

DIFRACCIÓN DE OLAS ALEATORIAS EN PUERTOS

Pablo A. Tarela
Instituto Nacional del Agua
C.C. 21 (1802) Aeropuerto de Ezeiza, Buenos Aires, Argentina
e-mail: ptarela@fi.uba.ar

RESUMEN

Se presenta un modelo matemático para la determinación de la agitación interna en puertos debida a la acción de oleaje irregular (olas de viento). El mismo está basado en la generalización del modelo monocromático de Berkhoff e incorpora una representación en componentes espectrales, pudiéndose simular los efectos combinados de difracción, reflexión y refracción. Se describen detalles de la implementación del modelo, en particular acerca de la discretización del espectro de olas, el mallado del recinto bajo estudio y el costo computacional. Finalmente, se ejemplifican sus alcances a través de la aplicación en el puerto de Rawson (Patagonia Argentina).

ABSTRACT

A mathematical model for computing the wave pattern within a harbor due to irregular (wind) waves is presented. It is based on the generalization of the Berkhoff's monochromatic model through a spectral modes representation. Combined diffraction, reflection and refraction can be simulated. The details on model implementation, wave spectrum discretization and computational cost are described. An application of the proposed methodology to study harbor layout optimization is shown.

INTRODUCCIÓN

Las olas generadas por viento son de crucial importancia a la hora de diseñar un puerto. Las olas de viento que alcanzan la región costera pierden gran parte de su energía en el área adyacente a la costa, disipándola naturalmente a través de la fricción contra el fondo, la percolación o la rotura, y artificialmente mediante la acción de estructuras de protección. Sin embargo, parte de la energía incidente se propaga hacia el interior del puerto, produciendo problemas en la navegación y la operación portuaria.

La magnitud del patrón interno de olas dentro del puerto depende tanto de las características del oleaje incidente como del diseño portuario. En muchos casos prácticos, la interacción entre el oleaje y las estructuras artificiales se estudia con técnicas de simulación numérica, que van desde los modelos simples de teoría de rayos [1,2] hasta elaborados códigos en el terreno de CFD [3,4].

Uno de los modelos más útiles y aplicados en el campo de la ingeniería portuaria es el basado en la ecuación de taludes suaves de Berkhoff [5]. El mismo permite la resolución simultánea de los efectos de refracción, reflexión y difracción, a través del planteo de un problema elíptico. En los bordes físicos del dominio de interés (generalmente las estructuras de abrigo portuario) se imponen condiciones de absorción/reflexión. En el caso de bordes abiertos resulta conveniente descomponer la solución como la superposición de un potencial incidente y un potencial de scattering, donde este último debe satisfacer la denominada condición de radiación de Sommerfeld.

El modelo de Berkhoff ha sido validado [6] y usado en numerosos estudios de investigación y aplicaciones prácticas [7,8]. En particular, Booij [9] analizó su performance en problemas con relativamente grandes pendientes del fondo, y comparó sus predicciones con un modelo 3D, obteniendo un acuerdo satisfactorio entre ambos a pesar de que una de las hipótesis básicas no se cumplía.

Un esquema de resolución numérica del modelo planteado fue implementada en el código *DIFRAC* por el Programa de Hidráulica Computacional del INA [10,8], usando el método de los elementos finitos en la zona interna (zona de difracción-refracción) y el método de los elementos de contorno para la zona externa (zona de radiación). Se utilizaron elementos finitos 2D triangulares. Por razones de precisión el tamaño medio de los elementos debe ser una fracción de la menor longitud de onda a modelar: un mínimo de 5 nodos por longitud de onda ha sido establecido como un umbral conveniente [11]. Detalles adicionales sobre la formulación del modelo matemático, la implementación del esquema numérico y el tratamiento de las condiciones de contorno se pueden encontrar en las referencias [11,12].

SIMULACIÓN DE OLAS ALEATORIAS

La principal limitación del modelo de Berkhoff es que está desarrollado para una onda monocromática, la cual en la práctica es sólo una cruda aproximación de las olas generadas por viento [13,14,15]. Este tipo de olas se puede representar mucho mejor mediante una distribución espectral bivaluada en términos de la frecuencia y la dirección. De hecho, para el caso de olas de mar o swell (olas que se propagan fuera de su área de generación) algunas ondas irregulares que viajan hacia la costa pueden ser reproducidas analíticamente a través de una serie de espectros útiles para aplicaciones prácticas [13].

Entonces, si los efectos no lineales son despreciables (o no considerados en regiones localizadas como la zona de rompientes) el modelo de Berkhoff puede ser interpretado como una representación del problema de transformación del oleaje en el dominio de las frecuencias, y la solución para el caso general de oleaje irregular su puede obtener por superposición, apelando al carácter lineal de la ecuación básica del modelo [16,17,18]. En otras palabras, los espectros se discretizan y se efectúan los ensayos (con el código *DIFRAC*) para todas las combinaciones de frecuencias y direcciones, obteniéndose el resultado final mediante la suma ponderada de las soluciones particulares. El peso de cada solución particular se determina a partir de la energía inicial de cada componente de ola [15,19]. Obviamente, esto hace crecer fuertemente el tiempo de cálculo necesario para simular un escenario, ya que normalmente se requieren del orden de 100 corridas monocromáticas para obtener un resultado.

La distribución espectral de energía de ola se suele descomponer como:

$$S(f, \theta) = S(f)G(\theta, f) \quad (1)$$

con $S(f, \theta)$ la densidad de energía para la frecuencia f y la dirección θ .

Existen diversas formas analíticas de las funciones de distribución S (espectro de frecuencias) y G (función de dispersión direccional) en (1), de las cuales se muestran a continuación las que se utilizaron en la aplicación del modelo presentada en la sección siguiente. Para el espectro de frecuencia se utilizó la expresión de Bretschneider-Mitsuyasu [20]:

$$S(f) = A f^{-5} \exp(-B f^{-4}) \quad (2)$$

donde

$$\begin{aligned} A &= 0.257 H_s^2 T_s^{-4} \\ B &= 1.03 T_s^{-4} \end{aligned} \quad (3)$$

siendo H_s la altura significativa y T_s el período de la ola significativa. Se asume que este último parámetro guarda una relación con el período del pico espectral (T_p) de la forma $T_s = T_p / 1.05$

Para el espectro de direcciones se aplicó la expresión de Mitsuyasu [20]:

$$G(\theta, f) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (4)$$

El parámetro s se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$s = s_{\max} \left(\frac{f}{f_p} \right)^n \quad (5)$$

donde f_p es la frecuencia pico ($f_p = 1/T_p$) y

$$n = \begin{cases} 5 & \text{si } f \leq f_p \\ -2,5 & \text{si } f > f_p \end{cases} \quad (6)$$

y para s_{\max} Goda (1991) propone un valor de 10 para olas de vientos locales, 25 para swell con corta distancia de decaimiento y 75 para swell con larga distancia de decaimiento.

CASO DE ESTUDIO

Aquí se ejemplifica la metodología presentada con su aplicación a la optimización del diseño de remodelación y ampliación del puerto de Rawson (Patagonia Argentina). En una primera etapa, el proyecto comprende la prolongación de la escollera sur existente y la construcción de una nueva escollera al norte de la desembocadura del río. El objetivo del estudio en su conjunto fue caracterizar la ola de diseño de las obras de abrigo y evaluar la capacidad de protección que las obras proveen al interior del puerto frente a diferentes configuraciones de abrigo (optimización del diseño portuario).

El régimen de mareas en la región es semidiurno. A la marea astronómica se suma, en el caso de temporales, la acción meteorológica, la que se ha estimado en 1.05 m con una recurrencia de 50 años [21]. Esta situación extrema se utilizó para el diseño de las obras de abrigo.

A los efectos de disponer de una descripción del clima de olas se utilizó un análisis efectuado por OCEANOR [22], a partir del Archivo Global de Parámetros de Ola de la UK Meteorological Office, generados mediante el Modelo Global de Olas, y calibrados mediante mediciones altimétricas de los satélites Geosat (1986/89) y Topex/Poseidon (1992/98). Se utilizaron datos correspondientes a dos nodos del Modelo Global de Olas, ambos ubicados hacia el cuadrante SE del puerto de Rawson. Se eligieron tales ubicaciones por que se encuentran en aguas relativamente profundas (alrededor de 80 m) donde la batimetría local es muy suave, y ya que definen una dirección con el puerto aproximadamente coincidente con la de propagación de las olas más frecuentes.

Como conclusión general del análisis de OCEANOR, surgió que la altura significativa media mensual es muy uniforme a lo largo del año. Las olas más frecuentes (56%) presentan una altura significativa de 1 a 2 m y están asociadas a un período medio de 5 a 6 s. El período de pico espectral, T_p , de estas olas es de 6 a 8 s. La información disponible incluyó análisis direccional, tormentas, swell y estadística de valores extremos de alturas de ola para recurrencias de 1 a 100 años [21].

Para correr el modelo de transformación del oleaje en el interior del puerto se debe dar el clima de olas en la boca del puerto, de acuerdo a lo mencionado anteriormente. Para ello se determinó la propagación de olas desde aguas profundas (datos satelitales) hasta la entrada al puerto y el pie de las obras de abrigo. Los cálculos se realizaron mediante un modelo de refracción de olas, que es una herramienta adecuada para resolver la propagación en regiones extensas, donde los procesos físicos dominantes permiten despreciar los efectos de reflexión y difracción [21]. Se tuvo en cuenta el efecto de rompiente que genera la restinga litoral (plataforma rocosa de desarrollo aproximadamente horizontal), a través del criterio de Miche [21]. Los cómputos de refracción se realizaron sobre mallas anidadas y para ondas monocromáticas, habiéndose considerado que la altura de ola en aguas

profundas representa la altura significativa de una distribución espectral. Los resultados se muestran en la tabla I.

Tabla I – Condiciones de borde en la boca del puerto

Escenario	Aguas Profundas			Borde Modelo Matemático	
	Dirección	H_s (m)	T_s (s)	H (m)	Dirección (°)
2	SE	6.6	16	6.0	330
7	NE	4.8	7	4.45	10
8	ENE	5.2	10	4.20	0

Las direcciones de procedencia de las olas se miden en sentido antihorario desde el E.

La distancia media entre nodos para las diferentes redes de elementos finitos se tomó del orden de los 3 m, que resulta suficiente para representar las oscilaciones más significativas. La cantidad de elementos por red osciló entre 80,000 y 86,000.

El borde del dominio de cálculo presenta distintas propiedades de reflexión del oleaje incidente: en este caso se determinaron distintos coeficientes de absorción para escolleras de bloques, espigones de tablestacado, playas y muelles sobre pilotes, mientras que los bordes abiertos (río Chubut y Mar abierto) resultan transparentes para las olas entrantes y de radiación para las olas salientes.

Para cada escenario estudiado se construyó el espectro de frecuencia y direcciones, el cual fue discretizado adecuadamente. Las direcciones mostradas en la tabla I se tomaron como representativas de la dirección principal de propagación utilizada en el proceso de discretización del espectro incidente. El mismo se truncó en 30° en forma simétrica respecto de la dirección principal de propagación, es decir, 15° a cada lado de ella. El proceso de discretización se realizó tomando 3 direcciones: la principal (informada en la tabla I), y las dos restantes a $\pm 10^\circ$ de la misma.

Para la discretización en frecuencia se tomó el intervalo $0.5f_p \leq f \leq 3f_p$, el cual asegura la representación de la mayor parte de la energía transportada [19]. Los pasos Δf utilizados surgen de dividir cada intervalo en 12 fracciones, cada una asociada a una componente monocromática. Nótese que, de la combinación de intervalos de frecuencia y dirección, resultan 36 corridas monocromáticas del modelo para simular la ola de 50 años por cada escenario y por cada configuración estudiados.

Ahora bien, debido al truncamiento en direcciones y frecuencias que se realiza sobre el espectro incidente, parte de la energía quedaría desechada. Para evitar este efecto se trabajó en forma conservativa, prorrateando la energía perdida en el proceso de discretización a las componentes monocromáticas propagadas, de forma tal que:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta df = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^I S(f_j, \theta_k) \Delta\theta_k \Delta f_j \quad (7)$$

donde la integral representa la energía del espectro y la doble suma se extiende sobre todas las componentes monocromáticas en que se discretizó el espectro, siendo $\Delta\theta_k$ el paso direccional ($I=3$ y $J=12$ en este caso).

Entre los resultados relevantes de la simulación se cuentan los patrones de altura máxima de ola en el interior del recinto portuario. Para las distintas configuraciones y escenarios de clima de olas estudiados, los mismos resultan relativamente suaves y con ausencia de zonas de resonancia. No obstante, en cada caso se observa una "lengua" definida por las envolventes de máximos de altura de ola que penetra desde la boca hacia el interior del recinto portuario (figuras 1 y 2).

En general, la agitación más intensa se produce en la boca del puerto, y en los primeros 200 m del canal de navegación (aproximadamente, dado que su posición difiere para cada configuración). Luego, las "lenguas" definidas por las envolventes de máximos de altura de ola tienden a recostarse sobre la escollera sur, y presentan diferente grado de incidencia sobre la zona del futuro muelle.

Para el caso de la configuración Preliminar 1 y el escenario 2, se observa un patrón de difracción significativo en el morro sur, que, conjuntamente con la presencia del morro norte, produce un ingreso de energía de ola al recinto portuario en sentido E-W. Ambas escolleras absorben energía incidente. En el caso de la escollera sur, enfrentada a las olas que inciden desde la boca del puerto, la reflexión incrementa las alturas en sus adyacencias. En la escollera norte se observa una amplia zona por debajo de la altura 0.50 m, mientras que en el muelle proyectado las alturas están por debajo de 1.00 m.

En el caso del escenario 7, el frente ingresa en forma "directa" desde la boca del puerto hasta interceptar la escollera sur, por lo que se produce un incremento significativo de la altura de ola en la zona SE del interior del recinto. La reflexión parcial que tiene lugar en la escollera sur produce la penetración de olas de mayor amplitud en la desembocadura del río.

En el caso del escenario 8, se observa una similitud cualitativa con el caso anterior (escenario 7), básicamente porque la dirección de ingreso de los frentes desde el exterior cambia poco y la amplitud a la entrada es similar. Sin embargo, como el efecto de difracción en el morro sur es pequeño, y la dirección de entrada es prácticamente paralela al extremo de la escollera sur, la reflexión constructiva decae y las alturas de ola en esa zona son algo menores a las del caso anterior.

La figura 3 presenta los resultados para la configuración Preliminar 3. En el caso del escenario 2, la altura de ola en el interior del puerto se presenta en casi todos los contornos por debajo de 1.00 m. Una excepción la constituye el lado N del espigón que delimita la playa interna del recinto, donde las alturas están entre 1.50 y 2.00 m. La reflexión parcial en la escollera sur es poco significativa. Sin embargo, para el caso del escenario 7, la penetración del patrón de olas resulta menos obstaculizado que en el caso anterior. Aunque la altura de ola a la entrada es menor que en el caso de la configuración anterior, en el interior la agitación es marcadamente superior, como se observa en la figura respectiva. En el caso del escenario 8 la situación resulta intermedia entre los dos casos anteriores.

La figura 4 muestra la agitación para la configuración Preliminar 4. Para el escenario 2, la modificación en la forma del escollero del puerto introducida en este caso produce una reducción global de la amplitud máxima esperable en el interior del puerto, respecto del mismo escenario en las configuraciones anteriores. Lo mismo ocurre para el escenario 7 respecto de la configuración Preliminar 3. Finalmente, y como en las configuraciones precedentes, el ensayo con el escenario 8 produce resultados intermedios entre los otros dos escenarios. En particular, la zona del muelle no supera 1.00 m de amplitud para esta situación.

CONCLUSIONES

Se presentó la generalización computacional del modelo monocromático de Berkhoff al caso de oleaje irregular en zonas costeras e interiores portuarios. La misma está basada en la superposición de modos que se pueden calcular independientemente unos de otros. Ofrece una buena aproximación ingenieril al problema de la agitación portuaria, tradicionalmente cuantificado considerando oleaje monocromático.

Se mostraron detalles de la implementación del método. En particular, acerca de las propiedades de discretización del espectro de olas, el mallado del recinto bajo estudio y el costo computacional.

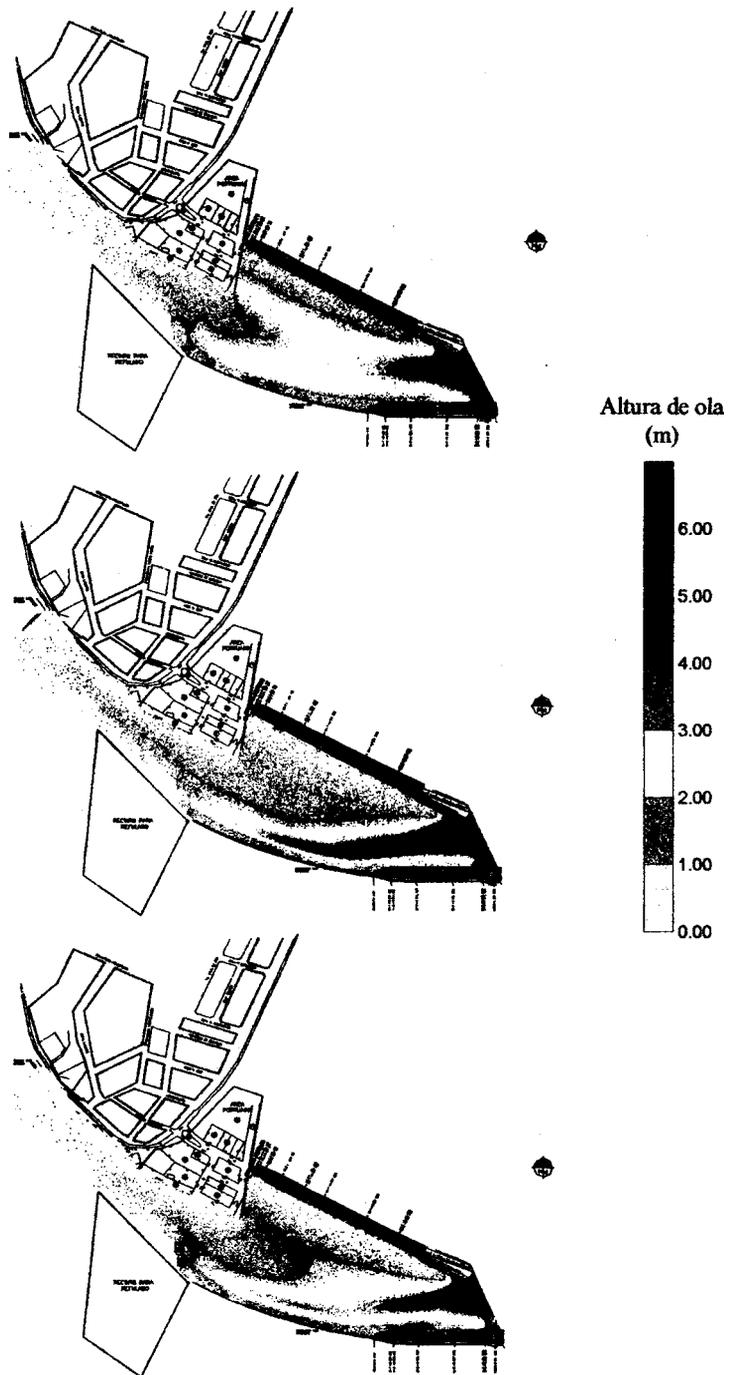
La metodología se ejemplificó con su aplicación a la optimización del diseño del puerto de Rawson, donde se estudiaron diferentes escenarios de climas de olas y configuraciones. En el primer caso, los escenarios se definieron a priori a través del uso de información satelital y modelos simples de transformación de oleaje. En el segundo, del balance entre las propiedades de abrigo (surgidas del presente modelo) y la viabilidad de las estructuras proyectadas surgió la forma óptima de la nueva configuración portuaria (orientación de la boca del puerto y del canal de navegación).

RECONOCIMIENTOS

Los resultados con los que se ha ejemplificado el modelo desarrollado, referidos al puerto de Rawson, corresponden al estudio de modelación matemática llevado a cabo para la Empresa Dragados y Obras Portuarias S.A. (DYOPSA), Expte. INA 116.011/00 LHA. El presente trabajo ha sido financiado parcialmente a través del proyecto mencionado.

REFERENCIAS

- [1] Vionnet, C.A. (1988), *REFRAC - Un modelo matemático para el cálculo de la refracción y bajo de una onda monocromática*, Informe INCyTH LHA 064-02-87.
- [2] Massel, S.R. (1999), *Fluid Mechanics for Marine Ecologists*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [3] Yang, C., Löhner, R., Noblesse, F. and Huang, T.T. (2000a), *Calculation of ship sinkage and trim using unstructured grids*, Proc. ECCOMAS 2000, Barcelona.
- [4] Yang, C., Noblesse, F., Löhner, R. and Hendrix, D. (2000b), *Practical CFD applications to design of a wave cancellation multihull ship*, 23rd Symp. on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil.
- [5] Berkhoff, J.C.W. (1976), *Mathematical models for simple harmonic linear water waves. Wave diffraction and refraction*, Delft Hydraulic Laboratory Report No. 163.
- [6] Berkhoff, J.C.W., Booy N. and Rader A.C. (1982), *Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves*, Coastal Eng.ineering, vol. 6, No. 3, pp. 255-279.
- [7] Houston, J.R. (1978), *Interaction of tsunamis with the Hawaiian islands calculated by a finite element model*, J. Phys. Oceanography, vol. 8, pp. 93-102.
- [8] Cavaliere, M.A., Menéndez, A.N. y Castellano, R.D. (1992), *Estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto mediante simulación numérica*, Rev. Int. Mét. Num. en Ing. 8, 4.
- [9] Booij, N. (1982), *Gravity waves on water with non-uniform depth and current*, Report No. 81-1, Delft University of Technology.
- [10] Vionnet, C.A. y Menéndez, A.N. (1986), *Simulación numérica de olas para el diseño de puertos*, XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pablo, Brasil.
- [11] Vionnet, C.A. (1987), *Difracción-refracción combinadas en ondas de agua*, Informe INCyTH LHA 064-02-87.
- [12] Berkhoff, J.C.W. (1974), *Linear wave propagation problems and the finite element method*, Delft Hydraulics Laboratory Publication No. 124.
- [13] Goda, Y. (1985), *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokyo Press, Tokio, 323 pp.
- [14] Vincent, C.L. and Briggs, M.J. (1989), *Refraction-diffraction of irregular waves over a mound*, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., vol. 115, No.2, pp. 269-284.
- [15] Souza Rego, V. and Melo, E. (1995), *Comparison of monochromatic and spectral wave propagation of the coast of Rio de Janeiro*, International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Rio de Janeiro.
- [16] O'Reilly, W.C. and Guza, R.T. (1991), *Comparison of spectral refraction and refraction-diffraction wave models*, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., vol. 117(3), pp. 199-215.
- [17] Panchang, V.G., Wei, G., Pierce, B.R. and Briggs, M.J. (1990), *Numerical simulation of irregular wave propagation over a shoal*, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., vol. 116(3), pp. 324-340.
- [18] Tarela, P. and Menéndez, A. (2001) *Numerical simulation of the wave pattern within a harbour due to ship waves*, submitted to International Journal of Computational Fluid Dynamics.
- [19] Castellano, R.D. (1998), *Experiencias sobre propagación de olas aleatorias mediante simulación numérica*, Informe INA LHA S4-040-98.
- [20] Goda, Y. (1991), *Random waves and spectra*, in *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, vol. 1, ed. J.B. Herbich, Gulf Pub. Co., Houston.
- [21] Castellano, R.D. y Tarela, P.A. (2000), *Remodelación del Puerto de Rawson, 1^{era} Etapa - Estudio mediante modelación matemática de propagación de olas*, Informe INA LHA 194-01-00.
- [22] Oceanor (2000), *Directional Wave Statistics Offshore Rawson, Argentina*, Oceanographic Company of Norway ASA..



*Figura 1 - Alturas de ola para la configuración Preliminar 1.
Escenario 2 (arriba), 7 (centro) y 8 (abajo).*

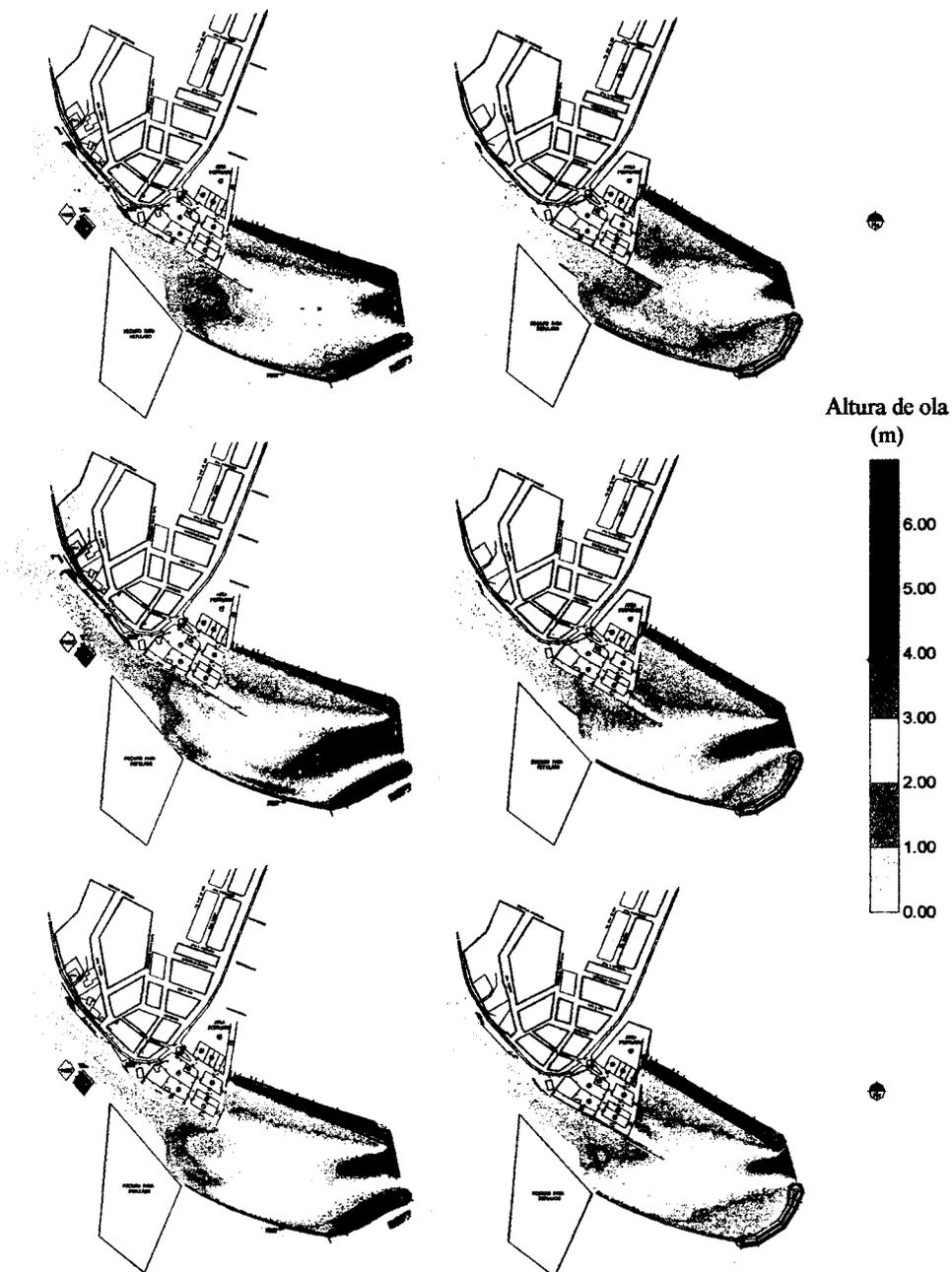


Figura 2 - Alturas de ola para la configuración Preliminar 3 (izquierda) y Preliminar 4 (derecha). En ambos casos se muestran los escenarios 2 (arriba), 7 (centro) y 8 (abajo).