

ESTUDIO DE EVOLUCIÓN EN EL LARGO PLAZO DE LOS ELEMENTOS MORFODINÁMICOS DEL ESTUARIO DE RÍO GRANDE (TIERRA DEL FUEGO, ARGENTINA).

Paolo Gyssels⁽¹⁾, Gerardo Hillman, Gonzalo Moya, Mariana Pagot, Andrés Rodríguez⁽¹⁾⁽²⁾.

(1) Instituto Superior de Recursos Hídricos, U.N.C.

(2) CONICET

Av. Filloy s/n, 5016 Córdoba. Tel. 0351-4333193

E-mail: pgyssels@isrh.unc.edu.ar - Web: http://www.secyt.unc.edu.ar/inst_rec_hid/

RESUMEN

Cualquier modificación en el entorno del estuario (un dragado, un relleno,...), provoca una respuesta de todos los elementos a este cambio, y no se puede estudiar por separado el comportamiento de un solo elemento del estuario (la desembocadura, la ría interior, las playas adyacentes, las marismas). La evolución siguiente a un cambio tenderá siempre a restablecer un equilibrio final, que puede ser el original o nuevo. Este equilibrio será una fluctuación respecto a una situación media, que se establece en una escala temporal denominada de largo plazo (del orden de decenas de años).

En este trabajo se describe un modelo “híbrido” de evolución morfodinámica a largo plazo, o “modelo de cajas” (cada elemento morfológico del estuario es esquematizado como una “Caja”), aplicado al sistema estuarino de Río Grande en Tierra del Fuego, Argentina. Estos tipos de modelos informan sobre el tiempo que transcurre desde la realización de una alteración hasta que las condiciones de equilibrio en el estuario son recuperadas (De Vriend, Bakker y Viles, 1994; Lomónaco et al., 1999).

ABSTRACT

Any modification in the surroundings of the estuary (dredging, a filling...) causes a response of all the elements and the behavior of a single element of the estuary cannot be studied separately (the inlet, the inner estuary, the adjacent beaches, the salt marshes). The evolution to a change will always tend to restore a final equilibrium, which can be the original or a new one. This equilibrium will be a fluctuation with respect to an average situation, that settles down in a temporary scale of “long term” (order of tens of years).

In this work a long term “hybrid” model describing the estuary morphodynamic evolution is developed, named “boxes model” (each morphologic element of the estuary is outlined like a “Box”), applied to the estuarine system of “Rio Grande” in “Tierra del Fuego”, Argentina. These types of models inform on the time that passes from an alteration until the conditions of equilibrium in the estuary are recovered.

INTRODUCCIÓN

Los estuarios representan ambientes marinos con dinámica sedimentaria muy activa. Este hecho es debido a que en ellos coexisten oleaje, corrientes de marea y abundantes depósitos

de arena. Además, la variación del nivel del mar, originada por el ciclo de mareas, da lugar a la aparición e inundación de bajos que provocan variaciones de la línea de rotura del oleaje y un continuo cambio en la dirección e intensidad de la corriente mareal. Teniendo en cuenta que el oleaje y la corriente de marea interactúan mutuamente modificando la propia propagación, resulta evidente la grande complejidad de las dinámicas actuantes en estos ambientes marinos. Asimismo, la enorme variabilidad en estas dinámicas actuantes influye en la dinámica sedimentaria de las desembocaduras, dando lugar a un constante trasiego de sedimentos.

Cualquier modificación en el entorno del estuario, sea por intervención humana (como edificaciones en las playas adyacentes, dragados en las desembocaduras y en el estuario, rellenos en el estuario, o construcción de diques, espaldones, etc.), sea por eventos naturales de una cierta magnitud (como aluviones o temporales muy fuertes), provoca una respuesta de todos los elementos a este cambio. La evolución siguiente al cambio tenderá siempre a restablecer un equilibrio final, que puede ser el original o totalmente nuevo, en función de si el sistema pueda recuperarse (si hay suficiente material y tiempo a disposición para restablecer su equilibrio), o de si el cambio resulta permanente (en tal caso tenderá un nuevo equilibrio). En todos los casos la condición de equilibrio no se ha de entender como estática, sino como fluctuación respecto a una situación media o de “equilibrio dinámico”.

Esta condición de equilibrio dinámico es una situación que se establece en una escala temporal denominada de largo plazo (del orden de años, decenas de años). Asimismo, mientras el concepto de equilibrio se corresponde con la escala del largo plazo, el concepto de la variabilidad (las fluctuaciones alrededor de la condición media) se asocia a la escala del corto plazo (horas, semanas, diferencia invierno-verano).

Por lo tanto, para estudiar la respuesta del sistema a cualquier tipo de actuaciones, es importante entender tanto la dinámica en el corto plazo, por la enorme variabilidad de las dinámicas actuantes que pueden provocar fuertes oscilaciones alrededor de la posición modal, como en el largo plazo, para estimar el tiempo y la forma de la evolución hacia la posición de equilibrio medio modal. Asimismo, debido a que los estuarios han sido utilizados como puertos naturales desde los albores de la navegación, por el abrigo que ofrecen frente a la acción del oleaje, resulta evidente la importancia de estudiar la respuesta de los ambientes marinos mencionados a efecto de cambios morfológicos, como por ejemplo los dragados, tanto en el estuario como en la desembocadura, para el mantenimiento de un calado adecuado para la navegación. La evaluación de la funcionalidad de la entrada al puerto (desembocadura y canal de acceso) en función de la profundidad disponible es un punto dominante en la metodología, puesto que el diseño óptimo de la entrada, y los volúmenes del dragado, serán afectados directamente por la funcionalidad requerida para la navegación segura y las operaciones portuarias.

En este estudio se describe un modelo a largo plazo de la evolución, o “modelo de cajas” del estuario de Río Grande en Tierra del Fuego (Ar, Figura 1), requerido para determinar la evolución del tiempo del sistema hacia el equilibrio después de una perturbación inicial. El modelo se basa en una comprensión de toda la dinámica y procesos costeros implicados, e.g. ondas, corrientes, mareas, y el transporte correspondiente de sedimentos. Desde el punto de vista de la gestión portuaria, la metodología permite prever el impacto económico de mantener la funcionalidad de la entrada. Desde el punto de vista de la gestión costera, el modelo de cajas proporcionará la información necesaria para determinar el efecto

morfológico en las unidades sedimentarias.

En efecto, la posibilidad de crear una ampliación del puerto interior de Río Grande, que debe de contar con una infraestructura portuaria acorde que permita canalizar la demanda comercial de la región, hace necesario plantear un estudio de la morfodinámica del estuario. Por lo tanto, se darán indicaciones sobre como puede responder, a largo plazo (orden de años) el sistema estuarino a un eventual obra de dragado para mantener operativo el nuevo Puerto, y se definirá el estudio de detalle y el trabajo de seguimiento, necesarios para la gestión optima de las obras que se van a efectuar.



Figura 1. Ubicación del Estuario de Río Grande en Tierra del Fuego (Ar).

LOS ELEMENTOS MORFOLÓGICOS, LA DINAMICA SEDIMENTARIA EN UN ESTUARIO Y LA OPERATIVIDAD PORTUARIA

Los elementos morfológicos de un estuario

Las desembocaduras de sistemas fluviales, en su forma natural, generalmente se encuentran formadas por una o más aperturas, a través de las cuales fluye la marea y el caudal de un río. En algunas tipologías de estuarios, como en el caso de Río Grande, la desembocadura se encuentra flanqueada por un barra o saliente sedimentaria que puede formar un cordón litoral, o sistemas de dunas, de cierta importancia. Típicamente, este cordón litoral forma una playa en ambos lados de la desembocadura, que termina en un puntal característico.

Muchos estuarios presentan una configuración con elementos morfológicos característicos

similares que, en el caso de Río Grande, se presentan en la Figura 2. Resumiendo, las características morfológicas fundamentales son:

- La boca de la desembocadura. Este elemento se ubica siempre en la zona más protegida del oleaje, buscando de esta forma la salida más fácil. En efecto el oleaje representa una fricción añadida para la corriente que sale del río, y como todos los procesos de la naturaleza tienden a gastar la menor cantidad posible de energía, la zona de máximo ahorro se sitúa en la zona donde haya menor oleaje.
- Los bajos exteriores. Generalmente los bajos son tres: dos laterales y uno central denominado barra. En el caso de una desembocadura protegida en un lado por un cabo o un dique, estos bajos quedan reducidos a dos.
- Los bajos interiores. Estos bajos debidos al flujo y reflujo de la marea se forman generalmente en la parte interior del estuario, en las proximidades de la desembocadura.
- Un cordón litoral y playas adyacentes. Estas playas han ido formándose por el aporte sedimentario esencialmente debido al río y a los aportes de la dinámica litoral.

La forma que asume en el tiempo la desembocadura, tanto por eventos climatológicos transitorios (temporales, avenidas...), como en su situación natural, o de equilibrio, es el resultado del balance entre el aporte sedimentario y las corrientes. Asimismo, cada uno de los mecanismos que intervienen es producto de las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada desembocadura.



Figura 2. - Fotografía de la boca de la desembocadura de Río Grande con los elementos morfológicos característicos.

Los procesos en un estuario

Básicamente, se puede hablar de tres dinámicas que, por su importancia, son la que se observan en las mayorías de los casos:

- La marea
- El oleaje
- El río

En particular, la desembocadura se encuentra sujeta continuamente a la acción combinada de estas tres dinámicas. Por un lado, la marea transporta sedimento hacia el mar y hacia el interior del estuario. El río, por su parte, no sólo transporta sedimento hacia el mar, sino que introduce nuevo material al sistema. El oleaje, aporta sedimento de la playa adyacente, gracias al transporte longitudinal producido por la incidencia oblicua y la variación transversal de la altura de ola. A toda esta secuencia, se añade la complejidad de la interacción que existe entre cada una de las dinámicas.

Los cambios morfológicos se manifiestan a dos escalas temporales diferentes. Por un lado la desembocadura (por ejemplo) tiende a una situación natural, o de equilibrio, a largo plazo. Por otro lado existe siempre una variabilidad a corto plazo, debida a fenómenos meteorológicos aleatorios y temporáneos, como los oleajes debidos a temporales, o fuertes corrientes y aportes de sedimentos, debidos a avenidas del río. La condición de equilibrio es solamente una nuestra representación, puesto que el movimiento de sedimentos es continuo, pero oscila alrededor de un condición media natural.

Las escalas de tiempo asociadas al corto y largo plazo pueden variar, indicativamente, desde las horas o semanas (corto plazo), hasta decenas de años (largo plazo). En la definición de las escalas de tiempo, es importante observar que no todos los elementos morfológicos tienen la misma respuesta a un cambio impuesto a sus características sedimentarias (por obras de abrigo, dragados, rellenos en un estuario, etc.). Por ejemplo las dinámicas que actúan en la desembocadura provocan en ella cambios más rápidos de cuanto puedan las mismas dinámicas en un estuario.

Para todo ello, cuando se intervenga con obras, tanto en el estuario como en la desembocadura o en las playas adyacentes, es importante reconocer y distinguir las respuestas que los elementos morfológicos puedan ofrecer a éstas actuaciones. De otra forma, las consecuencias de un mal entendimiento de los procesos puede que haga resultar inútil o extremadamente costosas las eventuales obras de dragado, encauzamiento o relleno que se quieran efectuar tanto en la desembocadura como en el estuario o en las playas adyacentes.

La dinámica sedimentaria a corto plazo

La desembocadura es un elemento en el cual los procesos sedimentarios y erosivos dan lugar a una continua modificación de su geometría. Estos procesos actúan de una forma continua y la geometría de la desembocadura oscilará alrededor de una situación de equilibrio natural, siempre y cuando no intervengan modificaciones de los patrones de circulación del sedimento por causa antrópica. Al mismo tiempo, tanto los temporales estacionales como las avenidas de los ríos intervienen en estos procesos, alterando de una forma brusca y generalmente temporánea la morfología de la desembocadura.

En primera aproximación, se pueden describir los procesos sedimentarios en un estuario en función del estado de la marea: pleamar, máxima vaciante, bajamar y máxima llenante.

Pleamar: en situación de pleamar las corrientes mareales son nulas y la dinámica dominante es el oleaje. En general la rotura del oleaje provoca un transporte de arena en dirección longitudinal con respecto a una playa. En el caso particular de una desembocadura, que representa una discontinuidad en la línea de costa, el oleaje tenderá a cerrar el hueco que se ha generado. Este transporte procede principalmente desde el puntal de playa adyacente a la boca de la desembocadura. El material transportado a la bocana y, por lo tanto, la reducción de la sección de la misma, será tanto más importante cuanto mayor sea el oleaje existente siendo, consecuentemente, una magnitud variable que depende del clima marítimo de la zona.

Vaciante: al iniciarse la vaciante, comienza el predominio de las corrientes de marea que alcanza su máxima intensidad en el entorno de la media marea. Las corrientes de vaciante han ahora de atravesar una sección de la desembocadura que ha disminuido por efecto del transporte debido al oleaje, y alcanzarán mayores velocidades que tenderán a limpiar la bocana arrastrando el material hacia el exterior. En esta situación, dominando el “efecto chorro”, el material será depositado en los bajos laterales y en la barra central.

Bajamar: en situación de bajamar, las corrientes de marea vuelven a detenerse y el oleaje vuelve a ser la dinámica dominante. Este oleaje tenderá ahora a romperse en las proximidades de los bajos que quedan más expuestos por efecto de la bajamar, y generará una progresiva erosión de estas formas sedimentarias. El material erosionado de los bajos será transportado hacia la playa cerrándose así el ciclo.

Llenante: durante la llenante, la marea predomina nuevamente frente al oleaje, y las corrientes que se producen tienden a transportar material en el interior del estuario. En esta situación se manifiesta el efecto embudo que provoca acumulo de sedimento en las zonas de separación del flujo. Este fenómeno es la causa de la formación de los bajos interiores. Por lo tanto, las dinámicas del oleaje y de la marea interactúan continuamente en la definición de la forma de la desembocadura y de los bajos, por el cíclico intercambio de material entre bocana-bajos-playa que provocan.

El ciclo de transporte de sedimentos descrito anteriormente se ve afectado por las situaciones climatológicas existentes. En general, durante el invierno, cuando predomine la acción del oleaje debido a los temporales, la playa adyacente a la bocana se erosiona y acumula material en forma de barra en el perfil sumergido. En la desembocadura, sin embargo, la preponderancia del oleaje genera una acumulación de material que tiende a cerrarla. Durante el verano, en ausencia de temporales, la playa recupera el material en la berma, mientras que la desembocadura es erosionada por efecto de las corrientes mareales.

La evolución a largo plazo

Como se ha visto en el apartado anterior, la forma de una desembocadura se encuentra en un estado de equilibrio dinámico, oscilando alrededor de una situación media, y presentando una cierta variabilidad en los elementos morfológicos, como la barra, los bajos mareales, la playa adyacente y la canal. La “estabilidad dinámica”, es una característica de las desembocaduras que se ha constatado en estuarios de todo el mundo.

Varios autores han estudiado estas “morfologías medias”, encontrando relaciones empíricas entre dichas morfologías y algunos parámetros de estuario. Así por ejemplo:

1) El área de la sección transversal de la desembocadura es función del prisma de marea del Estuario (O'Brien, 1969):

$$Ac = 6,65 \cdot 10^{-2} \Omega; \quad \text{para desembocaduras sin diques}$$

$$Ac = 4,063 \cdot 10^{-2} \Omega; \quad \text{para desembocaduras con diques}$$

donde:

Ac es el área de la sección transversal de la desembocadura en media marea (km^2), y Ω es el prisma de marea correspondiente a una marea viva (km^3).

La sección transversal Ac representa el área crítica correspondiente al caudal máximo de llenante o de vaciante. La sección no podrá ser menor que Ac, ya que la velocidad de la corriente se incrementaría erosionando el sedimento y recuperando la sección de equilibrio, y tampoco podrá ser mayor que Ac, puesto que la velocidad de la corriente mareal disminuiría, depositándose sedimento y nuevamente recuperando el área de equilibrio. Por lo tanto, a largo plazo la desembocadura tiende a presentar una situación de equilibrio dinámico.

2) El Volumen de arena de los bajos mareales exteriores es función del prisma de marea (Walton y Adams, 1976). Entre todas las formulaciones existentes, se proporcionan las relaciones propuestas por los dos autores mencionados:

$$V = 64,4 \cdot 10^{-4} \Omega; \quad \text{para oleaje moderado}$$

$$V = 53,33 \cdot 10^{-4} \Omega; \quad \text{para oleaje fuerte}$$

donde:

V es el volumen de arena de los bajos exteriores (m^3), Ω es el prisma de marea (m^3).

3) La forma de los bajos mareales exteriores es función de la geometría de la costa y del oleaje existente (Hicks y Hume, 1996).

4) El área de los bajos interiores (marismas) es función del área total del estuario (Renger y Partensky, 1974).

5) El volumen de agua de los canales de un estuario por debajo del nivel medio del mar es función del prisma de marea (Eysink, 1990):

$$\text{VMSL} = 65 \cdot 10^{-6} \Omega^{1,5};$$

donde VMSL es el volumen de los canales mareales en media marea (m^3).

Estas relaciones han sido verificadas en muchos casos en todo el mundo. Por ejemplo en el caso del estuario de Santander (España) los rellenos interiores que han ocupado casi la mitad de su superficie han conducido reducciones notables de la sección de canales de navegación, rindiendo necesarias periódicas e importantes obras de dragado en la desembocadura para mantener su navegabilidad.

Estas relaciones de equilibrio permiten llegar a dos conclusiones principales:

- 1) Si se modifican los parámetros del estuario se producirá un cambio en las formas de equilibrio de la desembocadura.
- 2) Si se alteran las formas de equilibrio de la desembocadura pero no se alteran los parámetros del estuario, la desembocadura tenderá a restablecer sus formas de equilibrio.

Para que estas conclusiones sean correctas, debe ocurrir, además, que el sistema disponga de material suficiente para realizar los cambios oportunos en la morfología.

Las fuentes de aporte de sedimentos en una desembocadura

A este punto es necesario evidenciar cuales son las posibles fuentes de material, de tal forma se podrán entender como y porqué un sistema reacciona a cambios morfológicos debidos, por ejemplo, a obras de dragado o a la construcción de espigones para proteger la entrada de una desembocadura y favorecer la navegación en su interior.

La primera fuente que aporta el material es, sin duda, la playa adyacente a la desembocadura. El transporte de sedimentos es debido a las corrientes longitudinales impuestas por la rotura del oleaje. El oleaje actúa tanto como elemento que pone en suspensión el material, por las variaciones de presiones que el paso del cavo y de la cresta del onda forman en la columna vertical, y por las turbulencias que crea a la rotura, y como agente de transporte del mismo por las corrientes longitudinales que se genera también por su rotura. Estos fenómenos no se establecen en un zona fija, sino se manifiestan en un zona, que varía en función del oleaje mismo, donde el movimientos ondoso hace sentir su influencia, y de la marea. Se suele delimitar esta zona donde existe transporte con la profundidad h^* (profundidad de cierre, o profundidad hasta donde existe transporte de sedimentos que modifica el perfil de playa), que depende del clima a que está sometido el paraje y del tamaño del sedimento. Por lo tanto una obra transversal que quisiera interrumpir totalmente el transporte procedente de una playa, tendría que extenderse hasta esta profundidad.

La segunda fuente de sedimento es la cuenca fluvial y el estuario interior. El verificarse de una riada puede causar fuertes aportes de material que generan barras que pueden permanecer durante años.

La tercera fuente de material al sistema es el mar exterior. Si no hubiese desembocadura, el mar exterior tendería a formar una playa con sus perfiles transversales variables en función del clima marítimo. Lo mismo ocurriría en las proximidades de la desembocadura, pero en este caso el mar no puede formar una playa por la aparición de una discontinuidad creada por la salida del río. En la zona de unión de estos dos elementos se forma, por lo tanto, una barra. En las proximidades de esta barra el oleaje se peralta y puede romper aumentando su capacidad de transporte de este material acumulado hacia el interior del estuario.

La operatividad portuaria

La profundidad del agua en la entrada es uno de los factores principales que controlan el acceso a un puerto. Por un lado, hay una profundidad mínima del canal (h_N) requerida para una nave dada para entrar con seguridad. Esta profundidad es el resultado de considerar el bosquejo de la nave, la separación inferior de la quilla que corresponde a las características del cargamento y el material del fondo, y la respuesta dinámica del barco a las ondas y al

desplazamiento. Por otra parte, la profundidad disponible del agua en un cierto momento (h_D) es el resultado de la profundidad de referencia mínima, de las mareas astronómicas y del oleaje de tormenta (Figura 3). La reacción dinámica del barco es uno de los aspectos más difíciles a considerar en el cálculo de la profundidad requerida, puesto que es el resultado del desplazamiento del casco y la acción de la onda (WICHERS, 1992). Para un barco asignado, hay un porcentaje de la hora donde el canal puede ser atravesado, es decir será operacional.

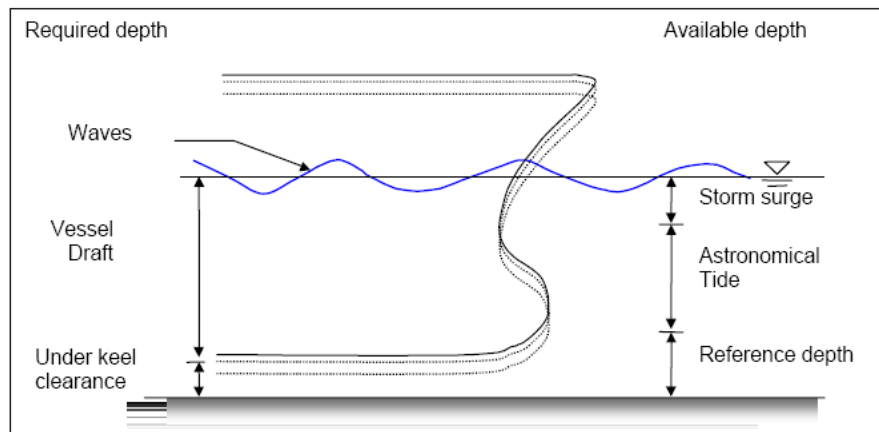


Figura 3.- Definición de la profundidad disponible (a la derecha) y necesaria (a la izquierda) en un canal.

Hay algunos factores secundarios que pueden controlar la profundidad requerida, e.g. el ángulo relativo entre el barco y las ondas, la anchura de la entrada, el viento o las corrientes. Como primera aproximación, puede ser considerado que la máxima subida y bajada será igual a la amplitud de la onda; por lo tanto la función de la probabilidad de este movimiento representará la misma distribución de las ondas. Finalmente, la profundidad disponible también dependerá de una serie de parámetros que varíe con tiempo, entonces, desde el punto de vista de la navegación, h_D seguirá una función de la probabilidad (Medina et al., 1998). Según lo mencionado arriba, la función de la probabilidad de la profundidad disponible será utilizada conjuntamente con la función de la probabilidad de la profundidad requerida para computar la funcionalidad de la entrada.

La funcionalidad de la entrada representa la ocasión que un barco asignado podrá entrar en el puerto bajo algunas condiciones oceanográficas en un cierto momento; es decir la entrada será operativa cuando la profundidad disponible es más grande que la profundidad requerida ($h_N > h_D$). La profundidad mínima del agua, es decir la profundidad de referencia en la Figura 3, es típicamente un parámetro que puede ser modificado (e.g. dragando), aumentando la funcionalidad de la entrada. Por lo tanto, se puede construir para cada barco una curva para diversos panoramas de dragados del canal contra la funcionalidad correspondiente de la entrada (Figura 4). En esta curva, la profundidad mínima de diseño se puede obtener dada una funcionalidad deseada y viceversa. Así, la profundidad de referencia será la profundidad de diseño de la entrada.

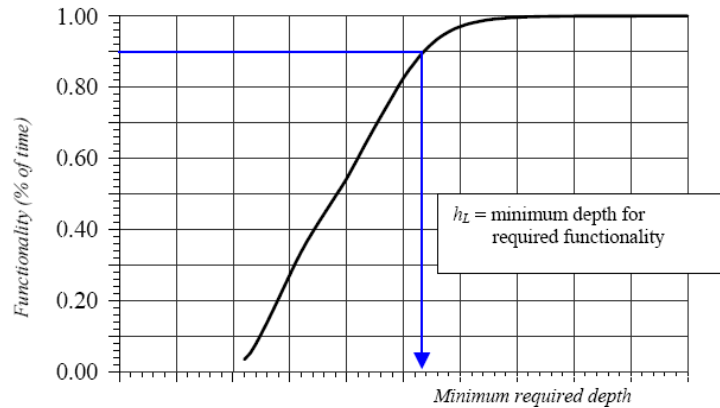


Figura 4.- Funcionalidad adversus Profundidad de la Canal para el barco de diseño.

La profundidad de diseño obtenida corresponde a los requisitos del barco y no tiene correspondencia con la profundidad del equilibrio de la naturaleza. Típicamente, ambas profundidades son diferentes y el problema se presenta cuando la profundidad del equilibrio es más pequeña que la profundidad requerida, en tal caso se draga el canal del acceso. Ésta es, otra vez, la definición de la interferencia navegación-sedimentación entre un puerto y la entrada.

LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO DE UNA DESEMBOCADURA

El problema del estudio de la evolución a largo plazo consiste en determinar el tiempo y la forma en que la desembocadura y los otros elementos sedimentarios tenderán al equilibrio a consecuencia de un desequilibrio inicial (un dragado por ejemplo). Básicamente existen tres formas para modelar la morfología de una desembocadura a largo plazo:

Los modelos de escalas agregadas: se calculan los procesos sedimentarios en función de la dinámica presente, y se integran los resultados sobre una escala temporal mayor. Este procedimiento tiene el problema de la no linealidad de las interacciones entre los procesos, en particular se evidencian efectos no lineales debidos a:

- interacción ola-corriente;
- la batimetría evoluciona en el tiempo y modifica el oleaje y los patrones de circulación;
- el oleaje es un fenómeno aleatorio;
- las formulaciones del transporte de sedimento son no-lineales;

Con todo esto se observa la importancia que tiene el conocimiento de la secuencia con la cual se manifiestan los fenómenos para poder aplicar estos tipos de modelos. Por lo tanto, la utilización de estos modelos se hace todavía demasiado dispendiosa en término de tiempos computacionales y de capacidad de cálculo de los ordenadores actuales.

Los modelos basados en relaciones empíricas: se emplean relaciones empíricas que relacionan la morfología con algunos parámetros representativos del estuario.

Los modelos híbridos: se emplea un modelo híbrido de los dos anteriores (Van De Kreeke, 1996), donde por ejemplo, el transporte longitudinal y transversal, producto de la acción del oleaje, puede calcularse empleando un modelo hidrodinámico.

Al objeto de determinar la evolución de la morfología de equilibrio, se han desarrollado en los últimos años una serie de modelos híbridos de evolución de largo plazo que, desde un punto de vista de macroescala (o largo plazo), utilizando las formulaciones de equilibrio y el conocimiento de los patrones de circulación a corto plazo, informan sobre el tiempo que transcurre desde la realización de una alteración hasta que las condiciones de equilibrio son recuperadas (por ejemplo: De Vriend, Bakker y Viles, 1994; Medina y Lomónaco, 1998).

Básicamente estos modelos de evolución realizan un balance sedimentario entre el volumen de material que llega a la desembocadura y el material que la desembocadura exporta a los elementos morfológicos contiguos: bahía interior, mar exterior y playa adyacente. Este balance se basa en la suposición que el volumen de erosión sea inversamente proporcional al grado de inestabilidad de la desembocadura, es decir, cuanto más cerca esté la desembocadura al equilibrio, mayor será la cantidad de sedimento que se exporta a las unidades morfológicas adyacentes. En una escala temporal de largo plazo, correspondiente a la evolución de la desembocadura hacia el equilibrio, esta distribuye el volumen de sedimento que recibe, depositándolo en el fondo, con lo que parte se verá afectado por el oleaje y las corrientes, siendo transportado de nuevo a la playa o en el interior del estuario. El volumen de sedimento que permanece es, por lo tanto, una fracción del que se deposita originalmente.

En una unidad de tiempo (mes, semestre) la desembocadura recibe una cantidad de material, V_D , de la Bahía (V_B), del mar (V_M), y de la playa (V_P):

$$V_D = V_B + V_M + V_P$$

En esa unidad de tiempo, la desembocadura reordena ese volumen de arena en los bajos, por lo que el material queda bajo la acción del oleaje y las corrientes de marea y es transportado de vuelta a la playa o a la bahía. El esquema del intercambio de material se representa en la Figura 5. El volumen de arena que realmente permanece en la desembocadura es, por lo tanto, una fracción del inicialmente depositado:

$$V_D = \alpha_B V_B + \alpha_M V_M + \alpha_P V_P$$

Nótese que, una vez conocida la evolución temporal de V_B , V_M , V_P , α_B , α_M y α_P queda determinada la evolución de V_D y, por lo tanto, la evolución del calado en la desembocadura, h . En la Figura 6 se representa un ejemplo de cómo evoluciona el calado en una sección de la desembocadura aplicando este tipo de modelo.

En este estudio, se plantea un modelo de evolución de largo plazo para una desembocadura, que se basa en el esquema de los modelos híbridos. A diferencia de los modelos híbridos, donde el transporte longitudinal y transversal, producto de la acción del oleaje, puede calcularse empleando un modelo hidrodinámico, el cálculo del transporte sedimentario, necesario para efectuar la calibración, se realizará a partir de los datos disponibles y los estudios precedentes (LH, 2005; Bujalesky G. G., 1999).

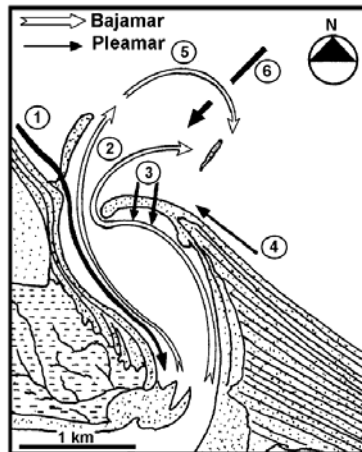


Figura 5.- Elementos morfológicos de Río Grande utilizados como punto de partida para el modelo de largo plazo (Bujalesky, 1997a).

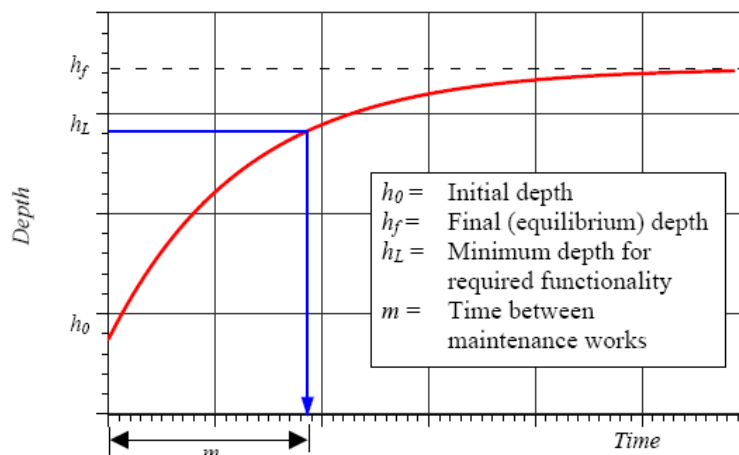


Figura 6.- Evolución de la profundidad, en una desembocadura, respecto al tiempo.

EL MODELO DE CAJAS PARA RIO GRANDE

Introducción

El modelo de cajas es la evolución de una versión presentada en Medina et al. (1998), que fue basado en los conceptos fundamentales ilustrados en De Vriend et al. (1994). El modelo, y algunas otras versiones equivalentes (Kraus, 2000), se ha aplicado con éxito en varios estuarios (véase por ejemplo Medina et al., 1998; Kraus, 2001; Lomónaco et al., 2003, Gyssels, P., 2003). En la mayoría de estos ejemplos, las relaciones empíricas y los datos medidos se han aplicado, demostrando el funcionamiento del modelo. Para todos los detalles en cómo describir las unidades morfológicas de una desembocadura, así como el uso y la calibración correspondientes del modelo, véase Lomónaco et al. (2003) o Kraus (2001).

En un paso de tiempo de largo plazo (de un mes en este caso), la unidad sedimentaria organiza el volumen de la entrada, así el sedimento que permanece realmente es una fracción del depositado originalmente. Finalmente, el volumen del equilibrio de cada unidad sedimentaria se considera ser constante a través del tiempo.

De acuerdo con todas las asunciones mencionadas, el modelo de la evolución de largo plazo se puede representar como serie de cajas interconectadas. Cada caja es una unidad sedimentaria y las conexiones entre ellas representan el flujo del sedimento. Es importante observar que el modelo, según lo descrito aquí, puede ser aplicado a cualquier sistema morfológico, e.g. la playa, los meandros del río, las dunas de arena, etc.

El modelo de cajas se basa en la asunción que el estuario, y sus elementos (es decir la desembocadura, las marismas de marea, el bajo exterior y las playas adyacentes) tenderán a una condición natural de equilibrio. La estabilidad dinámica, con una morfología media, es una característica de las desembocaduras que ha sido medida en muchos casos en el mundo.

Una vez que el modelo haya sido calibrado con datos de campo (en este caso con datos bibliográficos de Bujalesky, 1997a), puede ser aplicado en diferentes configuraciones para determinar el efecto del mantenimiento de dragado, o la influencia de aumentar la longitud de un dique de protección. Desde el punto de vista de optimizar el diseño, el modelo puede proporcionar una base para la mejor combinación del dragado del mantenimiento, de la ampliación del dique y de la alimentación de la playa, buscando el menor impacto morfológico. Por estas razones, el modelo se convierte en una herramienta para diseñar el canal de la navegación, puesto que la profundidad mínima óptima en la entrada será un compromiso de la funcionalidad requerida, del mantenimiento factible de dragado, de la ampliación del eventual dique y del efecto morfológico sobre las playas adyacentes.

Hipótesis

El esquema del modelo se presenta en la Figura 7. A continuación, se definen las cajas elegidas; el primer desarrollo del modelo conlleva a definir el intercambio de material en tres elementos característicos: el elemento desembocadura (Nº2); el elemento Puntal (nº3), y el elemento Playa Litoral Sur (nº4). Este planteamiento ha sido pensado para futuras mejoras del esquema que incluyan la Playa Litoral Norte (nº1) y el Estuario Interior (nº5).

1. Caja Playa Litoral Norte
2. Caja Desembocadura
3. Caja "Puntal"
4. Caja Playa Litoral Sur
5. Caja Estuario Interior
6. Caja Mar Exterior

Este modelo se basa en tres hipótesis fundamentales:

- 1) El volumen de material en la situación de equilibrio es una constante del sistema, eso quiere decir que la situación de equilibrio que se ha determinado es una característica invariable;
- 2) Se han identificado unas formas morfológicas que evolucionan según patrones de transporte pre-establecidos;
- 3) Cada elemento morfológico tiene su propia situación de equilibrio invariable (con un volumen de equilibrio V_{eq});

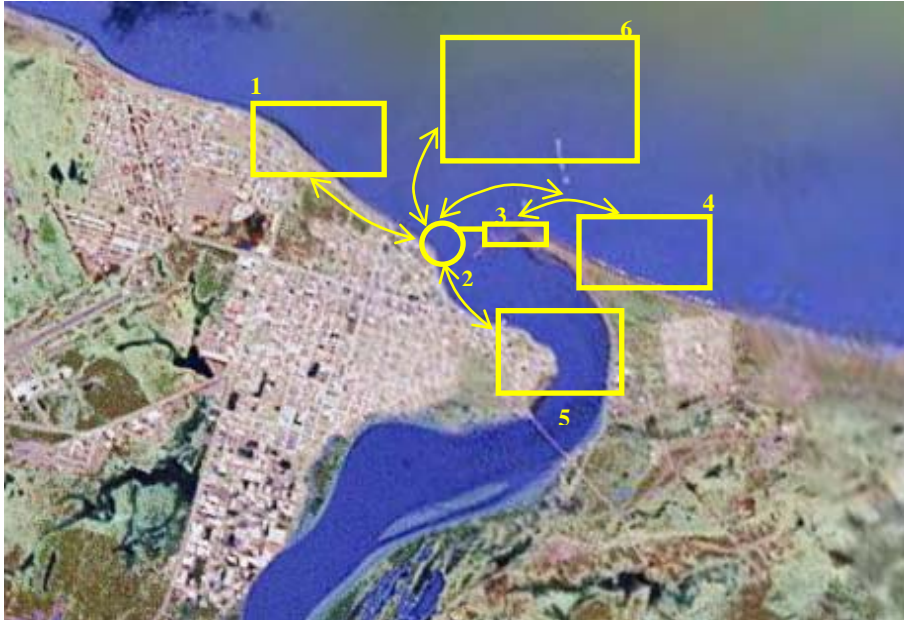


Figura 7. Definición de los elementos morfológicos o cajas en el caso de Río Grande.

Las otras hipótesis particulares son:

1. La cantidad de material saliente de la caja desembocadura disminuye cuanto más alejada esté del equilibrio, siendo máxima al equilibrio.

$$Q_e = Q_{e,eq} \frac{V_e}{V_{e,eq}} \quad (1)$$

2. La cantidad de material saliente de la playa de adyacente o puntal disminuye cuanto más alejada esté del equilibrio, siendo máxima al equilibrio.

$$Q_p = Q_{p,eq} \frac{V_p}{V_{p,eq}} \quad (2)$$

3. La cantidad de material que sale de la playa litoral sur depende de cuan lejos esté del equilibrio tanto de la misma playa como de la playa adyacente o puntal, siendo cero cuando ambas se encuentren en equilibrio.

$$Q_c = Q_{ck} \left(\frac{V_c}{V_{c,eq}} - \frac{V_p}{V_{p,eq}} \right) \quad (3)$$

4. Los aportes que se quedan en la desembocadura, tanto desde el mar abierto como del interior de la ría, dependen linealmente de cuan lejos esté la desembocadura del equilibrio, siendo cero cuando esta se encuentre en equilibrio.

$$Q_M = Q_m \left(1 - \frac{V_e}{V_{e,eq}} \right) \quad Q_R = Q_r \left(1 - \frac{V_e}{V_{e,eq}} \right) \quad (4)$$

5. En el equilibrio, los caudales procedentes de la playa del puntal y de la desembocadura coinciden.

$$Q_{e,eq} = Q_{p,eq} \quad (5)$$

6. Existe una relación exponencial entre los volúmenes de la desembocadura y los calados en las secciones de la bocana.

$$V_e = a \cdot \exp(b \cdot h) \quad (6)$$

7. Se han considerado relaciones lineales entre los volúmenes de la playa puntal y de la playa litoral sur, con la posición de las mismas playas.

$$V = a_1 \cdot x + b_1 \quad (7)$$

Modelo numérico

En este apartado se presentan las ecuaciones que describen las variaciones en el tiempo de los volúmenes de arena en la desembocadura, en la playa adyacente, y en la playa central. Las ecuaciones se basan en un balance sedimentario entre el material entrante y saliente en cada elemento morfológico. En este planteamiento es necesario determinar previamente los volúmenes de equilibrio de la desembocadura y de las playas ($V_{e,eq}$, $V_{p,eq}$, $V_{c,eq}$).

- Variación de volumen en la playa adyacente a la desembocadura:

$$\frac{dV_p}{dt} = \underbrace{Q_{e,eq} \frac{V_e}{V_{e,eq}} + Q_c + \alpha_2 Q_1 \left(1 - \frac{V_e}{V_{e,eq}}\right)}_{Q \text{ entrante}} - \underbrace{Q_{p,eq} \frac{V_p}{V_{p,eq}}}_{Q \text{ saliente}} \quad (8)$$

El material entrante procede de la desembocadura, de la playa litoral norte, de la playa litoral sur, y el material saliente se desplaza hacia la desembocadura.

- Variación de volumen en la desembocadura:

$$\frac{dV_e}{dt} = \underbrace{Q_{p,eq} \frac{V_p}{V_{p,eq}} + Q_{rr} + Q_{rm} + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) Q_1 \left(1 - \frac{V_e}{V_{e,eq}}\right)}_{Q \text{ entrante}} - \underbrace{Q_{e,eq} \frac{V_e}{V_{e,eq}}}_{Q \text{ saliente}} \quad (9)$$

El material entrante procede del puntal, de la ría, del mar, y de la playa litoral norte, mientras que el material saliente se desplaza hacia la playa adyacente.

- Variación de volumen de sedimento en la playa litoral sur:

$$\frac{dVc}{dt} = -Qck \quad (10)$$

- Variación de volumen de sedimento en el interior del estuario:

$$\frac{dVr}{dt} = \alpha_1 Q_1 \frac{Ve}{Ve,eq} - Qrr - Qrm \frac{Vr}{Vr,eq} \quad (11)$$

El material entrante procede de la playa litoral norte, mientras que el material saliente se desplaza hacia la desembocadura y hacia el mar abierto. El material que se draga o se inserta artificialmente, se impone en las condiciones iniciales.

El aporte procedente de la playa litoral norte (Q_1) entra en la desembocadura, y en gran parte la atraviesa para adentrarse en el estuario interior. Por lo tanto en la caja desembocadura, el volumen desde este elemento aumenta de una cantidad 1 que se ve disminuida por la cantidad que se dirige al interior (α_1) y por la cantidad que desde la desembocadura se dirige hacia los bajos exteriores (α_2). Por otro lado en el puntal, por acción del oleaje, el aporte se ve incrementado por la cantidad $\alpha_2 Q_1$.

La estimación (calibración) de estos nuevos parámetros ha de efectuarse a través de medidas de campo que se discutirán en otros apartados.

Hipótesis

1. el paso de tiempo es de 1 mes
2. $\alpha_1 = 80\%$; $\alpha_2 = 10\%$
3. $Vcq = 1,6 Vpq$ (Vcq : Volumen de equilibrio de la Playa Litoral Sur; Vpq : Volumen de equilibrio del Puntal)
4. Qe,eq = estimado analizando otros casos
5. $Qp,pq = Q_3/12$ (Tabla 1)
6. $Qck = Q_4/12$ (Tabla 1)
7. $Q_1 = Q_1/12$ (Tabla 1)
8. $heq = -4m$ (del estudio de equilibrio)

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de la evolución en el tiempo estimada de la desembocadura, de la playa puntal, de la playa litoral sur, y de la ría interior hacia el equilibrio, a consecuencia de una obra de dragado en la desembocadura y en el río interior, y con eliminación del sistema del material dragado. Se define el momento en que se vuelve al equilibrio cuando se recupera el 95% de la situación inicial con respecto a la diferencia inicial de volúmenes de arena. Se observa que, con las hipótesis anteriormente descritas, la desembocadura vuelve al equilibrio en aproximadamente 21 meses y la ría interior en 98 meses (Figura 8).

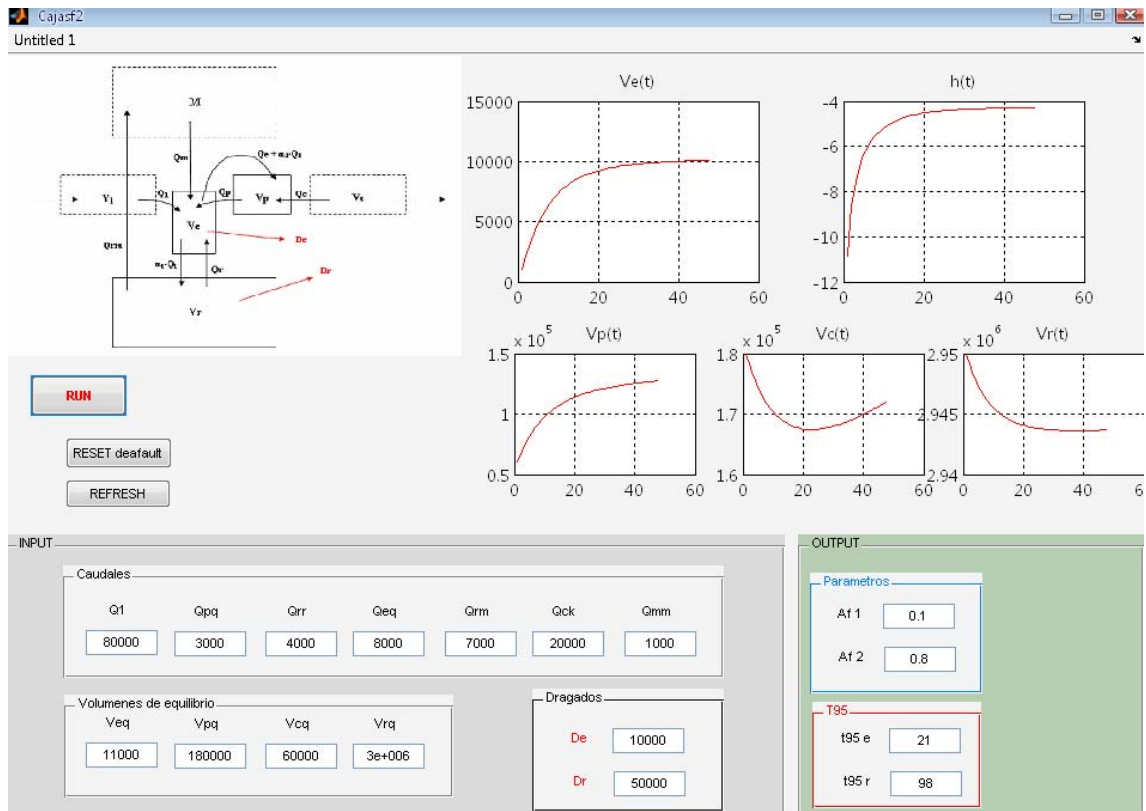


Figura 8. Estima de la evolución en el tiempo de los volúmenes de la desembocadura (V_e), de la playa puntal (V_p), de la playa litoral sur (V_c), y del estuario interior (V_r), después de un dragado en la desembocadura (D_e) y en interior (D_r), en el sistema estuarino de Río Grande.

Resultados

Datos de ingreso:

Dragado en la desembocadura de 10.000 m^3
 Dragado en el río interior de 50.000 m^3

Calibración:

$\alpha_1 = 0,1$;
 $\alpha_2 = 0.8$

Tabla 1. Caudales de arena procedentes de la calibración ($\text{m}^3 \cdot \text{mes}^{-1}$).

Q_1	$Q_{p,eq}$	Q_{rr}	$Q_{e,eq}$	Q_{rm}	Q_{ck}	Q_{mm}
80.000	3.000	4.000	8.000	7.000	20.000	1.000

Tabla 2. Volumenes de arena al equilibrio (m^3).

$V_{e,eq}$	$V_{p,eq}$	$V_{c,eq}$	$V_{r,eq}$
11.000	180000	60000	300.000

Tiempos de vuelta al equilibrio:

Río: $T_{95,r} = 98$ meses
 Desembocadura: $T_{95,d} = 21$ meses

Es importante evidenciar que este resultado es solamente una primera aproximación para mostrar las potencialidades del modelo de cajas, y que es necesaria una serie de campañas de campo para poder calibrar el modelo. A continuación se presenta una descripción de las medidas necesarias.

CONCLUSIONES

Ha sido desarrollado un modelo de evolución a largo plazo para el estuario de Río Grande y las playas adyacentes. El modelo es una evolución del modelo de caja presentado por Lomónaco et al. (2003), y describe la evolución morfológica de cada unidad sedimentaria. Una vez que el modelo se pueda calibrar con medidas de campo (batimetrías periódicas), puede aplicarse para predecir los efectos de un dragado o de un relleno. En el caso en examen, no disponiendo de medidas de campo, se ha calibrado con los datos de Bujalesky (1997a); y de campañas de campo efectuadas por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba (2005).

Desde el punto de vista del diseño óptimo de mantenimiento de la desembocadura o de la canal de acceso a un puerto, el modelo puede facilitar la mejor combinación de obras de dragado, regeneración de playas y diseño de estructuras en el interior o exterior del estuario, para minimizar el impacto morfológico (por ejemplo las pérdidas de playas), y optimizar el esfuerzo de dragado (definiendo el mejor intervalo entre dragados y la cantidad a dragar).

Se ha presentado un ejemplo de cálculo para determinar el tiempo de vuelta al equilibrio de los elementos morfológicos del sistema después de una operación de dragado en el interior del estuario y en la desembocadura.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a, b: coeficientes de la relación exponencial entre volúmenes y calados de la desembocadura
- a1, b1: coeficientes de la relación lineal entre volúmenes y posición de la playa
- Ac: Área sección transversal de una desembocadura
- α_1 : porcentaje del caudal procedente de la playa litoral norte que se dirige en el interior del estuario
- α_2 : porcentaje del caudal procedente de la playa litoral norte que se dirige fuera del estuario
- α_B : fracción del material procedente de la Bahía
- α_M : fracción del material procedente del mar
- α_P : fracción del material procedente de la playa
- h: calado en la desembocadura
- h_{eq} : calado de equilibrio de la desembocadura
- h_i : calado inicial en una desembocadura después de un dragado
- h_{min} : la mínima profundidad de la entrada (profundidad de dragado de diseño)
- h_N : profundidad mínima del canal
- h_D : profundidad de referencia mínima
- Ω : prisma de marea
- Op (h_{min}): funcionalidad de la entrada portuaria (operatividad)
- Qe: caudal de sedimento saliente de una desembocadura
- Qe,eq: caudal de sedimento de equilibrio saliente de una desembocadura (modelo)
- Qc: caudal de sedimento saliente de una playa litoral
- Qck: caudal de arena de equilibrio saliente de una playa litoral (modelo)
- QM: caudal de arena desde el mar
- Qm: caudal de arena de equilibrio desde el mar

Q_p : caudal de arena de equilibrio saliente de una playa
 $Q_{p,eq}$: caudal de sedimento de equilibrio saliente de una playa (modelo)
 Q_R : caudal de arena desde el río
 Q_r : caudal de arena de equilibrio desde el río (modelo)
 Q_{rr} : caudal de arena de equilibrio desde el río interior hacia la desembocadura (modelo)
 Q_{rm} : caudal de arena de equilibrio desde el río interior hacia el mar abierto (modelo)
 Q_1 : caudal de arena procedente de la playa litoral norte (modelo)
 Q_2 : caudal de arena procedente de la desembocadura
 Q_3 : caudal de arena procedente de la playa del puntal
 Q_4 : caudal de arena procedente de la playa litoral sur
 V : volumen de arena de los bajos mareales
 V_D : volumen de material en una desembocadura
 V_B : volumen de material en una bahía
 V_c : volumen de arena en la playa litoral sur (modelo)
 $V_{c,eq}$: volumen de equilibrio en la playa litoral sur (modelo)
 V_e : volumen de arena en la desembocadura (modelo)
 $V_{e,eq}$: volumen de equilibrio en una desembocadura (modelo)
 V_{eq} : volumen de equilibrio
 V_p : volumen de arena en una playa
 $V_{p,eq}$: volumen de equilibrio en la playa del puntal (modelo)
 V_M : volumen de material en el mar
 V_P : volumen de material en una playa
 V_{MSL} : volumen de agua de los canales de un estuario por debajo del nivel medio del mar

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bujalesky, G.G.** (1997a). “Erosión costera en el acantilado de Cabo Domingo, Tierra del Fuego”, Informe técnico para la UTE ORMAS S.A.I.C.I.C. – CONVIC ENGENHARIA S.A.
- Bujalesky, G.G.** (1999). *La costa de Tierra del Fuego, Argentina*. Centro Austral de Investigaciones Científicas (CONICET) Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.
- De Vriend, H.J., Bakker, W.T. And Bilsse, D.P.** (1994). “A morphological behaviour model for the outer delta of mixed-energy tidal inlets”, *Coastal Engineering* 23, pp. 305-327.
- Eysink, W.D.** (1990). “Morphologic response of tidal basin changes”, *Proc. 22nd Coastal Eng. Conference*, Vol. II, pp. 1948-1961.
- Hicks, D.M. And Hume, T.M.** (1996). “Morphology and size of ebb tidal deltas at natural inlets on open-sea and pocket bay coasts, North Island, New Zealand”, *Journal of Coastal Research*, 12(1), pp. 47-63.
- Kraus, N.** (2000). “Reservoir model of ebb-tidal shoal evolution and sand bypassing”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 126(6), pp. 305-313.
- Kraus, N.** (2001). “On Equilibrium Properties in Predictive Modeling of Coastal Morphology Change”, *Proc. Coastal Dynamics '01*, ASCE, 1-15.

Laboratorio de Hidráulica (2005). “Anteproyecto ejecutivo ampliación del puerto de Río Grande, Tierra del Fuego”. *Informe Preliminar*.

Lomonaco, P., Medina, R. and Losada, M.A. (1999). “Un modelo de evolución a largo plazo de desembocaduras: aplicación al diseño de canales de navegación” *Proc. V Jornadas Españolas de Ingeniería de Puertos y Costas*. La Coruña, España.

Lomónaco, P., Medina, R., Gyssels, P., and Vidal, C. (2003). “Application of a long-term morphologic evolution model to the plencia tidal inlet and its adjacent beaches”, *Proc. 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. ISBN 90-805649-6-6. Vol. I, pp. 401-413.

Medina, R., Losada, M.A., Lomonaco, P., 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 Coastal Eng. Conference*, Vol. III, pp. 3293-3306.

O’brien, M.P. (1969). “Estuarine tidal prism related to entrance areas”, *Coastal Engineering* 1, pp. 738-739.

Renger, E, y Partenscky, W. (1974). “Stability criteria for tidal basins”, *Proc. 14th, Coastal Eng. Conf.* ASCE. 1605-1618.

Van De Kreeke, J. (1996). “Morphological changes on a decadal time scale in tidal inlets: modelling approaches”, *Journal of Coastal Research*, 23, pp. 73-81.

Walton, T.L., and Adams, W.D. (1976). “Capacity of inlet outer’s bars to store sand”, Chapter 112, *Proceedings, Fifteenth International Conference on Coastal Engineering*, American Society of Civil Engineers, Honolulu, HI, p 1919-1937.

Wichers, J.E.W. (1992). “Wave frequency ship/semi submersible motions. Moored vessel motions: wave drift forces”, *Ocean Engineering Lecture Notes*, IHE/MARIN, The Netherlands.