

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



PROVINCIA DEL CHUBUT

PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA
DE NUEVAS OBRAS DE ABRIGO

PARTE 1 - CLIMA DE OLAS

Junio, 2008

Informe LHA- 273-01-08

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PROVINCIA DEL CHUBUT

PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DE
NUEVAS OBRAS DE ABRIGO

PARTE 1 - CLIMA DE OLAS

RESUMEN

Se presenta una evaluación del clima de olas en el área del puerto de Comodoro Rivadavia. El estudio se ha basado en datos generados por un modelo Global de Olas en una posición costa afuera y en la propagación de los datos hasta el área costera mediante el modelo SWAN.

PALABRAS CLAVE

Olas – clima de olas - – propagación de olas - modelación matemática – modelo global de olas – Golfo de San Jorge - Comodoro Rivadavia

| | |
|-----------|---|
| Informe | LHA-273-01-08 |
| Fecha | Junio, 2008 |
| PROYECTO | 652 |
| COMITENTE | Provincia del Chubut Dirección General de Infraestructura |

**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. Castellano

Equipo de trabajo

*Ing. N. Tomazin
Sr. C.A. Haspert
Sr. S.L. Peralta*

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUCCION..... | 1 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 3 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 4 |
| 4 | DESCRIPCION GENERAL DEL AREA..... | 5 |
| 4.1 | DATOS DE BASE..... | 7 |
| 4.2 | Planos de referencia..... | 7 |
| 4.3 | Batimetría..... | 7 |
| 4.4 | Nivel del mar..... | 8 |
| 4.5 | Olas y vientos..... | 8 |
| 5 | EVALUACION DEL CLIMA DE OLAS COSTA AFUERA..... | 10 |
| 5.1 | Vientos..... | 11 |
| 5.2 | Olas resultantes..... | 13 |
| 5.3 | Olas locales..... | 18 |
| 5.4 | Olas oceánicas..... | 23 |
| 5.5 | Régimen estacional costa afuera..... | 28 |
| 6 | EVALUACION DE OLAS EN EL AREA COSTERA..... | 30 |
| 6.1 | Implementación del modelo..... | 31 |
| 6.2 | Aplicación..... | 32 |
| 6.3 | Resultados..... | 33 |
| 6.3.1 | Olas locales (wind sea)..... | 33 |
| 6.3.2 | Olas oceánicas (swell)..... | 35 |
| 6.4 | Régimen estacional en el área costera..... | 37 |
| 7 | ESTADÍSTICA DE VALORES EXTREMOS..... | 39 |
| 7.1 | Metodología de ajuste..... | 39 |
| 7.2 | Olas costa afuera..... | 42 |
| 7.3 | Olas extremas en el área costera..... | 49 |
| 7.4 | Olas oceánicas..... | 52 |
| 7.5 | Aspectos relativos a la ola de diseño..... | 53 |
| 8 | CONCLUSIONES..... | 55 |
| 9 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 56 |

Anexo I - Relevamiento de detalle

Anexo II - Características del modelo SWAN

PROVINCIA DEL CHUBUT

PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DE NUEVAS
OBRAS DE ABRIGO

PARTE 1 – CLIMA DE OLAS

Junio, 2008

1 INTRODUCCION

La Dirección General de Infraestructura Portuaria (D.G.I.P.) de la Provincia del Chubut ha encomendado al Instituto Nacional del Agua (I.N.A.) la evaluación funcional desde el punto de vista hidráulico, de un proyecto de ampliación de las obras de abrigo al Puerto de Comodoro Rivadavia.

Con este proyecto la D.G.I.P. tiene como necesidad satisfacer los siguientes objetivos:

- Disminuir la agitación en la dársena pesquera, considerando además que está en marcha una nueva ampliación del muelle pesquero en un total de 56 m.
- Reducir la agitación frente al muelle de ultramar, para oleajes en régimen medio, ya que se ha observado una excesiva agitación durante las operaciones.
- Generar una zona de calma en una posible área destinada al atraque de cruceros.

La caracterización del clima de olas en el área costera próxima al Puerto de Comodoro Rivadavia constituye la primera etapa de las tareas convenidas, y está destinada básicamente a definir las situaciones de oleaje frecuente y extremo a que resulta expuesta el área portuaria, para de esta manera, en una segunda instancia, probar la eficiencia hidráulica de las nuevas obras mediante simulación numérica.

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.

Los objetivos y metodología para el desarrollo 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 oceanográfico de interés para este estudio.

En el **Capítulo 5** se muestra la información de base utilizada.

En el **Capítulo 6** se describe la metodología y resultados del análisis de los datos de olas en la posición costa afuera de Comodoro Rivadavia, incluyendo la caracterización de olas y vientos.

En el **Capítulo 7** se detalla la implementación del modelo numérico y la metodología aplicada para la transformación de los datos de olas a una posición costera próxima al puerto de Comodoro Rivadavia y la caracterización del clima de olas resultante en esa posición.

En el **Capítulo 8** se presenta un análisis de condiciones extremas probables evaluadas a partir de la serie de datos disponibles. El análisis se realizó tanto para la posición costa afuera como para una posición costera próxima al área portuaria.

2 OBJETIVOS

Las tareas desarrolladas tuvieron como objetivo final la evaluación funcional desde el punto de vista hidráulico de un proyecto de obras de abrigo complementarias en el Puerto de Comodoro Rivadavia.

El estudio se ha desglosado en dos etapas, la primera de ellas, desarrollada en el presente Informe, consistente en la caracterización del clima de olas en el área costera próxima.

En segunda instancia se evalúan mediante modelación matemática algunas alternativas de obra de abrigo desarrolladas por la D.G.I.P., analizándose en mayor profundidad aquella que fue considerada más eficiente.

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 desarrollan los siguientes aspectos:

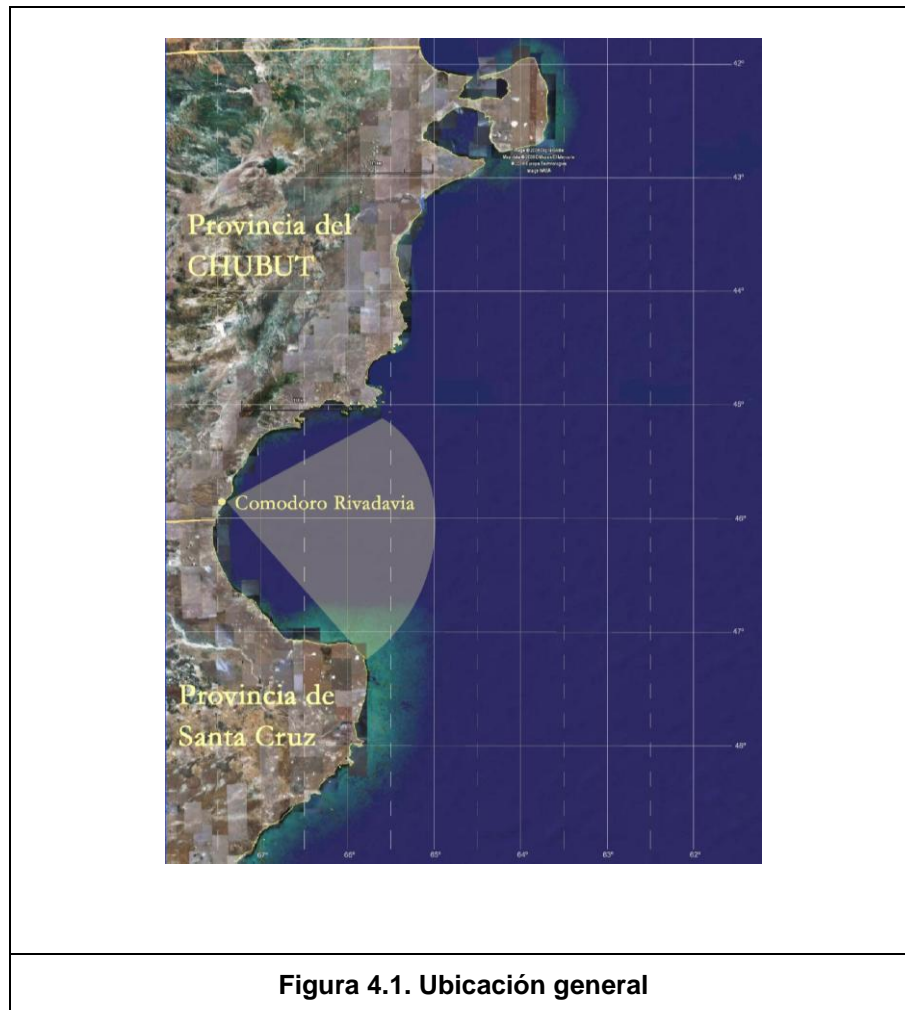
- Búsqueda y análisis de la información de base.
- Evaluación del clima de olas en aguas profundas.
- Definición de condiciones oceanográficas medias y extremas.
- Definición de escenarios para las simulaciones numéricas.
- Aplicación del modelo numérico para la modelación de la propagación del oleaje hasta el área costera.
- Determinación del clima de olas en el entorno del emplazamiento del puerto.

En la **Parte II** se desarrollan los siguientes aspectos:

- Modelación matemática de la agitación por oleaje en el área portuaria, tanto en situación actual como con las nuevas obras proyectadas.
- Optimización del proyecto de las obras de abrigo.

4 DESCRIPCION GENERAL DEL AREA

El puerto de Comodoro Rivadavia se encuentra en las coordenadas $45^{\circ} 51' 30''$ de latitud S y $67^{\circ} 28' 00''$ de longitud W, en el Golfo de San Jorge. (**Figura 4.1**).



El golfo tiene una forma aproximadamente semicircular, con un radio de 120 Km. Sus límites geográficos son el Cabo Dos Bahías al norte y el Cabo Blanco al sur. Las profundidades en una extensa área central son del orden de los 100 m.

Siendo en la región los vientos dominantes del sector W y N, su ubicación general en el extremo occidental del Golfo le provee al puerto de buena protección a las olas generadas por el viento localmente. El sitio ofrece también un relativo resguardo a las olas oceánicas que alcanzan el área costera desde el mar abierto. En efecto, una batimetría caracterizada

por curvas de nivel en forma de arco que acompañan la forma cóncava de la costa permite el desarrollo de efectos de refracción por profundidad que tienden a reducir la amplitud del oleaje a medida que el mismo se propaga hacia la costa. Esto es especialmente significativo para las ondas de largo período.

El puerto dispone actualmente de un muelle pesquero de 108 m y un muelle de ultramar de 216 m, adosado a la obra de abrigo.



Figura 4.2. Puerto de Comodoro Rivadavia

4.1 DATOS DE BASE

Para la realización de este estudio se ha dispuesto de la información de base que se describe a continuación:

4.2 Planos de referencia

El 0 MOP se halla a 0,52 m sobre el plano hidrográfico.

4.3 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:

- Carta N° 59 SHN (Servicio de Hidrografía Naval). GOLFO SAN JORGE. Escala 1:400.000
- Carta N° 30 COMODORO RIVADAVIA. Escala 1:20.000
- Relevamiento de detalle

El relevamiento de detalle fue realizado entre Marzo y Abril de 2007 a requerimiento de la D.G.I.P. y consistió en una batimetría y taquimetría desde el Puerto Comodoro Rivadavia hasta el Barrio Presidente Ortiz (Ver **Anexo I**). Para la batimetría se utilizó una ecosonda de registro digital y un GPS geodésico. El sistema se completó con otro GPS geodésico ubicado fuera en la playa. La ecosonda empleada fue un equipo SIMRAD, modelo EA501 P, portátil con conexión directa y simultánea al GPS. La precisión en la determinación de los valores de profundidad es del orden de 2 cm. Para el posicionamiento planimétrico se utilizó GPS (geodésico), en modo diferencial. También se instaló un sensor de nivel Modelo Génica para realizar el registro de nivel del mar durante el período de relevamiento de batimetrías, que permitió corregir los registros batimétricos y referirlos al Punto MOP.

La taquimetría se efectuó con una equidistancia de 25 m, desde el nivel de pelo de agua, hasta donde las instalaciones privadas lo permitieron o si no hasta cumplir los requerimientos del comitente. Se utilizó la Poligonal de apoyo y se realizó con estación total.

4.4 Nivel del mar

El régimen de mareas es semidiurno. El nivel medio del mar es 3,14 m respecto del plano de referencia hidrográfico. La siguiente **Tabla 4.1** muestra la marea astronómica en el Puerto de Comodoro Rivadavia¹

| Alturas en metros sobre el plano de reducción, correspondientes a la predicción 2005 | | | | Amplitud | |
|--|-------|----------|-------|----------|-------|
| Pleamar | | Bajamar | | Máxima | Media |
| Máxima | Media | Más baja | Media | | |
| 6.26 | 5.28 | 0.25 | 1.21 | 5.88 | 4.07 |

4.5 Olas y vientos

Los datos de base utilizada en este estudio corresponden a aguas intermedias y han sido generados por un Modelo Global de Olas. La modelación de olas en gran escala geográfica permite considerar las olas oceánicas que se propagan fuera de las áreas de influencia de los sistemas climáticos que les dieron origen, lo que implica un importante refinamiento en la descripción del clima de olas en regiones costeras. Por otra parte, cabe señalar que de los resultados obtenidos por el Modelo Global son calibrados y validados mediante la utilización de información satelital, lo cual constituye un aporte significativo para mejorar la confiabilidad de los datos.

Los datos utilizados en este caso fueron producidos por la Oficina Meteorológica del Reino Unido (United Kingdom Meteorological Office, UKMO) y corresponden a la ubicación 45,36° S y 64,38° W entre el 1/1/95 y el 25/5/99, y 45,83° S 64,58° W entre el 28/05/99 y el 31/07/2005. Los datos consistieron en una serie cronológica que abarca algo más de 10 años, desde 01/01/1995 al 31/7/2005. Los datos tienen un espaciamiento temporal de 6 horas. La ubicación indicada se halla a unos 236 Km. al ENE de Comodoro Rivadavia.

Las variables provistas en los registros son las siguientes:

¹ Servicio de Hidrografía Naval, TABLA DE MAREAS

- Intensidad y dirección del viento (a 10 m de altura)
- Altura de ola (H_s), período medio ($T_m=T_z=T_{0,2}$), período de pico T_p y dirección de propagación para el espectro total resultante.
- Altura de ola (H_s), período medio ($T_{0,2}$) y dirección de propagación para el espectro de olas generadas localmente por vientos.
- Altura de ola (H_s), período medio ($T_{0,2}$) y dirección de propagación de olas oceánicas ó *swell* (olas que se propagan fuera de su área de generación).

El período de pico es el correspondiente a la máxima densidad de energía del espectro resultante. El período medio $T_m=T_{0,2}$ es el determinado a partir de los momentos de orden 0 y 2 del espectro, es decir:

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad [4.1]$$

Los momentos de orden n se definen a partir del espectro de densidad de energía S :

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad [4.2]$$

Entre el 1/1/95 y el 31/7/05 se dispuso en total de 15008 valores de las variables.

5 EVALUACION DEL CLIMA DE OLAS COSTA AFUERA

En este capítulo se desarrolla un análisis que permite describir las características del clima de olas y vientos a partir de los datos disponibles en la posición correspondiente al nodo de grilla del modelo Global, ubicado a 236 Km al ENE de Comodoro Rivadavia. El resultado de este análisis constituye la base de la información necesaria para el estudio de propagación de las olas hacia una posición costera y la caracterización del clima de olas en esa ubicación.

La UKMO ha provisto de cuatro conjuntos de resultados diarios del modelo global con intervalos de 6 horas, los que caracterizan el espectro total de energía del mar resultante y, por separado, el espectro de las olas generadas localmente por viento (*wind sea*), y el de olas oceánicas (*swell*), entendiéndose como tales aquellas olas que se propagan fuera del área de influencia del viento que las ha generado.

Esta separación se fundamenta en el hecho de que ambos tipos de olas presentan características bien distintas tanto en su origen y estructura como en sus propiedades estadísticas. La metodología para modelar su propagación hacia la costa presenta también algunas diferencias según el caso. Esta circunstancia amerita el tratamiento por separado de ambos conjuntos de datos.

La información disponible fue procesada con el propósito de poder describir sintéticamente las características del oleaje generado por el Modelo Global, evaluando en primer lugar la distribución frecuencial de las variables características (dirección de propagación, altura significativa y períodos).

En el apartado **5.1** se presenta en primera instancia el análisis de la intensidad y dirección del viento determinado a 10 m de altura en la misma ubicación geográfica.

A continuación se desarrolla el análisis de los datos de olas totales o resultantes (apartado **5.2**). En **5.3**. se evalúan las características de las olas generadas por vientos locales y en **5.4**. las olas oceánicas (*swell*); todo el análisis corresponde a la ubicación costa afuera indicada.

El procesamiento de la información permitió obtener las distribuciones de frecuencia para la dirección de propagación, la altura significativa y el período en los registros de olas en la posición indicada. La presentación de los resultados se efectúa por medio de tablas, histogramas y gráficos polares (rosas).

Finalmente en el apartado 5.5. se evalúa la variabilidad estacional de la altura de ola media y máxima.

Si bien se analiza el registro completo de la información disponible, cabe destacar que dada la ubicación del punto de pronóstico para el estudio de la propagación de olas hacia la costa interesan particularmente las direcciones incluidas en los cuadrantes NE y SE, abarcando el conjunto de direcciones comprendido entre el Norte y el Sur. El resto de las direcciones no tienen influencia sobre Comodoro Rivadavia, dadas las características geográficas de la costa.

5.1 Vientos

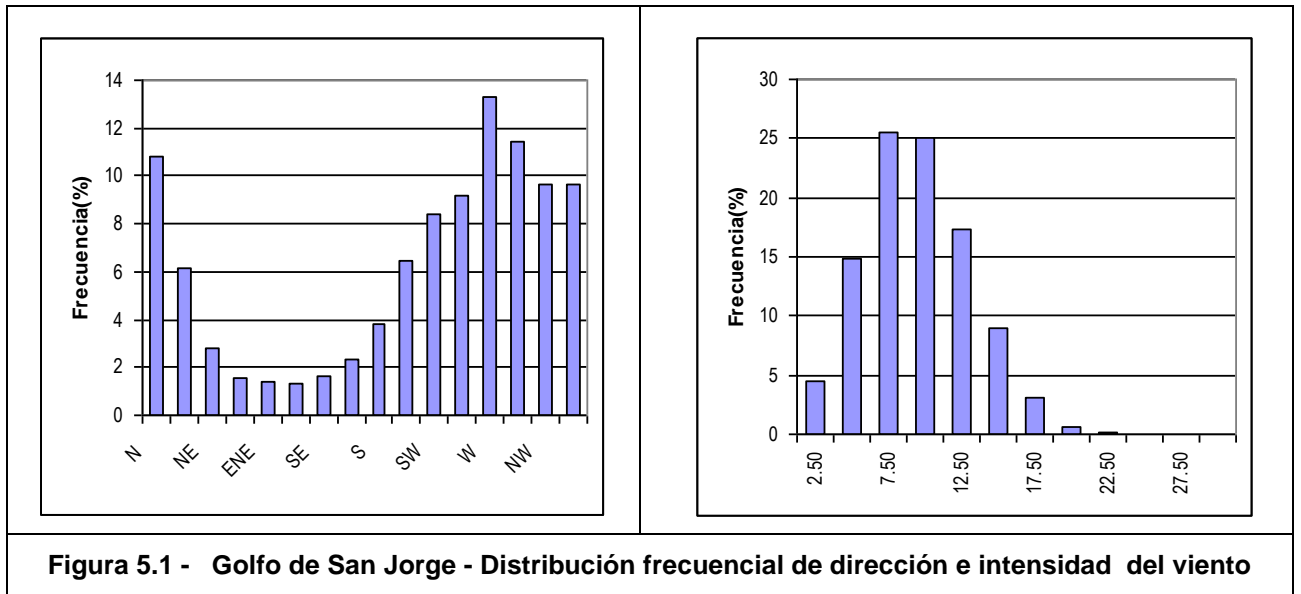
Los vientos en superficie (a 10 m de altura) son caracterizados por intensidad media y dirección, con un dato cada 6 horas. La **Tabla 5.1.** muestra los valores clasificados en intervalos de intensidad de 2,5 m/s para una rosa de 16 direcciones y frecuencias indicadas son por mil.

Tabla 5.1– Golfo de San Jorge –Viento de superficie. Número de casos por dirección e intensidad

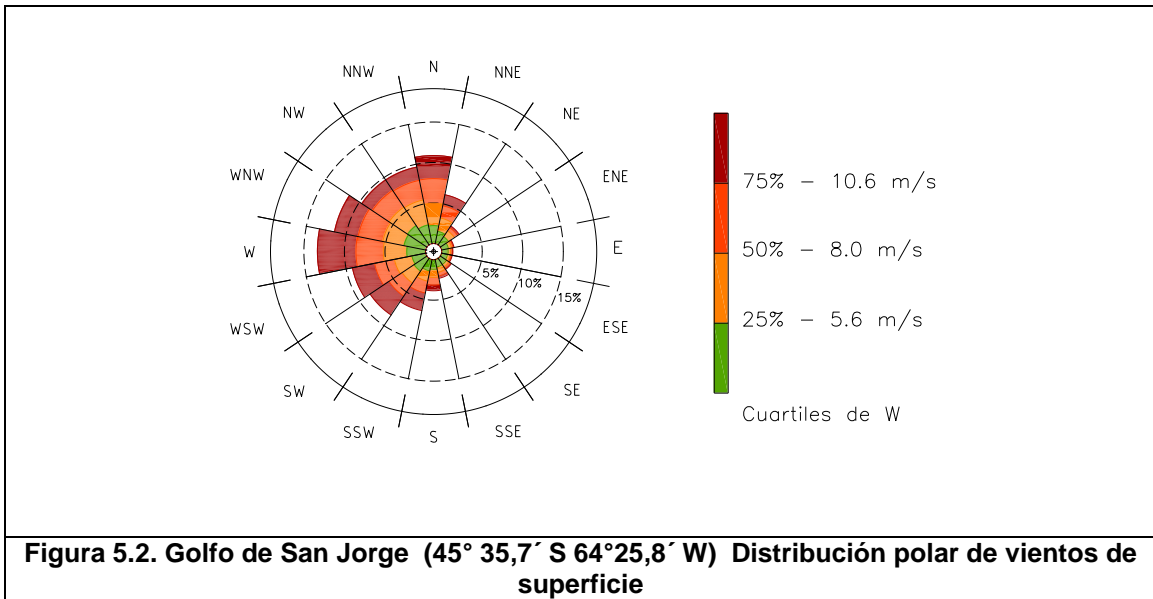
| W(m/s) | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | TOTAL |
|--------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| 0.0 - 2.5 | 33 | 41 | 32 | 32 | 29 | 31 | 40 | 32 | 34 | 46 | 41 | 47 | 55 | 55 | 65 | 50 | 663 |
| 2.5 - 5.0 | 191 | 123 | 113 | 72 | 70 | 61 | 67 | 82 | 105 | 120 | 167 | 145 | 204 | 237 | 268 | 193 | 2218 |
| 5.0 - 7.5 | 399 | 258 | 155 | 74 | 55 | 65 | 76 | 105 | 154 | 197 | 273 | 312 | 420 | 411 | 401 | 464 | 3819 |
| 7.5 - 10.0 | 460 | 251 | 75 | 36 | 35 | 26 | 43 | 76 | 144 | 214 | 283 | 377 | 479 | 457 | 382 | 416 | 3754 |
| 10.0 - 12.5 | 317 | 143 | 29 | 18 | 14 | 13 | 16 | 45 | 86 | 175 | 230 | 251 | 429 | 363 | 250 | 224 | 2603 |
| 12.5 - 15.0 | 186 | 80 | 14 | 3 | 3 | 1 | 4 | 12 | 33 | 123 | 158 | 162 | 286 | 146 | 63 | 83 | 1357 |
| 15.0 - 17.5 | 37 | 24 | 2 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 12 | 51 | 88 | 72 | 108 | 38 | 17 | 13 | 467 |
| 17.5 - 20.0 | 5 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 26 | 20 | 12 | 15 | 10 | 1 | 2 | 99 |
| 20.0 - 22.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 8 | 4 | 2 | 4 | 1 | 0 | 0 | 22 |
| 22.5 - 25.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 |
| 25.0 - 27.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27.5 - 30.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 1628 | 922 | 421 | 236 | 206 | 200 | 246 | 354 | 575 | 964 | 1264 | 1381 | 2000 | 1719 | 1447 | 1445 | 15008 |

La **Tabla 5.1** muestra que los sectores en los que el viento tiene componentes hacia el área costera estudiada acumulan un 27.5% del total de casos registrados. Se observa además, que los valores de intensidades máximas corresponden al cuadrante SW y también a la dirección WNW, resultando del orden de 80 Km/h.

La **Figura 5.1** permite ampliar el panorama de esta descripción presentando en forma gráfica las distribuciones frecuenciales por intensidad y dirección del viento.



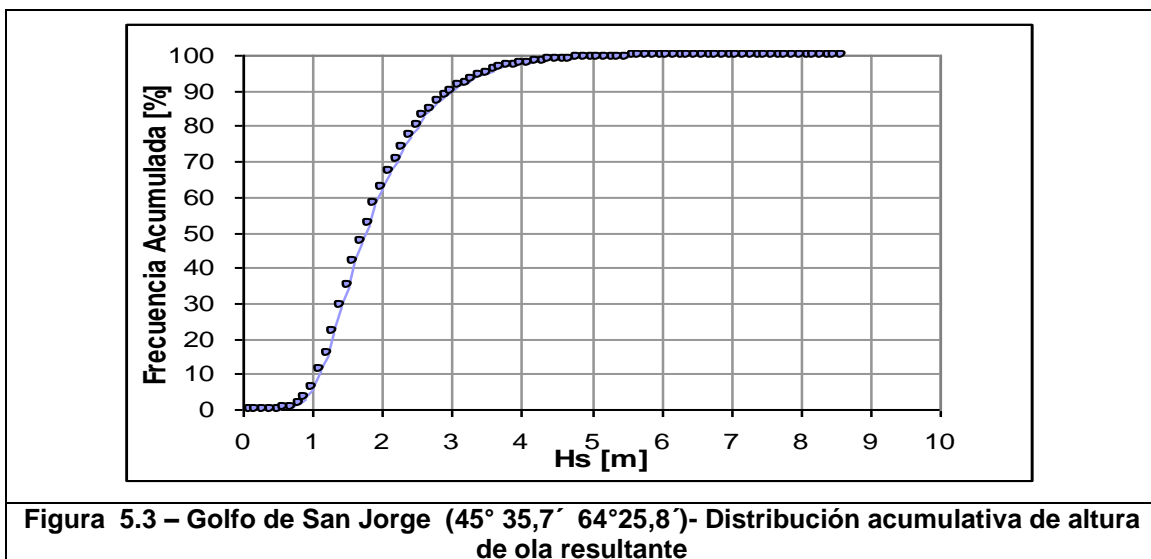
La distribución polar de vientos de superficie se muestra en la **Figura 5.2**. Los vientos se han clasificado en rosa de 16 direcciones, y en cuatro intervalos de de intensidad, cada uno conteniendo el 25% del total de datos (cuartiles).



5.2 Olas resultantes

Las olas en el área son el resultado de la superposición de olas generadas localmente por el viento (*wind sea*), y olas que llegan a la región después de haberse propagado fuera de su área de generación (olas oceánicas o *swell*).

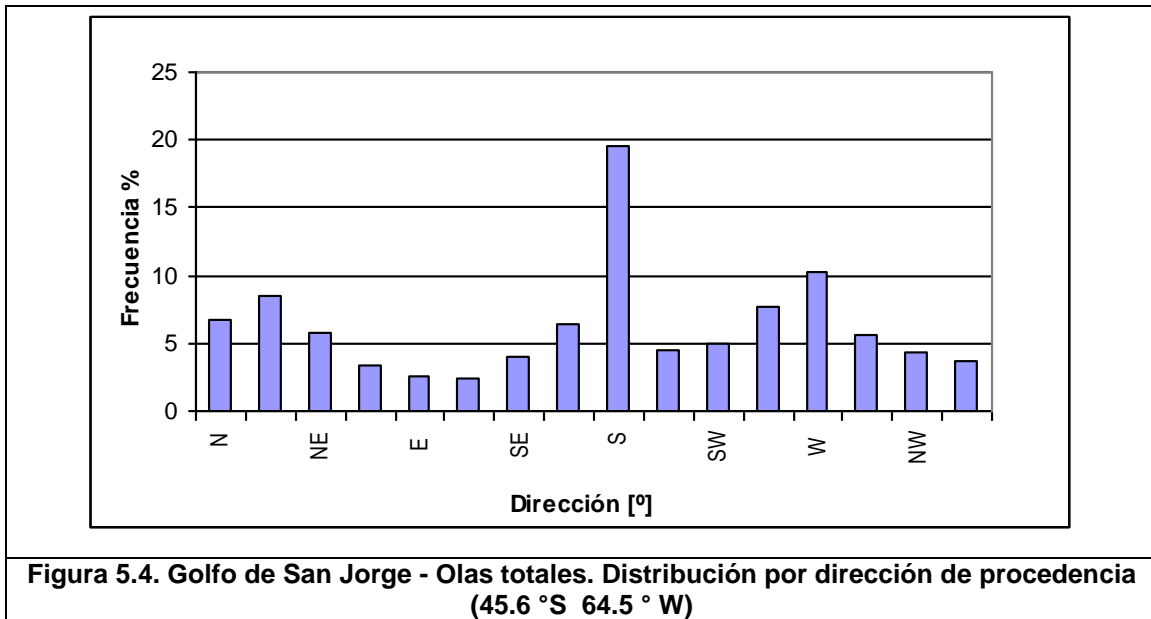
De la información analizada surge que en el área estudiada, el 90% de los datos se componen de la superposición de olas oceánicas y locales. El 6,3% de datos está constituido sólo por olas locales y el 3,7% sólo por olas oceánicas (*swell*).



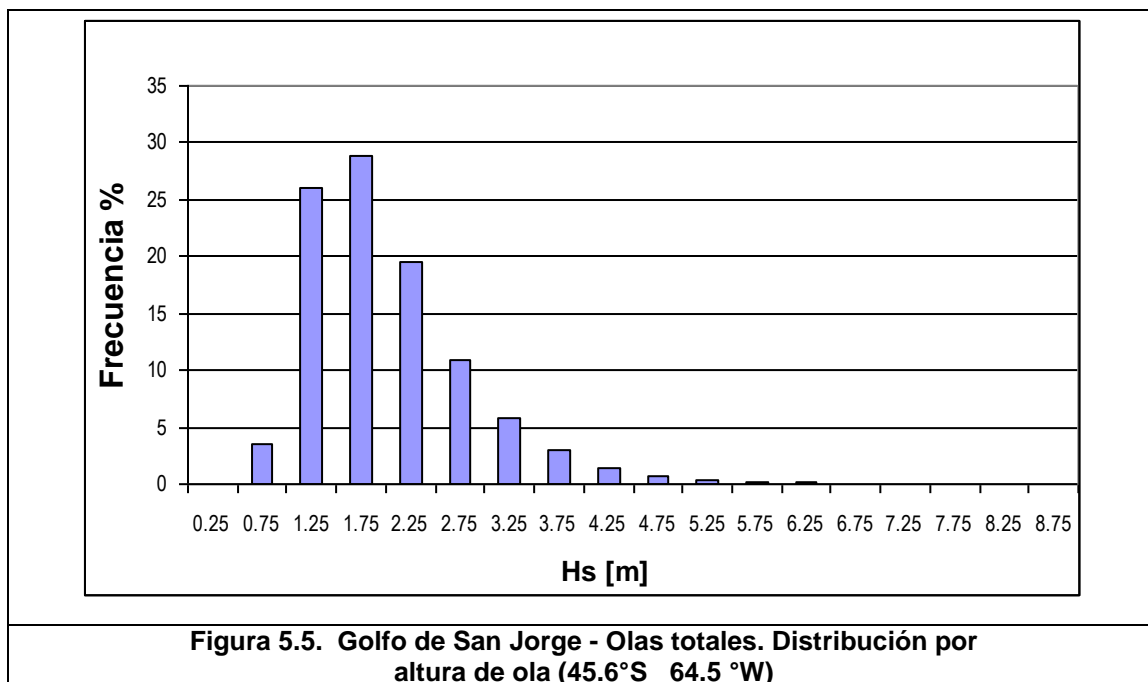
La altura promedio de todos los datos es 1,97 m. El valor máximo fue de 8,60 m. La **Figura 5.3.** muestra la distribución frecuencial acumulativa correspondiente, e indica que sólo el 10% de las olas superan los 3,10 m de altura significativa.

Si la totalidad de las olas determinadas en 10 años se clasifican en cuatro intervalos conteniendo cada uno el 25% del total de datos (cuartiles), puede decirse que el 75% de las olas son menores que 2,42 m, el 50% menor que 1,85 m y el 25 % menor que 1,44 m.

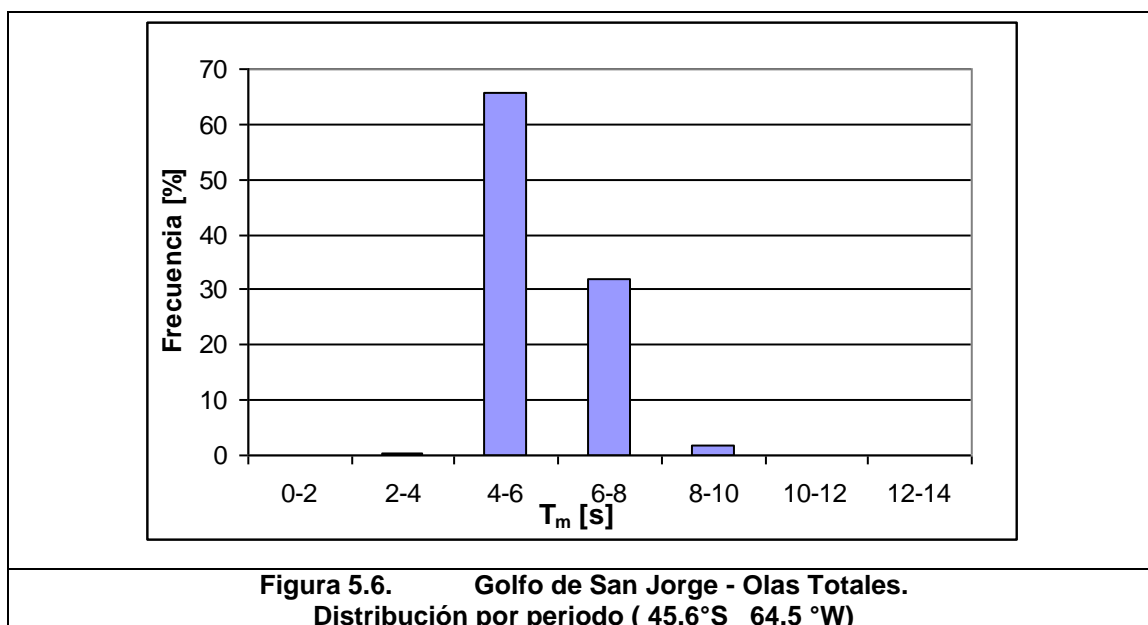
La **Figura 5.4.** muestra la distribución direccional de procedencia del oleaje (olas totales), destacándose el predominio de las olas del S. Las olas del sector W presentan en esta posición costa afuera una persistencia destacada, acorde con los vientos dominantes en la región.



La **Figura 5.5.** muestra la distribución de alturas de ola significativa (olas totales), clasificada en intervalos de clase de 0,50 m . Las olas más frecuentes corresponden al intervalo 1,5 - 2,0 m.



La **Figura 5.6.** muestra la distribución del período medio de las olas totales clasificados en intervalos de clase de 2 segundos.



En cuanto a la distribución combinada de altura y período de oleaje (olas totales), la **Tabla 5.2.** muestra que las olas de altura más frecuente (1,5 a 2,0 m) se vinculan a períodos

medios de 4 a 6 s, pero que las olas de temporal, con olas de 8 a 9 m se asocian a períodos medios de 10 a 12 s.

Tabla 5.2. Golfo de San Jorge - Olas totales. Distribución por altura y periodo

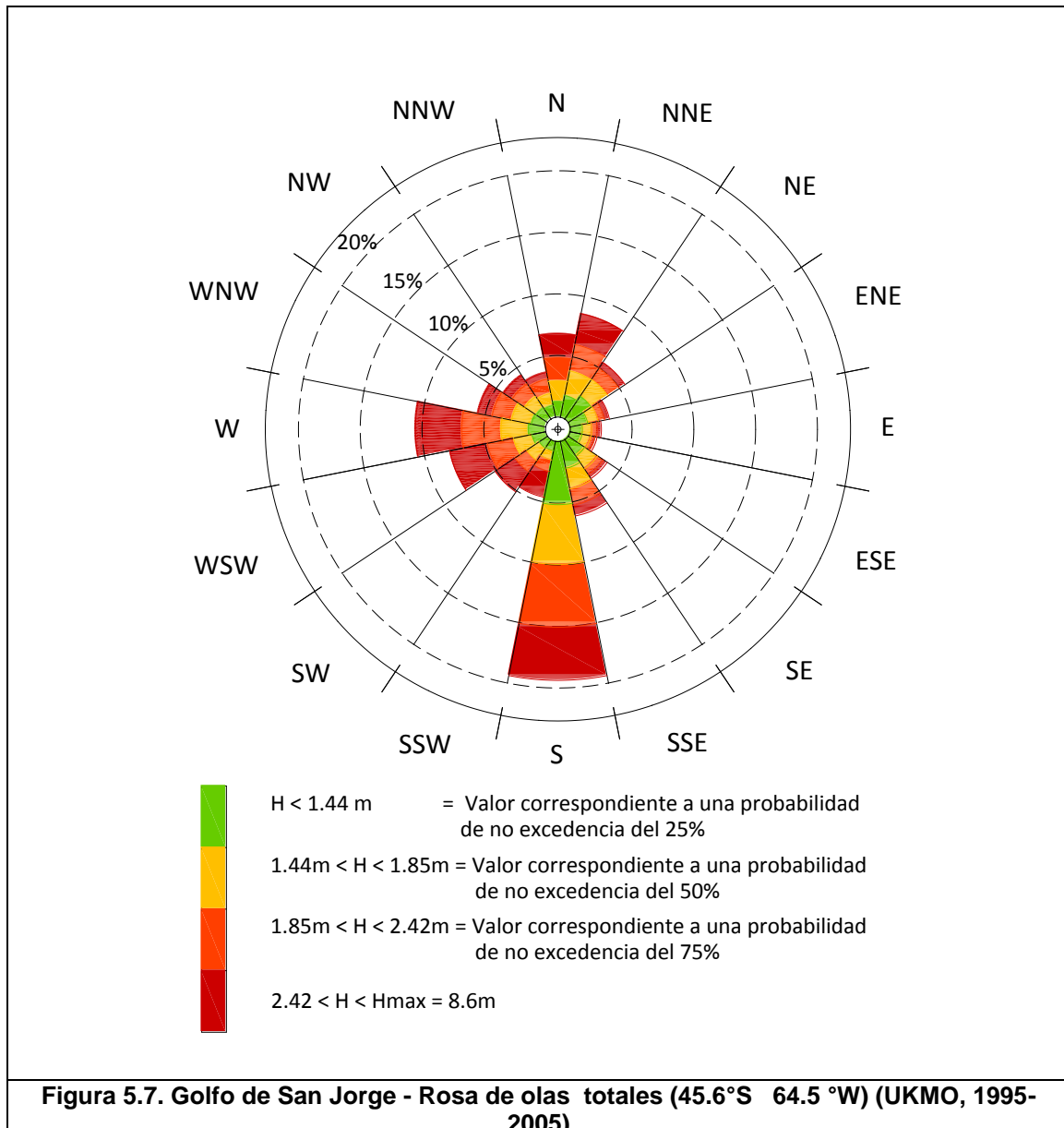
| Hs [m] | Tm [s] | | | | | | | Total [%] |
|------------------|--------|-----|------|------|------|------|-------|-----------|
| | 0-2 | 2-4 | 4-6 | 6-8 | 8-10 | 10-2 | 12-14 | |
| 0 - 0.5 | 0 | 1 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 0.5 - 1 | 0 | 29 | 437 | 41 | 9 | 0 | 0 | 3.4 |
| 1 - 1.5 | 0 | 45 | 3587 | 256 | 6 | 1 | 0 | 26.0 |
| 1.5 - 2 | 0 | 0 | 3715 | 595 | 13 | 0 | 0 | 28.8 |
| 2 - 2.5 | 0 | 0 | 1993 | 904 | 21 | 0 | 0 | 19.4 |
| 2.5 - 3 | 0 | 0 | 128 | 1493 | 19 | 0 | 0 | 10.9 |
| 3 - 3.5 | 0 | 0 | 0 | 856 | 21 | 0 | 0 | 5.8 |
| 3.5 - 4 | 0 | 0 | 0 | 434 | 10 | 0 | 0 | 3.0 |
| 4 - 4.5 | 0 | 0 | 0 | 191 | 8 | 0 | 0 | 1.3 |
| 4.5 - 5 | 0 | 0 | 0 | 33 | 60 | 0 | 0 | 0.6 |
| 5 - 5.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46 | 0 | 0 | 0.3 |
| 5.5 - 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | 0 | 0 | 0.1 |
| 6 - 6.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 0 | 0 | 0.1 |
| 6.5 - 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0.0 |
| 7 - 7.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0.0 |
| 7.5 - 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.0 |
| 8 - 8.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.0 |
| 8.5 - 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.0 |
| Total [%] | 0.0 | 0.5 | 65.7 | 32.0 | 1.7 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |

La **Tabla 5.3** presenta información direccional detallada, y permite establecer que las olas extremas en el período analizado proceden de la dirección S.

Tabla 5.3 Golfo de San Jorge - Distribución Direccional de Olas Totales

| Hs(m) | DIRECCION | | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL |
|--------------|-----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-------|
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | |
| 0,0 - 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 |
| 0,5 - 1,0 | 18 | 37 | 59 | 36 | 36 | 25 | 39 | 47 | 89 | 17 | 12 | 17 | 23 | 24 | 21 | 16 | 516 |
| 1,0 - 1,5 | 204 | 281 | 336 | 222 | 138 | 149 | 241 | 346 | 813 | 116 | 133 | 184 | 223 | 184 | 170 | 155 | 3895 |
| 1,5 - 2,0 | 291 | 352 | 260 | 140 | 123 | 115 | 198 | 303 | 849 | 135 | 215 | 268 | 395 | 295 | 202 | 182 | 4323 |
| 2,0 - 2,5 | 225 | 260 | 134 | 61 | 49 | 36 | 64 | 139 | 594 | 116 | 126 | 269 | 392 | 176 | 140 | 137 | 2918 |
| 2,5 - 3,0 | 141 | 158 | 44 | 28 | 29 | 16 | 33 | 64 | 266 | 81 | 110 | 189 | 249 | 105 | 76 | 51 | 1640 |
| 3,0 - 3,5 | 70 | 108 | 18 | 15 | 10 | 8 | 14 | 28 | 141 | 78 | 61 | 117 | 145 | 31 | 22 | 11 | 877 |
| 3,5 - 4,0 | 37 | 49 | 11 | 4 | 4 | 1 | 2 | 9 | 66 | 58 | 45 | 54 | 71 | 17 | 8 | 8 | 444 |
| 4,0 - 4,5 | 9 | 19 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 8 | 49 | 22 | 20 | 36 | 23 | 2 | 3 | 3 | 199 |
| 4,5 - 5,0 | 3 | 7 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 5 | 28 | 15 | 8 | 11 | 11 | 1 | 1 | 0 | 93 |
| 5,0 - 5,5 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 6 | 17 | 11 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 46 |
| 5,5 - 6,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 | 7 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 21 |
| 6,0 - 6,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 11 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 22 |
| 6,5 - 7,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 7,0 - 7,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 7,5 - 8,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 8,0 - 8,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 8,5 - 9,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| TOTAL | 999 | 1272 | 864 | 511 | 391 | 351 | 593 | 954 | 2925 | 671 | 745 | 1153 | 1535 | 836 | 645 | 563 | 15008 |

Finalmente la **Figura 5.7** muestra el gráfico polar correspondiente a las olas totales, constituyendo un resumen de la información presentada. Las alturas han sido clasificadas en cuatro intervalos de clase cada uno conteniendo el 25% de los datos (cuartiles) que se indican en la Figura. Las direcciones de procedencia del oleaje se han clasificado en 16 sectores de 22,5° cada uno.



5.3 Olas locales

Las olas locales son aquéllas generadas por vientos que soplan en la región considerada.

En las **Figuras 5.8 a 5.11** se presentan las tablas y gráficos que resumen el resultado del procesamiento de la información contenida en el registro de olas generadas por vientos locales.

Sólo el 10% de las olas generadas localmente por viento superan los 2,9 m (**Figura 5.8**). El 50% de las olas locales son inferiores a 1,4 m. Debe destacarse que el registro indica la presencia de eventos con alturas superiores a 8 m (dos casos en 10 años). Es decir que los temporales locales son los causantes de las condiciones más severas en el área.

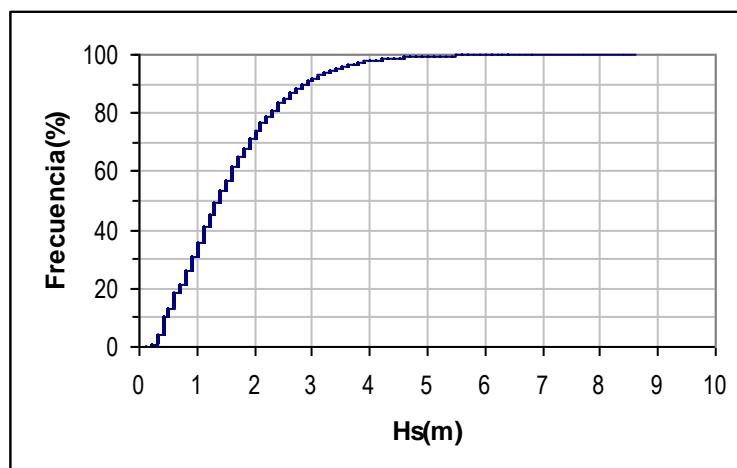
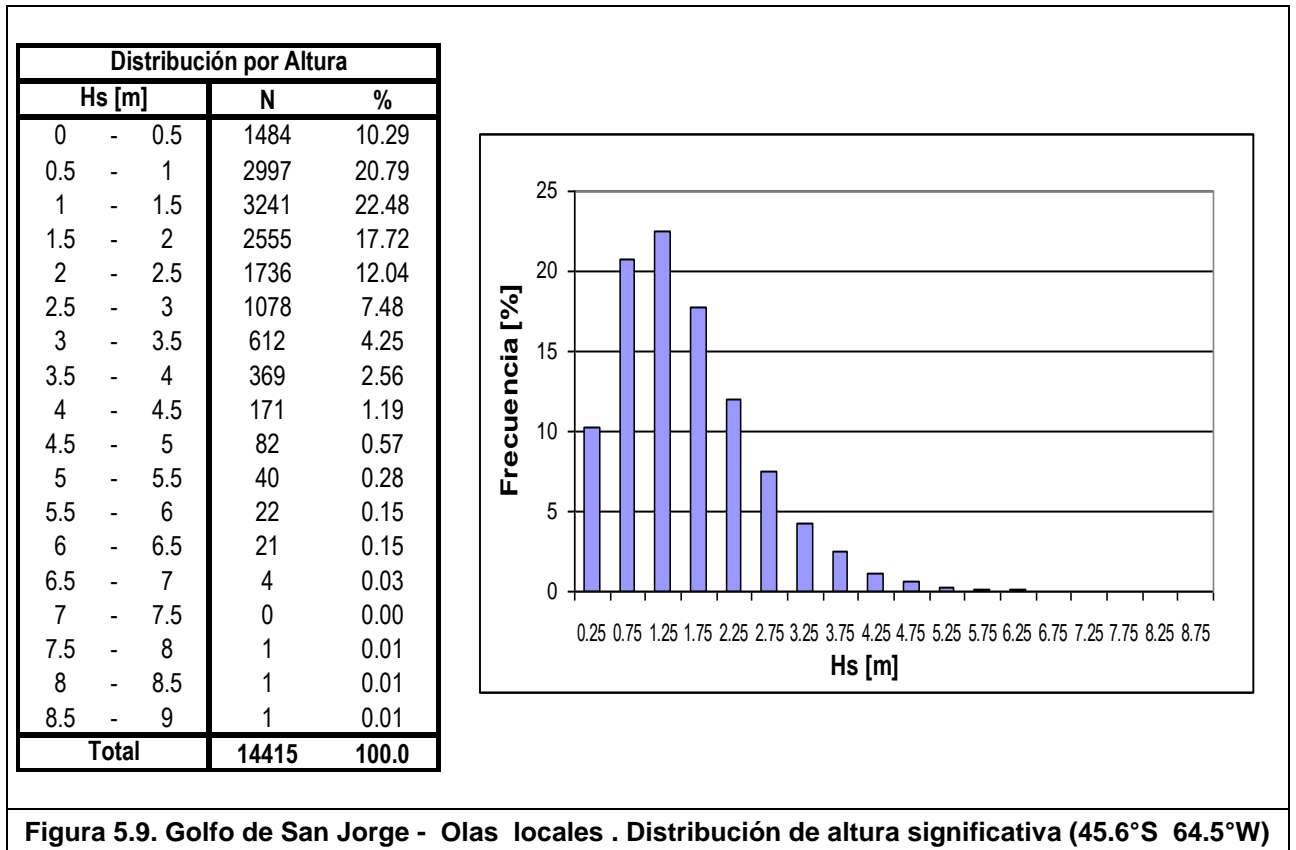
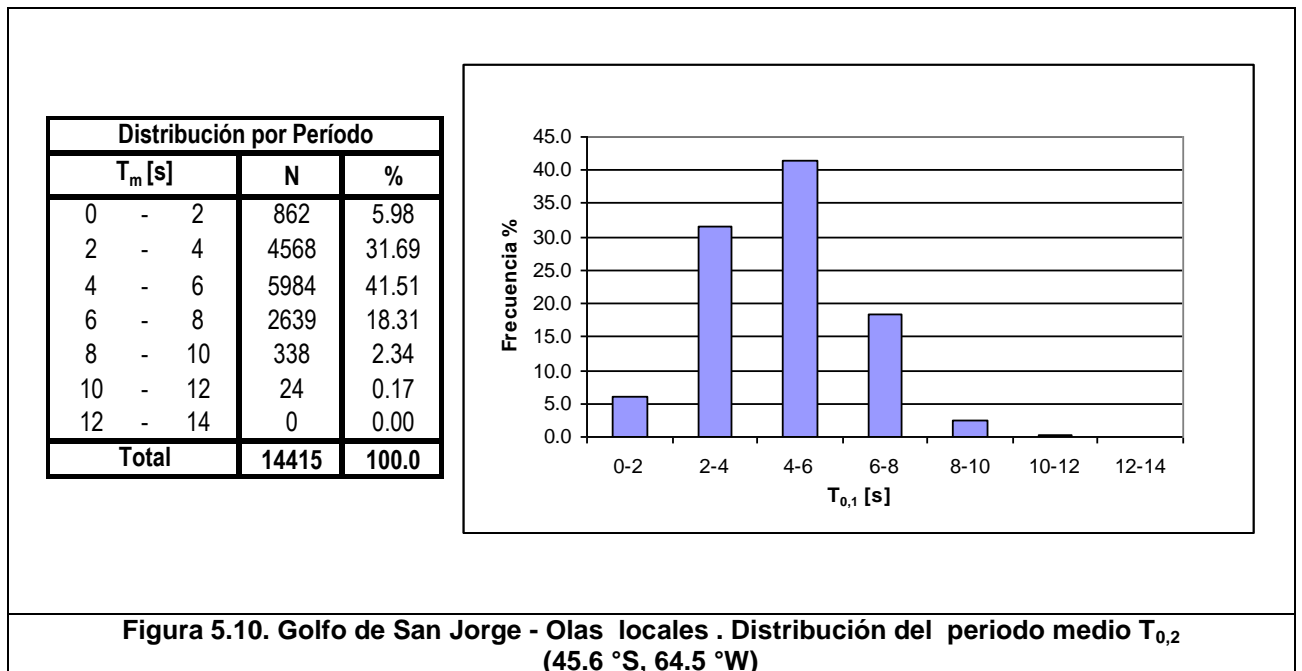


Figura 5.8. Golfo de San Jorge - Distribución acumulativa de altura de olas locales

En el análisis de la distribución de alturas significativas, los porcentajes se refieren al total de datos del tipo de oleaje analizado. Debe recordarse que del total de 15008 datos disponibles, el 96.3% contiene olas generadas por viento. La **Figura 5.9** señala que las olas generadas por vientos locales más frecuentes presentan valores de altura significativa H_s comprendidos entre 0,5 y 1,5 m (43%).

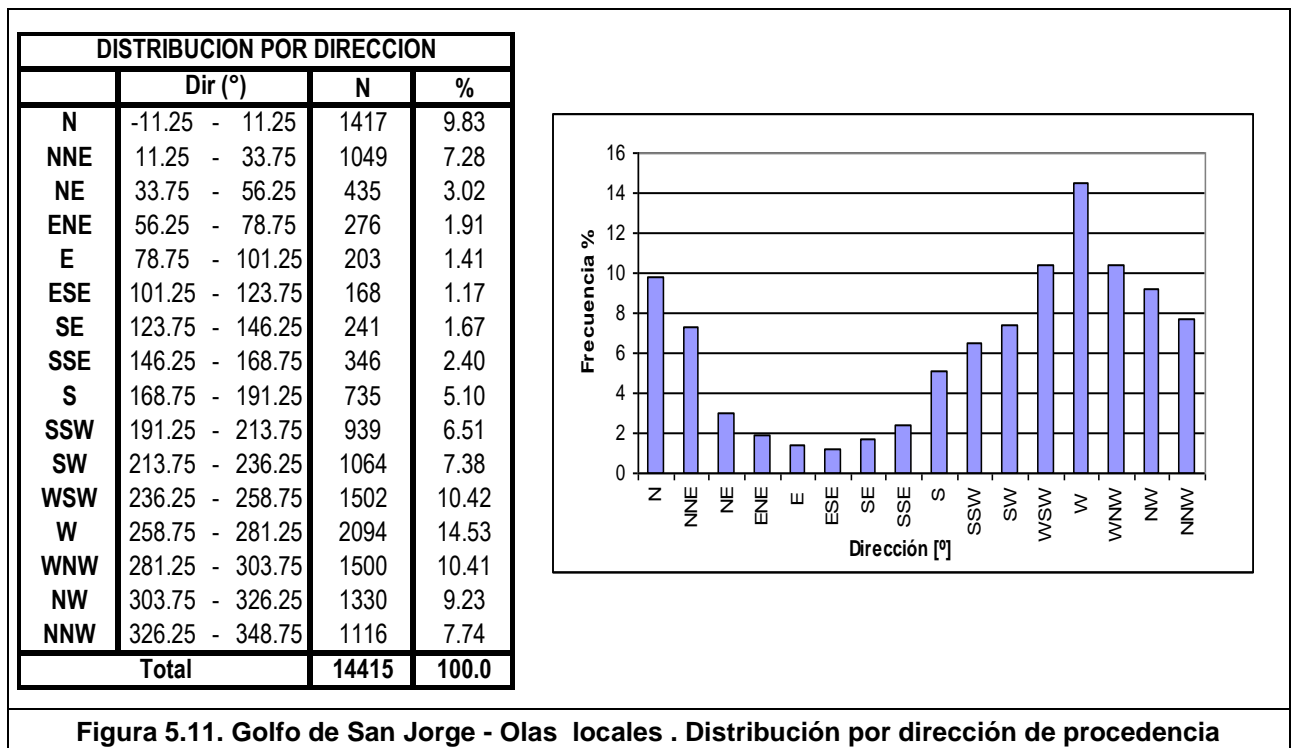


La **Figura 5.10** muestra la distribución de período medio en intervalos de clase de 2 segundos. Las olas más frecuentes presentan períodos medios de 4 a 6 s. (41.5 %).



Con respecto a la dirección de procedencia de las olas generadas localmente por el viento, la **Figura 5.11** muestra el predominio en aguas abiertas de olas de todo el cuadrante Oeste y en particular del sector W (14.5%). Esto resulta poco significativo para la ubicación del puerto de Comodoro Rivadavia, puesto que se trata de olas que proceden de la costa.

Con respecto a las olas que proceden desde las direcciones correspondientes a los sectores NE hasta S, los porcentajes oscilan entre el 1.17% (ESE) y el 5.10% (S); mientras que la suma total indica que, aproximadamente el 17% de olas generadas por vientos locales viaja hacia la costa.

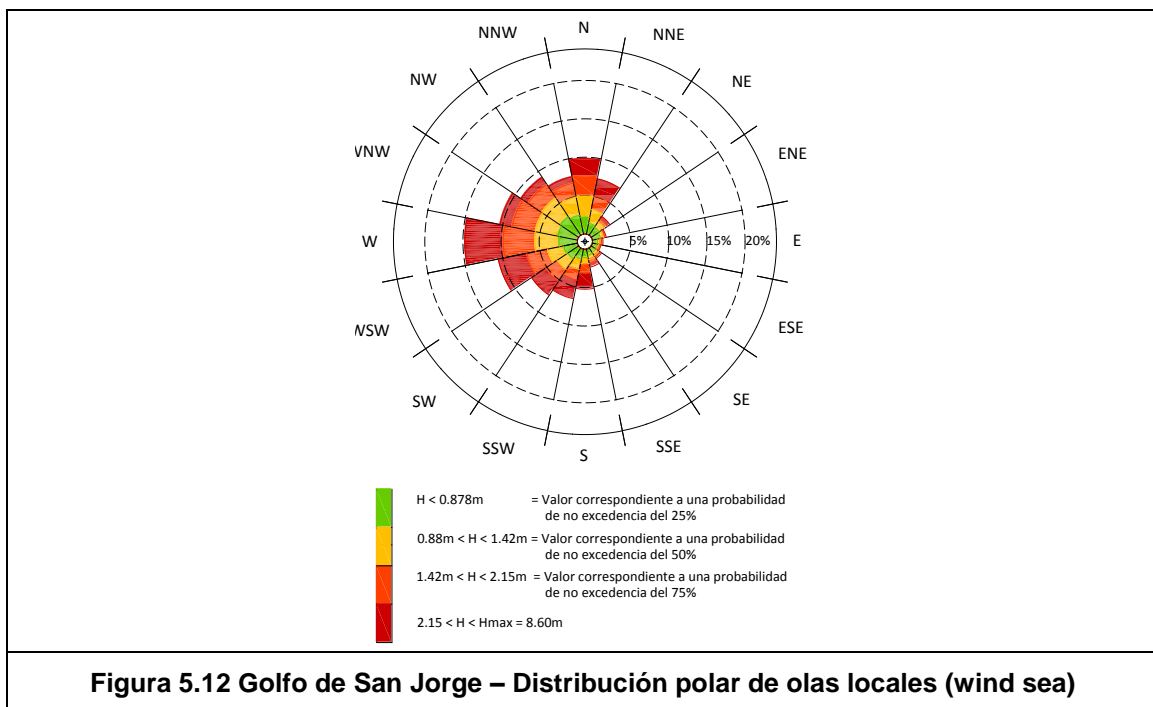


La **Tabla 5.4.** permite visualizar en detalle la distribución direccional del oleaje generado por viento en la posición costa afuera. Las olas más altas se presentaron de los sectores S y SSE. Las olas más frecuentes son del sector W.

Tabla 5.4. Golfo de San Jorge - Distribución Direccional de Olas Locales (wind sea)

| Hs [m] | DIRECCION | | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL |
|--------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | |
| 0 - 0,5 | 115 | 87 | 66 | 80 | 55 | 48 | 55 | 69 | 75 | 90 | 103 | 94 | 125 | 128 | 159 | 135 | 1484 |
| 0,5 - 1 | 301 | 178 | 153 | 99 | 49 | 41 | 62 | 67 | 108 | 152 | 199 | 248 | 321 | 344 | 365 | 310 | 2997 |
| 1 - 1,5 | 346 | 241 | 103 | 53 | 48 | 36 | 64 | 78 | 107 | 173 | 222 | 278 | 417 | 399 | 370 | 306 | 3241 |
| 1,5 - 2 | 263 | 172 | 52 | 21 | 25 | 25 | 29 | 58 | 119 | 142 | 190 | 265 | 414 | 342 | 238 | 200 | 2555 |
| 2 - 2,5 | 189 | 138 | 32 | 13 | 10 | 10 | 14 | 36 | 88 | 102 | 120 | 240 | 358 | 148 | 123 | 115 | 1736 |
| 2,5 - 3 | 114 | 92 | 16 | 5 | 8 | 6 | 9 | 15 | 71 | 88 | 86 | 166 | 232 | 92 | 48 | 30 | 1078 |
| 3 - 3,5 | 47 | 79 | 6 | 2 | 3 | 2 | 6 | 8 | 43 | 73 | 61 | 104 | 121 | 27 | 19 | 11 | 612 |
| 3,5 - 4 | 31 | 37 | 5 | 1 | 3 | 0 | 2 | 8 | 34 | 56 | 41 | 53 | 69 | 16 | 5 | 8 | 369 |
| 4 - 4,5 | 7 | 18 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 39 | 16 | 22 | 35 | 23 | 2 | 2 | 1 | 171 |
| 4,5 - 5 | 3 | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 23 | 15 | 9 | 11 | 11 | 1 | 0 | 0 | 82 |
| 5 - 5,5 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 17 | 7 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 40 |
| 5,5 - 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 | 8 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 22 |
| 6 - 6,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 21 |
| 6,5 - 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 7 - 7,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7,5 - 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 8 - 8,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 8,5 - 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| TOTAL | 1417 | 1049 | 435 | 276 | 203 | 168 | 241 | 346 | 735 | 939 | 1064 | 1502 | 2094 | 1500 | 1330 | 1116 | 14415 |

Finalmente la **Figura 5.12** es la representación polar de la distribución de olas generadas localmente por viento. Las alturas de ola se han clasificado en cuatro intervalos cada uno conteniendo el 25% del total de datos, y en 16 sectores direccionales de 22,5° cada uno.



Correlación H-T para olas de viento

En la etapa de desarrollo del oleaje cuando la energía del viento es transferida a las olas, el crecimiento ocurre tanto en altura como en el período de las olas.

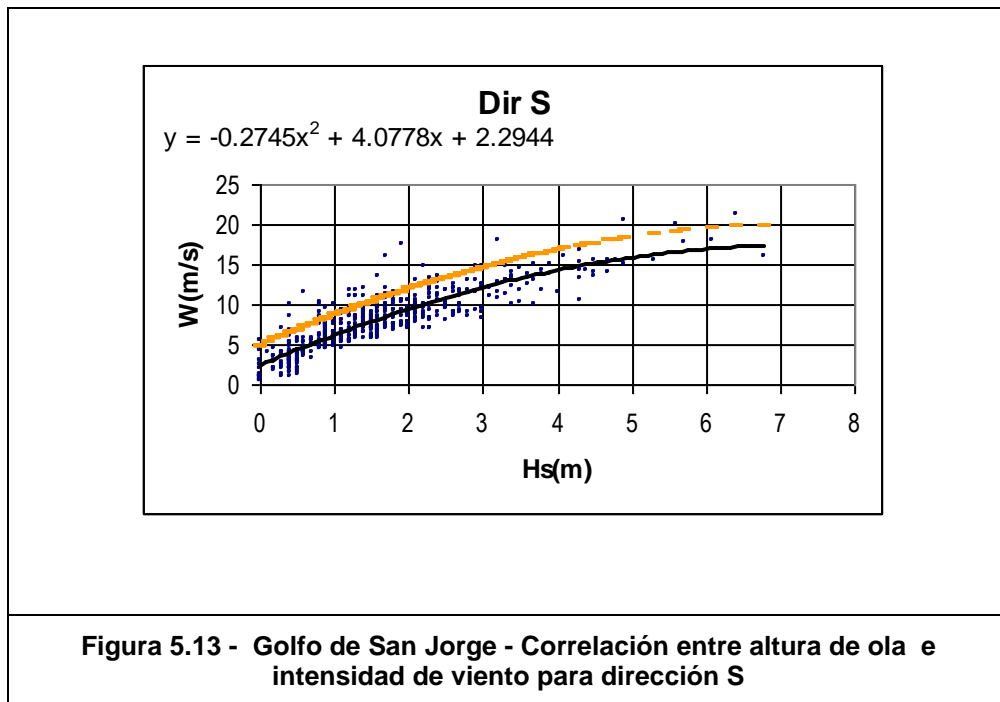
Tabla 5.4. Golfo de San Jorge - Correlación entre altura de ola y período medio. Olas generadas por vientos locales (45.6°S, 64.5°W)

| Hs [m] | Tm [s] | | | | | | | Total [%] |
|-----------|--------|------|------|------|------|-------|-------|-----------|
| | 0-2 | 2-4 | 4-6 | 6-8 | 8-10 | 10-12 | 12-14 | |
| 0 - 0.5 | 788 | 696 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.3 |
| 0.5 - 1 | 74 | 2865 | 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.8 |
| 1 - 1.5 | 0 | 908 | 2333 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.5 |
| 1.5 - 2 | 0 | 99 | 2456 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.7 |
| 2 - 2.5 | 0 | 0 | 1011 | 725 | 0 | 0 | 0 | 12.0 |
| 2.5 - 3 | 0 | 0 | 118 | 960 | 0 | 0 | 0 | 7.5 |
| 3 - 3.5 | 0 | 0 | 8 | 604 | 0 | 0 | 0 | 4.2 |
| 3.5 - 4 | 0 | 0 | 0 | 319 | 50 | 0 | 0 | 2.6 |
| 4 - 4.5 | 0 | 0 | 0 | 28 | 143 | 0 | 0 | 1.2 |
| 4.5 - 5 | 0 | 0 | 0 | 3 | 79 | 0 | 0 | 0.6 |
| 5 - 5.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 0 | 0 | 0.3 |
| 5.5 - 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | 1 | 0 | 0.2 |
| 6 - 6.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 17 | 0 | 0.1 |
| 6.5 - 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0.0 |
| 7 - 7.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 7.5 - 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.0 |
| 8 - 8.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.0 |
| 8.5 - 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.0 |
| Total [%] | 6.0 | 31.7 | 41.5 | 18.3 | 2.3 | 0.2 | 0.0 | 100.0 |

La **Tabla 5.4.** presenta el número de datos de altura de ola significativa Hs y período medio Tm para el período 1995-2005, clasificados en rangos de 0,50 m de altura y 2 segundos de período. Los totales por línea y columna se expresan en por ciento del total. El agrupamiento diagonal característico los datos observado en la **Tabla 5.4** corresponde a lo indicado.

Correlación H-W para las olas generadas por viento

Existe también una marcada correlación entre los valores de Hs y los valores de la intensidad del viento generador del oleaje. El conocimiento de esta correlación se hace necesario a los efectos de la simulación numérica de la propagación de estas olas hacia la costa. En la **Figura 5.13** se muestra la correlación resultante para la dirección Sur. Se estableció un ajuste de la forma $W = f(Hs) = a \cdot \exp(b \cdot Hs)$.

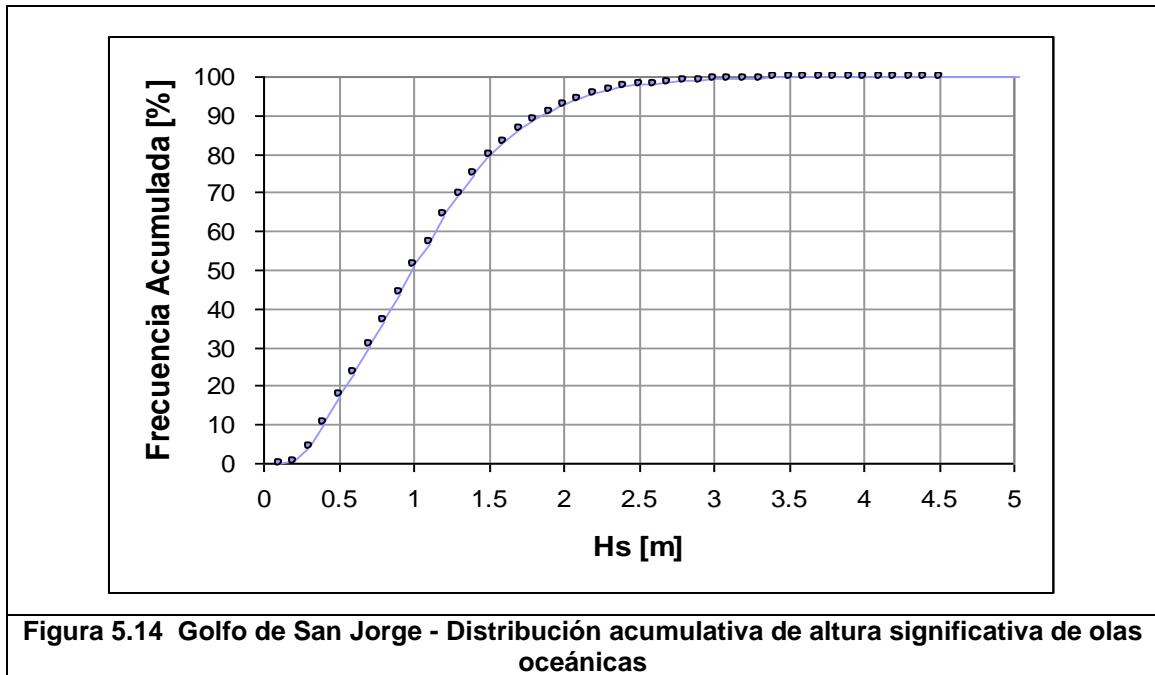


Se calcularon para cada par de valores W-Hs las diferencias entre el ajuste y el valor verdadero. Se calculó el desvío standard σ de las diferencias, y se definió una nueva curva de ajuste desplazada en $+1.5\sigma$, que es la que se adoptó como representativa de la correlación de los pares de valores. Este análisis se repitió para todas las direcciones de oleaje que potencialmente pueden alcanzar el área costera y permitió definir las condiciones de borde en la etapa de modelación matemática de las olas generadas por viento.

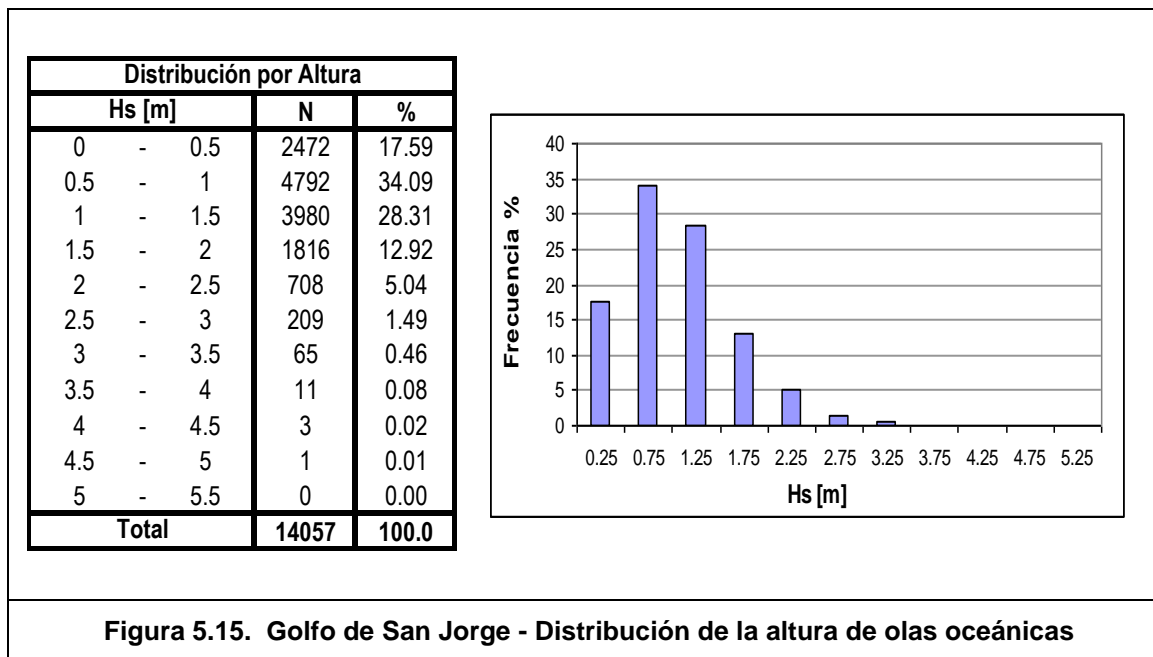
5.4 Olas oceánicas

El resultado del análisis de la distribución de frecuencias para la dirección de propagación, la altura significativa y el período medio del oleaje, correspondiente al conjunto de datos de olas oceánicas (*swell*) en el lapso comprendido entre el 1 de Enero de 1995 y el 31 de Julio de 2005 es presentado en las **Figuras 5.14 a 5.17**.

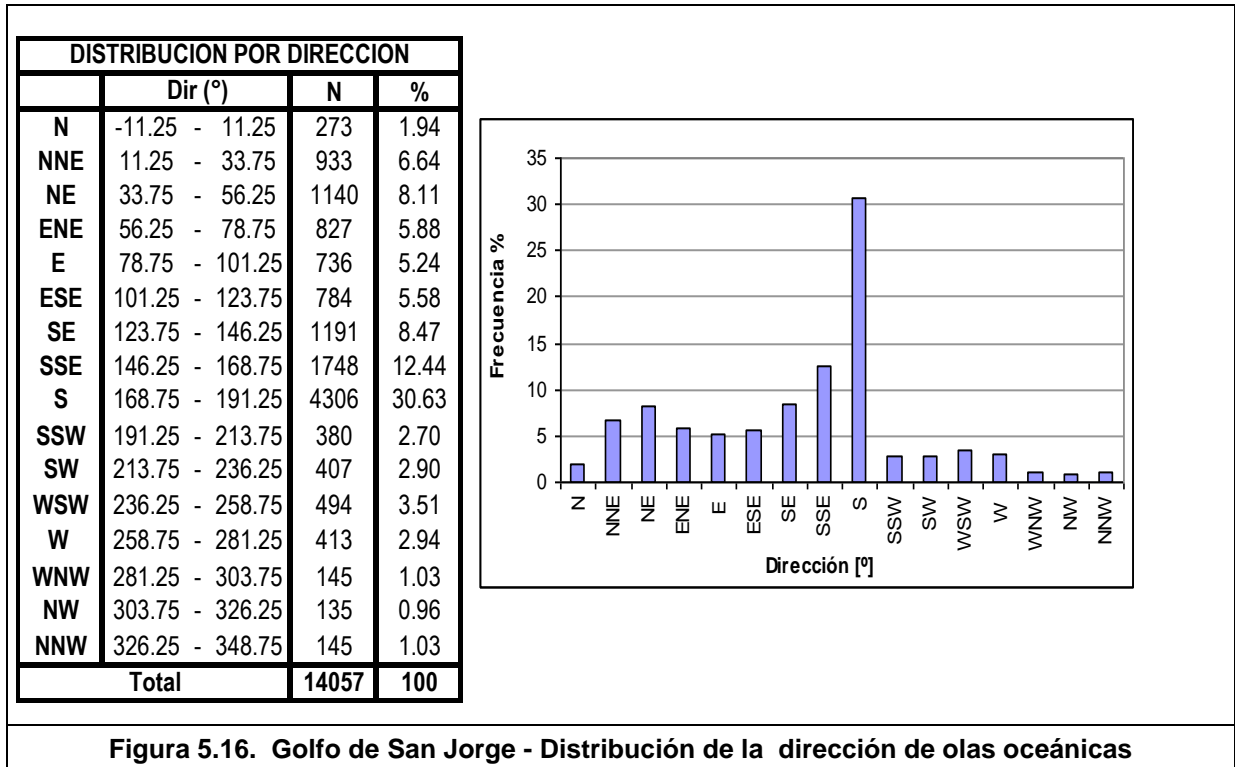
El valor máximo de altura significativa fue de 4,50 m en el período indicado. Sin embargo, sólo el 10% de las olas oceánicas superan 1,80 m. El 50% de las olas son menores que 0,90 m y el 25% menores que 0.50 m. La curva de frecuencia acumulativa se muestra en la **Figura 5.14**.



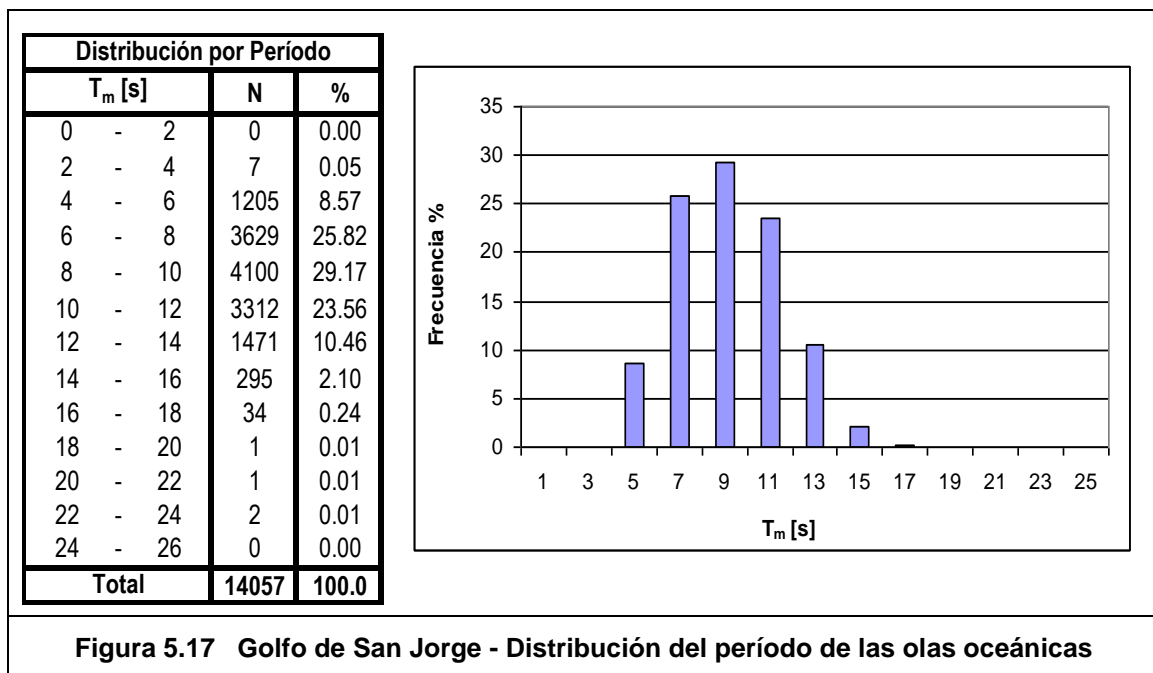
La distribución para la altura significativa (**Figura 5.15**) señala que los valores más frecuentes de Hs para las olas oceánicas se encuentran entre 0,5 y 1,5 m, representando aproximadamente el 62% del total de olas oceánicas. Estas a su vez componen el 94 % del total de datos.



La **Figura 5.16** indica la dirección de procedencia de las olas oceánicas destacándose el predominio de los sectores S y SSE. En la posición costa afuera analizada, el efecto continental limita la presencia de olas oceánicas desde los cuadrantes SW y NW.



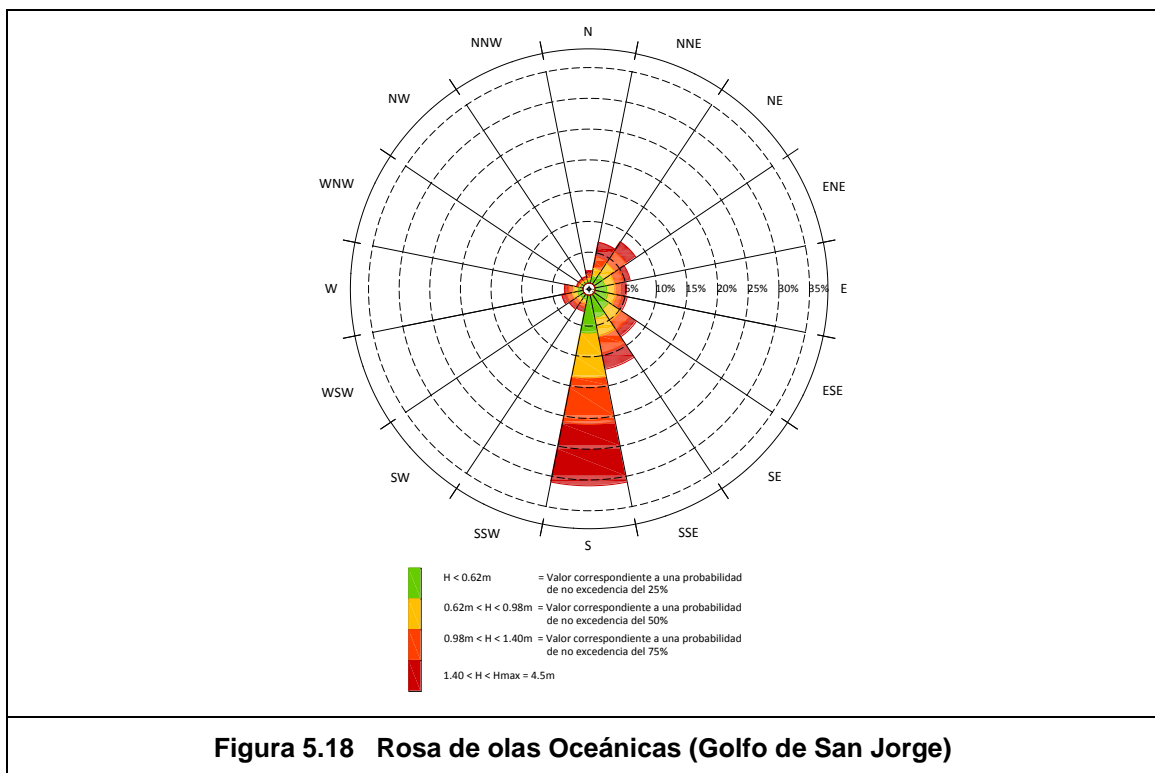
El período medio del oleaje oceánico (**Figura 5.17**) se concentra entre 8 y 10 s, llegando a observarse valores comprendidos entre los 22 y 24 s.



La **Tabla 5.5.** aporta información más detallada respecto de la estructura direccional de las olas oceánicas. Las olas más altas corresponden a los sectores SSE y S. Las más frecuentes se presentan desde el S.

| Hs (m) | DIRECCION | | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL |
|--------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | |
| 0.00 - 0.50 | 29 | 103 | 162 | 168 | 196 | 232 | 280 | 374 | 554 | 85 | 79 | 86 | 59 | 30 | 21 | 14 | 2472 |
| 0.50 - 1.00 | 69 | 243 | 405 | 297 | 295 | 299 | 490 | 629 | 1361 | 110 | 119 | 168 | 155 | 57 | 51 | 44 | 4792 |
| 1.00 - 1.50 | 104 | 318 | 379 | 241 | 158 | 173 | 287 | 442 | 1216 | 114 | 133 | 158 | 141 | 36 | 33 | 47 | 3980 |
| 1.50 - 2.00 | 45 | 178 | 141 | 73 | 60 | 54 | 89 | 194 | 691 | 53 | 56 | 72 | 51 | 16 | 15 | 28 | 1816 |
| 2.00 - 2.50 | 22 | 66 | 40 | 25 | 22 | 22 | 36 | 78 | 331 | 10 | 14 | 9 | 5 | 6 | 10 | 12 | 708 |
| 2.50 - 3.00 | 4 | 19 | 11 | 19 | 4 | 4 | 7 | 21 | 103 | 8 | 4 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 209 |
| 3.00 - 3.50 | 0 | 4 | 2 | 3 | 1 | 0 | 2 | 7 | 43 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 65 |
| 3.50 - 4.00 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 11 |
| 4.00 - 4.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 4.50 - 5.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 5.00 - 5.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5.50 - 6.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6.00 - 6.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6.50 - 7.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7.00 - 7.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7.50 - 8.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8.00 - 8.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8.50 - 9.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 273 | 933 | 1140 | 827 | 736 | 784 | 1191 | 1748 | 4306 | 380 | 407 | 494 | 413 | 145 | 135 | 145 | 14057 |

Finalmente la **Figura 5.18.** muestra la distribución direccional de olas oceánicas, clasificadas



en dieciséis sectores y en cuatro intervalos de altura cada uno conteniendo el 25% del total de datos. El sector S además de ser el más frecuente, contiene la proporción más alta de olas en el cuartil superior (olas entre 1,40 m y 4,50 m).

Correlación H-T para Olas Oceánicas

La **Tabla 5.5** muestra los datos de altura significativa H_s de olas oceánicas y su período medio T_m . El patrón de distribución observado es claramente diferente del correspondiente a las olas generadas por vientos locales (**Tabla 5.4**), para las que se presenta una distribución diagonal de los datos dentro de la tabla. El caso de las olas oceánicas existe una distribución amplia de valores de T_m para cada los rangos inferiores de H_s , que se estrecha a medida que aumenta el valor de H_s , hasta observar que las olas de mayor amplitud (hasta 5 m) tienden a concentrarse en el rango de período medio de 10 a 12 segundos.

Para las olas más frecuentes, de mediana y baja amplitud, no hay para el período T_m una clara dependencia de H_s . Por ejemplo, para las olas de entre 1.5 y 2 m de altura existe un número total de 1816 casos (12.9% del total de olas oceánicas) con períodos medios que varían entre los 4 y los 18 s.

Tabla 5.5 Golfo de San Jorge - Correlación entre altura y periodo medio de olas oceánicas

| Hs [m] | Tm [s] | | | | | | | | | | | | Total [%] | |
|-----------|--------|-----|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| | 0-2 | 2-4 | 4-6 | 6-8 | 8-10 | 10-12 | 12-14 | 14-16 | 16-18 | 18-20 | 20-22 | 22-24 | | 24-26 |
| 0 - 0.5 | 0 | 1 | 10 | 77 | 500 | 1018 | 686 | 158 | 20 | 1 | 1 | 0 | 0 | 17.6 |
| 0.5 - 1 | 0 | 6 | 355 | 817 | 1599 | 1393 | 511 | 98 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34.1 |
| 1 - 1.5 | 0 | 0 | 706 | 1471 | 1093 | 510 | 173 | 25 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 28.3 |
| 1.5 - 2 | 0 | 0 | 132 | 903 | 491 | 231 | 49 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.9 |
| 2 - 2.5 | 0 | 0 | 2 | 297 | 275 | 96 | 34 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.0 |
| 2.5 - 3 | 0 | 0 | 0 | 54 | 99 | 44 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.5 |
| 3 - 3.5 | 0 | 0 | 0 | 10 | 38 | 12 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |
| 3.5 - 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 6 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 |
| 4 - 4.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 4.5 - 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| 5 - 5.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| Total [%] | 0 | 0.0 | 8.6 | 25.8 | 29.2 | 23.6 | 10.5 | 2.1 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100 |

5.5 Régimen estacional costa afuera

La caracterización del régimen estacional del oleaje puede ser de utilidad en la planificación de diversas actividades relativas a operaciones marinas o vinculadas al puerto.

Para la posición costa afuera se analizaron las variaciones estacionales de la altura de las olas oceánicas y las locales. Se consideraron cuatro períodos comprendidos entre 21 de diciembre y 21 de marzo (verano), 21 de marzo a 21 de junio (otoño), 21 de junio a 21 de septiembre (invierno) y 21 de septiembre a 21 de diciembre (primavera).

Para evaluar la variación estacional se graficaron (**Figuras 5.19 y 5.20**) las alturas promedio de cada estación en los 10 años de extensión de la serie, la altura máxima estacional absoluta en los 10 años, y la altura promedio de los máximos estacionales en los 10 años.

Los gráficos muestran que hay más variación estacional en las olas locales que en las oceánicas. La altura media de olas locales es 30% mayor en invierno que en primavera, estaciones en las que los valores son 1,30 m y 1,70 m respectivamente. La estación más tranquila es la primavera. El otoño y el invierno las más activas. Las olas máximas estacionales (promedio de los 10 años) son 20% mayores en otoño/invierno que en primavera. Los máximos estacionales absolutos se presentaron en otoño. La primavera presentó los menores máximos. La variación estacional de H_{max} fue de 35 %, aunque esta variable se refiere a valores individuales y no tiene un carácter estadístico.

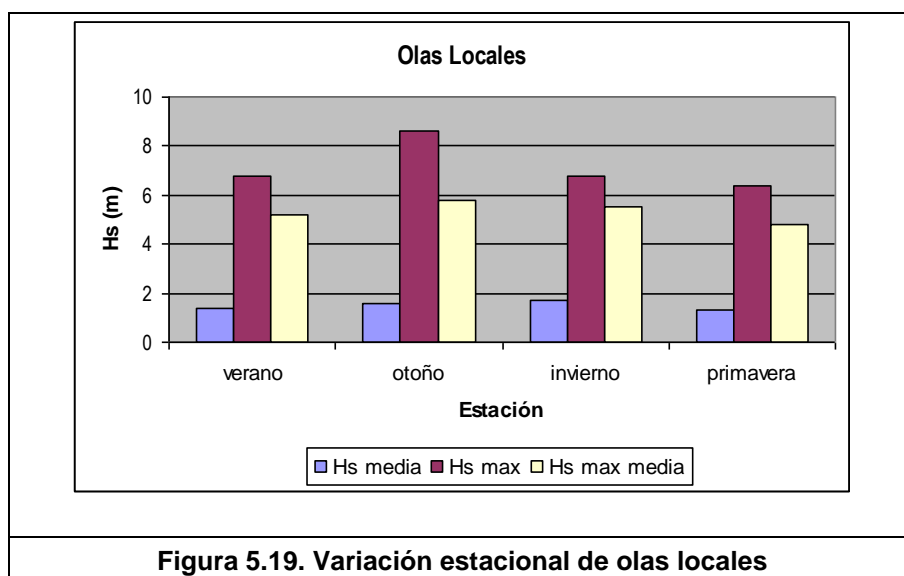
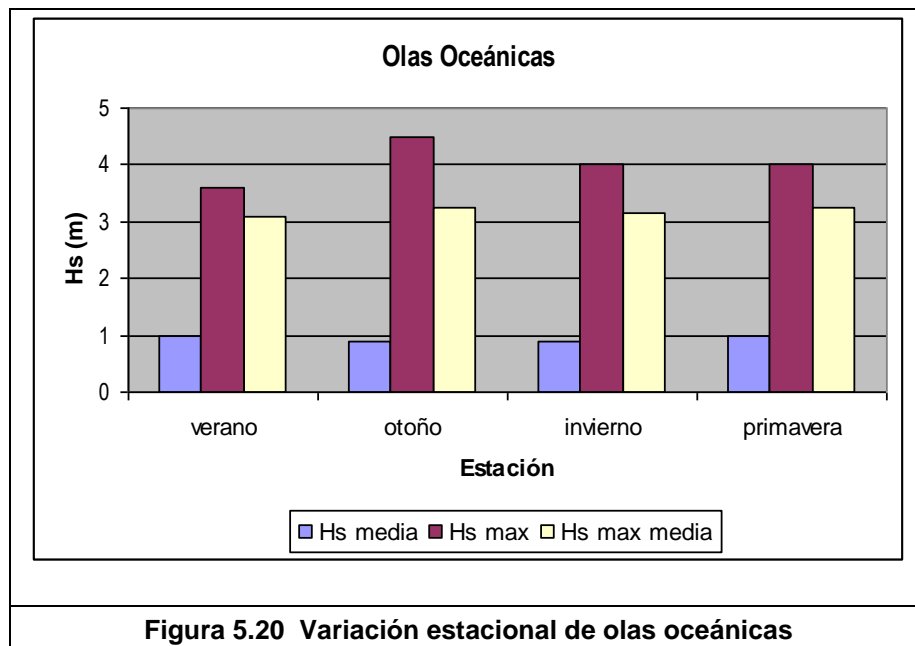


Figura 5.19. Variación estacional de olas locales

Las olas oceánicas medias presentan poca variabilidad a lo largo del año. La altura promedio es en el entorno de 1 m independientemente de la estación del año. Lo mismo ocurre con los valores promedio en 10 años de las máximas estacionales. Los mínimos de los máximos (tanto promedio de 10 años como absolutos) se presentan en verano. El máximo absoluto ocurrió en otoño y fue 25% mayor que el mínimo de los máximos absolutos estacionales, ocurrido en verano.

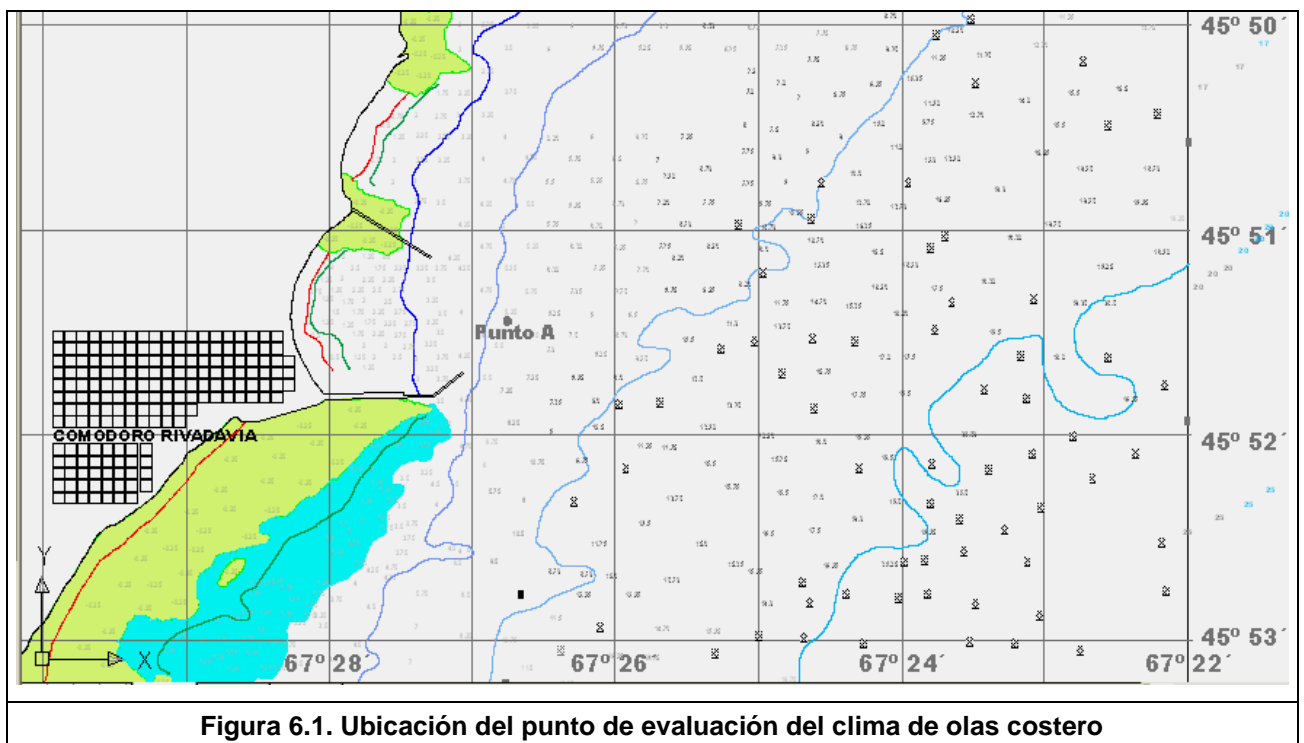


6 EVALUACION DE OLAS EN EL AREA COSTERA

El estudio de las características del oleaje en el área del Puerto de Comodoro Rivadavia requirió la aplicación de un modelo matemático a los efectos de modelar la propagación de las olas desde el punto en el que se dispuso de la información de base generada por el Modelo Global de Olas, ubicado en aguas intermedias, a unos 230 Km al ENE del área de interés.

Para el desarrollo de esta evaluación se aplicó el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore, L.H. Holthuijsen, N. Booij y otros) desarrollado en Delft University of Technology, versión 40.51. Una descripción del mismo se incorpora en el **Anexo II**.

El modelo fue aplicado para caracterizar el clima de olas en las proximidades de la entrada al puerto, en una posición de coordenadas X=3.387.550 (Este), Y=4.920.991 (Norte) que se indica como A en la **Figura 6.1**. La profundidad local en esta posición es de aproximadamente 12,8 m, referido al 0 MOP.



6.1 Implementación del modelo

La implementación del modelo requirió la construcción de tres mallas de cálculo anidadas de diferentes dimensiones, las cuales, acopladas convenientemente, permitieron propagar las olas desde el punto de pronóstico (45.6 °S, 64.5°W) hasta la zona costera del puerto de Comodoro Rivadavia, obteniendo los resultados de la modelación sobre una región de cálculo con una descripción batimétrica detallada.

Las grillas conforman un sistema cartesiano, coincidiendo el eje de abcisas con la dirección E-W y el de ordenadas con la dirección N-S.

La **Figuras 6.2** muestra la ubicación relativa y el tamaño de las tres grillas utilizadas para la implementación del modelo. A continuación se presenta información adicional correspondiente a cada una de ellas:

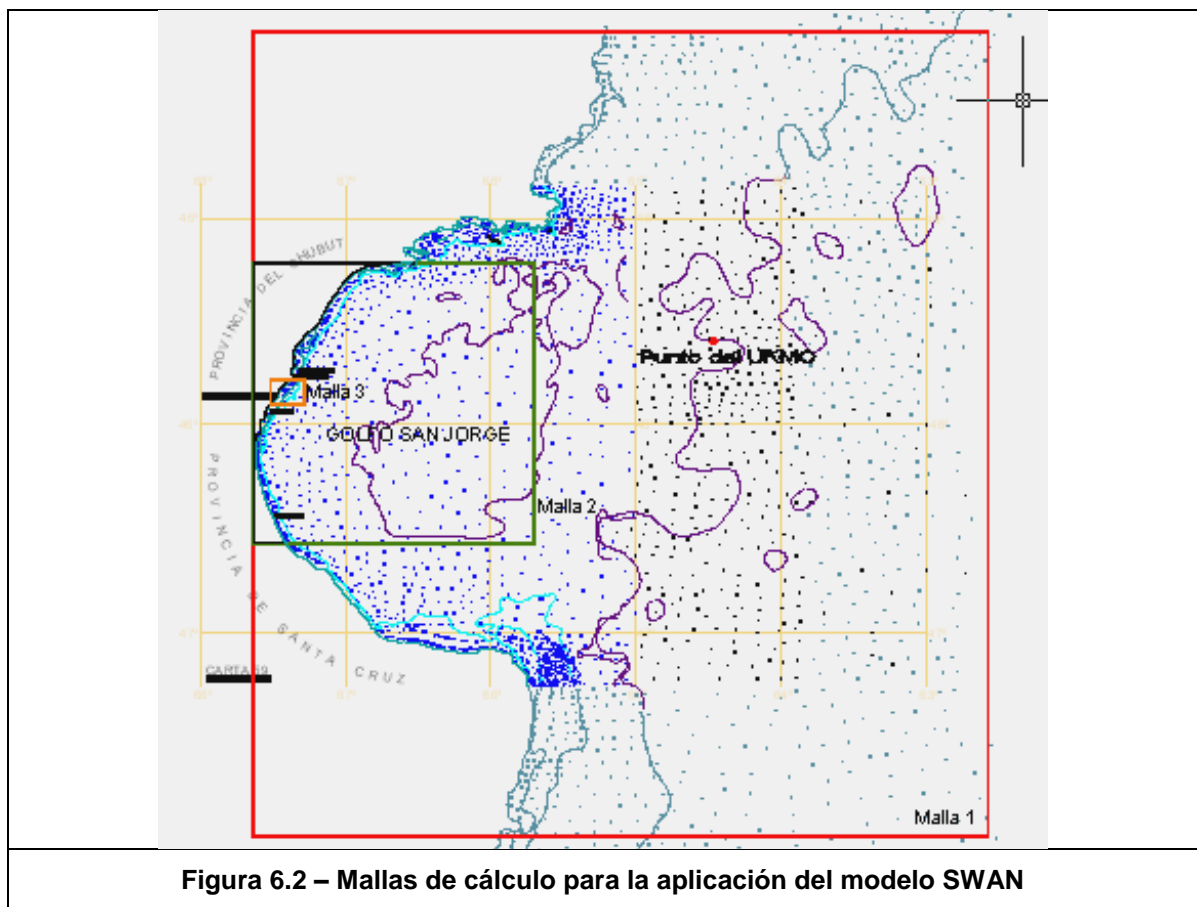


Figura 6.2 – Mallas de cálculo para la aplicación del modelo SWAN

- La Malla 1 Abarca una extensa región de la costa 392 Km x 430 del Golfo de San Jorge y Mar Argentino cuya área se encuentra cubierta por un total de 391x429 nodos, con un espaciamiento de $\Delta x = \Delta y = 1000$ m.
- La Malla 2 abarca una región ubicada dentro de la Malla 1 pero con un mayor detalle. Representa un área 149,5 Km x 149,5 Km, cubierta por un total de 300x300 nodos espaciados de manera equidistante con $\Delta x = \Delta y = 500$ m.
- La Malla 3 abarca una región incorporada dentro de Malla 2 pero con un mayor detalle. Representa un área de 17295 m x 12950 m cubierta por un total de 360x260 nodos espaciados de manera equidistante con $\Delta x = \Delta y = 50$ m.

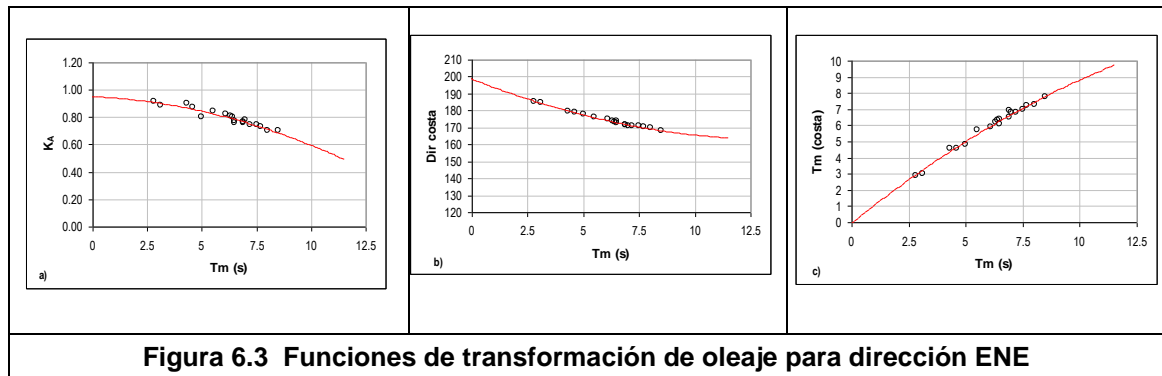
El acoplamiento de las grillas permite escribir el resultado de las simulaciones realizadas para la Malla 1 sobre el contorno de la Malla 2, sirviendo como dato de entrada para la segunda simulación. El proceso se repite entre las mallas 2 y 3, permitiendo obtener el resultado de la modelación sobre la zona de mayor detalle.

El resultado de la modelación permite obtener información sobre la altura, período, dirección y demás variables del oleaje, en forma directa, para cualquier nodo de la grilla de cálculo; o mediante un proceso de interpolación, para cualquier otra posición que se desee especificar dentro del área modelada.

6.2 Aplicación

Se realizaron alrededor de 350 corridas en cada una de las tres mallas anidadas, para distintas direcciones de incidencia, periodos y alturas de ola. A partir de los resultados se establecieron relaciones funcionales entre las variables homólogas en dos posiciones: la ubicación costa afuera y la posición costera. Como ejemplo se muestra en la **Figura 6.3** los resultados correspondientes a la altura de ola (6.3.a), el período medio (6.3.b) y la dirección de propagación (6.3.c) para la dirección ENE.

Esto se realizó separadamente para olas oceánicas y olas locales. El conjunto de escenarios estuvo constituido por una serie de direcciones de oleaje capaces de alcanzar el área costera, y períodos y alturas de ola en rangos escalonados y tales que abarcaron la totalidad de las situaciones observadas en la posición costa afuera.



Estas funciones de transformación fueron aplicadas a continuación a la totalidad de los datos que conforman la serie correspondientes al periodo 1995-2005 en la posición costa afuera obteniéndose como resultado de ello una nueva serie cronológica de las variables características (Hs, Tm, Dir) en la posición costera. El análisis de esta serie permitió caracterizar el clima de olas en la posición A a la entrada al puerto de Comodoro Rivadavia indicada en la **Figura 6.1**.

6.3 Resultados

6.3.1 Olas locales (wind sea)

La **Figura 6.4** muestra la distribución acumulativa de altura de olas locales (wind sea) en el puerto de Comodoro Rivadavia (Punto A de la **Figura 6.1**), de acuerdo a los resultados de la transformación efectuada mediante simulación numérica de los datos suministrados en la posición 45.6°S, 64.5°W, que abarcan el período 1/1/95 al 31/07/2005.

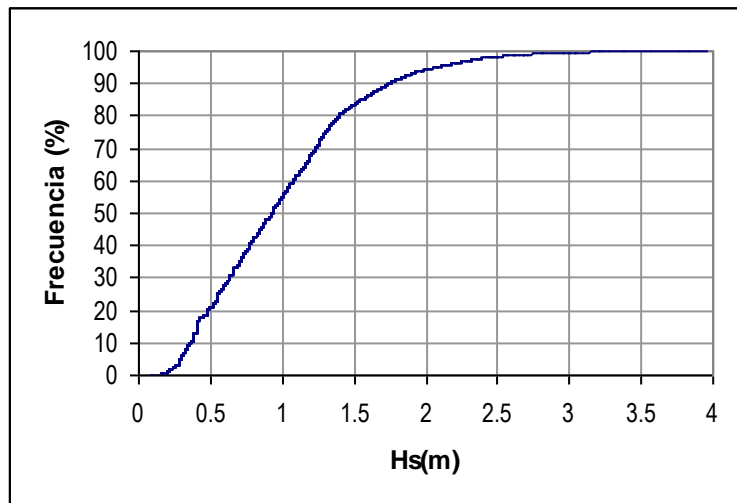


Figura 6.4 Frecuencia acumulativa de altura de olas locales en Puerto de Comodoro Rivadavia (d = 12,8 m)

El máximo valor resultó $H_s = 3.96$ m. El 90 % de las olas es menor que 1,75 m. En términos de cuartiles, el 25% de las olas resultan inferiores a 0,55 m, el 50% inferior a 0,92 m y el 75% inferior a 1,30 m.

La **Figura 6.5** muestra la distribución polar de frecuencia de altura de olas en la entrada al puerto de Comodoro Rivadavia. La altura de olas se ha clasificado según los cuartiles definidos previamente.

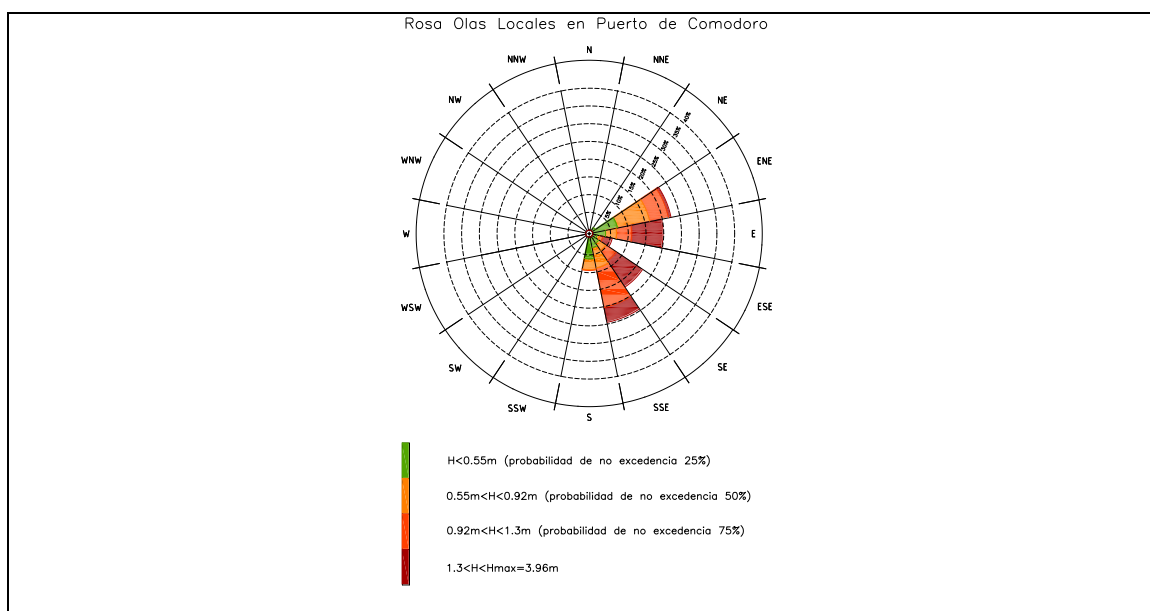


Figura 6. 5. Rosa de olas locales en Comodoro Rivadavia

Puede notarse que las olas de viento más frecuentes proceden del sector SSE y también del ENE, resultando el área portuaria más expuesta a esta última dirección. Las olas más intensas (aunque menos frecuentes) de la dirección E, ESE y SE, hallándose el área portuaria más expuesta a la primera de ellas.

La **Tabla 6.1** amplía la información gráfica presentada y permite establecer que aunque en el área costera las olas más frecuentes proceden del sector SSE, las más altas llegan desde los sectores SE y ESE.

| Hs(m) | DIRECCION | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL | |
|--------------|-----------|----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | | NNW |
| 0 - 0,5 | 0 | 0 | 50 | 282 | 132 | 54 | 76 | 108 | 216 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 918 |
| 0,5 - 1 | 0 | 0 | 0 | 492 | 224 | 44 | 157 | 390 | 194 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1501 |
| 1 - 1,5 | 0 | 0 | 0 | 201 | 262 | 58 | 197 | 530 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1251 |
| 1,5 - 2 | 0 | 0 | 0 | 12 | 215 | 39 | 155 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 471 |
| 2 - 2,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 32 | 107 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 177 |
| 2,5 - 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 13 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 54 |
| 3 - 3,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| 3,5 - 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 4 - 4,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4,5 - 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 0 | 0 | 50 | 987 | 873 | 245 | 744 | 1080 | 413 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4392 |

La **Tabla 6.1.** indica que al área costera próxima al puerto han llegado 4392 eventos del total de 15008 que compone la serie analizada, lo que implica que las olas generadas localmente tienen una persistencia de aproximadamente 30% del tiempo en el área costera.

6.3.2 Olas oceánicas (swell)

En el caso de las olas oceánicas, la distribución acumulativa de altura significativa en el área portuaria se muestra en la **Figura 6.6.**

La máxima altura calculada para el período 1995-2005 resultó $H_s = 2.52$ m. El 90% de las olas son no obstante menores que 0.84m, y el 50% menores que 0.56 m.

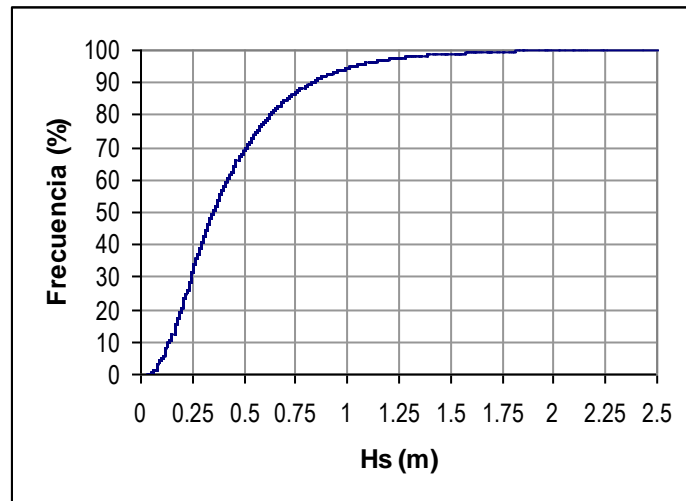


Figura 6.6 Distribución acumulativa de altura de olas oceánicas en la entrada al puerto de Comodoro Rivadavia

La distribución direccional en 16 sectores y 4 rangos de altura (cuartiles) se indica en la **Figura 6.7**. Las olas más frecuentes que en aguas abiertas proceden del sector S, se refractan y cambian de dirección por efecto del fondo al aproximarse al área costera, a donde llegan principalmente desde el SE y ESE.

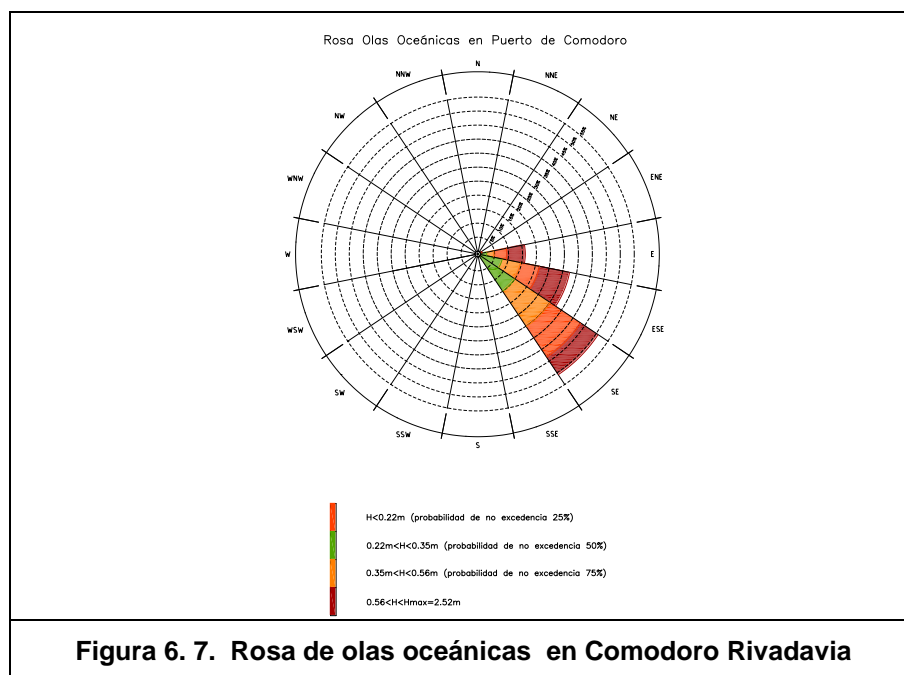


Figura 6.7. Rosa de olas oceánicas en Comodoro Rivadavia

La **Tabla 6.2.** aporta información más detallada de las características de las olea oceánicas en el área costera.

| Hs(m) | DIRECCION | | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL |
|--------------|-----------|----------|----------|-----------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | |
| 0 - 0,5 | 0 | 0 | 0 | 42 | 865 | 2150 | 4331 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7388 |
| 0,5 - 1 | 0 | 0 | 0 | 21 | 725 | 965 | 1018 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2729 |
| 1 - 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 111 | 296 | 79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 486 |
| 1,5 - 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 75 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 112 |
| 2 - 2,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 11 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| 2,5 - 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3 - 3,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3,5 - 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 - 4,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4,5 - 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 0 | 0 | 0 | 63 | 1720 | 3497 | 5452 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10732 |

Las olas oceánicas más frecuentes y las más altas son del sector SE en las proximidades del puerto. Los sectores ESE y el E también contribuyen con olas en el rango de 2 a 2,50 m de amplitud.

Las olas oceánicas muestran una persistencia importante en el área costera. La **Tabla 6.2.** indica la llegada de 10732 eventos sobre un total de 15008, lo que representa un 71,5% de persistencia.

6.4 Régimen estacional en el área costera

Con idéntico criterio que para la posición costa afuera, se analizaron las variaciones estacionales del oleaje en el área costera en forma separada para olas oceánicas y las locales. Los resultados se presentan en las **Figuras 6.8. y 6.9.**

Las olas locales medias estacionales varían entre 0,90 y 1,10 m. El menor valor se presenta en primavera. Los máximos ocurren en otoño/invierno y resultan 25% mayores que los de primavera.

Las olas máximas (tanto absolutas como promedio de los 10 años) ocurren en otoño. La primavera muestra los menores valores. Las máximas olas de otoño del orden de 30% mayores que las de primavera.

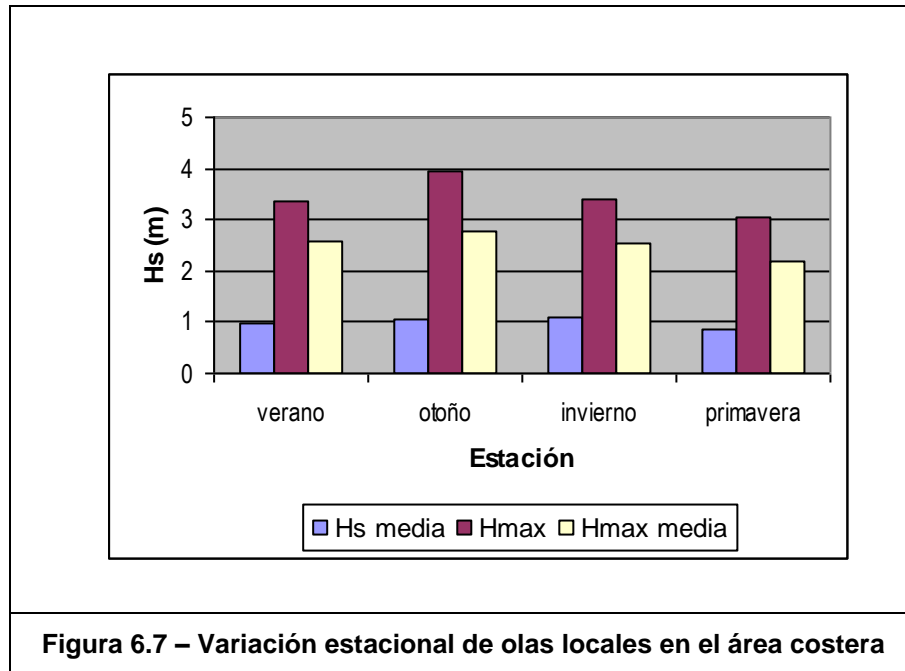


Figura 6.7 – Variación estacional de olas locales en el área costera

Las olas oceánicas medias estacionales no presentan prácticamente variaciones estacionales, siendo el valor promedio en el área costera $H_s = 0,44$ m. Las olas máximas estacionales (absolutas y promedio en 10 años) se presentan en otoño. Las máximas medias menores ocurren en primavera. Las olas máximas de otoño son casi 20% mayores que las de primavera.

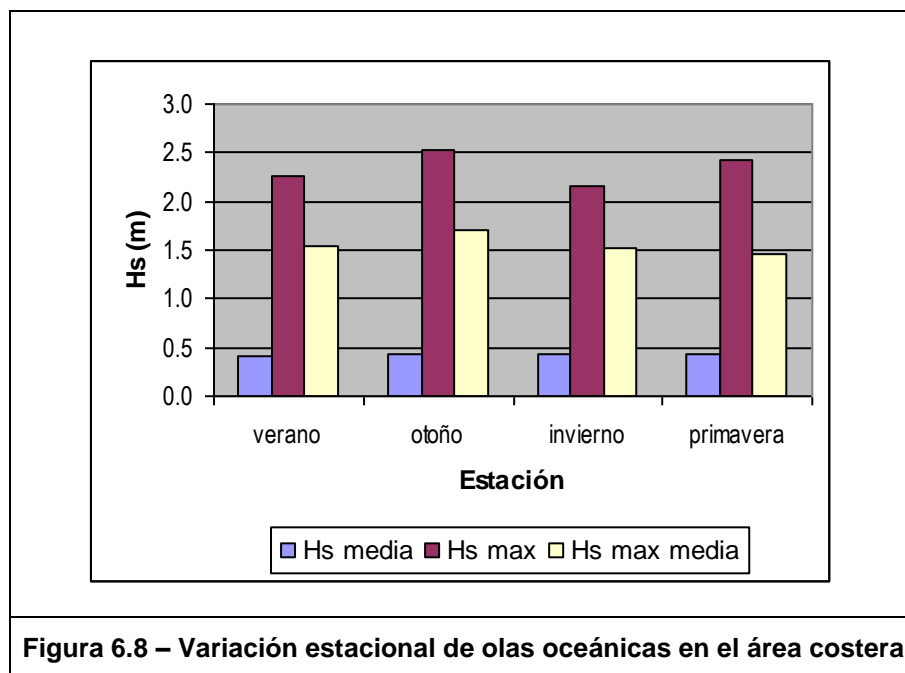


Figura 6.8 – Variación estacional de olas oceánicas en el área costera

7 ESTADÍSTICA DE VALORES EXTREMOS

El propósito de este análisis es la determinación de valores de altura de ola significativa (H_s) probables asociados a distintos períodos de recurrencia (T_r).

La evaluación se realiza para la serie cronológica de datos en la posición costa afuera como también en la posición costera próxima al puerto de Comodoro Rivadavia.

Los datos utilizados para este análisis corresponden a series valores máximos anuales de H_s correspondientes al período de 10 años comprendido entre el 1 de Enero de 1995 y el 31 de Diciembre de 2004, habiéndose descartado la fracción disponible del año 2005 por no constituir un año completo.

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

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 altura significativa de la ola alcance un cierto valor x_1) será descripta 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.

Para realizar el ajuste se pueden utilizar diferentes muestras de la variable $x = H_s$: la serie constituida por los *máximos anuales* de todas las direcciones, y las series constituidas por todos los valores que superan un umbral en una dirección determinada (*Peak Over*

Threshold, POT). En este último caso las series de datos estuvieron constituidas por todos los valores que superan al menor de los máximos anuales en la dirección correspondiente.

En todos los casos se verificó que los eventos que constituyen la serie son independientes. Las series también pueden ser discriminadas por dirección de procedencia, disponiéndose entonces de tantas series como direcciones en que se han clasificado los datos.

Función de ajuste

Existen numerosas funciones $F(x)$ utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos. Es habitual el uso de las funciones de Gumbel y de Weibull:

$$\text{Gumbel} \quad F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x - \mu))) \quad [7.1]$$

Siendo α y μ los parámetros de escala y posición respectivamente.

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

en las que F es la probabilidad de excedencia y x el valor de la variable, α , β y ε son los parámetros de forma, escala y posición de la función de Weibull respectivamente.

Estimación de los parámetros

Para el ajuste de un conjunto de datos a una $F(x)$ determinada debe realizarse la estimación de los parámetros de la función F (α , μ , γ , β , según el caso). Esto puede realizarse utilizando distintos algoritmos numéricos basados ya sea en el método de los momentos o el método de máxima verosimilitud.

En el presente estudio se han utilizado distintas metodologías para la estimación de los parámetros de las funciones [7.1] y [7.2]. En el caso de la función de Gumbel, la aplicación del *Método de los Momentos* a la distribución teórica permite establecer los parámetros de la función:

$$\alpha = \left(\frac{6 \operatorname{var}[x]}{\pi^2}\right)^{-1/2} \quad [7.3]$$

$$\mu = \text{media}[x] - \frac{\gamma}{\alpha} \quad [7.4]$$

siendo $\gamma = 0.5772$ la constante de Euler. $\text{Var}[x]$ y $\text{Media}[x]$ son la varianza y la media de la muestra.

En el caso de la función de Weibull, el *Método de los Momentos* proporciona las siguientes relaciones entre el *coeficiente de asimetría* γ de la muestra, su *desvío standard* σ y el *valor medio* μ y los parámetros α , β y ε de la distribución:

$$\gamma = \frac{\Gamma(1 + 3/\alpha) - 3\Gamma(1 + 2/\alpha)\Gamma(1 + 1/\alpha) + 2\Gamma^3(1 + 1/\alpha)}{[\Gamma(1 + 2/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha)]^{3/2}} \quad [7.5]$$

$$\beta = \left[\frac{\sigma^2}{\Gamma(1 + 2/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha)} \right]^{1/2} \quad [7.6]$$

$$\varepsilon = \mu - \beta \Gamma(1 + 1/\alpha) \quad [7.7]$$

Γ es la función Gamma. Dado el coeficiente de asimetría de la muestra γ , a partir de [7.5] mediante un proceso iterativo se determina α , y a continuación [7.6] y [7.7] permiten determinar β y ε respectivamente.

También se determinaron los parámetros de la funciones aplicando el *Método de Máxima Verosimilitud* (MMV) a las distintas series de datos. La bondad del ajuste es evaluada 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:

$$D = \text{máx } |S(x) - F(x)|$$

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.

Determinación de valores extremos

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:

$$x = F^{-1}(P) \quad [7.8]$$

Según el caso, estas funciones inversas resultan:

Gumbel
$$x = \mu + \frac{1}{\alpha} [-\ln[-\ln(P)]] \quad [7.9]$$

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

$$x = \varepsilon + \beta [-\ln(P)]^{1/\alpha} \quad [7.10]$$

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

7.2 Olas costa afuera

Los gráficos de las **Figuras 7.1 a 7.3** muestran la distribución direccional de los valores promedio de las máximas anuales y el valor máximo absoluto en el período de 10 años. Resulta evidente que el puerto de Comodoro Rivadavia, por la conformación general de la costa del Golfo de San Jorge, resulta expuesto a las olas más altas que son tanto del cuadrante NE como SE.

La **Figura 7.1** muestra que el oleaje generado por vientos locales presenta en esta ubicación máximos anuales de H_s dominantes de los sectores S y SSE con un valor máximo de $H_s= 8,60$ m.

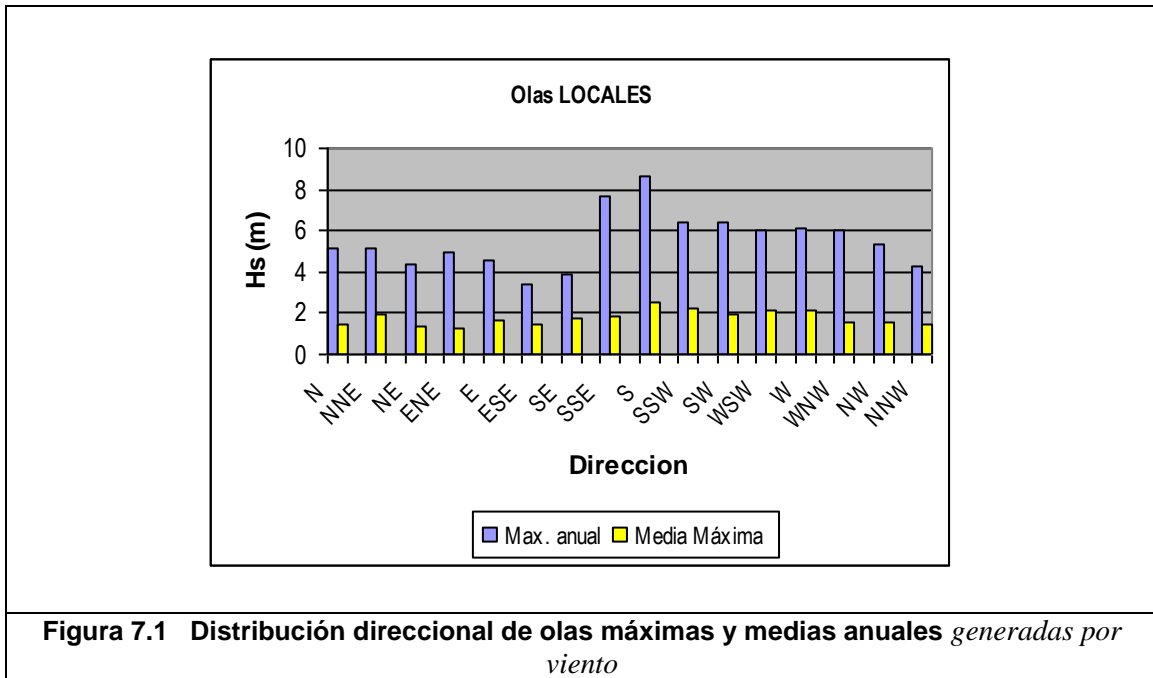


Figura 7.1 Distribución direccional de olas máximas y medias anuales generadas por viento

En cuanto a las olas oceánicas (*swell*) (Figura 7.2) el valor máximo determinado es de $H_s=4,50$ m y las condiciones más severas corresponden a las direcciones SE, SSE y S.

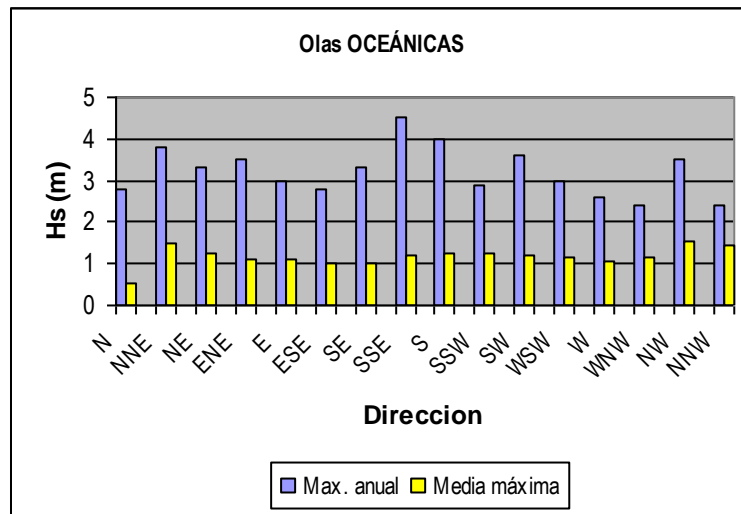


Figura 7.2 - Distribución direccional de *olas oceánicas* máximas y medias anuales

Las olas resultantes extremas (Figura 7.3) muestran una distribución dominada por las olas locales con un valor máximo de 8,60 m del sector S.

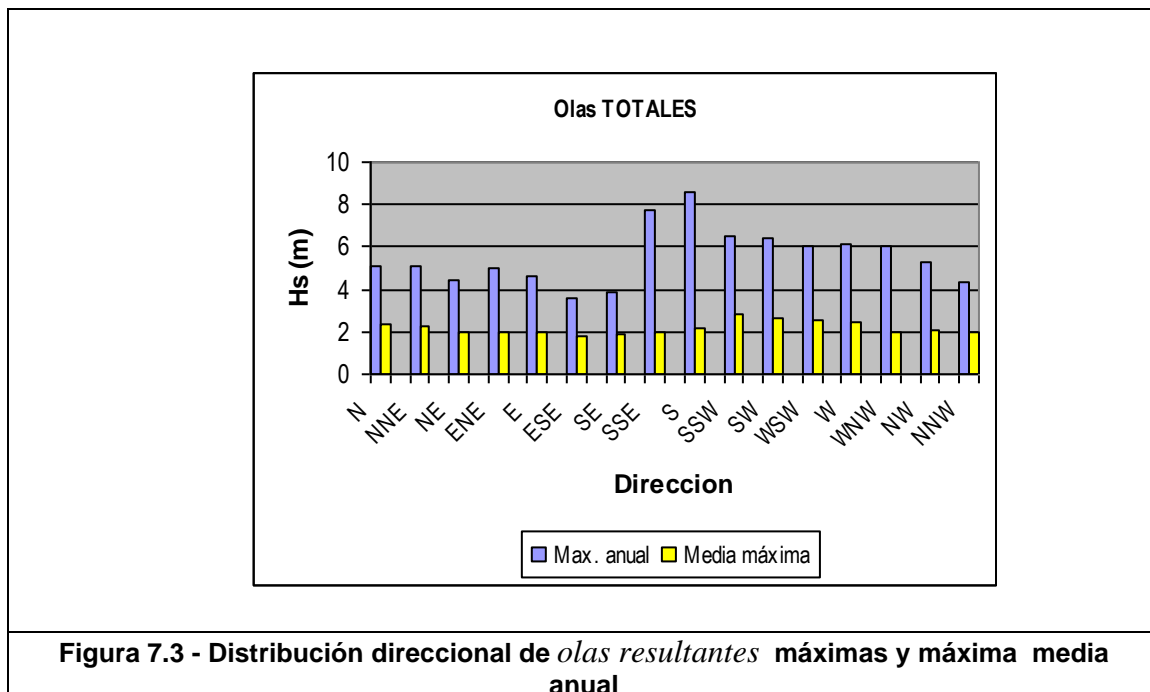


Figura 7.3 - Distribución direccional de *olas resultantes* máximas y máxima media anual

Teniendo en cuenta la orientación de la costa en el área costera del Golfo de San Jorge y consecuentemente, las posibles direcciones de llegada del oleaje al área portuaria, fueron

seleccionadas para el análisis ocho series de olas generadas por vientos locales y nueve series de datos de olas oceánicas.

Serie de valores

Las series estuvieron constituidas por todos los *valores que superaron al mínimo de los máximos anuales de Hs* correspondientes a una dirección determinada, extraídos del registro provisto por UKMO y para el período de tiempo comprendido entre 1/1/95 al 31/12/2004. Las series de datos se indican en las **Tablas 7.1. , 7.2 y 7.3.**

Tabla 7.1. Olas locales – Serie de valores sobre umbral (POT)

| Dir | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nro. DE DATOS | 43 | 33 | 24 | 33 | 40 | 34 | 50 | 26 |
| Umbral | 3.4 | 2.2 | 1.6 | 1.2 | 1.1 | 1.5 | 1.9 | 4.5 |
| Hs (m) | 3.8 | 2.9 | 1.6 | 1.7 | 1.1 | 2.9 | 2 | 5.9 |
| | 3.9 | 2.3 | 2.8 | 3.3 | 1.6 | 1.5 | 2.3 | 5.4 |
| | 5.1 | 2.2 | 1.6 | 1.5 | 2.3 | 2.6 | 1.9 | 5.6 |
| | 4.3 | 3.4 | 2 | 1.8 | 2.4 | 1.8 | 2.8 | 4.7 |
| | 3.9 | 3.1 | 4.4 | 2.3 | 1.6 | 3 | 5.2 | 8.6 |
| | 3.6 | 2.2 | 1.8 | 2.2 | 1.6 | 2 | 2.2 | 6.2 |
| | 4.5 | 2.6 | 2.6 | 4.6 | 1.1 | 1.9 | 2.7 | 4.7 |
| | 3.6 | 2.2 | 1.8 | 1.5 | 3.4 | 1.7 | 3.6 | 5 |
| | 3.8 | 2.3 | 2.4 | 2.6 | 1.2 | 1.8 | 2.1 | 4.8 |
| | 3.9 | 2.2 | 1.9 | 1.3 | 1.2 | 2.5 | 1.9 | 6.3 |
| | 4.8 | 2.2 | 1.7 | 2.5 | 1.5 | 1.7 | 2 | 4.7 |
| | 4.3 | 2.3 | 2.3 | 1.5 | 2.4 | 2.1 | 7.7 | 4.6 |
| | 4.6 | 3.3 | 1.8 | 1.6 | 1.8 | 3.5 | 3.8 | 6.4 |
| | 3.4 | 2.9 | 1.9 | 2 | 1.2 | 1.5 | 2 | 6.8 |
| | 4 | 2.9 | 3.6 | 1.4 | 2.6 | 2.6 | 2 | 6 |
| | 3.7 | 2.2 | 1.6 | 1.7 | 1.2 | 3.3 | 1.9 | 4.5 |
| | 3.8 | 2.2 | 2.2 | 1.4 | 1.7 | 2.1 | 2.7 | 4.6 |
| | 3.8 | 2.2 | 1.7 | 2.9 | 2.4 | 3.1 | 1.9 | 4.5 |
| | 3.7 | 3.5 | 2.8 | 1.6 | 1.1 | 1.6 | 2.2 | 6.8 |
| | 3.7 | 2.5 | 2.9 | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.2 | 4.9 |
| | 3.5 | 2.2 | 1.6 | 1.7 | 3.1 | 2.4 | 2.7 | 5.1 |
| | 3.4 | 2.6 | 1.9 | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 2.4 | 4.7 |
| | 3.5 | 3 | 2 | 2.2 | 1.3 | 2.5 | 4.3 | 4.7 |
| | 3.5 | 3.1 | 3.1 | 1.4 | 1.5 | 1.8 | 3.7 | 5.7 |
| | 4 | 2.9 | | 3.3 | 1.3 | 1.9 | 2.4 | 6 |
| | 3.4 | 4.4 | | 2.2 | 1.4 | 3.9 | 2.9 | 6.3 |
| | 4.3 | 2.4 | | 2.3 | 1.5 | 1.5 | 1.9 | |
| | 3.4 | 4 | | 3.8 | 1.6 | 1.6 | 4.9 | |
| | 3.6 | 3.7 | | 1.4 | 2.1 | 3.3 | 3 | |
| | 4.9 | 2.2 | | 1.3 | 1.2 | 2.4 | 1.9 | |
| | 3.9 | 2.2 | | 1.2 | 2.9 | 2.2 | 1.9 | |
| | 4.2 | 3.4 | | 1.7 | 1.3 | 1.7 | 2.1 | |
| | 4 | 2.9 | | | 1.1 | 1.8 | 2.7 | |
| | 3.4 | | | | 1.1 | 2.3 | 2.3 | |
| | 4.1 | | | | 1.9 | | 2.8 | |
| | 4.4 | | | | 1.6 | | 3.8 | |
| | 3.9 | | | | 2.6 | | 2.3 | |
| | 4.8 | | | | 1.1 | | 5.7 | |
| | 4.2 | | | | 2 | | 2.4 | |
| | 3.5 | | | | 2.4 | | 3 | |
| | 3.5 | | | | | | 2.5 | |
| | 3.5 | | | | | | 2.3 | |
| | 4.1 | | | | | | 2.2 | |
| | | | | | | | 2.4 | |
| | | | | | | | 2.4 | |
| | | | | | | 2.3 | | |
| | | | | | | 2.1 | | |
| | | | | | | 4.3 | | |
| | | | | | | 2.1 | | |
| | | | | | | 2.2 | | |

Tabla 7.2. – Olas oceánicas – Serie de valores sobre umbral (POT)

| Dir | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nro. DE DATOS | 66 | 25 | 29 | 28 | 41 | 31 | 36 | 28 | 23 |
| UMBRAL | 1,4 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 2,4 | 3 |
| Hs (m) | 1,4 | 1,9 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 2,4 | 3 |
| | 1,4 | 2 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 2,4 | 3 |
| | 1,4 | 2 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 2,4 | 3 |
| | 1,4 | 2 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 2,4 | 3 |
| | 1,4 | 2 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 2,4 | 3 |
| | 1,4 | 2 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 2,4 | 3,1 |
| | 1,4 | 2 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 2,4 | 3,1 |
| | 1,4 | 2 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 2,4 | 3,1 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,5 | 2,1 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,5 | 3,1 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,5 | 2,2 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 2,6 | 3,1 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,5 | 2,2 | 1,7 | 1,7 | 1,9 | 2,7 | 3,1 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,6 | 2,2 | 1,7 | 1,7 | 1,9 | 2,7 | 3,1 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,6 | 2,3 | 1,7 | 1,7 | 2 | 2,7 | 3,1 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,6 | 2,3 | 1,8 | 1,8 | 2 | 2,7 | 3,1 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,6 | 2,3 | 1,8 | 1,8 | 2,1 | 2,8 | 3,2 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,6 | 2,3 | 1,8 | 1,8 | 2,1 | 2,8 | 3,2 |
| | 1,5 | 2,1 | 2,6 | 2,4 | 1,8 | 1,9 | 2,1 | 2,8 | 3,2 |
| | 1,6 | 2,2 | 2,7 | 2,4 | 1,9 | 1,9 | 2,2 | 2,9 | 3,2 |
| | 1,6 | 2,2 | 2,7 | 2,5 | 1,9 | 1,9 | 2,2 | 2,9 | 3,2 |
| | 1,6 | 2,2 | 2,7 | 2,5 | 1,9 | 1,9 | 2,3 | 3,2 | 3,3 |
| | 1,6 | 2,4 | 2,7 | 2,7 | 1,9 | 2 | 2,4 | 3,3 | 3,3 |
| | 1,6 | 2,6 | 2,8 | 2,7 | 1,9 | 2 | 2,4 | 4 | 3,3 |
| | 1,6 | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 1,9 | 2 | 2,5 | 4,5 | 3,3 |
| | 1,6 | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 2 | 2,1 | 2 | 2,8 | 3,3 |
| | 1,6 | 2,8 | 3 | 2,9 | 2 | 2,1 | 2 | 2,8 | 3,4 |
| | 1,7 | 3 | 3 | 2,9 | 2 | 2,2 | 2 | 2,8 | 3,4 |
| | 1,7 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 2,1 | 2,4 | 2,1 | 3 | 3,4 |
| | 1,7 | 3,3 | 3,3 | 3,3 | 2,1 | 2,5 | 2,1 | 3,3 | 3,6 |
| | 1,7 | 3,8 | | | 2,2 | 2,6 | 2,1 | | 3,6 |
| | 1,8 | | | | 2,2 | 2,7 | 2,2 | | 3,8 |
| | 1,8 | | | | 2,2 | 3 | 2,2 | | 4 |
| | 1,8 | | | | 2,5 | | 2,2 | | |
| | 1,8 | | | | 2,5 | | 2,2 | | |
| 1,8 | | | | 2,5 | | 2,4 | | | |
| 1,8 | | | | 2,6 | | 2,6 | | | |
| 1,9 | | | | 2,6 | | 2,8 | | | |
| 1,9 | | | | 2,7 | | | | | |
| 1,9 | | | | 2,9 | | | | | |
| 1,9 | | | | 3,2 | | | | | |
| 1,9 | | | | 3,3 | | | | | |
| 1,9 | | | | 3,5 | | | | | |

Para poder estimar los parámetros de ajuste de las funciones de Gumbel y de Weibull para las series de datos presentados en las **Tablas 7.1** y **7.2** se aplicaron distintas técnicas (*Método de Máxima Verosimilitud, Método de los Momentos*), y distintas funciones de ajuste (Weibull, Gumbel).

Olas de viento

El análisis se realizó para las 8 series correspondientes a los sectores NNE a S, mediante las funciones de Weibull y Gumbel, habiéndose determinado el valor del test de Kolmogorov-Smirnov utilizado para evaluar la bondad del ajuste. En cada caso se decidió estimar los valores de Hs asociados a distintos Tr utilizando la función que presentara el menor valor de D_{max} .

La **Figura 7.4** muestra los distintos ajustes realizados para el sector SE.

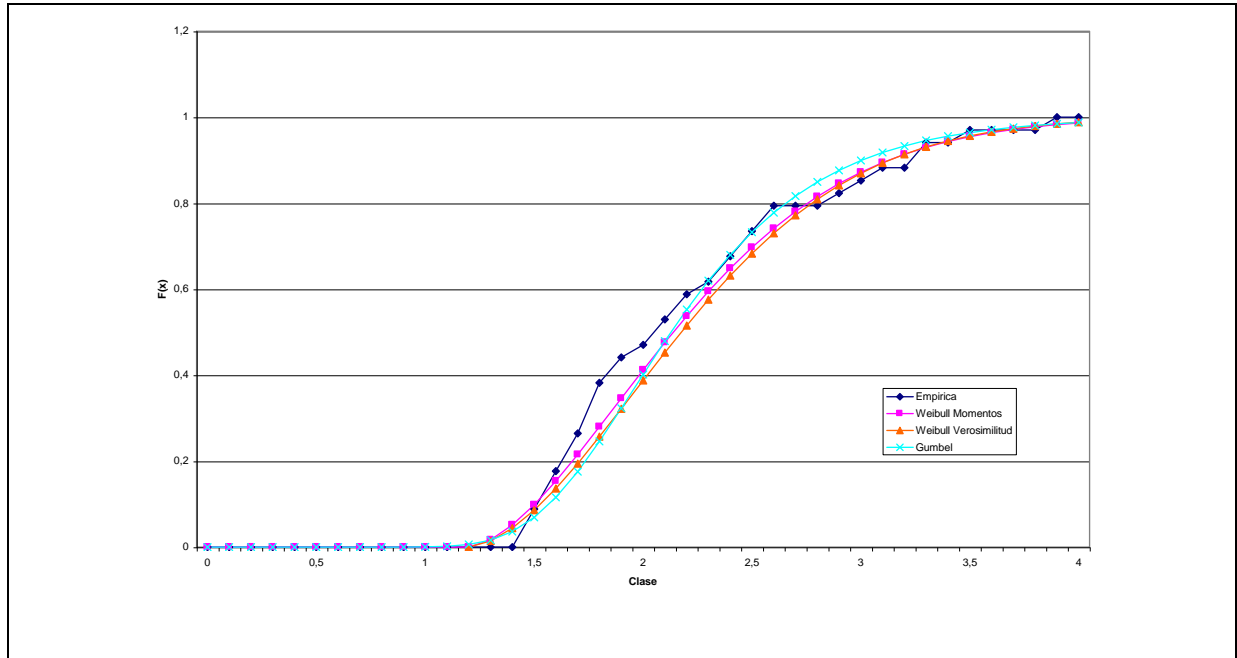


Figura 7.4 Ajuste mediante distintas funciones y métodos para olas de viento sector SE

Los resultados indicaron que la función de Weibull ajusta mejor los datos y fue utilizada para estimar valores probables en el resto de los casos.

Conocidos los parámetros del ajuste α , β y ϵ , el uso de la función inversa (en este caso la ec. [7.10]) permite entonces determinar el valor probable de H_s para un determinado período de retorno.

La **Tabla 7.4** muestra el resultado del procedimiento de ajuste y la estimación de los valores de altura significativa probables de olas generadas por viento para distintos períodos de retorno.

Los sectores S y SSE presentan los mayores valores estimados, que son de 8,50 y 9,0 m respectivamente para un período de retorno de 100 años.

Tabla 7.4. Golfo de San Jorge. Ajuste para olas generadas por viento

| METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD | | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S |
|--------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DATOS/AÑO | λ | 3,91 | 3,00 | 2,18 | 3,00 | 3,64 | 3,09 | 4,55 | 2,36 |
| PARAMETROS FUNCION WEIBULL | α | 3,87 | 1,53 | 1,32 | 1,28 | 1,66 | 1,77 | 0,94 | 1,43 |
| | β | 1,84 | 0,95 | 0,93 | 1,02 | 0,00 | 1,21 | 0,98 | 1,45 |
| | ε | 2,27 | 1,90 | 1,40 | 1,06 | 0,80 | 1,19 | 1,75 | 4,21 |
| TEST DE BONDAD | D | 0,137 | 0,188 | 0,143 | 0,151 | 0,136 | 0,126 | 0,105 | 0,155 |
| Tr (años) | 2 | 4,5 | 3,3 | 2,6 | 2,7 | 2,4 | 2,9 | 4,0 | 6,2 |
| | 5 | 4,7 | 3,7 | 3,2 | 3,3 | 2,8 | 3,3 | 5,0 | 6,9 |
| | 10 | 4,8 | 4,0 | 3,6 | 3,7 | 3,1 | 3,6 | 5,8 | 7,5 |
| | 20 | 5,0 | 4,3 | 3,9 | 4,1 | 3,4 | 3,9 | 6,6 | 7,9 |
| | 50 | 5,1 | 4,6 | 4,4 | 4,7 | 3,7 | 4,2 | 7,7 | 8,5 |
| | 100 | 5,2 | 4,9 | 4,7 | 5,0 | 3,9 | 4,4 | 8,5 | 9,0 |

Olas Oceánicas

En este caso la función de Gumbel mostró un ajuste más satisfactorio y los parámetros de la función fueron estimados mediante el *Método de Máxima Verosimilitud*. La **Figura 7.5.** permite comparar la bondad de los distintos ajustes realizados para la serie de datos correspondientes a la dirección SE.

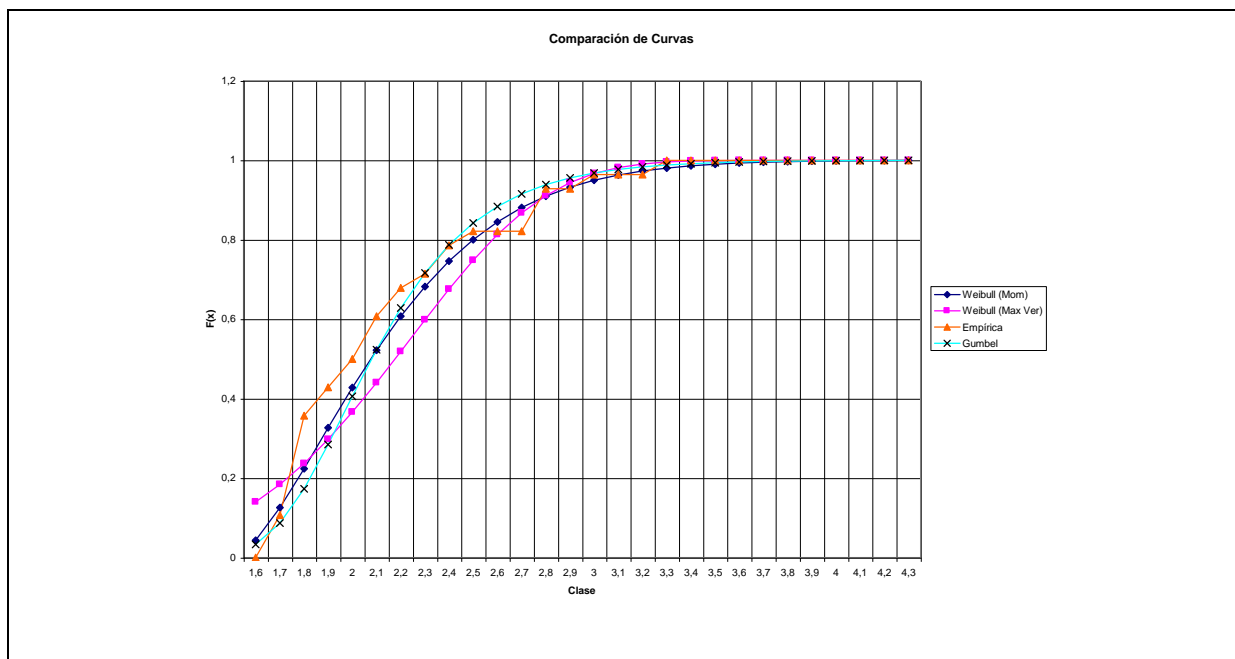


Figura 7.5. Comparación de ajustes de olas oceánicas para el sector SE

La **Tabla 7.5** muestra los resultados para olas oceánicas, con un valor de $H_s=4,20$ m estimado para un período de retorno de 100 años.

| Tabla 7.5 Golfo de San Jorge. Ajuste para olas oceánicas | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| METODO DE MAXIMA VEROSIMILITUD | | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S |
| DATOS/AÑO | λ | 6,0 | 2,6 | 2,5 | 3,7 | 2,8 | 3,3 | 2,5 | 2,1 | 2,8 |
| PARAMETROS FUNCION GUMBEL | α | 3,738 | 5,105 | 4,094 | 3,027 | 4,216 | 4,740 | 3,317 | 3,393 | 6,441 |
| | β | 1,678 | 2,552 | 2,268 | 1,854 | 1,778 | 1,755 | 1,969 | 2,594 | 3,146 |
| TEST DE BONDAD | D | | | | | | | | | |
| Tr (años) | 2 | 2,33 | 2,86 | 2,64 | 2,49 | 2,17 | 2,13 | 2,43 | 2,98 | 3,40 |
| | 5 | 2,58 | 3,05 | 2,88 | 2,81 | 2,40 | 2,34 | 2,72 | 3,27 | 3,55 |
| | 10 | 2,77 | 3,19 | 3,05 | 3,04 | 2,57 | 2,49 | 2,94 | 3,48 | 3,66 |
| | 20 | 2,96 | 3,33 | 3,23 | 3,28 | 2,73 | 2,64 | 3,15 | 3,69 | 3,77 |
| | 50 | 3,20 | 3,51 | 3,45 | 3,58 | 2,95 | 2,83 | 3,43 | 3,96 | 3,91 |
| | 100 | 3,39 | 3,64 | 3,62 | 3,81 | 3,12 | 2,98 | 3,64 | 4,17 | 4,02 |

Es preciso señalar que los valores estimados para períodos de retorno prolongados, como es el caso de $Tr = 50$ o 100 años, se encuentran asociados a una incertidumbre natural mayor.

7.3 Olas extremas en el área costera

En el área costera se realizó un análisis más minucioso, que consistió en evaluar distintas series de datos, mediante la aplicación de diferentes funciones de ajuste y metodologías para determinación de los parámetros.

Series

En este caso se utilizaron las series de máximos anuales y las series direccionales de valores sobre un umbral (POT), siendo el umbral el valor mínimo de los máximos anuales.

Mediante el *Método de Máxima Verosimilitud* aplicado a las series direccionales pudo establecerse que la dirección ESE es la que presenta los mayores valores.

También se aplicó el *Método de los Momentos* para estimar los parámetros de ajuste de la función de Gumbel (ec. [7.3] y [7.4]) y de Weibull (ec. [7.5], [7.6] y [7.7]).

La **Tabla 7.6** muestra la totalidad de las evaluaciones realizadas por distintos métodos para el caso de olas locales. Las series direccionales fueron las correspondientes al ESE.

Tabla 7.6 –Puerto de Comodoro Rivadavia. Olas locales Altura de ola para distintos períodos de retorno

| Tr | Hs | | | | | | $\sigma(1)$ |
|-----|------|------|------|------|------|------|-------------|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | |
| 2 | 3.00 | 2.89 | 2.98 | 2.79 | 2.99 | 2.89 | 0.13 |
| 5 | 3.37 | 3.32 | 3.42 | 3.13 | 3.32 | 3.32 | 0.25 |
| 10 | 3.62 | 3.63 | 3.70 | 3.36 | 3.54 | 3.60 | 0.37 |
| 20 | 3.86 | 3.94 | 3.94 | 3.57 | 3.75 | 3.87 | 0.49 |
| 50 | 4.17 | 4.34 | 4.23 | 3.84 | 4.03 | 4.21 | 0.66 |
| 100 | 4.40 | 4.64 | 4.44 | 4.02 | 4.23 | 4.44 | 0.78 |

(1) Gumbel. Método de los Momentos. Serie de máximos anuales

(2) Gumbel. Método de los Momentos. Serie POT SE

(3) Weibull. Método de los Momentos. Serie de Máximos anuales

(4) Weibull. Método de los Momentos. Serie POT ESE

(5) Tabla 5: Gumbel. Tabla 6 Weibull. Máxima Verosimilitud. Serie de máximos anuales

(6) Weibull. Máxima Verosimilitud. Serie POT ESE

Intervalo de confianza

Las estimaciones de altura de ola realizadas están afectadas de incertezas. Muchas causas contribuyen a esta incertidumbre (Burcharth, 1996):

- La varianza estadística de la naturaleza: la altura de ola es una variable aleatoria.
- La variabilidad debido al tamaño limitado de la muestra.
- Los errores de observación o del método de pronóstico
- La adopción de una hipótesis de distribución como la verdadera, cuando se desconoce la distribución real de los eventos
- La variabilidad de los algoritmos de cálculo (umbral, método de ajuste, etc)
- Los cambios climatológicos

Puede suponerse que la incertidumbre debida a la naturaleza aleatoria de las olas está distribuída normalmente alrededor de un valor medio, como lo muestra la **Figura 7.6**.

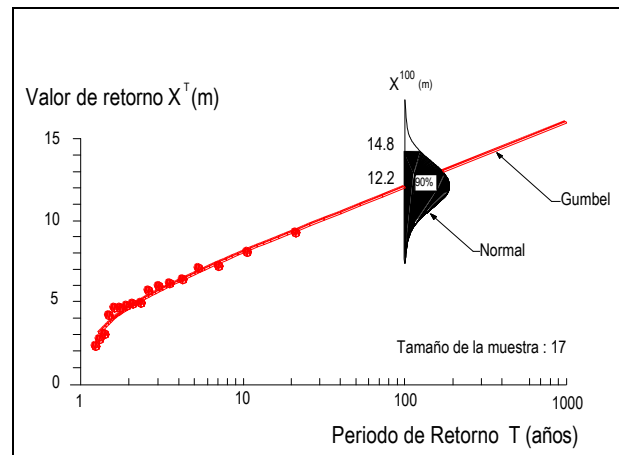


Figura 7.6

Esto significa que el valor probable estimado de la variable H para un período de retorno determinado, es un valor medio y que existe una probabilidad de ser superado. En la **Figura 7.6** se muestra un ejemplo para un valor medio de $H^{100} = 12,2$ m y desvío standard $\sigma = 2,05$ m. Si la distribución es normal, el puede establecerse que el 90% de los valores estarán debajo de 14,80 m (es decir $H^{100} + 1,25 \sigma$). El 84% de valores se halla debajo de $H^{100} + \sigma$. Es decir hay una probabilidad de 16% de superar el valor medio de $H^{100} + \sigma$.

El intervalo de confianza para un determinado valor medio de la variable, es el delimitado por dos valores de la misma, tales que la probabilidad de hallarse la variable en ese intervalo es $p = 1 - \alpha$, siendo α el valor de significancia. Para $\alpha = 0,05$ esa probabilidad (nivel de confianza) es del 95%. En el ejemplo, habrá un 0,025 de probabilidad de superar el denominado valor crítico, en el ejemplo, $H = 16.2$ m

Para establecer el intervalo de confianza en el caso del ajuste mediante la función de Gumbel realizado para el puerto de Comodoro Rivadavia, se utilizó la expresión:

$$\text{var}[x_r] = \left[\frac{\sigma^2}{N} \right] \left(1 + 1.1396(y_r - \gamma)\sqrt{6}/\pi + 1.000(y_r - \gamma)^2 \pi^2 / 6 \right) \quad [7.11]$$

donde N es el número de datos de la muestra, σ el desvío standard, γ la constante de Euler. Y_R es la variable reducida dada por:

$$y_r = F^{-1} \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \quad [7.12]$$

siendo λ el número de eventos por año. La **Figura 7.7** muestra el ajuste de datos para el ajuste (3) y el intervalo de confianza estimado (función de Gumbel, método de los momentos, serie truncada POT de dirección ESE, N=30 valores)

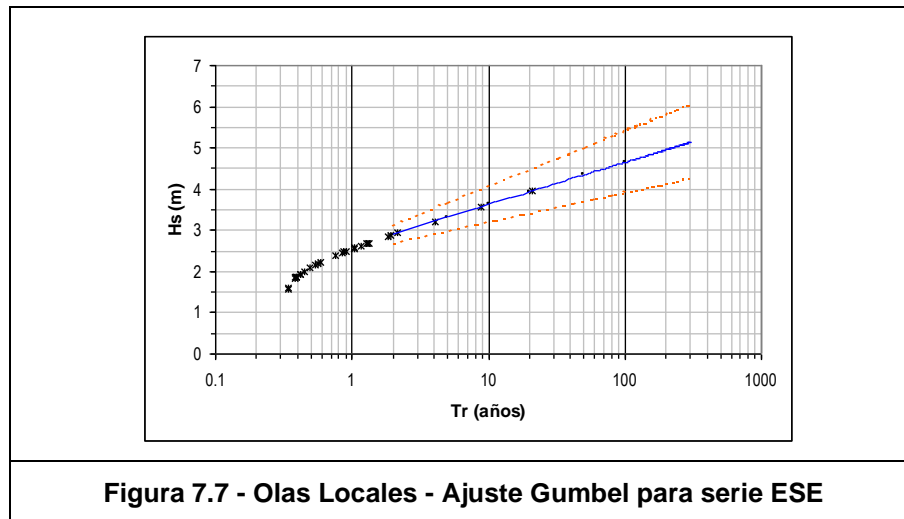


Figura 7.7 - Olas Locales - Ajuste Gumbel para serie ESE

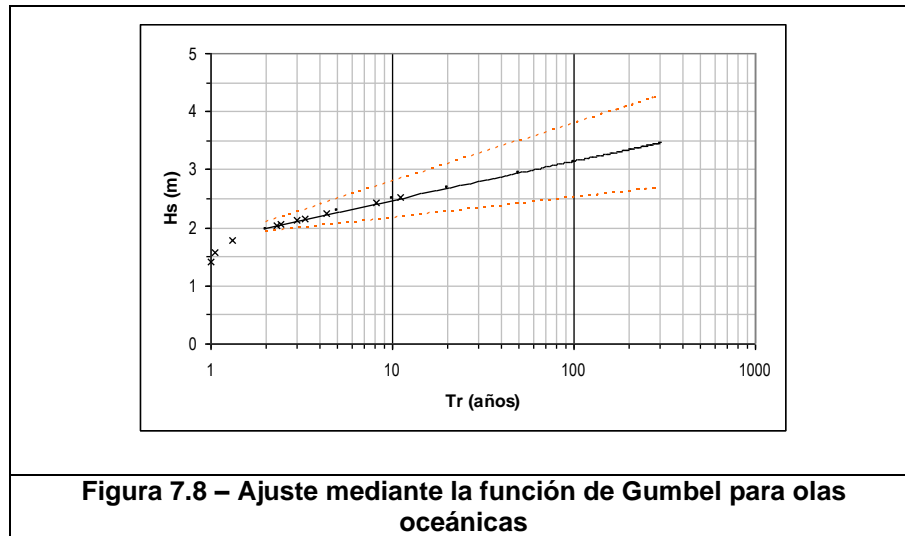
7.4 Olas oceánicas

Con igual metodología se evaluaron los valores extremos probables de las olas oceánicas. El *Método de Máxima Verosimilitud* aplicado a las series direccionales indicó que los mayores valores corresponden a la dirección SE. En la **Tabla 7.7** se presentan los resultados comparativos. En algunos casos el ajuste no fue satisfactorio y los resultados descartados.

Tabla 7.7 – Puerto de Comodoro Rivadavia. Altura de olas oceánicas para distintos períodos de retorno

| Tr | Hs | | | | | | $\sigma(1)$ |
|-----|------|------|-----|-----|------|------|-------------|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | |
| 2 | 1.97 | 1.78 | - | - | 2.07 | 1.75 | 0.10 |
| 5 | 2.28 | 2.05 | - | - | 2.31 | 2.07 | 0.20 |
| 10 | 2.49 | 2.25 | - | - | 2.43 | 2.32 | 0.30 |
| 20 | 2.69 | 2.45 | - | - | 2.52 | 2.57 | 0.41 |
| 50 | 2.94 | 2.72 | - | - | 2.61 | 2.89 | 0.54 |
| 100 | 3.13 | 2.92 | - | - | 2.67 | 3.14 | 0.64 |

En la **Figura 7.8** se muestra el ajuste para el caso (1).



7.5 Aspectos relativos a la ola de diseño

La ola de diseño es la escogida por el proyectista para dimensionar una estructura o evaluar sus aspectos funcionales. La determinación de la ola de diseño H_d para una estructura se basa usualmente en el análisis estadístico de mediciones o estimaciones de olas de largo plazo. Un modo implícito de establecer un margen de seguridad es adoptando un *período de retorno* T_r para la carga de diseño. Si se escoge un período de retorno de 100 años para caracterizar la ola de diseño, es decir $H_d = H^{100}$, esto significa que *en promedio H_d será excedida una vez cada 100 años*. Pero mediante este concepto no se puede evaluar el riesgo a que está sometida la obra o la probabilidad de que ocurra ese evento dentro de su vida útil L .

Si se introduce el concepto de *probabilidad de encuentro* p , es decir la probabilidad de que la ola de diseño (asociada al período de retorno T_r) sea superada durante la vida útil L de la estructura, puede estimarse que p se expresa como (Burcharth, 1996):

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T_r}\right) \quad [7.13]$$

Esta expresión tiene en cuenta el carácter aleatorio de los eventos extremos en la vida útil de la estructura. Si el período de retorno T_r del evento de diseño es el doble que la vida útil

de la obra, la probabilidad de encuentro resulta próxima al 40%. Según [7.13] la probabilidad de encuentro puede reducirse a 28 % si el periodo de retorno escogido para la ola de diseño triplicara a la vida útil.

Si se asume que la altura de ola H responde a la distribución de Gumbel o Weibull cuyos parámetros de ajuste han sido estimados previamente, la utilización de [7.13] permite establecer una altura de ola de diseño H_d con una probabilidad predeterminada de no ser superada en la vida útil de la estructura.

Siguiendo este procedimiento, el valor de p impuesto por el proyectista permite incorporar aspectos técnicos, económicos y de seguridad deseables para la estructura. Un ejemplo para el caso de olas generadas por viento del sector ESE (**Tabla 7.6, col. (2)**), una vida útil $L=20$ años y el ajuste realizado mediante la función de Gumbel, se muestra en la **Figura 7.9**.

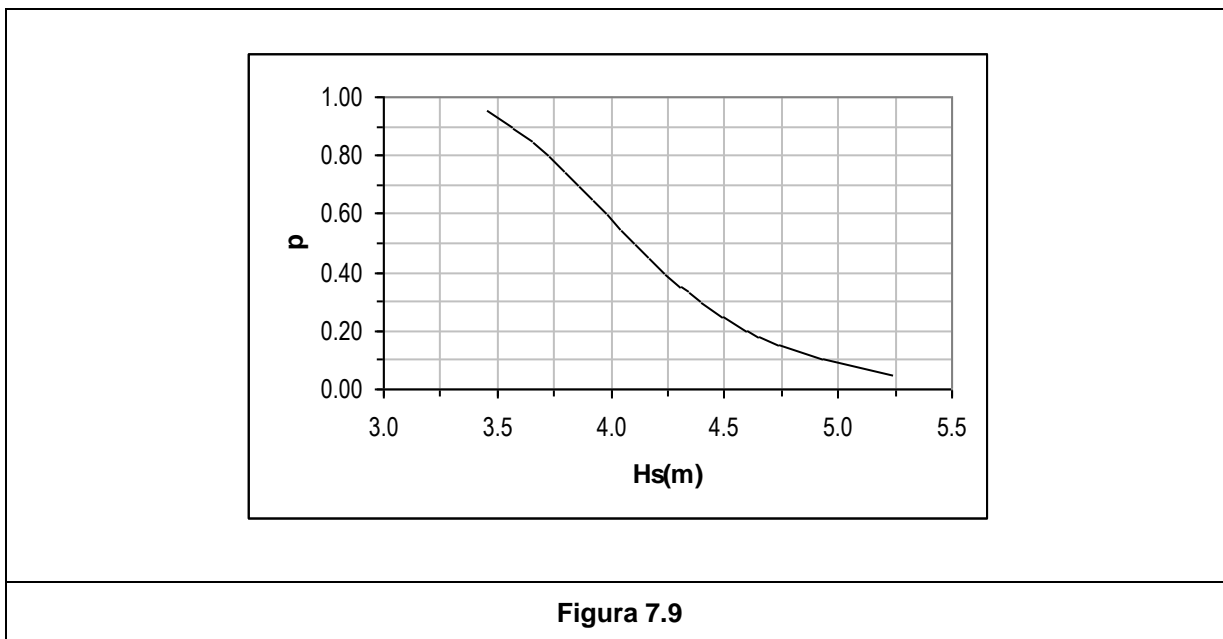


Figura 7.9

Según esta metodología, elegir un periodo de retorno de 50 años para una estructura cuya vida útil se estima en 20 años, implica una probabilidad de encuentro de 0,33 (ec. [7.13]) y la necesidad de adoptar una ola de diseño $H_d= 4,3$ m para satisfacer esa condición.

La aceptación o no de este riesgo ($p=0,33$) implica la evaluación de un conjunto de aspectos técnicos y económicos del proyecto. Inversamente, si se parte de fijar una probabilidad de encuentro $p = 0.10$ que no deba ser superada, la ec. [7.13] permite establecer que $Tr = 189,8$ años y a partir de los parámetros del ajuste y de [7.9] es posible determinar $H_d=4,9$ m.

8 CONCLUSIONES

1. Una serie de 10 años de datos generados por un Modelo Global de Olas en el Golfo de San Jorge fue utilizada como entrada para una modelación a escala regional, y permitió establecer las propiedades del oleaje en las proximidades del puerto de Comodoro Rivadavia. Entre otras, las propiedades del oleaje evaluadas fueron las distribuciones direccionales, la distribución de altura y período, las variaciones estacionales y valores extremos probables a largo plazo.
2. En el área del Puerto de Comodoro Rivadavia los valores extremos de oleaje resultan determinados por olas generadas localmente por el viento.
3. El uso combinado de modelos de generación y propagación de olas a escala global y regional muestra ser una herramienta valiosa para la caracterización del clima de olas en aguas costeras. La modelación matemática no reemplaza a la medición directa, pero tiene el mérito de permitir la generación de series extensas de datos (del orden de 15 años), lo que representa una clara ventaja para la representación de las propiedades estadísticas del oleaje.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. *SWAN Cycle III version 40.51AB Implementation Manual*, Delft University of Technology, 2007.
2. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, John Herbich, Editor, 1991
3. *Aplicacion de un Método Probabilístico al Diseño de Enrocados*. Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria Ing. R. Castellano – Ing. A. Grande – Ing. N. Tomazin INA - Laboratorio de Hidráulica. 2004

ANEXO I – Relevamiento Batimétrico

ANEXO II 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.