



**MODELO MATEMÁTICO DE PROPAGACIÓN DE OLAJE**

Desde el punto de vista práctico, una solución muy frecuente en la ingeniería costera son los modelos de refracción basados en principios de la óptica geométrica. La teoría lineal de ondas obtenida utilizando estos principios e ignorando los fenómenos de difracción, reflexión y disipación de energía, ha sido ampliamente usada para el estudio de la transformación del oleaje desde aguas profundas hasta las zonas próximas a costa. La introducción en la formulación de esta teoría de diferentes coeficientes que intentan representar las distintas formas de disipación energética del oleaje, como pueden ser la rotura, la fricción por fondo, y la percolación, ha permitido extender su aplicación hasta la misma línea de costa (Kirby y Dalrymple, 1986). En este trabajo se hace uso de la teoría lineal de ondas conjuntamente con un coeficiente capaz de representar todos los mecanismos disipativos del oleaje, el cual está basado en un reanálisis de la evolución energética sufrida por el espectro teórico unidireccional TMA cuando se propaga hacia aguas más someras (Gentile et al., 1994).

Admitiendo que el oleaje es un proceso estocástico de banda estrecha, es posible obtener que el momento de orden cero,  $m_0$  (calculado del espectro TMA), y la altura de ola significativa,  $H_s$ , están relacionados por  $H_s = 4m_0^{1/2}$ . El cociente entre las alturas de ola en diferentes profundidades da lugar a un coeficiente que permite evaluar la variación energética sufrida por el espectro TMA, el cual en la propagación del oleaje hacia costa está caracterizado por una disminución de energía. Partiendo del espectro TMA en función de la frecuencia lineal de onda  $f$ , el coeficiente  $K_e$  que evalúa esta disipación energética viene dado por

$$K_e = \left( \frac{\tanh \left[ \sigma_{hp}^2 / (\tanh \sigma_{hp}^{37/23}) \right]^{0.835}}{\sigma_{hp}^2} \right)^{0.835}$$

donde  $\sigma_{hp} = 2\pi f_p (h/g)^{1/2}$  siendo  $f_p$  la frecuencia de pico espectral,  $h$  la profundidad, y  $g$  la aceleración de la gravedad. Este coeficiente engloba al fenómeno de asomeramiento debido a que contabiliza todos los mecanismos involucrados en la transformación espectral en una única dimensión horizontal. En el caso bidimensional, el posible ángulo formado por la dirección de propagación del oleaje incidente y las batimétricas en la zona de aguas de profundidad finita da lugar al fenómeno de refracción, adicionalmente al de asomeramiento y disipación energética, el cual implica un cambio en la dirección del oleaje. La teoría lineal de ondas utilizada, considerando que la batimetría posee una variación gradual, permite derivar un coeficiente denominado de refracción,  $K_r (= \cos \theta_1 / \cos \theta_2)^{1/2}$  en función de los ángulos de propagación del oleaje en dos profundidades diferentes, el cual puede ser obtenido mediante las ecuaciones básicas de la óptica geométrica (Longuet-Higgins, 1956). En términos de lo comentado hasta ahora, el modelo de oleaje resultante permite el cálculo de la altura de ola en una profundidad  $h_2$  como

$$H_2 = H_1 \cdot K_e \cdot K_r$$

partiendo de la altura de ola  $H_1$  en aguas de mayor profundidad,  $h_1$ , y de los coeficientes  $K_e$  y  $K_r$ .

**DERRAMES DE SUSTANCIAS QUÍMICAS EN EL MAR**

Los estudios sobre los sucesos de derrames en el mar de sustancias químicas puras y sus compuestos indican que existe una gran variedad de éstas que deben ser consideradas como nocivas y potencialmente peligrosas (simbolizadas en forma abreviada por SNPP), tanto para el ecosistema marino como para la vida humana. El comportamiento de las SNPP al derramarse en el mar varía notablemente de un producto a otro, lo que

**El comportamiento de las SNPP al derramarse en el mar varía notablemente de un producto a otro.**



pagación (Longuet-Higgins, 1970), mientras que la difusión de la sustancia se considerará que sigue una distribución Normal o Gaussiana, en la cual la desviación típica será dependiente del tiempo. No son considerados otros agentes generadores de corriente como viento, marea, o gradientes de densidad en la columna de agua, debido a que el estudio se realiza en zonas costeras de pequeñas dimensiones y en las cuales se admite que el oleaje, al ser extremal, es el principal agente generador de la corriente.

**APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO**

El modelo numérico desarrollado anteriormente ha sido aplicado en el entorno costero de Santa Cruz de La Palma (en el archipiélago canario) desde la zona comprendida entre la punta de San Carlos y aguas arriba del puerto de dicha localidad, cubriendo unos 2500 metros en el eje paralelo a la costa y unos 1500 metros en el perpendicular.

En este área se han derivado datos de profundidad a distancias regulares utilizando la batimetría obtenida según los levantamientos efectuados por el buque hidrográfico Tofiño en los años 1957 y 1958, la cual es representada en la figura 3.

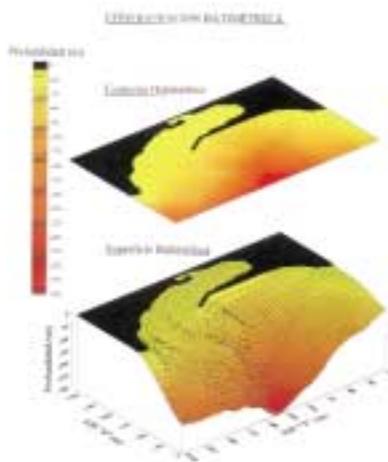


Figura 3. Configuración Batimétrica.

El oleaje extremal seleccionado para la aplicación del modelo numérico está caracterizado por una altura significativa,  $H_s$ , de 6 metros y un periodo de pico,  $T_p$ , de 17 segundos, con una dirección media de propagación del Noreste. En cuanto al contaminante que se va a derramar en la zona de estudio, partimos de la base de que inicialmente posee una concentración espacial dada por una distribución Normal centrada en el origen de coordenadas de la malla de batimetría, cuya desviación típica es dependiente del tiempo mediante la relación  $s=1+0.1t$ . La elección de dicha relación implica que estamos trabajando con una sustancia química determinada, la cual suponemos que flota en la superficie del mar.

Los datos indicados anteriormente son utilizados como parámetros de entrada para que el modelo numérico propague el oleaje en la zona de estudio, para a continuación derivar la corriente litoral provocada por éste y poder obtener así la dispersión del contaminante a lo largo del tiempo. En las figuras 4 y 5 se representan para el oleaje selec

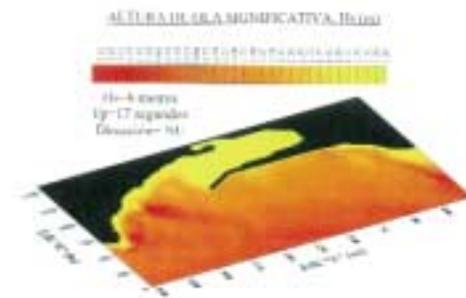


Figura 4. Altura de ola significativa.

cionado la distribución espacial de alturas de olas significativas y las sobreelevaciones de la superficie libre del mar con respecto al nivel medio derivadas de la utilización del modelo. Del análisis de estas figuras se puede apreciar que la condición de oleaje simulada presenta una transformación bastante gra-



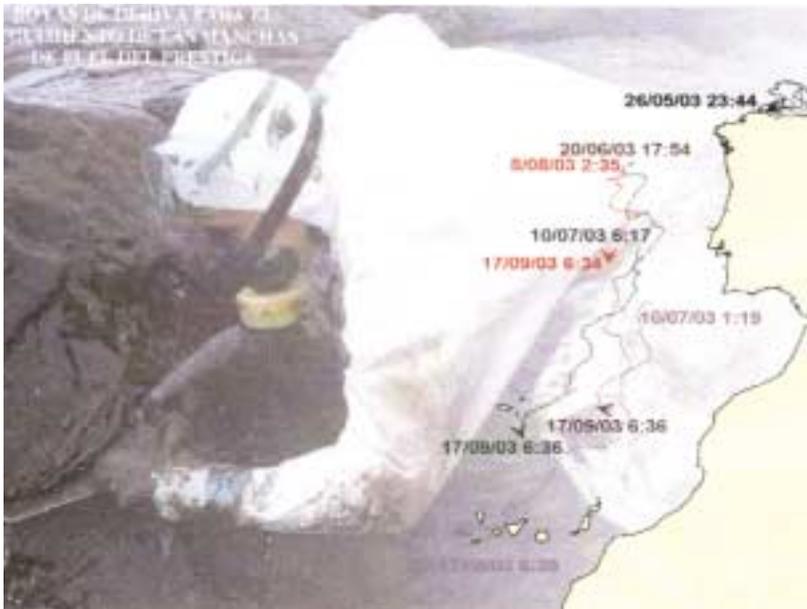


Figura 8. Boyas de deriva para el seguimiento de las manchas de fuel del Prestige.

Noviembre de 2003 frente a las costas gallegas de Finisterre. Tras ser remolcado durante 6 días aguas adentro debido a su maltrecho estado, el buque se partió en dos, hundiéndose en una profundidad superior a los 3500 metros. Su carga de más de 60000 toneladas de fuel-oil aún hoy en día sigue afectando a las zonas costeras bañadas por el mar Cantábrico y por el océano Atlántico, pudiendo llegar sus efectos incluso a las Islas Canarias como así lo atestiguan las trayectorias seguidas por las boyas de deriva utilizadas en el seguimiento del vertido (figura 8). En este caso, modelos de dispersión como el TRI-MODENA" (González et al., 2001) han sido utilizados eficientemente para la simulación de la evolución de las manchas de fuel en las regiones afectadas.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un coeficiente para el cálculo de la variación de energía de un oleaje

unidireccional en aguas poco profundas, basado en la ecuación teórica del espectro TMA desarrollada sobre mediciones experimentales en zonas costeras.

Dicho coeficiente ha sido incorporado fácilmente en la teoría lineal de la refracción clásica para estudiar la transformación del oleaje en costa debido a los procesos de asomeramiento, refracción, y disipación energética, lo cual ha dado lugar a la derivación de un modelo de propagación de oleaje que permite estimar adicionalmente la evolución sufrida por contaminantes vertidos al mar.

El modelo obtenido es una herramienta de fácil uso que puede ser aplicada en casos prácticos reales que necesiten de una rápida evaluación de la evolución hacia costa de un vertido en condiciones extremas de oleaje.

**BIOGRAFÍA**

LUIS FERRER RODRÍGUEZ

Doctor en Ciencias del Mar (2002) por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Actualmente se encuentra desarrollando su actividad profesional en el Departamento de Oceanografía y Medio Ambiente Marino de la Fundación AZTI. Su campo de investigación se centra en la física y biología de los ecosistemas acuáticos, principalmente en todo lo concerniente a tratamiento estadístico y espectral de bases de datos así como a la modelización numérica sobre la dinámica de estos ecosistemas.

Dirección: Departamento de Oceanografía y Medio Ambiente Marino, Fundación AZTI, Herrera Kaia – Portu aldea z/g, C.P. 20110 Pasaia, Gipuzkoa, Tel.: 943 004 800 Fax.: 943 004 801, e-mail: lferrer@pas.azti.es

**BIBLIOGRAFÍA**

Gentile, R., Rebaudengo Landó, L., y Scarsi, G. (1994): Design wave on finite depth: a re-analysis of the TMA model, Proc. of OMAE 94, Houston, Vol. 2, págs. 49-56.

González, M., Espino, M., Comerma, E., Gyssels, P., Hernáez, M., Uriarte, A., y Garcia, M.A. (2001): A numerical tool for hydrocarbon pollution forecasting in the autonomous port of Bilbao, Oil & Hydrocarbon Spills II, WITPress, C.A. Brebbia & G.R. Rodríguez Editors, Las Palmas de Gran Canaria, págs. 95-104.

Kirby, J.T., y Dalrymple, R.A. (1986): Modeling waves in surfzones and around islands, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 112, págs. 78-93.

Longuet-Higgins, M.S. (1956): The refraction of sea waves in shallow water, J. Fluid Mech., Vol. 1, págs. 163-177.

Longuet-Higgins, M.S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, J. Geophys. Res., Vol. 75, págs. 6778-6789.

Ozmidov, R.V. (1990): Diffusion of contaminants in the ocean, Published by Kluwer Academic Publishers, 283 págs.

Patrocinador de esta investigación:

**AGUAS MINERALES DE FIRGAS, S.A.**