

COMPARACION ENTRE METODOS DE CALCULO DE REGIMENES EXTREMALES: RESULTADOS PRACTICOS

FRANCISCO MUÑOZ ALVARADO (*)
JOSE C. SANTAS LOPEZ (**)

RESUMEN. A partir de los datos de Hs obtenidos por una boya Waverider a lo largo de ocho años se han calculado los regímenes extremos de este variable empleando el método Gumbel y la ecuación Extremal. Se han estudiado los resultados obtenidos con el fin de obtener criterios fiables que permitan al diseñador prever comportamientos extremos a partir de los resultados obtenidos con series ininterrumpidas de Hs mediante la ecuación Extremal. El mejor resultado se obtuvo al ajustar el Régimen Medio de los ocho años a una distribución exponencial: el Régimen Medio anteriormente citado no varía apreciablemente si el período es de al menos tres años consecutivos.

ABSTRACT. Resulting from the data of Hs obtained by a Waverider Buoy during a period rather long (eight years), the extremal regimes of this variable have been calculated through the Gumbel Method and that the Extremal Equation. The results obtained have been studied under the idea of obtaining reliable criteria permitting to the designer to foresee extremal behaviours from the results obtained with uninterrupted series of Hs, by means of the Extremal Equation. The best result has been obtained through the adjustment of the Average Regime of the eight years to an exponential distribution: the abovementioned Average Regime does not vary appreciably if the period is, at last, of three consecutive years.

1. INTRODUCCION

En el momento de realizar un proyecto de obra marítima de defensa es imprescindible evaluar las condiciones extremas del oleaje incidente.

Los regímenes extremos permiten asociar la altura máxima esperada y el período de retorno probable en que ésta puede suceder.

Básicamente existen dos métodos de obtención de dichos regímenes extremos de Hs: a partir de datos máximos anuales (Gumbel) o bien por aplicación de la Ecuación Extremal (Copeiro).

En este trabajo se describen las comparaciones realizadas entre los regímenes extremos obtenidos por ambos métodos, aplicados a los registros existentes del Puerto de Bilbao, boya Morro, según las diferentes alternativas posibles para obtenerlas según el método de la Ecuación Extremal. Se discute el grado de aproximación entre ambos y una forma práctica para la obtención de dicho régimen extremal.

2. CARACTERISTICAS DE LOS DATOS USADOS

La información usada en este trabajo corresponde a una boya tipo Waverider, fondeada en la zona de la entrada al Puerto Autónomo de Bilbao, y propiedad del mismo, en las siguientes coordenadas:

Longitud: 3° 4,40' W.

Latitud: 43° 22,92' N.

Calado: 30 m.

tal como se indica en la figura 1.

La información de dicha boya escalar se recibía en la estación costera. Los substratos en que se encuentra la misma corresponden, según la etapa de tiempo, a registros gráficos, magnéticos FM y digitales. El proceso realizado con los mismos ha sido el Tuckey-Draper, de tipo estadístico; se ha realizado además proceso espectral, pero exclusivamente de los registros de los últimos cinco años, razón por la cual hemos trabajado con los valores H(1/3).

Las series temporales de H(1/3) cubren prácticamente sin faltas de información el período 1976-1984, desechándose por tener un bajo nivel de datos el año 1983.

La toma de datos se realizó con período de

(*) Ingeniero Técnico de Obras Públicas.

(**) Doctor en Ciencias del Mar. Jefe de la División de Ingeniería Oceanográfica del Centro de Estudios de Puertos y Costas.

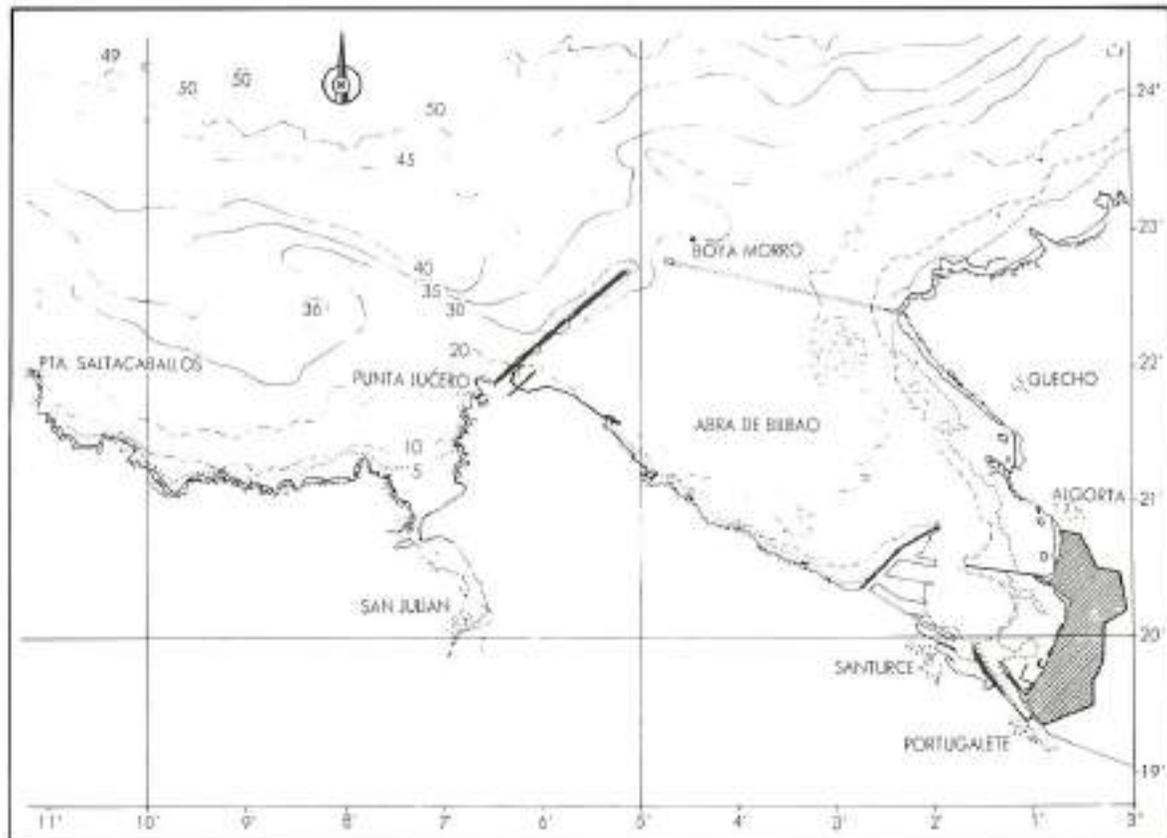


FIGURA 1.

muestreo de tres horas, con longitudes de aproximadamente 20 minutos. En el período posterior a 1986 se ha iniciado la toma de datos por ordenador, con registros digitales de 5.000 puntos, $\Delta t = 0,5$ seg.

3. METODOLOGIA USADA Y RESULTADOS

3.1. METODO GUMBEL

El ajuste del régimen extremal se ha realizado con la función de distribución Asintota I, cuya expresión es:

$$\Phi(H_s) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{H_s - A}{B} \right) \right]$$

La bondad del régimen calculado es función directa de la extensión de los datos empleados. Se consideraba como período idóneo un mínimo de 20 años (Saville). Sin embargo, y al no poseer esta serie de tan larga duración, es posible obtener una evaluación, aunque grosera, del régimen extremal, con menor duración.

El régimen calculado parte de las alturas significantes máximas anuales registradas por la boya. En este caso se aplicó el método a los registros de la boya Morro, del Puerto Autónomo de Bibao, entre los años 1976-1984.

AÑOS	H _s (m)	ORDEN (K)	PROBABILIDAD
1976	7,90	8	0,8889
1978	7,50	7	0,7778
1980	7,35	6	0,6667
1982	7,30	5	0,5556
1979	7,25	4	0,4444
1984	6,87	3	0,3333
1981	5,85	2	0,2222
1977	5,35	1	0,1111

TABLA 1.

El cálculo del régimen se realiza de la siguiente manera:

- Se ordenan las H_s de mayor a menor.
- Asignamos un número de orden (K) a cada H_s.

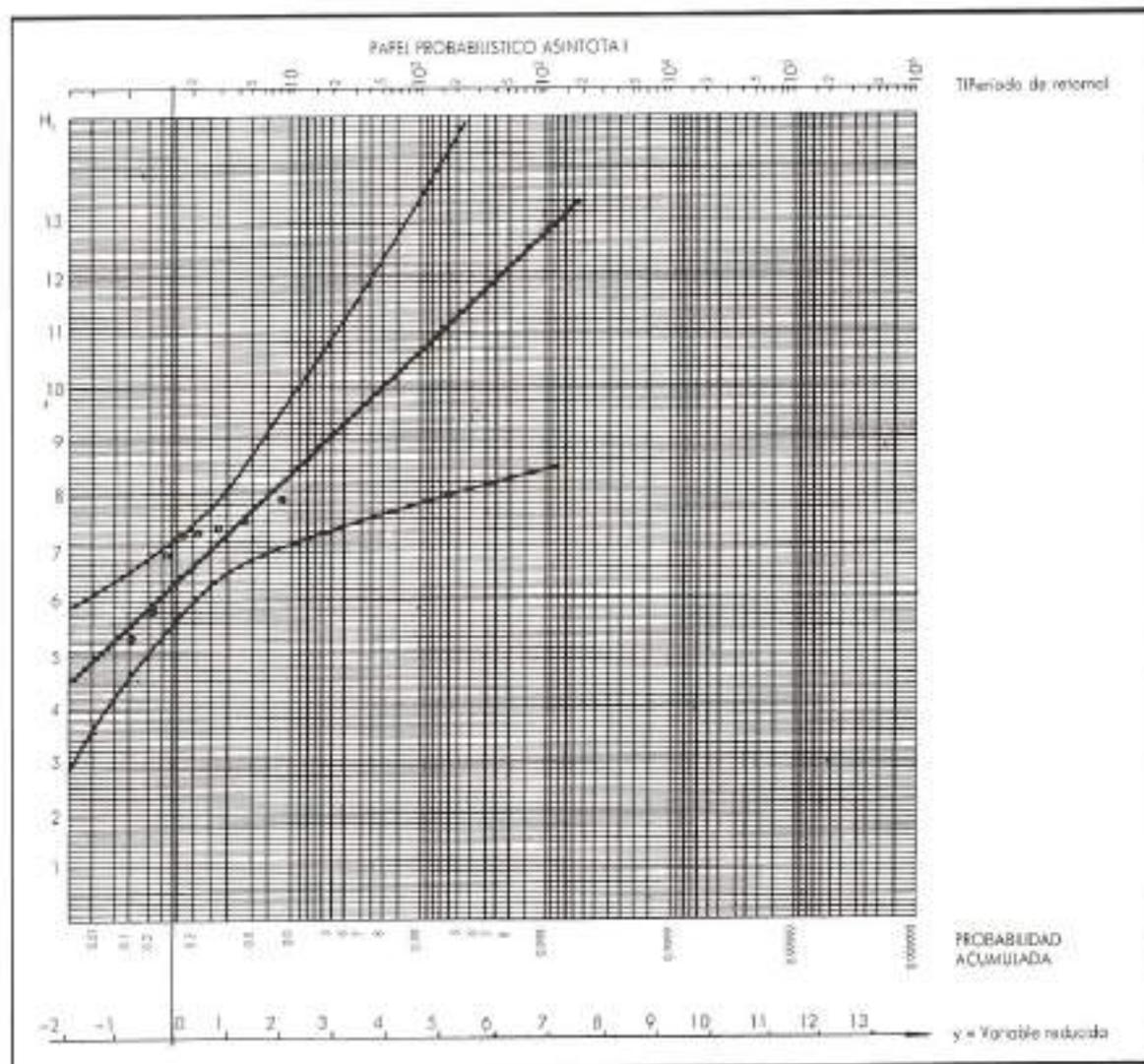


FIGURA 2. Régimen extremal / Garbel.

- Calculamos la probabilidad como $P = K/(n + 1)$, siendo n el número de orden total.
- En papel probabilístico Asintota I representamos las probabilidades obtenidas y por mínimos cuadrados ajustamos una recta (figura 2), con un coeficiente de regresión $r^2 = 0,9076$.

En la figura 2 se ha representado el régimen extremal calculado con los intervalos de confianza del 95 % de nivel de significación, obtenidos mediante la expresión estándar:

$$dy = \frac{t(v, 0.95)}{n - 2} \cdot S_{y,x} \sqrt{(n + 1) + \frac{n(x_1 - \bar{x})^2}{S_x^2}}$$

donde n = número de puntos
 v = número de grados de libertad = $n - 2$
 $t(v, 0.95)$ = F. de distribución t - Student de v grados de libertad, $\alpha = 0.05 = 1 - 0.95$ = nivel de probabilidad
 S_x = desviación estándar de x
 $S_{y,x}$ = desviación estándar de y sobre x
 \bar{x} = valor medio de x
 x_1 = valor ensayado
 d_y = intervalo de confianza del valor y (x_1), a ambos lados de la recta de regresión.

3.2. METODO DE LA ECUACION EXTREMAL

El ajuste del régimen de temporales se realiza utilizando la ecuación extremal:

$$\Phi(Hs) = [F(Hs)]^{n(Hs)}$$

Esto requiere conocer el régimen medio, $F(H_s)$, y las excedencias de los distintos niveles de la variable H_s .

Tenemos como régimen medio el obtenido de los datos de la boya «Morro» del Puerto Autónomo de Bilbao, entre los años 1976-1982.

El período de tiempo se elegirá, por un lado, procurando que el nivel de datos útiles durante ese período sea alto (> 80 %) y, por otro lado, según estudios comparativos tres años es el mínimo necesario para estimar correctamente el régimen medio.

El régimen medio correspondiente a estos años lo hemos ajustado a dos funciones de distribución, la lognormal (figura 3) y la exponencial (figura 4).

Debe tenerse presente que la idoneidad de la función de distribución lognormal para los regímenes medios de oleaje en la zona se mantiene en tanto no nos salgamos de las aplicaciones propias de tales regímenes medios, como puede ser determinar el tiempo de utilización de un muelle, para lo cual nos interesan alturas de la zona media-baja. Aquí como se pretende obtener un régimen extremal habremos de elegir, para el régimen me-

dio, una función de distribución que ofrezca un buen ajuste en la cola superior, ya que posteriormente se extrapolará hacia alturas de ola elevadas, y es la FD exponencial la que ofrece mejor ajuste en dicha zona.

Así, aunque en las extrapolaciones que se hagan con ambos regímenes medios apenas hay diferencias, veremos posteriormente que al elevar esas funciones de distribución a $n(H_s)$ para obtener los regímenes extremales, éstos dan lugar a extrapolaciones muy dispares.

Determinada la función de distribución, $F(H_s)$, el siguiente paso es el cálculo de $n(H_s)$. Para ello comenzaremos por conocer el número de excedencias (N) que se produce en cada nivel de la variable.

Partiendo de las curvas de estado del mar calcularemos N como el número de horas que la variable H_s supera un nivel determinado.

Seguidamente calculamos la duración media de las excedencias $t(H_s)$, en cada uno de los niveles, como el cociente entre el tiempo total de excedencia del nivel en cuestión y el número de veces en que se excede. Por último obtenemos $n(H_s)$, número de pruebas estadísticas en un año medio, de

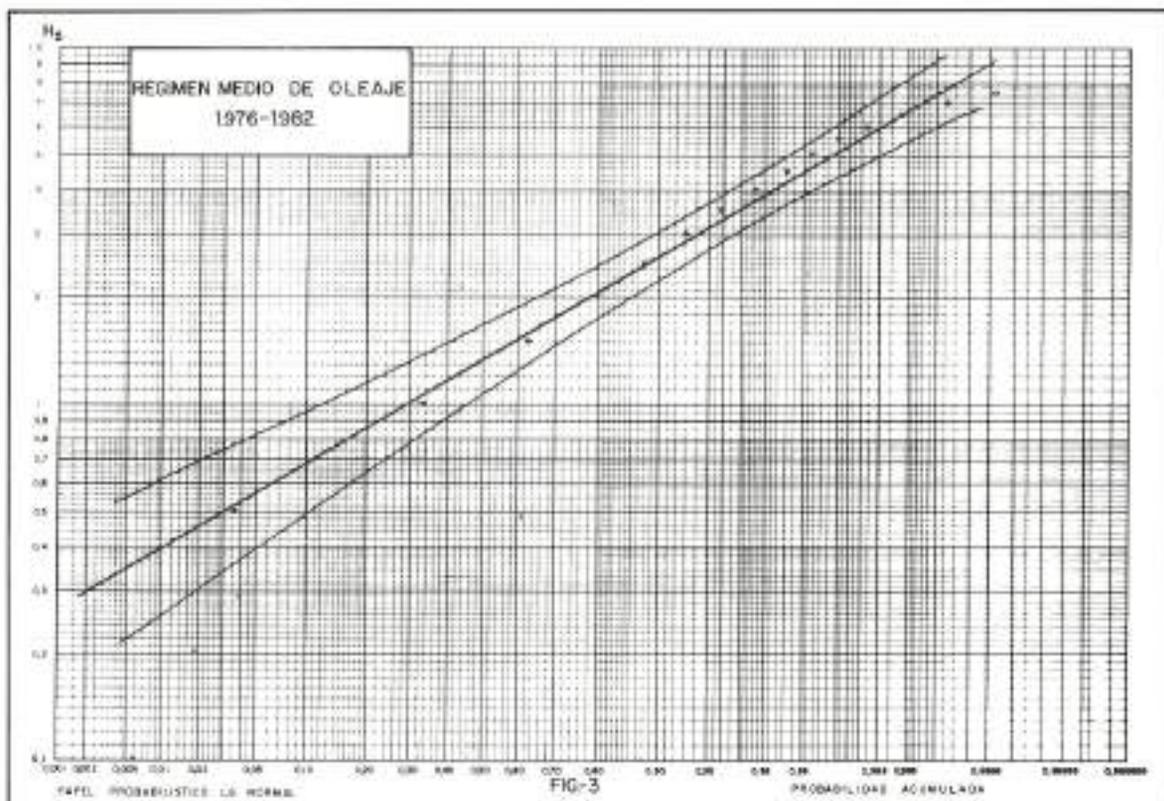


FIGURA 3. Régimen medio de oleaje (1976-1982).

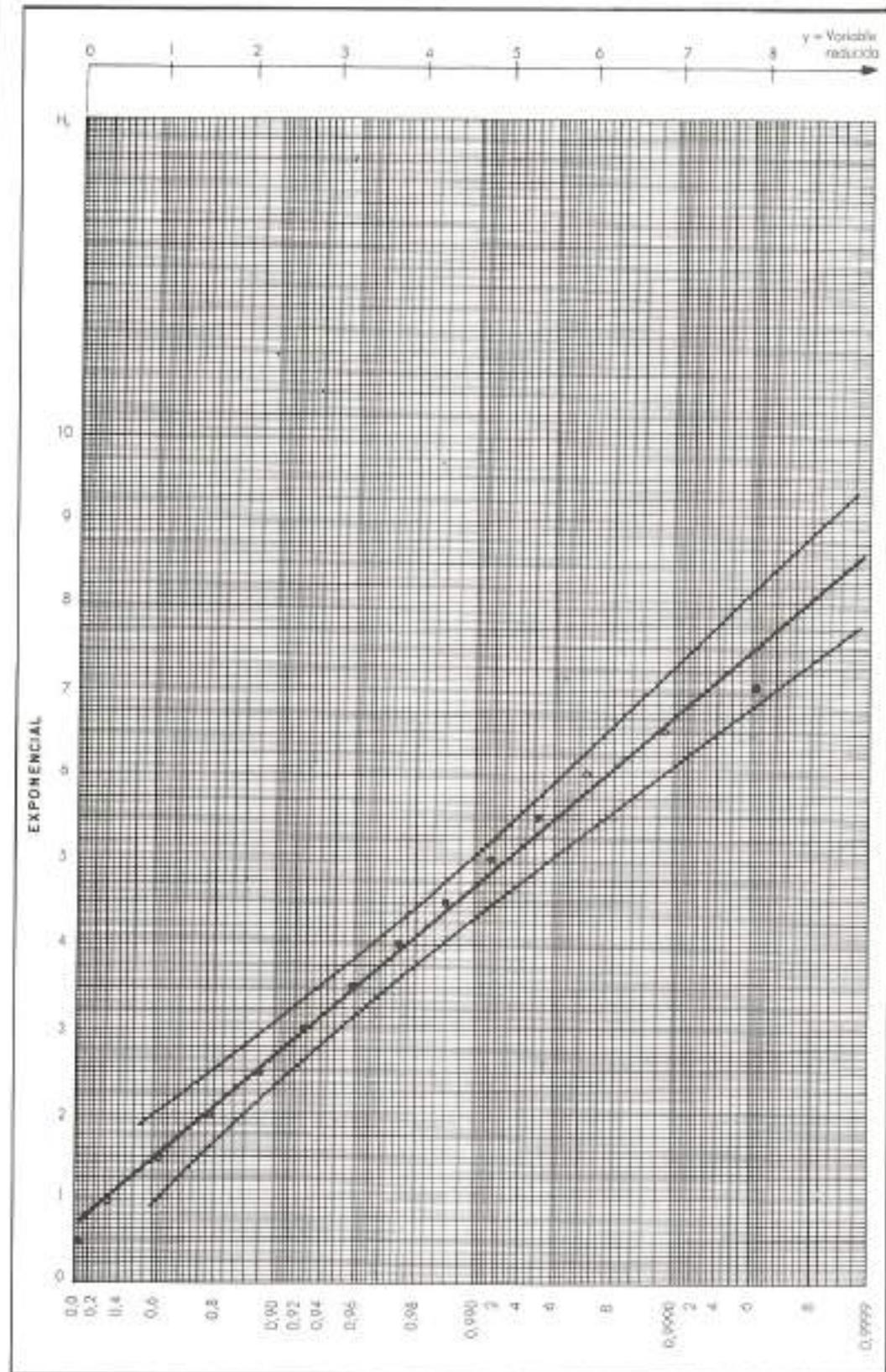


FIGURA 4.
Régimen
medio
de oleaje
(1975-1982).

la forma:

$$n(Hs) = \frac{T}{i(Hs)}$$

siendo T la duración total, $T = \frac{\Sigma \text{Tiempo total}}{n.^{\circ} \text{ años}}$

En la tabla 2 se presentan los datos para la obtención de $n(Hs)$.

Los valores de $n(Hs)$ se representan gráficamente frente a los correspondientes niveles de la variable (figura 5), ajustando a la nube de puntos resultante una recta que será la que proporcione los distintos valores de $n(Hs)$ que intervendrán en el cálculo de la función extremal $\Phi(Hs)$.

El ajuste de la recta a esos puntos se realiza siguiendo los criterios dados por E. Copeiro (Copeiro, 1976). De este modo no se han presentado las alturas con menos de diez excedencias y se han evitado los puntos pertenecientes a las zonas de desviación sistemática y accidental, efectuándose

Hs	Σ excedencias horas	n.º excedencias N	Excedencia media (Hs) = $\Sigma \text{ exced}/N$	$n(Hs) =$ $T/(Hs)$
0,5	54358,8	271	200,59	40,19
1,0	37610,0	845	44,51	181,14
1,5	20790,0	804	25,86	311,78
2,0	11547,5	590	19,57	411,99
2,5	6649,0	413	16,10	500,79
3,0	3999,5	289	13,84	582,57
3,5	2045,5	205	11,44	704,78
4,0	1349,0	140	9,64	836,38
4,5	788,5	96	8,21	982,06
5,0	479,5	56	8,56	941,91
5,5	277,5	34	8,16	988,08
6,0	153,5	28	5,48	1471,30
6,5	70,5	14	5,04	1599,74
7,0	22,0	7	3,14	2567,74
7,5	5,00	2	2,50	3225,08

$\Sigma \text{Tiempo total} = 56439 \text{ horas}$
 $T = \frac{56439}{7} = 8062,71$

TABLA 2.

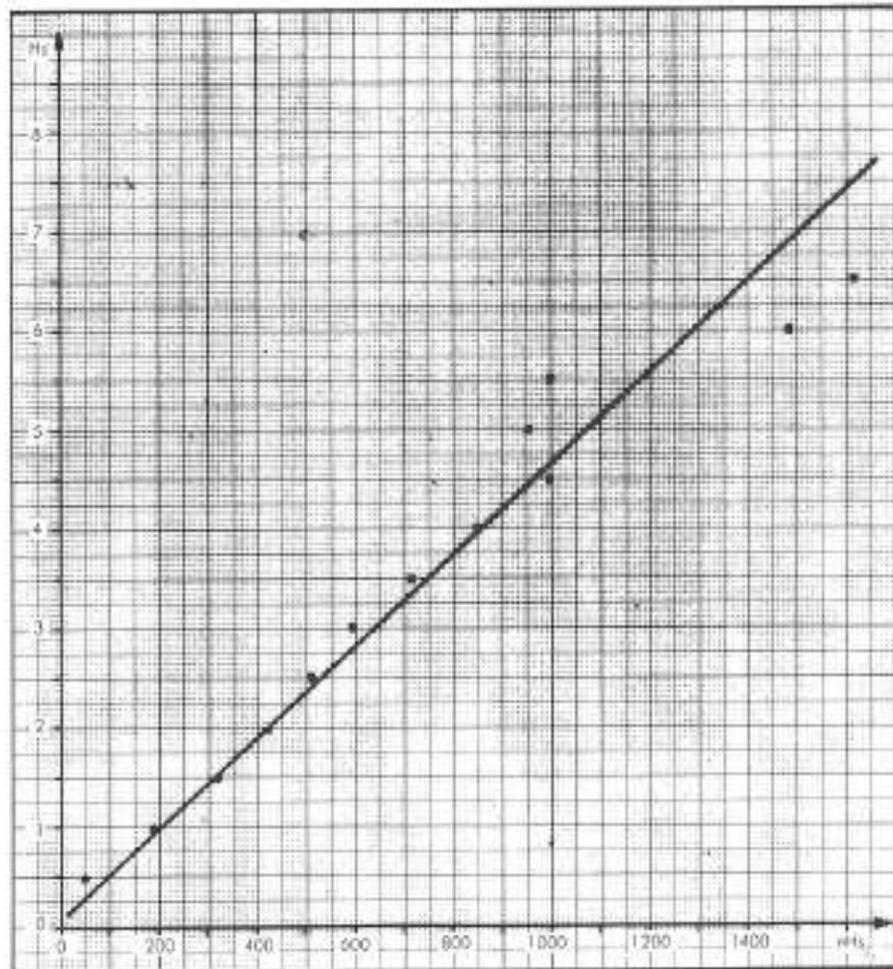


FIGURA 5. Estimo del número de pruebas estadísticas en un año medio.

Hs	r(Hs)	r(Hs)	
		Probabilidad log-normal	Probabilidad exponencial
0,5	83	0,03	—
1,0	192	0,29	0,33
1,5	300	0,588	0,63
2,0	410	0,785	0,78
2,5	518	0,887	0,879
3,0	625	0,94	0,929
3,5	733	0,969	0,9615
4,0	843	0,9828	0,972
4,5	955	0,9905	0,9879
5,0	1061	0,9944	0,9931
5,5	1171	0,99773	0,9962
6,0	1280	0,9981	0,9978
6,5	1390	0,9988	0,9988
7,0	1500	0,9993	0,9993
7,5	1606	0,99955	0,99962

TABLA 3.

el ajuste visualmente dando más peso a la zona con mayor número de excedencias.

De la figura 5 obtenemos los valores de $n(Hs)$ para Hs prefijada y de las figuras 3 y 4 obtenemos las probabilidades correspondientes para las mismas Hs prefijadas (tabla 3).

Finalmente aplicando la ecuación extremal $\Phi(Hs) = [F(Hs)]^{n(Hs)}$ sacaremos una serie de valores de los dos regímenes extremales (tabla 4).

Representando estos valores en Asintota I (figuras 6 y 7) ajustamos una recta para cada régimen dando en nuestro caso unos coeficientes de regresión $r^2 = 0,9590$ y $r^2 = 0,9974$ para el log-normal y exponencial respectivamente.

Igualmente que en el punto 3.1 hemos calculado los intervalos de confianza del 95 % de nivel de

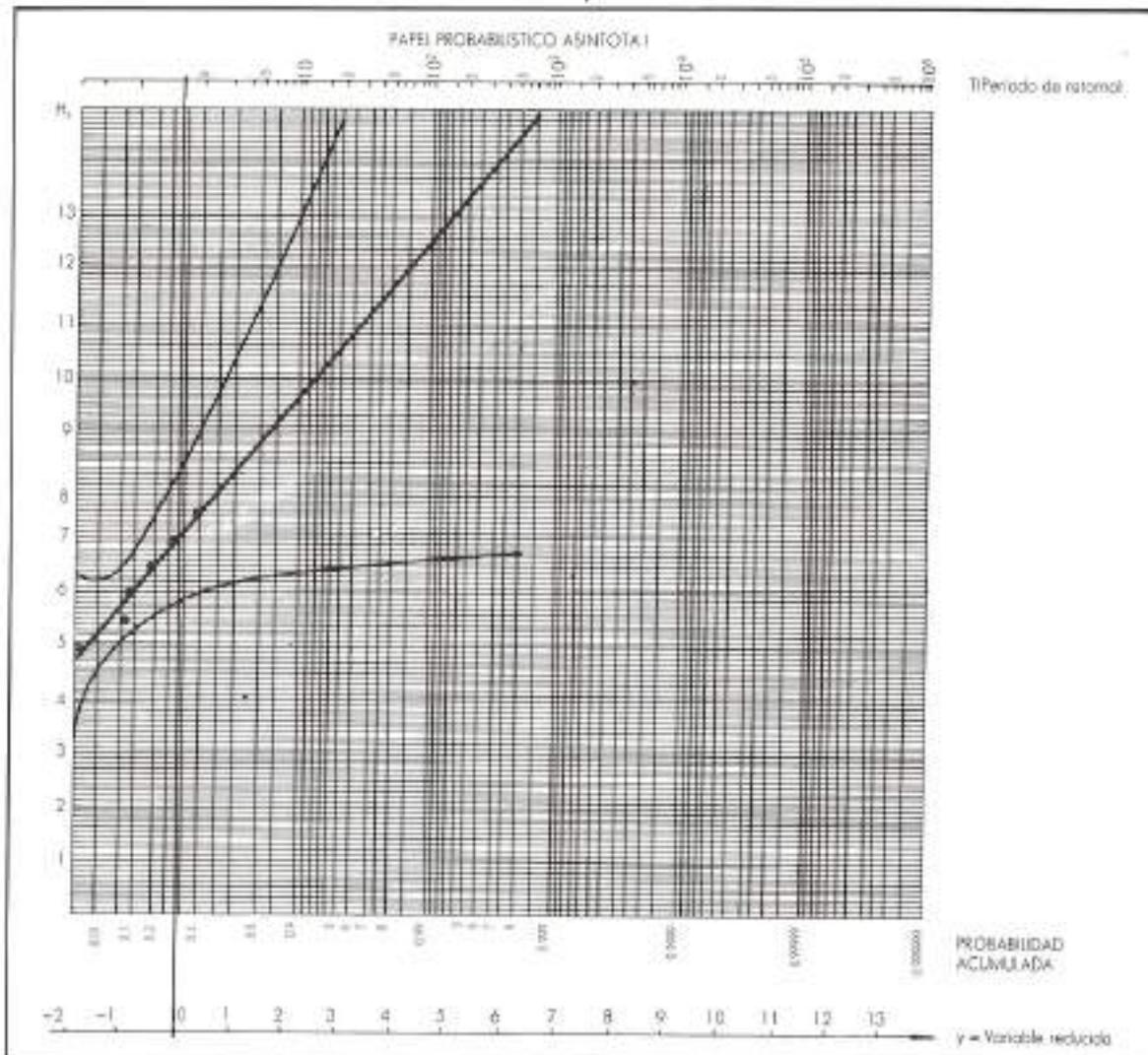


FIGURA 6. Régimen extremal (log. normal).

H5	Región	
	log-normal	Exponencial
0,5	0	—
1	0	$3,59 \times 10^{-99}$
1,5	$6,5 \times 10^{-20}$	$6,34 \times 10^{-61}$
2,0	$7,9 \times 10^{-44}$	$5,74 \times 10^{-43}$
2,5	$1,06 \times 10^{-27}$	$9,69 \times 10^{-30}$
3	$1,60 \times 10^{-17}$	$1,02 \times 10^{-20}$
3,5	$9,45 \times 10^{-13}$	$3,18 \times 10^{-13}$
4,0	$4,45 \times 10^{-7}$	$4,00 \times 10^{-11}$
4,5	0,0001	$8,93 \times 10^{-6}$
5,0	0,0026	0,0006
5,5	0,0751	0,0116
6,0	0,8877	0,0997
6,5	0,1884	0,1884
7,0	0,3498	0,3498
7,5	0,4854	0,5431

TABLA 4.

significación en los regímenes medios y extremos.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

La comparación de los distintos resultados obtenidos se presenta en la tabla 5.

T(años)	H(m)		
	Carbal	Ecuación Exponencial	
		log-normal	Exponencial
20	9,10	10,60	10,03
50	10,0	11,70	10,90
100	10,60	12,53	11,62
500	12,13	14,45	13,30

TABLA 5.

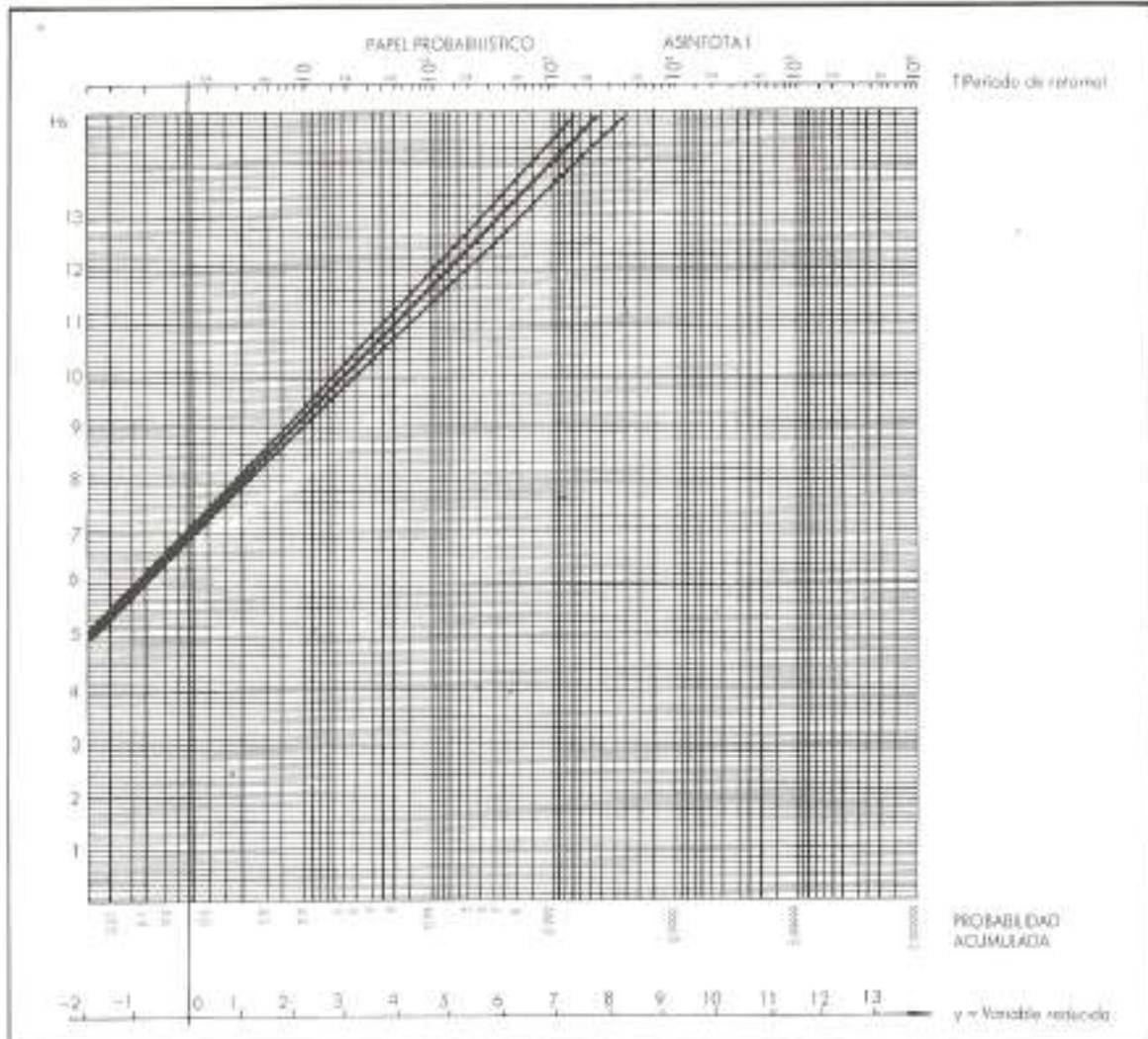


FIGURA 7. Régimen extremo (Exponencial).



**PUERTO DE CARBONERAS
(Almería)**



**REGENERACION DE LA PLAYA DE SANTA POLA
(Alicante)**



OFICINA CENTRAL:

Padilla, 46 - 2ª
Teléfonos: (91) 431 42 20
y 431 64 10
Télex: 49090 AXNI E
28008 MADRID

DIRECCIONES DE ZONA EN:

- ▶ As Pontes.
- ▶ Oviedo.
- ▶ Madrid.
- ▶ Sevilla.
- ▶ Tarragona.
- ▶ Zaragoza.



Trabajamos en profundidad

Somos especialistas en
Dragados.

Con una profunda experiencia de
más de 48 años de actividad.

Trabajamos con los más modernos
medios y con un
equipo muy
profesional, para
poder presentar,
en cada caso, el

proyecto más adecuado y realizarlo
con la mayor eficacia.

Con la mayor garantía.

Como desde siempre nos ha
gustado hacer
nuestro trabajo:
en profundidad.



 Desde 1940 nuestro trabajo
es nuestra garantía.



A. ASTIGARRAGA, S. A.

Pescadería, 10 - Teléfono: 395740 - Telex: 36362 - Telgr: ASTI
PASAJES - GUIPUZCOA (SPAIN)

Aparecen discrepancias entre los resultados según el método de ajuste del régimen medio. El calculado con el ajuste al lognormal es mayorante del exponencial.

El extremal Gumbel, se ciñe más al obtenido con la ecuación extremal, sobre ajuste Exponencial del régimen medio.

Teniendo en cuenta criterios del intervalo de confianza, parece más seguro el citado ajuste exponencial al ser Δy más reducido.

5. CONCLUSIONES

1. El método de Gumbel permite llegar a una evaluación del régimen extremal aun cuando el número de años considerados es menor de 20.
2. El ajuste del régimen medio por la función de

distribución exponencial produce un régimen extremal, aplicando la Ecuación Extremal, de menor variabilidad, intervalos de confianza menores, que el lognormal.

3. Comparando las $H(1/3)$ calculadas para los mismos períodos de retorno, $10 < T < 500$ años, por medio del régimen extremal Gumbel y el de la ecuación extremal (régimen medio ajustado a exponencial), se obtienen las dispersiones siguientes:

Retorno	20	30	100	500
Dispersión (%)	9.27	8.26	8.78	8.80

4. En cuanto al régimen medio no se advierten diferencias de bondad entre el ajuste lognormal y el exponencial, para el caso ensayado.

SESION PLENARIA DE LA DIRR

DOCUMENTACION
INTERNACIONAL DE
CARRETERAS

COPENHAGUE,
18-20 de Octubre
de 1988

En este seminario, dirigido a ingenieros, investigadores y profesionales que trabajan en sectores relacionados con la carretera, se presentarán los servicios del sistema de información DIRR (Documentación Internacional de Carreteras), destacando los servicios on-line de consulta a la base de datos documental DIRR que ofrecen los más importantes suministradores de información del mundo (Agencia Espacial Europea, DIALOG, etc.), así como los futuros desarrollos del sistema en relación con las necesidades de información de los profesionales de la carretera.



PARA MAS INFORMACION E INSCRIPCIONES:

Organizador del seminario:

BB Training
Strandvejen 266 B
3070 Snekkersten
DINAMARCA
Teléfono: 45 2231491

OCDE
RTRP Secretariat
2 rue André-Pascal
75775 Paris Cedex 16
FRANCIA
Teléfono: 1 45249244

MODELOS DE FONDO SEMI-MOVIL

JAVIER ENRIQUEZ (*)

RESUMEN. A veces, los ensayos de fondo móvil son un instrumento muy útil en el estudio y diseño de obras costeras. Sin embargo, por motivos técnicos y económicos este tipo de estudios resulta poco práctico en la mayoría de los casos. Es más fácil llevar a cabo los ensayos de fondo fijo con materiales trazadores para mostrar los procesos litorales resultantes, y éstos podrían facilitar información útil en los estudios litorales.

Se han realizado una serie de ensayos de fondo semi-móvil en el CEPYC en los últimos años, a veces junto con modelos de agitación. Se trata en este comunicado de las experiencias obtenidas de los estudios litorales citados. Incluimos el comportamiento de diversos materiales trazadores, consideraciones de escala, técnicas de medida y resultados.

ABSTRACT. *Movable bed model tests are sometimes a useful tool for the study and design of coastal works. However, technical and economical considerations make this kind of studies in most cases unpracticable.*

Fixed bed model tests with tracer materials showing the resulting litoral processes are easier to carry out than movable bed model tests, and could provide useful information to coastal studies.

A series of semi-movable bed model tests have been performed at the CEPYC in the past years, sometimes in combination with wave disturbance models. This paper deals with the experience gathered from the aforementioned coastal studies, including different tracer materials behaviour, scale considerations, measuring technics and results.

1. CONDICIONANTES DE LOS MODELOS DE FONDO MOVIL

Una investigación completa de los procesos litorales por medio de modelos de fondo móvil es impracticable en el estado actual de los conocimientos. Sin embargo, en muchos casos la investigación puede ser capaz de conducirnos a resultados suficientemente aproximados, proporcionando información útil a efectos de diseño.

En principio, existe una transición de un régimen de flujo a otro según nos movemos desde la zona de aguas profundas hacia la zona surf, por lo que es imposible obtener una similitud dinámica exacta, simultáneamente, en los procesos físicos dominantes para ambos regímenes. Otros efectos, como son las ondas de orilla, las corrientes de retorno, las ondas largas, etc., son difícilmente reproducibles en un modelo a escala, pero han de ser tenidos en cuenta a la hora de definir tanto las características fundamentales de la dinámica lito-

ral en una zona como su representación en el modelo.

Podemos señalar como requerimientos básicos de un modelo de fondo móvil los siguientes:

1. Que reproduzca con exactitud el fenómeno estudiado.
2. Que sea consistente, esto es, que bajo las mismas condiciones se obtengan siempre los mismos resultados.
3. Que sea suficientemente sensible a los cambios de condiciones.
4. Que sea económico.

Para la reproducción de la evolución de unos fondos en modelo, éste ha de cumplir un determinado número de condiciones de similitud que permiten definir sus límites de validez, ajustar y calibrar el modelo, e interpretar sus resultados. A su vez, se han de especificar los criterios de similitud para el modelo, tales como las características del oleaje y las corrientes, el grado de precisión en la representación de los fondos, etc. Es importante esta distinción entre las condiciones y los criterios de similitud.

En los modelos a escala, la mayoría de los procesos en el fluido llevan consigo complicados com-

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de División de Defensa de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX).

portamientos no lineales y condiciones de contorno complejas. Por ello, la complicada combinación de fuerzas que aparecen en el prototipo no siempre puede ser representada a escala. Por ello, algunas acciones y fenómenos han de ser desechados de partida, cuando su influencia se presume que no será de fundamental importancia en el resultado final.

Una alternativa a la complejidad de los modelos de fondo móvil son los modelos de fondo fijo que utilizan pequeñas cantidades de material trazador para hacer visibles los patrones de erosión y depósito del sedimento. Estos modelos de fondo semi-móvil son mucho más sencillos de calibrar y realizar, mucho más rápidos y económicos que los de fondo móvil. Sin embargo, su desventaja fundamental es la menor definición de la evolución final de los sedimentos que presenta con respecto a los modelos de fondo totalmente móvil. Los resultados de los modelos de fondo semi-móvil sólo pueden ser utilizados para un estudio cualitativo de los procesos litorales.

2. CALIBRACION DE LOS MODELOS DE FONDO SEMI-MOVIL

A lo largo de los años han sido desarrolladas una serie de relaciones de escala entre el modelo y el prototipo, cada una de ellas conteniendo sus suposiciones de partida y sus restricciones particulares. Muchas de ellas pueden llegar a ser en algunos casos contradictorias entre sí, por lo que la elección del método a utilizar ha de analizarse detalladamente en cada caso.

La elección del material de fondo móvil es uno de los puntos más importantes a tener en cuenta en el planteamiento del modelo. Según Kamphuis (1975), el efecto de escala resultante de la modelización de un flujo no estacionario es:

$$\eta_{des/m} = \eta_{\gamma_s} \cdot \eta_{\rho_s/\rho}$$

siendo ρ_s la densidad del material utilizado y $\gamma_s = (\rho_s - \rho) \cdot g$. Esto significa que, si se utiliza en el modelo material ligero, la aceleración de las partículas en el modelo es mucho más pequeña, con lo que el transporte de sedimentos se subestima, y se exagera la formación de bajos y acumulaciones en el modelo. A este inconveniente se le une también el efecto de escala producido por la existencia de material situado por encima del nivel de agua (playa seca).

Las serias limitaciones inherentes al uso de material ligero en modelos de fondo móvil, ha hecho que esta práctica haya sido progresivamente abandonada por muchos laboratorios. Sin embar-

go, se sigue utilizando material ligero para determinar áreas de erosión y sedimentación en modelos de fondo fijo con trazador.

En este tipo de modelos, la disposición del material sobre un fondo liso hace que las condiciones de iniciación del movimiento del sedimento cambien sustancialmente al cambiar la rugosidad y forma del fondo con respecto al prototipo. Esto hace que la aplicación de leyes de escala a este tipo de modelos sea, si cabe, más problemática que en los modelos de fondo móvil.

Dado que los resultados a obtener de los modelos de fondo semi-móvil son meramente cualitativos, la fase de calibración de los modelos realizados en el CEPYC ha sido la siguiente:

1. La relación de escalas horizontales y verticales ha sido siempre $\mu/\lambda = 1$, con el objeto de reproducir correctamente los fenómenos de propagación del oleaje.
2. Para cada oleaje, el movimiento del sedimento ha de iniciarse a la misma profundidad aproximada que en el prototipo, con el objeto de ajustarse lo máximo posible a las condiciones reales de movimiento del fondo en prototipo.
3. El modelo ha de reproducir cualitativamente los esquemas de erosión y acumulación que se producen en el prototipo.

Según se ha señalado anteriormente, la definición de los resultados finales obtenida en los modelos de fondo semi-móvil es bastante más reducida que la de los modelos de fondo totalmente móvil. Dado que estos resultados han de utilizarse de forma meramente cualitativa, una posible aplicación de estos modelos es el análisis del impacto de las obras en la costa. Los movimientos del sedimento y la distribución final del material sobre el modelo pueden servir de indicación para calibrar los diferentes grados de impacto de una obra en el equilibrio de una playa.

3. EJEMPLOS

A continuación se comentan algunos de los ensayos de fondo semi-móvil realizados en el CEPYC en los últimos años.

ONDARROA

El objeto de este trabajo era el análisis de la posible influencia de la ampliación del dique de abrigo del puerto de Ondarroa en las playas próximas.

Además de los estudios de clima marítimo, propagación del oleaje y agitación dentro del puerto, se realizó el análisis de la influencia de la ampliación del puerto en la playa de Arrigorri. Este estudio teórico fue complementado con un estudio realizado en el modelo a escala del puerto y la playa



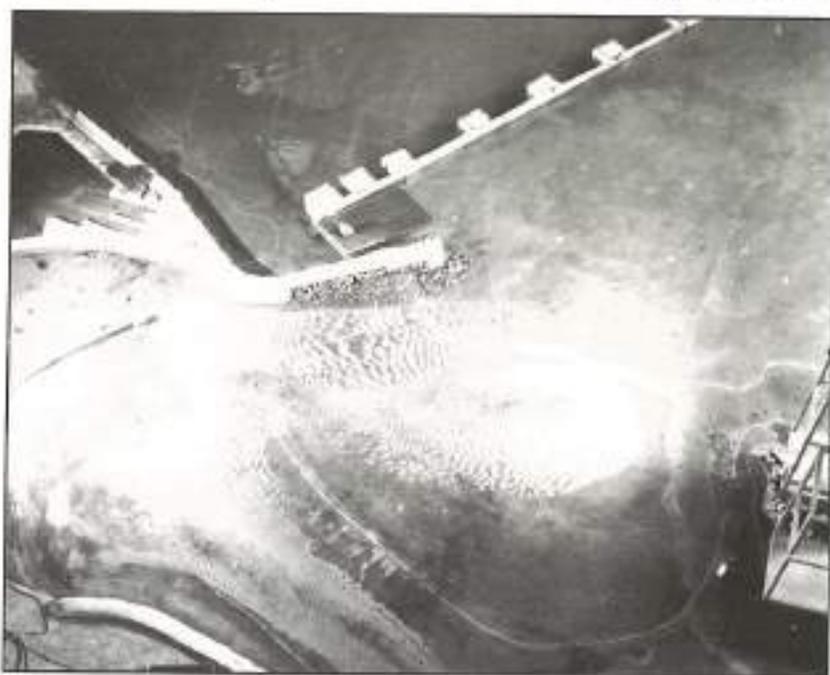
FOTOGRAFIA 1. Ensayos de Ondarroa. Material móvil: arena. Situación inicial del dique sin ampliar.

con material trazador, que analizó el sistema de corrientes existente en la zona y la influencia de la ampliación proyectada sobre la dinámica sedimentaria.

En este estudio en modelo reducido con fondo

móvil se consideraron tres disposiciones diferentes del dique de protección del puerto de Ondarroa: la situación anterior a la actual, la situación actual y la ampliación proyectada.

Se utilizó como material de fondo móvil la are-



FOTOGRAFIA 2. Ensayos de Ondarroa. Material móvil: arena. Dique ampliado.

na natural, la baquelita y el carbón (antracita), de forma que su diferente comportamiento permitiera detectar todos los posibles efectos en el modelo.

En los ensayos se probaron los 3 materiales en 3 supuestos del dique: anterior, actual y ampliación, en 2 direcciones distintas NO y NE. En todos los ensayos de trazadores se usó el mismo procedimiento de ejecución. Se tomó un volumen constante de cada uno de los materiales ensayados. En cada ensayo el material se extendió de forma uniforme sobre una superficie fija del modelo de 4,708 m². Después se sometió el material al oleaje durante el tiempo necesario para que se produjera la estabilización del mismo.

El basculamiento que los sedimentos de la ensenada sufrieron con la prolongación del dique hasta su posición actual quedó bien reflejado en los ensayos, en los que tanto los oleajes del NE como los del NO pasan de repartir el trazador a todo lo largo de la línea de playa en la situación antigua, a concentrar fuertemente el material en la parte occidental del modelo en la situación actual. Este brusco cambio en los resultados de un ensayo a otro es fiel reflejo de lo ocurrido tras la ampliación del dique en la playa.

La ampliación del dique ensayada en el modelo físico produce dos efectos principales sobre el material trazador:

A. Un aumento de las corrientes encauzadas por la obra a lo largo de la misma, que provocan un desplazamiento de sedimento hacia el exterior de

la ensenada. Esto ocurre fundamentalmente con oleaje procedente del NE.

B. Un apreciable aumento del resguardo en la zona de difracción situada tras el dique, lo que en prototipo supondría un basculamiento sensible de la arena hacia la zona del canal de entrada del puerto.

La ampliación actualmente existente del dique exterior del puerto produce un esquema de corrientes en el modelo que tiende a recorrer la ensenada en sentido horario y arrastrar el sedimento hacia la zona occidental. La ampliación proyectada acentúa esta circulación de manera apreciable, principalmente en la zona próxima al propio dique. Estas corrientes, con oleaje del NE, tienden a extraer el material de la playa y a lanzarlo a mayores profundidades. Por otra parte, el aumento de la longitud del dique produce un basculamiento de la arena en la línea de playa hacia el contradique, mientras que incrementa significativamente la protección de la zona situada tras el dique. Todo ello significa un aumento de los aterramientos del canal de entrada al puerto con la nueva solución.

PLAYA DE PUEBLO NUEVO

El proyecto de regeneración de las playas de Pueblo Nuevo consta de dos células encajadas entre espigones que apoyan los rellenos de nueva aportación.

La disposición de las obras que limitan estas dos células, y la gran oblicuidad de los oleajes que



FOTOGRAFIA 3. Ensayos de Ordóñez. Material móvil, carbón. Situación actual del dique sin ampliar.



FOTOGRAFIA 4. Ensayos de Ondarra. Material móvil: carbón. Dique ampliado.



FOTOGRAFIA 5. Ensayos de Pueblo Nuevo. Material móvil: boquerilla.

predominan en este sector de costa, han hecho pensar a los proyectistas en la posible existencia de corrientes generadas por el oleaje que, siendo encauzadas por las obras situadas perpendicularmente a la costa, extraigan el material de relleno de la playa y provoquen importantes erosiones en la misma.

Para analizar la existencia o no de este fenómeno en la futura playa, se optó por realizar un modelo a escala con fondo móvil de la célula situada más al Norte del tramo a regenerar. Se realizaron un total de 7 ensayos a escala 1/75 utilizando bakelita como material trazador.

El análisis de los resultados se realizó midiendo el espesor de la capa de material trazador acumulado en los nodos de una malla de ancho 20 cm x 20 cm, generándose a partir de estos datos una malla en el ordenador que ha servido para la representación de los resultados obtenidos.

Las observaciones realizadas a partir de los datos proporcionados por el modelo fueron las siguientes:

1. Tanto los oleajes procedentes del NE como los procedentes de los sectores S-10-O y E inducen una corriente a lo largo de la línea de playa de sentido Sur-Norte. Esta corriente generada por el oleaje cambia de dirección al llegar al espigón de cierre Norte y se encauza a lo largo del mismo hacia el exterior de la célula.
2. En general, la intensidad de esta corriente aumenta cuando el peralte del oleaje incidente ($H_0/L_0 = 0,070$) aumenta. Para oleajes intensos procedentes del S-10-O, se produce un cambio en el sistema de circulación de la célula que hace que esta corriente tienda a anularse.
3. Para toda la gama de oleajes ensayados en el modelo, no se han detectado intensidades de estas corrientes suficientemente elevadas como para

provocar un arrastre considerable del material trazador hacia el exterior de la célula.

4. La corriente longitudinal Sur-Norte que todos los oleajes incidentes producen, unida a la reflexión de los oleajes procedentes del NE y el E en el dique Sur, hacen que se provoque un transporte generalizado del trazador hacia el Norte de la célula, independientemente de cual sea la zona sobre la que inicialmente se extienda el material. Este hecho puede indicar una posible tendencia de los futuros rellenos arenosos a bascular hacia el Norte, situándose por detrás de la línea prevista en el tramo Sur de la célula, y produciéndose un avance en su parte Norte con respecto a la línea de playa proyectada.

Como resultado de estas observaciones, se sugirió la modificación del proyecto original para la reducción de las reflexiones del oleaje en el dique Sur de la célula ensayada.

CONCLUSION

Según la experiencia adquirida en el desarrollo de diversos modelos de fondo semi-móvil en laboratorio, podemos extraer las siguientes conclusiones:

1. Los modelos de fondo semi-móvil son más sencillos de realizar y calibrar, más rápidos y más económicos que los de fondo móvil.
2. En contrapartida, este tipo de modelos permiten únicamente una interpretación cualitativa de los fenómenos litorales que simulan, aunque para muchas aplicaciones esto pueda resultar una fuente de información suficiente.
3. El resultado más directo de estos modelos es la determinación de las zonas de acumulación y erosión que se producen en un tramo costero, pudiendo estudiarse cómo varían estas zonas al introducir otros elementos como obras de abrigo y defensa, etc.

APLICACION DE LOS SISTEMAS ESTEREOSCOPICOS DE VISION A LA DETERMINACION DE MAGNITUDES FISICAS EN ENSAYOS

JOSE RAMON AMOROS SERRET (*)

RESUMEN. Se ha implementado un sistema de captura de datos en laboratorio abordando cuestiones de análisis de imagen e interpretación de resultados con un método estereoscópico con el cual se está trabajando en CEPYC/CEDEX.

Además del apoyo de un conocimiento general existente, se dispone de los avances más recientes en cámaras C.C.D. sistemas de visión por ordenador y se pretende sustituir la actual metodología para medidas y control en ensayos de laboratorio.

Dedicados a este fin, el Departamento de Experimentación del CEPYC junto con empresas privadas como C.T.C. han recibido el visto bueno y apoyo, concedido por la Dirección General de Tecnología e Innovación, España.

ABSTRACT. *A system for data capture in laboratory environment is introduced dealing with the matters of vision analysis and results interpretation intended to the stereoscopic method we are working with at CEPYC/CEDEX.*

Biased by general knowledge at this concern, we are supported by the most recently advances in CCD cameras and computer vision systems capable to do this, so intended to substitute actual methodologies for laboratory measurement and control.

Devoted to this goal the Experimentation Section at CEPYC jointing capabilities with private corporations as CTC, have received approbation and support grant by General Direction of Technology and Innovation, Spain.

1. INTRODUCCION

El presente artículo desarrolla el procedimiento de obtención y análisis de datos procedentes de ensayos en entorno laboratorio mediante técnicas de interferometría de imágenes. La posibilidad de esta nueva metodología de análisis se hace posible hoy en día gracias a la incorporación de modernos sistemas digitales de proceso de datos junto a los avances alcanzados en la electrónica de captación y análisis de imágenes en tiempo real.

Este trabajo desarrolla los primeros estudios de implantación y las líneas generales de la metodología a aplicar en el proyecto VECTOR del CEPYC/CEDEX, desarrollado conjuntamente por personal

de la Sección de Experimentación del CEPYC y de la empresa privada CTC, en un proyecto auspiciado por la Dirección General de Innovación Tecnológica del Ministerio de Industria y Energía.

2. CARACTERIZACION DE LOS ACTUALES SISTEMAS DE TOMA Y PROCESADO DE DATOS PARA LABORATORIO

Las exigencias de un trabajo de toma de datos en modelo reducido suelen ser bastante estrictas y se caracterizan por un conjunto de situaciones peculiares comunes a todos ellos (así las exigencias de estricto control sobre parámetros tales como el ruido inducido en el entorno, atenuación y distorsión de la señal en su transmisión, filtrado y adecuación de las señales analógicas, conversión final de la señal).

Asimismo, el proceso operativo que se sigue, a

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de la Sección de Experimentación e Instrumentación del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX).

partir de transductores de altura de ola para el caso del CEPYC (en general, sistemas de conversión de una magnitud física a una magnitud eléctrica susceptible de ser medida), que requieren el empleo de acondicionadores de señal, calibrado y ajuste de los sensores y transmisión mediante cable al ordenador, resulta ser bastante rígido en comparación al método que se estudia.

Por otra parte, el número de grados de libertad en el análisis así realizado se incrementa mediante la multiplicación exhaustiva del número de ensayos a realizar con un número reducido de sensores (pequeño número de grados de libertad, medición intrusiva y dilatación de la duración de los ensayos). Las ventajas que se obtendrían de la utilización de una metodología como la estudiada pueden resumirse como sigue:

- La metodología es no intrusiva, permite la multiplicación indefinida del número de grados de libertad controlados y evita los largos procesos de recalibración y ajuste de los transductores y equipamiento auxiliar.
- El análisis de imágenes constituye un proceso susceptible de ser realizado tantas veces como se desee actuando sobre distintos puntos de la imagen, midiendo distintos parámetros de control y utilizando distintos algoritmos.
- La imagen recogida puede ser almacenada indefinidamente en un soporte magnético y contiene una mayor información del ensayo que cualquier conjunto de resultados correspondientes a un determinado proceso sobre un determinado conjunto de puntos considerados como representativos del modelo. Por otra parte una extensión del sistema, mediante las adecuadas técnicas software es susceptible de evaluar los campos de variaciones asociados a la evolución de cualquier magnitud física medible (en particular, en el caso del CEPYC, velocidad

des sin necesidad de acudir a otros métodos como el empleo de micromolinetes).

- Se atiendan grandemente los problemas de ruido en la transmisión de la información al ser en su mayor parte digital durante todo el ciclo.
- El proceso es susceptible de ser realizado de una forma altamente automatizable manteniendo un control muy completo sobre todos los factores intervinientes.

3. ENSAYOS EXPERIMENTALES CON MEDIDA FOTOGRAFICA DE ALTURAS DE OLA

Diversos investigadores (Pos y Kilner, 1987) han incluido en sus estudios y ensayos en modelo técnicas para la medición de alturas por interferometría de imagen. Según señalan, el método permite una medida precisa de las alturas de ola en todo el ámbito del modelo, y permite controlar efectos de reflexiones mediante la adquisición de las imágenes en instantes precisos.

En los diversos ensayos realizados se usaron focos de luz posicionados sobre la superficie del modelo (a unos cuatro metros sobre él) para producir la adecuada iluminación, y un par de cámaras situadas a cinco metros sobre la superficie del modelo. Otros dieciséis puntos de control se situaron formando tres planos sobre el modelo, encontrándose el plano inferior aproximadamente 50 mm bajo la superficie, el central a 220 mm sobre ella y el plano superior a una distancia de 660 mm sobre la superficie libre.

Los pares estereoscópicos fueron tomados a diversos tiempos, dependiendo de la longitud de onda del oleaje que se hacía incidir sobre el modelo, contados a partir del arranque de la paleta generadora (en tiempos correspondientes a la llegada de energía del frente de onda a elementos susceptibles de reflejarla).

Un segundo par estereoscópico fue tomado para un oleaje desfasado 180 grados con relación al oleaje recogido por el primer par estereoscópico. Esto significa que los valles fotografiados en el segundo par ocupan posiciones correspondientes a las crestas encontradas en el primer par. Si las elevaciones de las crestas y valles del primer par estereoscópico se restan de sus correspondientes elevaciones en el segundo se puede obtener con facilidad un gráfico de las distribuciones de la altura de ola en todo el modelo.

En este análisis realizado por Pos y Adams, el objetivo final era el llegar a trazar las curvas de igual coeficiente de difracción para compararlas con los resultados de la teoría y de un modelo matemático de probada eficacia (en este caso el Programa WAVE, de Swansea Univ. U.K.).

CAPTACION DE LAS IMAGENES MEDIANTE CAMARAS CCD

PROCESO DE ADQUISICION DE LA IMAGEN.	
ALMACENAMIENTO Y PROCESADO DE LAS IMAGENES.	
DETERMINACION DE PARAMETROS A EVALUAR Y CARACTERIZACION DE OPCIONES.	
POSTPROCESO DE RESULTADOS.	
SAUDA Y VALIDACION DE RESULTADOS	DEFINICION DE NUEVAS OPCIONES

TABLA 1. Esquema simplificado del proceso de adquisición y tratamiento de imágenes en ensayos.

Para llegar a prevenir cualquier tipo entre las características de la superficie fluida y el hecho del modelo, en este tipo de ensayos se suele recurrir a la utilización de diversos tipos de colorante en el agua del modelo, de tal forma que ésta se pueda convertir en un medio sensiblemente opaco.

La interpretación de los pares estereoscópicos para producir el estado adecuado de información sobre las alturas de ola en el modelo es la cuestión fundamental que afecta a la validez de la presente metodología. Teniendo en cuenta el hecho de que la altura de la ola medida en un punto determinado del modelo puede considerarse como la distancia vertical que separa una cresta del valle precedente (o del siguiente), está clara la necesidad de los dos pares fotográficos citados, siendo el estado del segundo par, como ya se ha comentado, una variación en fase sobre el estado de agitación recogido por el primero (el proceso de disparo de la señal que activa las cámaras puede ser realizado a través del propio mecanismo que se encarga de la generación del oleaje).

El sistema de cálculo usado en el experimento de Pos comprendía, aparte de las cámaras y el correspondiente sistema de adquisición de un sistema para la representación gráfica de resultados basado en Tektronix 4051, que se encargaba, además, de la realización de las correspondientes transformaciones proyectivas, y de la interpolación de resultados a través de la transferencia de los ficheros de datos a un sistema UNIVAC 1100 que se encargaba de generar las vistas tridimensionales de las distribuciones de alturas en el modelo.

La utilización de esta técnica, y con los medios empleados en el ensayo, llevó a la obtención de resultados con precisiones en la determinación de las alturas de ola que no llegaron a sobrepasar los 2 mm de error en ninguno de los puntos medidos.

4. UN SENCILLO MODELO DE DISTRIBUCION DE INTENSIDADES

En el tipo de modelo llamado de facetas la función de intensidad observada $I(x,y)$ puede considerarse como la suma de una función polinómica en x,y y de una determinada función que representa el ruido existente $\omega(x,y)$.

$$I(x,y) = \alpha x + \beta y + \gamma + \omega(x,y)$$

(el polinomio puede llegar a ser de un orden superior mediante los coeficientes apropiados).

La función $\omega(x,y)$ presenta media nula y varianza ρ .

Los parámetros α, β, γ pueden ser estimados

mediante un ajuste al modelo de cualquier imagen dada $I(x,y)$ mediante el método de mínimos cuadrados sobre una retícula dada.

Longuet-Higgins (1957) ha llegado a sugerir el uso de sinusoides para un tipo de representación de la forma:

$$I(x,y) = a_1 \cos(\lambda_1 x + \cos \lambda_2 y + \gamma_1) + \omega(x,y)$$

donde los parámetros $a, \lambda_1, \lambda_2, \gamma$, se estiman mediante el método de los mínimos cuadrados.

En los llamados modelos espaciales autorregresivos la secuencia aditiva de ruido $\omega(x,y)$ puede considerarse independiente con función de densidad dada por la curva de Gauss $N(o, \rho)$. Así un modelo de este estilo podría describirse numéricamente de la siguiente forma:

$$I(x,y) = \sum_{i,j \in N} \theta_{i,j} I(x+i, y+j) + \omega(x,y)$$

o bien

$$I(s) = \sum_{t \in N} \theta_t I(s+t) + \omega(s)$$

donde s y t son vectores bidimensionales de componentes enteras. El conjunto de puntos constituyentes del dominio N definido, pueden considerarse sobre una retícula que excluye a su origen.

5. RESTAURACION Y AMPLIADO DE IMAGENES

En el dominio de tratamiento de imágenes espacial, la imagen no es sino un agregado de pixels que puede llegar a ser preprocesado de la forma

$$g(x,y) = h[f(x,y)]$$

donde $f(x,y)$ es la imagen original y h es un operador que se aplica sobre f .

La forma de este operador h , elegible para evitar distorsiones de imagen debidas al ruido, alrededor de cualquier punto de la imagen, puede tomar la forma de una máscara de convolución del tipo:

$$\begin{aligned} h[f(x,y)] = & \\ = & \omega_1 f(x-1, y-1) + \omega_2 f(x-1, y1) + \\ & + \omega_3 f(x-1, y-1) + \omega_4 f(x, y-1) + \omega_5 f(x,y) + \\ & + \omega_6 f(x, y+1) + \omega_7 f(x+1, y+1) + \\ & + \omega_8 f(x+1, y) + \omega_9 f(x+1, y+1) \end{aligned}$$

donde los ω_j representan los llamados coeficientes del enmascaramiento.

A partir de aquí, la realización de un histograma de intensidades de la imagen es capaz de proporcionar una idea bastante general sobre las características de la imagen y de su entorno.

Para una imagen cualquiera con r_i intensidades diferenciables en los n puntos que la constituyen, formando grupos de n_j píxeles con la misma intensidad, el valor característico de la línea j de ese histograma será:

$$V_j(r_j) = \frac{n_j}{n}$$

Un procedimiento sencillo para la diferenciación de la imagen así caracterizada constituye el método llamado de ecualización de imágenes, de la forma:

$$S_i = T(r_i) = \sum_{j=1}^i V_j(r_j)$$

que representa un reacondicionamiento de la intensidad de los puntos de la imagen con el objeto de evitar concentraciones de intensidad debidas a efectos diversos, entre ellos los llamados reflejos indeseados. También puede ser utilizada para mejorar el contraste entre imágenes adyacentes por medio de una intensificación de las zonas oscuras y un apagado de las excesivamente brillantes. Dentro de las técnicas de tratamiento de imágenes existen fotogramas muy conocidos que muestran la bondad de estas técnicas para el realce de los resultados.

Otra forma más compleja de adecuación de una imagen a las condiciones presentes en su entorno es la conocida bajo el nombre de especificación del histograma. Simplemente se trata de caracterizar las imágenes imponiendo que su histograma tenga una forma admitida de antemano (como puede ser una curva de Gauss u otra cualquiera). Para ello aplicamos una ecualización de imagen en la forma especificada anteriormente, obteniéndose niveles de intensidad de pixel perfectamente diferenciables por el sistema de procesado de imagen. A partir de aquí se obtiene una función de transformación adoptando la forma:

$$S_i = G(z_i) = \sum_{j=1}^i V_j(z_j)$$

usando el histograma especificado, y a partir de este instante aplicamos:

$$z_i = G^{-1}(s_i)$$

a los niveles de intensidad correspondientes a la imagen ecualizada.

Este procedimiento permite obtener imágenes de mayor calidad y mejor contraste que las obtenidas por el procedimiento anterior.

En el caso de que se desee una focalización de la imagen (aumento de la imagen en una zona determinada del modelo, correspondiente a puntos a estudiar), bastaría tener en cuenta que un aumento se basa en la correspondencia que asigna a una imagen definida $f(x,y)$ una nueva imagen $g(x,y)$ que se obtiene realizando un conjunto de transformaciones de píxeles sobre la anterior de la forma:

$$g(x,y) = A(x,y) [f(x,y) - M(x,y)] + M(x,y)$$

$$A(x,y) = c \frac{M}{\sigma(x,y)} \quad 0 < c < 1$$

$m(x,y)$ es la intensidad media en un entorno del punto (x,y)

M es la media global en el entorno

$\sigma(x,y)$ es la desviación típica calculada en el mismo entorno del punto (x,y)

c es una constante

$A(x,y)$ representa un factor de ganancia en la imagen, que puesto que es inversamente proporcional a la desviación estándar de la intensidad garantiza que las áreas de menor contraste, recibirán una ganancia mayor.

6. ELIMINACION DE RUIDOS PRESENTES EN LA IMAGEN Y PERFILADO DE CONTORNOS

La reducción de efectos espúreos presentes en la imagen como consecuencia de la transmisión, cuantización o alteraciones debidas al medio durante la transmisión de la imagen o su adquisición es el propósito fundamental de las técnicas que someramente se describen a continuación.

Dada una imagen $f(x,y)$ el procedimiento utilizado para derivar de ella una imagen $g(x,y)$ donde los efectos de distorsión de la original se hayan corregido mediante un adecuado promedio de las intensidades en un entorno cercano se realiza de la forma:

$$g(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{u,v} f(u,v)$$

donde u y v son puntos pertenecientes a un entorno predefinido de la imagen alrededor de (x,y) .

Para el delimitado de contornos de una imagen supuestamente obtenida en condiciones no ópti-

mas se utilizan máscaras para definir un conjunto de operaciones que equivalgan (al menos de una forma aproximada) al cálculo del gradiente de la intensidad en cada uno de los puntos de la imagen. Tomando dos direcciones principales, la x y la y se pueden establecer las pendientes en cada punto de la forma siguiente:

$$P_x = [f(x+1, y-1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y+1)]$$

$$P_y = [f(x+1, y-1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x-1, y+1)]$$

donde, unificando las dos pendientes, resulta una pendiente global para un punto dado de la forma:

$$P(x, y) = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

El interés fundamental del uso del gradiente como derivada primera de la intensidad, responde a la facilidad de detección de transiciones de intensidad y, por lo tanto, a la detección de bordes. En el planteamiento de laboratorio aquí tratado este parámetro se acomodaría a la detección de las crestas de las ondas, permitiendo su individualización y tratamiento separado.

Otras formas de definición de las pendientes en un punto son:

$$P(x, y) = \sqrt{(a_4 + a_8)^2 + (a_7 + a_5)^2}$$

donde las intensidades se toman en puntos de una malla 3×3 que rodea (x, y) .

La dirección del gradiente según este método es:

$$\alpha = -\frac{\pi}{4} + \text{tg}^{-1} \left(\frac{a_7 - a_5}{a_4 - a_8} \right)$$

Según otro método también bastante utilizado en técnicas de imagen, el valor de la pendiente en un punto para la malla anteriormente mencionada toma el valor:

$$P_x = (a_6 + 2a_5 + a_4) - (a_0 + 2a_3 + a_2)$$

$$P_y = (a_6 + 2a_7 + a_8) - (a_0 + 2a_1 + a_2)$$

A partir de aquí sería fácil derivar un modelo de facetado de superficies aproximando los valores de la intensidad en un cierto entorno por un conjunto de polinomios del mayor orden posible. Usando un

conjunto de polinomios ortogonales, la función de intensidad puede ser calculada como una combinación lineal de los polinomios de la base elegida. Una vez que dicha aproximación haya sido calculada y expresada de forma numérica para la imagen es posible el cálculo analítico de las derivadas primeras. Este método presenta el valor adicional de permitir la detección automática de la forma del perfil a partir de las derivadas direccionales de segundo orden, estimándose éste mediante el cruce por cero de la segunda derivada.

En el mismo orden de ideas otros autores han sugerido que el operador más apropiado para la definición de bordes debería tomarse como una forma mixta laplaciano-gaussiana de la forma:

$$\nabla^2 G(x, y) = -\frac{1}{2\pi\sigma^4} \left(2 - \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} \right) \exp - \left(\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right)$$

En este operador la parte gaussiana actúa como función de suavizado para las intensidades, mientras que el laplaciano proporciona una derivada. Las máscaras asociadas a este proceso de cálculo suelen ser de dimensiones bastante grandes (con tamaños típicos del orden de 25×25 pixels), y por lo tanto este tipo de cálculos requiere una fuerte capacidad computacional.

Este operador puede ser aproximado mediante el llamado operador DOG de la forma:

$$\text{DOG}(\sigma_r, \sigma_t) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_r^2}\right) \right] - \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_t^2}\right) \right]$$

donde el valor óptimo de la aproximación se consigue para la relación:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_r} = 1,6$$

7. PRINCIPIOS MATEMATICOS DE LA CONSTRUCCION DE CURVAS Y SUPERFICIES

En el tratamiento de datos experimentales se suele llegar a la necesidad de la construcción de un modelo que refleje el comportamiento seguido por el proceso. Este modelo será casi siempre gráfico, lo que exigirá la existencia de un conjunto de algoritmos de interpolación que sean capaces de generar la información necesaria para la obtención de las isofleas y gráficos tridimensionales de los resultados del ensayo.

Para evitar los farragosos problemas inheren-

tes a la interpolación de tipo Lagrange, han aparecido un conjunto de métodos que se basan en la interpolación polinómica a trozos (un conjunto de polinomios de interpolación que cumplen ciertas condiciones de continuidad en los puntos de cambio, generalmente expresados en coordenadas paramétricas con su parámetro relacionado con el recorrido sobre la curva).

En este orden de ideas las llamadas curvas de Bezier se componen de un único tramo polinómico, obtenido mediante una combinación lineal de polinomios base $J_1(x) \dots J_n(x)$ cuyos coeficientes son precisamente los puntos dados de la forma:

$$B(x) = P_1 J_1(x) + P_2 J_2(x) + \dots + P_n J_n(x)$$

La diferencia fundamental con los esquemas de interpolación básicos estriba en que la curva que se obtiene no pasa por los puntos dados, aunque este tipo de curvas cumplen un conjunto de propiedades como la de pasar por el primer y último punto y determinar con él segundo y el penúltimo las direcciones de salida y de llegada (así la forma de la curva final se aproxima a la poligonal que forman los puntos).

Sin embargo, el principal inconveniente de las curvas de Bezier se deriva del hecho de estar constituidas por un único tramo polinómico, de grado $n-1$ para n puntos dados, por lo tanto al crecer n crece el grado y la curva se aproxima a la poligonal. De aquí que la forma que determina una misma poligonal depende del número total de puntos.

Este tipo de problemas quedan resueltos con los llamados B-splines. En este caso la curva final está formada por tramos polinómicos que conectan entre sí según unas características prefijadas de continuidad. Los puntos dados, como en el caso anterior, sirven también para combinar linealmente un conjunto de funciones base que formarán la curva final. Esta curva tampoco va a pasar por los puntos dados y seguirá manteniendo una forma semejante a la poligonal, sin embargo presenta un conjunto de ventajas que la distinguen:

- Los tramos polinómicos son del mismo grado, independientemente del número de puntos.
- Las condiciones de continuidad en la curva pueden fijarse como se desee (esto afectará a las formas de las funciones base que entran en la combinación).

Para las aplicaciones en que fuese interesante la obtención de curvas suaves pasando por los puntos dados, los llamados *Splines cardinales*

constituyen una base de funciones, cuya combinación lineal:

$$S(t) = P_1 G_1(t) + P_2 G_2(t) + \dots + P_n G_n(t)$$

goza de las propiedades que se detallan:

- Es una curva que pasa por cada uno de los puntos dados.
- En cada uno de los intervalos es un polinomio cúbico.
- Posee continuidad C_2 en todos los puntos de enlace entre los tramos polinómicos.
- De todas las curvas de interpolación en el conjunto de puntos dado es la que presenta una mayor suavidad (aunque esta propiedad también la comparten los B-splines cúbicos con continuidad C_2).

En lo que se refiere a la determinación de la base se puede demostrar que las características anteriores dejan todavía dos grados de libertad que pueden ser fijados. En aplicaciones de tipo gráfico la mayoría de los autores han encontrado que la mejor elección consiste en escoger $S(x)$ de tal forma que tenga en el primer intervalo y en el último la derivada tercera de las cúbicas de interpolación de los primeros y los últimos puntos.

La interpolación de un conjunto de puntos por medio de splines cardinales tiene un carácter global; así la variación en posición de cualquiera de los puntos modifica la forma de toda la curva de interpolación. (En este caso la base de splines es única, no poseyendo los dos grados de libertad anteriormente mencionados).

Para el caso de una modelización superficial de un conjunto de datos representados por puntos en el espacio, se puede suponer que corresponden a conjuntos cuya proyección ortogonal sobre el plano XY corresponda a una malla rectangular, o bien cuya proyección origine puntos irregularmente distribuidos.

El primero de los métodos tiene la ventaja de permitir un tratamiento matemático más simple, a la vez que las propiedades de continuidad y suavidad de la superficie son mejores. Ambos métodos corresponden a una exigencia de control sobre el proceso de adquisición de los datos que es capaz de permitir su toma en las posiciones deseadas.

En el caso del primero de los métodos se presupone la interpolación de los datos en volúmenes obtenidos manteniendo constantes las variables x e y , llegándose a obtener un conjunto de curvas $z(x)$, $z(y)$ ortogonales. La superficie se llega a obtener por interpolación lineal en cada rectángulo entre las cuatro curvas que lo delimitan. La super-

ficie final presenta características C_0 y presenta angulosidades.

Para la misma situación anterior el método de los ajustes bicúbicos supone que se conocen de alguna manera en cada punto de la malla las dos derivadas parciales primeras de la superficie y la derivada segunda cruzada, a partir de aquí se puede construir en cada rectángulo de la malla un ajuste de ecuación:

$$\zeta(x,y) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \theta_{ij} x^{i-1} y^{j-1}$$

dónde los coeficiente θ_{ij} se determinan unívocamente a partir de los datos.

El conocimiento expresado de las derivadas parciales tiene como consecuencia que la superficie final presente un tipo de continuidad C_1 (presentando por lo tanto discontinuidades en la curvatura pero no así en las pendientes).

Como extrapolación de los métodos usados para el ajuste de curvas, las superficies de Bezier se obtienen como una combinación lineal del tipo:

$$\zeta(x,y) = \sum_i \sum_j P_{ij} J_i(x) J_j(y)$$

P_{ij} son los puntos dados
 $J_i(x)$ son idénticas funciones base a las utilizadas para la construcción de las curvas de Bezier. Como no pasan por los puntos dados tan sólo permiten modelar la forma de la superficie.

Las superficies basadas en los B-splines resuelven el problema del enlace entre los ajustes a la superficie. Así la superficie se llega a formar por un combinación lineal de productos de elementos de la base, que ahora son elementos polinómicos de un grado limitado, permitiendo además un mejor control sobre las propiedades de continuidad de la superficie a partir de una definición adecuada de los elementos de la base.

Si se desea que la superficie final pase por lo puntos dados lo mejor es la utilización de un esquema basado en los splines cardinales. La superficie así formada por combinación lineal de productos de elementos de la base de splines cardinales, se puede considerar como resultado de la interpolación en una de las dos direcciones x o y de los perfiles obtenidos por splines cardinales en la otra dirección (y o x), y presenta unas condiciones de continuidad C_2 en cualquiera de sus puntos, con lo cual la superficie se nos muestra como de una gran suavidad. Con esto se puede llegar a modelar una superficie bastante compleja con muy pocos puntos. Evidentemente con los B-splines cúbicos

cos también se habría podido obtener una continuidad de tipo C_2 .

Si los puntos se encontrasen en proyección irregularmente distribuidos sobre el plano XY , entonces los métodos a aplicar pueden dividirse en tres clases:

- Métodos que triangularizan el conjunto de puntos y posteriormente interpolan dentro de los triángulos.
- Métodos que reducen el problema a la interpolación en una malla rectangular.
- Métodos que modelan la superficie por medio de una función única que es obligada a pasar por todos los puntos.

Los primeros originan superficies con continuidad no superior a C_1 . El proceso comienza por una triangularización de las proyecciones del conjunto de puntos sobre el plano XY siguiendo algoritmos que maximizan el mínimo ángulo interior de cada triángulo. Después de una estimación de las derivadas parciales en los vértices de los triángulos se interpola en el interior de cada uno de ellos con un polinomio de dos variables.

La dificultad en la conexión entre funciones definidas entre triángulos es la que origina un grado de continuidad menor que en el caso del uso de esquemas de interpolación sobre mallas de tipo rectangular.

El segundo de los métodos indicado permite el logro de altas características de continuidad (de tipo C_2), incluso en el caso de puntos irregularmente distribuidos. En una primera fase se obtiene un conjunto de puntos dispersos en una malla rectangular y tales que una vez interpolados proporcionen una superficie que pasa por los puntos dados. En este momento ya se puede construir la superficie mediante el método de los splines cardinales.

Este esquema es capaz de proporcionar superficies muy suaves a costa de unas exigencias computacionales más elevadas que en el caso de los métodos de triangularización.

El último de los métodos citados se utiliza poco, puesto que origina curvas interpolantes con propiedades geométricas poco aceptables, o bien requiere tiempos de cómputo excesivamente elevados.

8. CARACTERIZACION DE EFECTOS DEBIDOS A LA RUGOSIDAD DE LAS SUPERFICIES

El problema de la caracterización de la textura de las diversas superficies reconocibles en una imagen se relaciona con las diversas tonalidades que

aparecen para las diversas superficies constituyentes de la imagen. Así las texturas de mayor figura se encuentran representadas por superficies tonales más pequeñas.

La llamada función de autocorrelación es un medio para indicarnos el tamaño de estas superficies tonales:

$$\rho(x,y) = \frac{\frac{1}{(A-x)(B-y)} \iint_{-x}^0 I(u,v)I(x+u, v+y) du dv}{\frac{1}{A \cdot B} \iint_{-x}^0 I^2(u,v) du dv}$$

$$0 < x < A$$

$$0 < y < B$$

Las características derivadas de la textura del material pueden ser estudiadas también a partir de la designada como co-ocurrencia de tonos de gris (i,j) para una imagen I (número de pares de pixels con niveles de gris i y j que se encuentran en relación geométrica constante —distancia entre sí y ángulo—).

La matriz de co-ocurrencias puede ser normalizada mediante la división de cada uno de los términos por la suma total de los que componen la matriz. De esta forma se permite la introducción de matrices de probabilidad condicional, en el sentido de poder llegar a definir características de textura al no ser afectadas estas matrices por cambios en el nivel de grises del histograma de una imagen, sino solamente por cambios en la definición topológica de los niveles de grises dentro de la imagen.

Esta co-ocurrencia puede definirse de forma matemática como:

$$P(u, v) = \{ (i,j), (k,l) \in SI(i,j) = u \wedge I(k,l) = v \}$$

El conocimiento de esta función conlleva una estadística de las probabilidades de co-ocurrencia, que nos permite la derivación de funciones como las que a continuación se expresan:

Energía: $\sum_i \sum_j P(i,j)^2$

Entropía: $\sum_i \sum_j P(i,j) \log P(i,j)$

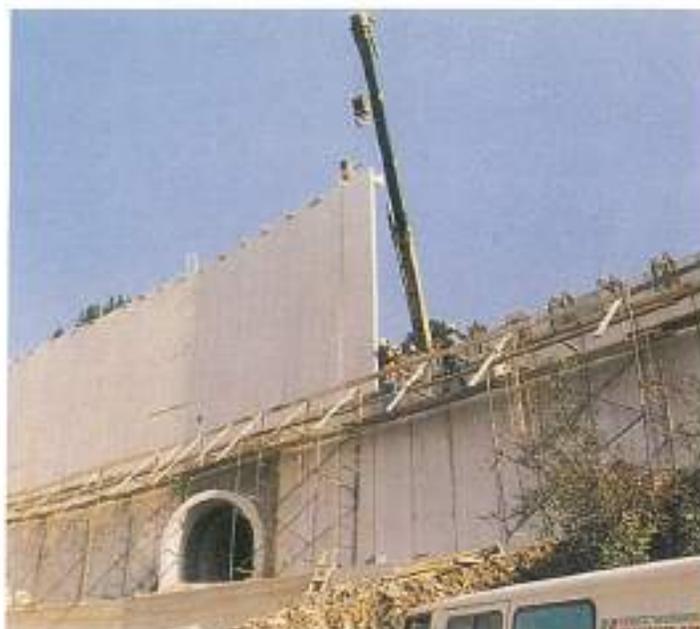
Contraste: $\sum_i \sum_j (i-j)^2 P(i,j)$

Correlación: $\sum_i \sum_j (i-u_i)(j-u_j) P(i,j) / \sigma_x \sigma_y$

Homogeneidad: $\sum_i \sum_j \frac{P(i,j)}{1 + |i-j|}$

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, L. P., y POS, J. D. (1981). Model harbour wave form studies by short range photogrammetry. *Photogrammetry Rec.* 10: 457-470.
- ADAMS, L. P., y POS, J. D. (1984). Wave height measurements in model harbours using close range photogrammetry. 15th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Río de Janeiro.
- POS, J. D. (1982). Photogrammetric wave height measurements in model harbours using projective transformations. *S. Afr. Surv. J.*, 18(6): 15-22.
- POS, J. D. (1982). Photogrammetric wave height measurements in model harbours. A detailed laboratory procedure. Notes for thesis students. Dept. Civ. Eng. Univ. Cape Town, South Africa, September.
- POS, J. D. (1983). Wave diffraction using finite and infinite elements. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 41(2): 219-235.
- POS, J. D., y KILNER, F. A. (1982). Laboratory photogrammetric wave height measurement. *Proc. 18th. Inter. Conf. Coastal Eng. Cape Town*, pp. 695-709.



Muro de Contención H = 12,80 mts. ejecutado con dos piezas superpuestas y ancho de unión. Acabado superficial liso.



Muro de Contención. H = 8,60 mts. Acabado Superficial Combinado TEXTURIZADO - Imitación Piedra.



Estribos y Aletas - Paso Superior Ctra. Toledo - Aranjuez. Acabado Superficial TEXTURIZADO

UN MURO EXPERIMENTADO UN MURO COMPETITIVO UN MURO RACIONAL

— "MUR EBAL" es un procedimiento a base de elementos modulares prefabricados, que permite la ejecución de paredes verticales o inclinadas que deben absorber esfuerzos y transmitirlos a la cimentación.

— Los elementos "MUR EBAL", autoestables en la puesta en obra, colocados uno al lado del otro sobre un hormigón de Empusa, constituyen la totalidad de la estructura vertical de las obras.

— La zapata de cimentación se hormigona "in situ" inmediatamente después de colocar la faja, asegurando así el empotramiento de los elementos.

— El "MUR EBAL" se fabrica siempre bajo pedido: la elección del modelo, la altura, y las armaduras son adaptadas a las dimensiones de la obra y determinadas según los esfuerzos a contener, dentro de la normativa vigente de obras de hormigón armado.

— Las zapatas o soleras son concetadas y calculadas por la oficina de estudios, en función del problema a resolver, según las normas de hormigón armado.

— El hormigonado de la viga de atado en el canal se realiza como última operación. Siendo opcional en función de la presión en el cálculo.

Los elementos se encuentran pues unidos monolíticamente en cabeza y en pie.

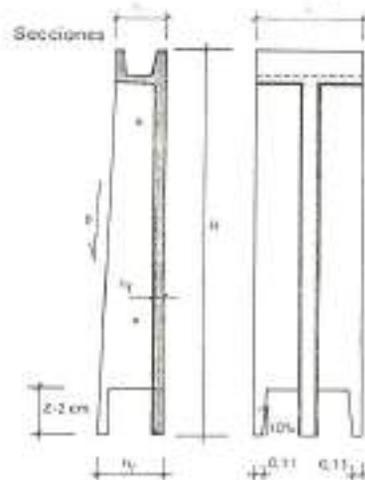
— Gracias a los nervios, la estructura de la obra es rígida en el sentido vertical y la viga de atado permite la absorción de cargas concentradas en los cabezales.

CARACTERISTICAS:

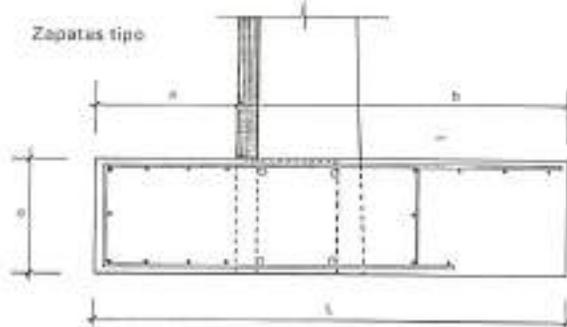
- Ancho: 1,20 y 2,40 mts.
- Altura: Hasta 14 mts.
- Peso: 450-550 kgs./m²

UTILIZACIONES:

- MUROS DE SOSTENIMIENTO.
- ESTRIBOS PARA PUENTES.
- CANALIZACIONES.
- DEPOSITOS DE AGUA.
- ESTACIONES DEPURADORAS.
- OBRAS URBANAS, PASOS INFERIORES, ETC....



Zapatas tipo



Casa Txindokape, s/n.
Tels. 88 58 00 - 04
20247 ZALDIBIA (Guipúzcoa)

Coopera en el desarrollo de proyectos de transporte en el ámbito internacional.

