

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL VOLUMÉTRICO A LO LARGO DE UN ESTUARIO CON ONDA DE MAREA ESTACIONARIA

FLOW CALCULATION IN A STANDING TIDAL WAVE ESTUARY

L. P. Thomas^{*1} y B. M. Marino¹

¹Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Prov. Buenos Aires (CIFICEN), UNCPBA – CONICET, Pinto 399 – (7000) Tandil – Argentina.

Recibido: 15/10/21; Aceptado: 25/04/22

Se estudia analíticamente y numéricamente el comportamiento hidrodinámico del estuario micromareal del río Quequén Grande con onda de marea estacionaria y 13.9 km de extensión. Los resultados proporcionados por el modelo numérico SisBaHiA (*Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental*) son validados por las mediciones efectuadas con dos correntómetros acústicos Doppler en estaciones de medición ubicadas a 1.4, 2.9, 7.5 y 11.3 km de la boca del estuario. El modelado numérico reproduce las diferencias entre la altura de la columna de agua medida y la altura de equilibrio en cada estación. En particular, los valores numéricos del caudal y el nivel mareal se analizan durante un ciclo en sicigia considerando nueve tiempos correspondientes a niveles de altura máximos, mínimos y cercanos al de equilibrio. Las variaciones temporales de altura del nivel del agua y del caudal a lo largo del estuario son explicadas satisfactoriamente por un modelo analítico, basado en las ecuaciones unidimensionales de Saint Venant, en función de la descarga fluvial y el nivel mareal en la desembocadura, y las pendientes de fondo y rozamiento.

Palabras Clave: caudal, estuarios, onda de marea estacionaria.

The hydrodynamic behaviour of the micro tidal and 13.9-km-long Quequén Grande River estuary (Buenos Aires, Argentina), in which the tide behaves as a standing wave, is studied analytically and numerically. Results provided by the SisBaHiA program are validated with the measurements performed with two acoustic Doppler current profilers in stations located at 1.4, 2.9, 7.5 and 11.3 km from the estuary mouth. The numerical model reproduces the differences between the measured water column height and the equilibrium height in each station. In particular, the numerical values of the flow and tidal height are analysed during a spring tide cycle by considering nine times corresponding to the maximum, minimum and close to the equilibrium levels. The time variations in the free surface height and flow along the estuary are explained successfully by an analytical model based on the Saint Venant one-dimensional equations as a function of the river discharge and the tidal height in the estuary mouth and the bed and friction slopes.

Keywords: flow, estuaries, standing tidal wave.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.fluidos.16>

 ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento hidráulico de cada estuario es diferente debido a la combinación local de las características mareales, fluviales y batimétricas. Por lo tanto, el flujo volumétrico es afectado por factores dinámicos que incluyen la marea, el viento, la descarga del río y el gradiente de densidad. Si bien la cuantificación del caudal estuarial es importante para la evaluación del recurso hídrico, la prevención de riesgos de inundación, el transporte de sedimentos, la estimación de los efectos de la intrusión salina, entre otros factores, su determinación es compleja ya que además depende del tipo y forma del estuario, y el lugar y momento (con respecto de la evolución mareal) de medición. Como consecuencia, la altura de la columna de agua en un punto dado no guarda una relación sencilla con el caudal, como en ríos, dificultando su correlación.

Thomas y Marino [1] presentaron un modelo analítico para calcular el caudal de agua dulce que ingresa a un estuario en el que la onda de marea presenta un movimiento estacionario, y el flujo neto intercambiado entre el estuario

y el mar. El mismo se aplicó al estuario del río Quequén Grande (ERQG), localizado en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). El modelo se calibró con mediciones directas del caudal obtenidas con un correntómetro acústico Doppler (ADCP, por su sigla en inglés) en varias estaciones de medición establecidas a lo largo del estuario durante trabajos de campo, y los resultados se validaron con los valores de la altura de la columna de agua medidos en forma continua en dos estaciones fijas de monitoreo. Se encontró que el caudal Q intercambiado con el mar es proporcional a la derivada temporal de la altura h de la superficie libre en la desembocadura, y que la descarga fluvial q puede calcularse por medio de la diferencia de altura entre estaciones de medición. Se determinó, además, que q guarda una relación simple con las precipitaciones locales.

Por otra parte, Thomas et al. [2] implementaron el modelo numérico SisBaHiA o *Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental* [3] para modelar la variación de h y la velocidad del agua en el ERQG. El módulo empleado fue el modelo hidrodinámico barotrópico de dos dimensiones horizontal (2DH), que adopta un perfil de presión hidrostático, y las ecuaciones de la conservación del momentum y la ma-

* lthomas@exa.unicen.edu.ar

sa para perfiles de velocidad promediados en la dirección vertical. La altura $h(x,t)$ y el campo de velocidad obtenidos fueron validados por las mediciones de campo.

El objetivo de este trabajo es cuantificar el caudal en diferentes sitios a lo largo del ERQG en función de la distancia x a la desembocadura según la magnitud de la descarga fluvial y la evolución del nivel mareal. Para ello se desarrolló un modelo analítico, basado en la resolución de las ecuaciones unidimensionales de Saint Venant, que complementa al propuesto por Thomas y Marino [1] (*modelo TM* de aquí en adelante), para calcular el caudal en diferentes sitios del estuario. Los resultados se comparan satisfactoriamente con aquellos obtenidos aplicando el modelo SisBaHiA y con mediciones in-situ.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estuario micro-mareal y de planicie costera del río Quequén Grande es un sistema primario con un ancho de entre 150 y 200 m, que se extiende hasta el primero de una serie de saltos naturales, conocido como paraje Las Cascadas, ubicado a 13.9 km desde la posición E0 en la Fig. 1 que muestra el perfil del lecho. El estuario presenta una profundidad de 3-5 m en sus tramos medio y superior con una topografía irregular que exhibe meandros naturales y canales angostos con profundidades de entre 5 y 7 m. Un puerto de aguas profundas se extiende en los primeros 2 km en los que la profundidad se mantiene en 12-14 m por dragado continuo y la forma del cauce es casi rectangular. La marea tiene una amplitud media de 1.03 m, con un máximo de 1.85 m durante las mareas vivas.

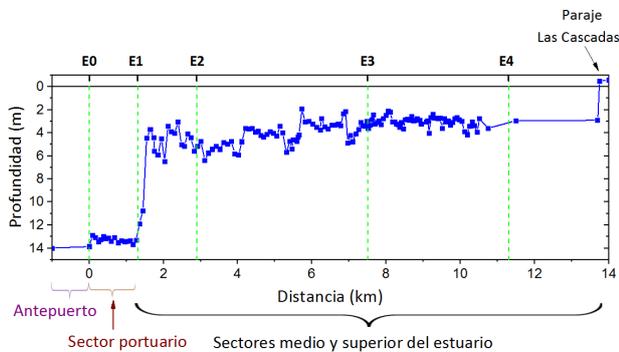


FIG. 1: Perfil del fondo a lo largo de la vaguada del estuario del río Quequén Grande. Se indican las posiciones de las estaciones de medición.

Las distribuciones transversales de velocidad $\mathbf{u}(u,v)$ para estimar el caudal Q_{ADCP} se obtuvieron en 4 secciones ubicadas a 1.4 (E1), 2.9 (E2), 7.5 (E3) y 11.3 (E4) km de E0 e indicadas en la Fig. 1, entre el 23 y 24 de agosto de 2016 con dos ADCP *Workhorse* (*Teledyne RD Instruments*) que operan a 600 y 1200 kHz. La evolución del nivel mareal en la boca del estuario (E0) y la información meteorológica fueron proporcionadas por el Consorcio de Gestión de Puerto Quequén. Durante la campaña, las condiciones meteorológicas fueron buenas y sin viento apreciable.

La simulación del comportamiento hidrodinámico del ERQG con el programa *SisBahia* emplea una malla de 3287 rectángulos con nueve nodos en los que se calculan las diferentes variables: cuatro nodos en las esquinas, cuatro nodos

en el centro de los lados y uno central, que representa el contorno y la batimetría estuarial con buena resolución. Se definió una zona marítima cercana (donde el aporte del río es insignificante) y el contorno superior en el paraje Las Cascadas. Se presta especial cuidado a las partes del contorno que tienen extremos agudos como las escolleras y el muelle, y en obtener una distribución regular donde el tamaño de los nodos cambia progresivamente. La salinidad y la temperatura del agua se consideraron constantes en el tiempo y uniformes en profundidad.

Las principales forzantes que actúan sobre el sistema se introdujeron a través de las condiciones de borde. La influencia marítima es dada fundamentalmente por el cambio del nivel del mar debido a la protección de las corrientes marinas que brindan las dos escolleras construidas en la desembocadura. Por consiguiente, en la frontera abierta del contorno marítimo se impone el nivel del agua que varía con el tiempo de acuerdo a la marea astronómica calculada a partir de las principales constantes armónicas. El análisis armónico de la marea indica que la componente semidiurna lunar M2 es la más importante, siguiendo las componentes diurnas O1 y K1, y la semidiurna solar S2. Las simulaciones se efectuaron incluyendo estas cuatro primeras componentes y para un tiempo total de al menos 30 días. En el otro extremo del contorno se impone una descarga constante del río dejando que el código calcule el nivel correspondiente. El caudal medido en una estación ubicada aguas arriba del paraje Las Cascadas es de entre 5 y 10 m^3/s , con crecidas esporádicas en las que suele alcanzar 170 m^3/s . Aquí se empleó un caudal de 10 m^3/s para caracterizar una situación normal. El principal parámetro de ajuste del modelo es la rugosidad del lecho cuyo valor se eligió de modo que la diferencia de nivel del agua entre dos estaciones correspondiera a la información de campo para diferentes caudales del río. Con esta rugosidad se verificó que, cuando se considera la marea, el tiempo de retraso entre la onda de nivel y la del flujo en los resultados numéricos sea el medido en las estaciones E0-E4 ($\approx 20-30$ min), dependiendo de la amplitud y fase mareales.

III. RESULTADOS

La Fig. 2 ilustra la razonable concordancia entre las mediciones de caudal realizadas con ambos ADCP, Q_{ADCP} , y los valores $Q_{TM}(t)$ proporcionados por el modelo *TM*. Un análisis detallado de los resultados muestra que las mediciones realizadas en E1 (símbolos rojos) son las que mejor concuerdan con el caudal teórico, y que Q_{ADCP} depende del momento del ciclo mareal en E0 y de la distancia x entre el lugar de medición y E0. Estas dependencias se consideran en el análisis a través de las relaciones x/L , con $L =$ distancia entre E0 y el paraje Las Cascadas, y $Q_{ADCP}(x,t)/Q_{TM}(t)$. La Fig. 3 ilustra como Q_{ADCP}/Q_{TM} disminuye aguas-arriba con la distancia desde E0, implicando que el modelo *TM* explica el comportamiento de Q en la desembocadura, pero no en el interior del estuario. Como se muestra más adelante, esta dependencia es confirmada por los resultados de la simulación numérica.

La evolución de las variaciones del nivel de la columna de agua en la desembocadura proporcionada por la simulación durante 3 meses se presenta en la Fig. 4 (a) para $q = 10$

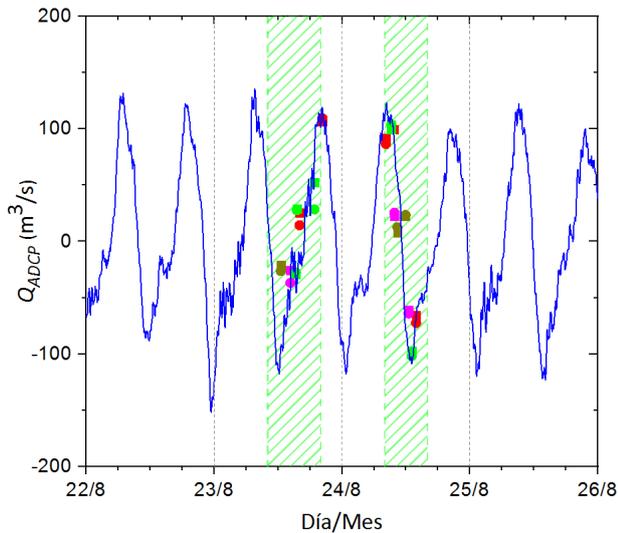


FIG. 2: Los símbolos indican los caudales proporcionados por los ADCPs de 1200 kHz (cuadrados) y 600 kHz (círculos) en cada estación identificada por colores (E1: rojo, E2: verde, E3: magenta, E4: marrón). La línea azul representa el resultado del modelo TM.

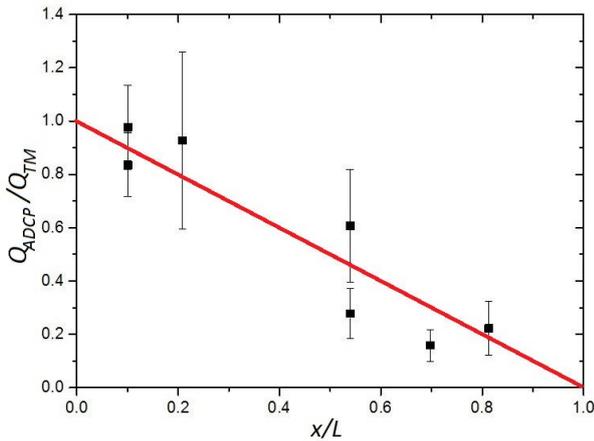


FIG. 3: Valores relativos del caudal medidos con el ADCP de 1200 kHz (cuadrados) para $L = 13.9$ km.

m^3/s . La Fig. 4 (b) muestra, en particular, un ciclo mareal completo en sicigia que tiene lugar entre el 10^{mo} y 11^{er} día en cada estación. Durante este lapso de tiempo se seleccionaron nueve tiempos, t1-t9, correspondientes a las diferencias de altura Δh máximas, mínimas y con respecto al nivel correspondiente a una situación sin marea (i.e. $\Delta h \approx 0$) en E0. Cada línea corresponde a la evolución de la variación del nivel mareal en una dada estación, las que muestran ligeras diferencias entre sí. Estas diferencias se manifiestan como un desfase temporal que es tanto mayor cuanto mayor es la distancia a E0. En particular, se obtiene un desfase de sólo 30 min entre los tiempos correspondientes a los máximos y mínimos de nivel en la desembocadura y en la cabecera del estuario, el que es mucho menor que el período de la marea.

Las variaciones del nivel mareal producidas a lo largo del estuario se muestran en la Fig. 5. Puntos y línea de un mismo color representan los valores de Δh para un mismo tiempo y diferentes distancias x . Se encuentra que $\Delta h(x)$ es prácticamente nula en todo el estuario a t1 (línea y pun-

tos negros), crece hasta un valor máximo (durante la es-toa de pleamar) a t2 (puntos y línea rojos coincidentes con los puntos y línea rosas a t6), regresan a un valor prácticamente cero a t3 (puntos y línea verdes), etc. Igual que en la Fig. 4(b), se observa que, a un dado tiempo, Δh entre la desembocadura y la cabecera es la misma, y de acuerdo con la información de campo disponible. Las variaciones entre $\Delta h(x = 0km)$ y $\Delta h(x = 13.7km)$ más importantes se registran a t7 (máximo reflujo), t8 (estoa de bajamar) y t9 (máximo flujo), es decir, cuando el nivel mareal es menor y/o varía más rápido.

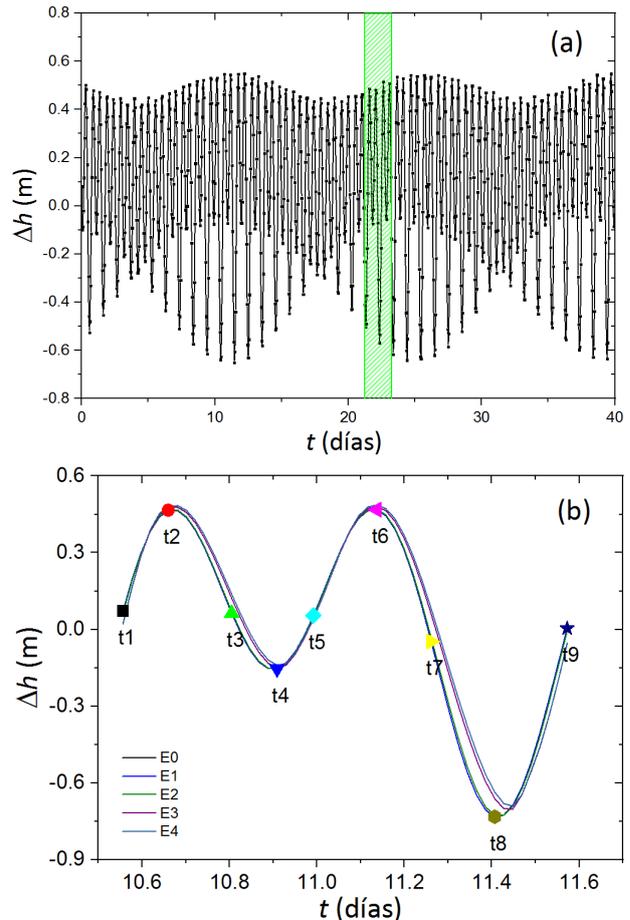


FIG. 4: (a) Variación del nivel mareal en E0 proporcionada por la simulación numérica. El sombreado verde indica la evolución de la marea durante los días 10-11 que se detalla en (b) para las estaciones E0-E4. A la curva de la variación del nivel en E0 se agregan los símbolos que indican los tiempos t1-t9.

Los valores de Q correspondientes a cada sección transversal hallados numéricamente se representan en función del correspondiente nivel de agua h en la Fig. 6. La presencia de figuras elípticas indica que el Quequén Grande es un estuario con onda de marea estacionaria. Los resultados numéricos de la Fig. 6 muestran que la marea causa que los caudales durante el flujo ($Q > 0$) y el reflujo ($Q < 0$) cerca de la desembocadura sean similares, y que el caudal del río q sólo introduce una modificación menor en Q . También se observa que las variaciones de h (entre -0.7 y 0.4 m con respecto al nivel estacionario) son casi iguales en la cabecera y en la desembocadura, en concordancia con lo mostrado en las Fig. 4(b) y 5. Las variaciones de Q , sin embargo, se

reducen a medida que aumenta la distancia x . Cerca de la cabecera, la influencia de la marea sobre Q es mínima y sólo se tiene la descarga constante del río ($q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$) marcada por la línea punteada, indicando un flujo continuo hacia el mar modulado por leves variaciones de altura.

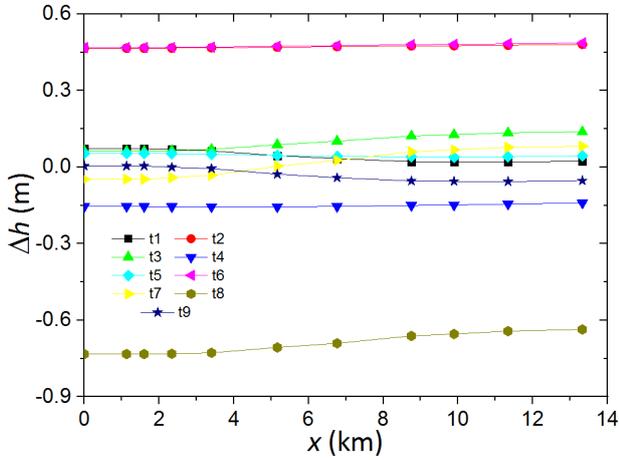


FIG. 5: Variación del nivel mareal a lo largo del estuario para los tiempos t_1 - t_9 mostrados en la Fig. 4(b).

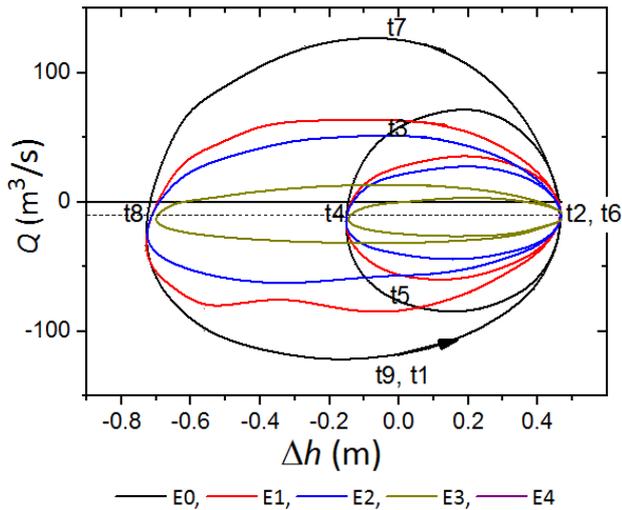


FIG. 6: Variación longitudinal del caudal durante dos ciclos mareales (24 h) y $q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ en función de la altura de la superficie libre en E0-E4. Valores negativos de Q indican que el flujo se dirige hacia el mar. Se indican los tiempos t_1 - t_9 sobre la curva correspondiente a E0 (negro).

La reducción de Q a lo largo del estuario es evidente para ambas fases mareales, como muestra la Fig. 7. El valor de Q_{max} en E0 ($x = 0$) es similar a los medidos insitu. Además, se observan dos gradientes $\partial Q/\partial x$; por ejemplo, para el instante en el que ocurre el flujo máximo (t_1) se encuentra $Q = 125-45x$ en el puerto y $Q = 80-9x$ en la parte menos profunda del estuario. Así, $\partial Q/\partial x$ alcanza un valor de $-45 \text{ m}^2/\text{s}$ en la zona portuaria y $-9 \text{ m}^2/\text{s}$ en el sector de menor profundidad. La relación entre ambos gradientes, $45/9 = 5$, se mantiene en ambas fases mareales. Por ejemplo, cuando tiene lugar el máximo reflujó (t_7) es $Q = -125+30x$ y $Q = -78+6x$, y la relación entre los gradientes también es ($30/6 = 5$).

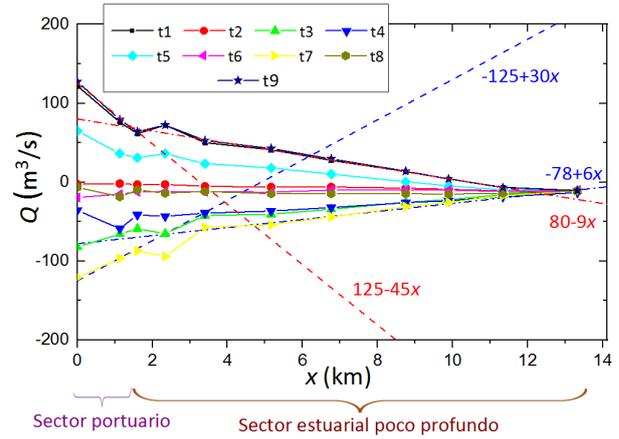


FIG. 7: Caudal en función de la distancia a E0 para distintos tiempos del ciclo mareal. Las líneas de puntos representan el gradiente del caudal a lo largo del estuario en t_1 (roja) y en t_7 (amarillo).

IV. MODELO ANALÍTICO

Las ecuaciones de Saint Venant (ESV) frecuentemente describen flujos en canales abiertos, y aquí las utilizamos para implementar un modelo analítico que explique el comportamiento hidrodinámico del ERQG. Suponemos que el flujo es unidimensional e incompresible, la distribución de presión es hidrostática, las fuerzas que actúan son las debidas a la gravedad y a la fricción con el lecho. Además, los esfuerzos de corte en la superficie libre debidos al viento, la fuerza de Coriolis, las variaciones de la presión atmosférica, etc., son despreciables; la forma del lecho se considera inalterable y el perfil de velocidad no cambia con las variaciones del nivel de la columna de agua.

A partir de los balances de masa y momentum, las ESV expresadas en función de $Q(x, t)$ y el área transversal $A(x, h(x, t))$, resultan como sigue:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = R \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = R + gI_2 + gA(S_b - S_f) \quad (2)$$

donde x : distancia a lo largo del canal, t : tiempo, $h(x, t)$: altura de la superficie libre, $S_b(x)$: pendiente del fondo, $S_f(x, A, Q)$: pendiente de fricción, $R(x)$: entrada lateral de agua por unidad de longitud (e.g., ingreso de agua de lluvia o percolación por el lecho), g : aceleración gravitatoria, e

$$I_1(x, t) = \int_0^{h(x, t)} (h-z) \sigma dz, \quad I_2(x, t) = \int_0^{h(x, t)} (h-z) \frac{\partial \sigma}{\partial x} dz \quad (3)$$

con $\sigma(z)$: ancho del cauce y z : altura desde el lecho. La pendiente del lecho es

$$S_b = -\frac{dz_b}{dx} \quad (4)$$

donde $z_b(x)$: elevación del lecho por encima de un nivel de referencia horizontal. Usando la fórmula de Manning se tiene:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2P^{4/3}}{A^{10/3}} \quad (5)$$

donde $P(x, h)$: perímetro mojado y n : coeficiente de fricción de Manning relacionado con la rugosidad de las paredes del canal.

La solución de las Ecs. (1), (2) se encuentra numéricamente con las adecuadas condiciones iniciales y de contorno en los extremos del canal. Para el ERQG suponemos que la sección transversal es uniforme en cada tramo, es decir $A \approx A_1(h)$ en el sector portuario y $A \approx A_2(h)$ en el sector menos profundo, $R = 0$ y todas las variaciones temporales son aproximadamente sinusoidales (como se infiere de la Fig. 6) de modo que:

$$A(x, t) = A_0 e^{i\omega t}, \quad Q(x, t) = Q_0 e^{i\omega t} \quad (6a)$$

donde $i = \sqrt{-1}$, sobreentendiéndose que la parte real es la que tiene sentido físico. Consistentemente, $h(x, t) = h_0 e^{i\omega t}$ y entonces

$$I_1(x, t) = I_{01} e^{i\omega t}, \quad I_2(x, t) = I_{02} e^{i\omega t} \quad (6b)$$

Para el caso representado por la Ec. (6a), las Ecs. (1), (2) se transforman en el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{dQ_0}{dx} = -i\omega A_0 \quad (7)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{Q_0^2}{A_0} + gI_{01} \right) = -i\omega Q_0 + gI_{02} + gA_0(S_b - \bar{S}_f) \quad (8)$$

donde \bar{S}_f es el promedio de la variación de S_f en el tiempo. Las condiciones de contorno son de frontera libre $dQ_0/dx = 0$ en $x = 0$, y $Q_0(x = L) = q$: constante. El contorno de la sección transversal dada por $\sigma(z)$ determina $A_0(h)$, $I_{01}(h_0)$ e $I_{02}(h_0)$ en función de $h_0(x)$ con la Ec. (3). Pero si $\partial h_0/\partial x \approx 0$, A_0 , I_{01} e I_{02} tampoco dependen significativamente de x y sólo un contorno típico del sistema es necesario para determinar el resto de los parámetros. En ese caso, la integración de (7) es inmediata para dar

$$Q_0 = q + i\omega A_0(L - x) \quad (9)$$

Reemplazando la Ec. (9) en la Ec. (8), se encuentra que:

$$A_0 = \frac{i\omega q + gI_{02}}{\omega^2(L - x) - g(S_b - \bar{S}_f)} \quad (10)$$

lo cual es consistente con la hipótesis $A_0 \approx$ constante si $g(S_b - \bar{S}_f) \gg \omega^2(L - x)$. El caudal es:

$$Re(Q_0) = q - \frac{\omega^2 q}{g(S_b - \bar{S}_f)}(L - x) \quad (11)$$

En resumen, las ESV junto con las hipótesis aplicadas, aún sin que se definan $\sigma(z)$, I_1 , I_2 , A_0 , S_b y \bar{S}_f , permiten explicar dos características importantes de las variables involucradas en el tipo de sistema estuarino tratado:

1. la altura de la columna de agua crece y disminuye en

el tiempo en todo el estuario al mismo tiempo, comportamiento que es representado en la Fig. 5;

2. El caudal aumenta a medida que disminuye x , en concordancia con las observaciones de campo y los resultados numéricos (Fig. 7). El gradiente $\partial Q/\partial x$ depende en mayor medida de $(S_b - \bar{S}_f)$, y $\partial Q/\partial x$ resulta diferente en las partes profunda y menos profunda del estuario debido a la gran diferencia de profundidad ($A_1 \neq A_2$). Estas consecuencias son observadas, efectivamente, en la Fig. 7.

V. CONCLUSIONES

Las mediciones in-situ de caudal realizadas con los ADCPs en el ERQG validan el comportamiento hidrodinámico proporcionado por el modelo numérico, a la vez que ambos son explicados por un modelo analítico simplificado basado en las ESV. Este último explica las variaciones del caudal encontrado en diferentes sitios del estuario a partir de la descarga fluvial en la cabecera, el nivel mareal en la desembocadura y de los valores de las pendientes de fondo y de rozamiento si se cuenta con una aproximación de la forma de la sección transversal. El análisis se simplifica por el comportamiento esencialmente estacionario de la onda de marea. Cualquiera sea forma elegida de $\sigma(z)$, los valores de I_1 , I_2 , A_0 , S_b , \bar{S}_f resultan constantes, obteniéndose concordancia con la evolución de h y Q obtenidos en campo y numéricamente. Debido a restricciones de espacio, la presentación de los resultados cuantitativos del modelo analítico junto con información física relevante serán expuestos en otro manuscrito.

La correspondencia entre los resultados experimentales, numéricos y analíticos permite inferir que las hipótesis son razonables y que, por tanto, se cuenta con un modelo analítico para describir el comportamiento hidrodinámico del ERQG cuando el caudal del río es menor que el generado por la marea (condición que es usual durante la mayor parte del año en este sistema estuarino), complementando las simulaciones numéricas.

REFERENCIAS

- [1] L. Thomas y B. Marino. Estimación del caudal a partir de la evolución del nivel del agua en un estuario con onda de marea estacionaria. *Ribagua* **3**, 8-17 (2016).
- [2] T. L.P., M. Pereyra, M. Gallo y B. Marino. *Calibración del modelo numérico SisBahia para el transporte de sedimentos en un estuario micromareal en Proceedings del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica* (Lima, Perú, 2016).
- [3] R. P. *Referência Técnica do SisBaHiA* <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>. 2011.