

Modelación 3D para la evaluación de corrientes de densidad en zona de espera de un sistema de esclusas

Mariano Re¹, Martín Sabarots Gerbec¹, Ángel N. Menéndez¹ y Nicolás Tomazin²

¹ Programa de Hidráulica Computacional, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua,

² Programa de Hidráulica Marítima, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua,

E-mail: m.re@ina.gob.ar

RESUMEN: En el nuevo sistema de esclusas del Canal de Panamá, la operación de ecualización de niveles entre la cámara inferior y el Océano, produce descargas/jets de agua dulce, mientras que la apertura de la compuerta entre esta cámara y el océano genera corrientes de densidad. Estas corrientes consecuentemente impactan sobre los barcos en espera para entrar en el sistema de esclusas. En este trabajo se presenta una metodología para la modelación 3D de este problema, incluyendo una validación indirecta y la posterior explotación del modelo para la evaluación de alternativas. El modelo 3D se implementó con el Sistema de Modelación MOHID Water, habitualmente utilizado para problemas estuarinos y costeros. La validación se realizó a partir de resultados de modelaciones previas y problemas teóricos. La explotación del modelo consistió en la comparación de las velocidades obtenidas en la zona de espera de los buques, considerando distintos diseños de las descargas y del canal de aproximación.

INTRODUCCIÓN

Una corriente de densidad es el flujo de un fluido en otro, causado por la diferencia de densidad entre ambos. En los océanos, las corrientes de densidad son forzadas por inhomogeneidades en la distribución de salinidad y temperatura (Simpson, 1982).

Las corrientes de densidad originadas por la propagación de agua salina en cuerpos de agua dulce o viceversa resultan un fenómeno de la mecánica de fluidos ambiental que ha sido abordado en numerosos y diversos trabajos (Benjamin, 1968; Heaps, 1972; Simpson et al., 1990; Alavian et al., 1992; Jackson et al., 2008; entre otros). Resulta muy escasa la bibliografía dedicada a la generación de corrientes de densidad a partir de la operación de obras de ingeniería (Figura 1).

A pesar de que una gran porción de los estudios de corrientes de densidad son de base experimental (por ejemplo: Klemp, 1994; Shin et al., 2004; Kolar et al., 2009), existen no pocos trabajos en los que se ha avanzado con herramientas de modelación numérica para predecir el avance, la mezcla y la difusión de estas corrientes (por ejemplo: Choi y Garcia, 2002; Firoozabadi et al., 2009).

Específicamente el problema del intercambio en esclusas (*lock-exchange problem*) ha sido abordado numéricamente con variados enfoques (Birman et al., 2005; Ooi et al., 2009; Constantinescu, 2014; entre otros). Según muestra Fringer et al. (2006) el alcance de la modelación numérica para este tipo de problemas está asociado al tipo de pregunta que se quiera responder y que procesos y escalas involucrar.

En este trabajo se presenta la modelación numérica de un problema de intercambio en esclusas en el Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá en donde la presencia de las corrientes de densidad impacta sobre la navegabilidad en los canales de aproximación al sistema.



Figura 1.- Corriente de densidad en el sistema actual del Canal de Panamá (CPP, 2008),

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Canal de Panamá es una vía navegable de aproximadamente 72 *km* de extensión que conecta los Océanos Atlántico y Pacífico. Incluye tres sistemas de esclusas: Miraflores y Pedro Miguel del lado del Pacífico (separadas por el Lago Miraflores), y Gatún del lado del Atlántico; entre medio se desarrolla el Lago Gatún. Las esclusas están compuestas por dos carriles paralelos, y por una o más cámaras. El programa de ampliación del Canal de Panamá (Figura 2), básicamente consiste en la construcción del Tercer Juego de Esclusas, que proveerá un tercer carril de mayores dimensiones en ambos extremos (Atlántico y Pacífico) permitiendo el tránsito de buques de mayor tamaño.

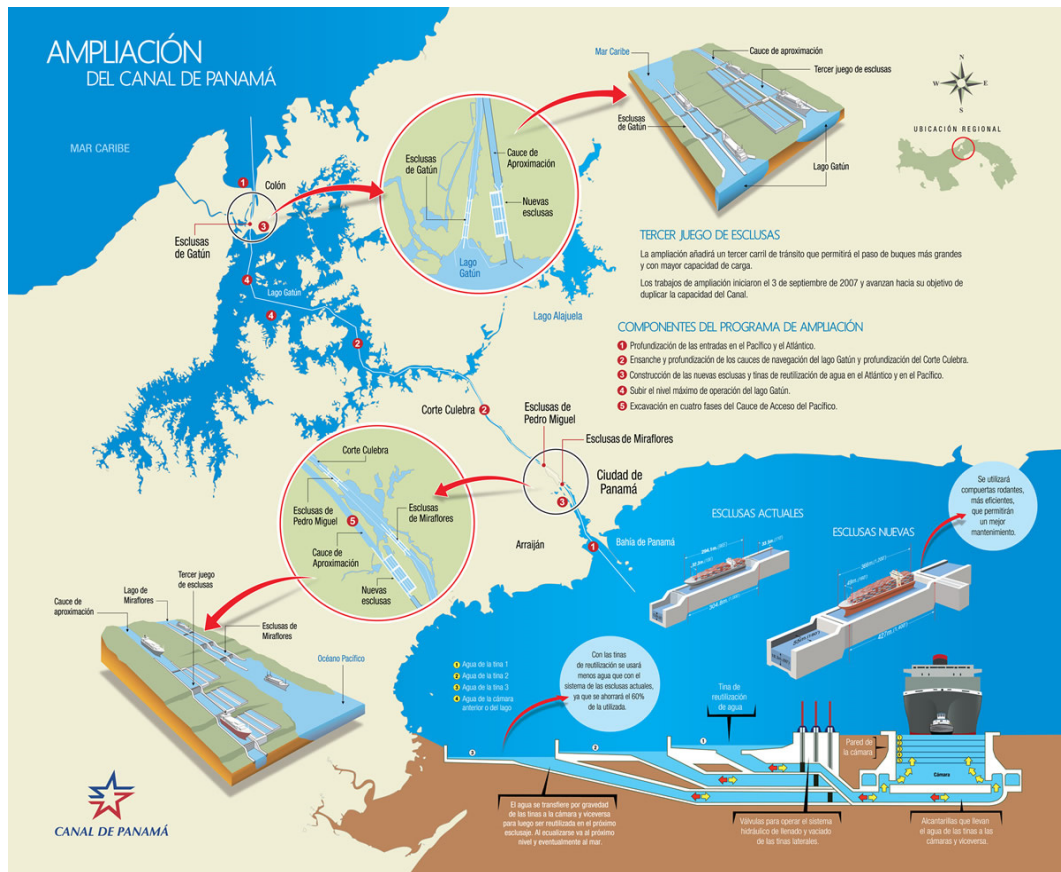


Figura 2.- Esquema de ampliación del Canal de Panamá (Autoridad del Canal de Panamá, ACP, www.micanaldepanama.com).

En el lado oceánico del nuevo sistema de esclusas del Canal de Panamá, durante el pasaje de buques desde el océano hacia la cámara más baja del sistema, ocurren los siguientes procesos: *i*) la onda de marea penetra desde el océano, a través del canal de aproximación; *ii*) durante la operación de vaciado de la cámara más baja del sistema, las compuertas se cierran, y un volumen de agua (principalmente dulce), se descarga a través de las salidas del Sistema de Llenado/Vaciado, generando dos chorros de agua en el canal de aproximación; *iii*) una vez que se logra una condición de ecuilibración del nivel de agua, se abren las compuertas, y se generan corrientes de densidad debido a la mezcla del agua de la cámara (más dulce) con la del canal de aproximación (más salada); *iv*) una vez que el buque ingresa en la cámara las compuertas se cierran; *v*) hasta la nueva operación del sistema, el flujo en el canal de aproximación evoluciona debido al forzante de la onda de marea, y las corrientes de densidad residuales tienden a atenuarse.

A partir de la generación de estas corrientes de densidad, se estableció como criterio de diseño del sistema de operación de la esclusa que la velocidad longitudinal superficial en el canal de aproximación, en un punto situado sobre el eje de la cámara y en una posición representativa de los buques en espera, no exceda de 1,25 *m/s* (criterio impuesto por la ACP). En este trabajo se presenta la validación de este criterio de diseño mediante la aplicación de un modelo numérico 3D. A modo ilustrativo se muestran solo los resultados de la modelación del Sistema Pacífico.

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Ante el abordaje desde modelaciones hidrodinámicas con aproximaciones no hidrostáticas e hidrostáticas del problema de intercambio en esclusas (la aproximación hidrostática implica que las aceleraciones verticales son despreciables en comparación con la aceleración de la gravedad, es decir, que el movimiento es netamente horizontal), Fringer et al. (2006) plantean que aunque la aceleración de las dos masas de agua se debe preponderantemente a la presión hidrostática, las diferencias entre los resultados no hidrostáticos e hidrostáticos se dan en la captación o no de las ondas que se forman en la interfase entre los dos fluidos.

Debido a que en este problema la variable a cuantificar tiene que ver con la velocidad en el canal de aproximación a una determinada distancia de las compuertas que separan a la cámara inferior del océano, se decidió abordar la modelación teniendo en cuenta la aproximación hidrostática. Por lo tanto, el Sistema MOHID resultó elegido para realizar estas simulaciones. MOHID consiste en una herramienta capaz de simular problemas costeros complejos y flujos estuarinos (Cancino y Neves, 1999, Martins et al. 2001, Coelho et al. 2002, Trancoso et al., 2005, Saraiva et al., 2007, entre otros), resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones utilizando las aproximaciones hidrostáticas y de Boussinesq.

Estrategia de simulación

En las esclusas del lado oceánico, el esquema de operación del Sistema de Llenado/Vaciado tiene tres etapas que se simulan por separado:

Descarga: Esta operación se realiza con las compuertas cerradas y dura 10,1 min (aunque el caudal de descarga es nulo antes del final de este intervalo de tiempo). Luego, se asume un tiempo de espera de 4,0 min (representativo de la apertura de compuertas).

Mezcla: Se asume la apertura de compuertas como instantánea, como hipótesis conservativa. La duración de esta etapa, representativa del desplazamiento del buque, es de 17,0 min. Al final de esta etapa se considera que las compuertas se cierran instantáneamente.

Pausa: Con las compuertas cerradas, se desarrolla un tiempo de espera de 31,9 min (tiempo de operación en las esclusas).

Implementación

El dominio de modelación se extiende lo suficientemente lejos de las compuertas, para tratarlo como un borde matemático cuya condición de borde de marea no perturbe significativamente en el flujo de la zona de espera de los buques. En el caso aquí mostrado, la condición de borde de marea entrante se encuentra 1.020 m de las compuertas. Las etapas con las compuertas cerradas (*Descarga* y *Pausa*) se simularon con un dominio que no incluye a la cámara inferior, en cambio la etapa de *Mezcla* si la incorpora (Figura 3). En ambos dominios, se tiene en cuenta la existencia de una 'pared permeable' de 500 m de longitud

(representada por dos filas de pilas cuadradas separadas 8 m, de 2 m de lado y ubicadas cada 16 m) adyacente al canal de aproximación, que proporciona algunas ventajas de operatividad de los busques.

El Modelo Digital de Elevación del fondo (DEM) fue construido a partir de datos de cartas náuticas e información provista por la ACP referida a las características del canal de aproximación.

La discretización espacial horizontal consta de pasos de cálculo de 5 m, que se reducen a 2 m para representar la zona de descarga, la pared permeable y las pendientes del canal, y que se incrementan a 10 m y 20 m hacia el canal de aproximación. La discretización vertical consta de una distribución *n-sigma* de 20 capas con 8 capas superficiales de 2,5% de espesor, 8 capas del centro con 6,25% de espesor y 4 capas de fondo de 7,5% de espesor.

De manera de representar correctamente la variación de niveles de marea, el paso de discretización temporal debe ser del orden del paso de discretización espacial horizontal (se utilizó 5 m) dividido la celeridad de onda (aproximadamente 14 m/s), eligiéndose un valor de 0,25 segundos.

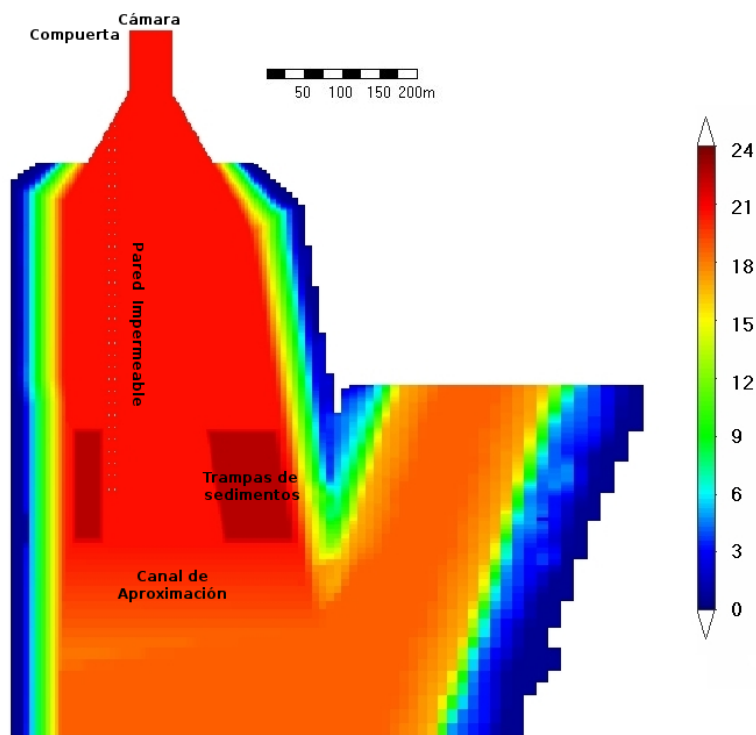


Figura 3.- Dominio sin la cámara inferior y batimetría en m de profundidad.

El borde oceánico del modelo se constituye como un borde matemático donde se impone una condición de nivel de marea según la Figura 4. La imposición de la onda de marea en el borde matemático oceánico genera la reflexión de las ondas internas, lo que se manifiesta con la superposición de una onda espuria de alta frecuencia en la solución. Para morigerar el impacto de estas oscilaciones se utilizó una condición de borde de radiación propuesta por Blumbert y Khanta (1985).

Las descargas a presión desde la cámara inferior hacia el océano se localizan en el fondo, y se materializan a través de cuatro brazos con una sección transversal de $42,45 \text{ m}^2$ hacia ambos lados de la cámara (Descarga Lejana y Cercana, respecto de la ubicación de las tinas del sistema; Figura 4). MOHID representa las descargas como un término fuente, por lo tanto se incorpora la cantidad de movimiento en cada una de ellas.

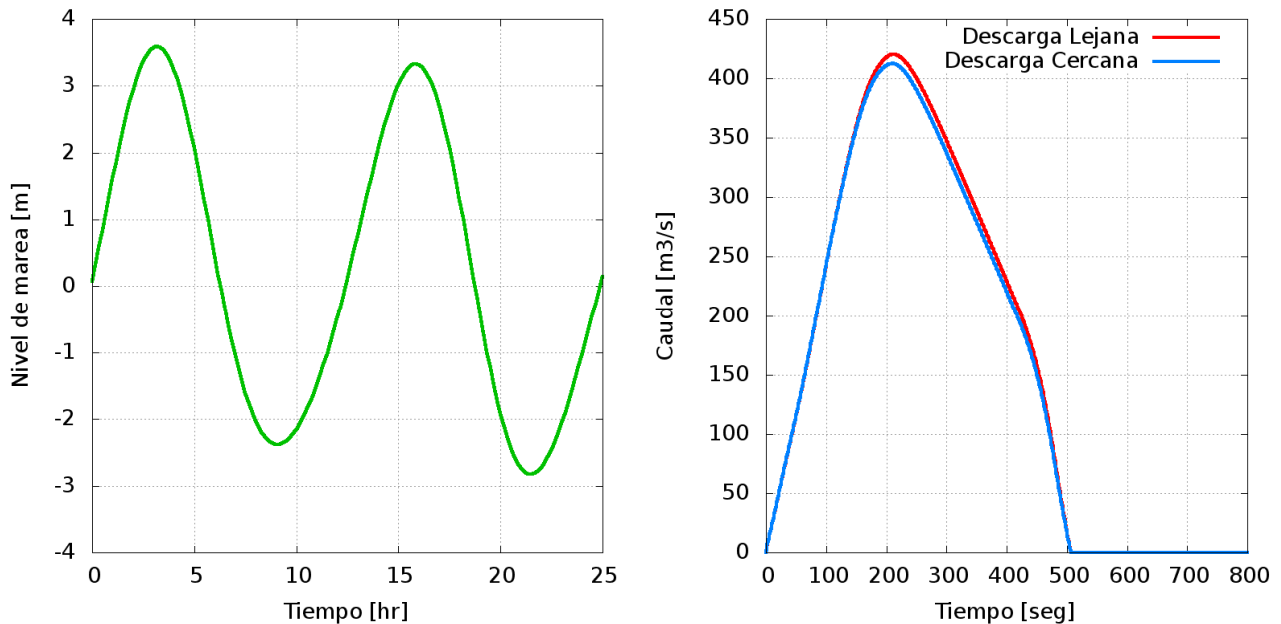


Figura 4.- Sistema Pacífico: a) onda de marea astronómica, b) descargas.

La salinidad en la cámara inferior, previa a la apertura de las compuertas, se consideró uniforme en el plano horizontal y con una variación lineal en la vertical que va de 6 psu en la superficie y 16 psu en el fondo, variando linealmente. La salinidad de las descargas se inició en $13,5 \text{ psu}$, variando hasta llegar al final de la misma con $12,0 \text{ psu}$ (valores representativos del tipo de agua del fondo de la cámara). En el borde oceánico del modelo, se impuso una variación lineal de la salinidad con la profundidad, comenzando con 25 psu en la superficie hasta 34 psu en el fondo.

Las diferencias de temperatura en el sistema son lo suficientemente bajas como para no producir corrientes de densidad, por lo tanto la variación fue despreciada utilizando un valor constante de $28 \text{ }^\circ\text{C}$.

La caracterización de la pérdida de energía en el fondo fue realizada a través de la imposición de un coeficiente n de *Manning* de $0,020$ en todo el dominio. La viscosidad de torbellino horizontal fue representada a través de la formulación de Smagorinsky, mientras que la vertical fue determinada con el modelo GOTM (*General Ocean Turbulence Model*; <http://www.gotm.net>).

VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN

No existiendo la posibilidad de contar con series de variables observadas relevantes para la operación del sistema, la validación del modelo hidrodinámico fue abordada a partir de dos etapas: la primera, en la que se compararon los resultados de la simulación de los mismos procesos evaluados durante el proceso licitatorio del proyecto ejecutivo; y la segunda, que consistió en la comparación con un ensayo experimental del problema de intercambio en esclusas.

Modelación previa

El criterio de validación en esta etapa consistió en comparar los resultados ahora obtenidos con aquellos de la modelación del proceso licitatorio realizadas con el software Delft3D (<http://oss.deltares.nl/web/delft3d>). Debido a las limitaciones en la disponibilidad de los datos, las condiciones de simulación resultaron similares, pero no idénticas. Las diferencias más significativas en cuanto a la implementación de los modelos se dieron en las condiciones de borde (sobre todo el hidrograma de descargas) y en la imposición de los bordes rígidos. Por lo tanto, entre los resultados de los dos modelos existen algunas desviaciones cuantitativas esperables, conformando un acuerdo semi-cuantitativo entre ambos modelos. En la Figura 5 se muestra, a modo ilustrativo, una comparación para la etapa de *Descarga*.

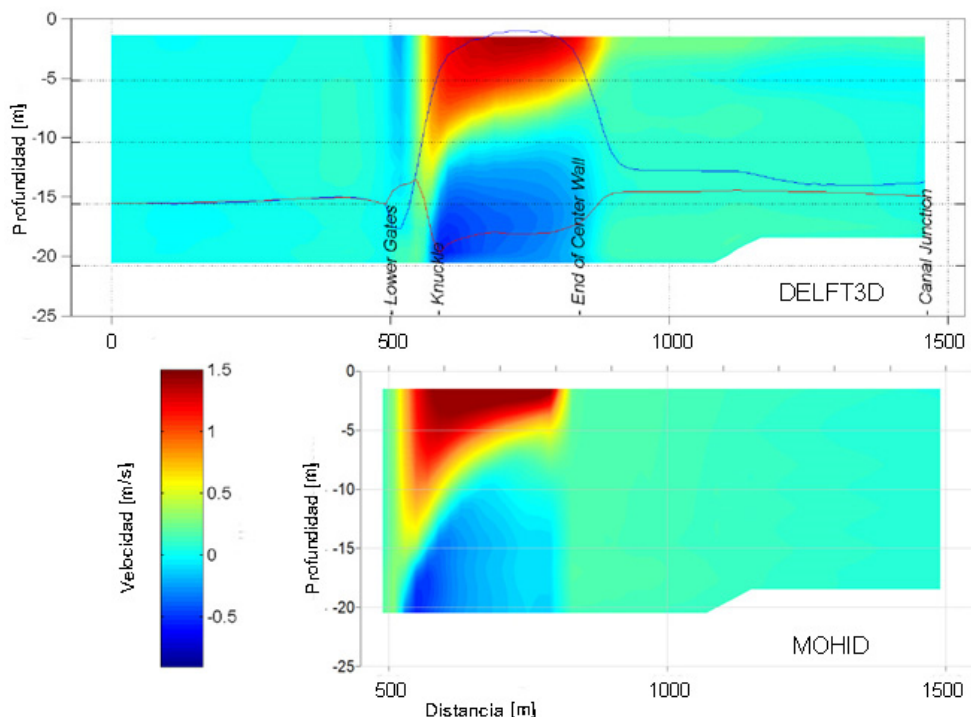


Figura 5.- Distribución en la vertical de la velocidad longitudinal en el eje del canal de aproximación a los 7 minutos de comenzada la primera etapa de *Descarga* (velocidades positivas hacia la derecha)

El acuerdo semi-cuantitativo se considera muy satisfactorio, con el actual modelo (MOHID) dando velocidades algo menores durante la etapa de *Descarga* y levemente más altas durante la etapa de *Mezcla*.

Las relativamente pequeñas diferencias entre las dos simulaciones, indican la baja sensibilidad de la respuesta del sistema a los detalles de la representación de las condiciones de contorno.

Problema de intercambio en esclusas

La segunda etapa de validación del modelo consistió en la simulación hidrodinámica luego de que se abriera instantáneamente la compuerta que inicialmente separa dos cuerpos de con diferentes densidades (*lock-exchange problem*).

Para esto se simuló un canal horizontal de 200 m de longitud y 55 m de ancho, con una profundidad de 20 m (dimensiones del orden de las del problema). La compuerta se ubicó en la sección central, dividiendo al agua dulce (densidad=1,000 kg/m³; a la derecha) del agua salina (densidad=1,008 kg/m³; a la izquierda). La discretización espacial horizontal contó con celdas de 2 m de lado y la vertical de 40 de aproximadamente 0.5 m. La referencia de comparación para la validación resultó ser el experimento planteado en Shin et al. (2004). La Figura 6 muestra la evolución de la distribución de salinidad luego de la apertura de la compuerta comparadas en términos adimensionales de tiempo ($t' = t * (g * (1 - \gamma) / H)^{0.5}$) y distancia ($x' = x / H$) (t es el tiempo, x la distancia, H la profundidad, g es la aceleración de la gravedad y γ la relación entre las densidades de ambos fluidos). Se observa que la solución numérica presenta un buen acuerdo cualitativo con la experimental. Además, se compararon las trayectorias del frente del fondo para ambos casos y para una solución analítica (sin considerar la disipación de energía debido a la mezcla), en donde se pudo observar que el acuerdo entre la solución numérica y la experimental tiende a mejorar a medida que avanza el frente de onda.

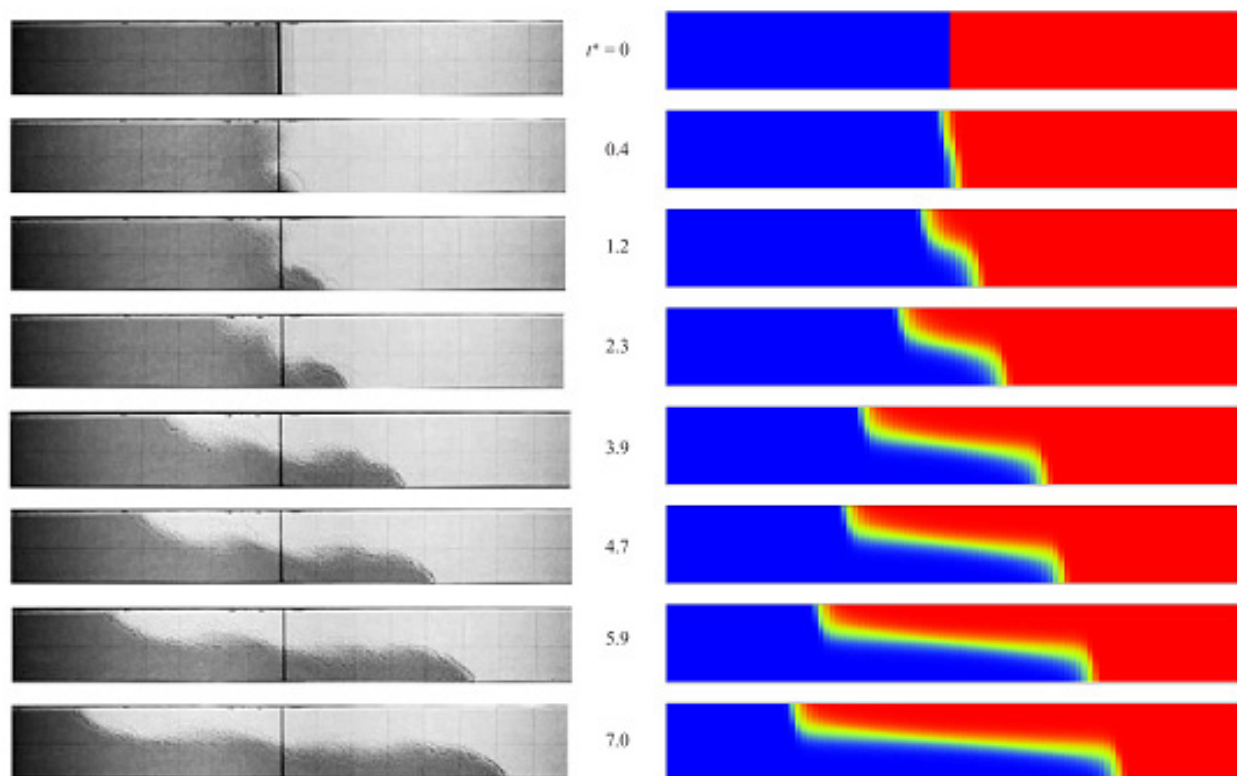
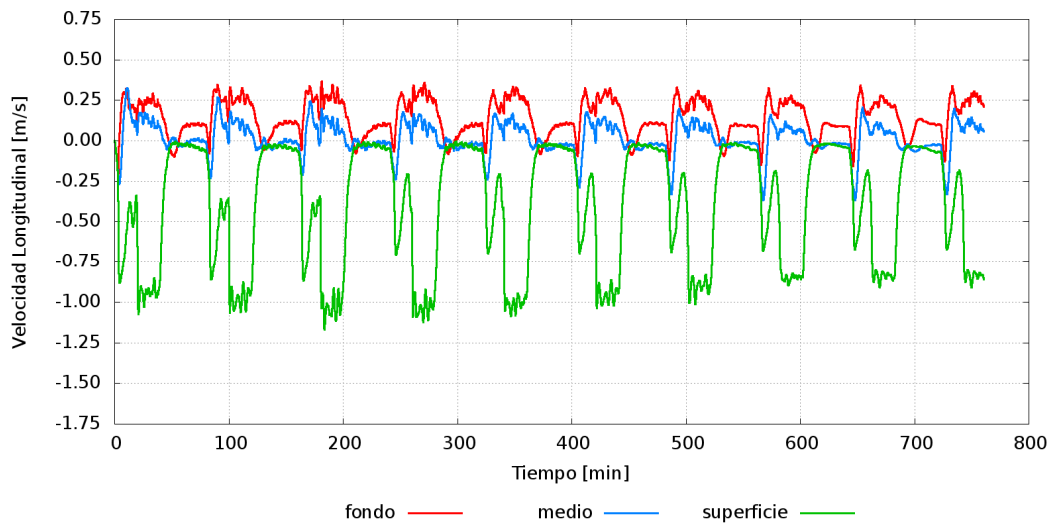


Figura 6.- Evolución de la distribución de salinidad (negro/azul: agua salada; gris/rojo: agua dulce).

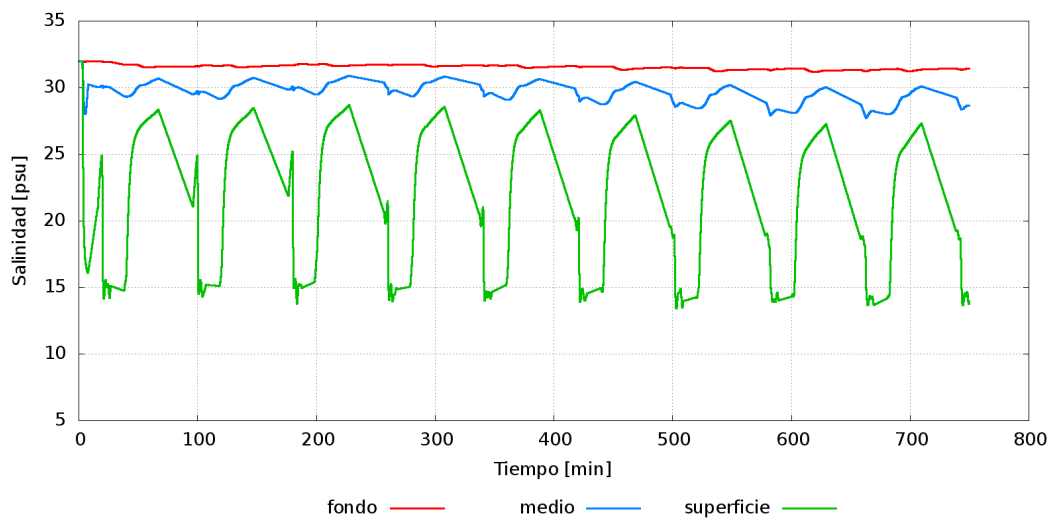
SIMULACIONES

Las simulaciones definitivas de este problema se realizaron en el marco de un esquema de simulación que incluyó a aquellas en las que se utilizó una geometría y descargas simplificadas con el objetivo de tener una primera aproximación al tipo de respuesta del sistema, y a una batería de análisis de sensibilidad que apuntaron a demostrar la robustez de los resultados y establecer sus rangos de incertidumbre. Cada simulación incluye la repetición de la operación completa (*Descarga, Mezcla y Pausa*).

Se observan en la Figura 7 las series de temperatura y salinidad de diez ciclos consecutivos de operación, en el punto crítico del sistema (a unos 280 m de las compuertas) y correspondientes a la primera parte del esquema de simulación (geometría y descargas simplificadas), destacándose la existencia dos picos de velocidad relativamente altos por ciclo, siendo el primero del proceso de *Descarga* y el segundo del proceso de *Mezcla*. Las velocidades positivas en la capa media y el fondo, indican flujo hacia la cámara y contrario al de la superficie. También, se observa el alto gradiente existente entre la superficie y el fondo entre los valores de salinidad.



a) Velocidad.



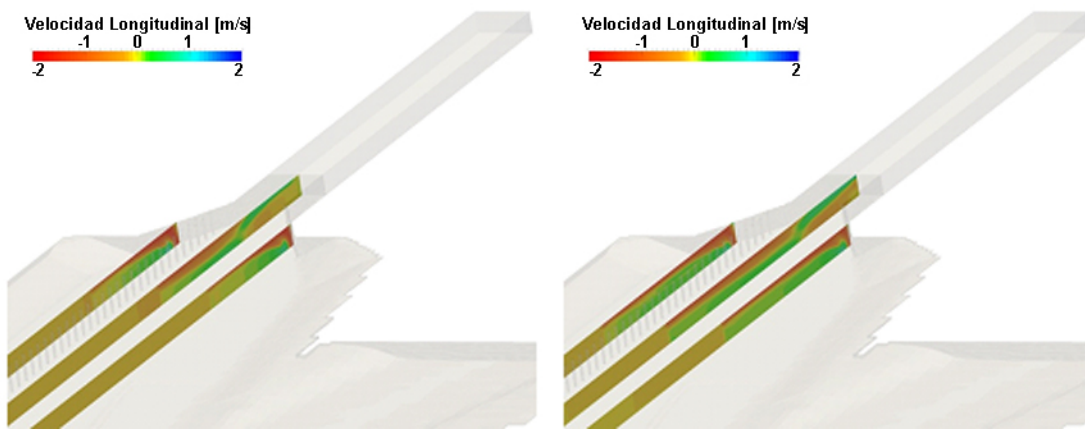
b) Salinidad.

Figura 7.- Series simuladas en el punto crítico del sistema (a unos 280 m de la cámara inferior).

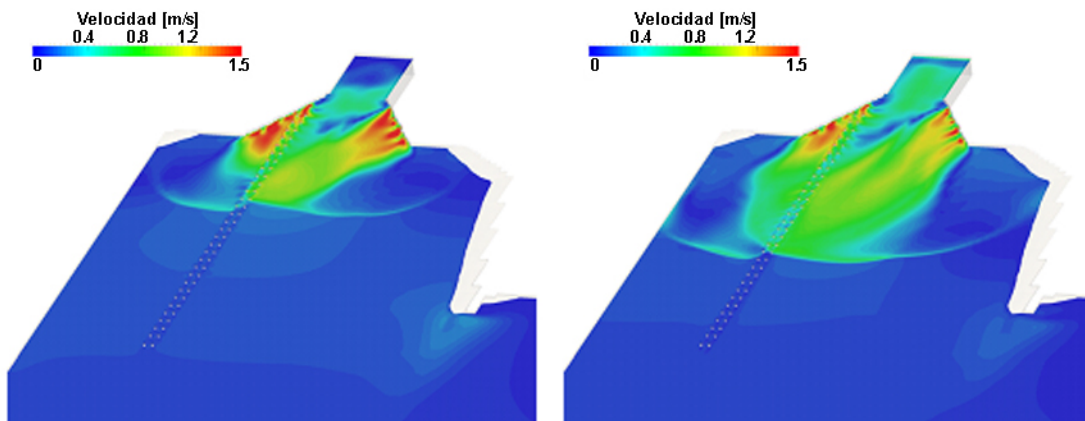
La Figura 8a presenta cortes verticales de la distribución de velocidad longitudinal en tres planos (uno sobre el eje del canal de aproximación y los otros dos a ambos lados (separados por aproximadamente 100 m) y la Figura 8b muestra la distribución de la velocidad módulo a una profundidad de 3,5 m, a los 5 y a los 7 minutos de haber comenzado la etapa de *Descarga*.

En general, se observa como emergen los chorros de agua alcanzando la superficie libre, en la zona donde se concentran las corrientes de densidad. La distribución horizontal de la corriente superficial se ve que está controlada por la difusión turbulenta lateral y que presenta una leve asimetría provocada por la 'pared permeable'.

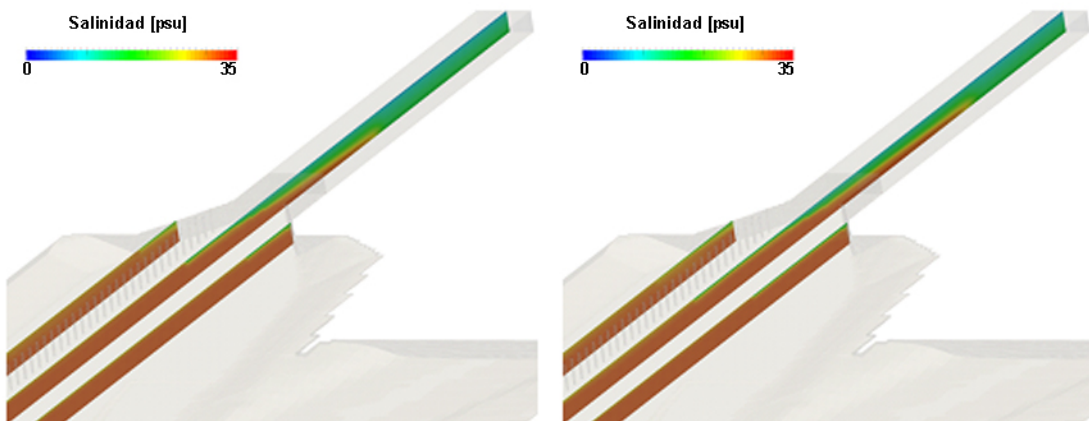
La Figura 8c, presenta la distribución de salinidad a los 5 y 7 minutos de haber comenzado la etapa de Mezcla. Se puede observar el desarrollo de una capa inferior más pesada hacia la cámara y una capa superficial más liviana hacia el océano.



a) Velocidad longitudinal. Cortes verticales.



b) Velocidad longitudinal módulo a 3,5 m de profundidad.



c) Salinidad. Cortes verticales.

Figura 8.- Variación espacial de la velocidad longitudinal y la salinidad a 5 y 7 minutos de iniciada la descarga.

La Figura 9 muestra la variación de las velocidades longitudinales según la profundidad (20 capas de discretización), observándose mayores diferencias entre capas hacia la superficie (situación dependiente de la discretización de esa zona). Por lo tanto, para evaluar la restricción de la ACP, se determinó como velocidad longitudinal superficial al valor que se obtiene a una profundidad de 3,5 m, considerándolo representativo de la velocidad que se da en el espesor de la corriente de densidad en la superficie durante la etapa de *Descarga*.

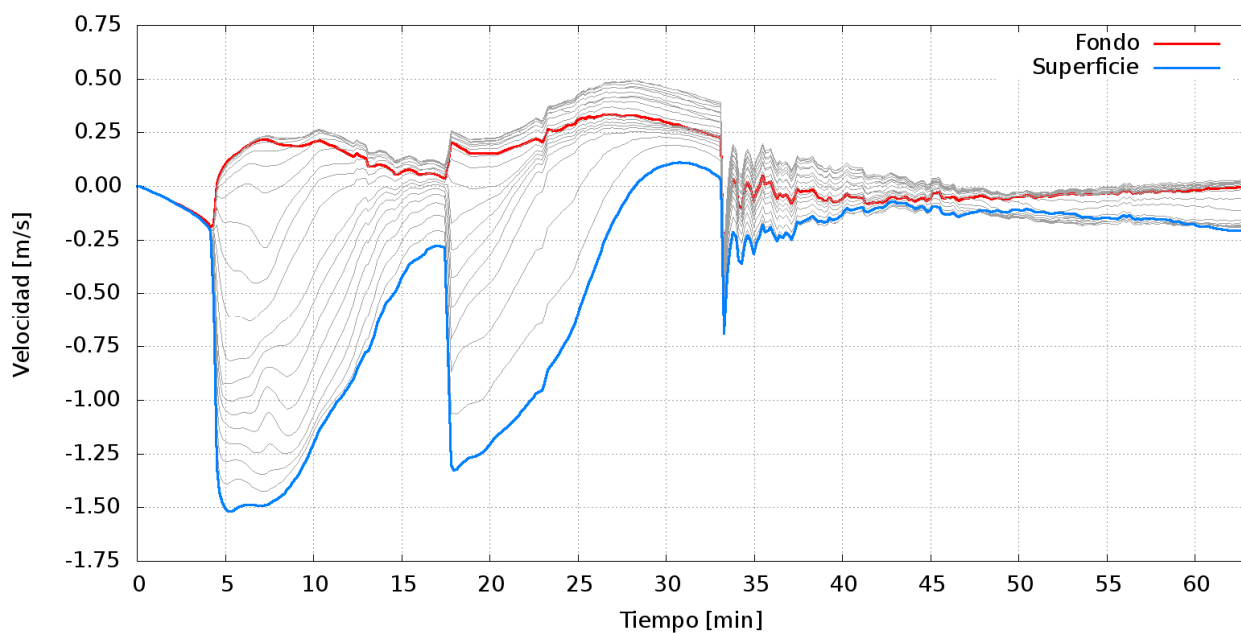


Figura 9.- Velocidad longitudinal por capa de discretización en el punto crítico.

En la Figura 10 se muestra la serie temporal de velocidad longitudinal superficial, de la simulación definitiva, para un ciclo completo (*Descarga-Mezcla-Pausa*, unos 63 minutos) en el punto crítico. Se observan tres picos: uno durante la etapa de *Descarga*, el siguiente cuando se abre la compuerta (inicio de la etapa de *Mezcla*), y la tercera inmediatamente luego del cierre de la compuerta. El primer pico es el más relevante, pero se muestra el cumplimiento de la restricción de velocidad.

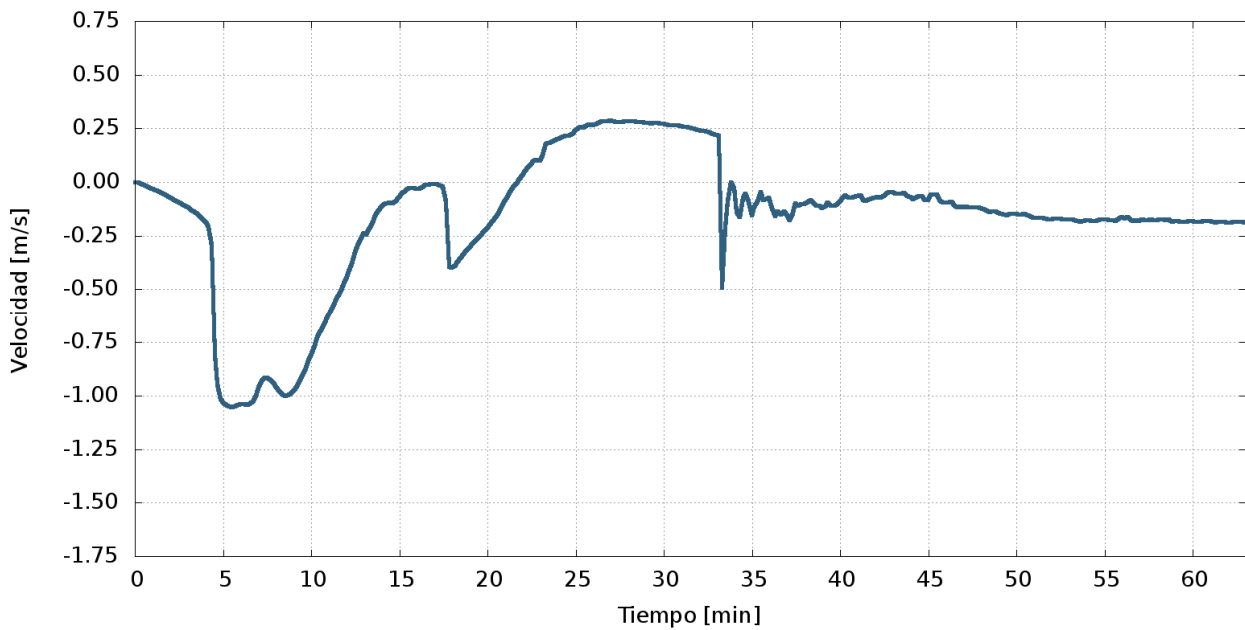


Figura 10.- Velocidad longitudinal superficial en el punto crítico.

A los resultados obtenidos le fue asignado un rango de incertidumbre proveniente de los análisis de sensibilidad realizados, con el objetivo de tener en cuenta variaciones en algunos de los parámetros de la modelación. En este sentido, las mayores incertidumbres provienen de la definición de la rugosidad del fondo y los coeficientes de mezcla turbulenta, y las diferencias de salinidad que se puedan dar respecto de los valores adoptados para la cámara inferior y la condición de borde oceánica. Basado en estos resultados, el rango máximo de variación resulta $\pm 13\%$ en el punto crítico del sistema. Esto significa que, a lo sumo la velocidad en ese punto alcanzaría el valor de $1,21 \text{ m/s}$ permaneciendo por debajo de la restricción

CONCLUSIONES

Las corrientes de densidad vinculadas a la operación de obras de ingeniería, específicamente para el caso de intercambio en esclusas oceánicas, no conforman un proceso dable de ser despreciado. Las corrientes de densidad conducen a relativamente altos gradientes de velocidad cerca de la superficie libre, por lo tanto su correcta evaluación es indispensable en el abordaje integral de la operación de esclusas oceánicas (a pesar de que en este problema la operación de *Descarga* se impone como limitante).

En este trabajo, se presentó un estudio completo de simulación numérica tridimensional del problema de intercambio de esclusas del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá. Se incluyó, como forma de explotación del modelo validado, un análisis de sensibilidad para dar cuenta de las incertidumbres en los parámetros del modelo, lo que llevó a la definición de un rango superior de incertidumbre.

La escala de resolución adoptada (aproximación hidrostática) resultó acorde a las necesidades de respuesta del problema. Mayor detalle hubiese requerido incrementar rangos de incertidumbre y la posible dificultad en la interpretación de la dinámica de este problema.

Teniendo en cuenta la dinámica de las velocidades en la capa superficial del sistema, la restricción en la velocidad longitudinal superficial se cumple en el Sistema Pacífico del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá, incluso teniendo en cuenta un margen de incertidumbre. El tratamiento de la apertura de la compuerta de manera instantánea resultó una aproximación conservadora respecto de la operatividad planificada, en términos del cumplimiento de la restricción de la velocidad superficial.

REFERENCIAS

- Alavian, V., Jirka, G.H., Denton, R.A., Johnson, M.C., Stefan, H.G., 1992. Density Currents Entering Lakes and Reservoirs. *J. Hydraul. Eng.*, 118 (11), pp 1464–1489.
- Benjamin, T.B., 1968. Gravity currents and related phenomena. *J. Fluid Mech.*, 31, 209–248.
- Blumbert, A.F., Khanta, L.H., 1985. Open Boundary Conditions for Circulation Models, *J. Hydr. Eng.*, 11, 237-255.
- Birman, V.K., Martin, J.E., Meiburg, E., 2005. The non-Boussinesq lock-exchange problem. Part 2. High-resolution simulations. *Fluid Mech.* (2005), vol. 537, pp. 125–144.
- Calvo Gobbetti, L.E., 2013. Design of the filling and emptying system of the new Panama Canal locks, *Journal of Applied Water Engineering and Research* 1:1, 28–38, DOI: 10.1080/23249676.2013.827899.
- Cancino, L., Neves, R. (1999). “Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems, Part I: Description of the numerical models”, *Journal of Marine Systems*, 22, 105-116.
- Coelho, H., Neves, R., White, M., P. C. Leitão, Santos, A., 2002. A Model for Ocean Circulation on the Iberian Coast, *Journal of Marine Systems*, 32 (1-3), 153-179.
- Choi, S-U., Garcia, M.H., 2002. k - ϵ turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on slope. *J. Hydraul. Eng.*, 128 (1), pp. 55–63.
- Constantinescu, G., 2014. LES of lock-exchange compositional gravity currents: a brief review of some recent results, *Environ. Fluid Mech.*, 14, pp. 295–317.
- CPP (Consortio Post Panamax), 2008, Numerical Modeling of Density Currents - Pacific Approach, TO4-Task 4.2-TEC-R002, Engineering Services for Additional Studies and Technical Assistance for New Locks Contract, CMC-159475.
- Firoozabadi, B., Afshin, H., and Aram, E., 2009. Three-Dimensional Modeling of Density Current in a Straight Channel. *J. Hydraul. Eng.*, 135, (5), pp. 393-402.
- Fringer, O.B., McWilliams, J.C., Street, R.L. 2006. A new hybrid model for coastal simulations. *Oceanography*, 19 (1), pp. 64-77.
- Heaps, N.S., 1972. Estimation of Density Currents in the Liverpool Bay Area of the Irish Sea. *Geophys. J. Int.*, 30 (4), pp. 415-432.
- Jackson, P.R., García, C.M., Oberg, K.A., Johnson, K.K., García, M.H., 2008. Density currents in the Chicago River: Characterization, effects on water quality, and potential sources. *Science of The Total Environment*, 401 (1–3), pp 130–143.
- Klemp, J.B., Rotunno, R., Skamarock, W.C., 1994. On the dynamics of gravity currents in a channel. *J. Fluid Mech.*, 269, pp. 169-198.
- Kolar, R.L., Kibbey, T.C.G., Szpilka, C.M., Dresback, K.M., Tromble, E.M., Toohey, I.P., Hoggan, J.L., Atkinson, J.H., 2009. Process-oriented tests for validation of baroclinic shallow water models: The lock-exchange problem. *Ocean Modelling*, 28 , pp. 137–152.
- Martins, F., P. C. Leitão, A. Silva, R. Neves, 2001. 3D modelling of the Sado Estuary using a new generic vertical

- discretization approach, *Oceanologica Acta*, 24 (1), 51-62.
- Ooi, S.K., Constantinescu, G., Weber, L., 2009. Numerical simulations of lock-exchange compositional gravity current. *J. Fluid Mech.*, 635, pp. 361–388.
- Re, F., Badano, N.D., Menéndez, A.N., Sabarots Gerbec, M., Lecertúa, E.A., Re, M., 2010, Modelación numérica del tercer juego de esclusas del Canal de Panamá para el estudio de alternativas de diseño, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, noviembre.
- Saraiva, S., Pina, P., Martins, F., Santos, M., Braunschweig, F., Neves, R., 2007. Modelling the influence of nutrient loads on Portuguese estuaries, *Hydrobiologia*, 587:5–18.
- Simpson, J.E., 1982. Gravity Currents in the Laboratory, Atmosphere, and Ocean. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 14, pp. 213-234.
- Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J., Allen, G., 1990. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification, *Estuaries*, 13 (2), pp 125-132.
- Shin, J.O., Dalziel, S.B., Linden, P.F., 2004. Gravity currents produced by lock exchange. *J. Fluid Mech.*, 521, pp. 1–34.
- Trancoso, A., Saraiva, S., Fernandes, L., Pina, P., Leitão, P., Neves, R., 2005. Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary. *Ecological Modelling*, 187: 232–246.