

MODELO CONCEPTUAL DE EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO DE LA MORFOLOGÍA DE LOS ESTUARIOS

P. Lomónaco, R. Medina, I.J. Losada

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas
Universidad de Cantabria
lomonacop@unican.es

Resumen: Se presenta un modelo analítico que describe la propagación de la onda de marea en un estuario somero, con el fin de determinar la influencia de la configuración del mismo en la deformación de la onda, estableciendo los mecanismos que producen la asimetría de las velocidades y las circunstancias en las que es posible recuperarla y, con ello, establecer las condiciones de un equilibrio dinámico. El modelo incorpora, de forma paramétrica, la morfología de un estuario cuya sección transversal admite la presencia de bajos mareales y canales de vaciante. El modelo resuelve, a través de un esquema de perturbaciones, las ecuaciones no lineales de movimiento donde se incluye la fricción con los contornos, el efecto de amplitud finita y la variación instantánea de la superficie libre. Los resultados del modelo se han verificado con medidas realizadas en campo, demostrando su aplicabilidad. Finalmente, el modelo se emplea como una herramienta para identificar la relación existente entre la asimetría de las velocidades y la tendencia morfológica del estuario. La solución analítica de las ecuaciones permite, de forma general, analizar la contribución individual de los términos no lineales en el comportamiento de la onda de marea al propagarse por un estuario somero.

INTRODUCCIÓN

La configuración de un estuario, compuesto por material sedimentario, es el resultado de la acción continuada de las corrientes de marea, el caudal de los ríos que en él pudieran confluir y el oleaje que llega a la desembocadura. Al mismo tiempo, las características hidrodinámicas dentro del estuario, esto es, la distribución espacial y la magnitud de las corrientes, están dominadas por la morfología del mismo. Esta interacción entre la morfología y el comportamiento hidrodinámico en el interior del estuario ha sido un tema continuo de investigación en la ingeniería de costas y la oceanografía física. Por ejemplo, Friedrichs *et al.* (1990) identificaron que, si la configuración del estuario es producto de la hidrodinámica y viceversa, mientras las acciones no cambien significativamente o la morfología no sea alterada, el sistema se encontrará en un estado de equilibrio dinámico.

Las distintas actuaciones que se realizan en un estuario tienen, necesariamente, consecuencias en el comportamiento de las corrientes y

este efecto se verá reflejado en una alteración de la configuración, evolucionando hacia un nuevo equilibrio (Aubrey 1986). Dicha evolución es tanto más rápida conforme las acciones hidrodinámicas son más intensas, o cuando la configuración del estuario, al cabo de las actuaciones, se encuentra muy alejada de la de equilibrio (Medina *et al.*, 1998). En general, el tiempo de respuesta evolutiva de un estuario puede encontrarse en el rango de varios meses a decenas de años.

Desde el punto de vista del ingeniero de costas, determinar el impacto de las actuaciones que se pretenden realizar en la configuración del estuario es un problema de gran relevancia, ya que ésta evaluación le permitirá tomar las medidas necesarias para minimizar dicho impacto, o verificar que el proyecto de actuación no quede inutilizado. Si, adicionalmente, conoce el tiempo de respuesta del sistema, podrá efectuar previsiones a largo plazo de las inversiones económicas necesarias, así como optimizar el plan de obra y mantenimiento de dichas actuaciones.

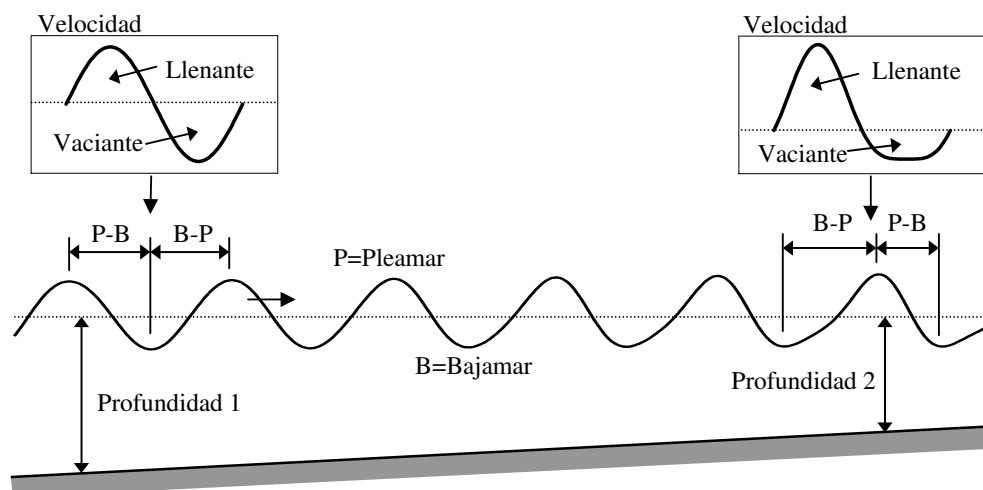


Figura 1. Deformación de la onda de marea al propagarse en un estuario somero

El presente estudio forma parte de una línea de investigación que tiene como objetivo determinar el comportamiento evolutivo de la morfología de un estuario a largo plazo. Como primer paso, en este trabajo se presenta un modelo hidrodinámico analítico, que considera la configuración de un estuario somero en el que se incluye la presencia de los bajos mareales. Específicamente, se estudia la influencia de la morfología en el comportamiento de la onda de marea conforme se propaga a lo largo del estuario. Una vez que se conozca a fondo dicha influencia, puede determinarse las condiciones en las que exista el equilibrio y definir el impacto de una actuación en la tendencia evolutiva.

Planteamiento del problema

La velocidad de propagación de la onda de marea, denominada celeridad, es proporcional a la profundidad total y es independiente del periodo. En el océano, la profundidad es mucho mayor a la amplitud, por lo que puede asumirse que la marea se propaga a la misma celeridad a lo largo de todo su ciclo. Sin embargo, conforme se aproxima a la costa y, en particular, al penetrar en un estuario somero, la diferencia entre la celeridad en pleamar y en bajamar se hace patente (Aubrey y Speer, 1985): en pleamar la celeridad es mayor, mientras que en bajamar ocurre lo contrario. Este fenómeno tiene dos orígenes. Primero, es consecuencia del efecto de amplitud finita de la onda de marea, en las ecuaciones de movimiento esto se traduce en considerar el efecto no lineal de la propagación de la onda. Segundo, la fricción en el fondo es proporcional a la velocidad e inversamente pro-

porcional a la profundidad, por lo que la cantidad de energía que se consume será variable a lo largo del ciclo de marea.

En la Figura 1 se presenta, esquemáticamente, el efecto de la diferencia en la propagación de una onda de marea en un estuario somero, representado longitudinalmente. Como se observa, el efecto de la amplitud finita de la onda es perceptible en las áreas menos profundas, deformando la onda. Como resultado, el tiempo entre la bajamar y la pleamar (Llenante) puede acortarse o alargarse de manera apreciable y, consecuentemente, se producirá una asimetría en las velocidades del fluido. La asimetría se representa por un intervalo más corto pero de mayor intensidad en una dirección, y un intervalo más largo pero de menor intensidad en la otra.

Esta asimetría define la tendencia evolutiva del estuario. Efectivamente, los estuarios objeto de esta investigación se encuentran formados de material sedimentario no cohesivo y no compactado. El campo de velocidades producido por la marea es capaz de transportar el sedimento y, si las velocidades son asimétricas, existirá una tendencia a la sedimentación o erosión que modificará la morfología del estuario, local y globalmente. El cambio en la morfología repercutirá, a su vez, en la deformación de la onda y así, sucesivamente, hasta llegar a una situación de equilibrio dinámico.

Al comparar una batimetría antigua de un estuario con la actual, si se observa que los elementos más destacados de su morfología se mantienen (la dimensión de los bajos mareales, la disposición de los canales de vaciante, etc.), puede considerarse que el estuario ha llegado a

un equilibrio, y que la tendencia sedimentaria producto de la asimetría de las velocidades se ha detenido. En la Figura 2 se presentan dos imágenes del estuario de San Vicente de la Barquera, una de 1870 y la segunda de 1995, donde se observa que los canales de vaciante, la dimensión del bajo mareal y la configuración de la playa adyacente, son aproximadamente iguales, es decir, el estuario se encuentra en equilibrio.

Nótese que para que este equilibrio ocurra, la configuración morfológica de un estuario debe ser tal que en pleamar las fuerzas de fricción reduzcan la celeridad de la onda, mientras que no sea así en bajamar. De esta forma es posible recuperar la simetría del campo de velocidades y con ello el equilibrio morfodinámico. La hipótesis fundamental del presente estudio es que el responsable de la recuperación del equilibrio es el cambio en la configuración morfológica del estuario, esto es, la cota y dimensión de los bajos mareales, la configuración de las marismas o la profundidad de los canales (Lomónaco, 1999).

Modelo conceptual

Los estuarios analizados en este trabajo se encuentran dominados por la acción de las corrientes de marea. En su interior se observan amplias zonas inundables, denominadas bajos mareales o marismas, y una serie de canales cuya disposición es visible únicamente en bajamar, llamados canales de vaciante. La configuración y profundidad de los canales de vaciante, así co-

mo las dimensiones y cota de los bajos mareales tienden, como toda unidad sedimentaria, a un equilibrio que depende, entre otros factores, de la intensidad y variabilidad hidrodinámica (VAN Dongeren, 1992). Una sección transversal tipo de un estuario con bajos mareales y canales de vaciante se presenta en la Figura 3, donde se incluye una imagen de la Marisma de Pombo, en el estuario de San Vicente de la Barquera.

En general, en los estuarios con éstas características, la cota de los bajos mareales presenta la misma elevación, es decir, ligeramente por encima del nivel medio del mar. Esquemáticamente, en la Figura 3 se muestra una variación constante en el nivel de la superficie libre. Para aumentar el nivel en bajamar, es necesario un volumen relativamente pequeño, mientras que el área de la sección es grande respecto al perímetro mojado. En pleamar, la misma variación de nivel requiere de un volumen mucho mayor, ya que es necesario inundar una gran superficie, donde el área de la sección es mucho menor respecto al perímetro mojado. Dado que el perímetro mojado define el contorno que se opondrá al flujo a través de la fricción, para recuperar la simetría en las velocidades y, en consecuencia, el equilibrio, debe existir una combinación entre el área y el perímetro mojado constante a lo largo del ciclo de marea. Queda por demostrar que la sección típica de equilibrio que se observa en todos los estuarios en estudio es producto de esta combinación geométrica.



Figura 2. Configuración morfológica del estuario de San Vicente de la Barquera en 1870 y en 1995

El objetivo de este estudio es determinar la influencia de la configuración del estuario (sección transversal) en la deformación de la onda de marea y, asimismo, establecer los mecanismos que producen la asimetría de las velocidades y las condiciones en las que es posible recuperarla y, con ello, llegar al equilibrio dinámico. Para alcanzar dicho objetivo, es necesario realizar un análisis detallado del comportamiento hidrodinámico de la marea al propagarse en aguas someras, donde se ha incorporado, de forma paramétrica, la morfología del estuario. Dicho análisis se efectuará con un modelo hidrodinámico que resuelve, analíticamente, la propagación de una onda de marea a lo largo de un estuario, donde se mantiene el efecto de la fricción, así como la configuración de la sección transversal en la que se incluye la presencia de los bajos mareales. El modelo, a través de un esquema de perturbaciones, incorpora el efecto no lineal de amplitud finita y la variación instantánea de la superficie libre, con lo que se consigue representar la variación de la celeridad con la profundidad to-

tal. El modelo así propuesto permite, de forma innovadora, estudiar la contribución individual de cada término no lineal de las ecuaciones de movimiento en el comportamiento de la onda de marea al propagarse por un estuario somero.

MODELO HIDRODINÁMICO

La propagación de una onda de marea a lo largo de un estuario somero puede representarse con las ecuaciones de movimiento integradas en vertical y transversalmente (Shetye y Gouveia, 1992):

$$\frac{\partial(Au)}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + f \frac{P}{A} u |u| = 0 \quad (2)$$

donde $A(x, t)$ representa el área instantánea de la sección transversal del estuario, (x, t) es la elevación de la superficie libre, $u(x, t)$ es el campo de velocidades a lo largo del estuario, g es la aceleración de la gravedad, $P(x, t)$ es el perímetro mojado de la sección transversal, f es un coeficiente de fricción, x es la coordenada longitudinal y t es el tiempo.

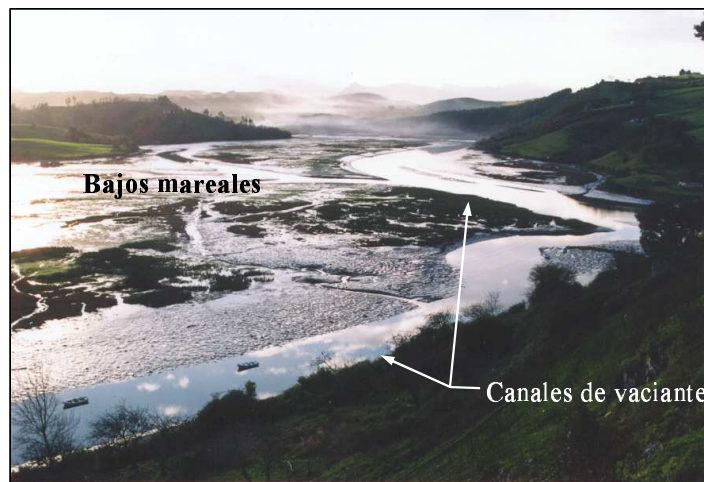
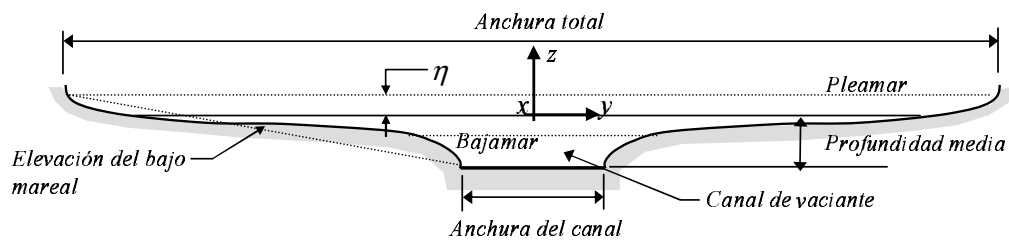


Figura 3. Fotografía de las Marismas del Pombo y esquema de la sección típica de un estuario: bajos mareales y canales de vaciante

Las ecuaciones (1) y (2) se encuentran sujetas a condiciones de contorno conocidas, es decir, la amplitud de la onda de marea en la desembocadura y la velocidad al final del estuario. En este caso, el efecto del oleaje en la desembocadura se ha considerado despreciable y el caudal del río es de segundo orden respecto a la marea.

Las ecuaciones (1) y (2) se han obtenido manteniendo la dependencia no lineal de la superficie libre en la sección transversal. Esta relación puede expresarse a través de una serie de potencias del área y del perímetro mojado (Lomónaco, 1999):

$$A(x, t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \eta^i(x, t) = A_0 + A_1 \eta(x, t) + A_2 \eta^2(x, t) + \dots \quad (3)$$

$$P(x, t) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i \eta^i(x, t) = P_0 + P_1 \eta(x, t) + P_2 \eta^2(x, t) + \dots \quad (4)$$

Los coeficientes A_i y P_i son constantes y se han incorporado de tal forma que pueden representar una sección transversal con una configuración arbitraria. De este modo, la complejidad de la sección transversal que quiera representarse dependerá del truncamiento de la serie. Por ejemplo, una sección trapezoidal se representa de forma exacta al segundo orden en el área y al primer orden en el perímetro mojado. Nótese que A_i y P_i no son funciones de x ó t , por lo que (3) y (4) corresponden a un estuario prismático.

Para resolver (1) y (2) analíticamente, el término de fricción cuadrático se lineariza, siguiendo la propuesta de trabajo equivalente de Lorentz (Ippen, 1966):

$$\begin{aligned} f u |u| &= f' u \\ f' &= f \frac{8}{3\pi} \frac{U}{H} \end{aligned} \quad (5)$$

donde U y H son valores representativos de la velocidad y la profundidad, respectivamente. Aplicando un método de perturbaciones (Nayfeh, 1973; Gallagher y Munk, 1971) para la superficie libre y la velocidad, se obtiene:

$$\begin{aligned} \eta &= \varepsilon \eta_1 + \varepsilon^2 \eta_2 + \dots \\ u &= \varepsilon u_1 + \varepsilon^2 u_2 + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

donde ε es un parámetro que representa el orden de magnitud de cada término de la ecuación (6). ε proporciona, por lo tanto, una indicación de la no linealidad del fenómeno y queda definido como la relación entre la amplitud de la onda de marea y la profundidad media ($\varepsilon = a/h_0$). η_i y u_i son la solución de orden i de la superficie libre y la velocidad, respectivamente.

Sustituyendo las ecuaciones (3) a (6) en (1) y (2) queda un sistema de ecuaciones que puede resolverse analíticamente. La solución de primer orden, expresada en las ecuaciones (7) y (8), representa la propagación de la componente principal de la marea (por ejemplo, M2 ó S2). En esta solución, el efecto simultáneo de la fricción y las variaciones de la sección transversal, han quedado incluidas en la celeridad y en el número de onda complejo:

$$\eta_{1,j} = [C_{1,j} \cos(\mathbf{k}_j x) + C_{2,j} \sin(\mathbf{k}_j x)] \exp(i(\omega_j t + \varphi_j)) \quad (7)$$

$$u_{1,j} = \frac{-ig}{c_0 \sqrt{1 - i\mu_j}} [C_{1,j} \sin(\mathbf{k}_j x) - C_{2,j} \cos(\mathbf{k}_j x)] \exp(i(\omega_j t + \varphi_j)) \quad (8)$$

donde $C_{j,1}$ y $C_{j,2}$ son las constantes complejas de integración para la j -ésima componente de marea, que se obtiene al aplicar las condiciones de contorno de la superficie libre en la desembocadura ($x = x_b$) y la velocidad en el final del estuario ($x = x_0$). Generalizando para cualquier combinación lineal de componentes armónicas, las ecuaciones (7) y (8) quedan,

$$\eta_1 = \sum_{j=1}^n \eta_{1,j} = \sum_{j=1}^n BB_j \cos(\mathbf{k}_j x_b - \mathbf{k}_j x) \quad (9)$$

$$u_1 = \sum_{j=1}^n u_{1,j} = \sum_{j=1}^n \frac{ig}{c_0^2 \mathbf{k}_j} \sin(\mathbf{k}_j x_b - \mathbf{k}_j x) \quad (10)$$

donde $BB_j = \frac{a_{1j}}{\cos(\mathbf{k}_j x_b - \mathbf{k}_j 0)} \exp(i(\omega_j t + \varphi_j))$ representa el comportamiento armónico de la j -ésima componente en la desembocadura, a_{1j} es la amplitud de la j -ésima componente en la desembocadura, $\mathbf{k}_j = \frac{\omega_j}{c_0} \sqrt{1 - i\mu_j} = k_j \sqrt{1 - i\mu_j}$ es el número de onda complejo para la j -ésima componente, $k_j = \frac{\omega_j}{c_0} = \frac{2\pi}{l_j}$ es el número de onda para el caso sin fricción, l_j es la longitud de onda para el caso sin fricción, $\omega_j = \frac{2\pi}{T_j}$ es la frecuencia para la j -ésima componente con periodo T_j , $\mu_j = \frac{f' P_0}{\omega_j A_0}$ es la fricción relativa para la j -ésima componente, $i = \sqrt{-1}$, $c_0 = \sqrt{gA_0/A_1}$ es la celeridad de la onda para el caso sin fricción y φ_2 es la fase de la j -ésima componente.

Las ecuaciones (9) y (10) representan un sistema de ondas que se propaga en direcciones opuestas, donde la parte real corresponde con el comportamiento progresivo de la onda y la parte imaginaria se refiere a la disipación de energía debido a la fricción.

El área y el perímetro mojado de una sección transversal tipo como la mostrada en la Figura 3 se calcula partiendo de una sección trapezoidal, perturbando las márgenes, obteniendo así una expresión analítica que puede sustituirse

en las ecuaciones (3) y (4) y en la solución (9) y (10):

$$\begin{aligned} A_0 &= (b_0 + Nh_0)h_0 - \frac{h_0 + h_s}{\pi} \delta \left[1 + \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^m}{(2m!)} \frac{h_s^{2m}}{(h_0 + h_s)^{2m}} \right] \\ A_1 &= b_0 + 2Nh_0 + \frac{h_0 + h_s}{\pi} \delta \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^m}{(2m!)} \frac{mh_s^{2m-1}}{(h_0 + h_s)^{2m}} \\ A_2 &= N - \frac{h_0 + h_s}{\pi} \delta \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^m}{(2m!)} \left(\frac{2m}{2m-2} \right) \frac{h_s^{2m}}{(h_0 + h_s)^{2m}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_0 &= b_0 + \int_{-h_0}^0 \sqrt{1 + \left(N + \frac{\pi}{h_0 + h_s} \delta \cos \left(\pi \frac{z - h_s}{h_0 + h_s} \right) \right)^2} dz \\ P_1 &= \sum_{m=0}^n \frac{d^{(m)}}{dz^k} \sqrt{1 + \left(N + \frac{\pi}{h_0 + h_s} \delta \cos \left(\pi \frac{z - h_s}{h_0 + h_s} \right) \right)^2} \Big|_{z=h_s} \frac{(-1)^m h_s^m}{m!} \end{aligned} \quad (12)$$

donde (ver Figura 3) b_0 es la anchura del canal, $N = \frac{\text{anchura total} - b_0}{2h_{\text{máx}}}$ es el talud de los bajos mareales, h_0 es la profundidad media, $h_{\text{máx}}$ es la profundidad del canal en pleamar, h_s es la elevación del bajo mareal y $\delta = N \frac{h_0 + h_s}{2\pi}$ es la anchura máxima del bajo mareal.

La solución de segundo orden se obtiene al sustituir nuevamente las ecuaciones (3) a (6) en (1) y (2). La solución analítica representa la propagación de las sobremareas (p.ej. M4, S4, etc.), incluyendo la transferencia de energía de las componentes principales, así como la solución estacionaria (es decir, la corriente residual y variación del nivel medio). La solución de segundo orden para la superficie libre tiene la forma:

$$\begin{aligned} \eta_{2,jj} &= \left[C_{3,jj} \cos(\mathbf{k}_{jj}x) + C_{4,jj} \sin(\mathbf{k}_{jj}x) + \right. \\ &\quad \left. F_{1,jj}(x) \sin(\mathbf{k}_{jj}x) - F_{2,jj}(x) \cos(\mathbf{k}_{jj}x) \right] \exp(i(\bar{\omega}_{jj}t + \varphi_{jj})) \end{aligned} \quad (13)$$

donde $C_{3,jj}$ y $C_{4,jj}$ son las constantes de integración complejas de la jj -ésima sobremarea, $\bar{\omega}_{jj}$ es la frecuencia de la sobremarea, φ_{jj} es la fase de la sobremarea, $\mathbf{k}_{jj}$ es el número de onda complejo de la jj -ésima sobremarea y, finalmente, $F_{1,jj}(x)$ y $F_{2,jj}(x)$ son dos funciones complejas que provienen de la integración de la ecuación de onda no homogénea.

Aplicando también las condiciones de contorno correspondientes, puede obtenerse la solución tanto para la superficie libre como para la velocidad. Dada la complejidad y longitud de las expresiones completas de dicha solución, se remite al lector a la fuente original (Lomónaco, 1999).

A continuación, se procede a verificar y validar el modelo con el fin de garantizar su apli-

cabilidad. El desarrollo de la solución analítica, así como la validación de modelo en distintos estuarios en todo el mundo, ya han sido descritos con anterioridad (Lomónaco, 1999 y Lomónaco et al., 2001). Sin embargo, con el fin de mejorar el entendimiento del modelo propuesto, se han resumido e incluido en este trabajo. Asimismo, en los siguientes apartados, se estudiará la influencia de la sección transversal en la evolución a largo plazo.

VALIDACIÓN DEL MODELO

Con el fin de validar y comprobar la aplicabilidad general del modelo presentado con anterioridad, a continuación se efectúa una comparación con datos medidos en el estuario de Nauset Bay, Massachussets y publicados previamente por Friedrichs y Aubrey (1988). El estuario Nauset es una bahía relativamente corta, ancha y poco profunda. En la Figura 4 se presenta una fotografía aérea del estuario. Las características geométricas y físicas del estuario pueden obtenerse de la imagen, de Aubrey y Speer (1985) y de Friedrichs y Aubrey (1988).

En la Figura 5 se presenta la amplitud de las componentes principales M2, S2 y O1 (Figura 5a), la sobremarea M4 (Figura 5b) y el desfase entre las componentes M2 y M4 (Figura 5c). En la Figura 5, los símbolos representan los datos medidos y la línea continua la solución analítica. Cabe resaltar que en el modelo se han introducido simples datos geométricos y la amplitud de la marea en dos puntos del estuario, mientras que los resultados, especialmente los elementos no lineales como la sobremarea o el desfase, muestran una correlación excelente.



Figura 4. Imagen aérea del estuario Nauset Bay, (MIT 1998)

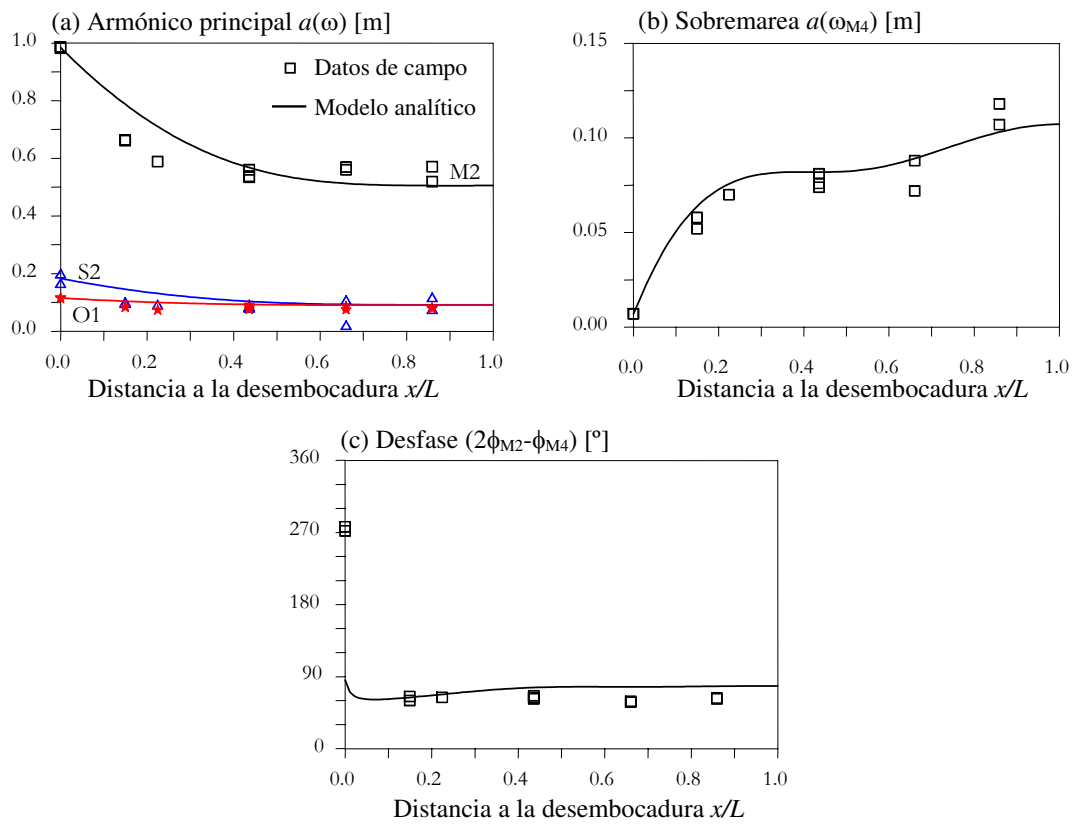


Figura 5. Comparación de los resultados del modelo con datos medidos. Amplitud de la superficie libre a lo largo del estuario Nauset. a) Amplitud del armónico principal M2, S2 y O1, b) Amplitud de la sobremarea M4 y c) Desfase entre la componente principal y la sobremarea ($2M2-M4$)

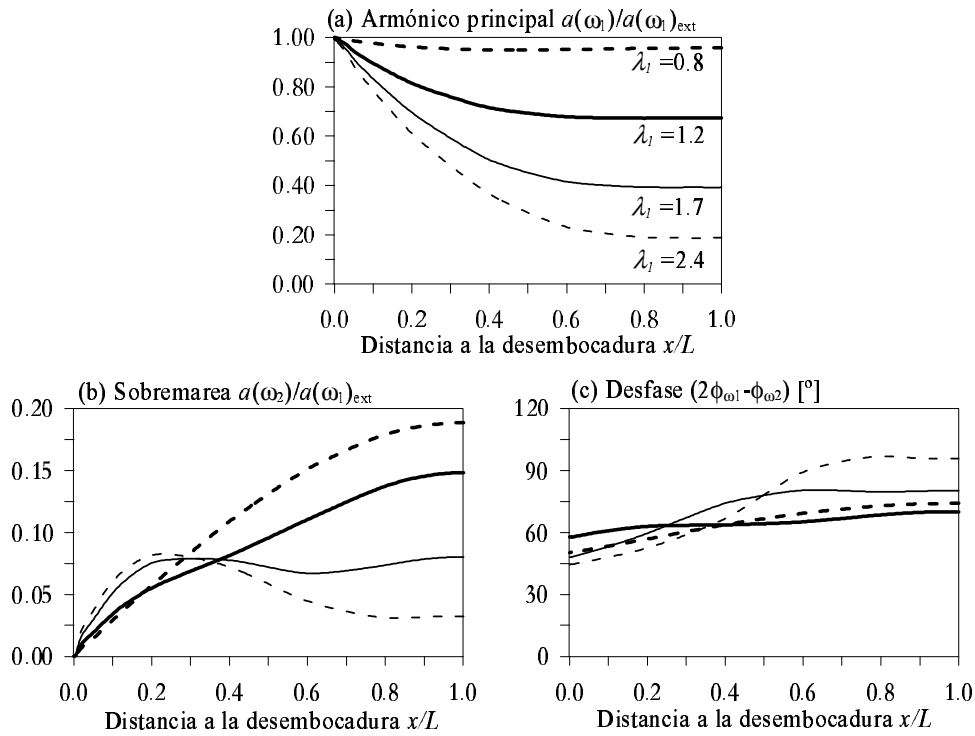


Figura 6. Efecto de la fricción relativa en la propagación de la onda de marea. a) Amplitud del armónico principal, b) Amplitud de la sobremarea y c) Desfase entre la componente principal y la sobremarea

INFLUENCIA DE LA MORFOLOGÍA DEL ESTUARIO

Para estudiar la influencia de la morfología del estuario en la propagación de la onda de marea, se procederá a variar los parámetros que representan su geometría y sus propiedades, es decir, la longitud del estuario, las dimensiones de los bajos mareales, la profundidad del canal de vaciante, la frecuencia de la componente principal, el coeficiente de fricción del fondo, etc. Todos estos parámetros pueden representarse a través de un factor, denominado fricción relativa, que los relaciona de forma adimensional:

$$\lambda_j = k_j L \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \mu_j^2}}{2}} \quad (14)$$

donde L es la longitud del estuario y k_j y μ_j se han definido previamente en (10).

λ_j representa la longitud del estuario respecto a la longitud de la componente principal de la onda de marea, en la que se ha incluido el efecto de la sección transversal y la fricción como elementos que reducen la celeridad de la onda. La fricción relativa, λ_j , permite entonces identificar el efecto conjunto de la geometría y las

propiedades del estuario en la propagación de la onda de marea, así como en la generación de las mareas compuestas. Como ejemplo, se presenta en la Figura 6 la variación de la amplitud de la componente principal y de la sobremarea a lo largo de un estuario, para cuatro casos de λ_j , desde el caso donde la fricción es despreciable (λ_j pequeño), hasta el caso en el que la disipación de energía prácticamente hace desaparecer la componente principal al final del estuario.

En la Figura 6a se presenta la variación de la amplitud de la componente principal a lo largo del estuario. Nótese que el comportamiento disipativo característico de un estuario puede representarse a través de una infinidad de combinaciones entre la geometría de la sección transversal, la longitud del estuario, el periodo de la onda y la fricción del fondo. En consecuencia, la forma en que el armónico principal transfiere energía al superarmónico, así como el acoplamiento de éstos dos, es una propiedad del estuario en su conjunto.

En la Figura 6b se presenta la evolución de la amplitud del superarmónico, donde destaca un mayor crecimiento de éste para el caso en que el armónico principal se mantiene a lo largo del estuario. Asimismo, cabe resaltar el caso en que

la amplitud del superarmónico deja de crecer, alcanzando un máximo, disminuyendo a continuación. Este caso ocurre cuando la transferencia de energía del armónico principal al superarmónico se ve contrarrestada por la disipación de energía, donde la sobremarea se propaga como una onda independiente. Finalmente, en la Figura 6.c se presenta el desfase entre la componente principal y el superarmónico, comportamiento que es representativo de la condición progresiva (desfase variable) o estacionaria (desfase constante) del sistema de ondas (Speer y Aubrey, 1985).

En la Figura 7 se presenta, adicionalmente, el comportamiento del campo de velocidades a lo largo del estuario para diferentes valores de la fricción relativa. En la Figura 7.a se observa la evolución de la velocidad de la componente principal de la onda de marea, en la que destaca la condición de contorno de flujo nulo en el final del estuario. En la Figura 7.b se presenta la amplitud de la velocidad de la sobremarea a lo largo del estuario, donde resalta la presencia de un nodo al final del estuario y en las proximidades de la desembocadura para los casos en los que la disipación de energía es relativamente importante, mientras que para el caso de fondo liso el comportamiento del campo de velocidades es distinto. Finalmente, en la Figura 7.c se muestra la evolución del desfase entre las componentes

de velocidad. Este desfase es el responsable de la forma asimétrica de las velocidades y, en consecuencia, de la tendencia evolutiva del estuario.

En efecto, la forma del ciclo de velocidades que se observa en la Figura 1, puede representarse a través de la suma de armónicos cuya frecuencia es un múltiplo de la correspondiente al armónico principal. La amplitud del primer superarmónico, y su desfase respecto al armónico principal, producirá un efecto determinado en la asimetría de la onda. En particular, las velocidades se verán acentuadas en una dirección predominante si el armónico principal y la sobremarea se encuentran en fase (0° ó 180°), mientras que su efecto quedará compensado, es decir, la duración e intensidad de la vaciante y la llenante serán simétricos, si se encuentran completamente desfasados (90° ó 270°). De la Figura 7 queda entonces identificado que la tendencia evolutiva del estuario, producto de la asimetría de las velocidades, puede representarse a través del desfase entre las velocidades del armónico principal y los superarmónicos. Además, destaca que dicha tendencia no es constante a lo largo del estuario, por lo que un estuario no tenderá unívocamente a colmatarse o erosionarse, mientras que puede encontrarse en equilibrio a base de modificar la geometría local.

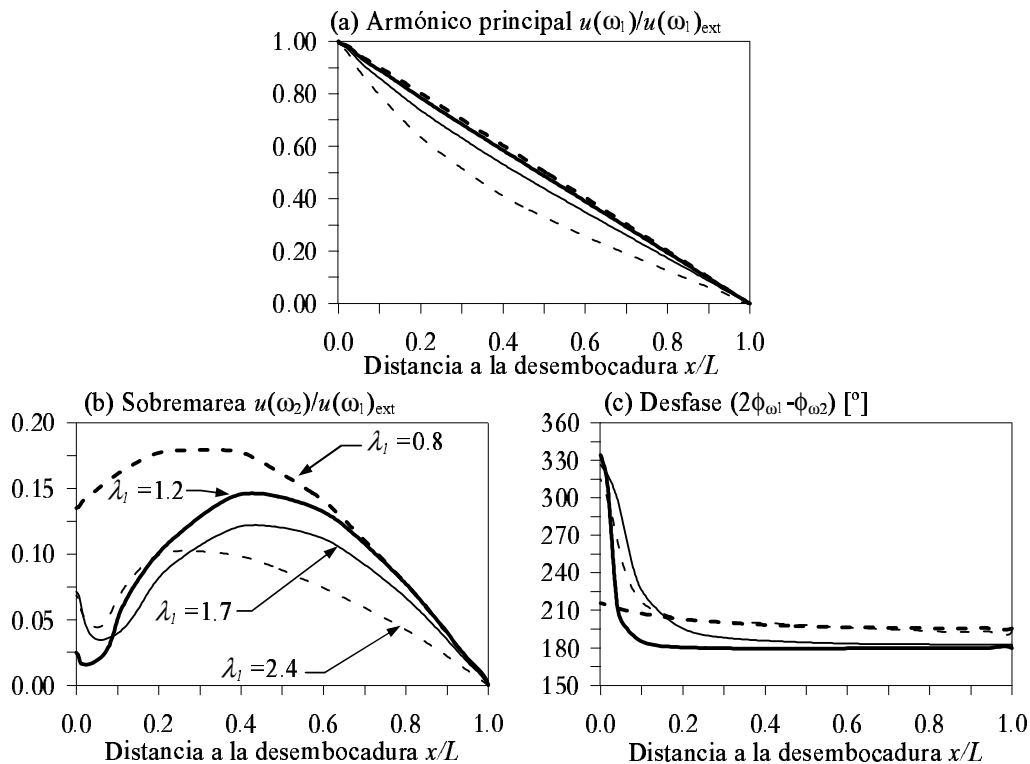


Figura 7. Efecto de la fricción relativa en el campo de velocidades. a) Velocidad del armónico principal, b) Velocidad de la sobremarea y c) Desfase entre la componente principal y la sobremarea

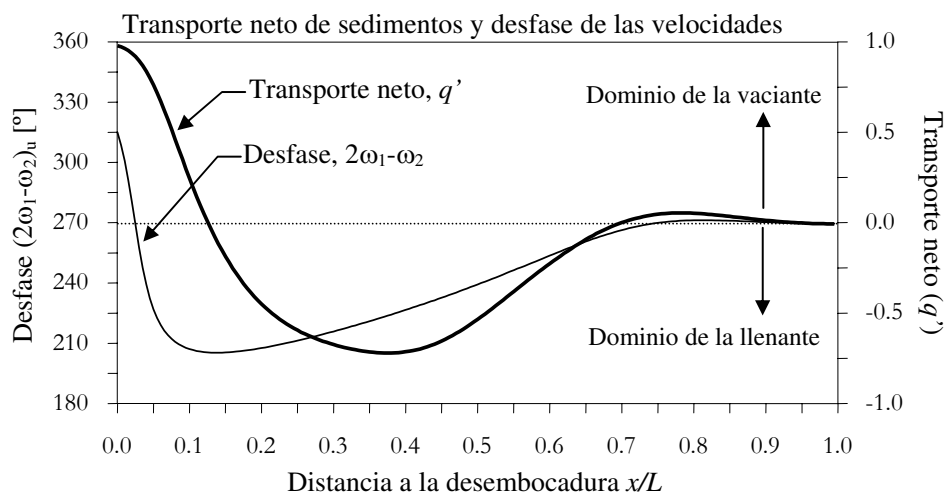


Figura 8. Tendencia morfológica en un estuario. Transporte neto de sedimentos (línea gruesa) y desfase para las velocidades (línea delgada) a lo largo del estuario. Si q' es negativo, la tendencia evolutiva es a la llenante, y la tendencia será a la vaciante si q' es positivo

Para comprobar esto, en la Figura 8 se presenta la tendencia evolutiva a lo largo del estuario, calculada integrando el transporte de sedimentos potencial a lo largo de todo el ciclo de marea. En la Figura 8 queda mostrado que la tendencia evolutiva del estuario no es constante y que ésta es imagen aproximada del desfase entre las amplitudes de la velocidad para el armónico principal y el superarmónico. Si el desfase es función de la fricción relativa (λ_j) tal y como se muestra en la Figura 7, y ésta es función de la geometría del estuario (véase la ecuación 10), con el modelo conceptual propuesto es posible determinar el efecto de una actuación, que modifique dicha geometría, en la morfología del estuario.

Cabe destacar que, al ser la tendencia evolutiva producto de una asimetría en el campo de velocidades, y dado que éste cambia continuamente en función de las variaciones de la marea (desigualdad diaria, mareas vivas y muertas, etc.), la evolución de un estuario hacia su situación de equilibrio puede estimarse que dure varios años, y que será aún más lenta conforme la dinámica de las corrientes disminuya, es decir, cuanto mayor sea la distancia a la desembocadura. Esta situación ha sido observada en distintos estuarios del Mar Cantábrico, como en la Bahía de Santander, donde las obras de relleno del estuario han producido un aumento de la cota de los bajos mareales al cabo de 50 años, mientras que la reducción de la sección de la desembocadura se ha observado desde el inicio de las obras (Lomónaco, 1999).

CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo analítico de propagación de la onda de marea que considera la evolución a largo plazo de la morfología de un estuario. Este modelo permite considerar los factores que influyen en la deformación de la onda de marea, es decir, la geometría del estuario representada a través de la sección transversal en la que se incluyen los bajos mareales y los canales de vaciante. Asimismo, el modelo considera, simultáneamente, los efectos no lineales de amplitud finita y fricción en los contornos. Al incorporar la geometría del estuario en las ecuaciones completas, es posible representar el papel combinado del área y del perímetro mojado en la recuperación de la simetría de las velocidades, con lo que se define el grado de equilibrio de un estuario así como la tendencia evolutiva del mismo. El modelo así propuesto permite, de forma conceptual, determinar la evolución a largo plazo de la morfología del estuario. Sin embargo, aun es necesario continuar esta línea de investigación con el fin de generalizar el modelo para poder aplicarlo en estuarios cuya configuración sea más aproximada con la realidad donde, por ejemplo, se incluya el efecto de la variación de la profundidad, o la anchura del estuario.

Específicamente, con el modelo se ha analizado la influencia de cada uno de los parámetros geométricos del estuario, así como la influencia de las propiedades de la onda de marea. Desde el punto de vista conceptual, es posible representar el comportamiento de la onda a través

de un único parámetro adimensional, denominado fricción relativa, el cual controla la disipación de energía a lo largo del estuario, así como la generación de sobremareas y mareas compuestas. Para la superficie libre, el desfase entre el armónico principal y la sobremarea es imagen de la condición cuasi-estacionaria del sistema de ondas, mientras que el desfase para la velocidad lo es del grado de asimetría de la onda, con lo que puede inferirse la tendencia evolutiva del estuario. El modelo propuesto es, entonces, una herramienta que permite evaluar cualitativamente el efecto de las actuaciones en la morfología del estuario, así como estimar cuantitativamente el comportamiento no lineal de la onda de marea conforme se propaga a lo largo de un estuario somero.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto AMB1999-0543 financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología y el proyecto europeo HUMOR EESD-ENV-99 (contrato EVK3-CT-2000-00037).

REFERENCIAS

- Aubrey, D.G. y Speer, P.E., (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 185–205.
- Aubrey, D.G., (1986). Hydrodynamic controls on sediment transport in web-mixed bays and estuaries. En *Physics of Shallow Estuaries and Bays*, Coastal and Estuarine Studies 16. Ed. J. van de Kreeke. Springer-Verlag, N.Y.
- Friedrichs, C.T. y Aubrey, D.G., (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27, 521–545.
- Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G. y Speer, P.E., (1990). Impacts of relative sea-level rise on evolution of shallow estuaries. En *Residual Currents and Long-term Transport*, Coastal and Estuarine Studies 38. Ed. R.T. Cheng. Springer-Verlag, N.Y.
- Gallagher, B.S. y Munk, W.H., (1971). Tides in shallow water: Spectroscopy. *Tellus XXIII*, 4-5, 346–363.
- Ippen, A.T., (1966). Tidal dynamics in estuaries. Part I: Estuaries of rectangular section. In: A.T. Ippen (Ed.) *Estuary and Coastal Hydrodynamics*, McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 493–522.
- Lomónaco, P., (1999). Propagación de la onda de marea en estuarios someros. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria. Santander, España.
- Lomónaco, P., Medina, R. y Losada, I.J., (2001). Influencia de la morfología del estuario en la propagación de la onda de marea. VI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Palma de Mallorca, España.
- Medina, R., Losada, M.A., Lomónaco, P. y Baquerizo, A., (1998). Application of a long-term evolution model of tidal inlets to the design of a navigation channel, the Navia inlet case. *Proc. 26th International Conference on Coastal Engineering*, Copenhagen, Dinamarca.
- Mit, (1998). Massachusetts Coastal Zone Management 1 meter color orthophoto resampled and extracted using MIT OrthoTools. <http://coast.mit.edu>. Nayfeh, A.H., 1973. *Perturbation Methods*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Shetye, S.R. y Gouveia, A.D., (1992). On the role of geometry of cross-section in generating flood-dominance in shallow estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 35, 113–126.
- Speer, P.E. y Aubrey, D.G., (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 207–224.
- Van Dongeren, A., (1992). A model of the morphological behaviour and stability of channels and flats in tidal basins. MSc Thesis, TU Delft, Holanda.