

# RELACION ENTRE LOS PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL OLEAJE EN EL LITORAL ESPAÑOL. PARAMETROS ALTERNATIVOS

JAVIER MARTINEZ ARANZABAL (\*)

**RESUMEN.** Partiendo de los dos tipos de análisis, estadístico y espectral, se ha realizado una comparación entre los principales parámetros obtenidos al aplicar dichos análisis a datos registrados por boyas medidoras de oleaje.

En primer lugar se ha hecho una breve descripción de los citados parámetros empleando los símbolos, nombres y definiciones recomendados por la International Commission for the Study of Waves perteneciente al PIANC (Permanent International Association of Navigational Congresses).

Dado que en muchos casos no es posible disponer de datos registrados por boyas, se ha hecho un intento de sustituir estos datos por observaciones visuales de oleaje, intentando averiguar la relación existente entre ambos tipos de datos.

**ABSTRACT.** *On the basis of two types of analysis of wave buoy recorded data a comparison have been carried out of the main parameters obtained from both, statistical and spectral analysis.*

*Beforehand, a brief description of those parameters has been made following the symbols, nomenclature and definitions recommended by the International Commission for the Study of Waves of the Permanent International Association of Navigational Congresses (PIANC).*

*Since there are many cases in which there is no possible to dispose of wave buoy recorded data an attempt has been made in order to replace these data by visual wave data trying to find out the relationship between them.*

## 1. INTRODUCCION

El conocimiento de los parámetros que caracterizan el oleaje es una necesidad primordial que se manifiesta a la hora de realizar estudios y proyectos de obras de defensa portuaria y costera, así como en cualquier obra marítima que se desee llevar a cabo.

La situación ideal sería poder disponer de un elevado volumen de datos fiables medidos en la zona o punto objeto de cada estudio particular. Desgraciadamente la realidad es muy distinta de esta situación, y es frecuente, por tanto, que a la hora de abordar una determinada obra no se disponga de datos registrados en esa zona y sea necesario recurrir a otras fuentes alternativas de información, como pueden ser las observaciones visuales de barcos en ruta y las predicciones de oleaje a partir de datos de viento.

A continuación se incluyen los parámetros ca-

racterísticos del oleaje y las distintas metodologías de cálculo para posteriormente analizar cómo se relacionan entre sí y posibles alternativas.

## 2. PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL OLEAJE

La figura 1 representa esquemáticamente un registro de oleaje en el que se pueden destacar como parámetros más representativos los siguientes:

$\eta(t)$  (sobreelevación): Distancia vertical entre el nivel medio del mar (N.M.M.) y la superficie libre instantánea.

$a_c$  (amplitud de cresta): Distancia vertical entre el N.M.M. y una cresta.

$a_s$  (amplitud de seno): Distancia vertical entre el N.M.M. y un seno.

$H$  (altura de ola): Distancia vertical entre una cresta y el seno precedente.

$H_{max}$  (altura máxima): Máximo valor de las  $H$ .

$N_0$  (número de cruces por cero): Número de veces que la curva  $\eta(t)$  pasa por el N.M.M. en sentido descendente.

(\*) Licenciado en Ciencias Físicas. Jefe de Sección del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX).

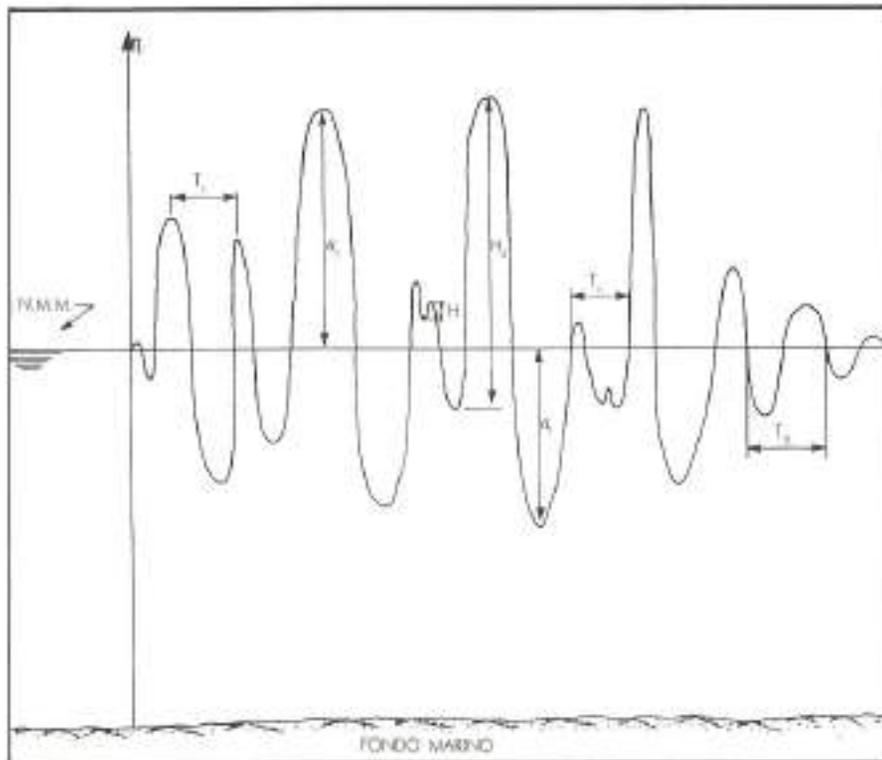


FIGURA 1. Esquematización de la agitación de la superficie del mar a corto término. Definición de los parámetros característicos de un registro de oleaje.

$N_c$  (número de crestas): Número total de máximos (crestas) del registro.

$T_z$  (período de cruces por cero): Intervalo de tiempo comprendido entre dos pasos consecutivos por cero en sentido descendente («downcrossing»).

$T_u$  (período de cruces por cero): Intervalo de tiempo comprendido entre dos pasos consecutivos por cero en sentido ascendente («upcrossing»).

$T_c$  (período de crestas): Intervalo de tiempo comprendido entre dos crestas consecutivas.

### 2.1. ANALISIS ESTADISTICO

Si tenemos en cuenta las definiciones anteriores y consideramos el oleaje como un proceso estocástico y ergódico, se obtiene, al efectuar un análisis estadístico de un registro de oleaje, un conjunto de **parámetros característicos**, siendo alguno de los más importantes los que se relacionan a continuación:

$\bar{T}_z$  (período medio de ceros): Valor medio de los períodos de paso por cero en sentido descendente.

$\bar{T}_u$  (período medio de ceros): Valor medio de los períodos de paso por cero en sentido ascendente.

Es evidente que  $\bar{T}_z$  y  $\bar{T}_u$  son estadísticamente idénticos.

$\bar{T}_c$  (período medio de crestas): Valor medio de los períodos de cresta.

$H_s$  (altura de la ola de paso por cero): Máxima distancia de un seno a una cresta entre dos pasos por cero consecutivos descendentes.

$H_{1/3}$  (altura significativa): Valor medio del tercio más alto de las  $H_s$  de un registro.

$T_{z,1/3}$  (período significativo de ceros): Valor medio de los períodos de paso por cero correspondientes al tercio más alto de las  $H_s$  de un registro.

### 2.2. ANALISIS ESPECTRAL

Otra forma de obtener parámetros característicos de un registro de oleaje es aplicar a éste un análisis espectral.

Estos parámetros se calculan a partir de los momentos del espectro, los cuales se obtienen según:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S_{\eta}(f) df$$

siendo:

$m_n$ , el momento de orden  $n$ .

$S_{\eta}(f)$  la función de densidad espectral.

Los principales parámetros característicos calculados por este método son:

$H_s$  (altura significativa): Se define como  $4\sqrt{m_0}$ .

$T_{01}$  (período medio): Definido como  $\frac{m_0}{m_1}$ .

$T_{02}$  (período medio): Se define según  $\sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$ .

$T_p$  (período de pico del espectro): Equivale a  $1/f_p$ , siendo  $f_p$  la frecuencia de pico, es decir la frecuencia correspondiente al punto donde la curva  $S_{\eta}(\omega)$  alcanza su máximo valor.

$\varepsilon$  (parámetro de anchura espectral):

$$\text{Definido como } \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$$

En la terminología hasta aquí empleada se ha tratado de seguir las normas recomendadas por el International Association for Hydraulic Research (IAHR) y el Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) en el suplemento al boletín número 52 publicado en enero de 1986.

### 3. RELACION ENTRE LOS PARAMETROS ESTADISTICOS Y ESPECTRALES

#### 3.1. ALTURAS DE OLA

El parámetro más empleado en ingeniería marítima para caracterizar el oleaje, en lo que a su altura se refiere, es la altura significativa.

La altura significativa obtenida por simple conteo en el análisis estadístico de un registro de oleaje puede asimilarse a dos valores:  $H_{\frac{1}{3}}$  (valor medio del tercio de olas más alto) y  $H_{\frac{1}{3},\varepsilon}$  definido ya anteriormente.

Es evidente que en un oleaje de banda estrecha ( $0 \leq \varepsilon < 0,5$ ), oleaje Swell, ambos parámetros serán prácticamente iguales, pero en general se verificará que  $H_{\frac{1}{3}} \leq H_{\frac{1}{3},\varepsilon}$ .

A este parámetro se le asocia el valor  $4\sqrt{m_0}$  obtenido mediante un análisis espectral del registro.

En algunos casos se ha utilizado también el valor  $H_s = 4(1 - \varepsilon^2/2)^{1/2}\sqrt{m_0}$  que tiene en cuenta la anchura del espectro. Es evidente que ambas definiciones coinciden cuando  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

La figura 2 muestra la comparación establecida entre el parámetro estadístico  $H_{\frac{1}{3},\varepsilon}$  y los espectrales  $H_s$ , definida como  $4\sqrt{m_0}$ , y  $H_s'$  que es la que tiene en cuenta el parámetro  $\varepsilon$ .

Las relaciones obtenidas son:

$$H_{\frac{1}{3},\varepsilon} \approx 1,16 \times H_s$$

$$H_{\frac{1}{3},\varepsilon} \approx 1,33 \times H_s'$$

Si efectuamos la comparación de los parámetros  $H$  y  $H_s'$  con  $H_{\frac{1}{3}}$ , figura 3, llegamos a las rela-

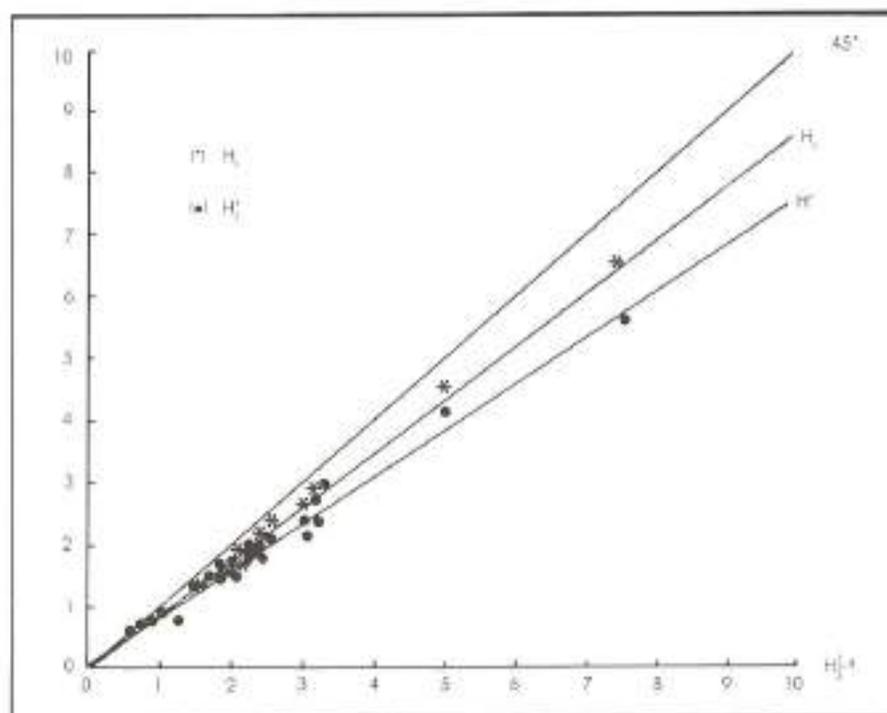


FIGURA 2.

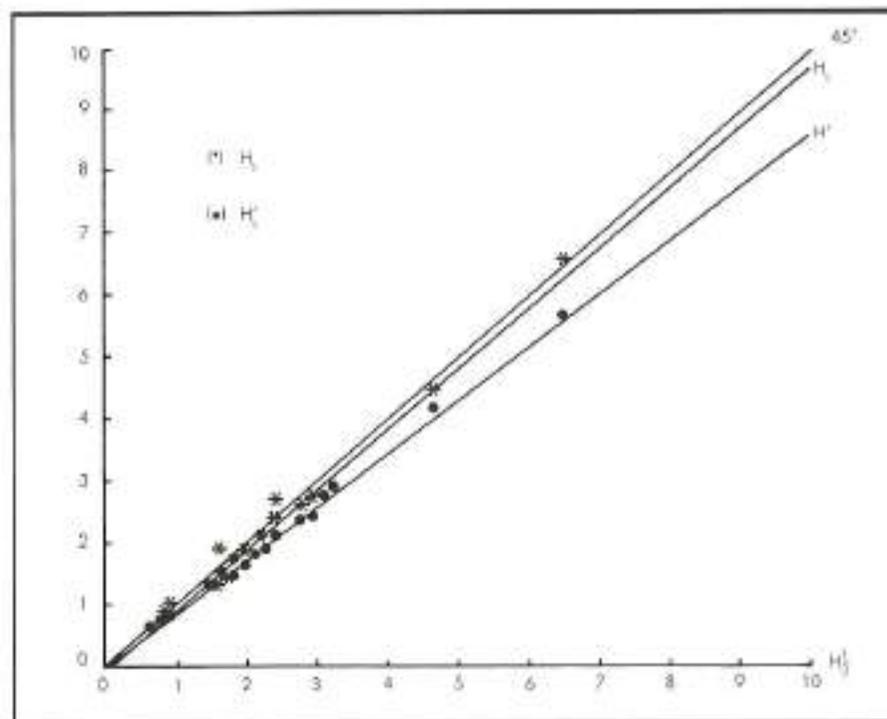


FIGURA 3.

ciones:

$$H_1 \approx 1,03 \times H_0$$

$$H_1' \approx 1,16 \times H_0'$$

Estas comparaciones se han realizado con parámetros obtenidos en el proceso de 33 registros procedentes de boyas mediadoras de oleaje fondeadas en las proximidades de Bilbao, Ceuta, Carboneras y Tarragona.

### 3.2. PERIODOS DEL OLAJE

El primer parámetro en el que centraremos nuestro interés es el período de pico  $T_p$ , que, como ya hemos mencionado, es el correspondiente a la frecuencia del máximo del espectro.

Los parámetros estadísticos comparados con  $T_p$  han sido:

$\bar{T}_0$ : período medio de ceros.

$T_{0,1}$ : valor medio del tercio de los mayores períodos de paso por cero.

$T_{0,1,3}$ : valor medio de los períodos de paso por cero correspondientes al tercio más alto de las  $H_0$  de un registro.

La figura 4 muestra la comparación efectuada con datos procedentes de la boya de Bilbao que

dan lugar a las siguientes relaciones:

$$T_{0,1} \approx 1,15 \times T_p$$

$$\bar{T}_0 \approx 0,9 \times T_p$$

$$T_{0,1,3} \approx 1,02 \times T_p$$

Realizando esta misma comparación con datos de la boya de Tarragona, figura 5, se llega a las siguientes relaciones:

$$T_{0,1} = 1,14 \times T_p$$

$$\bar{T}_0 = 0,89 \times T_p$$

$$T_{0,1,3} = 0,98 \times T_p$$

En lo referente a otros períodos característicos del oleaje podemos afirmar que el período medio de pasos por cero,  $\bar{T}_0$ , es de gran utilidad para fines ingenieriles, siendo además el más empleado en fórmulas estadísticas.

El período medio de crestas,  $\bar{T}_c$ , depende mucho más que el  $\bar{T}_0$  del contenido de ondas de corto período que tenga el registro, y por lo tanto está más afectado por los problemas que plantea la medida de las mismas, lo que hace que su determinación sea más imprecisa que la del  $\bar{T}_0$ . Sin embar-

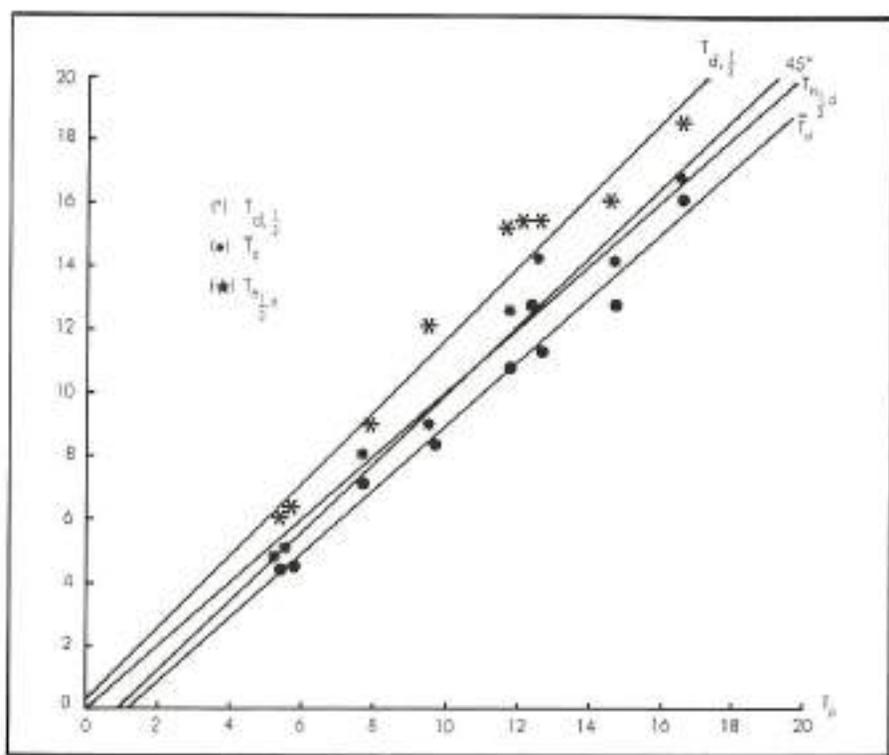


FIGURA 4.

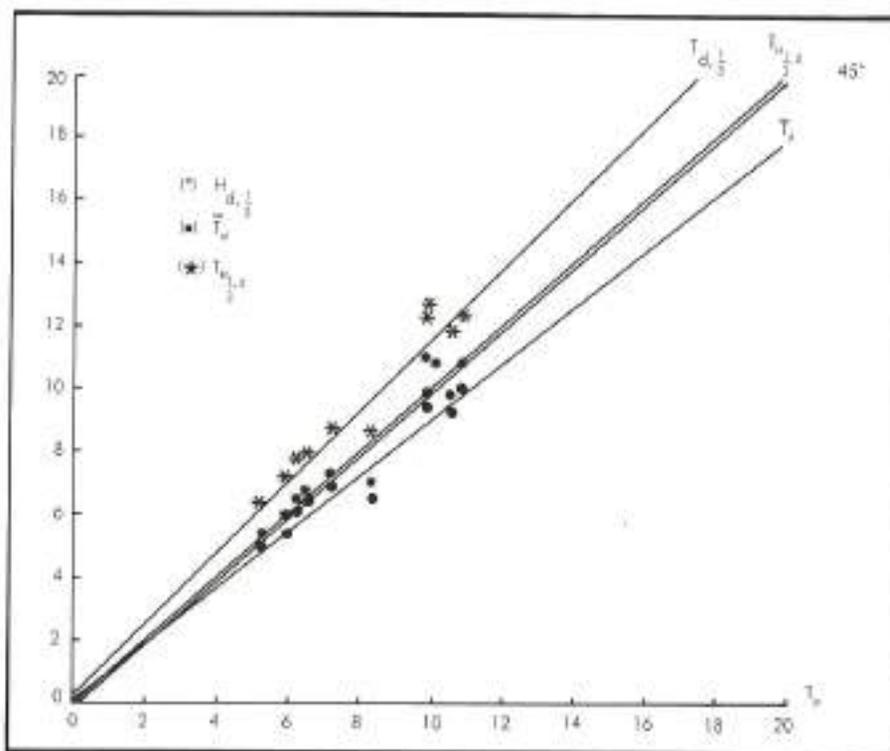


FIGURA 5.

go, la obtención de ambos períodos proporcionará información de gran utilidad para el conocimiento del espectro del oleaje.

En efecto, es sabido por el cálculo espectral que el parámetro de anchura del espectro es:

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}$$

y teniendo en cuenta las fórmulas de Rice;

$$T_c^2 = \frac{m_2}{m_4}, \quad T_d^2 = \frac{m_0}{m_2}$$

se llega a:

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} = 1 - \frac{\frac{m_2}{m_4}}{\frac{m_0}{m_2}} = 1 - \frac{T_c^2}{T_d^2}$$

luego:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{T_c^2}{T_d^2}}$$

por lo que mediante un análisis estadístico de un registro de oleaje podemos obtener información acerca del espectro de dicho registro.

La relación  $\bar{T}_d = T_{02}$ , donde  $T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$ , está ampliamente aceptada por la bondad de la semejanza entre ambos parámetros.

#### 4. PARAMETROS ALTERNATIVOS

Como ya se ha dicho anteriormente no siempre se dispone de datos instrumentales de oleaje tomados en la zona relativa a una obra o estudio concreto. Lo más habitual en estos casos es recurrir a los datos de oleaje **visuales**:

Los datos obtenidos visualmente presentan un gran interés, debido fundamentalmente a su abundancia, tanto en el tiempo como en el espacio, y porque además proporcionan información sobre la dirección del oleaje.

Por otro lado, el tratamiento y explotación de estos datos plantea dos problemas iniciales: La densidad de observaciones en el tiempo es muy irregular y su distribución en la cuadrícula o zona de estudio no es uniforme, agrupándose en los lugares y rutas de densa navegación, esto se debe sin duda a que la mayor parte de estos datos son tomados desde barcos en tránsito.

#### 4.1. CALIDAD Y FIABILIDAD DE LOS DATOS VISUALES

Ya hemos hablado de la utilidad de la información de origen visual en zonas donde los datos instrumentales son escasos o no existen, pero los datos visuales, por su propia naturaleza, plantean unas restricciones que es necesario considerar y tener presentes a la hora de efectuar cualquier tratamiento estadístico con ellos.

Comenzaremos hablando de las dificultades relativas a la propia observación.

La mayor parte de los datos visuales son tomados diariamente por barcos en tránsito. Esto hace que la medida dependa, en gran parte, del interés que tome la persona encargada de efectuarla. No hay que olvidar que la toma no sólo se limita a datos de oleaje sino que abarca una amplia gama de parámetros oceanográficos y meteorológicos y que se realiza varias veces al cabo del día, lo que puede llevar al observador a caer en una rutina que vaya en perjuicio de la calidad de los datos.

Por otro lado la dificultad que plantea el medir la altura de ola «de visu» o el período con un cronómetro desde un barco en movimiento, hace que algunos datos carezcan de fiabilidad e incluso de sentido.

Para paliar en la medida de lo posible estos problemas la mayor parte de los barcos de datos aplican diversos controles de calidad antes de aceptar los datos como válidos.

Otro problema que plantea la medida visual del oleaje es la distinción entre oleaje tipo Sea y Swell.

En el oleaje Sea (mar de viento) se generan y crecen ondas elementales con período, altura y dirección de propagación aleatorias, dando a la superficie del mar un aspecto caótico.

El oleaje Swell (mar de fondo), presenta olas con períodos más largos y con mayor celeridad. Son frentes de ola bien formados y ordenados.

Hay ocasiones en que estas características se aprecian claramente y pueden distinguirse con nitidez ambos oleajes. Sin embargo ocurren con cierta frecuencia estados del mar intermedios que se asemejan a uno u otro según la distancia recorrida por el oleaje desde la zona de generación al punto donde son observados, y es aquí donde pueden surgir la confusión si el observador no es muy experimentado.

Pese a existir normas internacionales dictadas por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) para distinguir el Sea del Swell, siempre queda un gran porcentaje de decisión para el observador.

Si a estos problemas añadimos los ya citados de irregular distribución de los datos en el tiempo y

en el espacio, es fácil adivinar que las extrapolaciones pueden o no ser fiables en determinados casos.

Una forma de solventar estos problemas sería la realización de estudios de correlación estadística entre las zonas con abundancia de datos y las que adolecen de los mismos, o bien mediante algún test estadístico de contraste de hipótesis de independencia (run-test, contraste de medias, contraste de diferencias, etc.).

#### 4.2. CORRELACIONES $H_s-H_v$

Los intentos que se han llevado a cabo para correlacionar la altura significativa,  $H_s$ , con la altura visual,  $H_v$ , han dado lugar a un elevado número de relaciones empíricas que, en la mayoría de las veces, poco o nada tienen que ver entre sí.

Esto hace pensar que las relaciones que se obtengan entre ambos parámetros estarán considerablemente influenciadas por la zona donde se lleven a cabo las medidas dependiendo de factores concretos como pueden ser: amplitud de la cuadrícula donde se toman las observaciones, distancia a la costa de la boya medidora de oleaje, rutas de navegación que pasan por la zona, etc.

Así pues, no debe elegirse una de las relaciones ya existentes, para aplicarla en una zona concreta, sin antes haber comprobado su validez contrastándola con datos instrumentales del área en cuestión.

En lo que atañe al litoral español se han realizado una serie de comparaciones que ofrecen los siguientes resultados:

##### A. Zona Cantábrica

Se han comparado datos procedentes de la boya fondeada en las proximidades de Gijón con los suministrados por el banco de datos visuales del National Climatic Data Center (Asheville; North Carolina, USA) y por el British Maritime Technology, correspondientes a la cuadrícula:

1,5° a 7,5° W

43° a 45° N

Las relaciones obtenidas son:

$$\text{NCDC} \quad H_s = 0,57 H_v + 0,18$$

$$\text{BMT} \quad H_s = 0,57 H_v + 0,04$$

##### B. Zona Atlántica

En este caso la comparación se ha llevado a cabo con observaciones visuales, recopiladas por los organismos antes citados, en la cuadrícula:

8° a 11° W

41,5° a 43,2° N

con los procedentes de la boya fondeada frente al cabo Silleiro:

Las relaciones en este caso son:

$$\text{NCDC} \quad H_s = 0,63 H_v + 0,29$$

$$\text{BMT} \quad H_s = 0,61 H_v + 0,08$$

##### C. Zona Mediterráneo

La comparación se ha realizado con datos de una boya fondeada frente a Carboneras y los facilitados por el NCDC antes referido correspondientes a la cuadrícula:

1,5° a 2,0° W

36,9° a 37,4° N

La relación obtenida es:

$$H_s = 0,59 H_v - 0,10$$

#### 5. CONCLUSIONES

De lo visto anteriormente puede concluirse que de los dos tipos de análisis que pueden aplicarse a un registro de oleaje, estadístico y espectral, se obtienen parámetros que permiten la caracterización del fenómeno del oleaje y que en algunos casos están íntimamente relacionados entre sí pudiendo llegar incluso a sustituirse unos por otros.

Así, en lo que a la altura de ola se refiere, se puede afirmar que la altura significativa procedente de un análisis estadístico, bien sea definida como la media del tercio superior de las olas de dicho registro,  $H_{\frac{1}{3}}$ , o como la media del tercio más elevado de las alturas de paso por cero,  $H_{\frac{1}{3},c}$ , puede asimilarse a la que se deduce de un análisis espectral según  $H_s = 4 \sqrt{m_0}$ .

En cuanto a los periodos, las equivalencias entre el período medio de cruces,  $T_p$ , y el deducido del análisis espectral como  $T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$ , y entre el período  $T_p$ , inversa de la frecuencia del pico del espectro, y  $T_{01,c}$ , valor medio de los periodos de paso por cero correspondientes al tercio más alto de las  $H_s$  del registro, parecen perfectamente asimilables en la mayoría de los casos.

En lo referente a suplir la ausencia de datos instrumentales de oleaje por observaciones visuales debe resaltarse la necesidad de realizar estu-

dios comparativos antes de decidirse por una de las relaciones que pueden encontrarse en la bibliografía especializada.

Los ensayos realizados en el litoral español parecen indicar, siempre con las reservas propias de este tipo de datos, que una relación similar a  $H_v = 0,6 H_c$  para reflejar la realidad con cierta verosimilitud.

Sin embargo, el problema de los períodos ofrece peor solución, pues el solo hecho de determinar un período en alta mar desde un barco en movimiento y sin ningún tipo de referencia fija ya plantea ciertas dudas sobre la validez del dato en sí.

La tendencia actual para el tratamiento de los períodos visuales consiste en correlacionar lo mejor posible datos visuales de altura de ola con instrumentales y llegar a los períodos a partir de la distribución conjunta altura-período.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Para la elaboración de este trabajo se ha contado con la inestimable colaboración de Ignacio Berenguer Pérez, jefe de la División de Estudios Portuarios del CEPYC, y de la doctora M.<sup>o</sup> Jesús Martín Soldevilla, perteneciente a la citada División.