

## Estudio de la cuña salina: río Pánuco, México

Gabriel Arcos-Espinosa

Instituto de Hidráulica Ambiental, Cantabria, España  
Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

Raúl Medina-Santamaría  
Fernando J. Méndez-Incera

Instituto de Hidráulica Ambiental, Cantabria, España

Sergio B. Jiménez-Hernández

Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

*El río del Pánuco, ubicado en la vertiente del golfo de México es un estuario micromareal. Este río se comporta la mayor parte del tiempo como un estuario altamente estratificado con cuña salina en su parte final. A fin de localizar los avances de la cuña salina en función de las descargas fluviales se utilizó el modelo numérico de dos capas (Cudaback y Jay 2000), el cual ha sido calibrado con datos de nueve campañas de campo realizadas durante el periodo 2005 y 2006. El proceso de calibración del modelo se efectuó para la situación de cuña salina estacionaria, para ello sólo se ajustó el parámetro de fricción interfacial  $C_f$ , comprobando que el modelo describe de manera satisfactoria la cuña salina estacionaria en el estuario del Pánuco. Se encontró la longitud de la cuña salina para cada uno de los caudales, ajustando una expresión que permite predecir su avance.*

**Palabras clave:** modelo de dos capas, cuña salina, estuario, río Pánuco, simulación numérica.

### Introducción

Los estuarios son complejos y fascinantes ambientes naturales que conectan dos sistemas distintos, el terrestre y el marino, donde se mezclan el agua salada y la dulce que proviene del escurrimiento terrestre (Pritchard, 1967). La riqueza de sus recursos y la estratégica ubicación de muchos de ellos, genera que cada vez sean más y mayores las comunidades que se asienten en sus márgenes, modificando de esta manera su comportamiento debido a presiones antropogénicas (Perillo *et al.*, 2005). Particularmente, es necesario reconocer que el encuentro entre el agua dulce y agua salada es capaz de transformar o remover biomasa (Morris *et al.*, 1978). En épocas de avenidas,

el flujo de agua dulce ayuda a remover los sedimentos y contaminantes, manteniendo el agua más limpia. Dada la variabilidad de la salinidad y temperaturas en la mezcla de aguas marinas y continentales, sólo permite que algunas especies endémicas vivan bajo estas condiciones (Harrison y Whitfield, 2006).

Existen diversos tipos de estuarios, sin embargo el estudio lo limitaremos a los estuarios altamente estratificados o cuña salina (Cameron y Pritchard, 1963), que se caracterizan por tener un alto grado de estratificación en la columna de agua, así como un bajo rango de marea y alta descarga del río (Stommel y Farmer, 1952; Pritchard, 1955). Así, bajo estas condiciones, una fuerte haloclina separa la capa superior e inferior (la cuña salina), cada una de composición casi

homogénea. Es necesario apuntar que la capa superior no es necesariamente dulce y que la profundidad de la haloclina sigue la forma general de una cuña, siendo más profunda en la dirección río arriba (Rattray y Mitsuda, 1974).

Múltiples factores pueden generar el rápido desarrollo de la cuña salina en un estuario, por ejemplo el vertiginoso aumento poblacional en sus riberas, que resulta en una alteración significativa que genera consecuencias colaterales con la construcción de estructuras que modifican el movimiento de su cauce fluvial y alteran la dinámica sedimentaria (Ibáñez *et al.*, 1996). También las alteraciones de la batimetría en su cauce, producto de actividades antropogénicas, así como alteraciones climáticas que pueden impactar en el desarrollo de la cuña salina (Sierra *et al.*, 2004). Otro factor preponderante es la alteración de las aguas del estuario, generada por fuertes descargas de afluentes domésticos e industriales (Lira *et al.*, 1997).

Todo lo antes señalado aporta elementos relevantes para poder entender de manera general el comportamiento de la cuña salina y sus repercusiones. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo está encaminado a localizar el avance de la cuña salina en función de las descargas fluviales en un estuario micro mareal, partiendo de la hipótesis de que en un estuario micro mareal la longitud de la cuña salina ( $L_s$ ) es función de las descargas fluviales ( $Q$ ).

Para lograr el objetivo es necesario disponer de instrumentos que permitan predecir el régimen dinámico de la cuña salina inducida por variables geométricas (batimetría irregular) y por variables ambientales (régimen de caudal fluvial, mareas y vientos).

Con el objetivo de responder a los puntos que se plantean, se ha hecho una recopilación de datos (batimetría, campañas de campo, régimen de caudales, régimen de mareas), así como una revisión de los modelos existentes. Con lo anterior, se llegó a la conclusión de la necesidad de implementar diversos modelos que permiten modelar el régimen dinámico de la cuña salina. En este estudio se utiliza un modelo numérico hidrodinámico unidimensional de dos capas que resuelve las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento.

El documento ha sido estructurado en cinco secciones. En la segunda sección se describe el área de estudio. En una tercera sección se presentan los datos y métodos. En una cuarta sección se muestran las aplicaciones del modelo numérico y los resultados comparados con los datos de campo. Finalmente se tienen las conclusiones y recomendaciones.

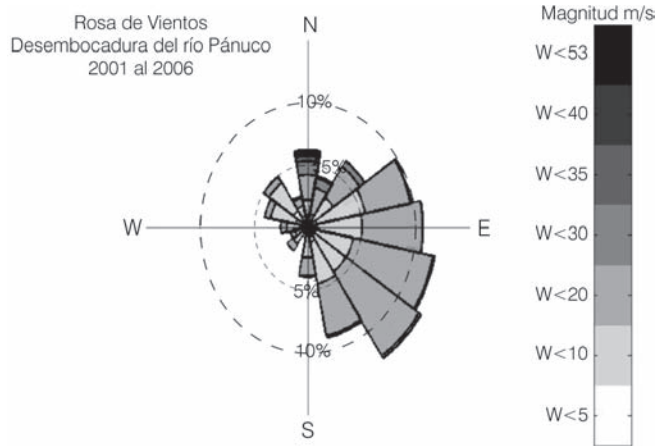
## Área de estudio

La zona de estudio (ver ilustración 1) se localiza en la subcuenca del Bajo Pánuco, la cual pertenece a la cuenca del Pánuco (84 956 km<sup>2</sup>), que se sitúa en la vertiente del Golfo de México. El cauce principal de la cuenca del Pánuco, que en su largo recorrido recibe distintos nombres e importantes aportaciones de otros afluentes, nace en el Estado de México y realiza un recorrido aproximado de 510 km hasta su desembocadura en el Golfo de México. En sus últimos 23 km, el cauce cuenta con valores promedios de 8.5 m de calado y 100 m de plantilla en su canal de navegación.

La subcuenca del Bajo Pánuco posee un clima de tropical a subtropical (Metcalf, 1987). Además, cuenta con una temperatura media anual que fluctúa en los 24.2 °C y en ella se registra una precipitación pluvial con una media anual aproximada de 1 000 mm. La precipitación de los meses de junio y julio se debe a la penetración de los vientos alisios. En el mes de agosto, el paso del sol en posición cenital, aunado al desplazamiento hacia el sur de la celda de alta presión del Golfo de México, interrumpe la intensidad de la precipitación, ocasionando una corta sequía y un aumento excesivo de la temperatura; aquí se produce un fenómeno local llamado *canícula*. A partir del mes de septiembre, las circulaciones ciclónicas y monzónicas se encargan de traer lluvias abundantes, así como tormentas eléctricas con chubascos y lluvias torrenciales. El promedio de lluvia acumulada para el mes de septiembre es de 250 mm, aproximadamente, y la precipitación máxima durante 24 horas ha llegado a alcanzar, de manera esporádica, el valor absoluto de 201 mm. La dirección de los vientos (ver ilustración 2) varía a lo largo del año

**Ilustración 1. Cuenca del Pánuco en la vertiente del Golfo de México.**



**Ilustración 2. Dirección y magnitud del viento registrado entre los años 2001 y 2006.**

del sureste a nordeste, destacando que cada año la presencia de la temporada de huracanes da comienzo el 1° de junio y termina el 30 de noviembre, puntualizando que estos eventos proceden generalmente del Mar de las Antillas, así como del propio Golfo de México. Durante el invierno desaparece el carácter ciclónico e inician los vientos del norte, por lo que las lluvias son de carácter frontal ligeras, pero persistentes.

Por otra parte, la estimación de los escurrimientos medios no comprometidos aguas abajo de la subcuenca de las tres estaciones hidrométricas del Olivo, Tamuín y Magiscatzin hasta su desembocadura en el Golfo de México son de 16 020 millones de metros cúbicos anuales (Semarnap, 1998). Aquí han sido registrados múltiples eventos extraordinarios, como el acontecido el 26 de septiembre 1993, llegando a reportar un caudal de 5 699 m<sup>3</sup>/s (Hudson y Colditz., 2003).

## Datos y método

### *Campañas de campo*

Para el análisis del comportamiento de la cuña salina en el estuario del Pánuco, el trabajo descansará en nueve campañas de campo que han registrado variables físicoquímicas del agua, éstas se realizaron bajo diferentes condiciones ambientales y se elaboraron con una cadencia aproximada de un mes; la primera fue hecha el 23 noviembre del 2005 y la última el 25 de agosto del 2006. Fue necesario instalar once estaciones de trabajo, distribuidas cada dos kilómetros en los últimos 23 kilómetros del río Pánuco (ver ilustración 3), donde se analizaron los perfiles en todas las estaciones con tomas de muestras a cada metro de profundidad, desde la superficie hasta el fondo del río.

**Ilustración 3. Estaciones de muestreo en el estuario del Pánuco.**

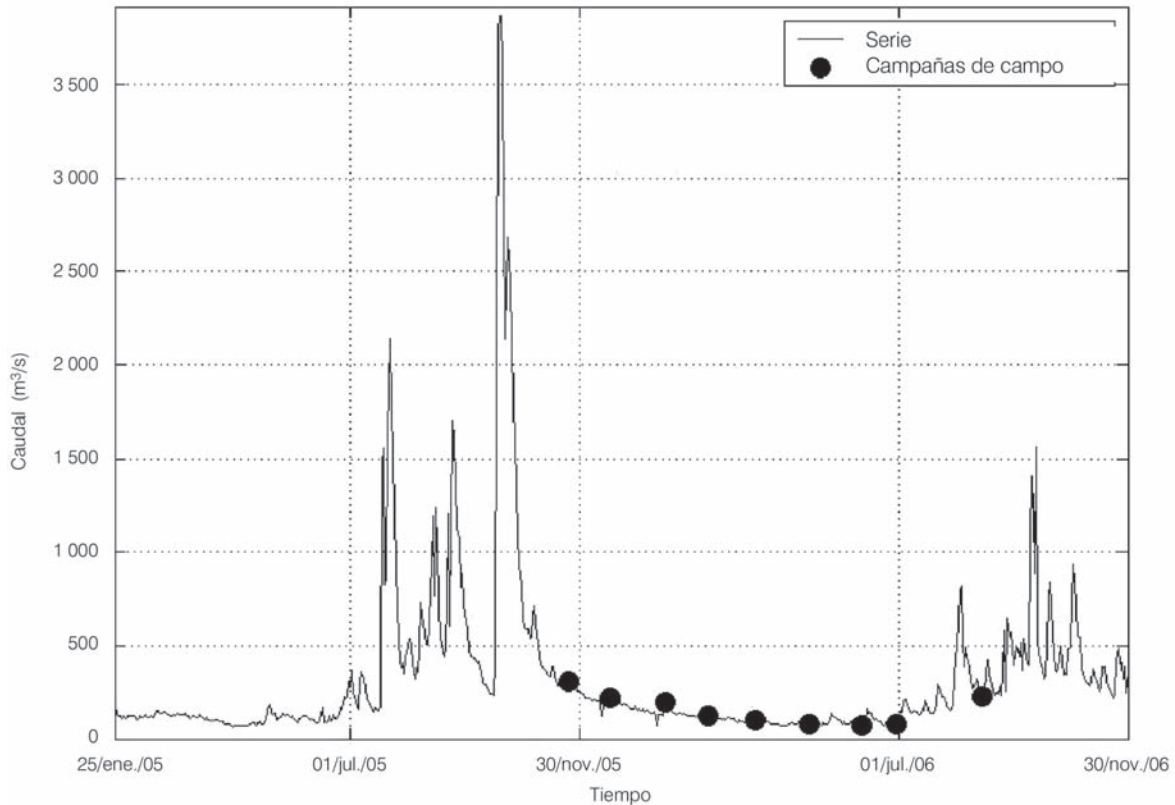
Los parámetros físico-químicos que se registraron en las diferentes campañas de campo fueron temperatura del agua, salinidad, conductividad y oxígeno disuelto, y se complementó con la obtención de tomas de muestras de sedimentos del fondo para su análisis granulométrico, así como de muestras de agua en la superficie y fondo para evaluar los sólidos en suspensión. Cabe mencionar que para posicionar las estaciones de trabajo se utilizó un GPS-GEOEXPLORER XT marca Trimble, además de una sonda multiparamétrica marca YSI. La toma de muestras de sedimentos de fondo fue hecha con una draga Ekman.

Los registros diarios de los caudales (ver ilustración 4) que se presentan son la suma de tres estaciones hidrométricas (ver ilustración 1), que fueron proporcionados por Comisión Nacional del Agua (CNA) a través de la Gerencia Regional Golfo Norte Región IX: el Olivo, con latitud 21° 50' 5''N y longitud 98° 30' 5''; Taquín, con latitud 22° 00' 08'' y longitud 98° 46' 06'', y finalmente Magiscatzin, con latitud 22° 48' 5'' y longitud 98° 43' 5''. En la serie temporal se puede apreciar claramente la época de estiaje, así como las fuertes avenidas que han sido registradas en el estuario del Pánuco entre los años 2005 y 2006.

Subrayando que de las tres estaciones hidrométricas donde se ha obtenido esta información, la que mayor aporte registra en la subcuenca del Bajo Pánuco pertenece a la estación del Olivo, le sigue Tamuín y por último Magiscatzin. La descarga diaria media durante este periodo de estudios fue de 328 m<sup>3</sup>/s, que es un valor menor que la descarga reportada (Semarnap, 1998), destacando que el 6 de junio del 2006 se presentó un evento extremo de poco caudal (68 m<sup>3</sup>/s). Los demás datos no sobrepasaron la descarga diaria media anual.

Por lo que respecta a las variables oceanográficas, los datos de marea (ver ilustración 5), proporcionados

Ilustración 4. Serie hidrométrica en la subcuenca del Bajo Pánuco.



por la Secretaría de Marina (Semar), pertenecen al mareógrafo instalado en el río Pánuco y ubicado en latitud  $22.2167^\circ$  N y longitud  $97.8500^\circ$  W. En él se muestra que el rango medio de marea es de 0.40 a 0.60 m. Como estos son menores a 2 m, el estuario es considerado micromareal (Montbet, 1992). La marea meteorológica máxima registrada es de 1.48 m (CFE). A la serie temporal proporcionada se le aplicó un análisis armónico para su clasificación, hecho en función del periodo dominante de la marea observada, que se basa en el factor de forma  $R$  (U.S. Army Corps of Engineers, 1984) y es el resultado de un cociente entre la suma de la amplitud de las dos componentes diurnas  $K_1=0.128610$  y  $O_1=0.127115$ , y la suma de las dos componentes semidiurnas  $M_2=0.069834$  y  $S_2=0.022167$ , resultando el factor de forma  $R=2.78$ , valor que indica que es una marea mixta, predominantemente diurna. Es significativo apuntar que las diferencias de elevaciones registradas (ver cuadro 1) por el mareógrafo entre el inicio y final de los muestreos no superan los 14 cm, una de las razones por las que se utiliza la situación de la cuña salina estacionaria.

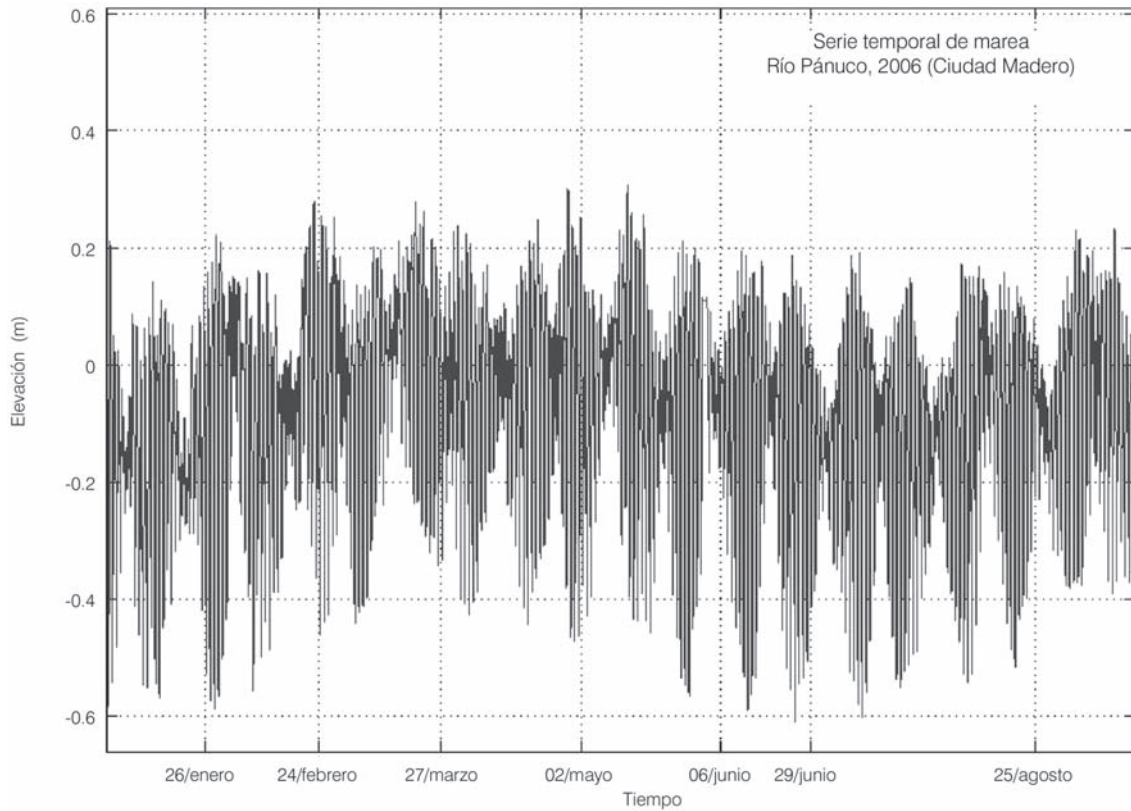
Los diferentes datos de salinidad y temperatura del agua en el estuario han sido obtenidos en un periodo

de intensas campañas de campo en las 11 estaciones de trabajo. En cada una de las estaciones se obtuvieron perfiles que nos muestran el comportamiento de la salinidad y temperatura, de esta manera se puede apreciar la penetración del agua salada dentro del estuario, así como las diferentes profundidades de la cuña salina. En la siguiente imagen (ver ilustración 6) se muestra la distribución de la salinidad en el río Pánuco durante las campañas de campo. Por su estructura de salinidad, el Pánuco es un estuario altamente estratificado que presenta dos capas diferenciadas: una superior dulce y otra inferior salada. Aquí se logra apreciar que el espesor de la interfase de la cuña aumenta en dirección río abajo, debido a que el conjunto de elementos de mezcla, como el oleaje y viento, suelen ser más dinámicos en la proximidad de la desembocadura del río.

### Método numérico

Se han desarrollado diversos trabajos concernientes a la cuña salina (Schijf y Schonfeld, 1953; Keulegan, 1966; Dermisis y Partheniades, 1984; Geyer, 1985; Helfrich, 1995; Cudaback y Jay, 2000), los resultados

Ilustración 5. Serie de marea del río Pánuco observada durante 2006.



Cuadro 1. Campañas de campo y resultados del modelo numérico.

Muestreo	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Diferencia de elevaciones (m)	Longitud (km)	C <sub>i</sub>	ECM
23 nov. 2005	310	-	14.44	0.000329	0.14
21 dic. 2005	215	-	16.28	0.000338	0.13
26 ene. 2006	195	0.01	16.44	0.000345	0.2
24 feb. 2006	125	0.12	19.48	0.000346	0.19
27 mar. 2006	96	0.02	> 20	0.000358	0.24
2 may. 2006	80	0.13	> 20	0.000362	0.3
6 jun. 2006	68	0.02	> 20	0.000362	0.29
29 jun. 2006	78	0.14	>20	0.000362	0.28
25 ago. 2006	228	0.07	14.52	0.000331	-

más importantes tienen su aplicación en una dimensión y son aplicables a problemas prácticos.

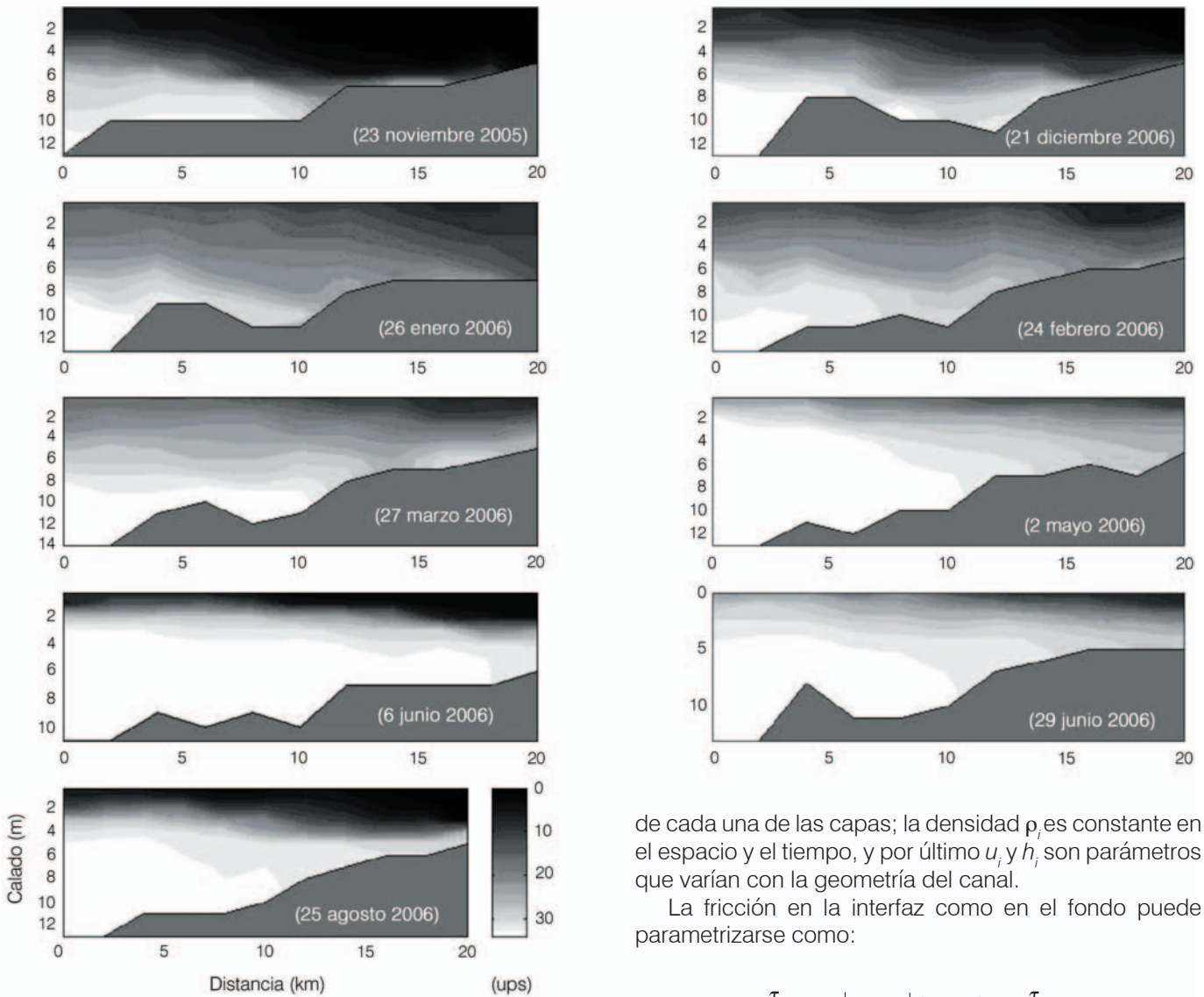
La simulación numérica de la cuña salina se apoya en el trabajo de Cudaback y Jay (2000). Dado que las ventajas de este modelo es que permite simular distintas condiciones de contorno (curvas de marea, hidrograma variable) sobre geometría variable, lográndose simular

la posición de la cuña salina a lo largo del tiempo, a continuación se presenta un esquema (ver ilustración 7) donde se puede apreciar la geometría y sus variables para sus dos capas.

El modelo resuelve las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad para cada una de sus capas, esto permite obtener cuatro ecuaciones;



Ilustración 6. Perfiles de salinidad en el río Pánuco.



por ello, si se emplea para ambas capas, la primera ecuación, donde actúa la fricción entre sí y con el fondo, se obtienen:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -g \frac{\partial}{\partial x} (h_1 + h_2 + h_s) - \frac{\partial P}{\partial x} \frac{1}{\rho_1} - \frac{\tau_{12}}{\rho_1 h_1}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = -g \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} h_1 + h_2 + h_s \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \frac{1}{\rho_2} - \frac{\tau_{21} + \tau_b}{\rho_2 h_2}$$

Los subíndices en las expresiones indican la capa a la que corresponden según el esquema, siendo  $h_s$  la elevación del punto de referencia al fondo y  $h_i$  el espesor

de cada una de las capas; la densidad  $\rho_i$  es constante en el espacio y el tiempo, y por último  $u_i$  y  $h_i$  son parámetros que varían con la geometría del canal.

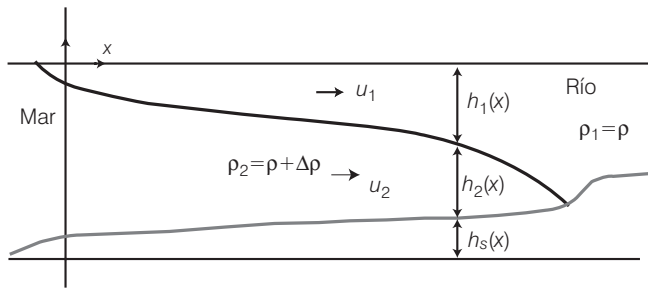
La fricción en la interfaz como en el fondo puede parametrizarse como:

$$\frac{\tau_{12}}{\rho_1} = C_i |u_2 - u_1| (u_2 - u_1) = - \frac{\tau_{12}}{\rho_2}$$

$$\frac{\tau_b}{\rho_2} = C_d |u_2| u_2$$

Siendo  $C_i$  el coeficiente de fricción entre las dos capas, donde son iguales las tensiones tangenciales, pero de signo contrario y  $C_d$  es el coeficiente de fricción en el fondo. El modelo plantea que las dos capas actúan como dos bloques sólidos que actúan entre sí. El coeficiente  $C_i$  es obtenido con base en mediciones hechas en las campañas de campo del río Pánuco. De manera complementaria se plantea que la variación del nivel es despreciable (hipótesis *rigid lid*) para una altura  $H$  y un caudal  $Q$  constante:

Ilustración 7. Modelo de dos capas.



$$H = h_1 + h_2 + h_s$$

$$Q = wh_1u_1 + wh_2u_2$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Si el ancho medio de la sección es  $w$ , todas estas simplificaciones, junto con las de Boussinesq, permiten reducir el número de incógnitas a tres:

$$\frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \right) + \frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2} \frac{\partial h_1}{\partial x}$$

$$-C_i |u_2 - u_1| (u_2 - u_1) \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) - \frac{C_d |u_2| u_2}{h_2}$$

$$\frac{\partial wh_1}{\partial t} + \frac{\partial wh_1 u_1}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial wh_2}{\partial t} + \frac{\partial wh_2 u_2}{\partial x} = 0$$

El coeficiente  $C_d$  fue estimado con la expresión:

$C_d = \frac{g}{C^2}$ , donde  $C$  es el coeficiente de fricción de Chezy.

Las condiciones de contorno del modelo se especifican en la desembocadura del cauce para cada una de las variables. Definiendo un caudal y un número de Froude interno  $F'_{ro}$  en la desembocadura como condición de contorno:

$$F'_{ro} = \frac{V_o}{\sqrt{g' h_o}}$$

$V_o$  es la velocidad en la parte no afectada por la cuña y  $h_o$  es el calado.

$$g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$\rho$  es la densidad de la capa superior,  $\Delta \rho$  es la diferencia entre la capa inferior y superior, y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Para obtener la expresión de la cuña atrapada estacionaria que se utiliza en el trabajo, se aceptan las siguientes hipótesis:

- No existe dependencia temporal ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ).
- En la capa inferior, la velocidad es nula cuando se encuentra estacionaria ( $u_2 = 0$ ).
- Variables ambientales despreciables, con excepción del caudal, temperatura y salinidad del agua.
- Densidad constante en las capas y no hay mezcla.

De esta manera se obtendrá la descripción de la cuña salina para cada caudal constante:

$$\frac{\partial u_1^2}{\partial x} + g' \frac{\partial h_1}{\partial x} + C_i |u_1| u_1 \left( \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_1} \right) = 0$$

$$\frac{\partial wh_1 u_1}{\partial x} = 0$$

Finalmente el modelo nos ayuda a encontrar dos parámetros relevantes:

- La máxima longitud de la cuña salina cuando ( $h_2 = 0$ ).
- Longitud media de la cuña cuando ( $h_2 = h_1$ ).

### Aplicaciones y resultados del modelo

#### Proceso de calibración del modelo a dos capas

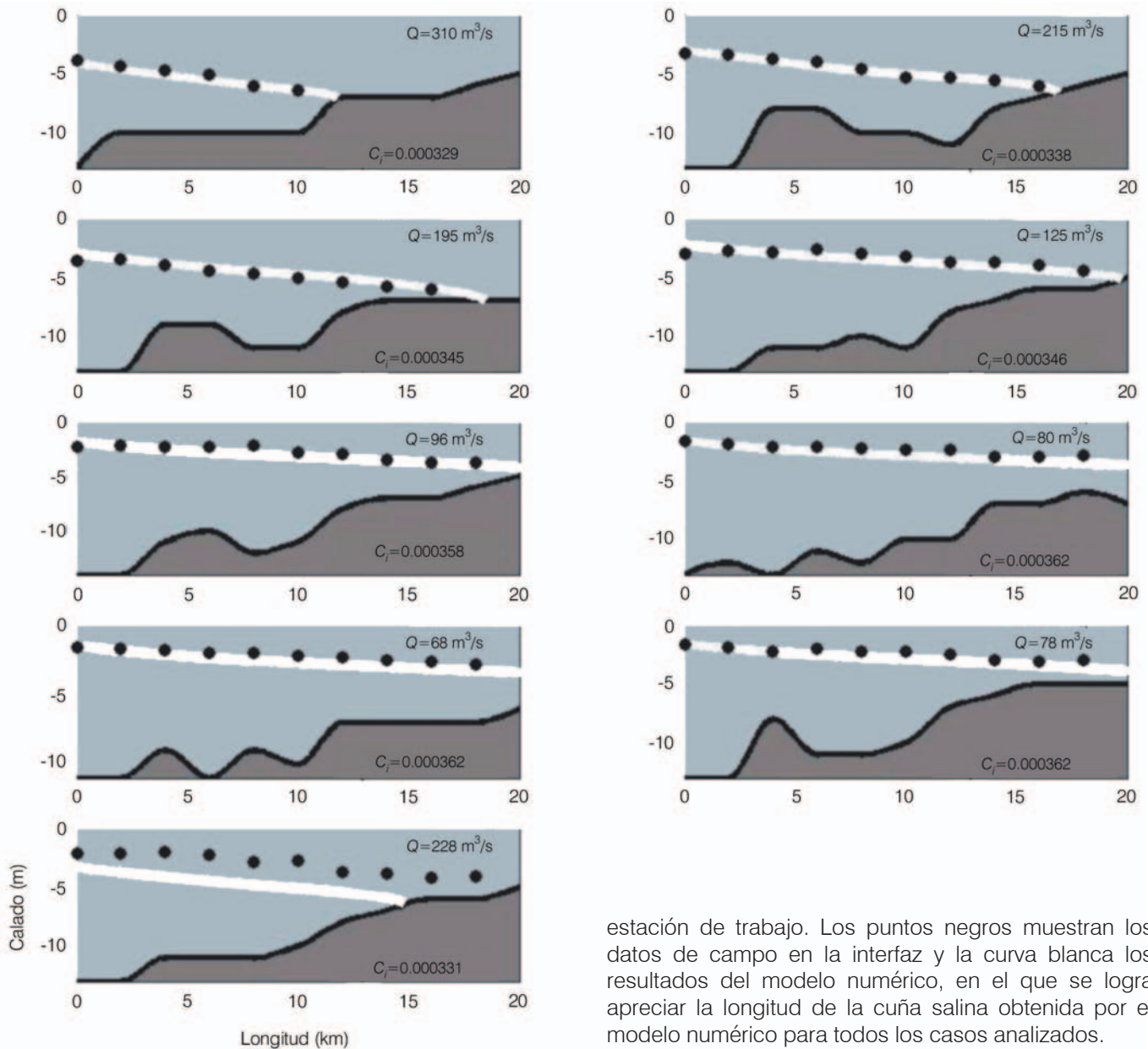
La calibración del modelo numérico de dos capas se procedió a realizar a partir del avance longitudinal de la interfaz para diversos caudales y las respectivas batimetrías del canal. Posteriormente se llevó a cabo la validación con datos del espesor de la capa de agua dulce en los diferentes puntos de muestreo para cada uno de los caudales analizados. El proceso de calibración para el modelo de dos capas se efectuó para la situación de la cuña salina estacionaria debido a que no se contó con series temporales en los puntos de muestreo que permitieran pasar al análisis transitorio;

sin embargo, este escenario facilitó el proceso y sólo se tuvo que ajustar el parámetro de fricción interfacial  $C_i$  en la última expresión de cantidad de movimiento. Cabe señalar que al modelo numérico se le impone como condición inicial un Froude interno igual a uno; las condiciones de contorno aguas arriba fueron la temperatura, la salinidad y el caudal; las hipótesis que se plantearon fueron la no existencia de mezcla, que la capa inferior permanezca atrapada inmóvil y se desprecia la variación de nivel al aplicarse la hipótesis

*rigid lid*; se utiliza un ancho a lo largo de todo el canal de 100 m que, junto con el caudal, permanece constante.

A continuación se presentan los resultados de las distintas campañas de campo (ver ilustración 8) que se utilizaron para calibrar la simulación numérica, también los distintos caudales junto con los resultados del modelo que se obtuvieron del coeficiente de fricción  $C_i$ , particularmente se observa el perfil longitudinal sobre el eje del río desde su desembocadura hasta la última

Ilustración 8. Simulaciones numéricas y los datos de campo analizados.



estación de trabajo. Los puntos negros muestran los datos de campo en la interfaz y la curva blanca los resultados del modelo numérico, en el que se logra apreciar la longitud de la cuña salina obtenida por el modelo numérico para todos los casos analizados.



## Resultados del modelo de dos capas

El modelo numérico sólo se pudo validar hasta la estación 11, ubicada metros antes del puente conocido como el Prieto, a 22 km de la desembocadura, ya que no se cuentan con datos de campo después de dicha estación. Como se observa, el error cuadrático medio (ver cuadro 1) entre el modelo y los datos de campo son aceptables para los primeros muestreos. Esto parece ser debido a que los escurrimientos iniciales no muestran grandes alteraciones; no es así para la última campaña (25 de agosto de 2006), donde existen fluctuaciones importantes de caudales entre un día y otro, y la hipótesis de estacionalidad no es muy representativa de las medidas efectuadas.

Una vez realizada la calibración del modelo numérico, se precisa un lugar geométrico para poder definir en un futuro el coeficiente de fricción  $C_f$ , en función del caudal (ver ilustración 9).

## Validación del modelo numérico

La calibración del parámetro  $C_f$  del modelo numérico de la cuña salina de dos capas permite ajustar una expresión (ilustración 10) que pueda predecir de manera aproximada cuál es el avance máximo de la cuña salina. Esta herramienta permite estimar la longitud de la cuña salina para un determinado caudal, teniendo como origen la primera estación de trabajo ubicada en el arranque de la escollera norte del canal; es necesario tomar estos datos con cautela debido a las escasas campañas de campo. Así también se puede estimar para las diferentes estaciones de trabajo (ilustración 11) la profundidad de la cuña para un determinado caudal.

Ilustración 9. Calibración del coeficiente de fricción.

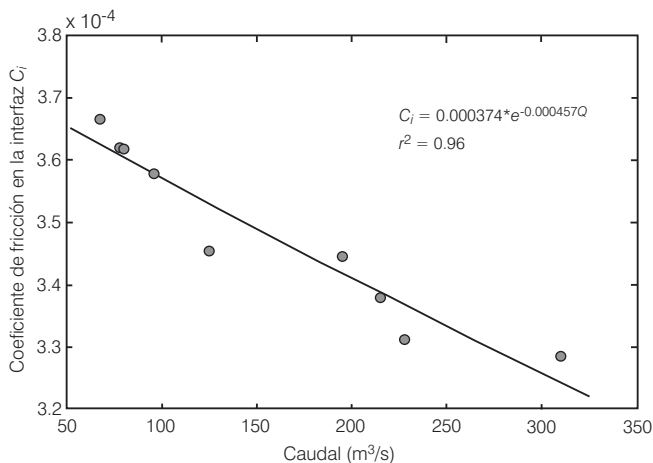
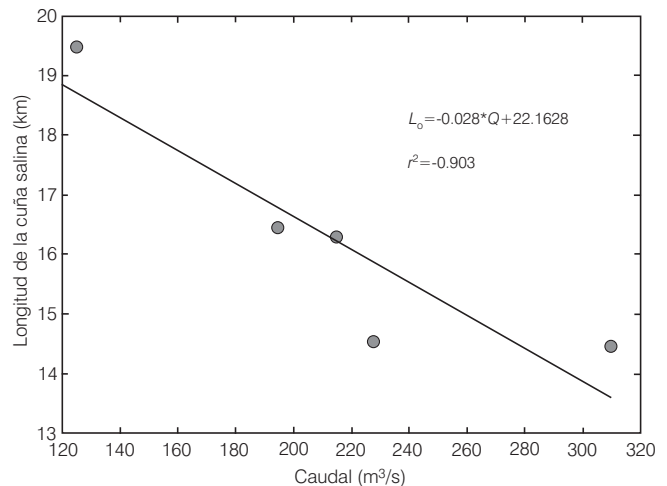


Ilustración 10. Longitud de la cuña salina en función del caudal para el río Pánuco.



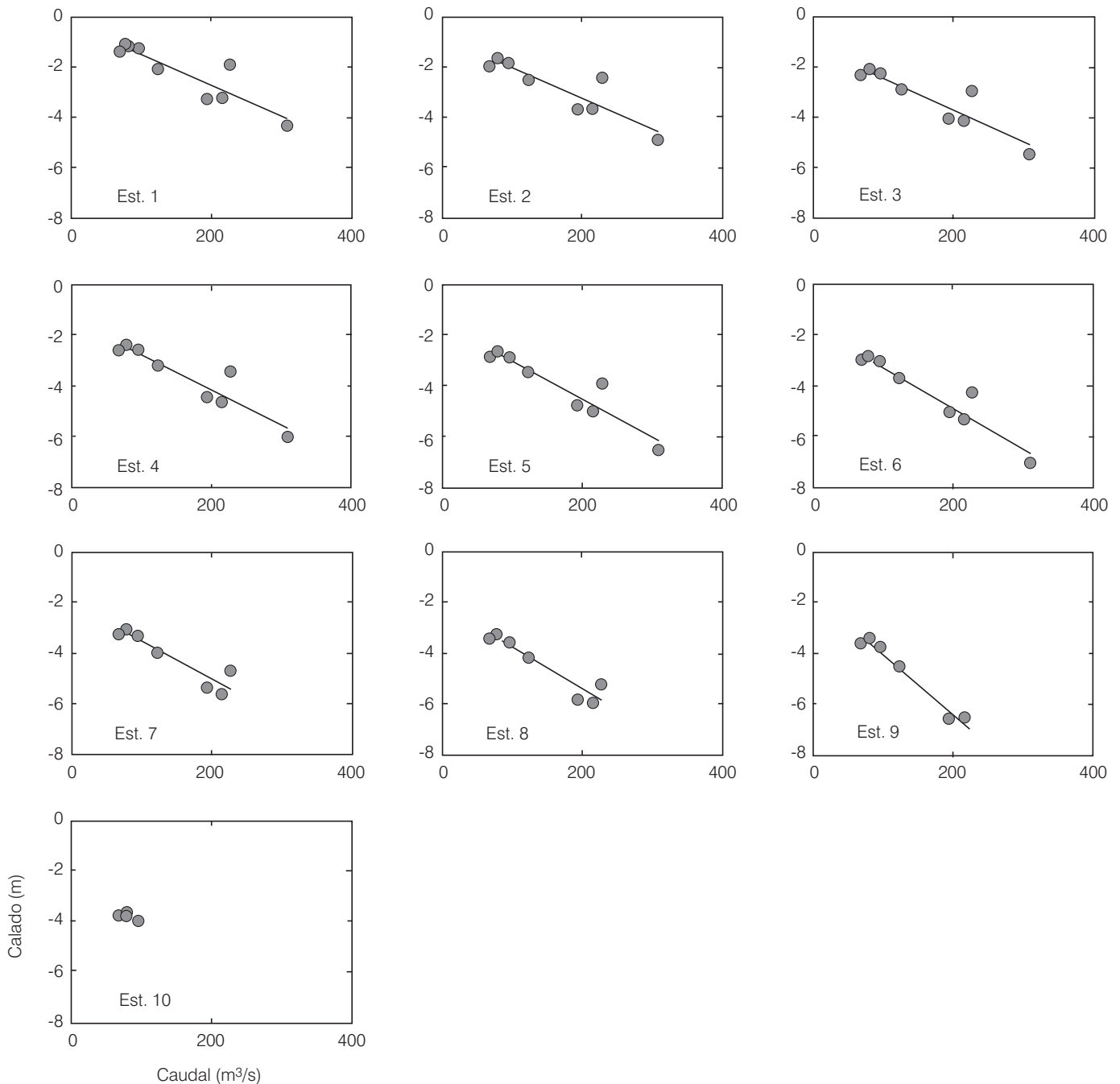
## Conclusiones y recomendaciones

En el estuario del Pánuco se ha determinado el avance de la cuña salina para diferentes variables (caudales y batimetrías), utilizando el modelo numérico de Cudaback y Jay (2000) de dos capas que resuelve la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en régimen transitorio. El modelo ha sido validado para condiciones estacionarias, utilizando los datos de campo obtenidos de noviembre de 2005 a agosto de 2006, donde se observa una alta correlación entre los datos de campo y los resultados del modelo. Con esto se comprueba que el modelo da excelentes resultados para modelar una cuña salina estacionaria. Se observó que la localización y la dinámica de la cuña salina en la sección del estuario del Pánuco están controladas principalmente por el caudal, aunque la morfología del cauce debe tener un papel determinante en ambas.

Los avances máximos encontrados de la cuña salina en el estuario a partir de su desembocadura fueron los siguientes: para un caudal de 310 m³/s, se encontró frente a la terminal de Cemex a 15.44 km; para 215 y 195 m³/s se halló a la altura del Club de Yates Tampico a 17.4 km, y finalmente para un caudal de 125 m³/s se situó frente al Puente del Prieto a 22 km. Los resultados indican que para caudales menores a 125 m³/s, la intrusión de la cuña salina supera los 22 km más allá de la última estación de monitoreo considerado para el estudio.

Todos los resultados se deberán tomar con cautela, ya que sólo se ha trabajado con datos del periodo comprendido entre noviembre de 2005 y agosto de

**Ilustración 11. Profundidad de la interfaz en función del caudal para cada estación del Pánuco.**



2006, abarcando un determinado rango de caudales. Los resultados de campo y del modelo muestran que la longitud máxima en un año se puede presentar después de la estación 11. Por ello, si se desea conocer la longitud máxima de la cuña salina, es recomendable extender el espacio de muestreo si los caudales son menores a 125 m<sup>3</sup>/s.

### Agradecimientos

Se agradece el apoyo obtenido por la Secretaría de Marina a través de la Estación de Investigación Oceanográfica de Tampico. Asimismo, a la Comisión Nacional del Agua, a través de la Gerencia Regional Golfo Norte Región IX; al Instituto de Investigación en Ingeniería de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, y al Puerto de Tampico, por

toda la información de campo proporcionada para la elaboración de este trabajo. También se agradece el financiamiento de Gabriel Arcos Espinosa al programa Promep, a Fernando J. Méndez Incera, y al Ministerio de Educación y Ciencia de España, a través del Programa Ramón y Cajal.

Recibido: 22/03/2007

Aprobado: 05/09/2007

## Referencias

- CAMERON, W.M. and PRITCHARD, D.W. *Estuarios. In the Sea*. Vol. 2. New York: Wiley, 1963, pp. 306-324.
- CUDABACK, C.N. and JAY, D.A. Tidal asymmetry in an estuarine pycnocline: 1, depth and thickness. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 105, no. C11, 2000, pp. 26237-26257.
- DERMISSIS, V. and PARTHENIADES, E. Interfacial Resistance in Stratified Flow. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE. Vol. 110, núm. 2, May, 1984, pp. 231-250.
- GEYER, W.R. *The time-dependent dynamics of a salt wedge*. Ph. D. Thesis. Seattle: University of Wash, 1985.
- HARRISON, T.D. and WHITFIELD, A.K. Temperature and salinity as primary determinants influencing the biogeography of fishes in South African estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. Vol. 66, 2006, pp. 335-345.
- HELFRICH, K. Time-dependent two layer hydraulic exchange flow. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 25, 1995, pp. 359-373.
- HUDSON, P.F. and COLDITZ, R.R. Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Pánuco basin Mexico. *Journal of Hydrology*. Vol. 280, 2003, pp. 229-245.
- IBÁÑEZ, C., PRAT, N. and CANICIO, A. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and its estuary. *Regulated Rivers: Research & Management*. Vol. 12, 1996, pp. 51-62.
- KEULEGAN, G.H. *The Mechanics of an Arrested Saline Wedge*. Ch. 11 Estuary and Coastline Hydrodynamics. Ippen, A.T. (editor). New York: McGraw Hill, 1966, pp. 546-574.
- LIRA, J., MORALES, A., and ZAMORA, F. Study of sediment distribution in the area of the Pánuco river plume by means of remote sensing. *Int. J. Remote Sensing*. Vol. 18, no. 1, 1997, pp. 171-182.
- METCALFE, S.E. Historical data and climatic change in Mexico a review. *The geographical journal*. Vol. 153, no. 2, July 1987, pp. 211-222.
- MONBET, Y. Control of phytoplankton biomass in estuaries: a comparative analysis of microtidal and macrotidal estuaries. *Estuaries*. Vol. 15, 1992, pp. 563-571.
- MORRIS, A.W., MANTOURA, R.F.C., BALE, A.J. and HOWLAND, R.J.M. Very low salinity regions of estuaries: important sites for chemical and biological reactions. *Nature*. Vol. 274, 1978, pp. 678-680.
- PERILLO, G.M.E., PEREZ, D.E., PICCOLO, M.C., PALMA, E.D., CUADRADO, D.G. Geomorphologic and physical characteristics of a human impated estuary: Quequén Grande River Estuary, Argentina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 62, 2005, pp. 301-312.
- PRITCHARD, D.W. Estuarine circulation patterns. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* Vol. 81, no. 717, 1955, pp. 1-11.
- PRITCHARD, D.W. What is an estuary: a physical viewpoint. *American Association for the Advancement of Science*. Vol. 83, 1967, pp. 3-5.
- RATTRAY, M. and MITSUDA, E. *Theoretical analysis of conditions in a salt wedge*. *Estuarine Coastal Marine Science*. Vol. 2, 1974, pp. 375-394.
- SCHIJF, J.B. and SCHONFELD, J.C. Theoretical Considerations on the Motion of Salt and Freshwater. *Proceeding. Minnesota International Hydrodynamics Convention*, 1953, pp. 321-333.
- SEMARNAP. Estudios técnicos para determinar la disponibilidad de las aguas superficiales de la cuenca del río Pánuco. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F., 26 de octubre de 1998, pp. 7-9.
- SIERRA, J.P., SANCHEZ-ARCILLA, A., FIGERAS, P.A., GONZÁLEZ DEL RÍO, J., RASSMUSSEN, E.K. and MÖSSO, C. Effects of discharge reductions on salt wedge dynamics of the Ebro river. *River research and applications*. Vol. 20, 2004, pp. 61-77.
- STOMMEL, H. and FARMER, H.G. On the nature of estuarine circulation WHOI. *Tech. Rep.* Vol. 131, 1952, pp. 52-88.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Shore protection Manual Coastal Engineering*. Part. 2, Chapter 5. Washington, D.C.: Research Center, 1984, pp. 24-25.

**Abstract**

ARCOS-ESPINOSA, G., MEDINA-SANTAMARÍA, R., MÉNDEZ-INCERA, F.J. & JIMÉNEZ-HERNÁNDEZ, S.B. Study of the salt wedge of the Pánuco River, Mexico. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIII, no. 3, July-September, 2008, pp. 77-88.

The Pánuco River, a microtidal estuary in the slope of the Gulf of Mexico, behaves most of the time as a highly stratified estuary with a salt wedge in its last stretch. The objective is to locate the advances of the salt wedge based on fluvial discharges. In order to do that, a two-layer numerical model is used (Cudaback and Jay 2000). This model has been calibrated with data from nine field campaigns carried out during 2005 and 2006. The process of calibration for the two-layer model was performed for the situation of arrested salt wedge, obtaining a fit for the interface friction parameter  $C_i$ . The length of the salt wedge was obtained for each one of fluvial discharge into the estuary. The model describes satisfactorily the salt wedge in the Pánuco estuary.

**Keywords:** two-layer model, salt wedge, estuary, Pánuco River, numerical simulation.

**Dirección institucional de los autores:**

*M.C. Gabriel Arcos-Espínosa*

Instituto de Hidráulica Ambiental, Cantabria, España  
Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Tamaulipas,  
México  
Bolivia 813, colonia Felipe Carrillo Puerto  
39430 Ciudad Madero, Tamaulipas, México  
teléfono: + (52) (833) 126 0743  
fax: + (52) (833) 241 2000, extensión 3544  
garcos@uat.edu.mx  
gabriel.arcos@alumnos.unican.es

*Dr. Raúl Medina-Santamaría*

Catedrático  
Universidad de Cantabria  
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas  
Avenida Castros s/n  
39005 Santander, España  
teléfono: + (34) (942) 201 810  
fax: + (34) (942) 201 860  
medinar@unican.es

*Dr. Fernando J. Méndez Incera*

Investigador Ramón y Cajal  
Universidad de Cantabria  
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas  
Avenida Castros s/n  
39005 Santander, España  
teléfono: + (34) (942) 201 810  
fax: + (34) (942) 201 860  
mendezf@unican.es

*Dr. Sergio B. Jiménez-Hernández*

Director  
Instituto de Investigación en Ingeniería  
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México  
Centro Universitario Tampico-Madero  
89337 Tampico, Tamaulipas, México  
Teléfono y fax: + (52) (833) 241 2051  
fax: + (52) (833) 241 2000, extensión 3544  
sjimenez@uat.edu.mx