

Diques exentos: inventario y comportamiento en las costas españolas

JOSÉ M. DE LA PEÑA OLIVAS (*) y FRANCISCO J. SÁNCHEZ PALOMAR (**)

RESUMEN A lo largo de los años 2005, 2006, y 2007, el CEDEX, por encargo de la Dirección General de Costas, ha ido realizando una serie de trabajos para conocer mejor la realidad del comportamiento de los diques exentos y facilitar los futuros diseños de este tipo de obras de defensa. En este artículo se presenta un resumen de los trabajos efectuados en 2005 y 2006 sobre el comportamiento observado de los diques exentos en las costas españolas. En la actualidad se continúa trabajando, para dar las directrices de diseño de estas obras, basados en los resultados que aquí se presentan.

DETACHED BREAKWATERS: INVENTORY AND BEHAVIOUR IN SPANISH COAST

ABSTRACT Throughout years 2005, 2006, and 2007, the CEDEX, by order of the Main Directorate of Coasts, it has been making a series of works to know better the behaviour of the detached breakwaters and to facilitate the future designs of this type of coast defence. In this article summary of the works done in 2005 and 2006 appears on the observed behaviour of the detached breakwaters in the Spanish coasts. At the present time it is continued working, to give the directives of design of these coastal works, based on the results that appear here.

Palabras clave: Dique exento, Defensa de costas.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio reciente de la ingeniería de costas, las obras de defensa han ocupado un papel importante en su desarrollo. Pero su tipología estructural es muy limitada; siendo ya clásica su clasificación en: diques y espigones, diques exentos, diques longitudinales, y alimentación artificial (Peña, 2007). Esta variedad de obras de defensa se fueron mejorando en su diseño y ubicación en el transcurso del tiempo. A lo largo de los años setenta y ochenta del pasado siglo, la ingeniería de costas usó profusamente los espigones y diques exentos en sus diversas variedades y combinaciones (Silvester, 1978), y se desarrollaron estudios específicos para mejora de su diseño y conocimiento de su comportamiento en la naturaleza. Dentro de este esfuerzo investigador se encuentran diversos trabajos realizados en este Centro en el transcurso de los años ochenta (Enríquez, 1984; Berenguer y Enríquez, 1985; Berenguer y Enríquez, 1987) y en los últimos tiempos (Sánchez y de la Peña, 2005; Peña y Sánchez, 2006).

Los dos primeros informes técnicos elaborados en el CEDEX (Enríquez, 1984; Berenguer y Enríquez, 1985) consistieron en una serie de ensayos en modelo reducido de fondo móvil, que pretendían ahondar en el conocimiento del comportamiento y diseño de los diques sumergidos y aéreos para la formación y defensa de playas. El tercero de los informes

técnicos del CEDEX (Berenguer y Enríquez, 1987), analizaba el comportamiento y forma en planta que adquirirían las playas protegidas y formadas al amparo de obras de defensa combinadas, formando así celdas cerradas que se conocen con el nombre de playas de bolsillo. El cuarto informe técnico (Sánchez y de la Peña, 2005) efectúa un exhaustivo inventario de las obras de defensa costera, entre las que se incluye los diques exentos.

A lo largo de las últimas décadas se han ido diseñando, como solución alternativa o complementaria para la mejora y acondicionamiento de determinadas playas, diversas combinaciones de diques exentos y espigones. La Dirección General de Costas, preocupada en la mejora del diseño y eficacia de este tipo de obras, encargó a este Centro un inventario de las obras de este tipo existentes a lo largo del litoral, para comprobar su eficacia y adaptación a las técnicas teóricas que pretenden predecir el comportamiento y que sirven para su diseño, que se plasmó en un informe técnico presentado en dos informes parciales en el año 2006 (Peña y Sánchez, 2006).

2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Las obras de defensa exentas son, posiblemente, las que más incertidumbre dan en predicción de su comportamiento futuro, y las de más difícil rectificación una vez acometidas y construidas. La incertidumbre del comportamiento tiene diversas vías y lecturas. La primera de ellas es la forma esperable que adquiere la playa a su resguardo. La segunda es cómo afecta y altera a la dinámica litoral general de la costa; si intercepta o no todo el material transportado por el oleaje a lo largo de la costa, aislando completamente un lado del otro de la obra; si las posibles reflexiones del dique hacen alterar el transporte longitudinal exterior a la obra, si lo

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Coordinador del Programa Técnico Científico de Dinámica Litoral del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas CEDEX (Jose.M.Pena@cedex.es).

(**) Ingeniero Técnico de Obras Públicas, Jefe de Sección del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas CEDEX (Francisco.S.Palomar@cedex.es).



FIGURA 1. Construcción del dique exento de la playa de La Barceloneta en Barcelona.

hubiere, si soterra los pies de los diques, etc.. La tercera sería la interferencia que diversas obras de defensa pueden hacer sobre las otras, esto es; el comportamiento esperable con no un único dique exento, sino con una combinación de dique exentos y espigones, que es lo que habitualmente se diseña. Para intentar reducir al máximo estas incertidumbres, en el trabajo del CEDEX (Peña y Sánchez, 2006) se propuso seis de escalones metodológicos de análisis:

1. Estudiar la acción física que los diques exentos hacen sobre el medio costero.
2. Analizar el estado del conocimiento que sobre los diques exentos se ha ido teniendo hasta la actualidad.
3. Hacer un inventario de todas las obras costeras con diques exento a lo largo de las costas españolas; obteniendo de ellas los parámetros más significativos, determinado la evolución de la costa donde se encuentra la obra y el clima marítimo que la afecta.
4. Ordenar y diseñar una tipología de los diversos conjuntos de obras que contienen diques exentos.
5. Analizar cada conjunto de obras, buscando características tipológicas que puedan determinar su comportamiento, al menos aproximado, a priori, y su mayor o menor adaptación a los diversos criterios teóricos definitorios del comportamiento de los diques exentos.
6. Intentar nuevas vías de diseño de diques exentos, que puedan responder algo mejor a las incertidumbres que en la actualidad se presentan, estudiando las diversas teorías sobre estas obras y cuál de ellas se adapta a la realidad de las costas españolas.

3. ACCIONES DE LOS DIQUES EXENTOS SOBRE EL MEDIO FÍSICO

Cuando se proyecta un dique exento para defender una costa o proteger o crear una costa, lo que se está haciendo es intentar actuar sobre el medio físico para transformarlo en su propio beneficio. Las transformaciones que ejercen los diques exentos sobre el medio físico pueden ser de cinco tipos:

1. Acciones sobre el oleaje.
2. Acciones sobre las corrientes.

3. Acciones sobre el nivel del mar.
4. Acciones sobre el transporte longitudinal de sedimentos.
5. Acciones sobre el transporte transversal de sedimentos.

Supóngase un oleaje unidireccional actuando sobre una costa abierta, donde el flujo de energía llega libre a la playa, la única restricción o acción del medio físico a la propagación de ese oleaje es el efecto de refracción cuando se alcanza una determinada profundidad. Si se construyese frente a la costa un dique exento la primera acción que esta obra hace sobre el medio físico, es evitar que el flujo de energía del oleaje llegue libremente a la costa, produciendo un resguardo a la playa situada a su espalda, disipándose la mayoría de la energía del oleaje que incide sobre el dique. Los frentes de ola que pasan a su derecha e izquierda, al sobrepasar a dique transmiten energía lateralmente al área marina situada al abrigo del dique exento. Cuando hay una distancia lo suficientemente larga, entonces la cesión de energía lateral es tal que los frentes se igualan en energía al llegar a la costa. Pero si no existe suficiente distancia a la orilla como para regularizar la energía en los frentes, el dique exento produce una sombra de energía que hace que exista un gradiente de

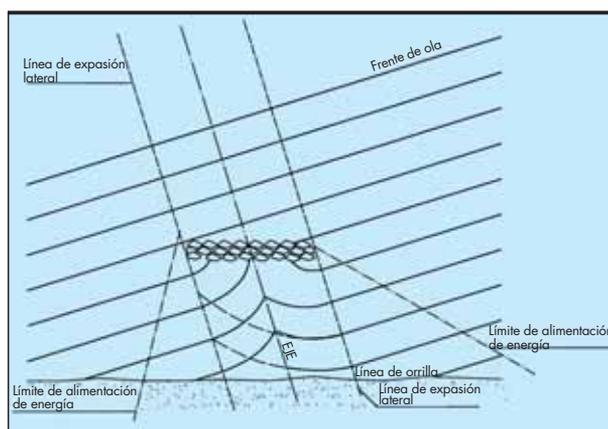


FIGURA 2. Esquema de la acción de un dique exento sobre el oleaje (Peña y Sánchez, 2006).



FIGURA 5. Diques exentos en la playa de Chilches y efecto del transporte longitudinal de sedimentos.

visibles cuando lo que se construye no es un dique aislado sino un grupo de diques exentos.

Si se supone un dique exento construido frente a una playa rectilínea y sobre éste incide un oleaje normal a la costa, y por tanto al dique, la sombra que produce el dique sobre el oleaje produce un transporte por gradiente de sobre elevación de altura de ola que hace absorber sedimento de las zonas aledañas produciendo una acumulación de sedimento.

Si ahora se supone esta misma playa rectilínea, con incidencia oblicua del oleaje sobre la playa se producirá un transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa. Este transporte longitudinal de sedimentos se realizará según una distribución transversal, con un máximo cerca de la zona de rompientes, disminuyendo a medida que nos acercamos a la línea de orilla y a medida que nos alejamos hacia el mar, hasta una profundidad denominada profundidad de cierre, PdC.; tal y como se analiza más adelante al tratar del transporte transversal. La forma producida por el resguardo del dique y el propio dique hacen frenar el transporte longitudinal de sedimentos a barlomar, que producirá una acumulación añadida a la que produce el oleaje normal a la costa, y a sotamar la descompensación del transporte provocará una mayor pérdida de material, haciendo bascular el eje de la formación. Este efecto se aprecia claramente en la la playa de Chilches en Castellón, donde se puede apreciar cómo, aparte de la propia acumulación de sedimento tras los diques exentos la costa se apoya en ellos, especialmente en una de ellos, como si fuera un espigón o dique.

La incidencia del oleaje sobre una costa, o playa produce un movimiento de sedimento a lo largo del perfil perpendicular a la playa. Pero el oleaje solamente es capaz de mover este sedimento hasta una profundidad dada, esta profundidad límite o máxima, es la que se denomina profundidad de cierre (PdC) dado que sería la profundidad a partir de la cual todos los perfiles medidos en diferentes fechas son iguales.

Hallermeier trabajó sobre el tema, y en 1981 publicó en el CERC un estudio sobre la profundidad límite. En este trabajo hace una división del perfil de playa, considerando tres zonas:

1. Zona litoral
2. Zona de transición (*Shoal zone*)
3. Zona de altamar (*Offshore zone*)

El límite entre la *zona litoral* y la *zona de transición*, denominado d_i (profundidad activa), da el límite marino por encima del cual existe un transporte longitudinal significativo y un transporte transversal intenso. El límite entre la *zona de transición* y la *zona de altamar*, denominado d_m (profundidad máxima), da el límite marino de movimiento de arena, restringiéndose el transporte a profundidades menores.

Cuando se sitúa un dique exento a una profundidad menor de la PdC activa, frente al dique existirá tanto un transporte transversal como longitudinal de sedimentos. Mientras que cuando se sitúa a una profundidad entre la PdC activa y máxima, frente al dique solamente se producirá, en la práctica, transporte transversal. A mayor profundidad que la PdC máxima no se producirá transporte transversal significativo. En

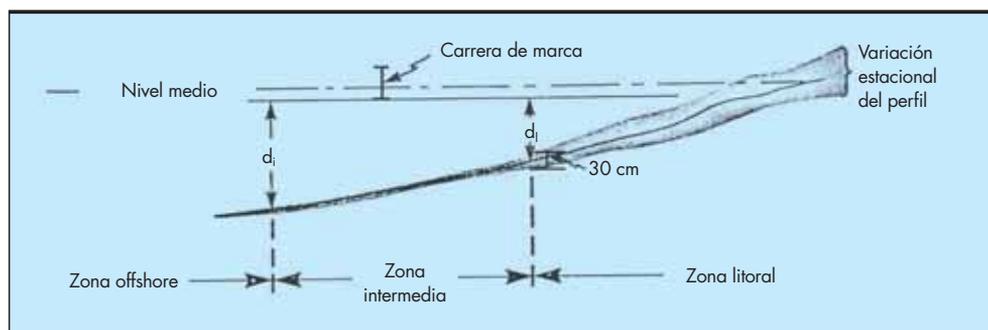


FIGURA 6. Perfil de Hallermeier, con las profundidades de cierre activa y máxima.

el segundo caso, y especialmente en el primero de ellos, frente al dique, lo que se produce es un transporte transversal que intentará socavar el pie del dique exento debido a las reflexiones que produce y a la necesidad de formación del perfil. Es por tanto importante conocer, a la hora de estudiar y diseñar un dique exento, la PdC a la que se situará dado que el comportamiento esperable frente al transporte transversal puede ser de mayor o menor intensidad.

El primero de los aspectos a tener en cuenta es la relación de profundidades, del dique (h_B) y del perfil natural de la playa. Esto es, se pueden dar tres casos generales de la disposición del dique respecto al perfil de playa y su profundidad de cierre, activa y máxima (Peña y Sánchez, 2006).

- I. $h_B > PdC_{max}$
- II. $h_B > PdC_{activa}$
- III. $h_B < PdC_{activa}$

En el primero de los casos (I), y estando el dique próximo a PdC_{max} , todo el sedimento transportado a lo largo de la costa es retenido por la defensa, tanto en una dirección como en la otra, esto es; el dique exento es una barrera total al paso de sedimentos.

En el segundo de los casos (II) gran cantidad de sedimento es retenido por el dique exento; solamente en temporales importantes una escasa cantidad de material puede moverse por delante de los diques exentos, favorecido por las reflexiones que los diques producen en su frente. Puede considerarse al dique como una barrera casi total al paso de sedimentos, y la gran cantidad de material se acumula a resguardo del dique exento.

En el tercero de los casos (III) el dique se ha construido en zona activa del perfil; el transporte longitudinal es compatible con la existencia de defensa costera, que se verá alterado por las reflexiones producidas por los diques, produciendo frente a ellos alteraciones importantes del perfil.

4. ESTUDIOS TEÓRICOS SOBRE DIQUES EXENTOS

A lo largo del desarrollo de la ingeniería de costas ha habido diversos autores que han estudiado el efecto que produce un dique exento o un conjunto de ellos sobre las costas. En general, existen tres tipos de estudios: aquellos que se basan en el análisis de los datos de campo, y a través de ello intentar predecir las formas que puede alcanzar la costa tras un dique o diques determinados puestos a una determinada distancia de la costa; y aquellos estudios que se basan en la modelización teórica de un dique exento y costa adyacente, esta modelización puede ser de dos tipos: la realizada en laboratorio en modelo físico, que estuvo muy en boga en los años 70 y 80 del pasado siglo; y las modelizaciones matemáticas, que se usaron cuando alcanzó en los años 90 del pasado siglo la tecnología informática un grado de desarrollo importante para que pudieran explotarse estos modelos matemáticos sin grandes esfuerzos, desplazando así a los costosos modelos físicos de fondo móvil. Por estas circunstancias, los diversos estudios que se han realizado hasta el momento se pueden dividir en estos tres tipos, esto es: en prototipo o naturaleza; modelo físico o modelo reducido; y modelo matemático o numérico.

Por otra parte, y complementario a lo anterior, el conocimiento de los diques exentos también se pueden efectuar en función de si el estudio se centra en diques aislados o en grupos de diques exentos. A continuación se presentan los trabajos incluidos en cada uno de estos tipos de estudios y, posteriormente, en forma de tabla, los resultados resumidos más importantes de los mismos, tanto para diques exentos individuales, como para grupo de diques exentos.

4.1. ESTUDIOS DE DIQUES EXENTOS AISLADOS

- Sawaragi (1957)
- Shinohara y Tsubaki (1966)
- Inman y Frautschy (1966)
- Toyoshima (1972, 1974)
- Horikawa y Koizumi (1974)
- Noble (1978)
- Perlin (1979)
- Walker, Clark y Pope (1980)
- Gourlay (1981)
- Rosen y Vadja (1982)
- Nir (1982)
- Hallermeier (1983)
- Mimura, Shimizu y Horikawa (1983)
- Shore Protection Manual-CERC (1984)
- Dally y Pope (1986)
- Sonu y Warwar (1987)
- Sunamura y Mizuno (1987)
- Berenguer y Enriquez (1987)
- Suh y Dalrymple (1987)
- Uda, Omata y Yokoyama (1988)
- Ahrens y Cox (1990)
- Hsu y Silvester (1990)
- Mangor, Godage, Amarasinghe y Anderskov (1991)
- Rosati, Gravens y Chasten (1992)
- Nicholson, Broker, Roelvink, Price, Tanguy y Moreno (1997)
- González y Medina (1999)
- Ming y Chiew (2000)
- Zyserman y Johnson (2002)
- Peña y Sánchez (2006)
- Bricio, Negro y Diez (2007)

4.2. ESTUDIOS DE GRUPOS DE DIQUES EXENTOS

- Dean (1978)
- Noda (1984)
- Pope y Dean (1986)
- Ministerio Japonés de Construcción (1986)
- Seiji, Uda y Tanaka (1987)
- Harris y Herbich (1987)
- Suh y Dalrymple (1987)
- Berenguer y Enriquez (1987)
- Hanson y Kraus (1990)
- Hardaway y Gunn (1991, 1999)
- Peña y Sánchez (2006)

Las variables o parámetros que caracterizan los diques exentos son coincidentes para la mayoría de los estudios y trabajos realizados por los diferentes investigadores. En este artículo se ha usado las definidas por Hsu y Silvestre en sus trabajos de 1990 y 1997; siendo estos:

- Y = Distancia de la línea original de playa al punto más avanzado del saliente.
- X = Distancia del punto más avanzado del saliente al dique exento.

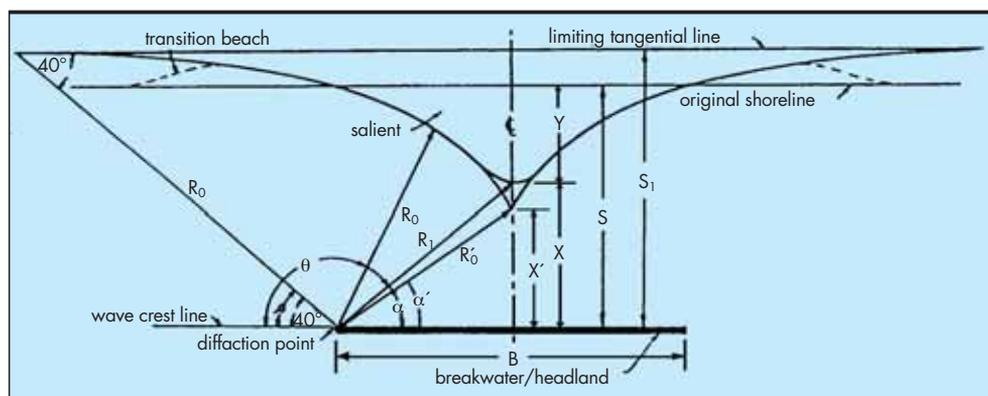


FIGURA 7. Parámetros característicos de un dique exento y formas que genera (Silvester y Hsu, 1997).

Estudio	B/S	OTROS	Forma generada
Gourlay (1981)	$B/S > 2$ $0'67 > B/S > 1$ $B/S < 0'5$ a $0'5$		Doble tómbolo Tómbolo Hemitómbolo
CERC (1984)	$B/S < 1$ $B/S > 2$		No se forma Tómbolo Se forma Tómbolo
Sunamura y Mizuno (1987)	$B/S > 0'67$ $0'29 < B/S < 0'67$ $B/S < 0'29$		Tómbolo Hemitómbolo Costa rectilínea
Berenguer y Enriquez (1987)		$B/L \geq 1$ (L=longitud de onda)	Tómbolo
Ahrens y Cox (1990)	$B/S > 2'5$ $B/S < 1'5$ $0'8 > B/S > 1'5$		Tómbolo periódico Hemitómbolo bien desarrollado Hemitómbolo poco desarrollado
Hsu y Silvester (1990)	$B/S > 1'33$ $B/S < 1'33$ $B/S < 0'203$		Tómbolo Hemitómbolo Costa rectilínea
González y Medina (1999)		$X/B = 0'5(B/S)^{-1'4233}$	Hemitómbolo
Ming y Chiew (2000)	$B/S > 1'25$ $B/S < 1'25$		Tómbolo Hemitómbolo
Bricio, Negro y Diez (2007)	$B/S \geq 1'3$ $0'5 > B/S > 1'3$ $B/S < 0'5$		Tómbolo Hemitómbolo Respuesta limitada

TABLA 1. Resultados obtenidos para diques aislados.

R_1 = Distancia del morro del dique al punto más avanzado del saliente.

α = Ángulo que forma el eje del dique exento con R_1 .

B = Longitud del dique exento.

S = Distancia del dique exento a la línea de costa original.

S1 = Distancia del dique exento a la tangente a la línea de costa formada.

5. INVENTARIO DE DIQUES EXENTOS EN LAS COSTAS ESPAÑOLAS

El inventario de los diques exentos existentes en las costas españolas se realizó analizando toda la serie fotográfica perteneciente al banco de datos del CEDEX, al que se añadió como complemento el uso de la aplicación de internet "Google Earth".

Los datos que se requirieron para el estudio de los diques exentos se podrían considerar desde dos aspectos: el primero sería los datos que se han necesitado para inventariar cada dique exento; el segundo serían todos aquellos datos precisos para estudiar el comportamiento de la obra de defensa y de la forma morfológica que genera. Para ello se definieron una se-

DIQUES EXENTOS POR PROVINCIAS	
Provincia	Número
Gerona (Girona)	3
Barcelona	14
Tarragona	16
Castellón	7
Valencia	2
Alicante (Alacant)	1
Murcia	6
Almería	6
Granada	5
Málaga	10
Cádiz	1
Mallorca	4
Asturias (Asturies)	1
Tenerife	9
Melilla	1

TABLA 2.

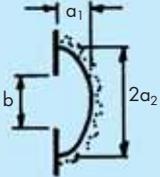
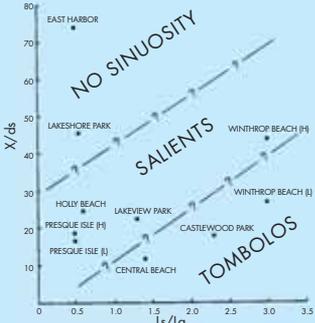
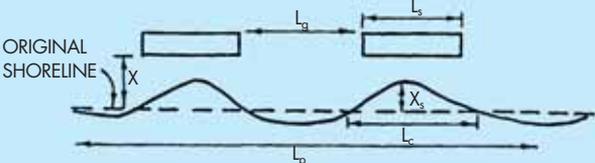
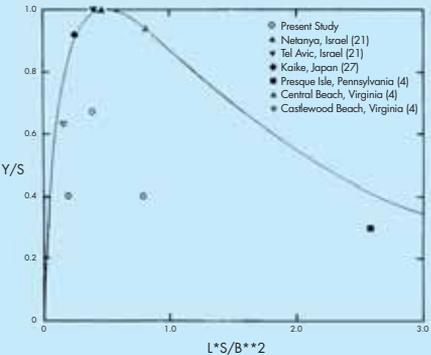
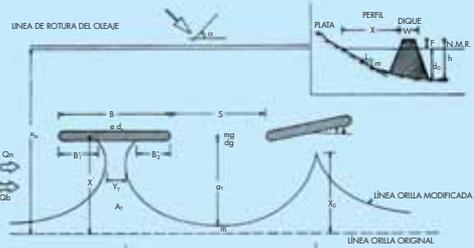
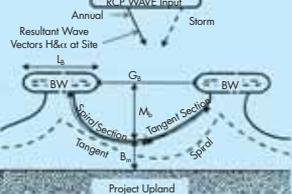
Estudio	Formulación y Gráfico		Comentario
Dean (1978)	$\frac{a_2}{a_1} = 1 + \frac{b}{2a_1}$		<p>Para oleaje normal.</p> <p>Sirve para definir la forma entre dos diques exentos.</p>
Pope y Dean (1986)	<p>Gráfico en función de B/L y S1/d para tener tómbolo, hemitómbolo o la costa rectilínea</p> 		<p>Define tipo de formación que se produce.</p> <p>No sirve para poder calcular la forma geométrica que se produce en medio de dos diques exentos.</p>
Ministerio Japonés de Construcción (1986)	$SAR = \frac{0.5 \lambda_c x_s}{x L_s}$		<p>Se basa en el análisis de más de 1500 proyectos.</p> <p>Se definen las características que deben cumplir un grupo de diques exentos a partir de la variable SAR.</p>
Suh y Dalrymple (1987)	$Y = 14.8 \frac{L S}{B^2} \exp(-2.83 \sqrt{\frac{L S}{B^2}})$ <p>L= separación entre dique exentos</p>		<p>Se basa en ensayos de laboratorio.</p> <p>Definieron formulaciones para diques aislados y para grupo de diques.</p>
Berenguer y Enriquez (1987)	$A_0 = 2A_1$ $B_1 + B_2 + S = 1.9 A_1$	 <p>LINEA DE ROTURA DEL CLEAJE</p> <p>PERFIL DIGUE</p> <p>LINEA ORILLA MODIFICADA</p> <p>LINEA ORILLA ORIGINAL</p> <p>CLEAJE</p> <p>ALTURA SIGNIFICANTE MEDIA : H</p> <p>LONGITUD DE ONDA : L</p> <p>PERIODO : T</p> <p>DIRECCION (RESPECTO COSTA) : W</p> <p>CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS ARENAS EN UNIDADES ϕ</p> <p>MEIA : M₅₀</p> <p>DESVIACION TÍPICA : D₅₀</p> <p>SECO : S₅₀</p> <p>SUBÍNDICES : ϕ : MAR PROFUNDO</p> <p>b : EN ROTURA</p> <p>g : EN LA BOCANNA DE LA PLAYA</p> <p>w : ESTRIAN</p> <p>s : SUBAREA</p>	<p>Se basa en el estudio de diversas playas de bolsillo españolas.</p> <p>Sirve para definir la forma entre dos diques exentos.</p>
Hardaway y Gunn (1991, 1999)	$M_b / G_b = 1/1.65$	 <p>RCP WAVE Input</p> <p>Annual</p> <p>Storm</p> <p>Resultant Wave Vectors H₀ at Site</p> <p>BW</p> <p>G_b</p> <p>M_b</p> <p>B_w</p> <p>Project Upland</p>	<p>Se supone que la bahía formada entre los diques exentos sigue la parábola de Hsu.</p> <p>Sirve para definir la forma entre dos diques exentos.</p>

TABLA 3. Resultados obtenidos para grupo de diques.

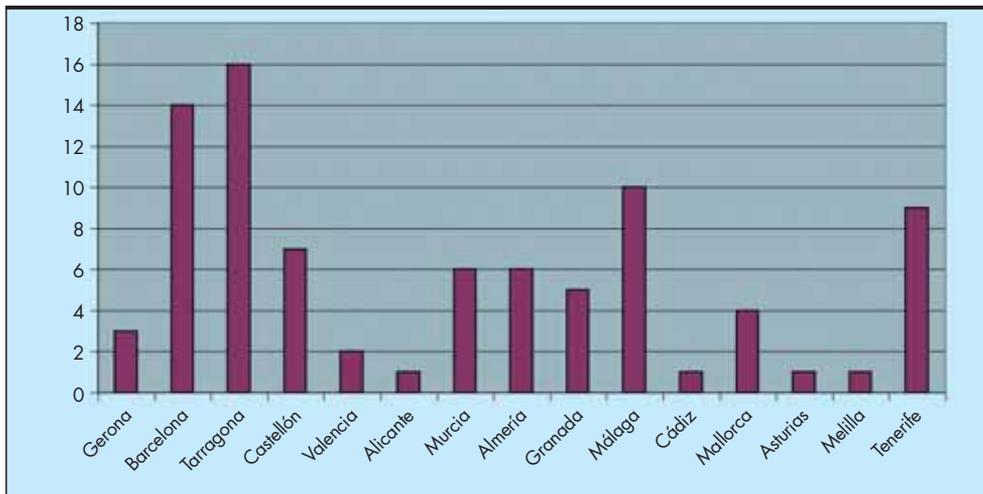


FIGURA 8. Distribución de los diques exentos en las costas españolas.

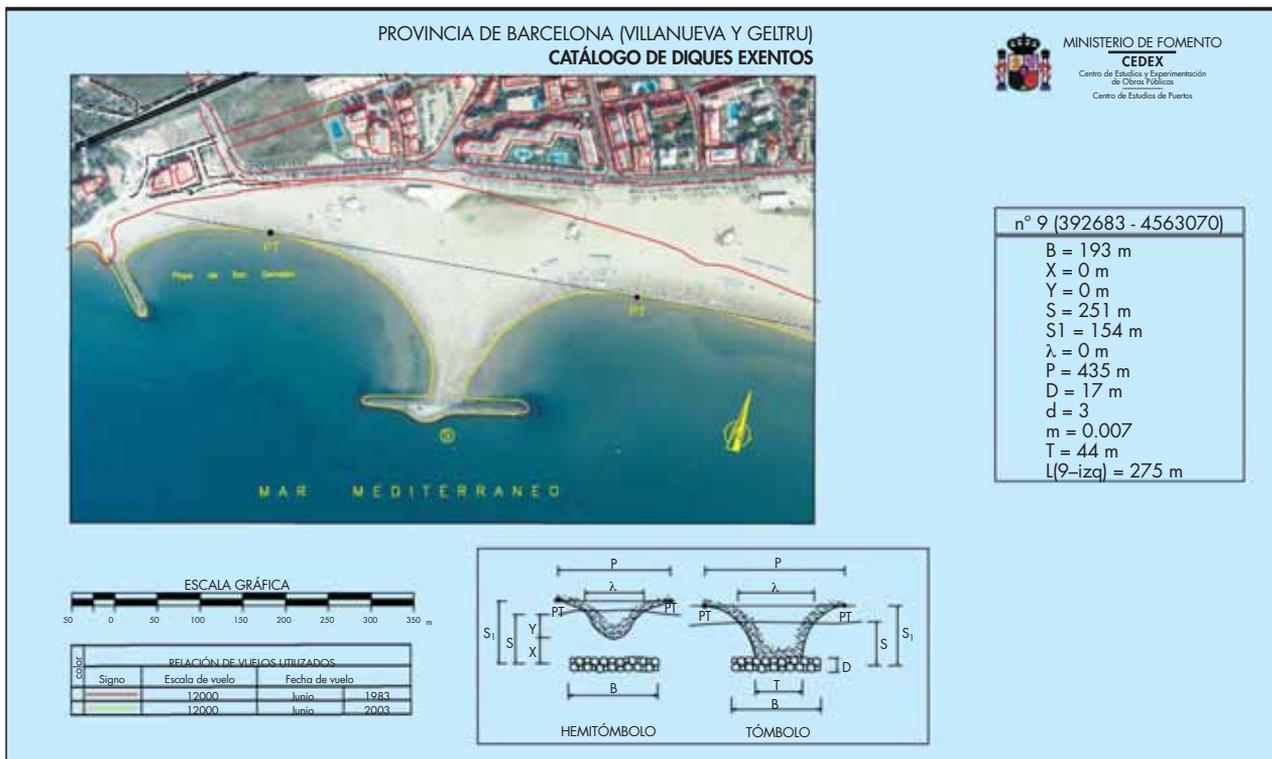


FIGURA 9. Ficha del catalogo de diques exentos correspondiente a Vilanova i La Geltrú.

rie de datos o parámetros, tanto para determinar su situación geográfica, como para conocer sus características físicas respecto al litoral en que se encuentra colocado y su influencia o no en el mismo. Presentando al final del inventario una tabla que contenía para cada dique exento veintiuna (21) columnas, correspondientes a cuatro grandes grupos de datos:

- Contador (columna 1).
- Determinan la situación geográfica (columnas 2 a 9).
- Determinación de las características físicas (columnas 10 a 19).
- Año desde que entró en funcionamiento y observaciones varias sobre la obra (20 y 21).

El número total de diques inventariados en todas las costas españolas fue de 86, que se distribuían por provincias de la forma que se muestran la figura 8 y la tabla 2.

El inventario se acompañó de unas fichas de cada uno de los diques donde se identificaba y calculaban los datos y parámetros identificadores del dique exento, habiéndose tomado la nomenclatura adoptada en los trabajos de Siverter y Hsu (1990, 1997).

6. TIPOS DE DIQUES EXENTOS

Los estudios que se han realizado hasta ahora sobre el comportamiento de los diques exentos, distinguían dos tipos básicos:

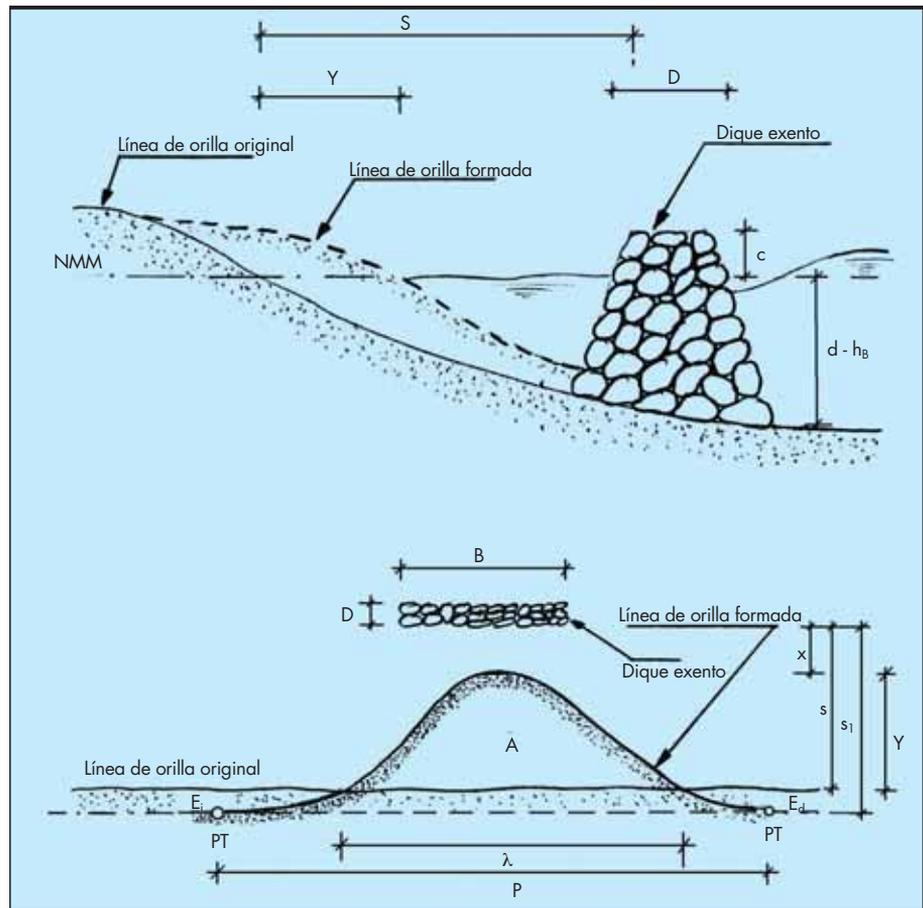


FIGURA 10. Tipo 1: Dique exento aislado.

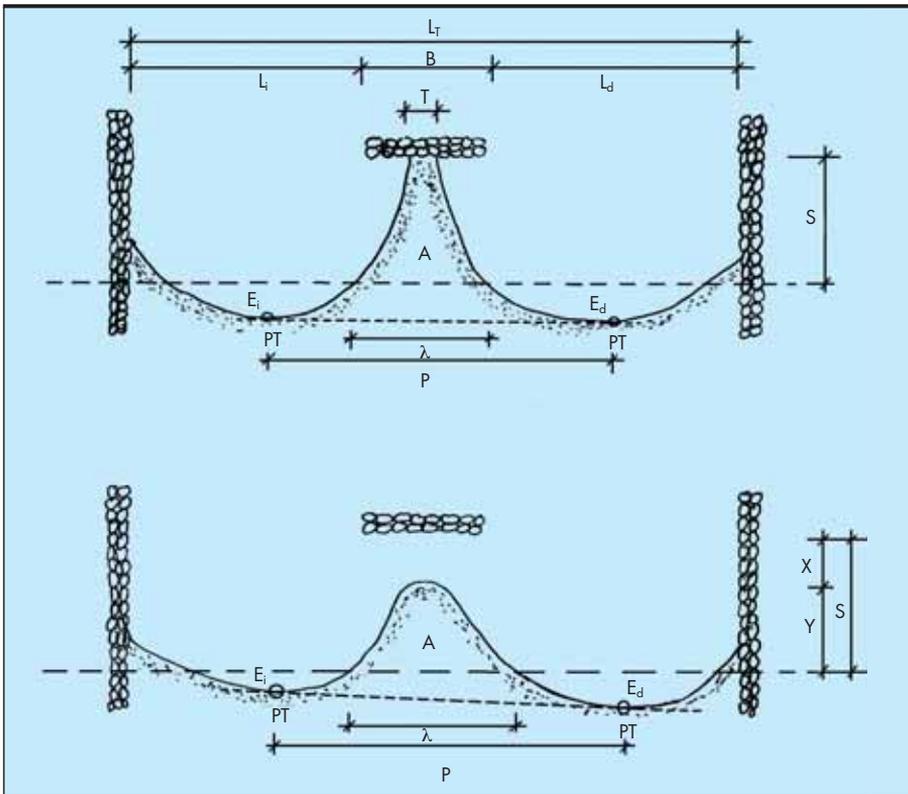


FIGURA 11. Tipo 2: Dique exento en costa cerrada.

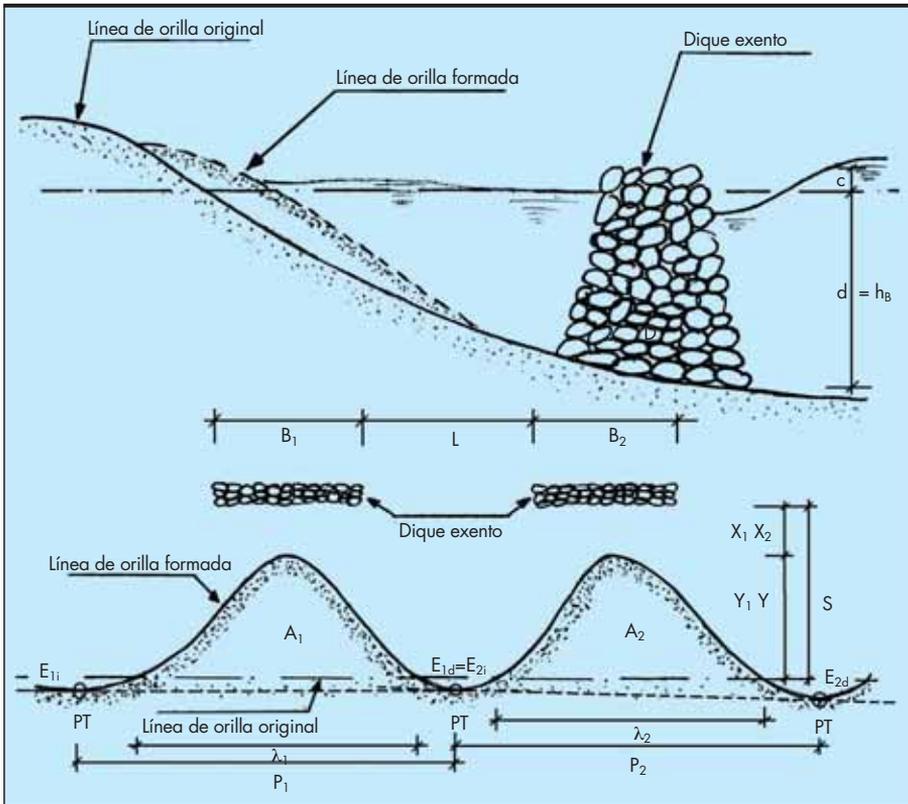


FIGURA 12. Tipo 3: Grupo de diques exentos.

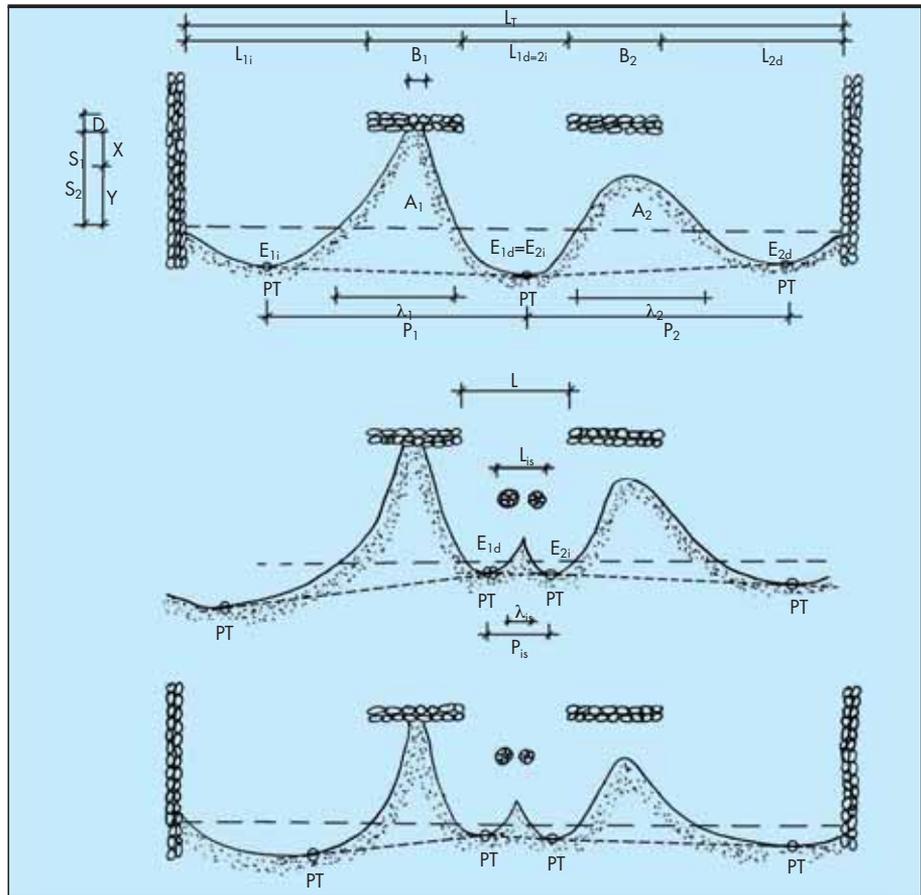


FIGURA 13. Tipo 4: Grupo de diques exentos con otras obras.

1. Dique exentos aislados.
2. Grupo de diques exentos.

Pero la realidad encontrada al inventariar los diques exentos existentes a lo largo de las costas españolas es muy distinta, especialmente por la combinación que hay entre este tipo de obras de defensa y con otros tipos como son los espigones. El análisis primero de todo este conjunto de obras exentas ha llevado a decidirse a clasificar el conjunto de obras que forman los dique exentos en cuatro grupos, eligiendo cada grupo por el comportamiento de conjunto esperable frente a los agentes marinos y los sedimentos que protege, siendo éstos:

- Tipo 1: Dique exento aislado.
- Tipo 2: Dique exento en costa cerrada.
- Tipo 3: Grupo de diques exentos.
- Tipo 4: Grupo de diques exentos con otras obras.

7. ADAPTACIÓN DE LAS TEORÍAS A LOS DIQUES EXENTOS INDIVIDUALES

La adaptación de las diversas teorías que intentan predecir el comportamiento de la costa ante la presencia de un dique exento se ha realizado para el total de 86 diques exentos inventariados en las costas españolas. Se presenta a continuación el resumen de los resultados obtenidos:

- a. Los criterios de Gurlay (1981), Berenguer y Enríquez (1987), Sunamura Mizuno (1987) y Ahrens y Cox (1990) no se adaptan al comportamiento observado en las costas españolas, por lo que no se recomienda su uso para el diseño y estudio de un dique exento.
- b. El criterio del CERC (1984) es aceptable solo parcialmente, en especial cuando no se quiere diseñar la formación de tómbolo.
- c. El criterio de Hsu y Silvester (1990) tiene un buen comportamiento, con porcentajes de cumplimiento altos, por lo que se adaptan aceptablemente a los diques de las costas españolas y resulta válido su uso para el diseño de este tipo de obras de defensa.
- d. El criterio de Mauricio González y Medina (1999) tiene un planteamiento y desarrollo que es válido para el diseño y comportamiento de diques exentos, siendo el criterio que mejor aborda la transición entre formaciones en tómbolo y hemitómbolo; pero las simplificaciones finales no se adaptan a lo observado en los diques exentos de las costas españolas. Por lo que este

criterio sería válido para el diseño de diques exentos en una primera aproximación.

- e. El criterio de Ming y Chiew (2000) se adapta en un gran porcentaje a lo observado en las costas españolas, por lo que este criterio resulta válido para el estudio y diseño de diques exentos en las costas españolas.
- f. El criterio de Bricio, Negro y Díez (2007), realizado en base a los diques exentos de Cataluña, no se analizó en los informes del CEDEX al publicarse posteriormente a la terminación de dichos estudios. Este criterio es prácticamente coincidente con el criterio de Hsu y Silvester (1990) y de Ming y Chiew (2000), por lo que, en principio, resulta válido su uso para el diseño de este tipo de obras de defensa.

8. ADAPTACIÓN DE LAS TEORÍAS A LOS GRUPOS DE DIQUES EXENTOS

La adaptación de las teorías que intentan predecir el comportamiento de los grupos de diques exentos y su adaptación a las costas españolas se ha efectuado para todos los grupos de diques exentos existentes en las costas españolas, los resultados se resumen en los siguientes puntos:

- g. Las teorías de Dean (1978), Pope y Dean (1986), Suh y Darlynple (1987) y Hardaway y Gunn (1991, 1999) no se adaptan al comportamiento de los grupos de diques exentos en las costas españolas analizados, por lo que no se recomienda su uso para el diseño de este tipo de defensa costera.
- h. El método propuesto por el Ministerio Japonés de la Construcción, no se ha podido analizar con la profundidad requerida, dado la gran cantidad de variables que demanda. En los casos que si se ha comparado no parece que se adapte demasiado bien. De todas formas, este método es para diseñar un grupo de diques exentos con unas características muy bien definidas y rígidas, por lo que no puede descartarse su utilización para el diseño de este tipo de obras, si bien debiera realizarse estudios más específicos para validar o invalidar este método para su aplicación a las costas españolas.
- i. Solamente se adapta con un grado de fiabilidad muy alto el método propuesto por Berenguer y Enríquez (1987), por lo que se recomienda su uso para el diseño de este tipo de obras de defensa. Es decir, $A_0 = 2 A_1$, que transformado a las variables usadas en este artículo, sería: $A_0 = 2 S_1$.

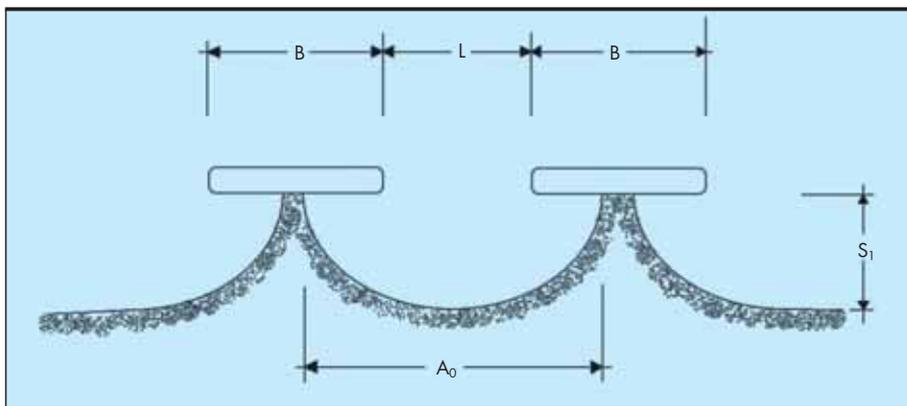


FIGURA 14. Variables de un grupo de diques exentos.

8. CONCLUSIONES

A la hora de diseñar un dique exento, se debe utilizar los criterios dados por Siverster y Shu (1990), Ming y Chiew (2000) y Bricio, Negro y Díez (2007). Si fuese un grupo de diques exentos, el diseño se debe realizar de tal forma que las bahías entre diques exentos sigan el criterio de Berenguer y Enríquez (1987), mientras que los extremos se comportarán como un dique aislado y como tales debe tratarse en su cálculo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahrens J.P. y J. Cox (1990). *Design and Performance of Reef Breakwaters*; Journal of Coastal Research (SI #7, pp. 61 a 75).

Berenguer Pérez, Ignacio y Javier Enríquez Fernández (1985). *Ensayo tridimensional de diques arrecife*; Centro de Estudios y Experimentación de Puertos y Costas "Ramón Iribarren" (informe técnico para la Dirección General de Puertos y Costas).

Berenguer Pérez, José María y Javier Enríquez Fernández (1987). *Parámetros de diseño de las playas de bolsillo*; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (n° 22-413-9-027, informe técnico para la Dirección General de Puertos y Costas).

Bricio, L., V. Negro y J.J. Díez (2007). *Parámetros geométricos de diques exentos en el litoral catalán*; Revista de Ingeniería Civil (n° 147, pp. 91 a 103).

Coastal Engineering Research Center (1984). *Shore Protection Manual*; Department of the Army, US Army Corps of Engineers.

Dean, Robert G. (1978). *Diffraction calculation of shoreline planforms*; Proceedings International Conference on Coastal Engineering (n° 115, pp.1903 a 1917).

Douglass, S.L. (1990) Estimating Runup on Beaches: A review of the state of the art.; Department of The Army- U.S. Army Corps of Engineers (Contract Report Cerc-90-3).

Enríquez Fernández, Javier (1984). *Ensayo bidimensional en modelo reducido de banquetta pie de perfil*; Centro de Estudios y Experimentación de Puertos y Costas "Ramón Iribarren".

González, M. y R. Medina (1999). *Equilibrium shoreline response behind on single offshore breakwater*; Proceedings Coastal Sediments'99 (vol. 2, pp. 844 a 859).

Gourlay, M.R. (1981). *Beach processes in the vicinity of offshore breakwaters*; Proceedings 5 Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering (pp. 129 a 134).

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (1999). *Documento Temático. Cota de Inundación: Atlas de inundación en el litoral peninsular español*; Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria.

Hallermeier, R.J.. "Uses for Calculated Limit Depth to Beach Erosion" (1978); Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering (págs. 1493 a 1512).

Hallermeier, R.J.. "Seaward Limit of Significant Sand Transport by Waves: An Annual Zonation for Seasonal Profiles" (1981); Coastal Engineering Research Center – U.S. Army Corps of Engineers (Coastal Engineering Technical Aid N° 81-2).

Hardaway, C. Scott y James R. Gunn (1991). *Headland breakwaters performance in Chesapeake bay*; Coastal Zone'91 (pp. 1267 a 1281).

Hsu, John R. y Richard Silvester (1990). *Accretion behind single offshore breakwater*; Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE (vol 116, n° 3, pp. 362 a 380).

Ming, D. y Y. M. Chiew (2000). *Shoreline changes behind detached breakwater*; Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE (vol. 126, n°2, pp.63 a 70).

Ministerio Japonés de Construcción (1986). *Handbook of offshore breakwater design*; Oficina de ríos del Ministerio de Construcción del Gobierno Japonés (en japonés, existe una traducción al inglés del CERC).

Peña Olivas, José Manuel (2007). *Guía técnica de estudios litorales. Manual de costas*; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (colección señor n° 39).

Peña Olivas, José M. y F. Javier Sánchez Palomar (2006). *Inventario y efectos morfológicos de los diques exentos en las costas españolas*; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (n° 22-404-5-116, informe técnico para la Dirección General de Costas).

Pope, J. y J. L. Dean (1986). *Development of design criteria for segmented breakwaters*; Proceedings, 20 International Conference on Coastal Engineering (pp. 1930 a 1947).

Sánchez Palomar, Francisco J. y José M. de la Peña Olivas (2005). *Inventario de espigones, diques exentos, longitudinales y encauzamiento*; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (n° 22-405-5-119, informe técnico para la Dirección General de Costas).

Silvester, Richard (1978). *Some facts and fancies about beach erosion*; Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering (pp. 1888 a 1902).

Silvester, Richard y John R. Hsu (1997). *Coastal Stabilization*; World Scientific, Advanced Series on Ocean Engineering (vol. 14).

Suh, K y Dalrymple R.A. (1987). *Offshore breakwaters in laboratory and field*; Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE (Vol. 113, pp. 105 a 121).

Sunamura, T. y O. Mizuno (1987). *A Study on Depositional Shoreline Forms Behind an Island*; Annual Report of the Institute of Geoscience, Universidad de Tsukuba (n° 13, pp. 250 a 254).

US Army Corps of Engineers (2001). *Coastal Engineering Manual. Part V: Coastal Project, Planning and Design*; Department of the Army (EM 1110-2-1100).