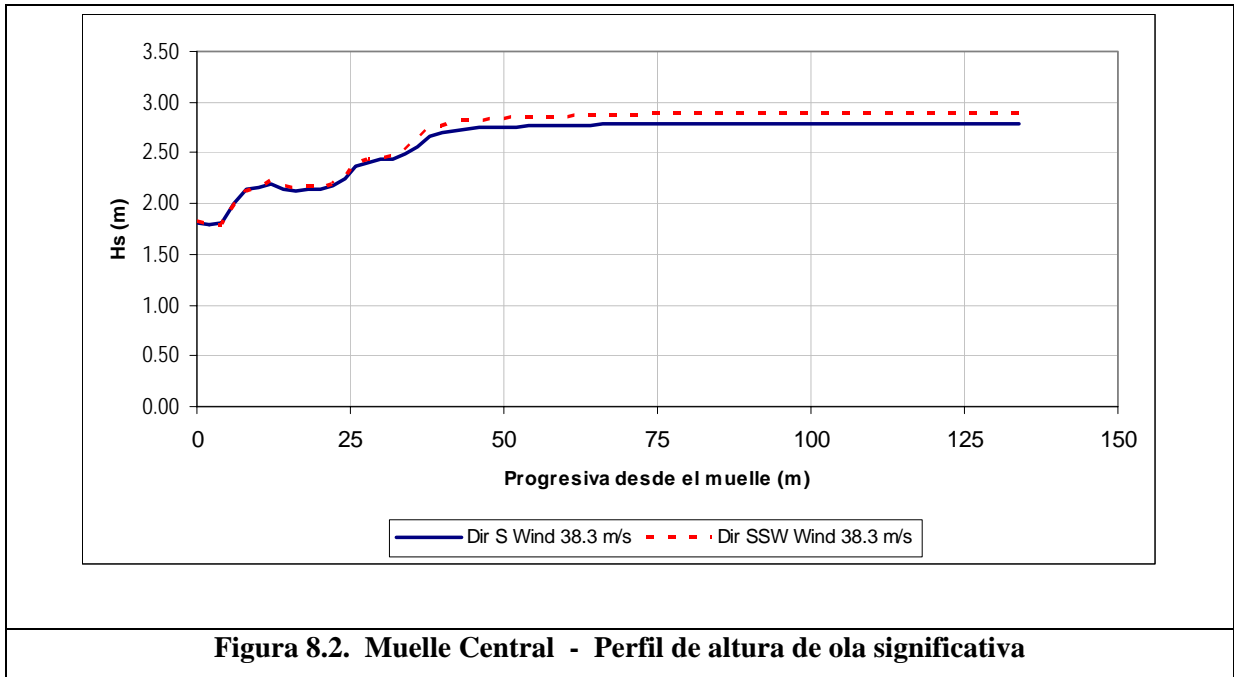
Ubicación	Dirección	Intensidad (m/s)
Muelle Central	S	38.3
	SSW	38.3
Los Hitos	E	18.6
	ESE	18.6
El Turbio	N	26.8
	NNE	25.6

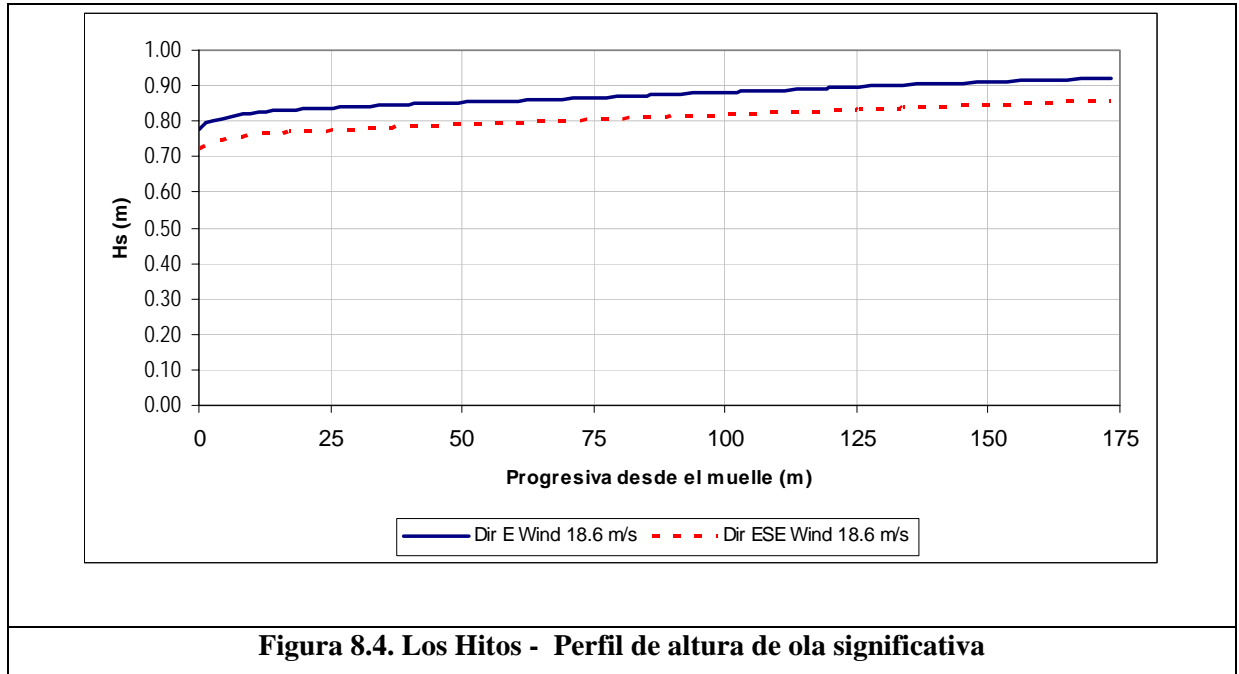
Acorde a lo indicado, para el caso de Muelle Central se consideraron dos situaciones: un viento de 38,3 m/s (137,9 Km/h), que corresponde a la dirección SSW según lo muestra la **Tabla 7.2**. y el mismo viento asociado a la dirección S. Con ello se intenta tener en cuenta el posible encauzamiento del flujo por efecto de las montañas. No se ha intentado efectuar correcciones a la intensidad del viento por este mismo efecto.

8.2 Resultados

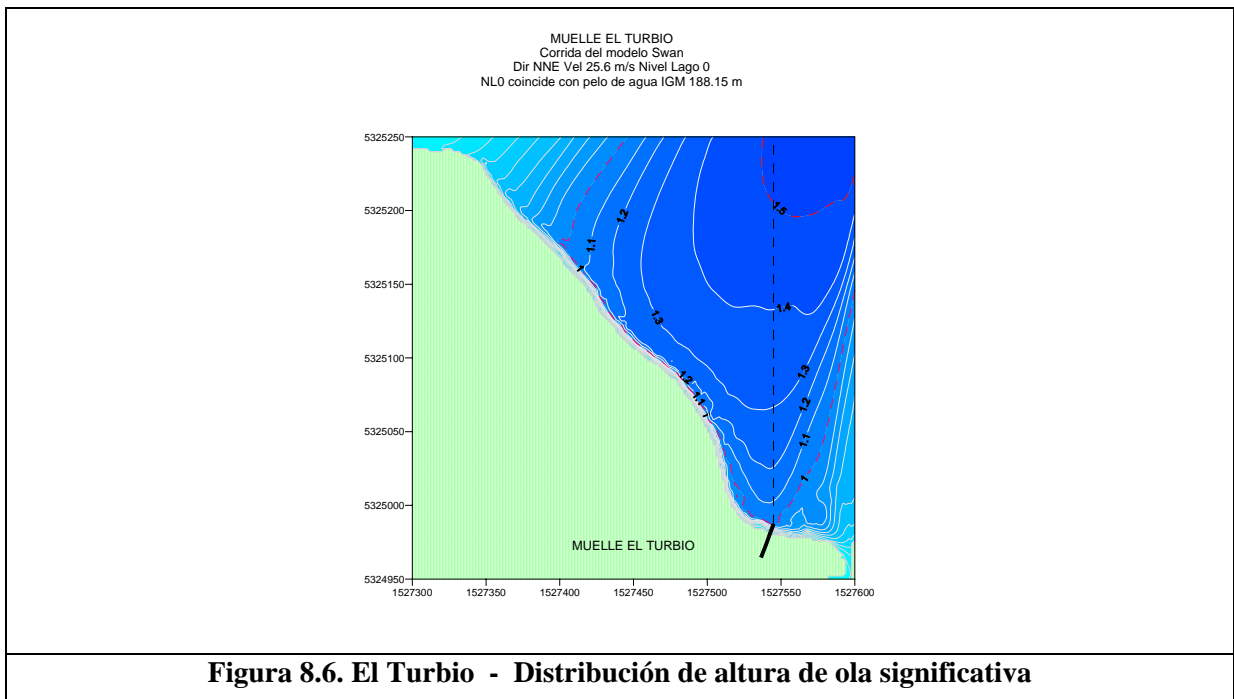
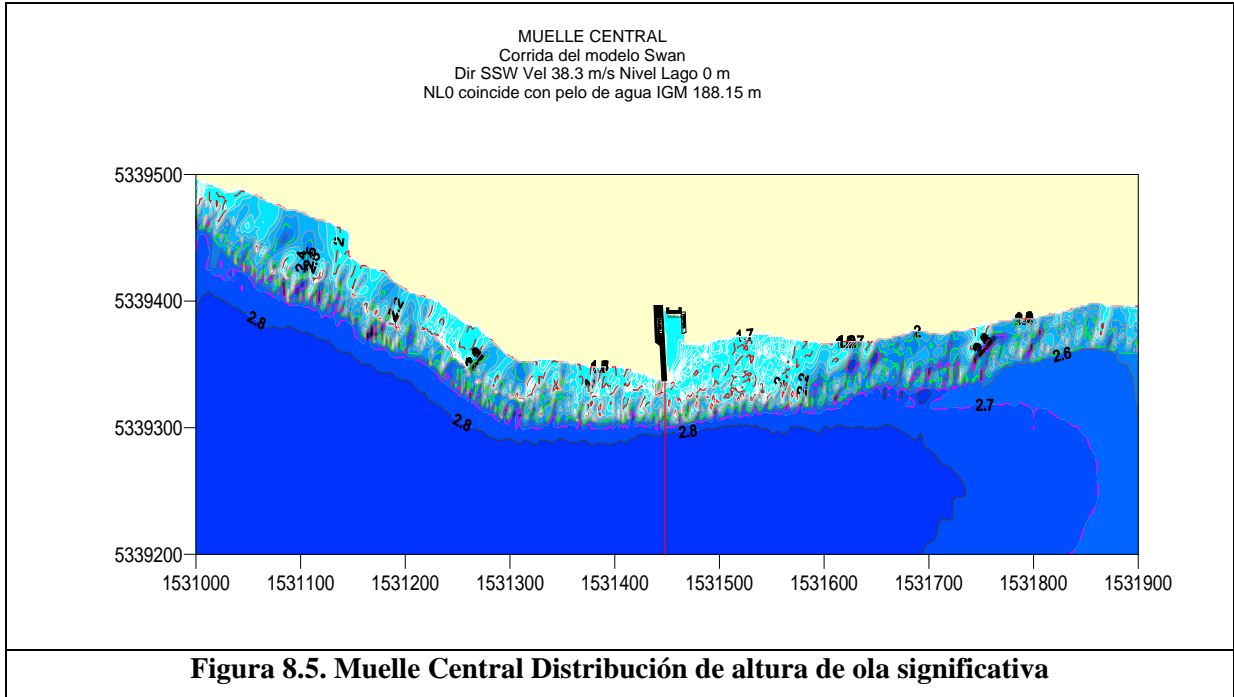
En las **Figuras 8.2 a 8.4** se presenta un corte transversal de la distribución de altura significativa del oleaje para cada una de las ubicaciones indicadas en la **Figura 8.1**. El corte

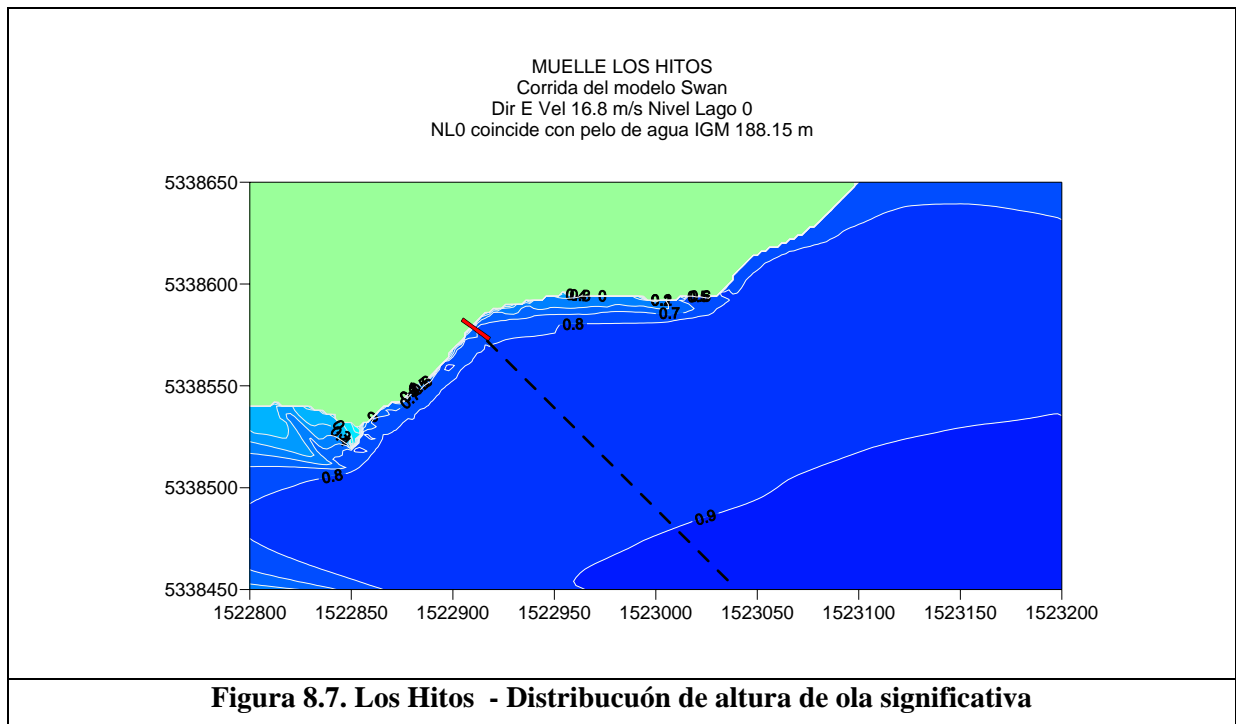
corresponde a una orientación aproximadamente perpendiculares a la línea de costa y en correspondencia con la ubicación de los muelles.





En las **Figuras 8.5 a 8.7** se presenta la distribución espacial de altura de ola significativa para el caso más desfavorable de los dos escenarios evaluados en cada uno de los sitios.





Las **Figuras 8.5. a 8.7.** muestran que, acorde a las características de los vientos en la región y a la morfología del Lago Puelo, el muelle Central resulta expuesto a las mayores olas. Aunque se ha estimado que esas olas pueden alcanzar los 3 m para un período de retorno de 100 años en aguas abiertas del sector norte del lago, el efecto de la profundidad se hace notar en las cercanías de las obras de abrigo, donde resultan olas de $H_s \cong 2,20$ m. El período de pico de estas olas es $T_p = 5,2$ s.

En El Turbio y Los Hitos resulta $H_s \cong 1,10$ y $0,80$ respectivamente, con período de pico $T_p = 4,3$ s y $3,5$ s respectivamente.

Como se ha indicado, estos resultados son preliminares, debiendo todavía evaluarse la influencia del nivel del lago, y verificarse si el período de retorno escogido ($T_r = 100$ años) para los eventos modelados (y en consecuencia la ola de diseño escogida) es compatible con los aspectos técnicos y económicos del proyecto .

9 CONCLUSIONES

1. Se realizó una búsqueda y análisis de información de los vientos en la región, que constituye el mecanismo de generación de oleaje en el lago, y se definieron escenarios extremos probables para esta variable en cada uno de los sitios de emplazamiento de las obras.
2. Se implementó y aplicó el modelo matemático SWAN para cada uno de los sitios y escenarios extremos definidos para un período de retorno $Tr=100$ años.
3. Debido a que el mayor desarrollo del lago (15 Km) resulta aproximadamente alineado con la dirección SSW-NNE, y siendo que el SSW presenta vientos muy intensos, el sector norte del Lago Puelo se halla expuesto a las olas más altas, estimadas en $H_s = 2,20$ m para Muelle Central.
4. Para la ubicación El Turbio, los vientos que soplan desde el N y NNE, coincidentes además con el eje mayor del lago, generan olas estimadas en $H_s=1,10$ m.
5. El Muelle Los Hitos resulta el menos expuesto al oleaje, debido a los vientos menos intensos de los sectores E y ESE y al menor desarrollo del lago en su eje E-W, que es de unos 9 Km. Las olas estimadas en esta ubicación son del orden de 0,80 m.
6. Los resultados indicados son de carácter preliminar, debiendo todavía evaluarse la influencia del nivel del lago, y verificarse si el período de retorno escogido ($Tr=100$ años) para los eventos modelados, es el más adecuado para establecer una ola de diseño compatible con los aspectos técnicos y económicos del proyecto .

ANEXO I Descripción del modelo SWAN

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 descripto 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.