

AGITACIÓN POR OLAJE EN EL PUERTO DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA: MÉXICO MEDIDAS DE ATENUACIÓN

Modesto Ortiz Figueroa

Centro de investigación Científica y de educación Superior de Ensenada, B. C.

Departamento de Oceanografía Física, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada

Tel. (646) 175-0500 Ext. 24045, ortizf@cicese.mx

Ensenada, Baja California, CP 22860, México

RESUMEN

En este trabajo se analiza el problema de agitación por oleaje en el Puerto de Ensenada, Baja California, México, y se proponen medidas de atenuación que a su vez se analizan mediante la simulación del oleaje en el puerto con un modelo numérico de propagación de olas para oleaje proveniente tanto del noroeste como del suroeste. Las medidas de atenuación que se proponen son: La prolongación de la escollera principal con una escollera impermeable de ~400 metros de longitud o la prolongación de la escollera principal con una escollera permeable de ~400 metros de longitud con 70% de impedancia en la altura del oleaje que se transmite.

ABSTRACT

The problem of wave agitation in the harbor of Ensenada, Baja California, México, as well as solutions for wave attenuation in the harbor, are analyzed by means of the numerical simulation of waves propagating from two directions, northwest and southwest. The solutions proposed here are: The increasing of ~400 meters in the length of the main breakwater, or the increase of ~400 meters in the length of the main breakwater by means of a permeable breakwater, with 70% of impedance for the transmitting wave height.

Palabras clave: Oleaje, difracción, Escolleras, Puerto de Ensenada.

Keywords: Wind waves, diffraction, breakwaters, Ensenada harbor

INTRODUCCIÓN

El puerto de Ensenada, Baja California, se localiza en la Bahía de Todos Santos en el Noroeste de México (Figura 1). A pesar de que es el puerto de altura más importante en la región, el oleaje en su interior ha hecho que los navegantes lo caractericen como "un puerto muy agitado" (comunicación personal, Director de Astilleros, 2008). Este efecto no deseado del oleaje se debe a que se han construido nuevas escolleras a demanda de necesidades específicas que han sobrepasado las expectativas del desarrollo del puerto a largo plazo. La cronología de las escolleras del puerto explica el problema de agitación por oleaje, motivo por el que en este trabajo se describe muy brevemente la cronología de cuatro de sus escolleras y se discute el efecto de éstas en el oleaje que se propaga al interior del puerto. Una cronología completa tanto de las escolleras como de las variaciones morfológicas del Puerto de Ensenada entre los años 1935 y 2001 se encuentra en Sepúlveda (2003).

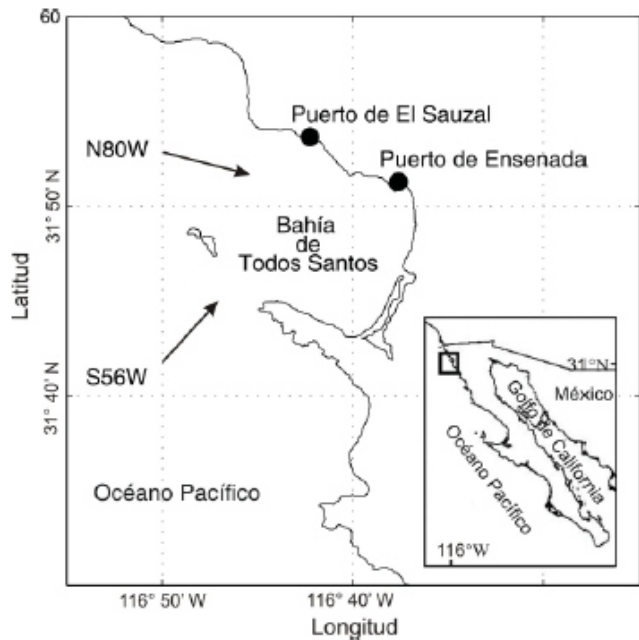


Figura 1. Localización del puerto de Ensenada, Baja California y vectores que muestran las dos direcciones de oleaje que se emplearon en este trabajo para el modelo de propagación de olas.

Cronología de las escolleras del puerto

La escollera principal o rompeolas del Puerto de Ensenada, con una longitud de 1650 metros (Figura 2), se construyó entre los años 1951-1955 con rocas que fueron extraídas del cerro "El Vigía", aledaño al puerto. En esos años no se construyeron escolleras adicionales que delimitaran el perímetro del puerto y consecuentemente la agitación por oleaje al interior era considerable debido a que la escollera principal solamente protegía a las embarcaciones del embate directo de las olas, permitiendo que el oleaje difractado al final de la escollera entrara sin obstáculos al interior.

La segunda escollera data del año 1955. Esta escollera inició su operación como un espigón de escasos 150 metros de longitud para apoyar las maniobras de la empresa cementera. El espigón operó sin cambios en su longitud hasta el año 1978. La prolongación del espigón hasta su longitud actual culminó en el año 1980.

Aun cuando esta escollera delimitó parcialmente el perímetro del puerto, ésta se construyó afuera del abrigo de la escollera principal, permitiendo que una fracción considerable del oleaje entrara sin obstáculos e incidiera directamente en el área de operaciones de la empresa cementera. En lugar de prolongar la escollera principal para dar abrigo a la escollera secundaria, se construyó en el año 1993 una tercera escollera o espolón orientado hacia el interior del puerto. Sobre decir que tanto la segunda escollera como el espolón se construyeron para satisfacer las necesidades específicas de la empresa cementera, sin considerar su efecto en el resto del puerto.

A manera de ejemplo para ilustrar una configuración adecuada entre una escollera principal y una escollera secundaria se muestra el Puerto de El Sauzal (Figura 3), ubicado a escasos 8 kilómetros al noroeste del Puerto de Ensenada. En El Sauzal, la escollera principal abraja a la escollera secundaria para impedir que el oleaje se propague directamente al interior del puerto.



Figura 2. Imagen del puerto de Ensenada, Baja California, que ilustra la cronología de tres de sus escolleras: La principal data del año 1955 y se indica con el numero 1; la segunda escollera en el extremo Sur del puerto data del año 1980 y se indica con el numero 2 y, una tercera escollera o espolón, data del año 1993 y se indica con el numero 3. Imagen INEGI, noviembre, 1993.

A finales del año 2006 se construyó en la parte sur del Puerto de Ensenada una cuarta escollera de 320 metros de longitud, orientada hacia el exterior del puerto y paralela al canal de navegación, partiendo del extremo oeste de la segunda escollera. En la Figura 4 se muestra una imagen reciente del puerto en donde se indica la ubicación de la cuarta escollera.

Intuitivamente, considerando las leyes de incidencia y reflexión de ondas, se aprecia en la figura que la cuarta escollera reflejará al interior del puerto el oleaje proveniente tanto del noroeste como del suroeste. De hecho, a raíz de esta escollera se agudizó el problema de agitación por oleaje en el interior del puerto (comunicación personal, usuarios del puerto de Ensenada, 2008). Al igual que la segunda escollera, es evidente que la cuarta escollera se construyó para satisfacer necesidades específicas, sin considerar su efecto en el resto del puerto.

La solución para atenuar la agitación por oleaje en el Puerto de Ensenada ha sido y es la prolongación de la escollera principal de tal forma que ahora debe abrigar a la cuarta escollera, motivo por el que las medidas de atenuación que se proponen son:



Figura 3. Puerto El Sauzal, Baja California, donde se ilustra una configuración adecuada entre la escollera principal y la escollera secundaria. Imagen cortesía de Servicios Portuarios S.A. de C.V., junio, 2003.



Figura 4. Fotografía del puerto de Ensenada, Baja California, que muestra la cuarta escollera (4) en el extremo sur del puerto, construida en el año 2006, cuya longitud es de 320 m de longitud. Imagen DigitalGlobe, enero, 2008.

La prolongación de la escollera principal con una escollera impermeable de ~400 metros de longitud, o la prolongación de la escollera principal con una escollera permeable de ~400 metros de longitud con impedancia suficiente para atenuar sustancialmente la altura del oleaje que se trasmite. En este trabajo se analizan las escolleras propuestas en función de la atenuación del oleaje al interior del puerto de manera independiente al costo de construcción de las mismas.

El modelo de propagación de oleaje

El oleaje más frecuente en la Bahía de Todos Santos proviene del noroeste y las olas más altas se observan en invierno. Con menor frecuencia y de menor altura se observa oleaje del suroeste, principalmente durante el verano. En particular, el oleaje más energético observado frente a la escollera principal del Puerto de Ensenada tiene períodos de 12 a 16 segundos (Martínez y Nava, 1987), motivo por el que en el modelo de propagación de olas se considerará el período de 15 segundos como representativo del oleaje en el puerto.

En la proximidad del puerto y en el interior de éste, en donde las profundidades son de ~15 metros, las olas con períodos de 12 a 16 segundos tienen una longitud de onda ~10 veces mayor que la profundidad del agua en donde se propagan, lo que permite simular adecuadamente la propagación del oleaje empleando las ecuaciones del modelo de propagación de ondas largas o barotrópicas comúnmente conocido en la literatura como el Modelo de Aguas Someras. En este trabajo se empleará el modelo de propagación de ondas de Goto et al. (1997), que resuelve numéricamente las ecuaciones del Modelo de Aguas Someras:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} = 0$$

La ecuación (1) representa la conservación de masa y las ecuaciones (2) representan la conservación de momentum en las direcciones perpendiculares x-y, respectivamente.

En el conjunto de ecuaciones (1) y (2), t es el tiempo, η representa el desplazamiento vertical de la superficie del agua respecto al nivel de medio del mar, g es la aceleración de la gravedad, h la profundidad media de la columna de agua (modelo digital de la batimetría). $D = (\eta+h)$ representa la profundidad instantánea de la columna de agua. U y V son las velocidades (integradas verticalmente) del flujo de agua en las direcciones perpendiculares x-y, respectivamente. La fuerza de fricción en el fondo se controla con el parámetro de rugosidad de Manning (m). Para la integración de las ecuaciones (1) y (2) se prescribió un paso de tiempo de $\frac{1}{4}$ de segundo y se simuló una hora de tiempo real hasta alcanzar un estado cuasi-estacionario del oleaje en el puerto.

El modelo digital del puerto o dominio espacial para la integración numérica del conjunto de ecuaciones (1) y (2) se confeccionó interpolando la batimetría en una malla rectangular con resolución espacial de 5 metros. En la Figura 5 se muestra el modelo digital de la batimetría considerando las cuatro configuraciones del puerto que se emplearon en este trabajo. En particular, la escollera permeable que se indica en la Figura 5d se confeccionó con una impedancia de 70%, es decir, la amplitud de las olas se reduce en 70% al propagarse a través de ésta. La impedancia de la escollera en el modelo numérico se prescribió con un "peine" de columnas o pilotes equidistantes que impiden naturalmente el 50% del flujo de agua (50% de impedancia). Para lograr la impedancia del 70% se aumentó artificialmente la disipación de momentum en las ecuaciones (2), aumentando artificialmente (a prueba y error) el valor del parámetro de rugosidad de Manning (m) en los nodos del modelo que corresponden a los espacios vacíos del peine de columnas. No se observaron cambios significativos en la atenuación del oleaje en experimentos numéricos con escolleras permeables con impedancias menores al 50%. No se hicieron experimentos con escolleras permeables con impedancias mayores al 70% por considerar que impedancias mayores se pueden suplir con escolleras impermeables.

Resultados del modelo de propagación de olas

A manera de ejemplo para ilustrar los resultados del modelo de propagación de olas se muestran cuatro registros sintéticos de oleaje (Figura 6), todos ellos resultantes de oleaje con periodo de 15 segundos proveniente del noroeste.

Los cuatro registros de oleaje sintético que se muestran en la Figura 6 corresponden a una misma localidad en el extremo noroeste del interior del puerto, y cada registro, como se indica en la figura, corresponde a cada una de las cuatro configuraciones del puerto que se muestran en la

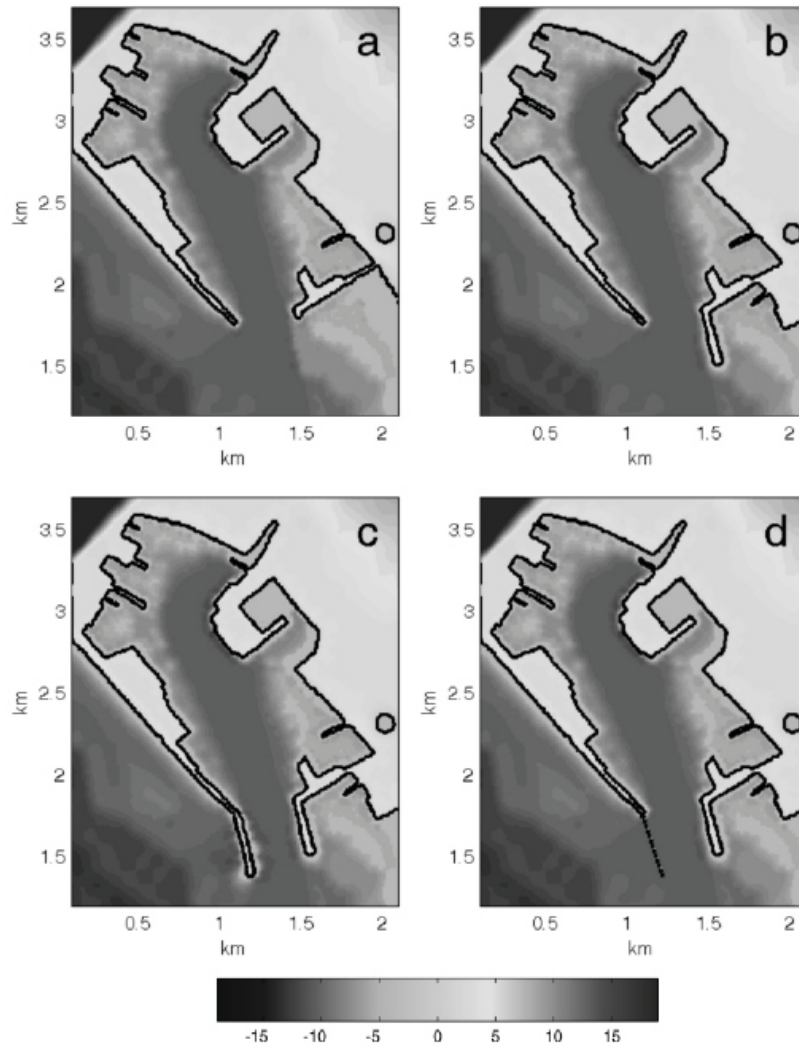


Figura 5. Modelo digital de la batimetría del puerto de Ensenada, Baja California. La escala de tonos indica la profundidad en metros: a) Configuración del puerto en el año 1993; b) en el año 2006; c) con prolongación impermeable de la escollera principal; d) con prolongación permeable de la escollera principal.

Figura 5. El oleaje de alta frecuencia que se observa en Figura 6 es el resultado de la superposición del oleaje incidente con las múltiples reflexiones del mismo en el interior del puerto.

Para comparar la altura del oleaje entre cada una de las configuraciones del puerto se obtuvieron registros sintéticos de oleaje en 21 localidades al interior del puerto, registros similares al los que se muestran en la Figura 6. A partir de cada registro se calculó la altura significativa o altura $1/3$ del oleaje. Ésta se calcula como la altura promedio del tercio de las olas más altas del registro.

Los resultados de altura significativa en las 21 localidades al interior del puerto para oleaje proveniente del noroeste se muestran en la Figura 7. En la Figura 7a, que corresponde a la configuración del puerto en el año 1993, se indica la altura significativa del oleaje normalizada con la altura significativa en la entrada del puerto. En las Figuras 7b,c y d, se indica la altura significativa relativa a la altura significativa correspondiente a cada una de las localidades que se indican en la Figura 7a. La altura significativa-relativa r_{jk} se calculó con la siguiente ecuación:

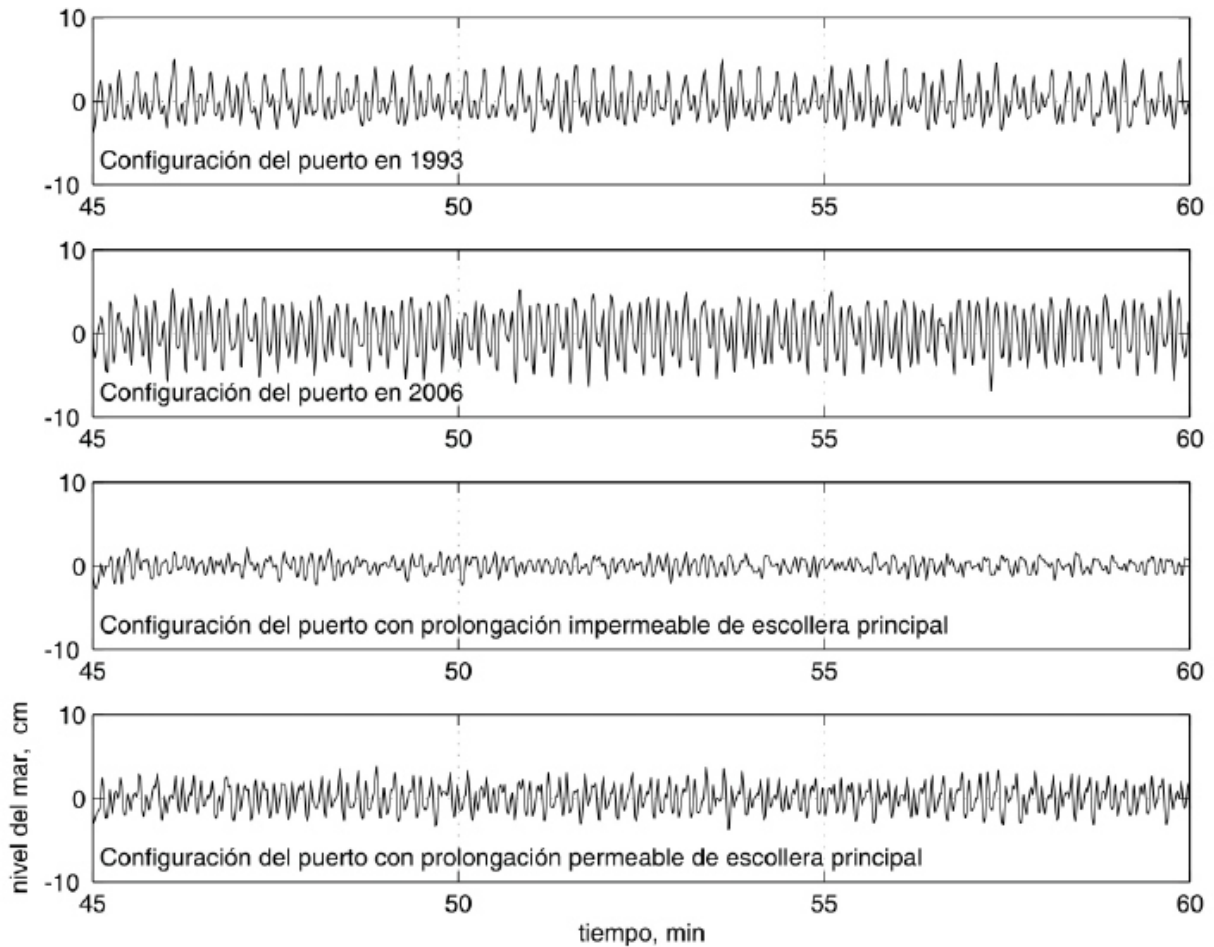


Figura 6. Registros sintéticos de oleaje en el interior del Puerto de Ensenada correspondientes a cada una de las cuatro configuraciones del puerto que se indican en la Figura 5.

$$r_{jk} = \frac{Z_{jk} - Z_{ja}}{Z_{ja}} \times 100 \quad (3)$$

donde Z_{jk} representa la altura significativa en las localidades j , para la configuración del puerto que se indica en las figuras 7k; ($k = b, c, d$).

Z_{ja} representa la altura significativa en las localidades j para la configuración del puerto que se indica en la figura 7a. La altura significativa-relativa indica a su vez el porcentaje de aumento (+) o en su caso de disminución (-) de la altura significativa con respecto a la altura significativa correspondiente que se indica en la Figura 7a. Por ejemplo, una altura significativa relativa de -100% indicaría la eliminación completa del oleaje. Ninguna escollera es perfecta, por lo que los valores negativos no llegan a -100%.

Cero por ciento indica que no hay atenuación del oleaje con respecto al oleaje de referencia que se indica en Figura 7a. En contraste, los valores positivos indican que el oleaje es mayor que el oleaje de referencia, es decir, que la escollera está trabajando al revés de lo planeado. A diferencia de los valores negativos, los valores positivos pueden ser mayores al 100%, indicando en este caso que la altura del oleaje es al menos el doble que la altura de referencia.

Al igual que en la Figura 7, los resultados de altura significativa para oleaje proveniente del suroeste se muestran en las figuras 8a,b,c y d.

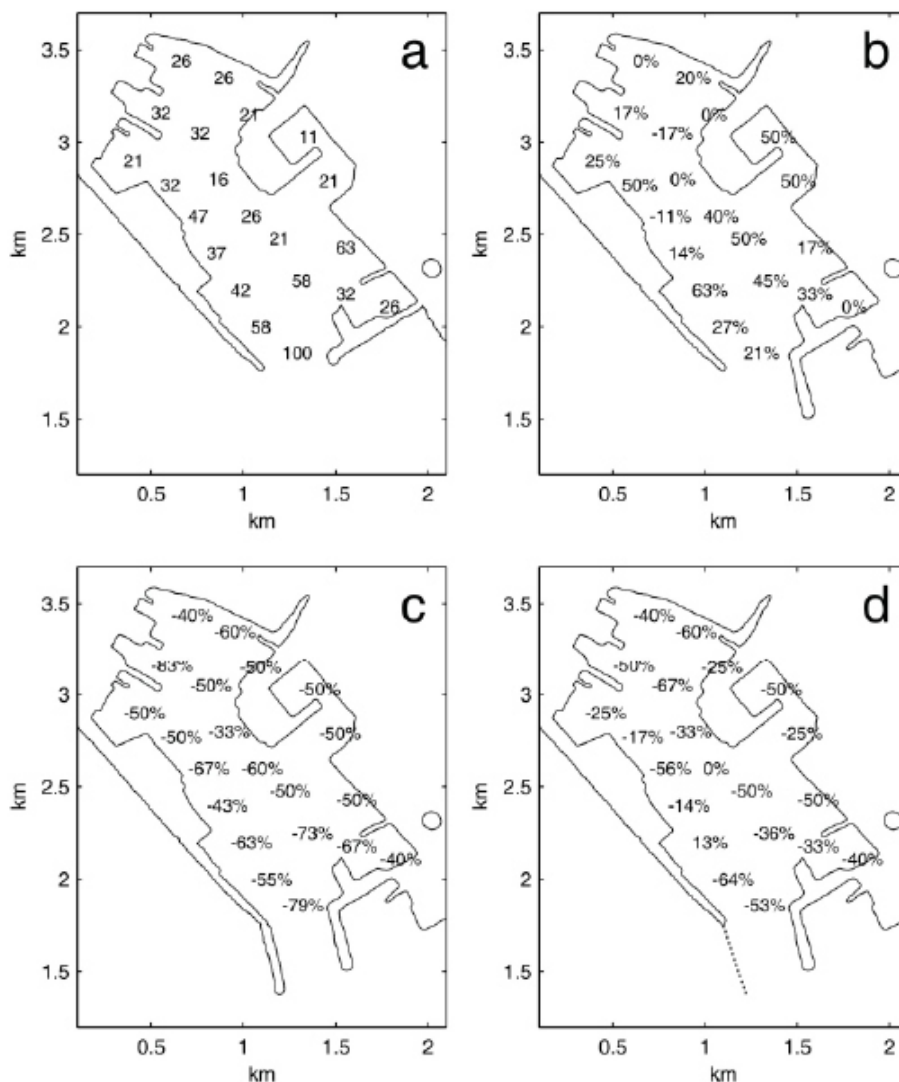


Figura 7. Resultados para olas provenientes del noroeste: a) Altura significativa del oleaje normalizada con la altura significativa en la entrada del puerto; b) Altura significativa-relativa a la altura significativa en a; c) Altura significativa-relativa a la altura significativa en a. d) Altura significativa-relativa a la altura significativa en a.

Discusión y conclusiones

Los resultados de altura significativa del oleaje corroboran el análisis intuitivo en el sentido de que la construcción de la cuarta escollera en el año 2006 -configuración actual del puerto-, aumentaría la agitación por oleaje (Figura 7b). En esta figura se observa en general un aumento promedio de 24% en la altura del oleaje con respecto a la configuración del puerto en el año 1993. Para olas provenientes del suroeste se observa un aumento promedio de 11% (Figura 8b).

La prolongación de la escollera principal con una escollera impermeable (Figura 7c) es la mejor solución al problema de agitación por oleaje. Esta escollera tiene como efecto una reducción promedio de 55% en la altura del oleaje con respecto a la configuración del puerto en el año 1993 y una reducción promedio de 79% con respecto a la configuración actual. Para olas provenientes del suroeste (Figura 8c), la atenuación es de 14% y 25% respectivamente.

Los resultados que se muestran en la Figura 7d corresponden a la prolongación de la escollera principal con una escollera permeable con 70% de impedancia. En esta figura se observa una reducción promedio de 37% en la altura del oleaje con respecto a la configuración del puerto en 1993 y una reducción promedio de 61% con respecto a la configuración actual. El efecto de la escollera permeable versus la escollera impermeable (Figuras 8c y 8d) es también alentador cuando las olas provienen del suroeste. La escollera permeable reduce la altura del oleaje prácticamente en el mismo porcentaje que la escollera impermeable y lo atenúa sustancialmente con respecto a la configuración actual del puerto.

Cabe mencionar que los valores positivos (183%, 117% y 117%) de altura significativa relativa que se observan en la vecindad de la entrada del puerto en las Figuras 8b, 8c y 8d, respectivamente, se deben al oleaje reflejado tanto por la cuarta escollera como por el espolón, cuando el oleaje proviene del suroeste. En particular, en la Figura 8c, se puede apreciar este efecto en tres localidades consecutivas de sur a norte.

El hecho de que la escollera permeable reduzca la altura del oleaje al interior del puerto no solamente se debe a la impedancia misma de la escollera, sino también a que la impedancia de la escollera inhibe la difracción del oleaje en el

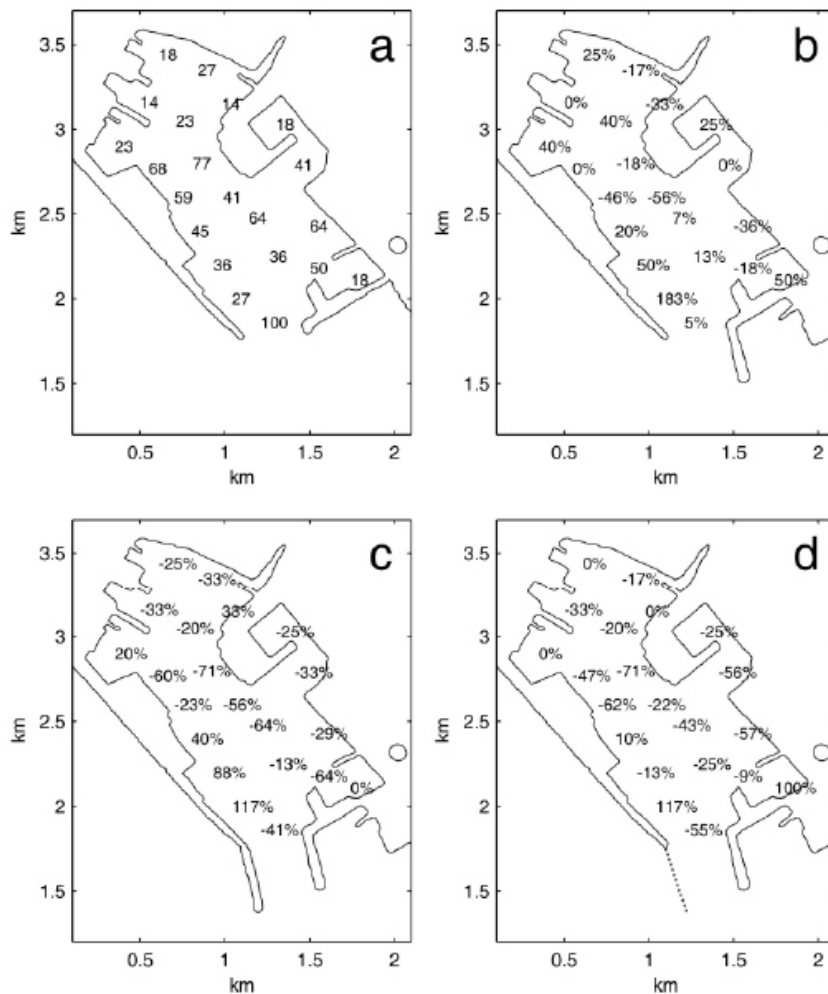


Figura 8. Resultados para olas provenientes del suroeste: a) Altura significativa del oleaje normalizada con la altura significativa en la entrada del puerto; b) Altura significativa-relativa a la altura significativa en a; c) Altura significativa-relativa a la altura significativa en a; d) Altura significativa-relativa a la altura significativa en a.

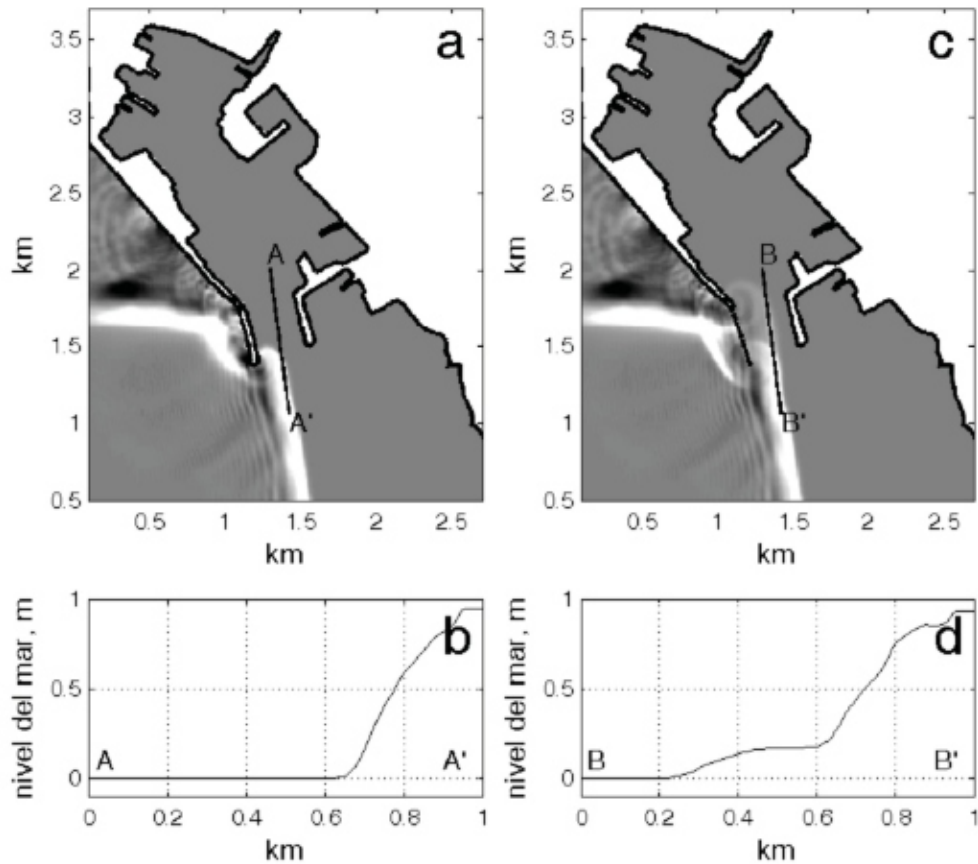


Figura 9. a) Instante en el que el frente de la ola se propaga más allá de la escollera impermeable; b) diferencia del nivel del agua a lo largo de la línea A - A'; c) instante en el que el frente de la ola se propaga más allá de la escollera permeable; d) diferencia del nivel del agua a lo largo de la línea B - B'.

extremo de la misma. Para explicar este mecanismo sutil, consideremos primeramente el caso una escollera impermeable y de un frente de ola avanzando hacia ella. En el instante en el que una parte de la ola se refleja en la escollera, la otra parte de la ola avanza más allá de ésta, como se indica en la Figura 9a. En ese preciso instante se establece un gradiente de presión debido a la diferencia de altura en la superficie del agua a lo largo del frente de la ola (Figura 9b), que fuerza a la ola a propagarse al interior del puerto. En el caso de la escollera permeable, la ola que pasa a través de la escollera reduce su altura mientras que la otra parte de la ola avanza intacta más allá de la escollera (Figura 9c). En este caso, la diferencia de altura en la superficie del agua a lo largo del frente de la ola (Figura 9d) es menor que en el caso anterior y consecuentemente es menor el gradiente de

presión que impulsa a ola difractada hacia el interior del puerto. Mientras que este proceso de difracción ocurre en el extremo de la escollera permeable, la ola que pasa a través de ésta se difracta a la altura en donde se une la escollera permeable con la escollera principal. El efecto conjunto de ambas difracciones es el de distribuir la energía de la ola incidente en mayor lapso de tiempo, como si dos trenes de olas de igual período entraran al puerto con un desfase constante, pero cada uno de ellos con menor altura que el que incidiría por difracción en el caso de una escollera impermeable.

A la par de los experimentos numéricos para analizar la atenuación del oleaje en el Puerto de Ensenada, se realizaron experimentos numéricos para estudiar la posibilidad de emplear, tanto

rompeolas impermeables, como permeables en el interior del puerto con el objetivo de proteger a las embarcaciones menores que atracan en los "peines" que se observan en el extremo norte del puerto en la Figura 4. En los resultados de los experimentos numéricos se observó, como era de esperarse, que al proteger al área de los peines se afectaba a diferentes áreas debido a la reflexión total o parcial del oleaje en los rompeolas sintéticos. En general, se debe considerar que cualquier modificación a la geometría del interior del puerto, ya sea para proteger algunas áreas o para construir nuevas marinas, deberá tener consecuencias en el patrón de agitación por oleaje.

En resumen, los resultados de este trabajo muestran que en primer lugar es necesario atenuar la agitación por oleaje en el todo el puerto antes de construir nuevas marinas o escolleras para satisfacer necesidades específicas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) por el financiamiento parcial de esta investigación mediante el proyecto de Ciencia Básica, CONACYT PCI 51457. Esta investigación se llevó a cabo en el marco del convenio de colaboración del CICESE con la Administración Portuaria Integral (API) de Ensenada, Baja California. También agradezco los arbitrajes por parte de Antonio González y otro revisor anónimo que ayudaron a lograr la versión final de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Goto, C., Y. Ogawa, N. Shuto, and F. Imamura, 1997. IUGG/IOCTIME Project: "Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme", Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides #35, Paris, 4 Parts.

Martínez Díaz de León A. y Nava Button C., 1987. Estadísticas del oleaje en las costas de Baja California. Reporte Técnico 87-04. Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California.

Sepúlveda Nuñez, R., 2003. Variaciones Morfológicas de la Rada del Puerto de Ensenada, B. C., a partir del método de fotografía aérea multitemporal (1935-2001). Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.

Recepción del manuscrito: 29 mayo de 2009
Aceptación del manuscrito: 31 agosto de 2009