

Forma en planta de una bahía cerrada en equilibrio. Aplicación a la ensenada de Cariño (La Coruña)

FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ PALOMAR (*); JOSÉ MANUEL DE LA PEÑA OLIVAS (**)

RESUMEN La forma que adquiere la línea de costa de una bahía cerrada por sus dos extremos ha sido estudiada desde 1955 por diversos autores, especialmente por R. Silvester, y aún hoy en día aparecen nuevos trabajos sobre el tema. En este artículo, se muestra primeramente el conocimiento general del tema, para posteriormente definir físicamente el problema y la aplicación práctica a la bahía de Cariño en las costas gallegas.

SHAPE OF CLOSED BAYS IN STATIC EQUILIBRIUM. CASE OF CARIÑO BAY (LA CORUÑA-SPAIN)

ABSTRACT The shape of the bay shoreline when it is closed by both outside has been studied from 1955 by many investigators, especially R. Silvester, and also now new works are edited about it. In this article, it is shown, firstly, the state of the art, afterward the physical problem is described, and finally the practical application in the Cariño Bay is presented.

Palabra clave: Bahía cerrada en equilibrio.

1. INTRODUCCIÓN

No ha habido muchos autores en España que se hayan dedicado a publicar trabajos que estudien la forma en planta que adquiere la costa en el supuesto que ésta esté cerrada por sus dos extremos y no permita un transporte sólido litoral a través de ellos.

En este artículo se pretende resumir la experiencia de largo tiempo utilizando las diversas teorías que dan solución y explican la forma que adquiere la costa en respuesta al clima marítimo reinante y para determinadas condiciones morfodinámicas, siendo de especial interés los trabajos realizados por Richard Silvester.

En primer lugar se determinará y delimitarán los conceptos básicos e hipótesis de partida del problema. Seguidamente se dará un repaso a la evolución en el conocimiento

del tema hasta hoy en día. El tercer paso seguido es estudiar que acciones y agentes físicos son los que gobiernan la modelación en planta de una bahía cerrada en equilibrio.

Tras el estudio teórico de la forma en planta de una bahía cerrada en equilibrio, se expondrá un ejemplo práctico de aplicación de dicho método utilizado en uno de los últimos trabajos llevados a cabo en el Sector de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX para el estudio de la evolución a que se ha visto sometida la bahía de Cariño en La Coruña.

2. CONCEPTOS E HIPÓTESIS DE PARTIDA

El primer punto a tener en cuenta es el concepto de bahía abierta y de bahía cerrada. Se entiende por bahía aquella forma morfológica de la costa constituida por un entrante del mar en la tierra; cuando por un extremo o por ambos existe una continuidad en el transporte sólido litoral, se dice que la bahía es abierta; mientras que cuando ese entrante se encuentra aislado del resto de la costa a ambos lados, no siendo compatible un transporte sólido litoral en dichos extremos, se dice que la bahía es cerrada.

Si se supone una costa abierta con un transporte sólido litoral (Q) a lo largo de ella, y se independiza un tramo de ella, en una longitud determinada b , de tal forma que en el

(*) Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Jefe de Sección de la División de Estudios Litorales del Sector de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, Ministerio de Fomento.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de la División de Estudios Litorales del Sector de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, Ministerio de Fomento.

recinto creado no puede entrar ni salir material alguno, figura 1, esto es no exista transporte sólido litoral en los extremos, la línea de orilla del área aislada irá transformándose para adaptarse a los nuevos condicionantes físicos, de tal manera que sea compatible el clima marítimo y la respuesta de la costa. Finalmente la línea de costa tomará una forma tal que el transporte sólido litoral medio dentro del recinto o bahía sea nulo ($Q = 0$), habiendo alcanzado entonces la bahía cerrada el equilibrio.

Como se sabe, dicho equilibrio puede ser estático o dinámico. Entendiéndose por equilibrio estático cuando la forma y posición adquirida por la línea de costa no varía a lo largo del tiempo. En contraposición con el concepto de equilibrio dinámico, esto es, cuando la forma y posición del tramo de costa no es único sino que puede tener diferentes posiciones de equilibrio estático dependiendo del clima marítimo reinante, existiendo entre dos posiciones un transporte Q distinto de cero que facilita la transformación de un estado a otro.

En el supuesto de una bahía abierta, existe por ambos o alguno de los extremos un transporte sólido litoral, y por tanto el equilibrio que puede adquirir la bahía tiene que ser compatible con un transporte sólido litoral a lo largo de su costa.

3. CONOCIMIENTO GENERAL DEL TEMA

Los primeros estudios realizados para explicar la forma curva que adquieren las bahías cerradas fueron publicadas en 1955 por Jennings (1), intentó determinar el fenómeno mediante el dibujo de multitud de normales a la curva que formaba la bahía con el objetivo de encontrar el foco de dicha curva. Más tarde, en 1958, Davies (2) publica unos trabajos en los que introduce la idea de refracción de la ola como la causante de la curvatura de las bahías. Por estas mismas fechas, sendos trabajos de Gresswell (3) y Hoyle & King (4) se ocupan del origen y estabilidad de las bahías achacando, exclusivamente, de su modelización al oleaje.

Es entre 1960 y 1963 cuando Richard Sivester (5 y 6), en base a los trabajos anteriormente mencionados, construye un modelo reducido de fondo móvil que reproducía dos playas rectas continuas y encajadas entre espigones, formando la línea de costa un ángulo de 45° con el generador de oleaje. El observó que la línea de costa tendía a formar sendas bahías que alcanzaban el equilibrio cuando la corriente longitudinal a lo largo de la playa cesaba y el oleaje rompía a la vez en todos los puntos. El ensayo se hizo con oleaje regular.

En 1965, Yasso (7) fue el primero que en base a los trabajos anteriores y suyos propios encontró que la forma en

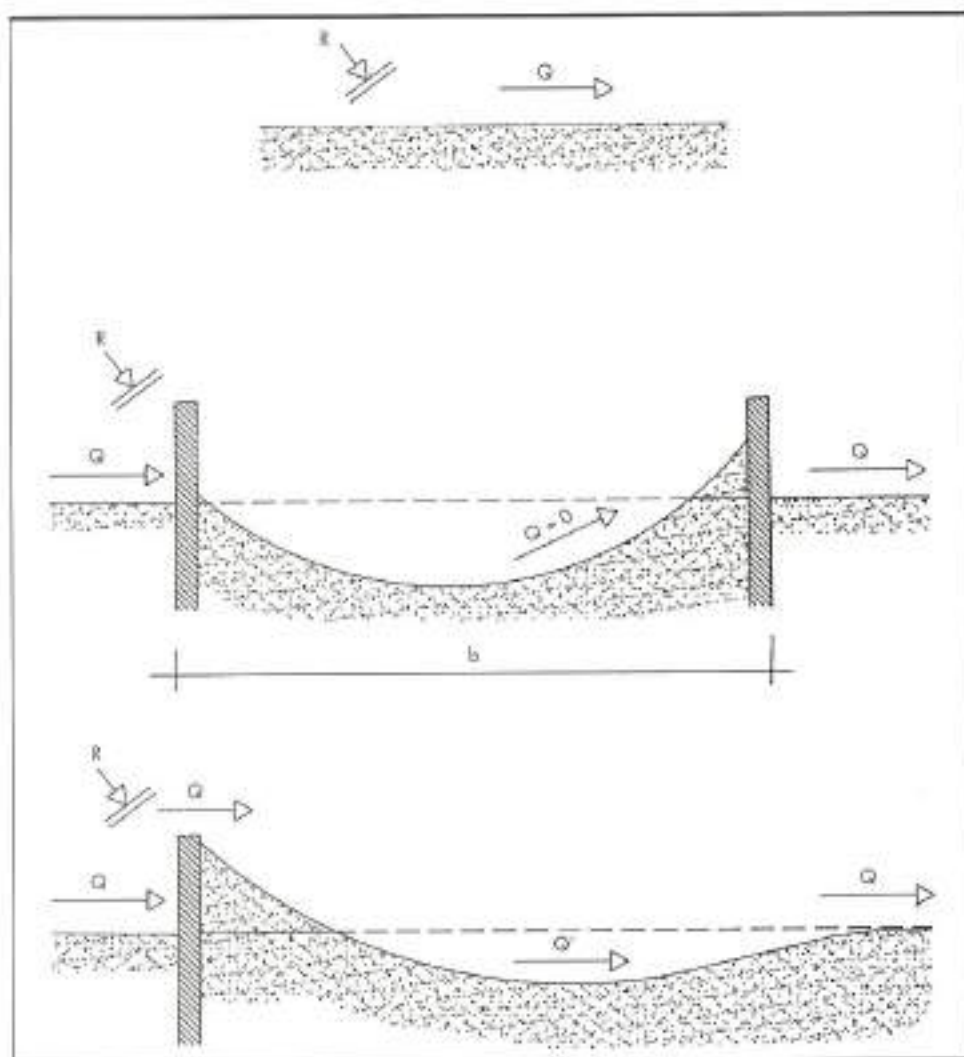


FIGURA 1. Esquema de una costa abierta, bahía cerrada y bahía abierta.

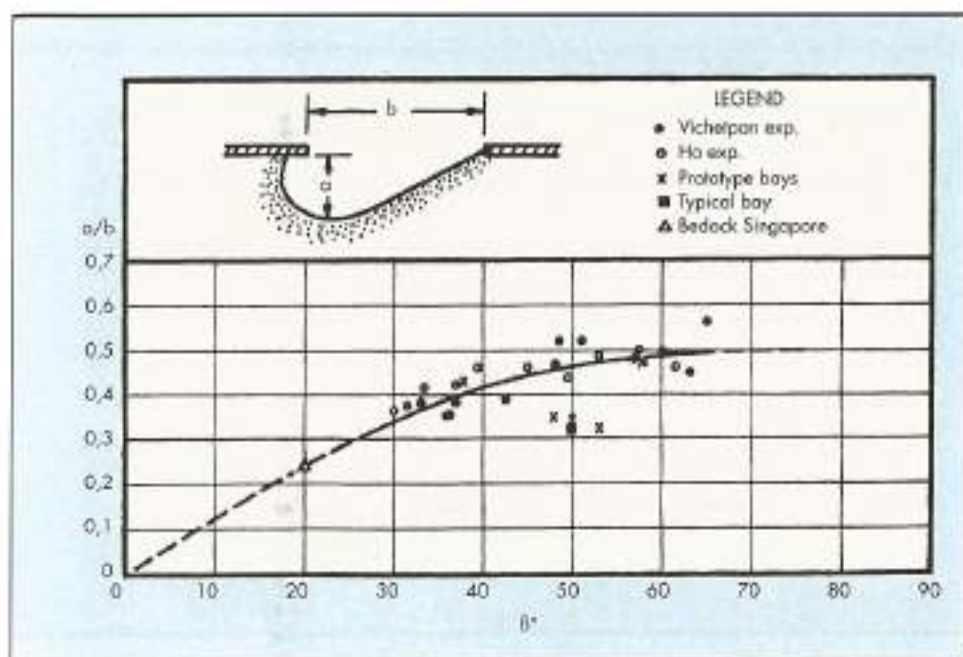


FIGURA 2. Gráfico de Silvester (1972) que relaciona el ángulo β de abordaje del oleaje y la relación a/b de las dimensiones de la bahía.

planta que adquiría una bahía cerrada cuando alcanzaba el equilibrio venía representada por una espiral logarítmica de ecuación:

$$\frac{R_2}{R_1} = e^{(\cot \alpha) \theta}$$

Yasso determinó el valor de α para tres bahías y localizó el origen de la espiral, si bien no supo explicar el motivo por el cual variaba el valor de α .

En 1970, Richard Silvester publicó (8) los resultados de sus trabajos en el Instituto de Tecnología Asiático de Bangkok, continuación de los emprendidos en 1960.

En el nuevo modelo reducido, ensayó tres direcciones de oleaje respecto a la bahía, 30° , 45° y 60° , utilizando oleaje regular con tres diferentes periodos, 0'6, 1 y 1'4 segundos, con una duración por ensayo de 30 minutos. Las pendientes de la playa reproducidas fueron de 1:2 y 1:4, siendo el tiempo de reacción en la modelización de la playa menor.

El resultado de los ensayos mostró que la forma de la costa se aproximaba a la espiral de Yasso en la zona de influencia de la difracción y a una recta enfrentada al oleaje donde no existía dicha influencia. Finalmente, como conclusión de estos trabajos, comenzó a esbozar dos gráficos que relacionaban: R_1/R_2 y α ; y α y β , siendo β el ángulo que forma el oleaje con la cuerda de la bahía.

LeBlond (9) presentó en el ICCE'72 un estudio de formación de playas en espiral basado en los anteriores trabajos de Silvester y Yasso, intentando demostrar matemáticamente la formación de bahías en forma de espiral, aplicándolo a modelos matemáticos.

En el mismo ICCE'72 Silvester (10) presentó los resultados de los ensayos antes mencionados de 1970, mejorando considerablemente sus conclusiones y que relacionan: α y β ; y a/b y β , figura 2, que serán la base práctica del método de Silvester para el estudio de las bahías cerradas en equilibrio. En este trabajo incluyó un estudio de propagación por el método gráfico de las ortogonales en la bahía ensayada.

En 1974 Silvester (11) publicó su famoso tratado de ingeniería de costas en el que en su capítulo 2 incluyó todos los estudios realizados hasta ese momento del equilibrio de bahías, no añadiendo nada significativamente nuevo respecto a publicaciones anteriores.

En 1976, Silvester (12) presentó una ponencia al ICCE'76 sobre el mismo tema. En ella va depurando el aspecto y explicación física del problema, y utiliza puntos fijos artificiales en la costa para prevenir la defensa de la misma.

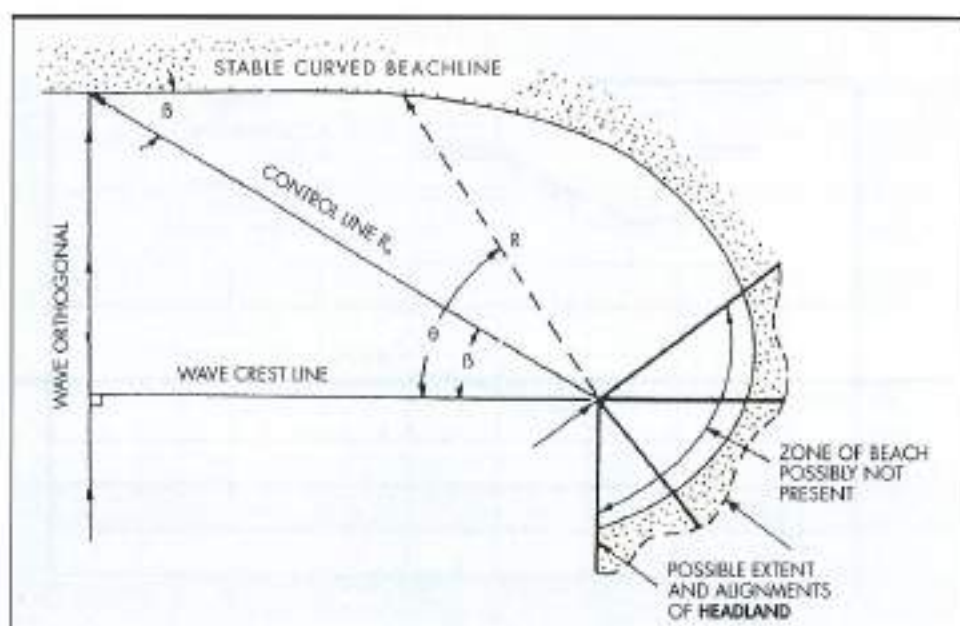
Aunque no relacionado directamente, en 1980 Ozasa y Brampton (13) sacan a la luz pública su conocida fórmula del transporte sólido litoral que introduce dos componentes; la ya conocida por la incidencia oblicua del oleaje en la costa, y otra componente debida al gradiente de sobreelevación que se produce en el frente de ola cuando éste se encuentra afectado por el fenómeno de difracción. Con esta nueva formulación del transporte sólido litoral que recoge el efecto que produce la difracción puede estudiarse matemáticamente las causas modelizadoras del las bahías.

En 1984 Nicholas C. Kraus, Hans Hanson y Soichi Harikaei (14) presentaron una ponencia al ICCE'84 en la que analizaron los cambios que se produjeron en una playa debido al efecto de la ampliación de las obras exteriores de un puerto, aplicando la fórmula del cálculo del transporte sólido litoral de Ozasa-Brampton para conocer la forma en planta de la playa.

En 1989 John R. C. Hsu, Richard Silvester y Yi-Min Xia (15) definen un nuevo concepto de equilibrio estático de una bahía, sustituyendo la espiral logarítmica utilizada hasta entonces por una forma parabólica que se adapta mejor a la línea de costa rectilínea situada aguas abajo y que es normal al oleaje dominante. Toma como polo el punto donde comienza la difracción y como límite exterior de la parábola aquel que tiene un radio R_0 que llaman línea de control, figura 3.

Presentan dos métodos para determinar el equilibrio estático de una bahía. En el primero, la curvatura de la línea de orilla se obtiene mediante dos gráficas que relacionan:

FIGURA 3. Definición parabólica de la línea de costa de una bahía en equilibrio, según Hsu & Evans (1989).



R/R_0 con $\beta^{0.83}/\theta^{0.77}$; y a/R_0 con β . Y en el segundo, se relaciona la profundidad de bahía, a , y la línea de control con β mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{a}{R_0} = 0.014\beta - 0.00009\beta^2$$

que permite conocer la estabilidad de una bahía.

También en el año 1989, John R. C. Hsu y C. Evans (16) publican un artículo en el cual desarrollan el criterio por el cual la forma que adquiere una bahía en equilibrio es una parábola de segundo grado, figura 3, cuya ecuación es:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \frac{b}{\theta} + C_2 \left(\frac{b}{\theta} \right)^2$$

y donde los tres coeficientes C_0 , C_1 y C_2 se obtienen mediante gráficas.

En 1993 John R. C. Hsu, Takashi Uda y Richard Silvester (17) presentaron en el Coastal Engineering, 19, una ponencia en la que resumen el conocimiento existente de la forma en planta que adquieren las bahías en equilibrio, utilizando para ello la ecuación de la parábola de segundo grado comentada anteriormente. En dicha ponencia definen la formas de playa que se generan, tanto tras la realización de diques exentos, como tras la construcción de puertos en bahías en equilibrio estático o dinámico. También se presentan algunos casos prácticos de bahías generadas por la construcción o ampliación de puertos en Japón.

En 1994 Soon-Keat Tan y Yee-Meng Chiew (18) partiendo de los trabajos de Hsu y Evans de 1989 y de la expresión parabólica que definieron para bahías en equilibrio estático, consideran la tangente de la bahía en el punto de control de aguas abajo, es decir donde $R = R_0$ y $\theta = \beta$, y obtienen la siguiente expresión:

$$\frac{R}{R_0} = [1 - \beta \cot(\beta) + \alpha] + [\beta \cot(\beta)] - 2\alpha \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + \alpha \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2$$

que sólo tiene un coeficiente desconocido, α , en lugar de los tres anteriores. Pudiéndose obtener α en función de β me-

dante una gráfica obtenida a partir de ensayos en modelo y de comparación indirecta con otros datos publicados.

4. DEFINICIÓN FÍSICA DEL EQUILIBRIO DE UNA BAHÍA CERRADA

Como se sabe, la dirección predominante de oleaje que alcanza una bahía cerrada es el causante principal de su modelación final en equilibrio. Hay que tener en cuenta que el estado final se alcanza tras la actuación del oleaje predominante durante un tiempo, que depende de la acción y reacción de las variables en juego.

Cuando los frentes de onda llegan a tocar el primero de los puntos del extremo de la bahía, polo, estos se difractan expandiéndose lateralmente dentro del recinto, recibiendo su energía por el extremo de cada frente de onda, denominándose comúnmente como zona de alimentación al área que transmite lateralmente energía, figura 4. El resto del frente alcanza la costa sin disminuir lateralmente su energía ni, por tanto, difractarse.

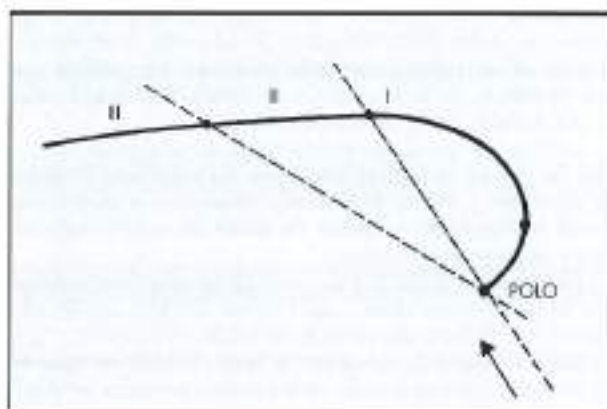


FIGURA 4. Diferentes zonas en que se divide una bahía cerrada según su comportamiento frente al oleaje.

Según la breve descripción de la propagación del oleaje dentro de una bahía, esta pudiera dividirse, dependiendo de los fenómenos ondulatorios que se producen, en tres áreas:

Área I: Zona de expansión lateral del oleaje, propagándose por difracción a partir del polo de la bahía.

Área II: Zona de alimentación del oleaje, donde la propagación se produce tanto por fenómenos de refracción como de difracción.

Área III: Zona donde el oleaje se propaga sometida únicamente al fenómeno de refracción.

El límite de separación entre las áreas I, zona de expansión lateral, y II, zona de alimentación, se encuentra definido por la ortogonal del frente de onda que toca el polo de la bahía.

El límite de separación entre las áreas II y III depende principalmente del flujo de energía y del ángulo relativo de abordaje del oleaje respecto a la bahía.

Cuando la bahía se encuentra en equilibrio en todo punto de la misma el transporte sólido litoral neto tiene que ser nulo.

En el área I, debido a la propia naturaleza del efecto de difracción existe un gradiente de sobreelevación en la altura de ola que origina un transporte sólido litoral dirigido hacia el polo de la bahía que es compensado por un transporte sólido litoral igual y de sentido contrario debido a la rotura oblicua del oleaje, figura 5.

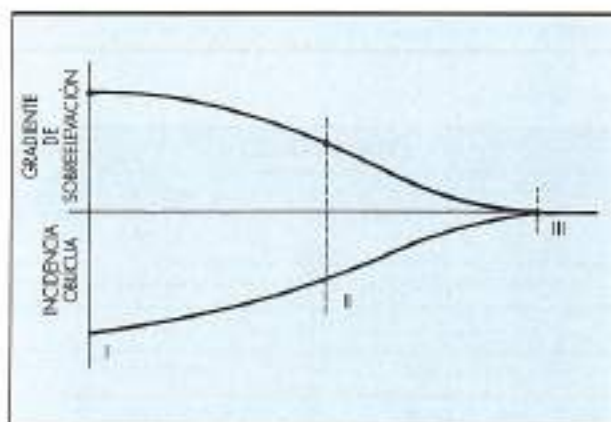


FIGURA 5. Variación del transporte sólido litoral dentro de una bahía cerrada debido a la incidencia oblicua del oleaje y al gradiente de sobreelevación.

Con las condiciones indicadas anteriormente, el transporte sólido litoral puede calcularse teóricamente por diversas fórmulas, siendo la más comúnmente empleada la debida a Ozasa y Bampton (13):

$$Q = \frac{(E \cdot C_g)_h}{\gamma_s} \cdot (K_1 \cdot \sin 2\alpha_0 - K_2 \cdot \frac{\partial H_s}{\partial X} \cdot \cot \beta \cdot \cos \alpha_s)$$

Donde:

E = densidad de energía del oleaje ($1/8 \rho g H^2$)

H = altura de ola

ρ = densidad del agua

C_g = velocidad de grupo de ondas

α = ángulo de incidencia del oleaje sobre la costa

β = pendiente de la playa

γ_s = peso específico del material de la playa

$K_1 = 0.385$ (ó 0.18 para modelos reducidos)

$K_2 = 1.247$ (ó 0.583 para modelos reducidos)

El primer término de la fórmula anterior es la conocida fórmula para el cálculo del transporte sólido litoral por incidencia oblicua del oleaje de la *Scripps Institution* creada por Komar e Inman (19) y el segundo término es debido a los propios autores y obedece al transporte sólido litoral que se produce al existir un gradiente de sobreelevación de la altura de ola a lo largo de la playa debido, en este caso, a la difracción.

En las áreas I y II existe transporte sólido litoral tanto debido a la incidencia oblicua como al gradiente de sobreelevación del oleaje por lo que los dos términos de la ecuación anterior son válidos.

En el área I, como se aprecia en la figura 5, el gradiente de sobreelevación puede considerarse cuasi-constante. No siendo así en el área II, zona que pudiera denominarse de transición, donde el gradiente de sobreelevación varía de un valor en el borde con el área I igual a éste y cero en el borde con el área III.

En el área III el efecto de la difracción del oleaje es nulo, por lo que el segundo término de la fórmula de Ozasa y Bampton es cero y, por tanto, la fórmula de cálculo del transporte sólido litoral coincide con la de Komar e Inman.

Según Horikawa (20), de resultados obtenidos en laboratorio y en campo, la relación K_1/K_2 debe estar comprendida en el intervalo de 0.25 a 0.75.

5. METODOLOGÍA BÁSICA PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA

El primer paso a seguir para la aplicación práctica de los modelos anteriormente reseñados es la verificación de las hipótesis y requisitos que definen una bahía cerrada.

Como se ha visto anteriormente, para poder considerar que una bahía es cerrada debe cumplir dos requisitos básicos:

- El transporte sólido litoral neto dentro de la bahía debe ser nulo.
- No puede existir transporte sólido litoral a través de los extremos de la bahía.

Estos dos requisitos obliga a la bahía a una cierta independencia respecto del resto de la costa adyacente.

Una vez verificada la hipótesis de bahía cerrada deben determinarse los parámetros y variables que la definen y caracterizan.

El primero de los puntos singulares de una bahía cerrada es el polo de difracción de la misma, que será uno de los condicionantes básicos en la forma que adquiere su línea de costa. El polo se determina como aquel saliente costero, natural o artificial, en el cual los frentes de ola de los oleajes predominantes tocan primero, provocando una difracción a partir de este punto.

El segundo de los condicionantes básicos es la longitud de la bahía que es la distancia existente entre el polo y extremo opuesto de la bahía. Hay que tener en cuenta que muchas bahías que se pueden encontrar en la naturaleza no "están completas" al alcanzar su zona de influencia puntos rígidos,

como acantilados o roquedales no moldeables por el oleaje, no permitiendo la determinación exacta del extremo opuesto que define la longitud de bahía.

La tercera de las variables a tener en cuenta es la dirección predominante del oleaje que definirá en ángulo de abordaje del mismo respecto a la cuerda de la bahía.

Una vez determinadas las variables anteriores se aplicará el modelo que defina más adecuadamente la forma en planta de la bahía en equilibrio.

Conocidas las variables de la bahía y calibrado su estado de equilibrio, el modelo se encuentra listo para permitir el conocimiento de la evolución futura de la línea de costa una vez introducidos nuevas variables que condicionen su variación y estado final de equilibrio.

6. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LA BAHÍA DE CARIÑO

La evolución de la playa de Cariño se estudió en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX como parte de un trabajo (21), en el se abordó la posibilidad de eliminar el espigón existente en la actualidad y la definición de la nueva forma en planta que se alcanzaría en ese supuesto.

La ensenada de Cariño o Santa Marta se abre entre la punta de Aguillones, en el cabo Ortegal, y la punta de Estaca de Bares, extremo septentrional de la península Ibérica.

La margen occidental de la ensenada tiene dirección norte-sur, y ofrece como accidente más importante la rada de Cariño, donde se ubican el puerto y playa de Cariño. Su margen oriental tiene dirección noreste y es bastante rectilínea, en ella existen las pequeñas ensenadas de San Antonio, Espasante y Esteiro.

La playa de Cariño era una rada con forma de espiral, apoyada originalmente en la punta de Castro, con curvatura decreciente hacia el sur. La construcción del puerto pesquero de Cariño, sus ampliaciones sucesivas y la construcción de un espigón en medio de la playa son los que definen su forma en planta actual, figura 6.

Entre el puerto y el espigón se extiende la playa norte de 650 metros de longitud, siendo la zona de mayor curvatura la apoyada en el puerto con una pendiente del 4 % y una anchura máxima de playa seca. Al avanzar hacia el sur la pendiente aumenta hasta situarse en el 17 % en las proximidades del espigón, con anchura de playa mínima.

La playa sur se encuentra encajada entre el espigón y los acantilados meridionales de la ensenada, su longitud es de 500 metros, encontrándose su línea de orilla avanzada 90 metros respecto de la playa norte. La anchura y pendiente, 8 %, de la playa es prácticamente uniforme a lo largo de ella.

Dada la configuración de la costa de Cariño los únicos oleajes que pueden alcanzar la ensenada son los provenientes del primer cuadrante, siendo la dirección principal de oleaje el este-norte tanto para el SEA como para el SWELL.

Los oleajes que alcanzan la ensenada de Cariño al penetrar en la misma sufren una reducción significativa en su altura de ola, siendo prácticamente nula su agitación en la playa norte.

Las diversas formas en planta de la playa de Cariño se han estudiado a partir de fotografías aéreas de proyección estereoscópicas y del levantamiento topográfico realizado por el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX en febrero de 1995.



FIGURA 6. Batimetría general de la playa de Cariño en febrero de 1995.

FOTOGRAFÍAS AÉREAS	
FECHA	ESCALA
13 - 10 - 1956	1:33.000
1 - 12 - 1975	1:10.000
1 - 11 - 1978	1:18.000
12 - 9 - 1984	1:30.000
15 - 9 - 1990	1:5.000

Estas fotografías están tomadas en diferentes estados de marea, por tanto lo que se ha estudiado es la variación de la forma en planta de la playa de Cariño, al irse prolongando a lo largo del tiempo el dique exterior del puerto.

Todas las fotografías aéreas se han integrado en un sistema de información geográfica mediante Arc/Info, resultando de este proceso unos planos a escala 1:10.000 de la playa y puerto de Cariño, a partir de los cuales se ha estudiado la evolución en planta de la playa, figura 7.

En 1956 la longitud del dique exterior era de 150 metros, no existiendo ninguna obra exterior en la playa. En esta época la playa se ajustaba perfectamente a una espiral logarítmica con polo 1 en el morro del dique y ángulo $\alpha = 69^{\circ}29'$. La parte interior de la playa se ajustaba a otra espiral de polo 2 el morro del contradique interior y ángulo $\alpha = 57^{\circ}5'$ que se unía perfectamente a la anterior.

En el año 1975 el dique exterior del puerto se amplió 240 metros creándose un gran muelle entre el dique y contradique.

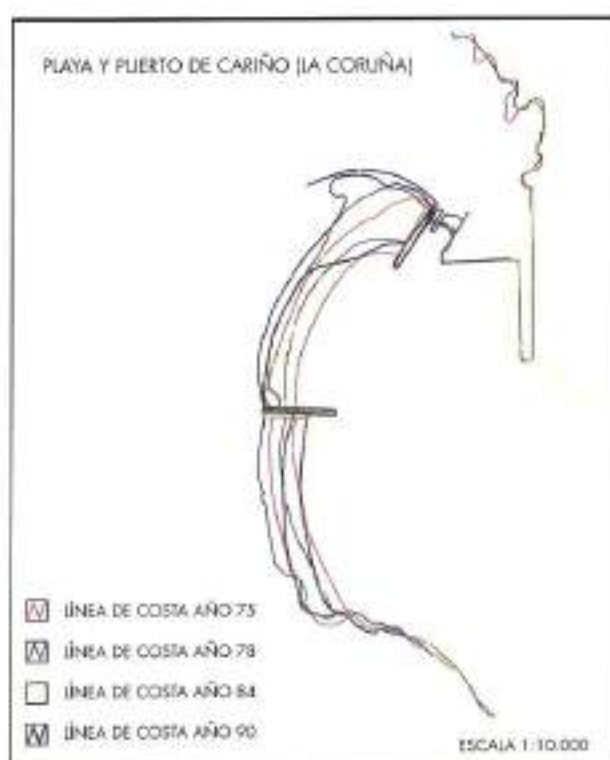


FIGURA 7. Variación de la línea de costa de la bahía de Cariño a lo largo del tiempo.

que. En medio de la playa se construyó el espigón, de 100 metros de longitud, que divide en dos la playa. Con estas nuevas obras, el polo principal de la bahía pasó al morro de la ampliación del dique exterior (polo 1), siendo la espiral

que mejor se ajustaba a la playa la que tenía un ángulo de $\alpha = 73'84''$ si bien, como es lógico, no se ha tenido en cuenta el efecto local que produce el espigón. En el interior de la bahía la forma de la línea de orilla se adapta a una espiral logarítmica de polo el extremo del nuevo contradique del puerto (polo 2) y de ángulo $\alpha = 44'67''$.

En el periodo comprendido entre 1975 y 1978 se amplió 80 metros el espigón central de la playa. En este último año la forma en planta de la playa se adaptaba a una espiral logarítmica con el mismo polo (polo 1) que en 1975 y ángulo $\alpha = 75'78''$. La parte más interna de la playa se adapta a una espiral logarítmica con el mismo polo 2 que en la fecha anterior y ángulo $\alpha = 62'27''$, si bien en esta zona el ajuste de la espiral es peor.

Vistas las posiciones de la playa de Cariño en 1975 y 1978, se puede observar que el espigón normal a la playa, independientemente de su longitud, solo tiene un efecto local sobre ella, existiendo la misma anchura de playa a ambos lados de la misma.

El puerto de Cariño se amplió nuevamente en 1984, consistiendo en una nueva alineación, a continuación de la primitiva, del dique exterior de 230 metros de longitud, que gira 46 hacia el exterior respecto de la primera alineación. Con estas nuevas condiciones la forma de la bahía de Cariño varió de nuevo, situándose el nuevo polo (polo 1) en el morro del nuevo dique exterior y el ángulo de la espiral logarítmica en $\alpha = 75'80''$. El ajuste de esta espiral es muy bueno en la playa sur de Cariño, que se ha mantenido en buen estado gracias al espigón. La playa norte, debido a la gran difracción producida en el polo 1 se erosionó, dirigiéndose la arena hacia el puerto. En esta zona no es posible ajustar una espiral logarítmica, ya que al no existir oleaje significativo el equilibrio y modelación de la playa tardará mucho en alcanzarse.

Hasta 1990, las condiciones externas del puerto no habían variado respecto de la posición anterior de 1984, permaneciendo, básicamente, hasta hoy en día, salvo la cons-

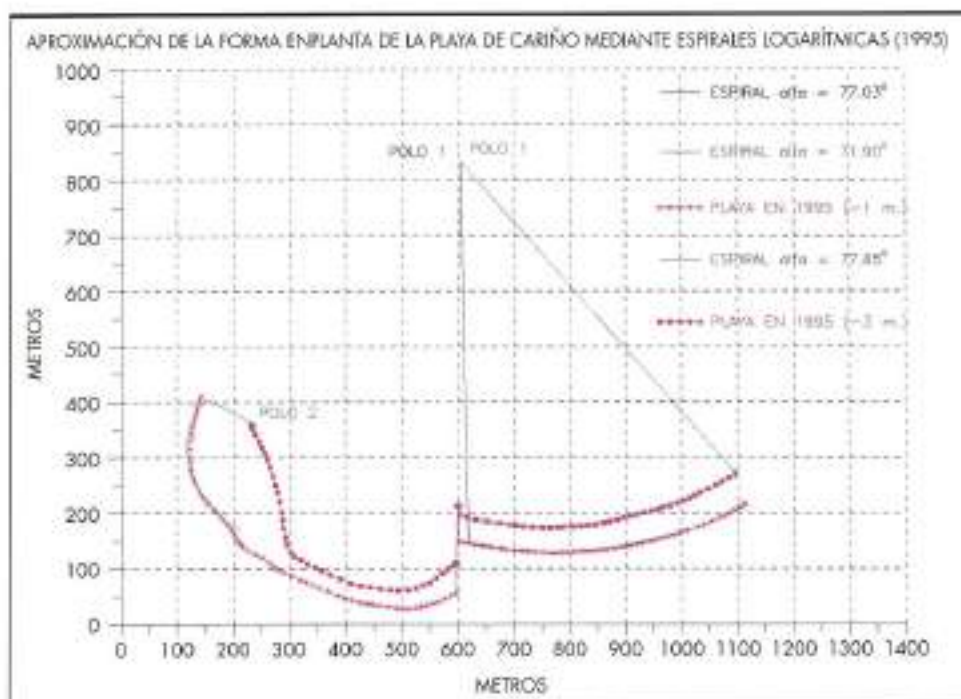


FIGURA 8. Aplicación del modelo a la línea de orilla de 1995 de la bahía de Cariño.

trucción de un muelle-cargadero de mineral que comenzó a construirse en 1990. El polo de la espiral (polo 1) es en mismo que el considerado en 1984, siendo el ángulo de la espiral logarítmica que mejor se ajusta de $\alpha = 78^\circ$. La playa norte de Cariño no se puede aproximar a una espiral logarítmica por las mismas causas apuntadas para 1984.

La situación actual de la bahía de Cariño se ha definido mediante una campaña topográfica realizada por técnicos del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX en febrero de 1995, figura 6.

Para aproximar la forma en planta de la bahía de Cariño en 1995 se consideraron dos líneas batimétricas, -1 y -3 metros. El polo 1 se sitúa en el mismo lugar que en las dos posiciones anteriores señaladas, para ambas líneas batimétricas, siendo la espiral logarítmica que mejor se adapta la de ángulo $\alpha = 7703^\circ$ metros para la línea -1 y $\alpha = 7785^\circ$ para la -3 metros. Esto es, la playa sur se ajusta perfectamente a una espiral logarítmica media de $\alpha = 775^\circ$, figura 8. En contraposición, la playa norte no puede aproximarse a una espiral logarítmica, salvo un pequeño tramo de la línea batimétrica -1 metro, ya que la parte interna de la ensenada de Cariño tiene muy poco oleaje y tardará mucho tiempo en que se alcance el equilibrio.

7. SOLUCIONES RECOMENDADAS PARA LA BAHÍA DE CARIÑO

En consecuencia de las afirmaciones vertidas en el punto anterior, así como del estudio global realizado, se llegó a la conclusión que la retirada del espigón que divide la playa de Cariño llevaría consigo que toda la arena que se retiene en la zona sur se podría mover libremente hacia el interior del puerto, de tal forma que la playa alcanzaría el equilibrio se-

gún una espiral logarítmica, con el mismo polo y ángulo actual, ya que la posición del morro del dique de abrigo define la forma en planta de la playa y éste no ha variado.

La retirada del espigón originaría una única playa, unificando en planta y perfil todo su conjunto. Su forma en planta se ajustaría a una espiral logarítmica de ángulo $\alpha = 775^\circ$ y con polo el morro del dique de abrigo, de tal forma que la línea batimétrica -1 metro adoptaría la forma que se indica en la figura 9. La actual playa sur sufriría un retroceso medio de 94 metros, invadiendo el actual "Instituto de Cariño" situado sobre las dunas de la playa. La línea batimétrica -1 metro de la zona norte avanzaría de tal forma que compensase los 42.500 m² que perdería la zona sur en beneficio de esta zona, produciéndose avances que irían de 0 a 100 metros, dependiendo del lugar considerado. Como consecuencia, los bajos próximos al puerto aumentarían considerablemente, perjudicando el normal funcionamiento del puerto. Finalmente, la pendiente de la nueva playa se ajustaría aproximadamente al 8%, valor actual de la playa sur.

Otra solución estudiada fue trasladar el espigón hacia el puerto, de tal manera que se obtuviera una nueva línea de orilla retranqueada. En este caso habría que definir previamente una serie de condiciones iniciales respecto a la forma en planta que se desee alcanzar, por ejemplo; si se trasladase el espigón 100 metros hacia el puerto, no variando su longitud y no hubiera aporte suplementario, la forma que adquiriría la playa correspondería a la representada en la figura 10. La playa sur se adaptaría a una espiral logarítmica de ángulo $\alpha = 775^\circ$ y polo el morro del dique de abrigo. La línea batimétrica -1 metro se retrasaría una longitud media de 14 metros, aumentando la longitud de la playa 100 me-

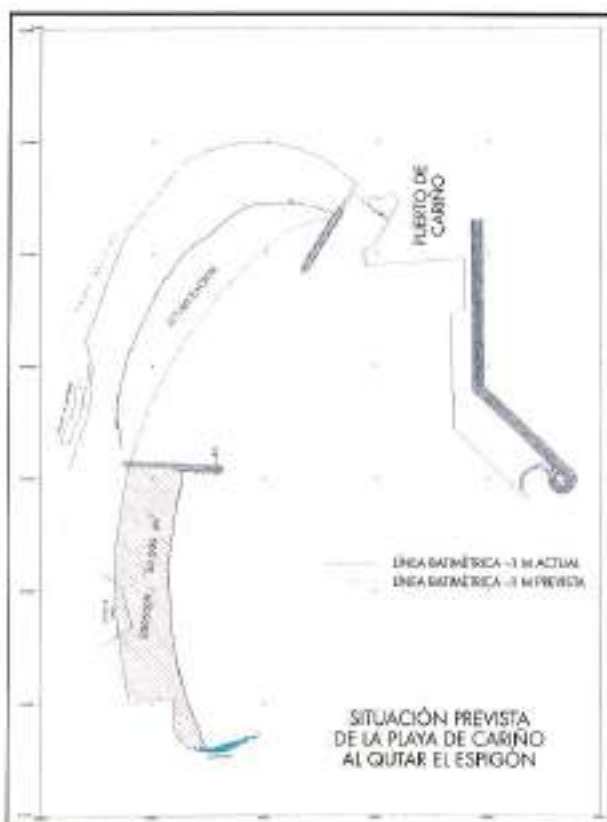


FIGURA 9. Estado final previsto si se quita el espigón de la bahía de Cariño.

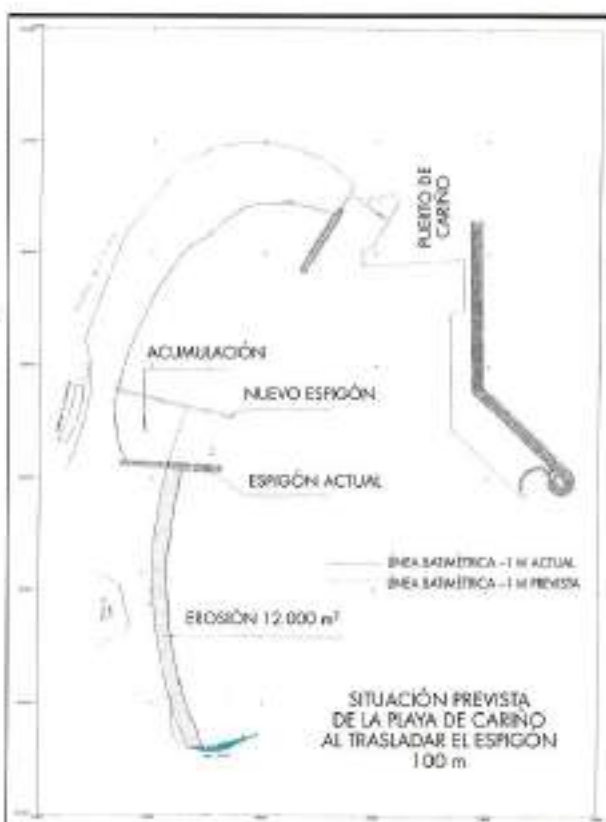


FIGURA 10. Estado final previsto si se trasladase el espigón de la bahía de Cariño hacia el puerto.

tres. La playa norte permanecería en un estado igual al actual sin afectar al puerto de Cariño.

7. BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Jennings, J. N., "The Influence of Wave Action on Coastal Outline in Plan" (1955); *Australian Geographer*, vol. 6, pages 35-44.
- Davies, J. L., "Wave Refraction and the Evolution of Shoreline Curves" (1958); *Geophysical Studies*, vol. 5.
- Grosswell, R. K., "The Physical Geography of Beaches and Coastlines" (1967); *Hulton Educational Publication*.
- Hayle, J. W. y G. T. King, "The Origin and Stability of Beaches" (1957); *Proceedings of the 6th Conference of Coastal Engineering*, pages 281 y stén.
- Silvester, R., "Stabilization of Sedimentary Coast Lines" (1960); *Nature*, vol. 188, nº 4748, pages 467 a 468.
- Silvester, R., "Design Waves for Littoral Drift Models" (1963); *Journal of the Waterways and Harbors Division ASCE*, vol. 89, nº ww3, pages 37 a 47.
- Yano, W. K., "Plan Geometry of Headland Bay Beaches" (1965); *Journal of Geology*, vol. 73, pages 702 a 714.
- Silvester, R., "Growth of Crescent Shaped Bays to Equilibrium" (1970); *Journal of the Waterways and Harbors Division ASCE*, vol. 96, nº ww2, pages 275 a 287.
- LeBlond, P. H., "On the Formation of Spiral Beaches" (1972); *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference (Vancouver-Canada)* vol. 2, pages 1331 a 1345.
- Silvester, R. y Shou-Koon Ho, "Use of Crescent Shaped Bays to Stabilize Coasts" (1972); *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference (Vancouver-Canada)* vol. 2, pages 1347 a 1365.
- Silvester, R., "Coastal Engineering I" (1974); *Elsevier Scientific Publishing Company (Developments in Geotechnical Engineering, vol. 4B)*.

- Silvester, R., "Headland Defense of Coasts" (1976); *Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference (Honolulu-Hawaii-EE.UU.)* vol. 2, pages 1394 a 1406.
- Ozasa, H. y A. H. Bampton, "Mathematical Modelling of Beaches Backed by Seawalls" (1984); *Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (Coastal Engineering, 4)*, pages 47 a 63.
- Kraus N. C., H. Hansen y S. Hanka, "Shoreline Change at Oahu Beach: Past, Present and Future" (1984); *Proceedings of the 19th Coastal Engineering Conference*, vol. 2, pages 2017 a 2123.
- Hsu, J. R. C., R. Silvester y Yi-Min Xia, "Static Equilibrium Bays: New Relationships" (1989); *Journal of the Waterways and Harbors Division ASCE*, vol. 115, nº ww3, pages 285 a 298.
- Hsu, J. R. C. y C. Evans, "Parabolic Bay Shapes and Applications" (1989); *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London*, vol. 87 (parte 2), pages 557 a 570.
- Hsu, J. R. C., T. Uda y R. Silvester, "Beaches Downcoast of Harbours in Bays" (1993); *Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (Coastal Engineering, 19)*, pages 163 a 181.
- Tan, S. K. y Y. M. Chiew, "Analysis of Beaches in Static Equilibrium" (1994); *Journal of the Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering ASCE*, vol. 120, nº 2, pages 143 a 153.
- Komar, P. D. y D. L. Inman, "Longshore sand transport on beaches" (1970); *Journal of Geophysical Research*, 75, nº 30.
- Horioka, K., "Nearshore dynamics and coastal processes" (1988); *Universidad de Tokio Press*.
- Sánchez Pulgarín, F. J., "Dinámica litoral de la playa de Cariño (La Coruña) y posible modificación de sus obras de defensa" (1995); *Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (MOPTMA) (informe técnico)*.

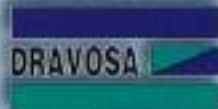


Dragado Canal de Acceso del PUERTO DE HUELVA

- ▼ Vertido material contaminado en recintos especiales por la draga de succión en marcha
DRAGO COSTA BLANCA

Construcción Sub-Base Rompeolas MARINA CASCAIS Portugal

- ▲ Vertido roca con alta precisión por el barco de tiro lateral
s.s.d.v. FRANS



DRAGADOS Y OBRAS MARITIMAS

Plaza de Castilla, 3 • 21 A
28046 MADRID
Telf.: (91) 323 02 07
Fax: (91) 323 06 87



EL ICO LE OFRECE LOS BILLETES QUE NECESITA PARA SALIR **AL EXTRANJERO**

EQUIPO TRES

Programa
PROINVEX

Financiación de Grandes Proyectos de Empresas Españolas en el Exterior

El Instituto de Crédito Oficial, a través de su Programa de Financiación de Inversiones en el Exterior (PROINVEX), destina **80.000 millones de pesetas** para financiar grandes proyectos de inversión en el exterior llevados a cabo por empresas españolas.

El Programa PROINVEX financia **hasta el 70% de la inversión** mediante préstamos, a medio y largo plazo, superiores a **750 millones de pesetas**. Antes de salir al extranjero consulte al ICO, encontrará la solución que busca para sus necesidades de financiación.



Ministerio de Economía y Hacienda
Secretaría de Estado de Comercio, Turismo
y Pequeña y Mediana Empresa

ICO
Instituto de Crédito Oficial

INFÓRMASE EN EL
900 121 121