

# MODELO NUMERICO PARA LA PROPAGACION DE OLAJE IRREGULAR FRECUENCIAL DIRECCIONAL. DESCRIPCION Y CONTRASTE CON MODELO FISICO

JOSE MARIA GRASSA (\*)

**RESUMEN.** Se presenta la metodología empleada en el desarrollo de un modelo numérico (REFDIF10) de propagación de oleaje irregular direccional, realizado en el CEPYC - CEDEX. El modelo se aplica al caso estudiado por Vincent et al. en el CERC, comprobándose un excelente grado de ajuste. Finalmente se indican las líneas a seguir en el desarrollo y se indican algunas claras repercusiones de la consideración de la direccionalidad para el estudio de actuaciones en la costa.

**ABSTRACT.** *The methodology employed in the development at the CEPYC - CEDEX of a numerical model (REFDIF10) for irregular random wave propagation is presented. The model is applied to the cases studied by Vincent et al. in the CERC, obtaining an excellent degree of adjustment between physical and numerical experiences. Finally, some development directions and the transcendental importance of directionality in human actions in the coastal area are indicated.*

## 1. INTRODUCCION

El oleaje en el mar es mucho más complejo de lo que la mayoría de los modelos físicos y matemáticos reflejan.

En lo que respecta a su propagación en zonas en las que es afectado por los fondos, una primera aproximación ha sido asimilarlo a una onda sinusoidal que se propaga en una dirección, dando lugar a una sucesión de crestas y senos de longitud indefinida y teniendo siempre en un mismo punto igual longitud de onda y amplitud. Con ello, la elevación del nivel del mar en un punto  $x$  y en un instante  $t$  es:

$$z(x, t) = a \cdot \text{sen}(kx - wt)$$

Siendo  $a$  la amplitud,  $k$  el número de onda,  $w$  la frecuencia angular del movimiento y  $x$  una coordenada en la dirección de propagación del oleaje.

Una segunda aproximación proviene de la consideración de que en el mar, las crestas sucesivas no tienen la misma altura ni están igualmente espaciadas en el tiempo. Ello queda claro en los registros de las boyas escalares y en la mera observación del mar. Las herramientas para analizar esta aproximación son el estudio estadístico y el espectral, considerando que la superficie es la resultante de un número infinito de ondas sinusoidales propagándose en una misma dirección:

$$z(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n (K_n x - w_n t)$$

Este planteamiento es el que más se emplea hoy en día, y ha supuesto un gran avance en la modelización

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (MOPU).

del oleaje, tanto en ensayos a escala reducida como en modelos matemáticos.

Sin embargo, el oleaje en el mar, sobre todo en situaciones de temporal, puede mostrar un aspecto aún más complejo, con frentes cortos que se entrecruzan, y no con una única y bien definida dirección de propagación, sino formando un abanico, más o menos abierto alrededor de una dirección media. Con ello, la superficie se puede describir como:

$$z(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} a_{mn} (K_m x \cos \Theta_n + K_m y \sin \Theta_n - w_m t)$$

siendo  $\Theta_n$  la dirección de cada componente.

Hasta la fecha pocos modelos físicos y menos matemáticos han planteado el estudio de la propagación de oleaje aproximado mediante este planteamiento, menos idealizado que los anteriores. El objeto de este trabajo ha sido la puesta a punto de un modelo matemático que permitiera una primera aproximación operativa a la propagación de oleaje irregular direccional, para analizar qué diferencias se dan, cualitativa y cuantitativamente con respecto a las simulaciones con oleaje regular o irregular en un sentido simplemente frecuencial. Los resultados se considera que pueden ser de notable interés para estudios de estabilidad de playas, diseño de obras y agitación en zonas portuarias.

Sin embargo, y desgraciadamente, se debe advertir de las idealizaciones y limitaciones que se encuentran en este estudio:

- Superficie como suma de ondas sinusoidales que se propagan según la teoría lineal de ondas y sin interacciones.
- Modelo matemático de propagación (refracción difracción) aproximado e incapaz de reproducir determinados fenómenos.
- Las características direccionales del oleaje han sido poco estudiadas en la naturaleza hasta la fecha.

La contrapartida a estos aspectos negativos (compartidos con otros modelos de uso corriente) es la posibilidad de introducir en el estudio de la propagación del oleaje una nueva característica, la direccionalidad, palpable y evidente en la naturaleza, con la esperanza de que ello permita aproximarse más a la realidad.

Con mayor rotundidad, se puede decir que no se trata de introducir un nuevo parámetro, de forma más o menos caprichosa, en contra del principio de economía de la ciencia. La cuestión es más bien reconocer que este parámetro, que existe en la naturaleza y se ha venido empleando con un único valor:

$$\text{distribución direccional del oleaje} = 0$$

puede tomar otros valores, con efectos negativos sobre el riesgo de las actuaciones en la costa.

## RESUMEN DEL TRABAJO

El trabajo ha consistido en la extensión del modelo parabólico REFDFIF, desarrollado en anteriores estudios del CEDEX, para simular la propagación de oleaje irregular direccional en zonas costeras.

Para la modelización de oleaje irregular se han tomado una serie de espectros frecuenciales paramétricos:

- Pierson-Moskowitz
- Jonswap
- Jonswap-Goda
- TMA

y funciones de distribución direccionales del tipo:

- Coseno cuadrado
- Mitsuyasu
- Distribución normal

construyendo el espectro completo  $S(f, \Theta)$  como un producto de ambas funciones.

La consideración de espectros paramétricos tiene por objeto permitir una definición sencilla en el modelo de las características de irregularidad del oleaje. Sin embargo, su aplicación a cualquier forma espectral completa obtenida a través de medidas de campo, por ejemplo, es perfectamente realizable.

La simulación de la propagación del oleaje irregular se realiza aplicando el modelo REFDFIF a una serie de componentes monocromáticos representativas del espectro completo,  $S(f, \Theta)$  que se discretiza en una serie de celdas cuyo contenido de energía está eualizado, con lo que al menos teóricamente se obtiene una máxima representatividad para una finura de discretización dada.

A partir de los resultados de las propagaciones de las componentes se reconstruyen determinados aspectos definitorios del oleaje (altura significativa, dirección media...) en los puntos de la zona de cálculo. Es posible incluso recuperar en cualquier punto la forma espectral completa y mediante un ajuste a una forma paramétrica estudiar la evolución de determinados aspectos (apuntamiento, dispersión angular...), si bien esta tarea no se ha realizado en el presente trabajo.

Con todo ello se dispone de una herramienta avanzada para el estudio de propagación de oleaje irregular en frecuencias y direcciones sobre batimetrías irregulares e incluyendo fenómenos de refracción y difracción.

El presente estudio contiene, en primer lugar, una breve indicación de las formas espectrales y distribuciones direccionales empleadas, para a continuación presentar la metodología de discretización y síntesis del oleaje y una breve descripción del modelo matemático integrado, REFDFIF10. A continuación, se presenta el primer y único caso que se ha podido realizar de validación del modelo con resultados de un ensayo a escala reducida con oleaje irregular direccional en el CERC. Finalmente se señalan una serie de conclusiones respecto a la utilidad y aplicabilidad del modelo y muy en especial respecto a la profunda repercusión que la consi-

deración de la direccionalidad va a tener en la ingeniería de costas, tanto en la determinación de parámetros de diseño de obras, estudios de agitación, estabilidad de playas, etc., como en la inevitable revisión del riesgo de actuaciones diseñadas en base a una concepción tradicional de la propagación del oleaje.

**PARAMETRIZACION DEL OLAJE IRREGULAR**

Una descripción sintética (si bien no totalmente satisfactoria, pero suficiente a los efectos de este trabajo) de un oleaje irregular no plano viene dada por su espectro completo de energía,  $S$ :

$$S = S(f, \theta)$$

siendo  $S$  la densidad de energía y  $f, \theta$ , la frecuencia y dirección correspondientes.

Para un oleaje determinado la forma de la función  $S$  puede ser cualquiera, siendo la única condición a priori que su integral en todo el dominio de frecuencias y direcciones tiene que ser representativa de la energía del oleaje. Sin embargo, desarrollos teóricos y medidas en la naturaleza han llevado a la definición de una serie de formas espectrales tipo para los oleajes generados por el viento. Una simplificación notable es considerar:

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

realizando una separación del espectro completo en un espectro escalar en frecuencias,  $S$ , y una distribución direccional  $G$ , que en algunas propuestas de distribución depende a su vez de la frecuencia.

Los espectros frecuenciales paramétricos que se van a emplear en este trabajo son:

**PIERSON-MOSKOWITZ**

Pierson y Moskowitz (PM) dieron un espectro para oleaje desarrollado en función de la velocidad del viento. Su forma generalizada según Goda se puede escribir:

$$S_{PM}(f) = A f^{-5} \exp[-B f^{-4}]$$

Los valores de  $A$  y  $B$  se pueden expresar en función del momento de orden cero ( $m_0$ ) del espectro y teniendo en cuenta que  $S(f_p) = \max$ , siendo  $f_p$  la frecuencia de pico. El resultado es:

$$S_{PM}(f) = 5 \frac{m_0}{f_p} (f/f_p)^{-5} \exp(-5/4 (f/f_p)^{-4})$$

Haciendo uso de la relación  $H_{1/3} = 4.004 (m_0)^{1/2}$ , el espectro queda totalmente definido en función de la altura significativa y la frecuencia de pico.

Una ventaja notable para la discretización es que el espectro es directamente integrable:

$$\int_0^f S_{PM}(f) df = m_0 \exp(-5/4 (f/f_p)^{-4})$$

**JONSWAP**

El espectro Jonswap ( $J$ ) ha sido definido como:

$$S_J(f) = A f^{-5} \exp[-B f^{-4}] \gamma^a$$

Siendo  $\gamma$  el parámetro de forma del pico ( $\gamma = 1$  se tiene  $S_J(f) = S_{PM}(f)$ ) y a la expresión:

$$a = \exp(-(f - f_p)^2 / (2\sigma^2 f_p^2))$$

$$\text{con } \sigma = \sigma_A \text{ para } f \leq f_p$$

$$\sigma = \sigma_B \text{ para } f > f_p$$

Este espectro no es ya directamente integrable, lo que complica su aplicación. El valor de  $B$  se suele tomar igual al caso anterior ( $B = 1,25 f_p^4$ ) y  $A$  queda como un factor de escala ajustable para obtener la altura significativa deseada (supuestos unos valores determinados de  $\tau$  y  $\sigma$ ).

Para simplificar su aplicación, Goda ha propuesto una aproximación (Espectro Jonswap-Goda):

$$S_{JG}(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp(-B f^{-4}) \gamma^a$$

siendo  $\alpha = 0,0624 / (0,230 + 0,0336 \gamma - 0,185 (1,9 + \gamma)^{-1})$  y  $a = \exp[-(T_p f - 1)^2 / (2\sigma)]$

Este enfoque evita la integración previa para ajustar el coeficiente  $A$  a un  $m_0$  deseado.

**ESPECTRO TMA**

Este espectro es una aproximación desarrollada para oleaje en profundidades no indefinidas. En base a los anteriores, se puede escribir:

$$S_{TMA}(f) = S_J(f) \varphi_K(W_H)$$

Siendo  $\varphi_K$  un factor de forma adicional que se puede escribir:

$$\varphi_K(w_H) = \frac{\left[ (k(w, H))^{-3} \frac{\delta k(w, H)}{\delta f} \right]}{\left[ (k(w, \infty))^{-3} \frac{\delta k(w, \infty)}{\delta f} \right]}$$

donde  $w_H = 2\pi f (H/g)^{1/2}$ ,  $H$  es la profundidad y  $k$  el número de onda, ligado a la frecuencia angular  $w$  por la relación de dispersión (lineal):

$$w^2 = g k \tanh(KH)$$

Este espectro tampoco es integrable, por lo que requiere el mismo trabajo adicional que el Jonswap, para ajustar  $A$  (o bien  $\alpha$ , siendo  $A = \alpha g^2 (2\pi)^{-4}$ ), como se suele encontrar en la literatura.

Este espectro se ha incluido en las rutinas de cálculo, dado que el único resultado de modelo físico direccional

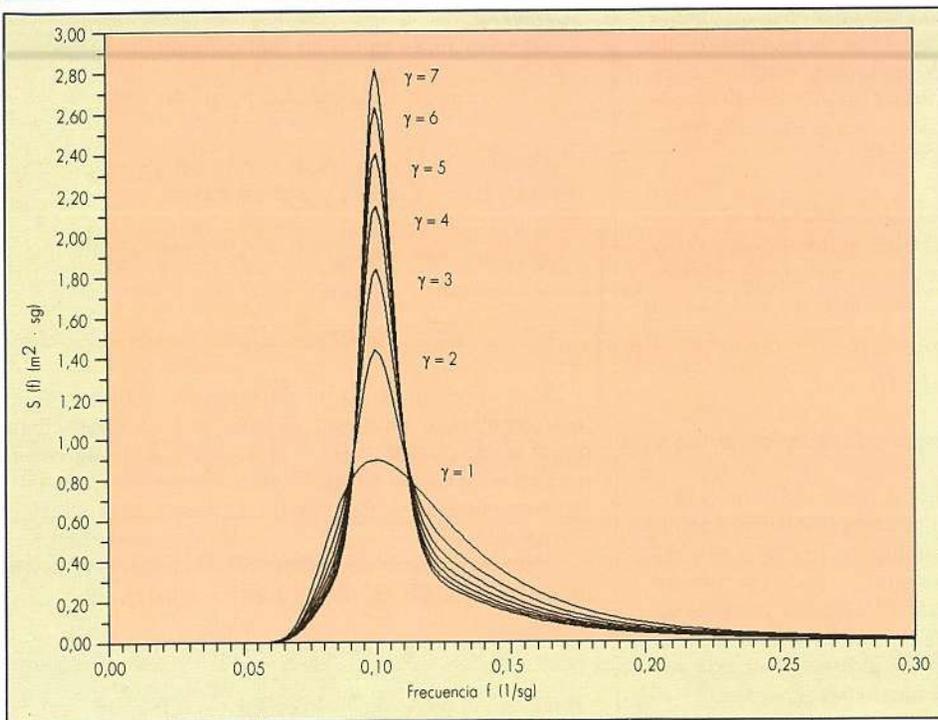


FIGURA 1. Espectro  $S(f)$  Jonswap con  $H_s = 1$ ,  $T_p = 10$ ,  $\Gamma = 1 - 7$ .

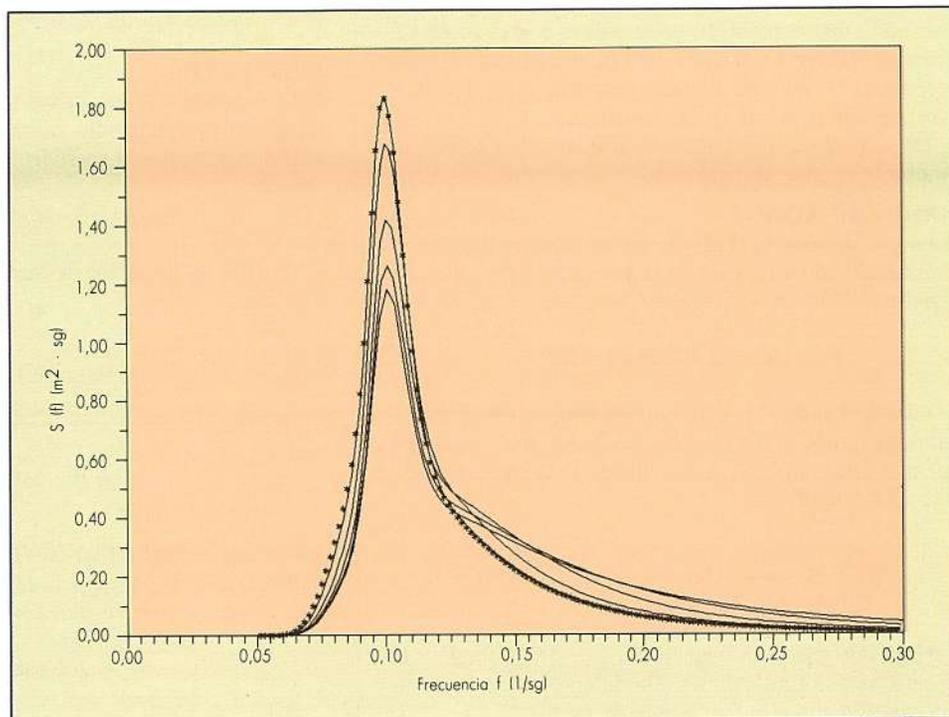


FIGURA 2. Espectro  $S(f)$  TMA con  $H_s = 1$ ,  $T_p = 10$ ,  $\Gamma = 3$ . Profundidades 5, 10, 20, 40 y 80 metros ( $\tau$  Jonswap).

se ha obtenido simulando un oleaje de acuerdo a esta propuesta.

Como referencia, las Figuras 1 y 2 muestran representaciones de estos espectros, siendo de señalar el he-

cho de que el *PM* es un caso particular del *J* para  $\tau = 1$ . Es notable asimismo la característica de decrecimiento del *TMA* en frecuencias mayores que la de pico y su aproximación al *J* al ir a aguas profundas.

Las distribuciones direccionales,  $G$ , de oleaje son de mucho más cuestionable parametrización debido a la relativa novedad de las medidas de oleaje direccional en la naturaleza. Las que se han incluido en el modelo son:

**DISTRIBUCION COSENO CUADRADO**

Se puede escribir, siendo  $\Theta_m$  la dirección media:

$$G(\Theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\Theta - \Theta_m) \quad , \quad -\pi/2 < \Theta - \Theta_m < \pi/2$$

$$G(\Theta) = 0 \quad , \quad \text{resto}$$

Como se puede comprobar  $\int_{-\pi}^{\pi} G(\Theta) d\Theta = 1$ , con lo que la función meramente «reparte» la energía del espectro frecuencial escalar en las direcciones, siendo además esta distribución independiente de la frecuencia.

**DISTRIBUCION DE MITSUYASU-GODA-SUZUKY**

Esta distribución se puede escribir de la forma:  $G(\Theta) = G_0 \cos^{2S}(\Theta - \Theta_m)$ , siendo  $G_0$  un coeficiente ajustado de forma que la integral extendida a  $-\pi, \pi$  sea la unidad, y tomando  $S$  el valor:

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f/f_p)^5 & ; f \leq f_p \\ S_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & ; f > f_p \end{cases}$$

Como se ve, la distribución se estrecha alrededor de la frecuencia de pico, ensanchándose para valores mayores y menores que ésta.

**DISTRIBUCION NORMAL**

El modelo gaussiano se puede escribir:

$$G(\Theta) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp(-(\Theta - \Theta_m)^2 / (2\sigma^2))$$

Siendo  $\sigma$  la desviación típica.

Las Figuras 3A y 3B muestran algunos casos de estas distribuciones, siendo de destacar que la coseno cuadrado parece corresponder a una normal entre 30 y 45 grados de desviación típica y la característica de la de Mitsuyasu de abrirse notablemente para frecuencias superiores a la de pico.

**DISCRETIZACION DEL ESPECTRO Y PROPAGACION DEL OLAJE**

Para la propagación de un espectro de oleaje sobre una batimetría irregular, aplicando los principios de la teoría de ondas, es precisa la descomposición de éste en una serie de ondas componentes individuales, cuyas características sean acordes con una determinada teoría de ondas a emplear. Esta filosofía se ha aplicado, escasamente, en modelos matemáticos para oleaje irregular plano, a partir de un espectro frecuencial determinado. Sin embargo, no se ha realizado, hasta donde alcanza el

conocimiento del autor, para oleaje verdaderamente tridimensional hasta este trabajo, a excepción de la aportación pionera de Goda con un modelo analítico no aplicable a batimetrías arbitrarias y el reciente trabajo de Isobe con un modelo de ortogonales, distinto sustancialmente al planteamiento del presente estudio. Un cierto número de autores han señalado que la consideración de la irregularidad es una extensión simple de los modelos para oleaje monocromático, por lo que resulta curioso que este paso natural y por añadidura sencillo no haya sido dado hace al menos una década.

La propagación se realiza, por tanto, sobre componentes monocromáticos, obteniendo a partir de éstas el espectro en cualquier punto de la malla rectangular de cálculo o bien algunos de sus parámetros que sean de interés (energía total, dirección media...).

El problema de la discretización, para el caso de un espectro paramétrico, se centra, por tanto, en obtener las características correspondientes a la serie de ondas componentes que se van a propagar.

Un primer enfoque es subdividir el espectro de una serie de intervalos ( $f + \Delta f, \Theta + \Delta \Theta$ ), asignando a las componentes correspondientes a este intervalo la energía que resulte de la densidad espectral correspondiente a ese intervalo y, por supuesto, la dirección y frecuencia que resulte representativa del mismo.

Ello, sin embargo, plantea el problema de que las diferentes componentes tienen una representatividad energética muy diferente, dada la rápida variabilidad de la forma espectral con respecto a la frecuencia y dirección. Por ello, y dado que el proceso puede llegar a ser relativamente costoso en tiempo de proceso, es deseable realizar una discretización que maximice la significancia de la información que se procesa para un determinado número de componentes. Esta idea presenta un paralelismo claro con los métodos de integración de Gauss y Legendre, etc. Ello se obtiene tomando una discretización tal que se equalice el contenido energético de cada intervalo con respecto al espectro. Como ejemplo, si se desea discretizar el espectro en  $N_f$  componentes frecuenciales por  $N_\Theta$  componentes angulares, la metodología a seguir sería:

- Dividir el espectro frecuencial en  $N_f$  intervalos con el mismo contenido energético.
- Para cada intervalo, dividir la distribución direccional en  $N_\Theta$  intervalos con el mismo contenido energético.

Dentro de cada intervalo, los valores representativos deberán ser la mediana en direcciones y frecuencias con respecto a la energía.

Este planteamiento posee además la ventaja adicional de que para una forma espectral dada puede aliviar la necesidad de establecer frecuencias de corte motivadas por la resolución espacial de la malla de cálculo, a igualdad de componentes y frente a una discretización a intervalo constante en el plano ( $f, \Theta$ ), dado que en ge-

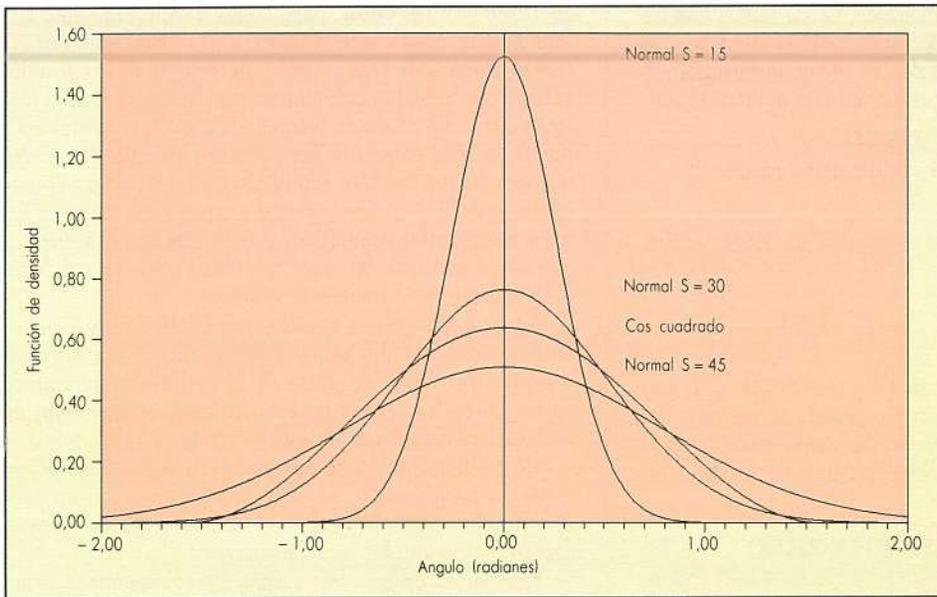


FIGURA 3A. Distribución direccional coseno cuadrado y distribución normal (desviación típica 15, 30 y 45 grados).

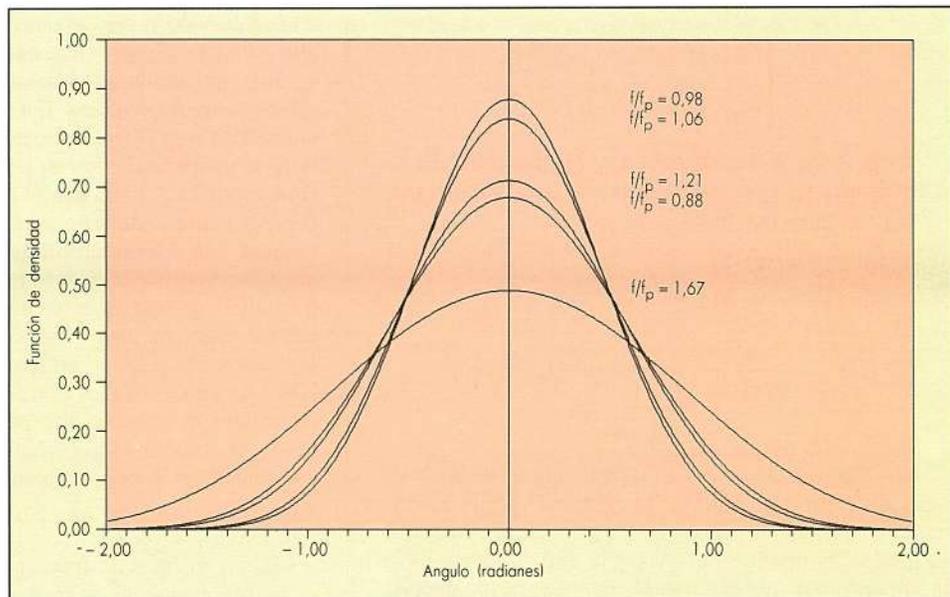


FIGURA 3B. Distribución direccional Mitsuyasu-Goda-Suzuki  $S_{max} = 10$ .

neral la energía se concentra alrededor de una frecuencia de pico, para la que previsiblemente se ha diseñado la malla. Asimismo, y dada la aproximación parabólica que se va a emplear para la propagación de las componentes, este método tenderá a agrupar las componentes más estrechamente alrededor de la dirección principal de propagación, con la consiguiente mejora en la precisión de los resultados.

Este método fue propuesto por Goda para la discretización del espectro frecuencial y ha sido extendido en este trabajo al espectro completo.

Un problema que surge es que dado un determinado

grado de finura de la discretización, por ejemplo definido el número total de elementos a generar, existe un grado adicional de libertad en la distribución entre número de componentes en frecuencias y número de componentes en direcciones. Cabe suponer que en función de la naturaleza del caso tendrá más relevancia la correcta representación en direcciones o en frecuencias, pero el autor no ha obtenido un criterio apriorístico al respecto.

Finalmente, y excepto en el caso de formas espectrales directamente integrables, la equalización deberá llevarse a cabo mediante integración numérica.

**DISCRETIZACION DE S (f)**

La metodología empleada para obtener las  $N_f$  componentes discretas a partir de un espectro  $S(f)$ , ha sido la siguiente:

- A. En primer lugar, se calcula el valor  $m_o/N_f$ , contenido energético de cada una de las rebanadas del espectro discretizado.
- B. La frecuencia media representativa de la rebanada  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_f$ ) será el valor  $f_{mi}$  que satisfaga la ecuación:

$$\int_0^{f_{mi}} S(f) \cdot df = \left( \frac{m_o}{N_f} \right) (i - 1/2)$$

En el caso del espectro Pierson-Moskowitz los valores  $f_{mi}$  se pueden calcular analíticamente, obteniendo:

$$f_{mi} = f_p (-5/(4 L_u ((i - 1/2)/N_f)))^{1/4}$$

En el resto de los casos la ecuación se debe resolver en forma numérica, por aproximaciones sucesivas. El único hecho a señalar es que se debe truncar de hecho el espectro en frecuencias pequeñas para evitar la aparición de valores fuera del rango de los ordenadores (el método empleado ha sido cortar el espectro por la frecuencia tal que  $S(f_{mi})/S(f_p) < 10^{-30}$ ).

El método numérico empleado ha sido el de acotación en un intervalo y partición sucesiva, relativamente lento pero apropiado en este caso. Las integrales se han calculado por el simple método del trapecio con iteraciones de intervalo mitad hasta que la diferencia de iteraciones sucesivas fuera menor que un determinado valor.

**DISCRETIZACION DEL G (f,  $\Theta$ )**

El último paso para la completa discretización del espectro consiste en la distribución de componentes en el dominio direccional para cada una de las bandas de frecuencia definidas en el punto anterior.

El proceso es exactamente similar al empleo en el caso anterior, quedando la dirección de cada intervalo definida por:

$$\int_0^{\Theta_{mi}} G(\Theta) d\Theta = \frac{1}{N_\Theta} (i - 1/2), i \leq \frac{N_\Theta}{2} \text{ si } N_\Theta \text{ es par}$$

$$\frac{1}{N_\Theta} (i - 1), i < \frac{N_\Theta}{2} \text{ si } N_\Theta \text{ es impar}$$

Lógicamente, para cada valor calculado se estarán obteniendo las direcciones  $\Theta_{mi}$  y  $-\Theta_{mi}$  representativas de dos intervalos simétricos respecto a la dirección de propagación media (excepto para  $i = 1$  con  $N_\Theta$  impar).

Las soluciones se suelen obtener en forma numérica; sin embargo, para la distribución coseno cuadrado es

posible obtener una ecuación implícita más sencilla.

$$2\Theta_{mi} + \text{sen } 2\Theta_{mi} = 2\pi I$$

Siendo  $I$  el valor especificado para la integral en cada caso.

El procedimiento numérico empleado es el mismo utilizado para la discretización frecuencial.

Una vez realizada la discretización de las componentes representativas del espectro, todas ellas con el mismo contenido energético, se procede a la aplicación del modelo de propagación a cada una de ellas. La materialización de cada elemento discreto del espectro se realiza con una onda de frecuencia  $f_{mi}$ , dirección  $\Theta_{mi}$  y altura la media cuadrática correspondiente a una energía  $m_o/(N_f N_\Theta)$  (la altura es irrelevante para el modelo debido a su carácter lineal a no ser que se quieran tener en cuenta aspectos no lineales como fricción, rotura, etc.), introduciendo además una fase inicial  $\varphi$  pseudo aleatoria en cada componente para obtener una buena representación de la superficie libre instantánea.

El modelo numérico de propagación empleado es un esquema de resolución en diferencias finitas sobre una malla rectangular y empleando el método de Crank-Nicholson de una aproximación parabólica a la ecuación de Berkhoff (ecuación de la «mild slope») que se puede escribir como la siguiente ecuación diferencial en variable compleja (Kirby, 1986):

$$(C C_y A_y) \left( \frac{i}{w} \left( a_1 - b_1 \frac{k_0}{k} \right) + \frac{b_1}{w} \left( \frac{k_x}{k^2} + \frac{C_{gx}}{2 k C_y} \right) \right) +$$

$$+ A_x C_y + A (i (K_0 - a_0 k) C_y + (C_{gx} / 2)) -$$

$$- b_1 C ((C C_y A_y) / w = 0$$

En su versión lineal sin incluir fricción ni interacción oleaje-corrientes.  $A$  es la amplitud compleja;  $C$  y  $C_g$  las celeridades de onda y grupo;  $k$  y  $w$ , el número de onda y frecuencia;  $i$ , la unidad compleja, y  $a_0, a_1, b_1$  y  $k_0$ , coeficientes. Los subíndices  $x$  e  $y$  indican derivación parcial.

La aplicación de esta ecuación a oleaje monocromático ha sido presentada y discutida en numerosas publicaciones. Su principal limitación es su rango de validez angular a partir de una dirección preferente de propagación (eje  $x$  en la ecuación anterior). Es por ello especialmente útil el esquema de discretización equalizada para oleaje direccional, que minimiza sin necesidad de truncamiento la separación entre la dirección de propagación de cada componente y la media, de acuerdo con la cual se debe plantear la orientación de la malla de cálculo.

Los resultados de la propagación en cada nodo, en forma de contenido de energía, se van acumulando con cada componente, para reconstruir finalmente el momento de orden cero en cada nodo y estimar a partir de él la altura significativa. Una dirección representativa

podría obtenerse asimismo como media de las direcciones obtenidas para cada componente.

### CONTRASTE DEL MODELO REFDIF10 CON ENSAYOS EN MODELO FISICO

Si bien el autor ha desarrollado y aplicado el modelo REFDIF10 desde hace un cierto tiempo, no ha sido hasta la reciente publicación del trabajo de Vincent et al. que se ha dispuesto de un elemento de validación no teórica y al menos parcial, de los resultados de su aplicación. Estos autores han realizado una serie de ensayos en un tanque de oleaje de 35 por 29 metros, dotado de un generador segmentado de oleaje irregular que permite la reproducción de oleaje irregular frecuentemente direccional. Hasta fechas muy recientes, este tipo de generadores se han empleado casi exclusivamente para estudios de plataformas offshore, en aguas profundas y, por tanto, sin posibilidad de análisis del efecto de los fondos en la propagación.

La batimetría elegida por Vincent et al. ha sido una variante del ya clásico bajo elíptico (Figura 4), prueba dura para los modelos de propagación, dado que los modelos de refracción conducen a alturas infinitas en el cóustico que aparece tras el bajo, siendo necesario en cualquier caso el empleo de un modelo de refracción difracción.

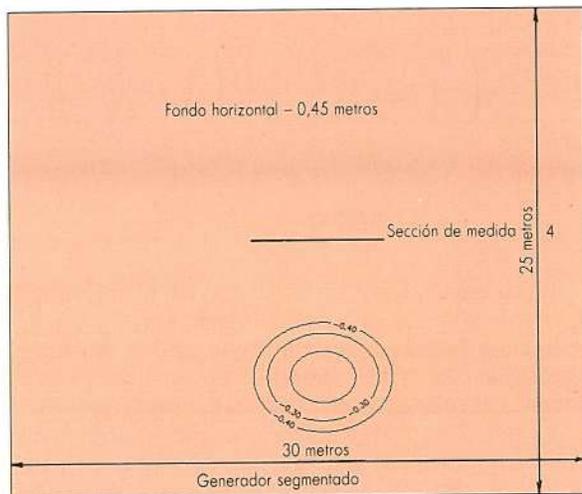


FIGURA 4. Generador direccional. Disposición de modelo.

Las pruebas realizadas han consistido en una serie de ensayos con oleaje regular e irregular, midiendo la altura de ola (significante en los casos de oleaje irregular) en diversas zonas del modelo.

Una primera serie de ensayos (números 1 a 7) ha sido realizada con una altura de ola que ha debido provocar un cierto grado de rotura del oleaje sobre el bajo. La segunda serie (ensayos 8 a 14) se ha realizado con un oleaje de amplitud suficientemente pequeña como para garantizar la no rotura del oleaje sobre el bajo.

Esta serie de ensayos es la que se ha reproducido con el modelo matemático REFDIF10, y sus características se muestran en la Tabla I.

NUMERO	CASO	TIPO	PERIODO	ALTURA	$\gamma$	$\sigma_m$ (GRADOS)
8	M2	MONO	1,30	2,54	*	*
9	U3	ESPE	1,30	2,54	2	0
10	N3	ESPE	1,30	2,54	2	10
11	B3	ESPE	1,30	2,54	2	30
12	U4	ESPE	1,30	2,54	20	0
13	N4	ESPE	1,30	2,54	20	10
14	B4	ESPE	1,30	2,54	20	30

TABLA I.

El tipo Mono indica monocromático y Espe oleaje irregular. El espectro empleado ha sido el TMA y la distribución direccional de tipo normal, con las desviaciones típicas señaladas en cada caso. Los períodos (de pico en los casos irregulares) están en segundos y las alturas en centímetros.

La batimetría se ha modelizado para la aplicación del modelo numérico con una malla rectangular de 121 por 101 nodos, con espaciamento de 0,25 metros. En todos los casos de oleaje irregular la discretización se ha realizado con  $N_r = 10$  y en los casos de oleaje direccional con  $N_\theta = 10$ . Como ejemplo de discretización, se incluyen las Figuras 4A y 4B, no correspondientes a este caso. Evidentemente se debería haber empleado una discretización comparativamente más fina en el caso con mayor apertura angular, pero se ha preferido hacerlo así para poder analizar el efecto de la finura de discretización en los resultados e intentar acotar el orden de magnitud del número de componentes que produce una simulación adecuada.

Los resultados de estas propagaciones (alturas de ola) se recogen en las Figuras 5A-G, extendidas a toda el área modelizada, y en las figuras 6A-G, en una zona inmediatamente tras el bajo. Como se puede apreciar con toda claridad, la direccionalidad del oleaje tiene una influencia dramática en la distribución de alturas de ola tras el bajo, llegando a desaparecer casi en su totalidad el cóustico en los casos con mayor direccionalidad ( $\sigma_m = 30$  grados). Comparativamente, el mayor o menor apuntamiento del espectro tiene una influencia muy pequeña, como se puede observar analizando los casos N3 - N4, B3 - B4 y U3 - U4. Este resultado es incluso irónico si se piensa en el grado de conocimiento y caracterización climática de ambos parámetros.

Desde el punto de vista de la validación del modelo, Vicent et al. han publicado para estos siete casos los resultados en nueve puntos de una sección de medida situada tras el bajo (sección 4 en la Figura 4) y en la

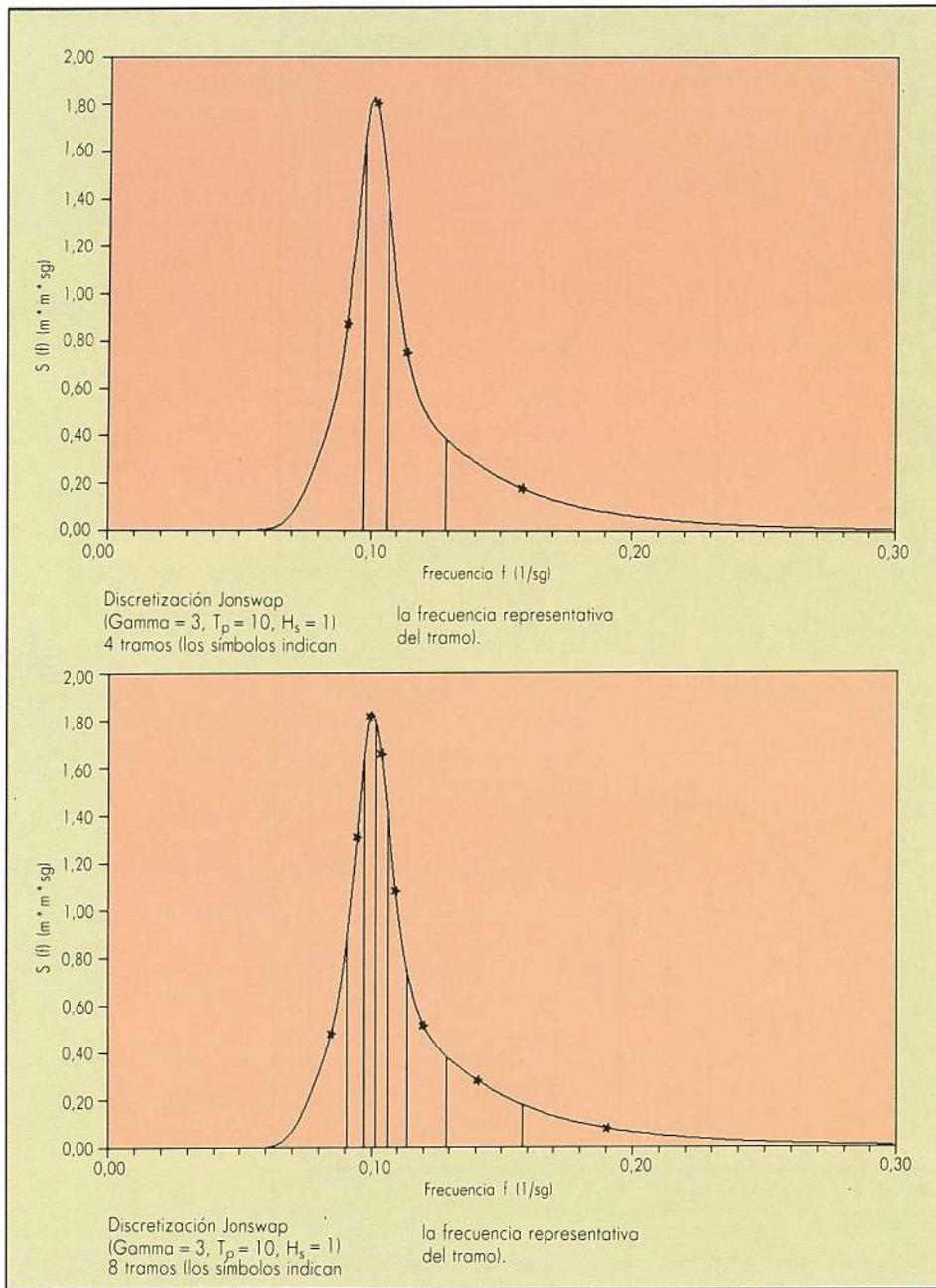


FIGURA 4A.

que, por tanto, el oleaje ha sufrido previamente efectos de refracción, shoaling y difracción. Los resultados del modelo matemático más próximos a esta sección se representan en las Figuras 7A-G junto al caso correspondiente del experimento en modelo reducido. Como se puede ver, los resultados son concordantes en elevado grado con los del modelo físico, con la importante conclusión de que en este caso el modelo **REFDIF10** reproduce con alta precisión la propagación de un oleaje irregular frecuencial-direccional.

Para obtener una idea cuantitativa de la calidad de

los resultados del modelo, se ha procedido a un análisis de errores a través de los siguientes parámetros:

$$A) \quad \sigma = \frac{(\sum (H_{mf} - H_{mm})^2)^{1/2}}{(\sum (H_{mf})^2)^{1/2}}$$

siendo  $H_{mf}$  la altura en cada punto medido en el modelo físico y  $H_{mm}$  el valor correspondiente al punto más próximo en el modelo matemático. Con ello,  $\sigma$  resulta ser el error relativo medio cuadrático, cuyo valor 0 equivaldría

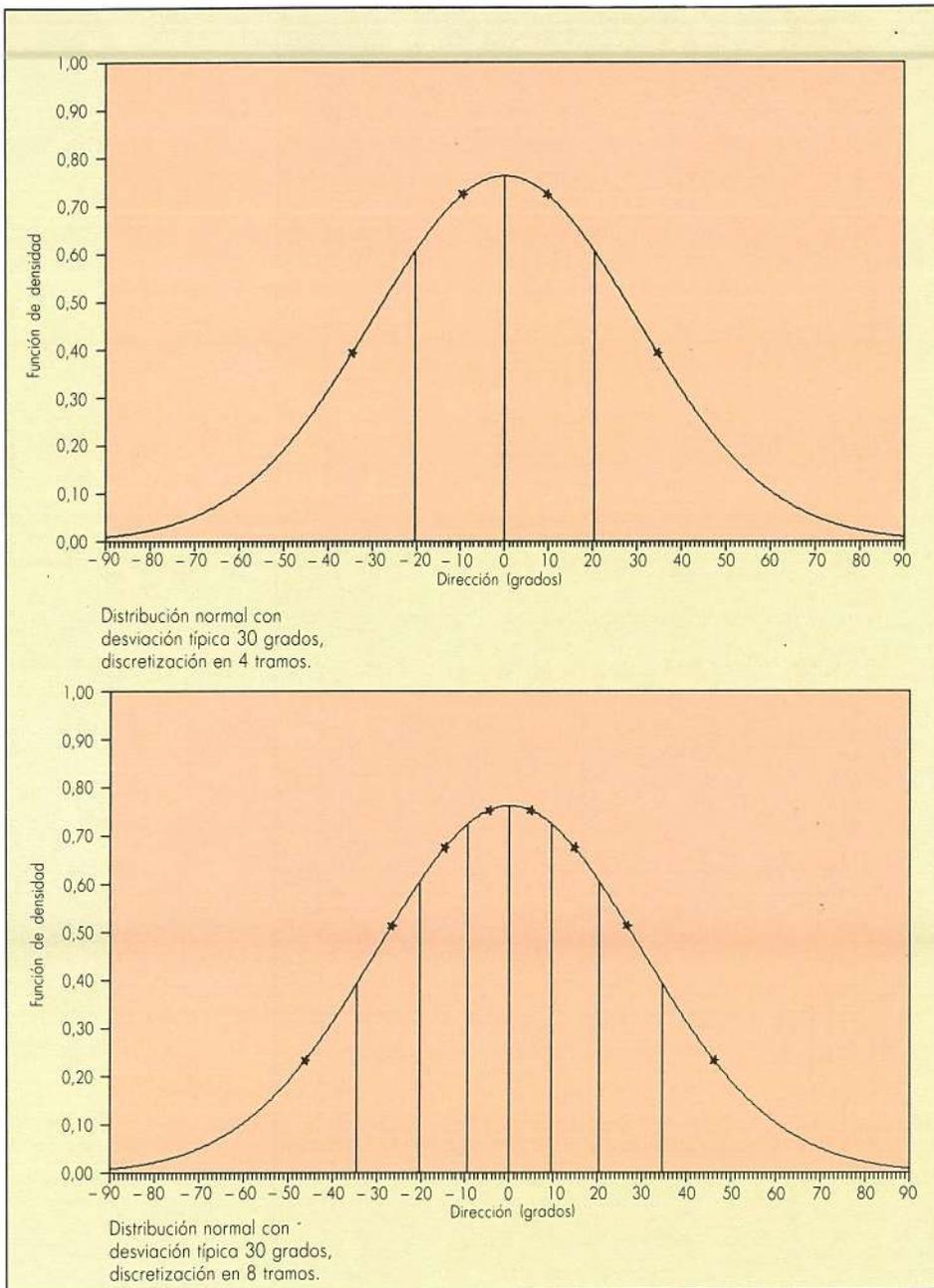


FIGURA 4B.

a un ajuste perfecto y el valor 1 a la no realización de predicción alguna ( $H_{mm} = 0$ ), si bien no es un parámetro acotado.

$$B) \quad \sigma' = \frac{(\sum (H_{mf} - H_{mm})/H_{mf})^2)^{1/2}}{N^{1/2}}$$

siendo  $N$  el número de puntos de comparación. Este es un error medio relativo más frecuente, que pondera igualmente los errores relativos en todos los puntos de medida, mientras que el anterior da mayor peso a aquellos puntos en los que el error absoluto es mayor. Los resultados para ambos parámetros en cada caso se muestran en la Tabla II.

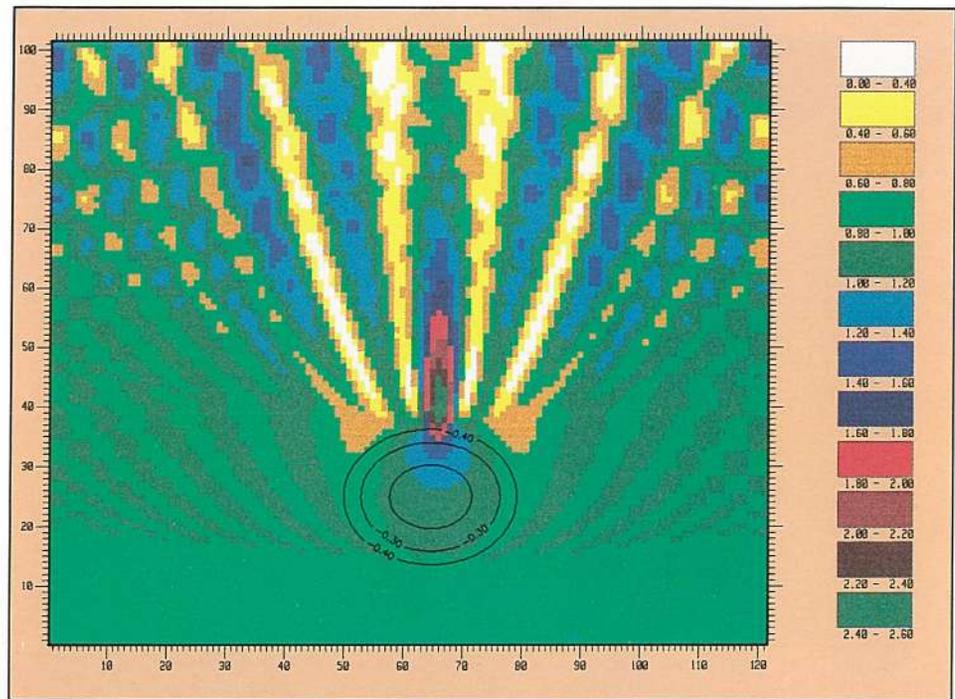


FIGURA 5A. Alturas de ola. Caso M2.

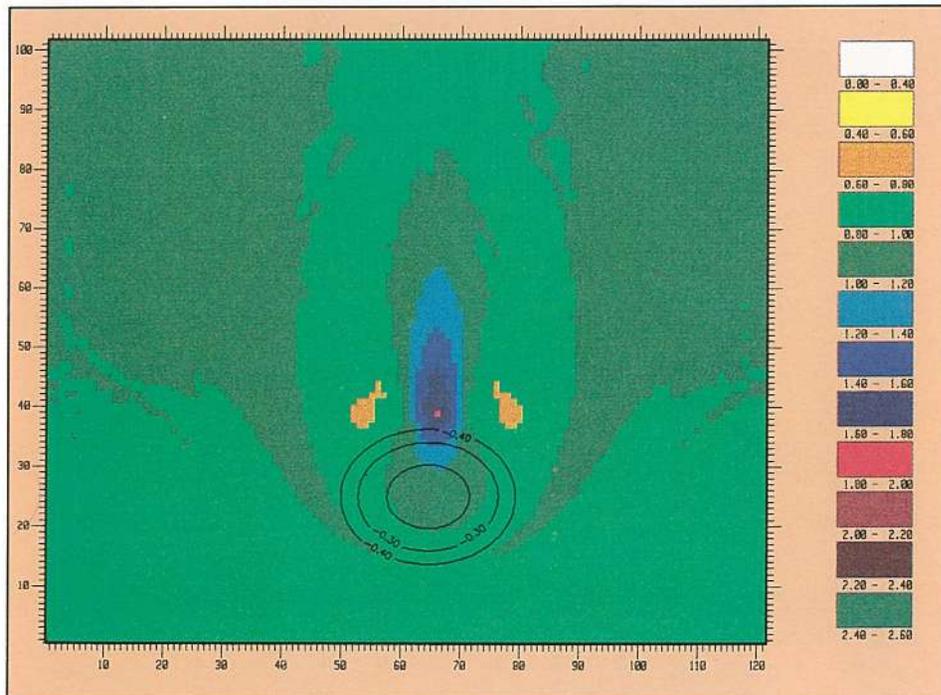


FIGURA 5B. Alturas de ola. Caso N3.

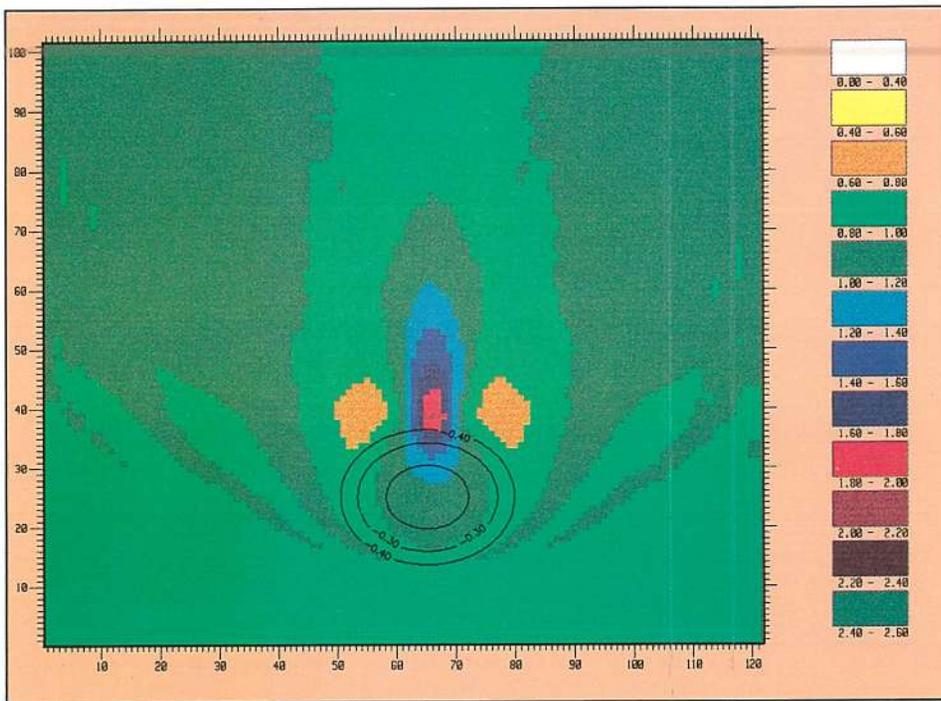


FIGURA 5C. Alturas de ola. Caso N4.

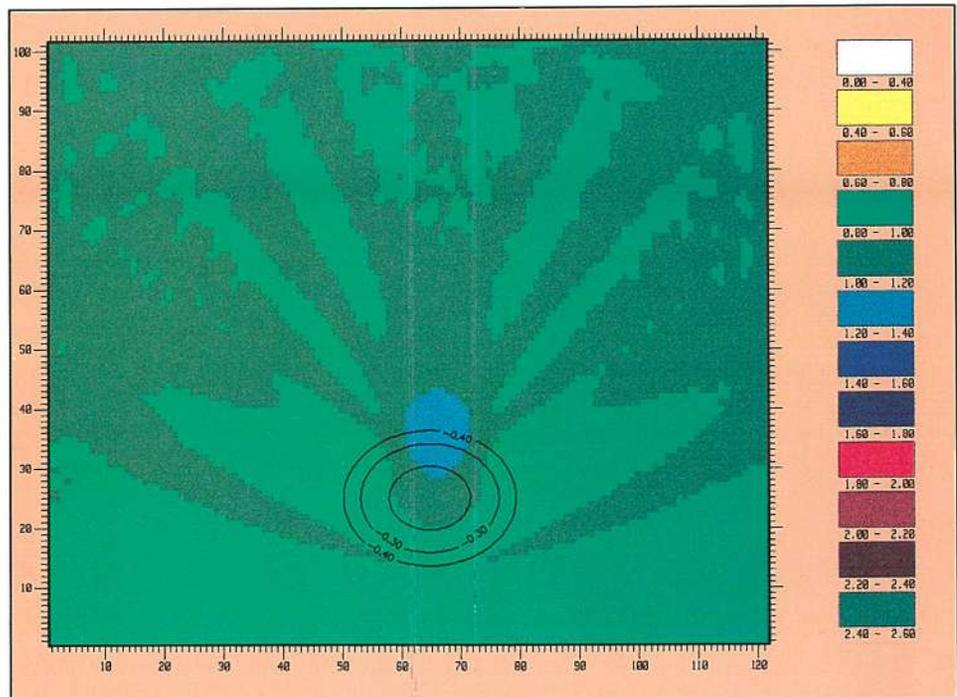


FIGURA 5D. Alturas de ola. Caso B3.

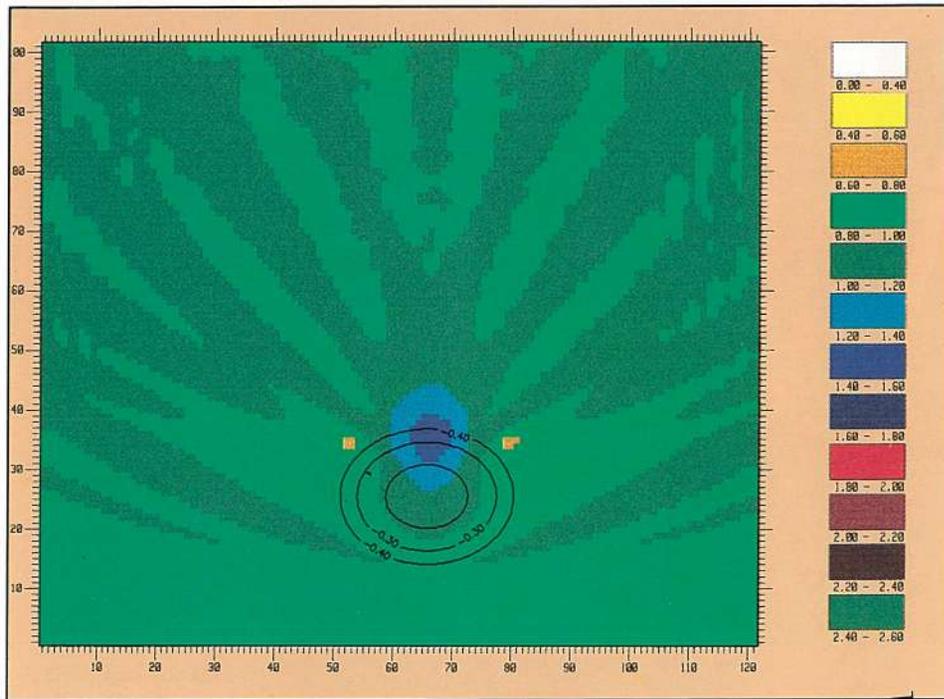


FIGURA 5E. Alturas de ola.  
Caso B4.

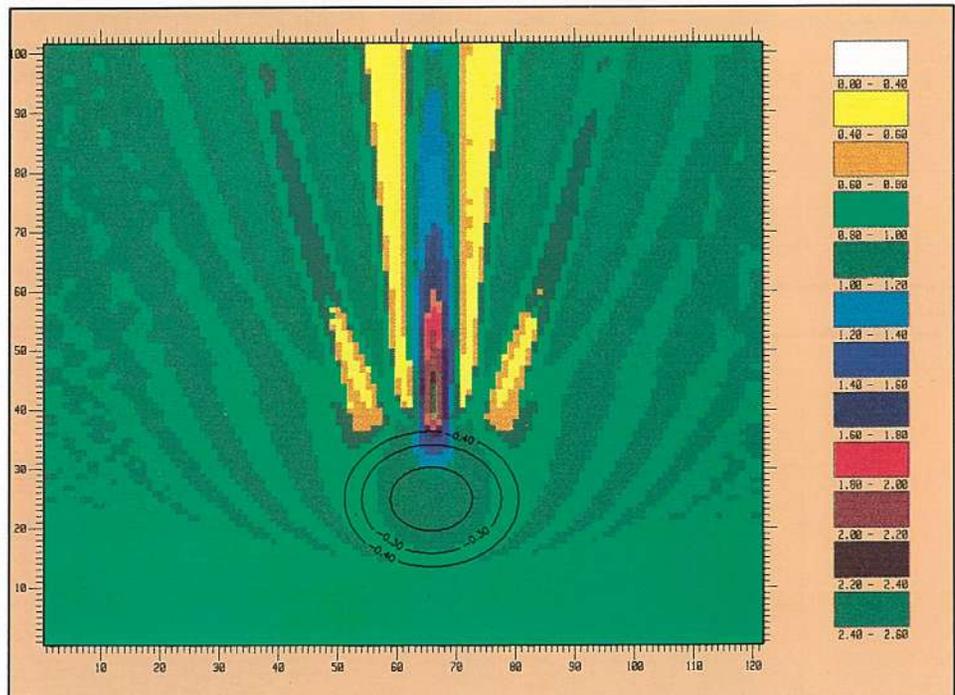


FIGURA 5F. Alturas de ola.  
Caso U3.

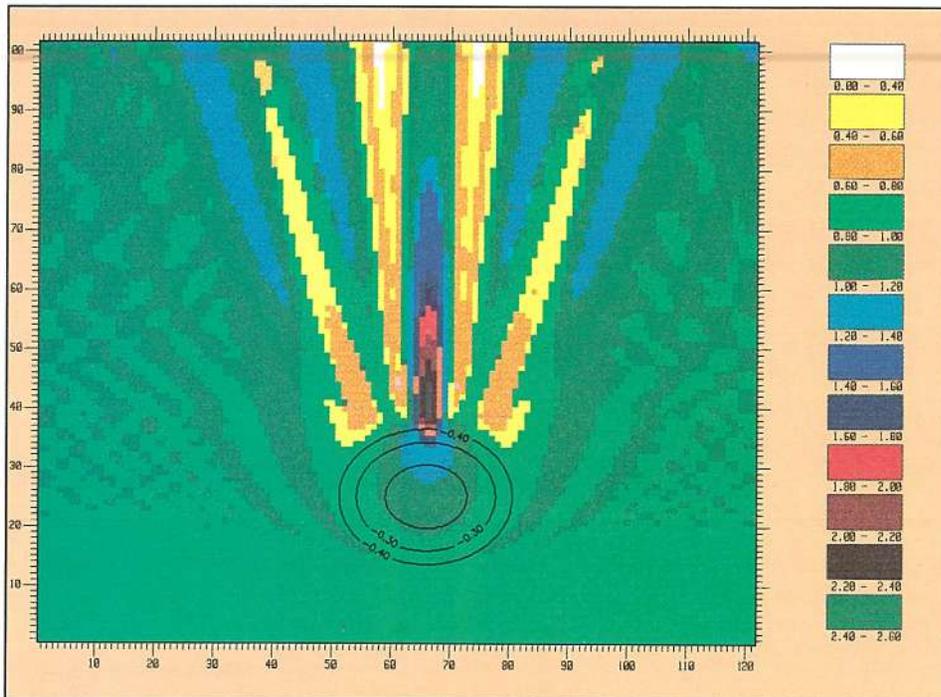


FIGURA 5G. Alturas de ola. Caso U4.

CASO	$\sigma$	$\sigma'$
M3	0,1013	0,1561
N3	0,0382	0,0358
N4	0,0938	0,1200
B3	0,0473	0,0442
B4	0,1613	0,1763
U3	0,0788	0,1420
U4	0,0490	0,0556

TABLA II.

Como se ve, los valores de estos errores relativos medio cuadráticos indican un ajuste excelente entre el modelo matemático y el experimento a escala reducida. En este punto es necesario resaltar que el modelo matemático no posee ningún parámetro de ajuste o calibración, siendo el único aspecto decidible la finura de la discretización.

Como se puede ver, los errores son inferiores al 10 %, excepto en el caso de oleaje regular y en el caso B4. Respecto a este último, cabe incluso plantearse la posibilidad de un problema de calibración de las sondas de medida en el modelo físico. El hecho curioso de que las propagaciones con oleaje irregular den un error me-

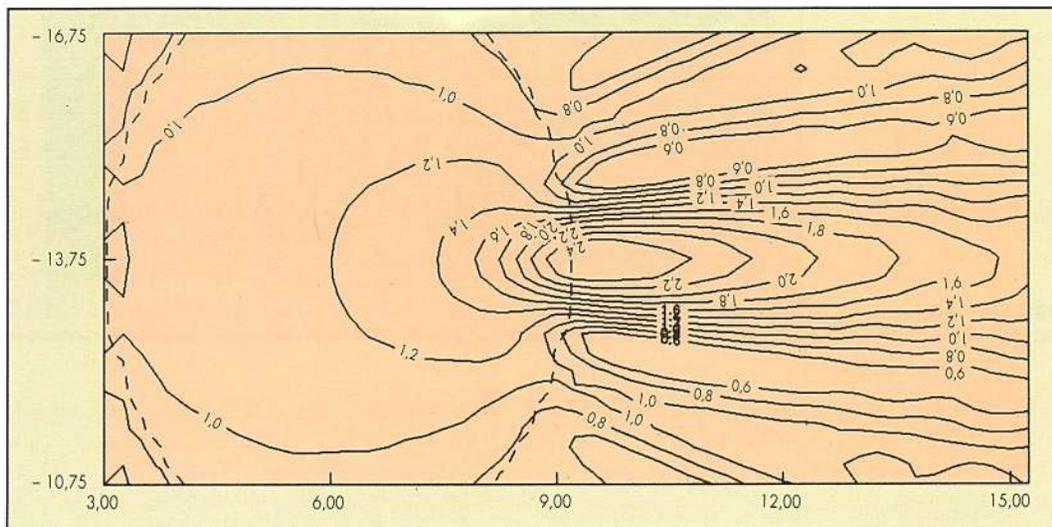
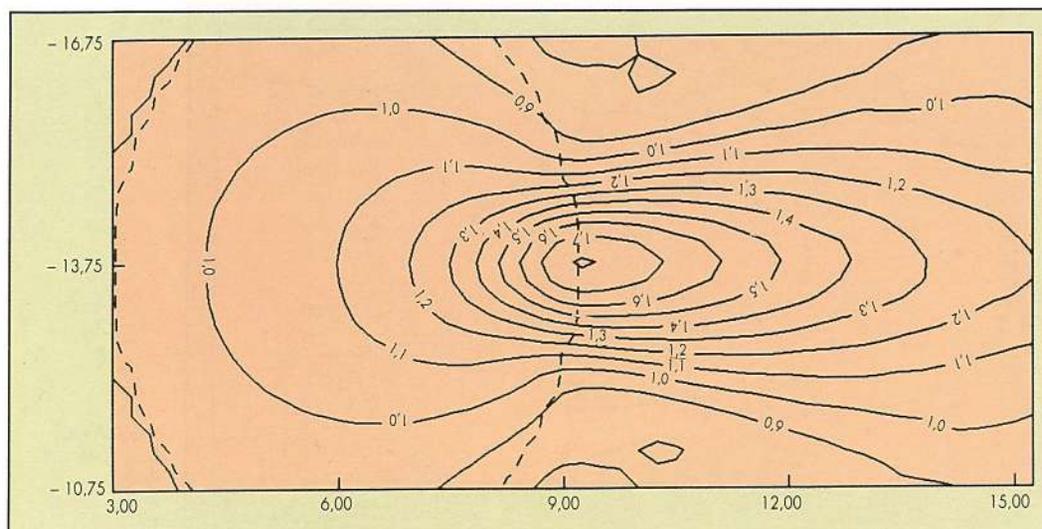
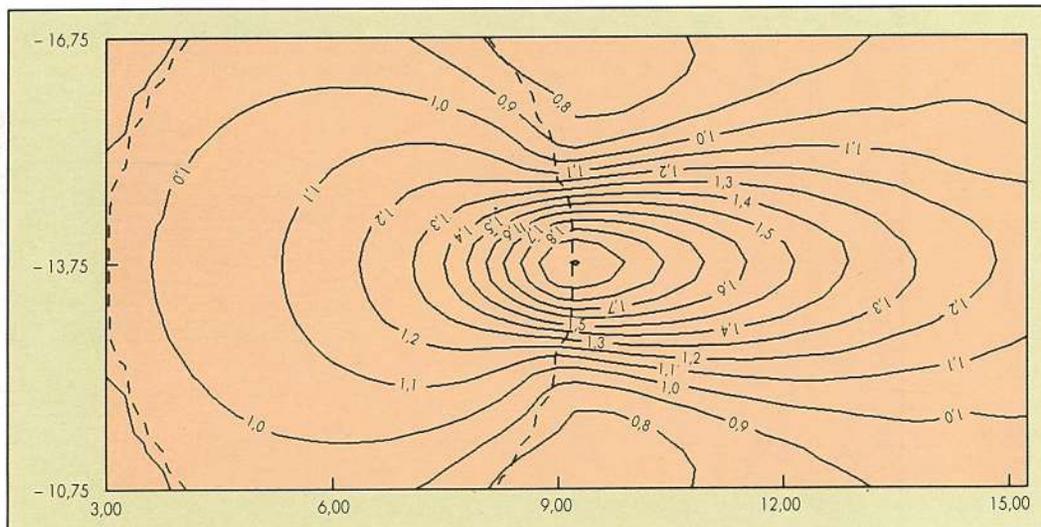


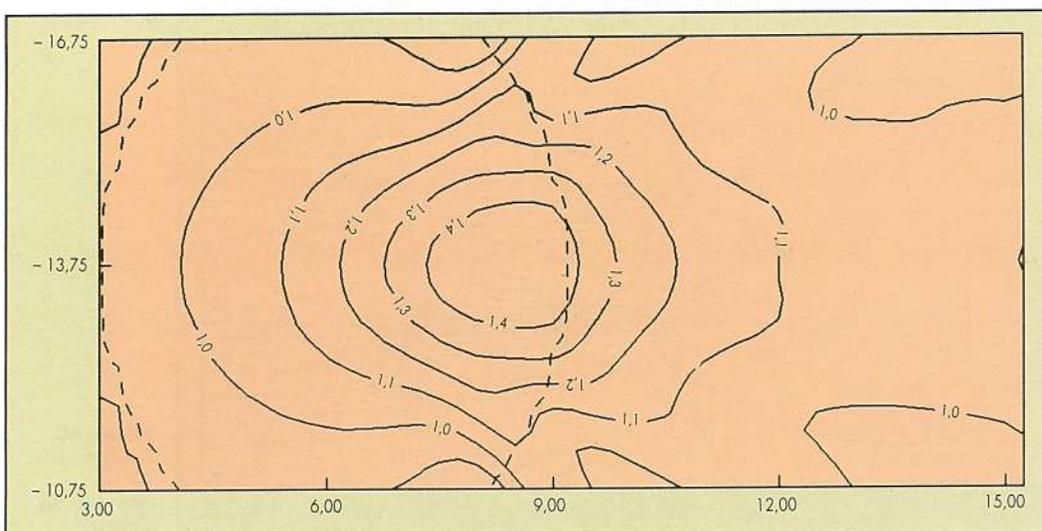
FIGURA 6A. Simulación con Refdifio. Alturas de ola. Caso M2.



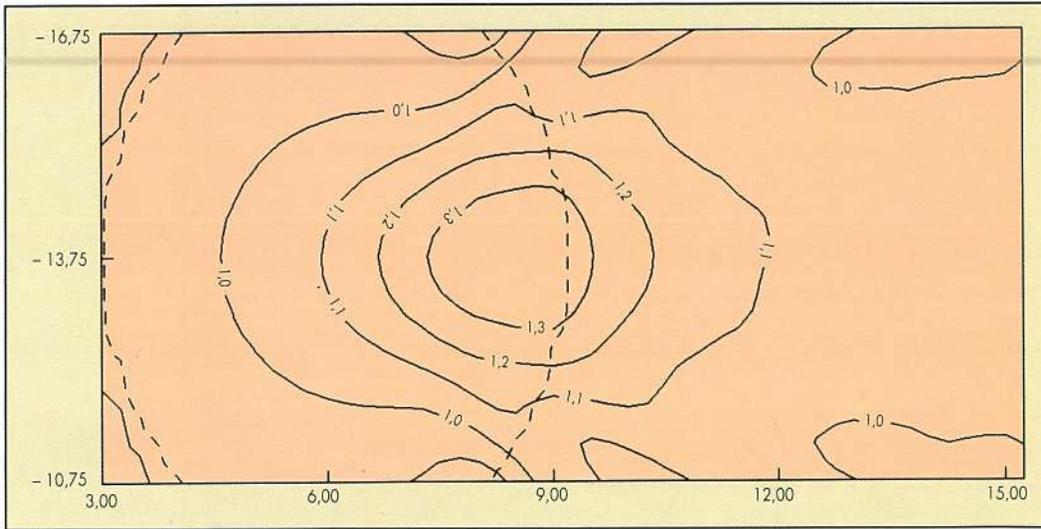
**FIGURA 6B.**  
Simulación con Refdifio.  
Alturas de ola.  
Caso N3.



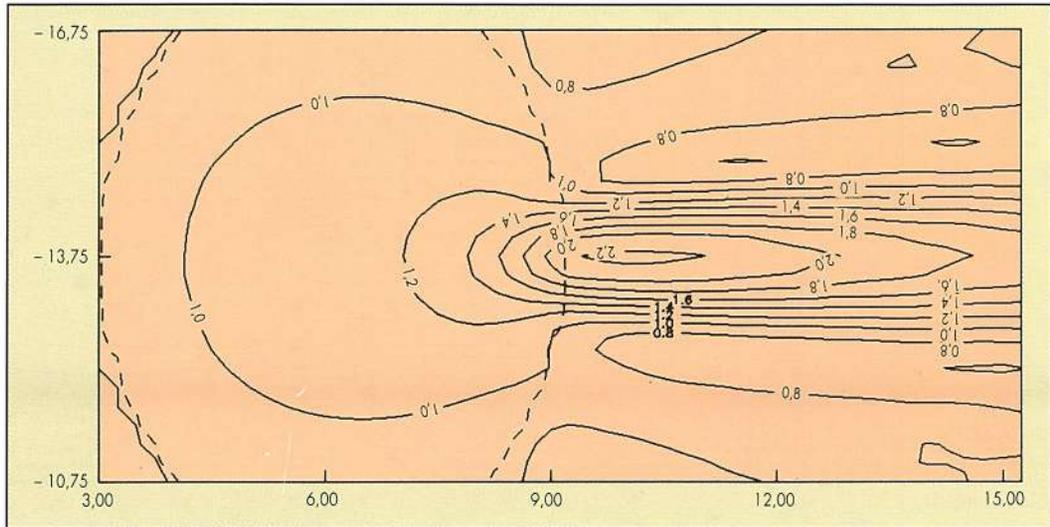
**FIGURA 6C.**  
Simulación con Refdifio.  
Alturas de ola.  
Caso N4.



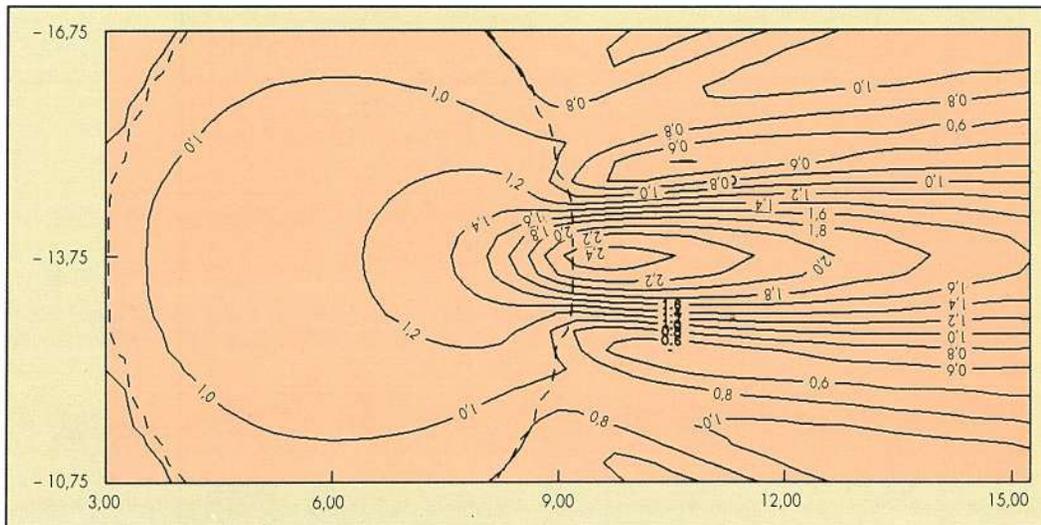
**FIGURA 6D.**  
Simulación con Refdifio.  
Alturas de ola.  
Caso B3.



**FIGURA 6E.**  
Simulación con  
Refdifio.  
Alturas de ola.  
Caso B4.



**FIGURA 6F.**  
Simulación con  
Refdifio.  
Alturas de ola.  
Caso U3.



**FIGURA 6G.**  
Simulación con  
Refdifio.  
Alturas de ola.  
Caso U4.

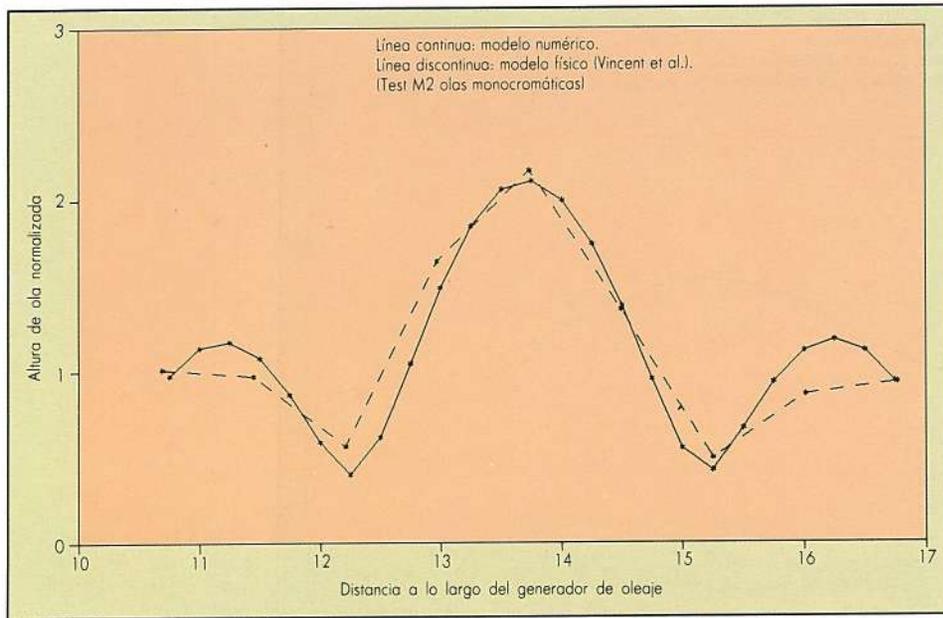


FIGURA 7A. Comparación entre modelo físico (Vincent et al., 1989) y este modelo numérico. Test M2.

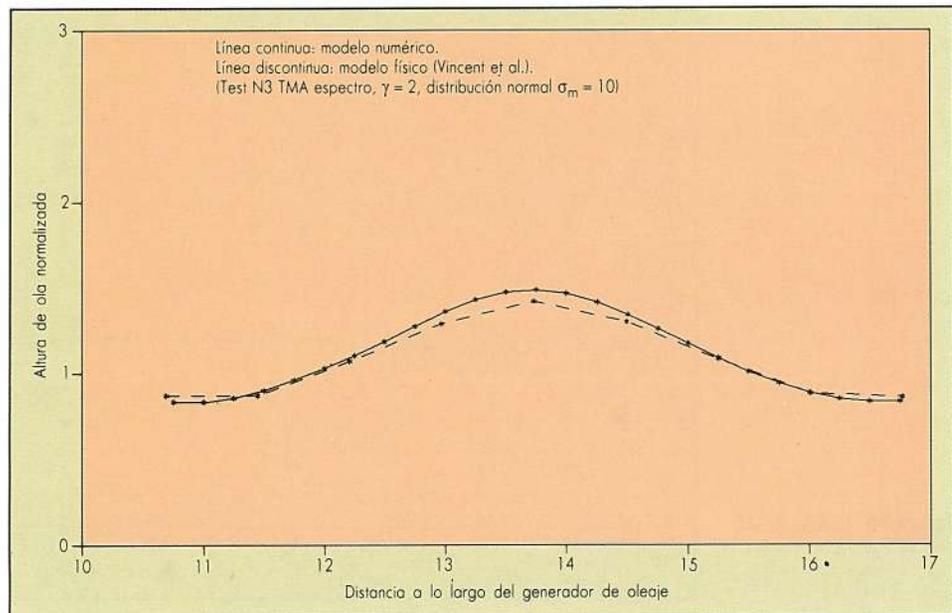


FIGURA 7B. Comparación entre modelo físico (Vincent et al., 1989) y este modelo numérico. Test N3.

dio menor que las del monocromático, puede deberse al efecto, como filtro de paso bajo, de la irregularidad del oleaje con respecto al gradiente de alturas de ola, haciendo al oleaje menos sensible a la disposición de los fondos y al efecto concreto sobre una componente de dirección y frecuencia determinada.

Dada la sencillez del modelo postulado y el grado de ajuste alcanzado, cabe concluir que en este caso el método empleado de simple superposición de componentes es válido, siendo, en consecuencia, despreciables los

efectos de interacción onda-onda y pequeños los derivados de la no linealidad.

### CONCLUSIONES

Se ha presentado la metodología seguida en el desarrollo del modelo numérico **REFDIF10**, de propagación de oleaje irregular frecuencial direccional, en el CEPYC-CEDEX. El modelo se ha contrastado con una experiencia a escala reducida realizada en el CERC por Vincent et al. con resultados sumamente satisfactorios.

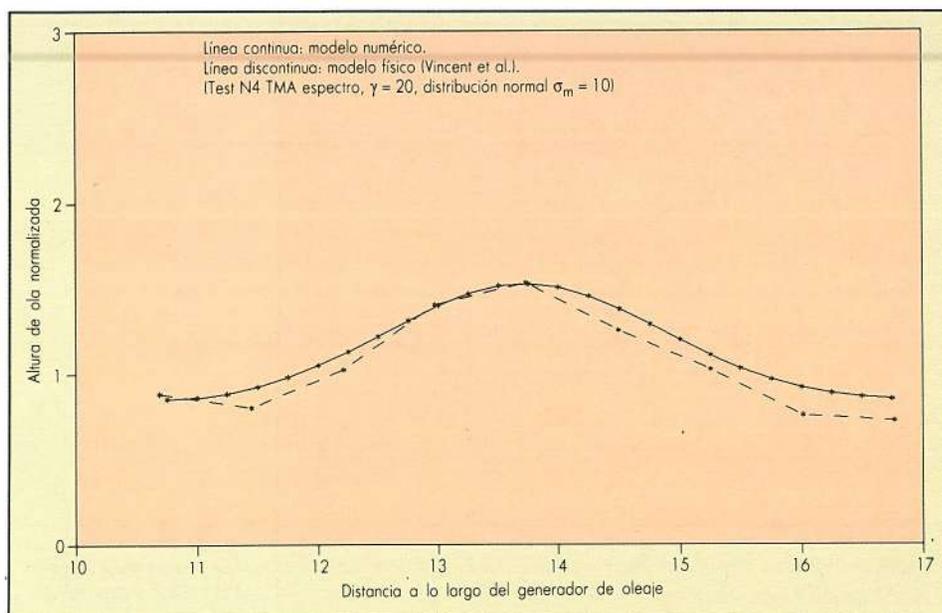


FIGURA 7C. Comparación entre modelo físico (Vincent et al., 1989) y este modelo numérico. Test N4.

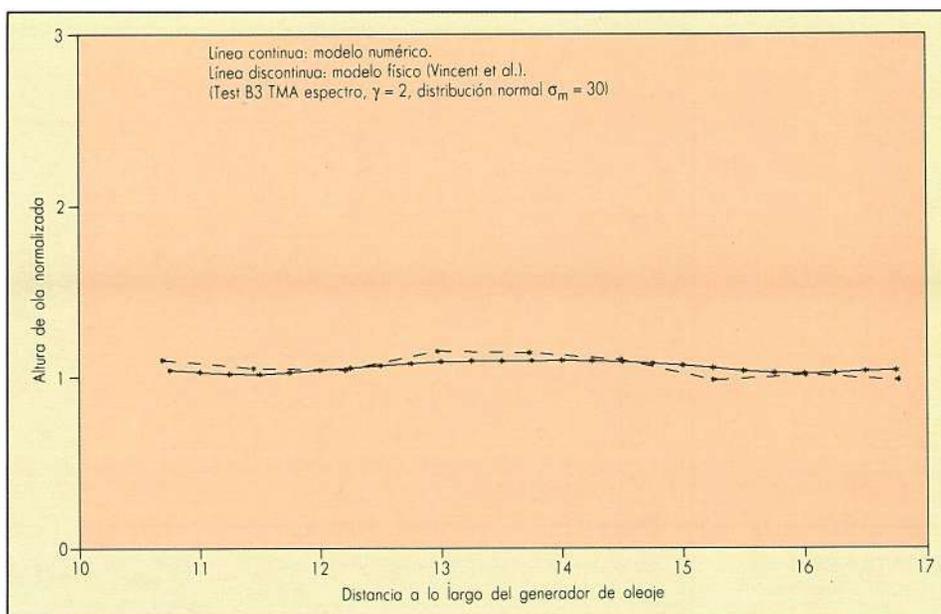


FIGURA 7D. Comparación entre modelo físico (Vincent et al., 1989) y este modelo numérico. Test B3.

Cabe, por tanto, señalar que se dispone de una herramienta operativa, dentro del campo de sus limitaciones, para el estudio de la propagación de oleaje irregular direccional en áreas extensas, lo que abre un nuevo y amplio panorama en la posibilidad de estudio del oleaje en zonas costeras.

Dentro de este estudio a comenzar, se considera de gran interés la realización de un análisis sistemático de la repercusión de la direccionalidad en situaciones idealizadas clásicas (refracción sobre batimetría rectilínea y paralela, difracción provocada por un obstáculo semiin-

finito...), completando el trabajo realizado por Goda con un modelo analítico y obteniendo una idea clara de la repercusión de la direccionalidad en situaciones típicas. Asimismo se pretende trabajar en la inclusión en una forma empírica de la rotura del oleaje en el modelo.

En paralelo, y trascendiendo al hecho del modelo, a la vista de las profundas diferencias en altura de ola significativa que pueden darse en un punto en función simplemente de la direccionalidad del oleaje, parece sumamente urgente la realización de un especial esfuerzo de medida para conseguir una urgente caracterización

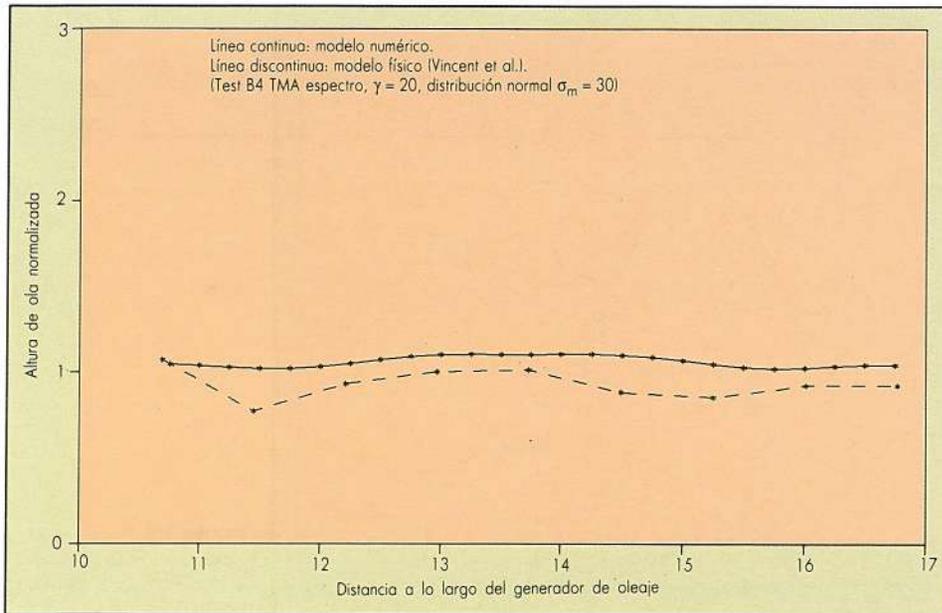


FIGURA 7E. Comparación entre modelo físico (Vincent et al., 1989) y este modelo numérico. Test B4.

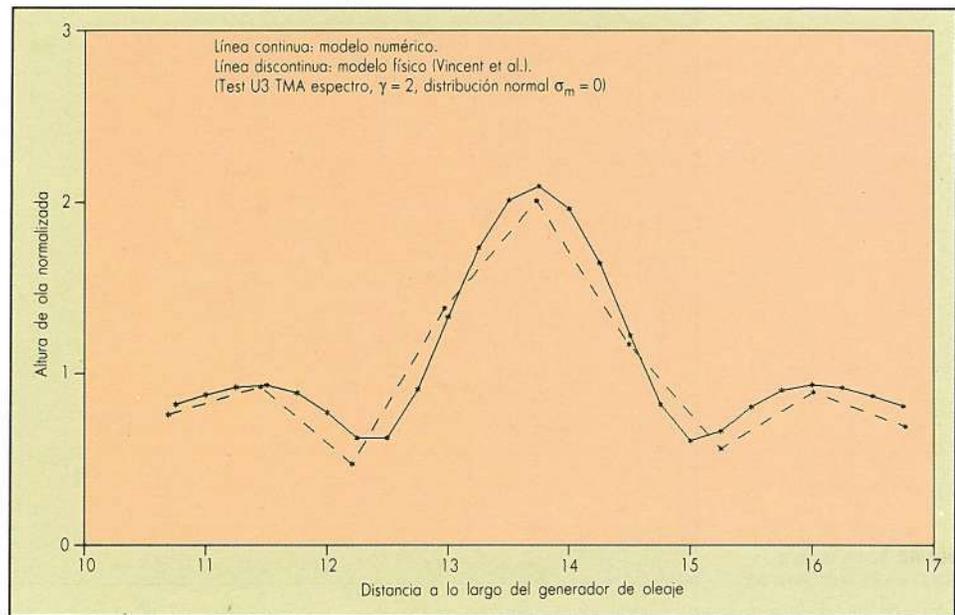


FIGURA 7F. Comparación entre modelo físico (Vincent et al., 1989) y este modelo numérico. Test U3.

de este aspecto en las costas españolas. Es cierto que al ir a profundidades reducidas, la direccionalidad del oleaje va perdiéndose por efecto de la refracción, pero de hecho existen muchas obras situadas en profundidades relativas grandes y la distribución direccional más empleada desde antiguo, la coseno cuadrado, es aún más abierta que la normal con desviación estándar 30 grados, cuyos efectos sobre la altura de ola en comparación con los casos monocromáticos o simplemente irregulares en frecuencias se puede ver en las figuras para el caso estudiado. La Figura 8 explicita este hecho: si suponemos que a lo largo de un tramo de costa la distribu-

ción de alturas de ola con y sin direccionalidad es la que muestra la figura, es claro que, frente al temporal de cálculo, la obra dimensionada para el punto A mediante técnicas convencionales resistirá independientemente de la direccionalidad. Sin embargo, la obra B podrá verse arruinada con temporales de altura muy inferior a la de cálculo en función precisamente de la direccionalidad del oleaje.

**AGRADECIMIENTOS**

Se desea agradecer especialmente al Prof. Felipe Martínez su apoyo durante la gestación del trabajo y su contribución con

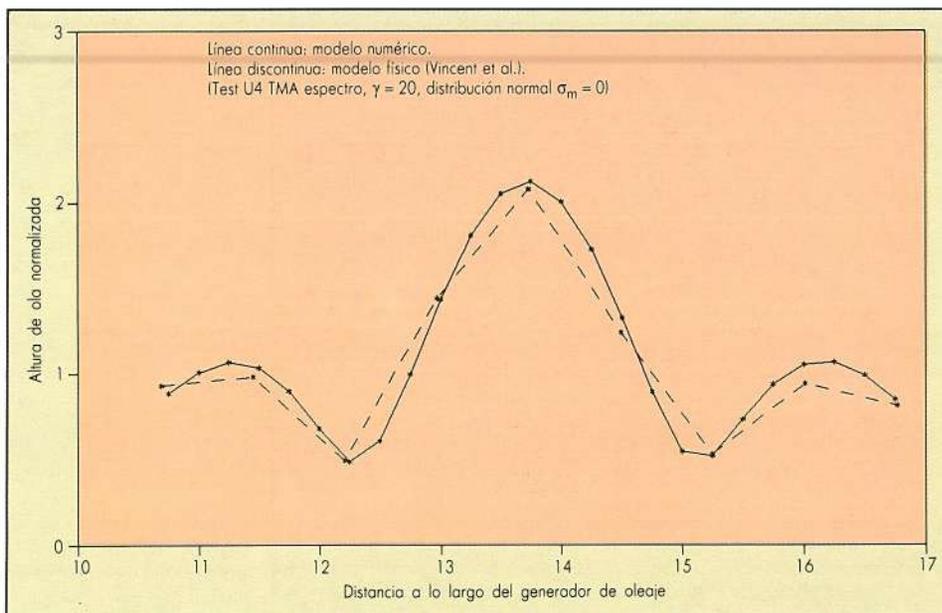


FIGURA 7G. Comparación entre modelo físico (Vincent et al., 1989) y este modelo numérico. Test U4.

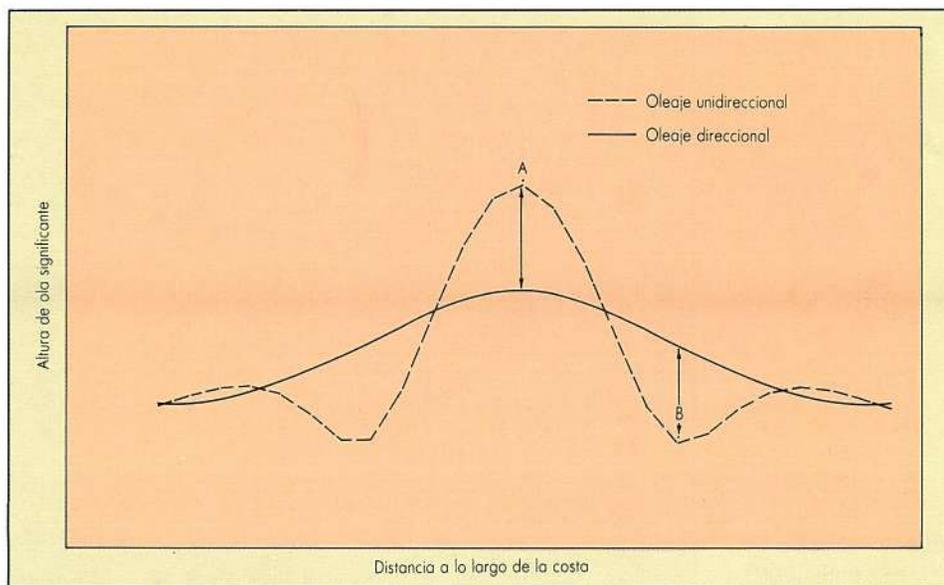


FIGURA 8. Un posible efecto de la direccionalidad.

fructíferas discusiones e intercambio de opiniones. El Dr. Antonio Lechuga introdujo al autor en el estudio de la propagación de ondas a partir de la ecuación de Berkhoff, germen inicial de este trabajo.

El Prof. Yoshimi Goda discutió con el autor en mayo de 1989 una versión previa del trabajo. Sus amables palabras, así como las del Prof. James T. Kirby, han sido un estímulo indudable para la conclusión del mismo.

#### BIBLIOGRAFIA

**Berkhoff, 1972.** «Computation of combined refraction-diffraction». Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE.  
**Radder, 1979.** «On the parabolic equation method for water wave propagation». J. Fluid Mech., V. 95.

**Booij, 1982.** «Gravity waves on water with non-uniform depth and current». Tesis, U. delft.

**Goda, 1985.** «Random seas and design of maritime structures». University of Tokio Press.

**Kirby, 1986.** «Higher order approximations in the parabolic equation method for water waves». J. Geophys. Res., V. 91.

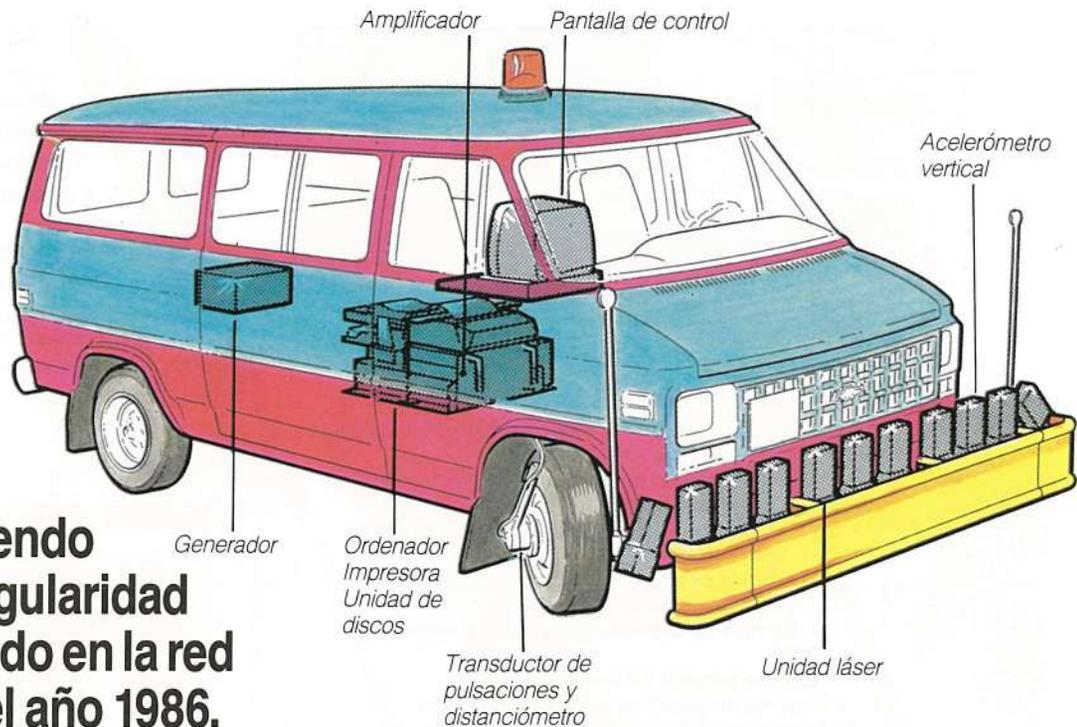
**Grassa, 1988.** «Modelo parabólico de propagación de ondas». Informe CEDEX para la DGPC.

**Vincent, 1989.** «Refraction-Diffraction of irregular waves over a mound». J. W, P, C, and Oc. Eng., ASCE, V. 115.

**Grassa, 1990.** «Directional random wave propagation of beaches». To be published, Proc. 22th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE.

# El RST Láser

Un sistema "no contacto" para determinar el estado del pavimento obteniendo el **IRI**, índice de regularidad superficial. Aplicado en la red del MOPU desde el año 1986.

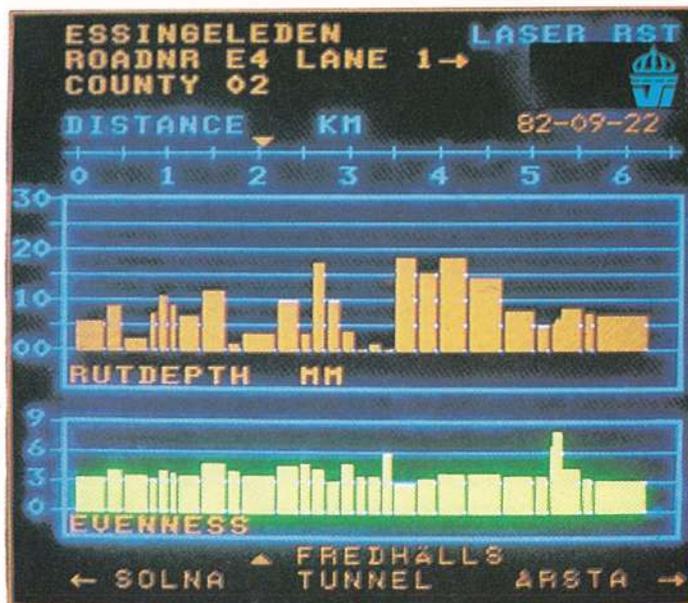


Mediante 11 unidades láser se determina cada decímetro el perfil transversal del carril y se miden las profundidades de las deformaciones longitudinales (roderas), el estado de agrietamiento y la rugosidad superficial, texturas, etc.

Se calcula el **índice de regularidad superficial** como dato objetivo del estado del firme, que permite tramificar los trayectos auscultados para proyectar los tratamientos correctores o para realizar otras auscultaciones más lentas y costosas (por ejemplo deflexionar) **en aquellos tramos que realmente lo requieran**.

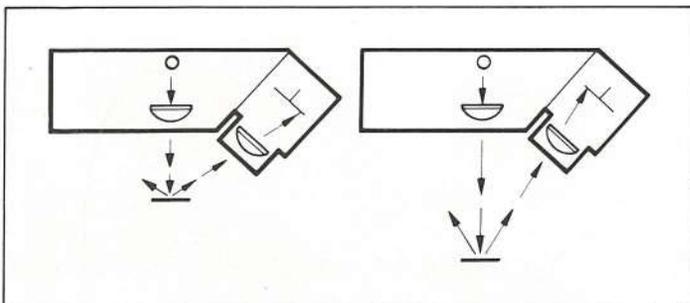
La auscultación periódica con el RST Láser, permite la evaluación objetiva de la bondad de los tratamientos aplicados en un determinado tramo, pudiendo llegar a la solución del más idóneo para cada estado inicial, **IRI inicial**.

La auscultación se realiza a la velocidad de circulación de los vehículos pesados (60 a 90 km/hora) sin molestias especiales para la circulación de usuarios.



Profundidad de roderas y rugosidad - Índice de servicio de un carril de un camino. La anchura de las columnas corresponde a la longitud del tramo y su altura indica el valor variable.

## LAS UNIDADES LASER



El punto de luz sobre la superficie de la carretera, se proyecta sobre un sensor de desplazamiento sensible a la luz. Las señales eléctricas que representan la posición vertical y la intensidad de la luz del punto, se registran y procesan en el ordenador.

**SISTEMA UTILIZADO EN LA AUSCULTACION DE FIRMES EN SUECIA, EE.UU., AUSTRALIA, ETC.**

**AEPO, S.A.**

Rafael Calvo, 9  
28010 Madrid  
Teléfono: (91) 446 64 00  
Fax: (91) 445 99 05

**Información:**

D. JAVIER ORTUETA SAINZ (Ingeniero Industrial)

Equipo para ensayos no destructivos de cargas repetidas en pavimento de aeropuertos.



### ACTIVIDADES

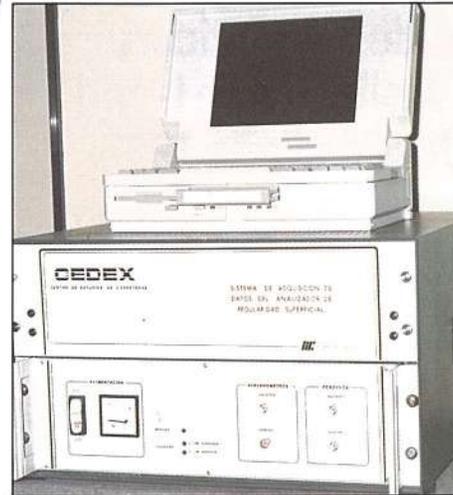
- Sistemas automatizados para equipos de auscultación de pavimentos.
- Instrumentación de pavimentos.
- Instrumentación geotécnica.
- Auscultación de obra pública y minería.
- Seguridad de Presas y televigilancia.
- Control automático de acuíferos.
- Telemando de redes de abastecimiento, riego y saneamiento.
- Sistemas de meteorología y medio ambiente.

### TRABAJOS SINGULARES

- Equipos meteorológicos y de detección de hielo en carreteras.
- Sistema automático de captación y tratamiento de datos para deflectógrafo.
- Equipos de adquisición y edición de datos para viágrafos.
- Equipos de pesaje dinámico de vehículos en movimiento (120 km/h).
- Equipo de medida de la textura superficial.
- Equipo portátil de medida del IRI.
- Sistema automático para la realización de ensayos no destructivos de cargas repetidas en pistas de aeropuertos.
- Sensores para la instrumentación de firmes flexibles.
- Equipo de teleguiado de vehículos para ensayos de impacto contra barreras de seguridad.
- Sistema automatizado para la adquisición, almacenamiento y procesado de datos para el Analizador de Regularidad Superficial.



Dipsticks



Equipo de adquisición, tratamiento y edición de datos para un analizador de regularidad superficial.



Equipo viágrafo: viga soporte y equipo de adquisición y edición de datos.



**Ingeniería de Instrumentación y Control, S.A.**

**Instrumentación y electrónica al servicio de la Obra Pública y su gestión.**

c/ Arapiles, 14

Teléf.: 445 03 00 - Télex: 42779 EPTI-E - Fax: 446 55 46  
28015 MADRID



Equipo automático de captación y tratamiento de datos para deflectógrafo.

