

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN  
SUSPENSION EN PRESENCIA DE UNA CUÑA SALINA**

**CRISTIÁN GODOY B.<sup>1</sup>  
YARKO NIÑO<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

El presente estudio busca mejorar la comprensión de la dinámica del transporte de sedimento en suspensión en presencia de una cuña salina, en estuarios estratificados. Esta intrusión salina puede generar variaciones de importancia en la capacidad del flujo de transportar y movilizar las partículas sólidas en el flujo, induciendo una importante disminución de la turbulencia ambiente. El estudio se basa en experiencias de laboratorio, las que posibilitaron caracterizar la distribución de sedimentos en la columna de agua y la distribución de la turbulencia al interior del sistema. La experimentación fue desarrollada en un canal de laboratorio de 9.3 m de largo y 0.4 m de ancho, en donde se genera una cuña salina arrestada. Una suspensión de partículas sólidas es alimentada desde la cabecera del canal. Para la caracterización de la velocidad y turbulencia fue utilizado un sensor Doppler acústico (ADV). La concentración fue medida mediante la toma de muestras y también mediante una calibración de la amplitud de la señal capturada por el sensor ADV, relacionándolo con la cantidad de sedimento suspendido. Los resultados obtenidos muestran una influencia directa de la presencia de sedimento suspendido sobre la reducción del largo de la cuña salina. Además, se observa una disminución de turbulencia presente en la zona cercana a la interfaz, debido tanto a la movilización del sedimento suspendido, como a la presencia de agua de mayor densidad en la cuña salina, siendo los efectos boyantes los principales responsables de la disminución de los flujos turbulentos en la vertical, favoreciendo la depositación del sedimento en la zona de la cuña.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – mail: [cgodoy@ing.uchile.cl](mailto:cgodoy@ing.uchile.cl)

<sup>2</sup>Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - mail: [ynino@ing.uchile.cl](mailto:ynino@ing.uchile.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio busca mejorar la comprensión de la dinámica del transporte de sedimento en suspensión en sistemas estuariales altamente estratificados, con presencia de cuña salina, enfocándose tanto en los cambios sobre la capacidad de transporte de sedimento del flujo inducidos por la intrusión salina, como las alteraciones sobre ésta última producida por el sedimento en suspensión.

La cuña salina, en estuarios, corresponde a un tipo de interacción entre el agua dulce proveniente del río y el agua salada de mar, en el que la columna de agua se estratifica en dos capas de distinta densidad, de modo que el agua dulce fluye sobre el agua salina que intruye en el estuario. Este tipo de intrusión salina puede extenderse por longitudes considerables aguas arriba (Olivares, 2000). Por otro lado, en muchos casos el flujo del río presenta una carga importante de sedimento en suspensión. Cuando un flujo de tales características enfrenta una cuña salina puede generarse un cambio importante en la extensión de la intrusión salina, así como un intercambio de sedimentos entre las capas de distinta densidad de la columna de agua, lo cual modifica la capacidad de transporte de sedimentos del flujo. Este tipo de interacción entre cuña salina y el transporte de sedimentos aparentemente no ha sido estudiada en detalle con anterioridad. Los estudios relacionados se han enfocado en uno u otro fenómeno (e.g, Sargent y Jirka, 1987; Jensen, Brunk, Jirka y Lion, 1999), no profundizando en la búsqueda de la conceptualización de su interacción a nivel de las pequeñas escalas presentes en los flujos, como es la turbulencia.

El transporte de sedimentos en sistemas estuariales no siempre es completamente eficiente, dado que la presencia de efectos como la marea impiden descargar el gasto sólido en su totalidad fuera del estuario. Lo anterior tiende a generar una acumulación de estos sedimentos en el estuario, hecho que genera tres problemas principales. El primero corresponde a problemas de navegabilidad asociados a los embanques producidos; el segundo nace como una consecuencia del primero y corresponde a la alteración del comportamiento hidráulico del estuario, y en consecuencia de todo el escurrimiento hacia aguas arriba, por la alteración de las condiciones de borde en la zona de la desembocadura. Por último y no menos importante, la acumulación de contaminantes presentes en forma adsorbida en el material particulado depositado constituye una amenaza a los sistemas ecológicos presentes en los sistemas estuariales, debido a su disponibilidad para bioacumulación y biomagnificación. La presencia de una cuña salina puede contribuir a estos problemas en la medida que altere la capacidad de transporte del sedimento en suspensión, incrementando las tasas de depositación de éste (Niño et al., 2006).

En este trabajo se reportan resultados de un estudio experimental realizado con el fin de analizar los parámetros que gobiernan el problema de la interacción de una cuña salina con un flujo cargado de sedimentos, para generar información más completa respecto del comportamiento de la cuña en presencia de sedimentos y de cómo la estratificación modifica el proceso de transporte y depositación de sedimentos, mediante el análisis de la turbulencia presente.

## 2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La experimentación se realizó en un canal de laboratorio que permite ser alimentado por dos caudales, uno de agua dulce, desde el extremo aguas arriba, y otro de agua salada, alimentado desde aguas abajo por medio de un orificio en el fondo del canal. Con ambos caudales es posible generar una cuña salina arrestada en el interior del canal.

La altura del escurrimiento es controlada por medio de una compuerta de clapeta en el extremo de aguas abajo del canal, en tanto que el espesor del estrato inferior (cuña salina) es limitado por una compuerta con forma de L, de 31 cm de altura y 25 cm de largo, ubicada en el extremo de aguas abajo, la que permite imponer una condición cercana a la crisis interna en la sección de salida (Fig. 1).

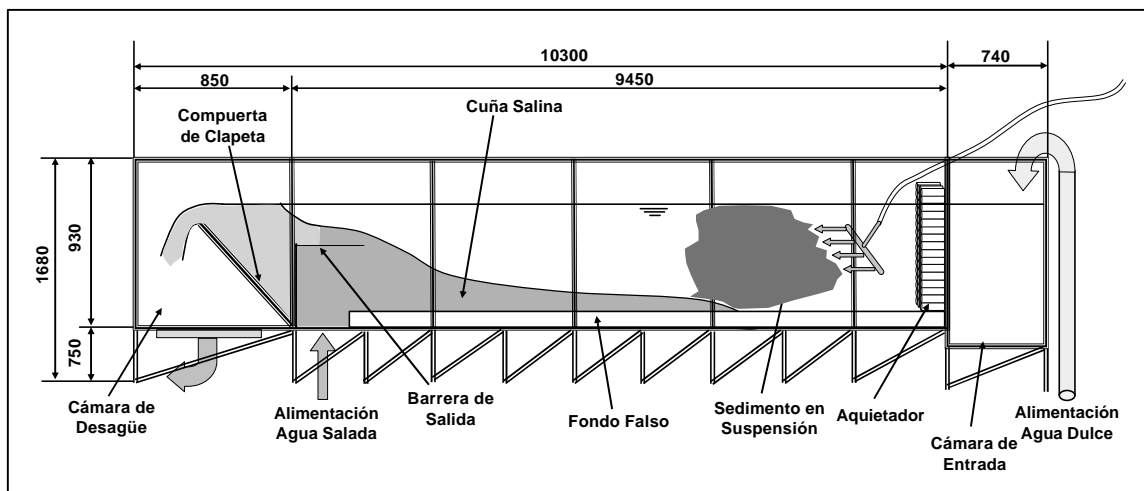


Figura 1: Esquema de la instalación experimental.

El aporte de sedimento al flujo de agua dulce se realiza, desde un estanque de mezcla, en el extremo de aguas arriba del canal, por medio de un difusor transversal (Fig.2). El estanque de mezcla, de carga constante, entrega una mezcla de sedimento y agua a una concentración conocida (Fig.3).



Figura 2: Difusor transversal



Figura 3: Sistema mezclador

Los caudales de agua dulce y salada son controlados independientemente por medio de placas orificio instaladas en las líneas de alimentación de ellos al canal. El caudal de agua salada es mantenido para mantener la cuña arrestada, de modo de contrarrestar el flujo salino perdido en la condición de borde de aguas abajo de la cuña y en menor medida debido a la mezcla producida en la interfaz a lo largo de ella.

## INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación utilizada corresponde a un sensor Doppler acústico (AVD Sontek), con capacidad de realizar mediciones a una frecuencia de 50 Hz. El instrumento permite medir las tres componentes de velocidad de un sistema de ejes cartesianos (Fig.4). La obtención de las series de velocidad en los tres ejes posibilita el análisis de la turbulencia ambiental presente en la instalación. Las capacidades de este instrumento, los errores asociados y las condiciones de su operación óptima han sido estudiadas extensivamente en el pasado (e.g., García et al., 2005).

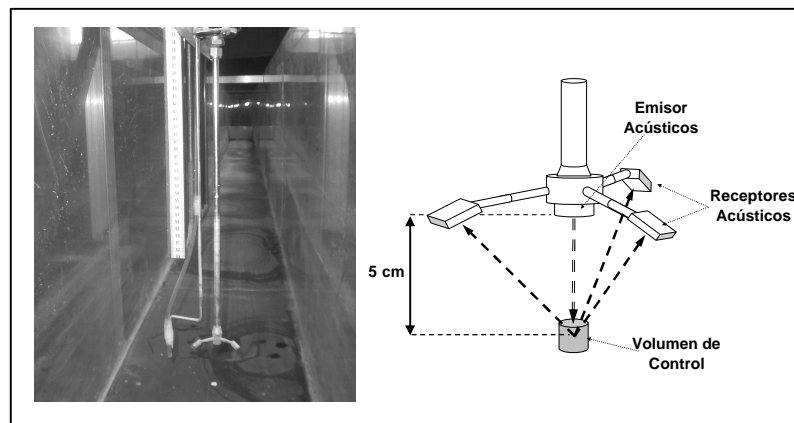


Figura 4: Sensor acústico Doppler (ADV)

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El sedimento elegido para la suspensión corresponde a pomacita (pumacita), el cual fue tratado (pulverizado) para lograr una disminución del tamaño de las partículas. El tamaño medio de partículas es  $11 \mu\text{m}$ , medido con dos metodologías distintas: análisis de imágenes de microscopía desarrollado por el grupo investigador, y utilización de un granulómetro láser (Mastersizer 2000). La densidad del material es de  $2400 \text{ kg/m}^3$ , medida mediante el método de variación de volumen según norma chilena aplicada a cementos y puzolanas. La velocidad de sedimentación asociada a este tamaño y densidad es aproximadamente  $0.0092 \text{ cm/s}$ . La elección de ésta distribución granulométrica corresponde a la utilización de partículas posibles de ser movilizadas por la turbulencia presente en el flujo, dadas las dimensiones y capacidades de la instalación.

La metodología experimental consistió en la medición de perfiles verticales de velocidad y la toma de muestras desde el volumen de control del sensor ADV en cada punto medido. Se midieron series de tiempo de velocidad de 2.5 minutos de duración, lo que asegura la

convergencia de las estadísticas de la turbulencia calculadas sobre los datos. Los perfiles medidos se ubican en el eje del canal y cubren regiones aguas arriba de la cuña y a lo largo de ella.

Las series de velocidad medidas son procesadas mediante rutinas creadas en MatLab, obteniéndose las series de tiempo de fluctuaciones de velocidad, series de SNR (signal to noise ratio) y la serie de correlación. Con esta información se crearon los perfiles verticales de velocidad media, velocidad RMS, energía cinética turbulenta y esfuerzos de Reynolds.

Del análisis de las muestras de agua para la determinación de la concentración de sedimento en suspensión mediante análisis de laboratorio, se obtiene el valor medio de concentración en el volumen de control del sensor Doppler acústico. Esta información es utilizada en la construcción de ajustes entre la concentración media del punto y el valor del SNR medio (Nikora, 2002). Estos ajustes posibilitan la obtención de las series de tiempo de concentración ( $C$ ) y las series de tiempo de fluctuaciones de concentración ( $C'$ ) a partir de las series de tiempo del SNR medidas por ADV.

## CONDICIONES EXPERIMENTALES

Las distintas experiencias realizadas definieron distintos valores de los parámetros que determinan el fenómeno en estudio. Estos parámetros, que cuantifican efectos boyantes asociados tanto a la salinidad como a la concentración de sedimento en suspensión, son:

*a.* Froude densimétrico:

$$F_{rd} = \frac{q_f}{\sqrt{\mathbf{j} g h_1^3}} = \frac{u_f}{\sqrt{\mathbf{j} g h_1}} \quad (1)$$

*b.* Velocidad de sedimentación adimensionalizada:

$$\frac{Ws Ho}{q_f} \quad (2)$$

*c.* Relación de aporte de densidad:

$$\frac{\Phi_o}{\Phi_s} \quad (3)$$

*d.* Aporte de densidad por sedimento:

$$\Phi_o = \frac{(\mathbf{r}_{\text{sedimento}} - \mathbf{r}_{\text{agua}}) \bar{C}_{\text{sedimento}}}{\mathbf{r}_{\text{agua}}} \quad (4)$$

*e.* Aporte de densidad por sal:

$$\Phi_s = \frac{(\mathbf{r}_{\text{sal}} - \mathbf{r}_{\text{agua}}) \bar{C}_{\text{sal}}}{\mathbf{r}_{\text{agua}}} \quad (5)$$

Las variables utilizadas son:

|                              |  |
|------------------------------|--|
| $q_f$                        | : Caudal por unidad de ancho   |
| $j g$                        | : Gravedad reducida  |
| $h_1$                        | : Altura de escurrimiento estrato superior                             |
| $h_2$                        | : Altura de escurrimiento estrato inferior                             |
| $h_{2s}$                     | : Altura de escurrimiento estrato inferior en la salida del canal      |
| $W_s$                        | : Velocidad de sedimentación de las partículas                         |
| $Ho$                         | : Altura total del escurrimiento                                       |
| $r_{\text{sedimento}}$       | : Densidad del sedimento suspendido                                    |
| $r_{\text{agua}}$            | : Densidad del agua dulce  |
| $r_{\text{sal}}$             | : Densidad de la sal   |
| $\bar{C}_{\text{sal}}$       | : Concentración media de sal en la cuña salina                         |
| $\bar{C}_{\text{sedimento}}$ | : Concentración media de sedimento en el flujo superior                |
| $\bar{C}$                    | : Concentración media de sedimento en volumen de medición              |
| $C'$                         | : Fluctuaciones de concentración instantánea en el volumen de medición |
| $\bar{u}$                    | : Componente media de velocidad longitudinal                           |
| $u'$                         | : Componente instantánea de velocidad longitudinal                     |
| $\bar{w}$                    | : Componente media de velocidad vertical                               |
| $w'$                         | : Componente instantánea de velocidad vertical                         |
| $X$                          | : Posición del perfil con respecto al punto de salida del canal        |
| $L$                          | : Largo de la cuña salina  |
| $Z$                          | : Posición en la vertical  |

Las condiciones experimentales en cada una de las experiencias realizadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen de condiciones experimentales

| N°<br>Experiencia | $Fr_{do}$ | $Fr_{do}^2$ | $Ws*Ho/qf$ | $F_o$ | $F_s$ | $F_o/F_s$ |
|-------------------|-----------|-------------|------------|-------|-------|-----------|
| 1                 | 0.6202    | 0.3846      | 0.0029     | 0.203 | 2.274 | 0.089     |
| 2                 | 0.3272    | 0.1071      | 0.0059     | 0.836 | 2.047 | 0.409     |
| 3                 | 0.3087    | 0.0953      | 0.0058     | 0.780 | 2.388 | 0.327     |
| 4                 | 0.2907    | 0.0845      | 0.0056     | 0.959 | 2.843 | 0.337     |
| 5                 | 0.4912    | 0.2413      | 0.0034     | 0.543 | 2.615 | 0.208     |
| 6                 | 0.4912    | 0.2413      | 0.0034     | 0.542 | 2.615 | 0.207     |
| 7                 | 0.5389    | 0.2904      | 0.0032     | 0.520 | 2.501 | 0.208     |

### 3. RESULTADOS

En todas las experiencias realizadas se observó una reducción de la longitud de la cuña salina tras la incorporación del sedimento suspendido en el flujo superior (Fig.5). Este

hecho se debe al aumento aparente de la densidad del flujo superior, además de una pérdida de momentum por el carácter deposicional del flujo al interior de la cuña salina (Niño et al., 2006).

También se apreció la autosimilaridad de la forma de la cuña salina, cuando ésta es adimensionalizada usando la longitud de la cuña como escala longitudinal y la altura de la cuña a la salida como escala vertical, para los casos sin y con sedimento suspendido en el flujo superior (Fig.6).

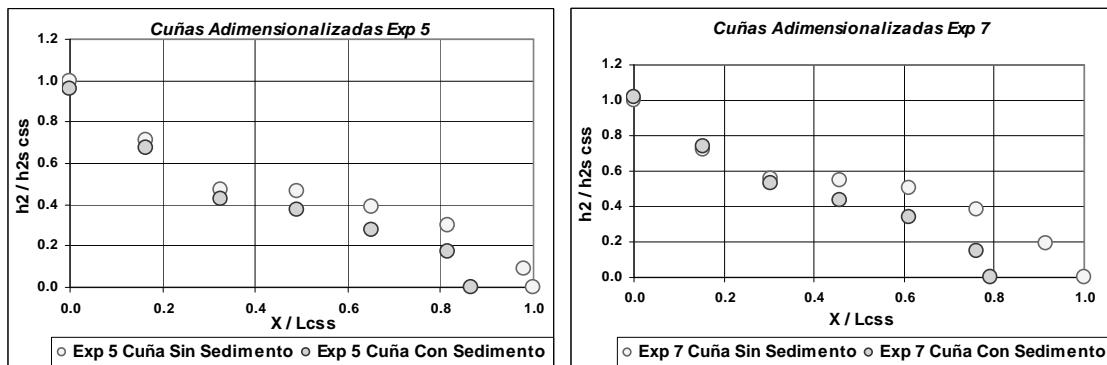


Figura 5: Retracción de la cuña salina por presencia de sedimento suspendido. Panel de la izquierda corresponde a la Experiencia 5, el de la derecha a la Experiencia 7 (Tabla 1).

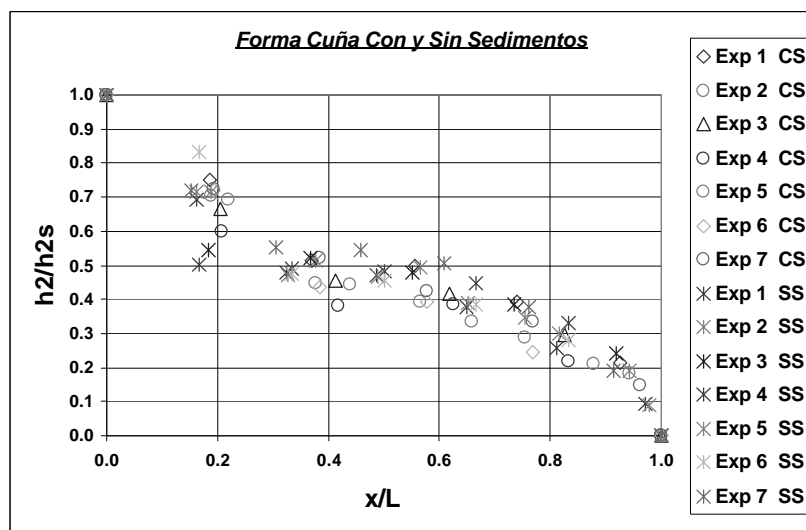


Figura 6: Autosimilaridad de la forma de la cuña salina adimensionalizada (CS: con sedimento , SS: sin sedimento)

En la mayoría de los experimentos se pudo observar la presencia de ondas internas propagándose en la interfaz de densidad (Fig.7). El tipo de ondas observadas corresponde al conocido como inestabilidad de Holmboe, asociada a la existencia de las paredes que imponen límites rígidos, al desplazamiento interfacial entre los dos flujos presentes, y a inestabilidades en los esfuerzos de corte en la zona cercana a la interfaz (Yonemitsu et al.,

1996). Parte de las ondas no son persistentes, presentándose un rompimiento de ellas. Estas se asocian a la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz (Carpenter et al., 2007).

La energía cinética turbulenta presente en los distintos perfiles medidos es aportada principalmente por la componente longitudinal de velocidad, siendo la contribución de la componente vertical la de menor magnitud. En cuanto a la distribución vertical de la energía cinética turbulenta, ésta se concentra en la zona cercana a la interfaz de densidad, debido principalmente a los mayores gradientes de velocidad en esta zona (Fig. 8). En todos los casos estudiados, la energía cinética turbulenta decrece sustancialmente hacia el fondo en la zona de la cuña salina, indicando una importante reducción de la turbulencia en la zona cercana al lecho con respecto a un flujo sin cuña.

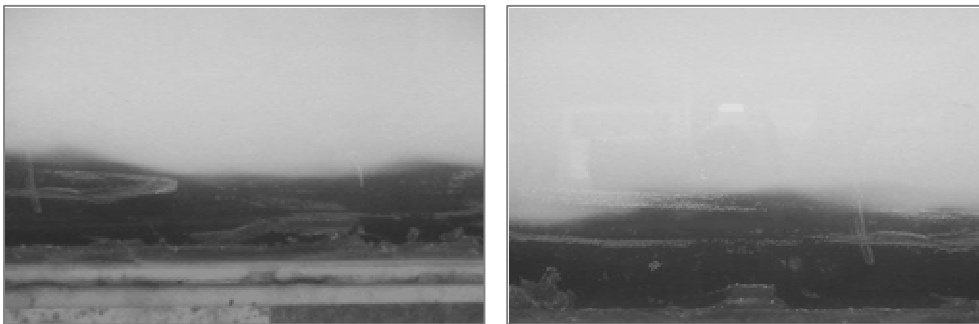


Figura 7: Propagación de ondas en la interfaz, Experiencia 4. Zona media de la cuña salina.

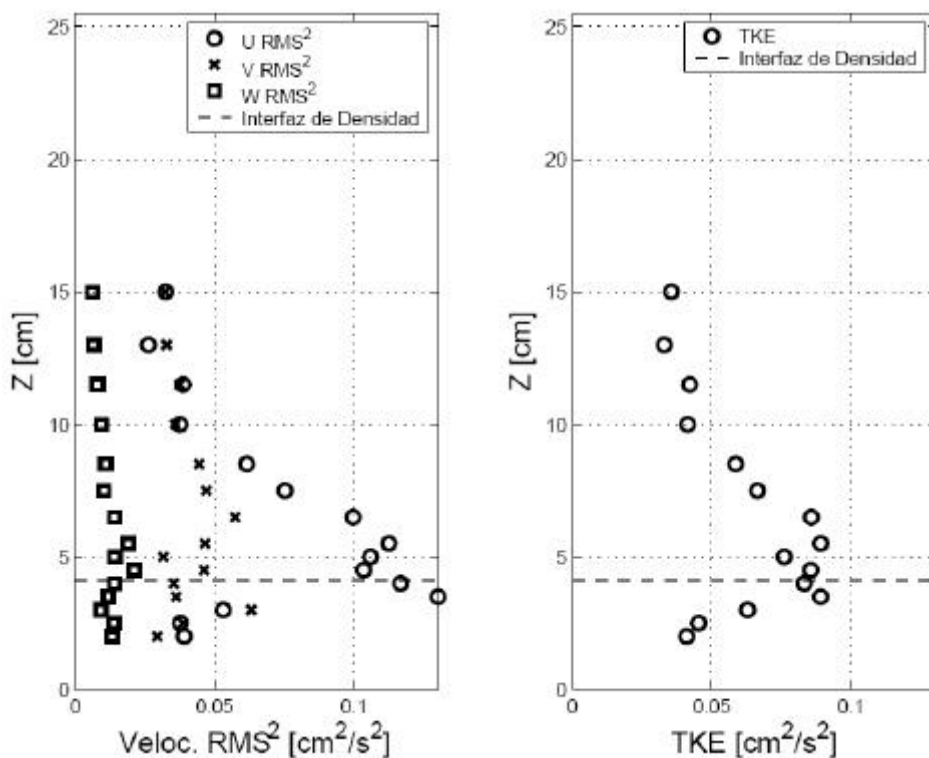


Figura 8: (Izquierda) Perfil vertical de velocidad RMS cuadrado por componente (Derecha) Perfil vertical de energía cinética turbulenta. Experiencia 6. Perfil 1.

$$X_{\text{perfil}}/L_{\text{cuña}}=0.69$$



La distribución vertical de concentración de sedimento en suspensión muestra un máximo en la zona cercana a la interfaz de densidad en todos los experimentos realizados (ver por ejemplo la Fig.9). Esta distribución sigue en la capa superior una distribución similar a la propuesta por Rouse (1937), es decir aumentando en profundidad, sin embargo en la cuña salina se produce un descenso de la concentración hacia el fondo.

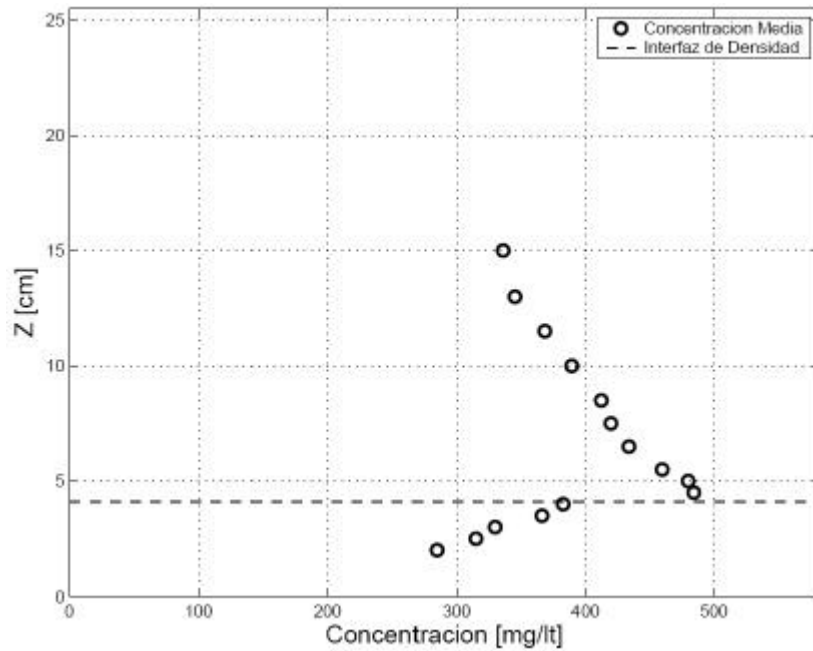


Figura 9: Distribución vertical de la concentración de sedimento en suspensión. Experiencia 6. Perfil 1.  $X_{\text{perfil}}/L_{\text{cuña}}=0.69$

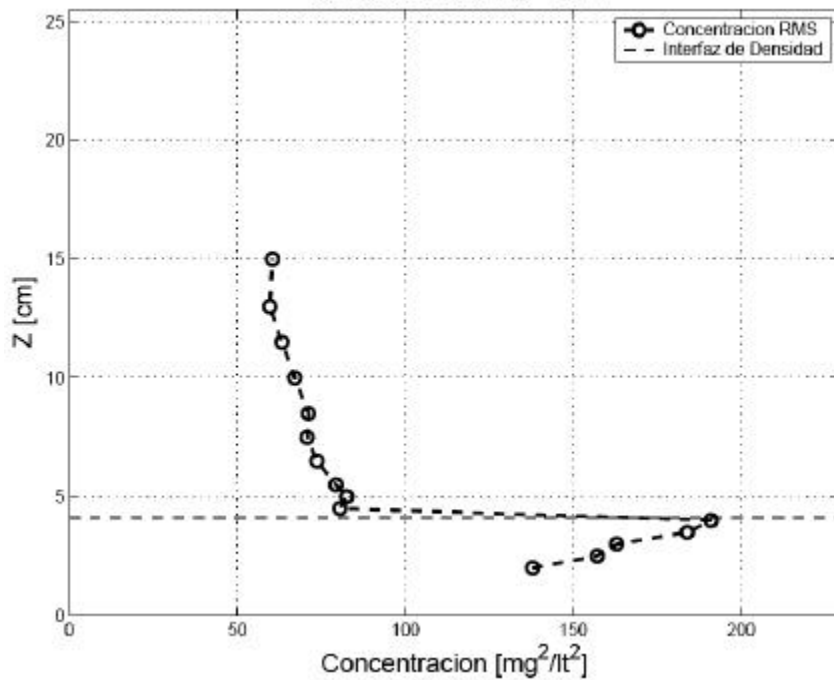


Figura 10: Perfil vertical de fluctuaciones RMS de concentración. Experiencia 6. Perfil 1.  $X_{\text{perfil}}/L_{\text{cuña}}=0.69$

Del análisis de las series de tiempo de concentración (estimadas a partir de las series de tiempo de SNR del ADV), se obtiene que, en general para todas las experiencias realizadas, las fluctuaciones de concentración son mayores en la zona cercana a la interfaz de densidad, presentando un máximo del valor RMS de concentración en la interfaz de densidad (Fig.10).

#### 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Realizando el análisis de la conservación de sedimentos en un volumen de control sobre el cual existen flujos de sedimentos, se obtiene la ecuación de continuidad del sedimento en suspensión. Descartando los términos de difusión molecular por presentarse el material en forma suspendida, considerando las variables compuestas por un término medio y una fluctuación instantánea, y promediando sobre la turbulencia se obtiene:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u} \bar{C})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{w} \bar{C})}{\partial z} - \frac{\partial(W_s \bar{C})}{\partial z} = - \left( \frac{\partial(\overline{u' C'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{w' C'})}{\partial z} \right) \quad (6)$$

Considerando ahora condiciones de régimen permanente (Ec.7) y la aproximación de capa límite (Ec.8), se obtiene una ecuación para los flujos máscicos (Ec.9).

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\overline{u' C'})}{\partial x} \ll \frac{\partial(\overline{w' C'})}{\partial z} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\bar{u} \bar{C})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{w} \bar{C})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (W_s \bar{C} - \overline{w' C'}) \quad (9)$$

Los términos de la izquierda en la Ec. 9 representan los flujos advectivos medios. De los términos de la derecha, el primero representa el flujo deposicional por peso propio de las partículas; el segundo representa el flujo máscico turbulento en la vertical. Estos flujos pueden ser estimados para las experiencias realizadas, a partir de los datos de velocidad y concentración medidos con el ADV.

La Fig. 11 presenta un ejemplo de los balances realizados entre los flujos deposicionales y turbulentos para la Experiencia 4 en los perfiles 3 y 4, ubicados a un 46% y 30% del largo de la cuña, respectivamente. En esta figura es posible observar el carácter deposicional de los flujos máscicos verticales en toda la columna de agua, aunque la zona cercana a la interfaz presenta una tendencia al aumento de la depositación, representada por los valores positivos del balance de los términos de la derecha de la Ec. 9. Este comportamiento es general para todos los experimentos realizados. La mayor tasa de depositación se tiene siempre en la zona cercana a la interfaz. Se puede apreciar, también, que en la zona alta el flujo posee baja capacidad de transporte en suspensión del material sólido. Esto es una consecuencia de las restringidas condiciones experimentales que se debieron imponer para conseguir la cuña arrestada en el canal en presencia de sedimento en suspensión.

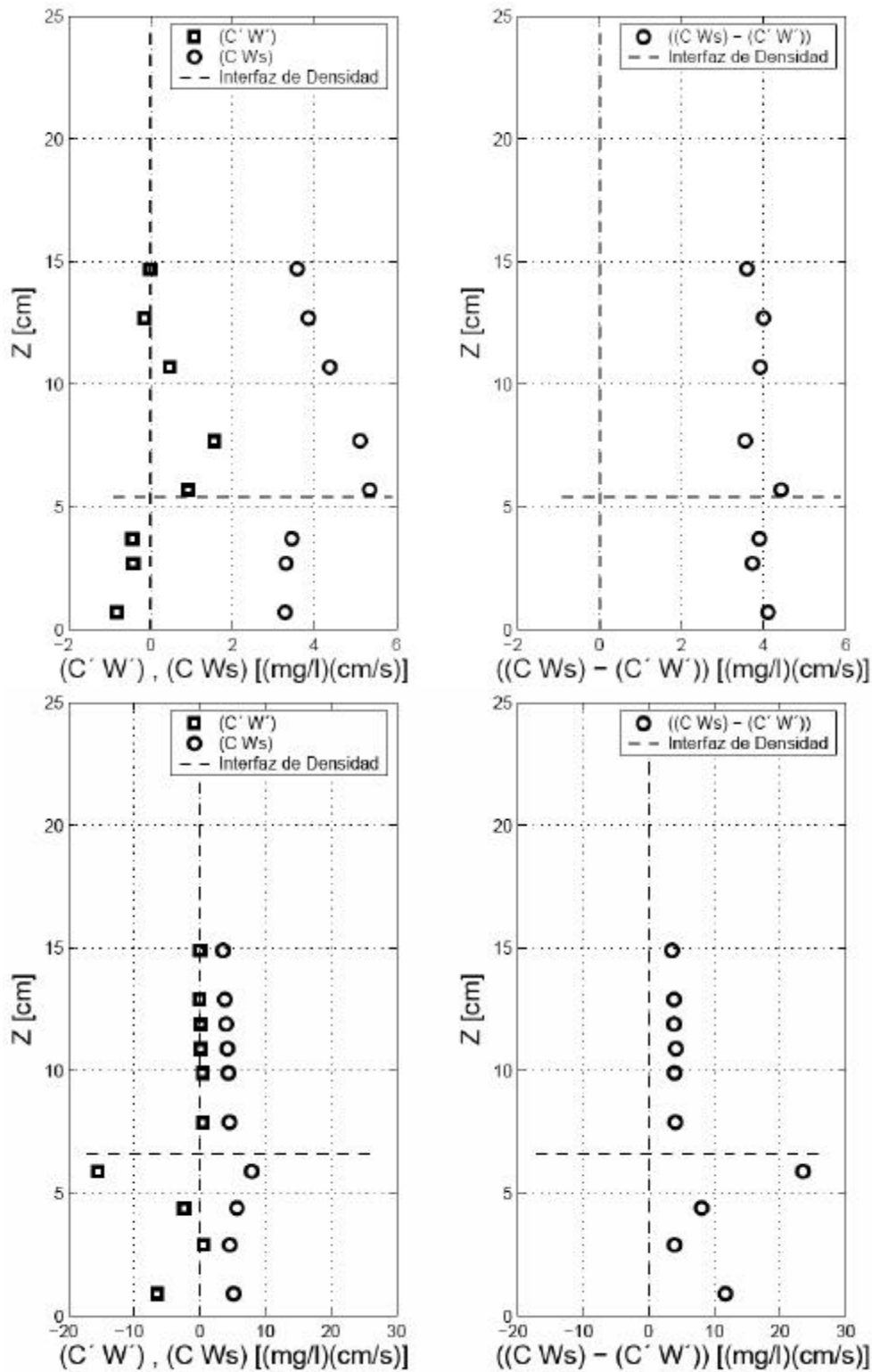


Figura 11: Flujos máxicos verticales. A la izquierda se grafica el flujo deposicional y el flujo vertical turbulento. A la derecha se grafica el flujo máxico vertical neto. Experiencia 4, (Arriba) Perfil 3,  $X_{\text{perfil } 3}/L_{\text{cuña}} = 0.46$ , (Abajo) Perfil 4,  $X_{\text{perfil } 4}/L_{\text{cuña}} = 0.30$

A pesar de la limitación anterior, estos experimentos demuestran que la estratificación por salinidad de la columna de agua produce una clara supresión de la turbulencia en la zona de la cuña salina, debido a los efectos boyantes que consumen parte de la energía disponible en la mezcla del agua salina con el agua dulce del estrato superior. En efecto, el análisis de los espectros de velocidad muestra que el rango inercial está caracterizado por una pendiente de  $-3$  (Fig.12), en lugar del clásico valor  $-5/3$ , lo cual es indicativo del rompimiento y mezcla de ondas interfaciales como las mostradas en la Fig. 7. La presencia de efectos boyantes asociados al transporte del sedimento en suspensión también contribuye a la reducción de la energía cinética disponible en la zona de la interfaz. Esta zona se convierte, por lo tanto, en un sumidero del sedimento transportado en suspensión en la capa superficial, al no existir en ella la capacidad de resuspender el material que cae por gravedad hacia el lecho. Esta situación difiere de la que ocurre en las cercanías del lecho en una columna no estratificada, en la que la turbulencia y la capacidad de resuspensión de sedimentos es máxima, por los altos gradientes de velocidad inducidos por la condición de no resbalamiento en el lecho.

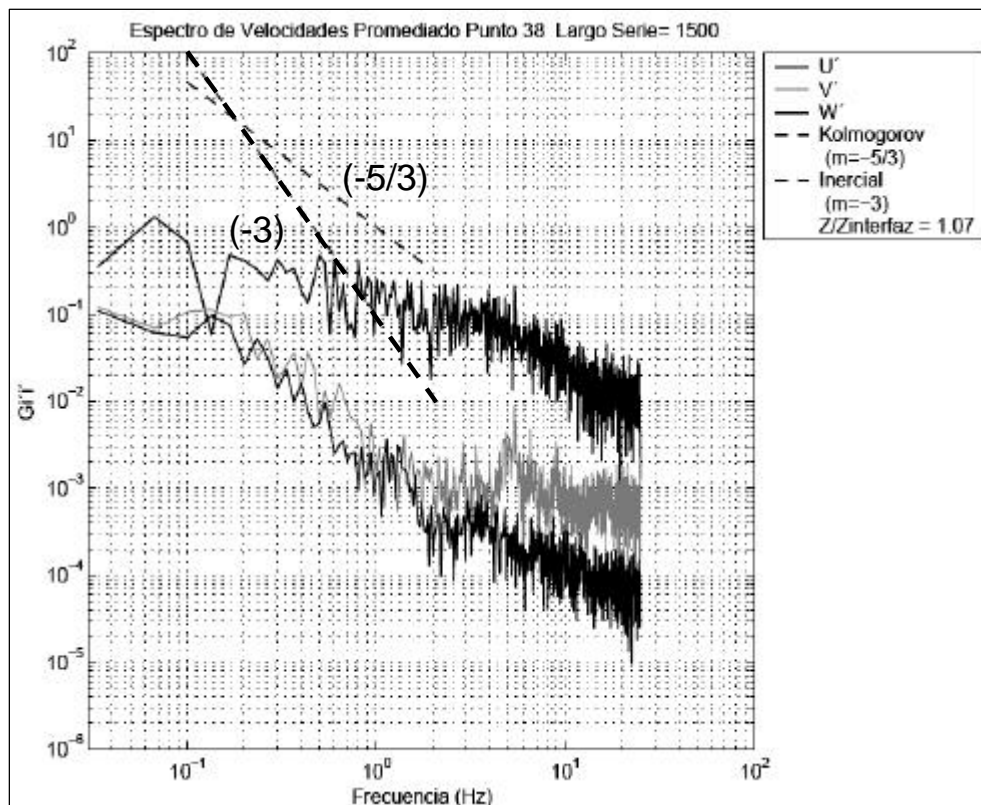


Figura 12: Espectro de velocidad, Experiencia 5, Perfil 3.  
 $Z/Z_{interfaz}=1.070$ . (Rango Inercial - Ley  $(-3)$ )

## 5. CONCLUSIONES

La presencia de sedimento suspendido en un sistema estuarial afectado por una cuña salina genera una disminución del alcance de la cuña, debido a una pérdida de momentum del flujo de agua dulce superficial, por el carácter deposicional del flujo al interior de la cuña salina. Por otro lado, las altas concentraciones de sedimento en la zona cercana y por sobre la interfaz de densidad, sumado a la presencia del agua salada más densa de la cuña salina, inducen efectos boyantes importantes sobre el flujo. Son estos últimos los responsables de un gran gasto de la energía cinética disponible, no permitiendo un desarrollo de la turbulencia en la zona. Este hecho ha sido identificado por otros autores como un colapso de la turbulencia, siendo gran parte de la energía disponible traspasada a las frecuencias boyantes asociadas a la presencia de la cuña salina por un lado, y por otro, a la presencia del fluido de mayor densidad constituido por sedimentos. Así, la capacidad de movilización del sedimento por parte del flujo se ve restringida, haciéndose predominante la depositación del material en la zona cercana a la interfaz de densidad. La baja mezcla de ambas capas en este tipo de estratificación, impide la reincorporación del material desde la cuña hacia el flujo superior, generando la acumulación de los sedimentos en el cauce.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo prestado por el Proyecto Fondecyt N°1040494 y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

## REFERENCIAS

- Carpenter, J.; Lawrence, G. and Smyth, W. (2007). Instability mechanisms in asymmetric stratified shear layers. *6<sup>th</sup> International Conference on Stratified Flows, Perth, Western Australia*. Pp. 14-19
- García, C.; Cantero, M.; Niño, Y.; García, M. (2005). Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 131, No. 12, pp. 1062-1073.
- Godoy, C. (2007). Estudio experimental del transporte de sedimento suspendido en presencia de una cuña salina. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Jensen, A., Brunk, B., Jirka, G., and Lion, L.W. (1999). Simulating entrainment and particle fluxes in stratified estuaries. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 125, No. 4, pp. 351-359.
- Nikora, V. and Goring D. (2002). Fluctuations of suspended sediment concentration and turbulent sediment fluxes in an open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 128, No. 2, pp. 214-224.

Niño et al. (2006). Suspended sediment effects on salt wedge: Theory and experimental observations. *6<sup>th</sup> International Conference on Stratified Flows, Perth, Western Australia*. Pp. 165-170

N. Yonemitsu, G. E. Swaters, N. Rajaratnam and G. Lawrence. (1996). Shear instabilities in arrested salt-wedge flows. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. Vol.24, pp.173-182.

Olivares, M. (2000). Estudio analítico-numérico y experimental de la intrusión salina en estuarios estratificados. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Sargent, F.E.; Jirka, G.H. (1987). Experiments on Saline Wedges. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 113(10), 1307-1324.