

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**LA UTILIZACIÓN DE MODELOS GLOBALES DE OLEAJE
PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA DE OLAS
EN AGUAS COSTERAS**

*Roberto Daniel CASTELLANO **, *Nicolás TOMAZIN ***

* Jefe Programa de Hidráulica Marítima , ** Investigador Programa de Hidráulica Marítima
INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
Buenos Aires – Argentina
rcastell@ina.gov.ar ntomazin@ina.gov.ar

RESUMEN

Se presenta una metodología para caracterizar el régimen de olas en una posición costera a partir de la información generada por un Modelo Global de Oleaje en un nodo próximo. Para ello se implementó un modelo numérico a escala regional que abarcó un área tal que permitiera incorporar tanto la posición costera de interés como el nodo disponible del Modelo Global de Oleaje. Los resultados del Modelo Global fueron utilizados como entrada para el modelo local. Se aplicó la metodología para evaluar el clima de oleaje en un sitio de la costa atlántica en las proximidades de la ciudad de Rawson, Provincia del Chubut, Argentina.

ABSTRACT

A regional scale numerical wave model is used to characterize the wave climate at a nearshore location. The model inputs are wave and wind conditions at an offshore grid point, provided by a Global Wave Model. A case study is presented, for a coastal area near Rawson, Argentina.

PALABRAS CLAVE: propagación de olas - modelos globales - modelos matemáticos.

INTRODUCCION

La ejecución de proyectos de ingeniería de puertos y costas en un adecuado marco de seguridad y eficiencia depende entre otros, del conocimiento de las características del oleaje en el área costera en las inmediaciones del sitio de interés. Los Modelos Globales de Olas responden a nuevos avances tecnológicos logrados en numerosos campos y son una alternativa valiosa para la caracterización del oleaje cuando no se dispone de mediciones de largo plazo. Dado que los Modelos Globales producen información sobre grillas de relativamente baja resolución, se hace necesario complementar esos resultados con modelos locales o regionales que permiten evaluar el oleaje en posiciones específicas a partir de la información generada en un nodo cercano por el Modelo Global. La modelación a escala local permite considerar adecuadamente los procesos de transformación por efecto de la topografía del lecho marino, que en áreas costeras son importantes y requieren de un tratamiento detallado.

OBJETIVOS

El propósito de este trabajo ha sido establecer una metodología para caracterizar el régimen de olas en una posición costera a partir de la información generada en un nodo próximo por un Modelo Global de Oleaje. Para ello se implementó un modelo numérico a escala regional que abarcó un área tal que permitiera incorporar tanto la posición costera de interés como el nodo disponible del Modelo Global de Oleaje.

Se aplicó la metodología para evaluar el clima de oleaje en un sitio de la costa atlántica en las proximidades de la ciudad de Rawson, Provincia del Chubut, Argentina.

MODELOS GLOBALES DE OLEAJE

Los modelos matemáticos para la predicción de oleaje, se utilizan en la actualidad para una variedad de actividades marinas, pero al mismo tiempo permiten también disponer de información histórica. Estos modelos utilizan como entrada los vientos en superficie generados por un Modelo Climático Global. El área modelada abarca prácticamente todos los océanos y mares del globo. La resolución espacial en los océanos es del orden de $1^\circ \times 1 \frac{1}{4}^\circ$.

Las salidas de las simulaciones son corregidas en función de mediciones de altura, período y dirección del oleaje. Para ello es necesario disponer de datos de olas medidos directamente. En algunas regiones donde la actividad marina es intensa existen redes de boyas marinas que proveen tal información, lo que permite conocer las aptitudes de la modelación y corregir los resultados.

Los sensores de microondas a bordo de los satélites ERS (altímetros, escatómetros y radar de apertura sintética SAR) ofrecen información adicional para este propósito, ya que permiten una cobertura global, continua y homogénea y con una resolución mejorada respecto de lo que pueden ofrecer las redes de boyas.

La **NOAA** (National Oceanic and Atmospheric Administration), **MeteoFrance**, la Oficina Meteorológica del Reino Unido (United Kingdom Meteorological Office, **UKMO**) y empresas privadas como Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services (**ARGOSS**) utilizan este tipo de modelos para pronóstico y para generación de series históricas.

En términos generales, los Modelos Globales se basan en la ecuación de balance de la densidad de energía. 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 término S del miembro derecho de la ecuación representa las fuentes y sumideros de energía y puede ser descripto como la suma de la energía transferida por el viento, la transferencia de energía entre olas por efectos no lineales, la disipación de energía por “crestas blancas”, por la fricción con el fondo y por la rompiente inducida por profundidad.

La ecuación de balance [1] es una ecuación diferencial de primer orden en la que la variable dependiente a resolver es la densidad de acción de ola N. La solución 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 evolución del espectro de energía de las olas es forzada por tres mecanismos: el efecto del viento, la disipación de energía por rotura, y la transferencia de energía entre componentes espectrales debido a efectos no lineales. La energía se propaga por advección desde un punto de cálculo al siguiente a la velocidad de grupo. Los modelos de olas utilizan vientos horarios de superficie producidos por un modelo numérico climático global.

El planteo de los diversos mecanismos de crecimiento y disipación del oleaje, como también las técnicas de resolución de la ecuación [1] pueden diferir en los diversos Modelos Globales.

La comparación entre los resultados del modelo global muestran que la altura significativa así determinada resulta en buena concordancia con tanto las determinaciones altimétricas satelitales como también de boyas amarradas.

En general, las variables provistas por los Modelos Globales en un nodo determinado son las siguientes:

- Intensidad del viento
- Dirección del viento
- Altura de ola (H_s), periodo medio y dirección de propagación para el espectro resultante.
- Altura de ola (H_s), periodo medio y dirección de propagación para el espectro de olas generadas localmente por vientos (wind sea).
- Altura de ola (H_s), periodo medio y dirección de propagación para el espectro de olas oceánicas (*swell*, olas que se propagan fuera de su área de generación).
- Período de pico (T_p) del espectro resultante

Un aspecto importante que surge de lo expuesto es que la caracterización del estado del mar permite discriminar entre olas generadas localmente por el viento (olas locales o wind sea), de aquéllas que se propagan fuera de su región de generación, con frecuencia en áreas lejanas (olas oceánicas o swell). Otro aspecto importante es que cada valor de ola (caracterizado por variables espectrales como la altura significativa y el período medio) se halla asociadas a una dirección de propagación. En virtud de las técnicas para su generación, la base de datos resulta homogénea en calidad, lo que favorece su tratamiento estadístico. Finalmente ofrece la posibilidad de su extensión futura (y bajo condiciones homogéneas) mediante la incorporación de nuevos períodos modelados.

En virtud de lo expuesto, tomando asimismo en consideración las características técnicas de los Modelos Globales utilizados, la calidad de los resultados, puede concluirse que la información indicada resulta apropiada para abordar la descripción de las características del oleaje en una región costera.

Es muy importante recalcar que la disponibilidad de una serie histórica de 10 o 20 años de calidad homogénea permite la caracterización del régimen de olas con un enfoque estadístico y particularmente (mediante la aplicación de modelos estadísticos adecuados) la cuantificación de eventos extraordinarios probables de ocurrir dentro de períodos de retorno más extensos que la duración de los registros.

MODELACION A ESCALA REGIONAL

Para el desarrollo de esta evaluación se aplicó el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore,) desarrollado en Delft University of Technology, versión 40.51. SWAN es un modelo numérico de tercera generación que permite estimar los parámetros del oleaje en regiones costeras basándose en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas $N(\sigma, \theta)$ [1].

En SWAN la ecuación se resuelve mediante un esquema implícito que es incondicionalmente estable, lo que permite escoger pasos de tiempo prolongados. El modelo está implementado en lenguaje FORTRAN.

CASO DE ESTUDIO

Playa Magagna, ubicada sobre el litoral atlántico de la provincia del Chubut, en las proximidades de la ciudad de Rawson (**Figura 1**), constituye un emplazamiento urbano costero de rápido desarrollo en tiempos recientes. Dadas las características geológicas del área y la amplitud de la marea astronómica (de hasta 5 m), la costa resulta particularmente vulnerable a la acción hídrica marina.

La necesidad de mitigar los efectos indicados mediante obras de ingeniería costera motivó que las autoridades provinciales abordaran la planificación y ejecución de las obras de control más convenientes.

La caracterización del clima de olas en el área costera próxima constituyó la primera fase del estudio, destinada a generar la información de base para evaluar los procesos físicos costeros y diseñar las obras de ingeniería más adecuadas.

Los datos de oleaje utilizados en este estudio fueron producidos por la empresa **ARGOSS** (Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services) y corresponden a la ubicación 44° 00' S y 63° 46' W entre el 1/1/96 y el 31/12/2005. La ubicación indicada se halla a

unos 125 Km al ESE de Playa Magagna. Los datos generados consistieron en una serie cronológica que abarca de 10 años con un intervalo de 3 horas.

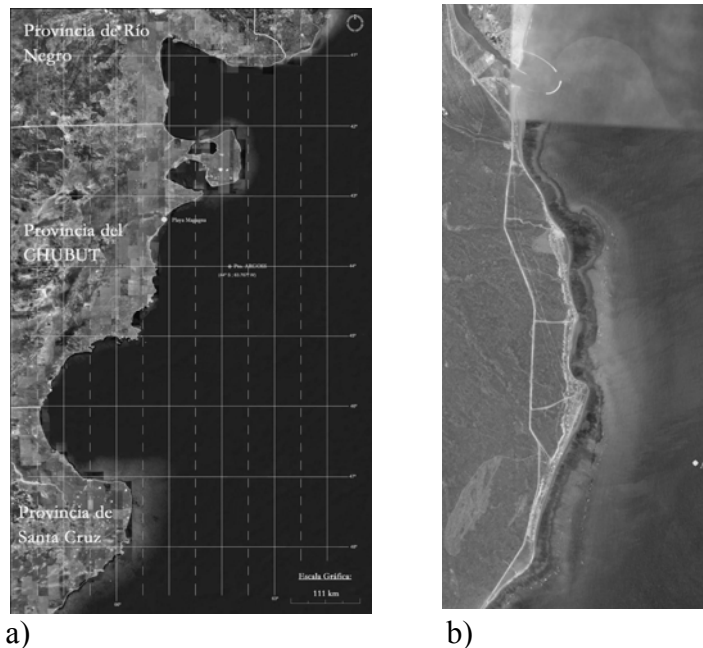


Figura 1.- Playa Magagna a) Ubicación general b) Detalle

Los datos han sido generados por el modelo Wavewatch III (Tolman, 2002) que es un modelo de oleaje de 3ª generación, desarrollado por la NOAA/NCEP (*National Oceanic and Atmospheric Administration / National Centers for Environmental Predictions*). El modelo basa en sus predecesores Wavewatch I desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft (Holanda) y Wavewatch II desarrollado en la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), aunque con importantes diferencias tanto en las ecuaciones de gobierno como en los métodos numéricos de resolución, entre otros.

El modelo SWAN fue aplicado para computar la propagación de olas desde el nodo costa afuera hasta el área costera de interés y así caracterizar el clima de olas en una posición sobre la isobata – 12 m frente al área en estudio, que se indica como A en la **Figura 1**.

La implementación del modelo en este caso requirió la construcción de tres mallas de cálculo de diferentes dimensiones, las cuales, acopladas convenientemente, permitieron propagar las olas desde el nodo del Modelo Global hasta la zona costera de Playa Magagna, utilizando un mapa digital con una descripción batimétrica detallada.

- La Malla 1 Abarca una extensa región oceánica de 212 x 236 Km, con $\Delta x = \Delta y = 1000$ m.
- La Malla 2 Representa un área de 100 Km x 80 Km, con $\Delta x = \Delta y = 400$ m.
- La Malla 3 Representa un área costera detallada, de 14,9 Km x 14,9 Km, y $\Delta x = \Delta y = 50$ m.

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.

Se realizaron alrededor de 580 simulaciones en cada una de las tres mallas anidadas, para distintas direcciones de incidencia, períodos y alturas de ola, de modo tal de abarcar todas las situaciones presentes en la serie de datos correspondiente a la posición costa afuera. El nivel del mar correspondió al Nivel Medio. Esto permitió establecer de manera muy detallada la función de transformación del oleaje desde la posición costa afuera hasta la posición costera indicada, para todo el rango de direcciones, períodos y alturas de ola. La dirección de propagación del oleaje se mide desde el eje +X en sentido antihorario, hacia donde se propagan las olas.

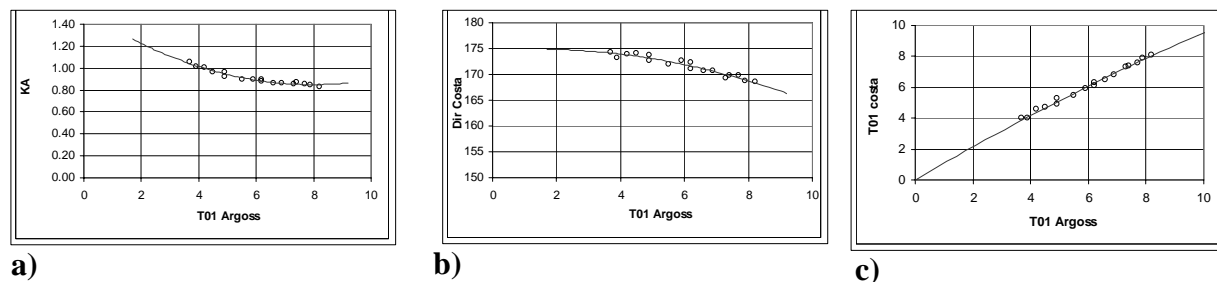


Figura 2.- Funciones de transformación de oleaje para la dirección E

La **Figura 2** muestra la transformación de olas para la dirección de procedencia E (180°). En **2a** se muestra el coeficiente de transformación de altura de ola K_A en función del período medio T_{01} , siendo $K_A = H_{\text{costa}}/H_{\text{ARGOSS}}$. La **Figura 2b** muestra la dirección en la posición costera y **2c** el período medio. Funciones de transformación equivalentes fueron determinadas para la totalidad de las direcciones de incidencia del oleaje que pueden llegar al área costera.

Estas funciones de transformación fueron aplicadas a continuación a la totalidad de datos que conforman la serie correspondientes al periodo 1996-2005 en la posición costa afuera ($44^\circ 00'S$, $63^\circ 46'W$). De esta manera se obtuvo una serie cronológica para el oleaje en la posición costera de la cual pudo extraerse la información estadística necesaria para el análisis del clima de olas en la costa además de un conjunto de datos sumamente valioso para el desarrollo de los estudios planificados.

OLAS LOCALES

La **Figura 3** muestra la distribución acumulativa de altura de olas locales (*wind sea*) resultante frente a Playa Magagna. El máximo valor resultó $H_s = 4.47$ m. El 90 % de las olas locales resulta menor que 2.23 m.

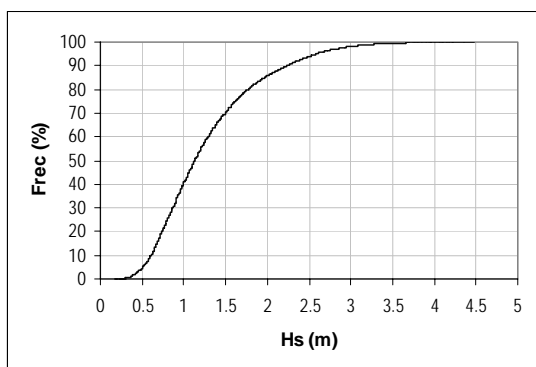


Figura 3.- Frecuencia acumulativa de altura de olas locales en Playa Magagna

Para su descripción estadística, los datos fueron agrupados en rangos de altura de ola cada uno conteniendo el 25% del total de datos (cuartiles). El 25% de las olas resultan inferiores a 0.80 m, el 50% inferior a 1.13 m y el 75% inferior a 1.62 m.

En el caso de olas locales generadas por viento (wind sea) sobre un total de 29.224 datos, 10.118 casos (casi 35%) alcanzan la costa.

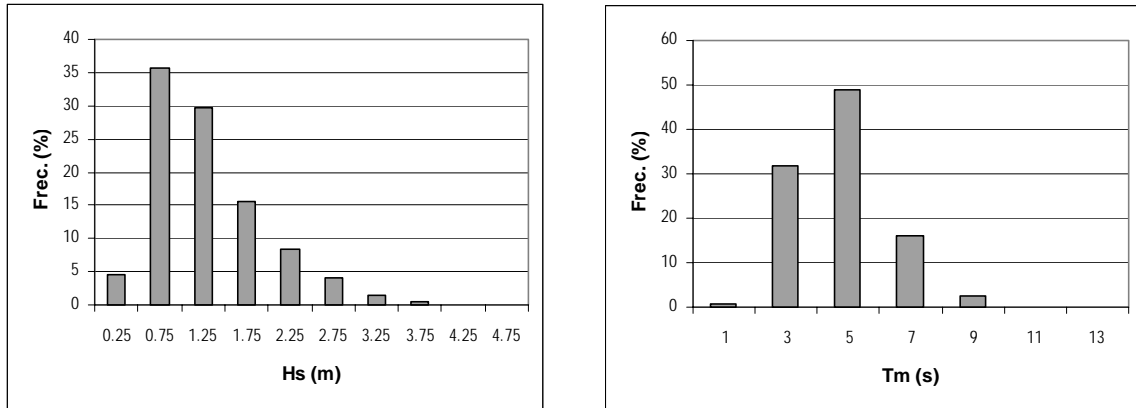


Figura 4.- Playa Magagna - Olas locales. Distribución de altura significativa y período medio de ola

La **Figura 4** muestra los histogramas de altura y período medio del oleaje. Los porcentajes son relativos al total de las olas que alcanzan la costa (10.118 casos).

La **Figura 5** muestra la distribución polar de frecuencia de altura de olas tanto en la posición costa afuera como en Playa Magagna. La altura de olas se ha clasificado según los cuartiles definidos previamente. Los vientos dominantes que en la región soplan desde el sector costero generan olas en la posición costa afuera, pero sólo un porcentaje reducido (35%) alcanza Playa Magagna. Los efectos de refracción por profundidad producen cambios en la dirección del oleaje.

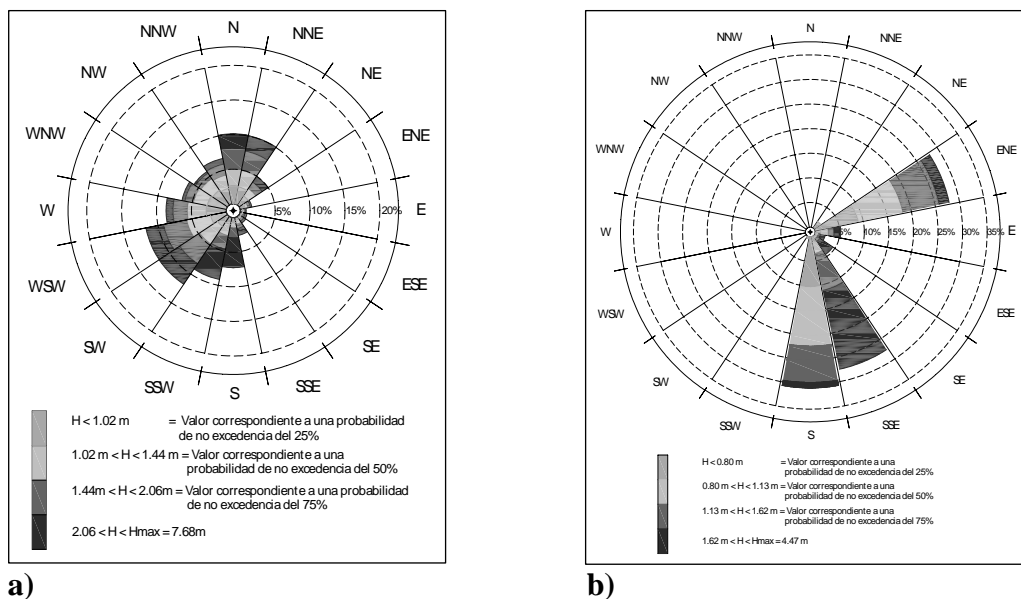


Figura 5.- Rosa de olas locales. a) Costa afuera b) Playa Magagna

OLAS OCEÁNICAS

La **Figura 6** muestra la distribución acumulativa de olas oceánicas en el área costera.

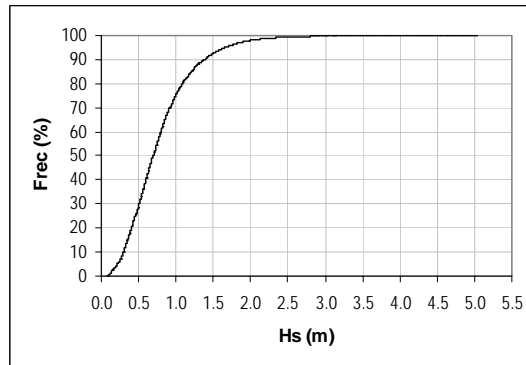


Figura 6.- Playa Magagna. Distribución acumulativa de altura de olas oceánicas.

La máxima altura resultó (para Nivel medio del mar) $H_s = 5.04$ m. El 90 % de las olas es menor que 1.4 m. En términos de cuartiles, el 25% de las olas resultan inferiores a 0.45 m, el 50% inferior a 0.7 m y el 75% inferior a 1 m. Sobre un total de 29.224, 20.740 resultaron olas oceánicas que llegan al área costera, lo que representa un 71%.

La **Figura 7** muestra la distribución por altura y período respectivamente de las olas oceánicas.

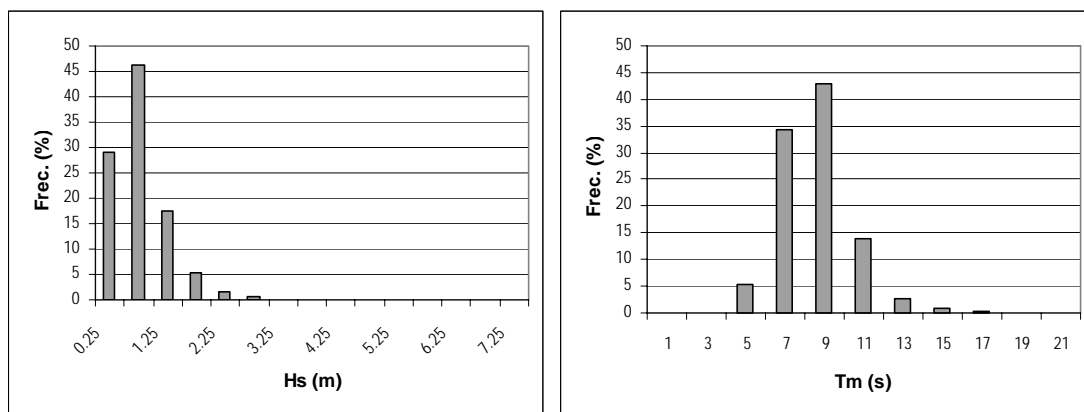
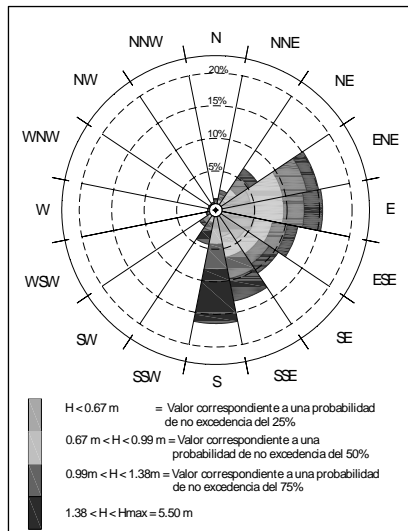
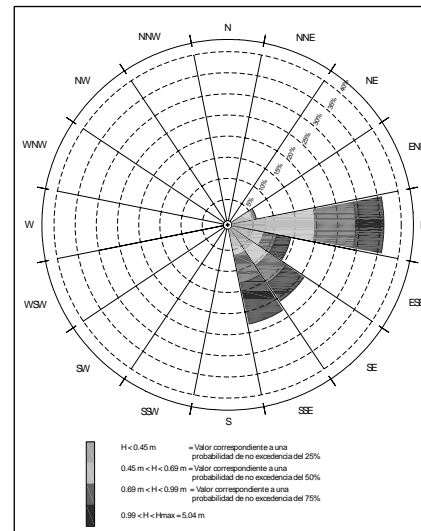


Figura 7.- Olas oceánicas. Distribución de altura significativa y período medio de ola

La **Figura 8** muestra la distribución polar costa afuera y en el área costera de las olas oceánicas. Los efectos de refracción por profundidad son marcados en el área costera y las olas dominantes llegan a la costa desde la dirección E, también con alguna contribución del SSE y SE.



a)



b)

Figura 8.- Rosa de olas oceánicas. a) Costa afuera b) Playa Magagna

OLAS EXTREMAS EN EL AREA COSTERA

Se efectuó la evaluación de las olas extremas probables en el área costera, separadamente para olas oceánicas y locales.

SERIE DE VALORES

Para realizar el ajuste se utilizó una muestra de la variable $x = H_s$ dada por las series constituida por todos los valores que superan un umbral (*Peak Over Threshold, POT*). Como umbral se escogió al menor de los máximos anuales de la serie disponible. Para las olas locales este valor fue 3,08 m (1996) y la serie se conformó de 31 valores. La serie de olas oceánicas estuvo constituida por los 30 valores que superaron o igualaron 2,37 m (1999).

FUNCION DE DISTRIBUCION

Para la descripción de valores extremos de oleaje es habitual el uso de las funciones de Gumbel y de Weibull, en las que F es la probabilidad de excedencia y x el valor de la variable. En este caso se utilizó la primera de ellas:

$$F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x - \mu))) \quad [2]$$

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

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS FUNCIONES

Para la estimación de los parámetros de ajuste de la función [2] para las series de datos correspondientes, se aplicaron algoritmos numéricos basados en técnicas estadísticas, como lo es el Método de Máxima Verosimilitud.

La bondad del ajuste fue 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:

$$D = \text{máx} |S(x) - F(x)| \quad [3]$$

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.

VALORES EXTREMOS PROBABLES

En cualquiera de los casos una vez establecida 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:

$$x = F^{-1}(P) \quad [4]$$

En el caso de la distribución de Gumbel resulta:

$$x = \mu + \gamma \left[-\ln(P') \right]^{\beta} \quad [5]$$

Siendo $P' = 1/\lambda Tr$
 $\lambda = N/L$
 $N = \text{número de datos de la serie}$
 $L = \text{cantidad de años que abarca el registro}.$

λ es un factor de ajuste que representa un valor promedio del número de eventos al año. Debe tenerse en cuenta que el período de retorno Tr se relaciona con la probabilidad según $Tr=1/P$.

RESULTADOS

Los parámetros resultantes para los ajustes de las series se muestran en la **Figuras 9 y 10**, conjuntamente con la distribución teórica y la empírica.

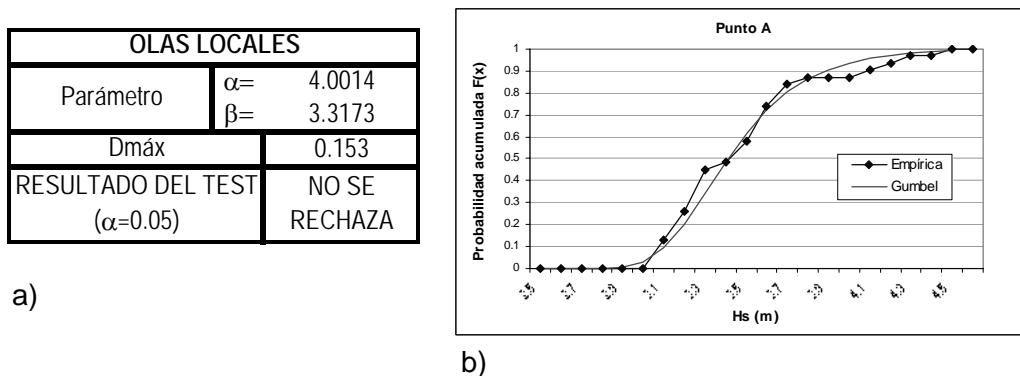
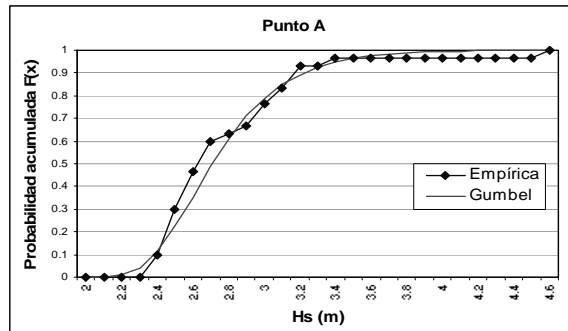


Figura 9.- Olas locales. a) Parámetros de ajuste. b) Test de bondad

OLAS OCEANICAS	
Parámetro	$\alpha=$ 3.7066
	$\beta=$ 2.6108
Dmáx	0.153
RESULTADO DEL TEST ($\alpha=0.05$)	NO SE RECHAZA



a)

b)

Figura 10.- Olas Oceánicas. a) Parámetros de ajuste. b) Test de bondad

Resta aclarar que dado que este análisis fue realizado con series de datos constituidas por 10 años de registro (1996-2005). Los valores estimados para períodos de retorno prolongados, como es el caso de $T_r=50$ y $T_r=100$, se encuentran asociados niveles de incertidumbre elevados, propios de la naturaleza del problema analizado.

Para establecer el intervalo de confianza en el caso del ajuste mediante la función de Gumbel, se utilizó la expresión (Goda, 1988):

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

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:

$$y_r = F^{-1} \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \quad [7]$$

siendo λ el número de eventos por año. La **Tabla 1** muestra los resultados del el ajuste de datos efectuado y el intervalo de confianza estimado a partir de [6].

Tabla 1.- Valores extremos de altura de ola en el área costera

Tr (años)	Olas Locales		Olas Oceanicas	
	Hs(m)	$\sigma[xR]$	Hs(m)	$\sigma[xR]$
2	3.75	0.13	3.07	0.15
5	3.99	0.19	3.33	0.22
10	4.17	0.25	3.52	0.27
20	4.35	0.30	3.71	0.33
50	4.58	0.38	3.96	0.41
100	4.75	0.43	4.15	0.47

CONCLUSIONES / RECOMENDACIONES

Una serie de 10 años de datos generados por un Modelo Global de Olas fue utilizada como entrada para una modelación a escala regional, y permitió establecer las propiedades del oleaje en las proximidades de Playa Magagna, una franja costera que requiere de intervenciones para mitigar procesos erosivos de origen marino.

Entre otras propiedades del oleaje, fueron determinadas las distribuciones direccionales, la distribución de altura y período y valores probables a largo plazo. Esta información es requerida tanto para las evaluaciones de transporte de sedimentos, evolución morfológica de la línea de costa así como para el diseño de estructuras de control.

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.

Aunque la modelación matemática no reemplaza a la medición directa, 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.

Los resultados de los Modelos Globales son validados con observaciones de boyas y determinaciones satelitales, no obstante lo cual la medición directa en una posición específica por plazos relativamente reducidos permitiría aumentar la confianza en los resultados.

Una serie de datos generada mediante modelos matemáticos y respaldada por mediciones locales de corto plazo, tiene la doble ventaja de la confiabilidad y la extensión en el tiempo, con el consiguiente beneficio para las aplicaciones de ingeniería a las que va destinada.

La resolución espacial y temporal de los resultados resulta especialmente apta para la realización de estudios vinculados con transporte de sedimentos en áreas costeras y estudios portuarios. Como ejemplo pueden citarse el análisis de condiciones operativas de un puerto, el dimensionamiento de estructuras, la planificación de actividades según las variaciones estacionales, evaluación del transporte litoral de sedimentos en áreas costeras, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services (2007). "Overview of Wave Climate Information Available from ARGOSS"

Delft University of Technology (2007). "SWAN Cycle III version 40.51AB Implementation Manual"

Goda, Y. 1988, "On the Methodology of Selecting Design Wave Heights". *ASCE, Proc 21st International Conference on Coastal Engineering.*