

CARACTERÍSTICAS DE MEZCLA EN DEPRESIONES DEL
LECHO DE UN ESTUARIO CON CUÑA SALINA

JUAN FRANCISCO MIRANDA S.¹

YARKO NIÑO C.²

RESUMEN

Se presentan y analizan resultados experimentales orientados al estudio de las características del flujo y los procesos de mezcla que ocurren en depresiones de grandes dimensiones del fondo de estuarios con presencia de una cuña de sal, donde volúmenes importantes de agua salada quedan retenidos durante la vaciante de marea, debido al desplazamiento de la cuña de sal hacia el océano. El estudio experimental se realizó en un canal de laboratorio donde se generan flujos con cuña de sal, en el cual se modela una depresión del lecho mediante obstáculos ubicados sobre el fondo. Se midió la estructura turbulenta de los flujos estratificados al interior de la depresión con un sensor de velocidad acústico doppler y un sensor de conductividad. Se midió además la inclinación de la interfaz de densidad y la velocidad de mezcla en la depresión. Los resultados obtenidos indican que la interfaz de densidad en la depresión se inclina en la dirección del flujo por un efecto de gradientes longitudinales de presión asociados a la separación del flujo en la depresión. La pendiente de la interfaz aumenta con el Froude densimétrico local. La inclinación de la interfaz hace que ésta se ubique en zonas de baja turbulencia, lo que disminuye la capacidad de mezcla del flujo. La velocidad de incorporación disminuye levemente al aumentar el Froude densimétrico local. Esta información es utilizada para predecir los tiempos de mezcla y los volúmenes de agua salada extraídos de la depresión debido a la mezcla utilizando como referencia las características batimétricas e hidráulicas del Estuario Valdivia en Chile. Se concluye que el tiempo de mezcla predicho por los resultados experimentales está en el rango entre 5 a 100 veces el período de marea, asimismo, el volumen de dilución, o volumen de agua salada renovada en la depresión en un ciclo de marea es, en general, inferior al 30% del volumen de la depresión.

¹ Ayudante de Investigación.

² Profesor Asociado. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

Un estuario es un cuerpo de agua costero, semi-cerrado, correspondiente al último tramo en el extremo de aguas abajo de un curso superficial, donde existe interacción entre agua dulce del río y agua salada del mar. Tal interacción conduce a la existencia de gradientes de densidad en el sistema estuarial, los cuales generan lo que se conoce como intrusión salina. La intrusión salina corresponde a un fenómeno en el cual el agua del estuario tiene una salinidad alta, y por lo tanto una mayor densidad que la del agua afluyente del río, a lo largo de longitudes que pueden ser de varios kilómetros hacia aguas arriba de la desembocadura. Dependiendo de las características de mezcla en el estuario, esta intrusión salina puede darse en la forma de una cuña de agua salada que se extiende hacia aguas arriba desde el océano, con una alta estratificación del flujo en la vertical, o bien en la forma de una dispersión longitudinal de salinidad, con bajos gradientes verticales de densidad. En un trabajo presentado a este mismo congreso (Miranda y Niño, 2001) se presentan y discuten antecedentes generales y resultados experimentales y de modelación numérica respecto del fenómeno de cuña de sal en estuarios altamente estratificados.

Un ejemplo de un estuario altamente estratificado se puede encontrar en ciertas ocasiones en la desembocadura del río Valdivia, en cuya zona se tiene una batimetría irregular caracterizada por depresiones y elevaciones del fondo, las cuales tienen una magnitud comparable con la altura del flujo. Un efecto de las mareas en un estuario como el Valdivia, es el producido por la vaciante, en la cual la cuña salina retrocede, dejando un volumen importante de agua salada en las depresiones del fondo. Este fenómeno se traduce en un efecto negativo sobre la calidad del agua en la depresión y, por ende, sobre el sistema ecológico del estuario, particularmente en las depresiones del lecho, lugares que suelen ser ricos en términos de biodiversidad. De aquí surge el interés por estudiar los procesos de mezcla y renovación de agua en estas depresiones del fondo estuarial, con el objeto de predecir impactos sobre el sistema ecológico en el estuario.

En este trabajo se muestran algunos resultados preliminares de un estudio experimental sobre el tema, donde se mide la estructura del flujo y las características de los procesos de mezcla en una depresión del lecho, modelada como el espacio generado entre dos obstáculos colocados sobre el lecho de un canal de experimentación donde se generan cuñas de sal.

2. ANTECEDENTES DEL ESTUARIO DEL VALDIVIA

El estuario del Valdivia es el estuario navegable más importante de nuestro país. Un estudio de terreno realizado recientemente ha mostrado la presencia de una cuña de sal, la cual se extiende hacia aguas arriba desde el océano hasta alcanzar, eventualmente, la ciudad de Valdivia (Imberger y Thomson, 1994; Sinergos Consultores, 1996). Una peculiaridad exhibida por el río Valdivia en la zona de su desembocadura corresponde a una batimetría irregular caracterizada por una serie de depresiones y elevaciones del fondo, las cuales tienen una magnitud comparable con la altura del flujo y presentan una cuasi-periodicidad espacial caracterizada por una longitud de onda que varía entre 2 a 5 km. Una ilustración de lo anterior se presenta en la Fig. 1, donde se muestra el perfil longitudinal del estuario Valdivia, incluyendo, además, líneas de isosalinidad medidas por Imberger y Thomson (1994) para ciertas condiciones de flujo. Por otro lado, se determinó que la onda de marea posee un período promedio de aproximadamente 12.5 horas, tanto en la ciudad de Valdivia como en Corral.

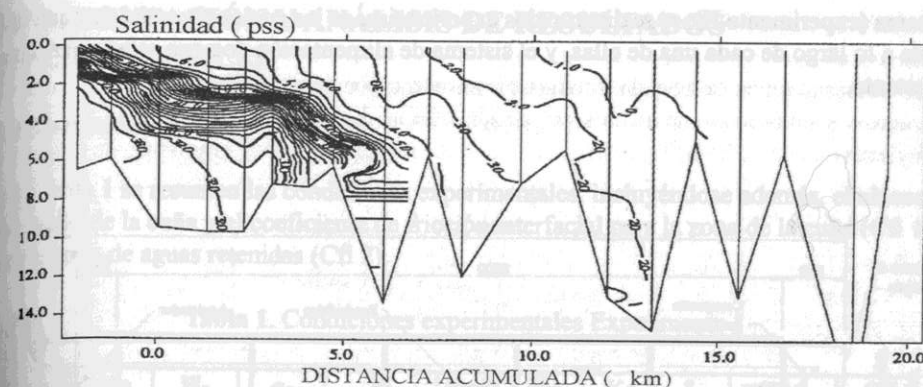


Fig. 1: Perfil batimétrico y líneas de isosalinidad Estuario Valdivia (Imberger y Thomson, 1996).

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1 Descripción de la instalación experimental

Los experimentos fueron realizados en un canal rectangular con paredes de acrílico, de 0.4 m de ancho y 9.3 m de largo, que cuenta con un fondo falso plano, dispuesto 17 cm por sobre el fondo original. Sobre el fondo falso, se colocan dos elevaciones de 10 cm de alto, por 40 cm de largo y de ancho, que siguen la forma de una función sinusoidal, separadas entre sí por una distancia de 26 cm. En el extremo de aguas arriba del canal se tiene una cámara de entrada con una capacidad de 0.5 m³, que recibe el caudal entregado por una bomba. En el extremo aguas abajo, por otra parte, se ubica una cámara de desagüe que posee una compuerta de clapeta para el control del nivel de escurrimiento. Además, en una zona intermedia entre el fin del canal y la cámara de desagüe se tiene un recipiente con una entrada de fondo para la alimentación de agua salada, proveniente de dos estanques que contienen una mezcla salina controlada. Justo antes de la cámara de desagüe se tiene un recipiente de 52 cm de largo y 17 cm de alto a través de cuyo fondo se realiza la alimentación de agua salada proveniente de dos estanques de 3 m³. Además, se dispuso una barrera en forma de L, de 47 cm de altura y 25 cm de largo, con el fin de evitar que el flujo de agua dulce arrastre cantidades importantes de agua salada hacia la cámara de desagüe, impidiendo tener buenas condiciones de experimentación. Con el fin de controlar los caudales de experimentación, se cuenta con dos sistemas de medición, una placa orificio para el caudal de agua dulce y un tubo Venturi para el flujo de agua salada, conectados a un tablero piezométrico. En la Fig. 2 se muestra un esquema del canal experimental, donde todas las distancias se encuentran en mm. Una descripción más detallada puede encontrarse en Abello (2000).

3.2 Procedimiento experimental

En primer término, se procedió a llenar el canal con agua dulce hasta la altura de escurrimiento deseada. Luego, se suspendió el flujo de agua dulce y se inició la alimentación de agua salada en forma lenta para evitar la mezcla. Posteriormente, cuando la cuña así formada superaba la segunda elevación del lecho, se reanudó la alimentación de agua dulce con el caudal de experimentación escogido. Se realizaron dos tipos de experimentos. En el primero, con el fin de conocer la estructura del flujo (experimento I), se realizaron dos experiencias en las cuales el caudal de agua dulce y el sistema de alimentación de agua salada no varían en el desarrollo de cada experiencia. En el segundo, con el fin de conocer la característica de mezcla del

sistema (experimento II), se realizaron dos experiencias, en las cuales el caudal de agua dulce varía a lo largo de cada una de ellas, y el sistema de alimentación de agua salada permanece constante.

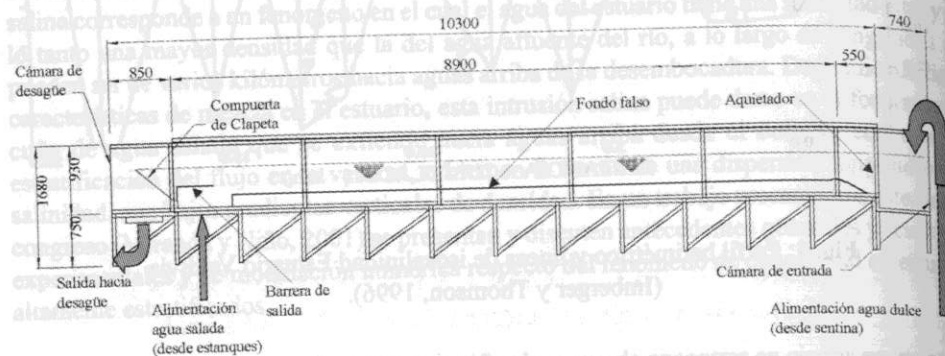


Figura 2. Esquema de la instalación experimental. Procedimiento experimental

3.3 Procesamiento de datos

Para el Experimento I se realizaron mediciones de velocidad y de salinidad. Para la obtención de datos de velocidad se utiliza un sensor ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), y para su procesamiento se utiliza el software winADV. Para la medición de datos del aumento relativo de densidad, se determinó la salinidad, la que es medida con un sensor de conductividad. Una descripción más detallada del procesamiento de datos se encuentra en Miranda (2001). Para el Experimento II, se mide la pendiente de la interfaz de densidad que se genera debido a las aguas de la cuña que quedan retenidas en la zona entre obstáculos, y además la velocidad de mezcla o tasa a la que la interfaz de densidad se profundiza por efecto de la mezcla. A continuación se definen los siguientes números adimensionales que contribuirán al análisis de resultados:

Número de Froude densimétrico global:

$$Frd_0^2 = \frac{q_f^2}{g\phi H_0^3}$$

Número de Reynolds:

$$Re = q_f / \nu$$

Número de Keulegan:

$$Ke = Re Frd_0^2$$

donde q_f : Caudal de agua dulce por unidad de ancho

$\Phi = (\rho_s - \rho_0) / \rho_0$: Diferencia relativa de densidad entre agua salada y agua dulce
 g : Aceleración de gravedad
 H_0 : Profundidad media de escurrimiento
 ν : Viscosidad cinemática del agua dulce

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Experimento I

En la Tabla 1 se resumen las condiciones experimentales, incluyéndose además, el alcance observado de la cuña y el coeficiente de fricción interfacial para la zona de la cuña (Cfi 1) y para la zona de aguas retenidas (Cfi 2).

Tabla 1. Condiciones experimentales Experimento I

Experiencia	H_0	q_f	Φ	Frd_0	Re	Ke	L	Cfi 1	Cfi 2
Cuña I	21.5	21.05	0.00046	0.18	2105	69	20	0.0100	0.017
Cuña II	23.5	39.27	0.00068	0.35	4679	558	20	0.0001	0.024

Para cada experiencia se realizaron mediciones en distintos puntos a lo largo del eje del canal, y en cada uno de ellos se tomaron mediciones de las componentes de la velocidad (u , v , w) y sus valores RMS (u_{RMS} , v_{RMS} , w_{RMS}). De igual forma, se obtuvieron medidas de la salinidad (S) y de su valor RMS, con las que se pudo calcular ϕ y ϕ_{RMS} . Con todos estos datos se obtuvieron los perfiles verticales para u , w , u_{RMS} , w_{RMS} , ϕ , ϕ_{RMS} , el esfuerzo de Reynolds por unidad de densidad, $\overline{u'w'}$, y del esfuerzo de corte total τ . La altura de la interfaz se obtuvo del perfil vertical de ϕ , como el punto de 50% de densidad, con lo que se tienen los espesores de las capa de agua dulce (h_1) y de agua salada (h_2).

El coeficiente de fricción interfacial para cada punto del eje longitudinal en el que se midió las propiedades del flujo se obtuvo mediante la expresión:

$$c_{fi} = \tau_i / \rho_0 \frac{q_f^2}{h_1^2}$$

donde τ_i es el esfuerzo de corte en la interfaz obtenido del perfil vertical de τ . En la Tabla 1 aparece el promedio de los coeficientes de fricción interfacial obtenidos a lo largo del eje longitudinal para cada cuña. En la Fig. 3 se muestran los perfiles longitudinales para cada cuña salina.

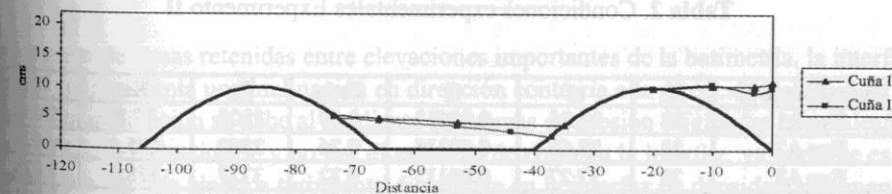


Fig.3. Perfiles longitudinales de la cuña salina y de la interfaz de densidad en la zona de aguas retenidas.

Perfiles verticales de velocidad media longitudinal, u , diferencia relativa de densidad, ϕ , y energía cinética turbulenta, K , se presentan en las Figs. 4 y 5, respectivamente. De la Fig.4 se observa que el perfil de ϕ indica una clara estratificación del flujo, tanto en la zona de la cuña como en la zona de la depresión. El perfil de u muestra la recirculación del flujo de agua salada en la zona de la cuña salina. En la zona de la depresión se observa recirculación en la capa de

agua salada, y la división del flujo de agua dulce en uno de baja velocidad cercano a la interfaz de densidad, que recircula, y otro de mayor velocidad que se dirige hacia aguas bajo. De la Fig.5 se aprecia que la energía cinética turbulenta crece hacia arriba debido a las mayores velocidades del flujo de agua dulce, por ello la interfaz de densidad queda en una zona de baja turbulencia

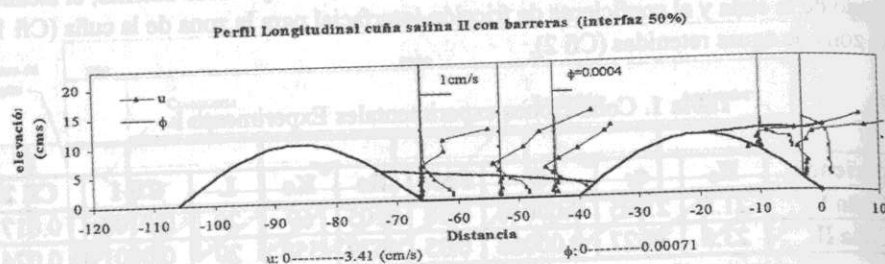


Figura 4. Perfiles verticales de la velocidad media longitudinal u y diferencia relativa de densidad ϕ a lo largo del eje longitudinal.

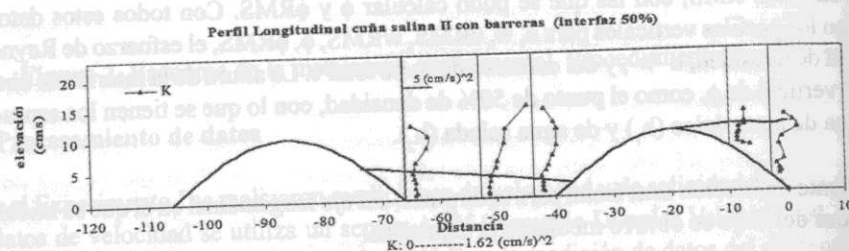


Figura 5. Perfiles verticales de la energía cinética turbulenta K a lo largo del eje longitudinal.

4.2 Experimento II

En la Tabla 2 se resumen las condiciones experimentales y el coeficiente de fricción interfacial respectivo, obtenido interpolando y extrapolando a partir del Cfi 2 del Experimento I.

Tabla 2. Condiciones experimentales Experimento II

Experimento II	H_0	qf	$\square$	Fr_{do}	Re	Ke	Cfi
Exp A1	22	21.05	0.00115	0.19	2105	77.8	0.018
Exp A2	22	28.60	0.00115	0.26	2860	195.4	0.027
Exp A3	23	37.27	0.00115	0.32	3727	378.4	0.028
Exp A4	23	48.57	0.00115	0.42	4857	837.3	0.032
Exp A5	23	60.19	0.00115	0.51	6019	1593.4	0.038
Exp B1	22	21.05	0.00115	0.19	2105	77.8	0.018
Exp B2	22.5	41.22	0.00115	0.36	4122	546.7	0.036
Exp B3	23	48.57	0.00115	0.42	4857	837.3	0.038
Exp B4	23.5	72.15	0.00115	0.60	7215	2573.2	0.040

Para el análisis de resultados de este experimento se define el número de Froude densimétrico local Fr_{dx} , considerando que h_1 es el espesor de la capa de agua dulce, como:

$$Fr_{dx} = \frac{q_f}{\sqrt{\phi g h_1^3}} \quad (1)$$

En los cálculos de este número de Froude densimétrico se considera h_1 en el punto medio de la zona de aguas retenidas. La Fig.6 muestra la pendiente de la interfaz de densidad para diferentes valores del número de Froude densimétrico. La Fig.7 muestra las pendientes de la interfaz de densidad medidas en función del cuadrado del número de Froude

Figura 6. Perfil de la interfaz de densidad para diferentes valores del número de Froude densimétrico. (Experiencia II, Serie B).

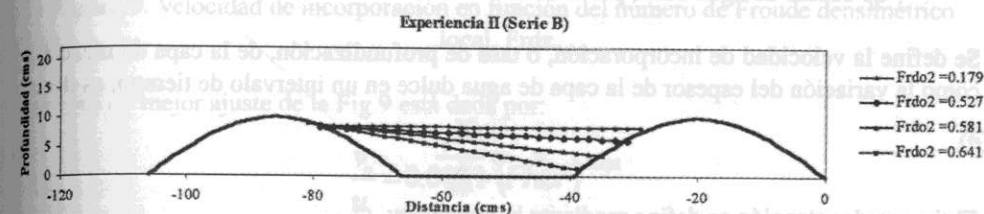
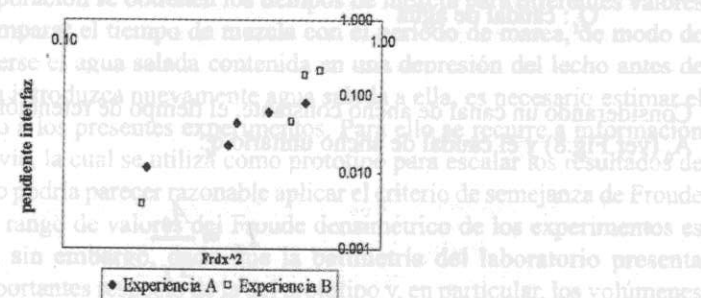


Figura 7. Pendiente de la interfaz de densidad en función del número de Froude densimétrico local



Para la zona de aguas retenidas entre elevaciones importantes de la batimetría, la interfaz de densidad experimenta una inclinación en dirección contraria a la dirección del flujo de agua dulce. Esta inclinación se debe al gradiente de fuerzas de presión originadas por el despegue del flujo en las elevaciones, y no por el esfuerzo de corte en la interfaz, ya que éste es muy pequeño. La energía cinética turbulenta disminuye en la interfaz de densidad al aumentar el número de Froude densimétrico, ya que la interfaz de densidad queda menos expuesta a la corriente principal que pasa por sobre la depresión, escondiéndose en una zona de menor turbulencia.

4.3 Análisis de la capacidad de mezcla del sistema entre las elevaciones del lecho

Previo al análisis de la capacidad de mezcla del sistema, es necesario definir la velocidad de incorporación, o tasa de profundización, de la interfaz de densidad, el tiempo de retención y el tiempo de mezcla. La Fig.8 muestra la definición de variables del problema.

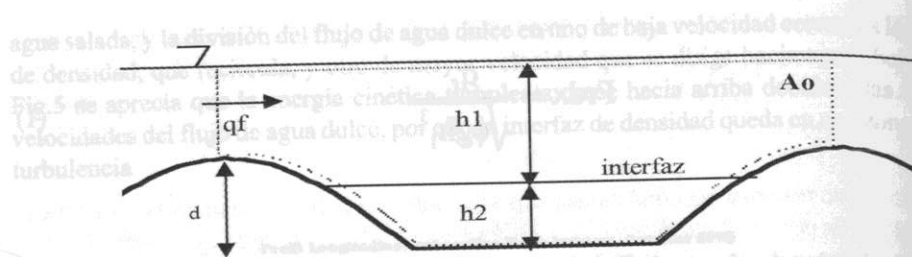


Figura 8. Definición de variables. Zona entre elevaciones.

Donde d: altura de la elevación

h_1 : espesor de la capa de agua dulce

h_2 : espesor de la capa de agua salada

q_f : caudal de agua dulce por unidad de ancho

Se define la velocidad de incorporación, o tasa de profundización, de la capa de mezcla, v_e , como la variación del espesor de la capa de agua dulce en un intervalo de tiempo, es decir:

$$v_e = \frac{\partial h_1}{\partial t} \quad (2)$$

El tiempo de retención se define mediante la expresión:

$$T_r = \frac{V_0}{Q_f} \quad (3)$$

donde V_0 : volumen de control (ver Fig.8)

Q_f : caudal de agua

Considerando un canal de ancho constante, el tiempo de retención queda definido por el área A_0 (ver Fig.8) y el caudal de ancho unitario q_f :

$$T_r = \frac{A_0}{q_f} \quad (4)$$

El tiempo de mezcla se define como la escala de tiempo que tarda la interfaz en alcanzar el fondo del estanque. Se supone que la velocidad de incorporación permanece constante. A partir de la Fig.8 se tiene:

$$T_e = \frac{d}{v_e} \quad (5)$$

La velocidad de incorporación se obtiene midiendo el desnivel experimentado por el punto medio de la interfaz de densidad, y considerando el tiempo transcurrido en cada experimento. La velocidad de incorporación es adimensionalizada con la velocidad media del flujo de agua dulce, u_1 . La Fig.9 muestra la velocidad de incorporación en función del número de Froude densimétrico local, Frd_x .

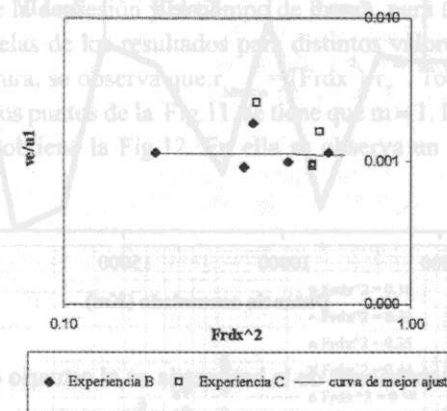


Figura 9. Velocidad de incorporación en función del número de Froude densimétrico local, Frd_x .

La curva de mejor ajuste de la Fig.9 está dada por:

$$\frac{v_e}{u_1} = 0.0011 \cdot (Frd_x^2)^{-0.131} \quad (6)$$

Esta curva indica que, a medida que el número de Froude densimétrico aumenta, la velocidad de incorporación presenta una leve disminución.

Con la velocidad de incorporación se obtienen los tiempos de mezcla para diferentes valores del Frd_x . Con el fin de comparar el tiempo de mezcla con el periodo de marea, de modo de determinar si puede extraerse el agua salada contenida en una depresión del lecho antes de que la siguiente marea alta introduzca nuevamente agua salada a ella, es necesario estimar el periodo de marea asociado a los presentes experimentos. Para ello se recurre a información sobre el estuario del Valdivia, la cual se utiliza como prototipo para escalar los resultados de laboratorio. En un principio podría parecer razonable aplicar el criterio de semejanza de Froude densimétrico (de hecho el rango de valores del Froude densimétrico de los experimentos es similar al del prototipo), sin embargo, dado que la batimetría del laboratorio presenta distorsiones espaciales importantes respecto de la del prototipo y, en particular, los volúmenes asociados a las depresiones del Valdivia son muy superiores que los del laboratorio escalados suponiendo semejanza de profundidades, entonces es necesario recurrir a criterios de semejanza alternativos. En particular, dado que se busca la escala de tiempo del periodo de marea en las experiencias de laboratorio, se utilizó como criterio de semejanza de tiempo la condición de que modelo y prototipo tuvieran igual valor de la razón entre el tiempo de retención de la depresión, T_r , y el periodo de marea, T_t . Se tiene entonces: $r_t = T_r/T_t$. Esta razón se evalúa con datos del estuario del Valdivia. El periodo de marea en las experiencias de laboratorio será entonces: $T_{t, Modelo} = T_{r, Modelo} / r_t$.

Imberger y Thomson (1994) señalan que el periodo anual de marea en el estuario es de 12.5 horas y que el caudal medio del Valdivia varía entre 300 y 1200 m³/s. La Fig.10 muestra la batimetría del estuario del Valdivia. En ella se consideran cinco depresiones del lecho. En la Tabla 3 aparecen los volúmenes de agua en dichas depresiones, los tiempos de retención y la razón de retención asociados a las depresiones del Valdivia. Los tiempos de retención fueron calculados para un caudal de 300 m³/s.

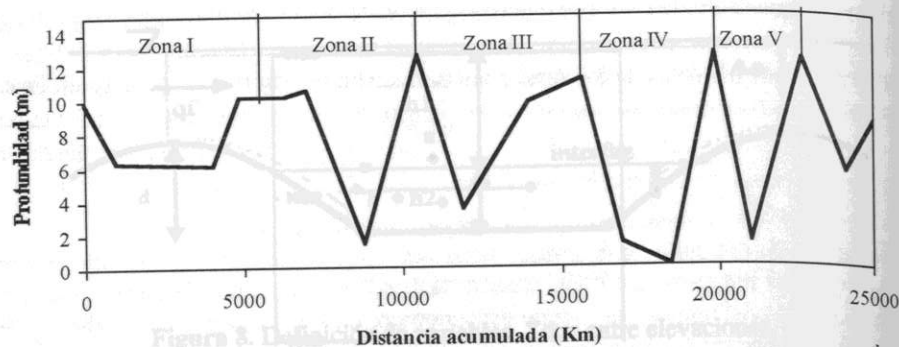


Figura 10. Depresiones de la batimetría en el estuario del Valdivia.

Tabla 3. Volúmenes de agua, tiempos de retención y razón de retención asociados a las depresiones de la batimetría del Valdivia.

Depresión	V(m ³)	Tr	r _T	Fr _d
I	14762500	5.13	0.43	0.093
II	10020000	3.48	0.29	0.143
III	9127500	3.17	0.26	0.263
IV	6490000	2.25	0.19	0.380
V	3150000	1.09	0.09	0.790

Definimos la razón de mezcla del modelo como el cociente entre el tiempo de mezcla, T_e , y el período de marea del modelo. Se tiene entonces: $r_{Mezcla} = T_e / T_{Modelo}$. Esta razón entrega el siguiente criterio para determinar la renovación o limpieza del sistema en estas depresiones:

Si $r_{Mezcla} < 1$, se limpia toda la depresión en menos de un período de marea.

Si $r_{Mezcla} > 1$, hay una limpieza parcial de la depresión en un período de marea.

La Tabla 4 muestra los valores de la razón de mezcla para las diferentes experiencias, tomando como prototipo las diferentes zonas del estuario del Valdivia. Se aprecia que en todos los casos hay una limpieza parcial, ya que se tienen valores de r_{Mezcla} bastante superiores a 1.

Tabla 4. Razón de mezcla para las diferentes experiencias.

ZONA	Exp C1	Exp C2	Exp C3	Exp C4	Exp C5	Exp B1	Exp B2	Exp B3	Exp B4
I	80.7	103.2	58.5	109.9	101.0	54.7	38.5	26.5	87.8
II	54.8	70.0	39.7	74.6	68.6	37.1	26.1	18.0	59.6
III	49.9	63.8	36.2	68.0	62.4	33.8	23.8	16.4	54.3
IV	35.5	45.4	25.7	48.3	44.4	24.0	16.9	11.6	38.6
V	17.2	22.0	12.5	23.5	21.6	11.7	8.2	5.6	18.7

Se observa que en las depresiones más alejadas de la desembocadura se obtienen valores menores de la razón de mezcla, lo que indica una mayor capacidad de limpieza en depresiones

ubicadas aguas arriba. En la Fig. 11 se muestra la razón de mezcla en función de la razón entre el tiempo de retención de la depresión y el tiempo de marea, para todas las experiencias. Se observa tendencias paralelas de los resultados para distintos valores del número de Froude densimétrico. De ésta figura, se observa que: $r_{Mezcla} = f(Fr_{dx}^2) \cdot r_T^m$. Tomando la pendiente de la curva de mejor ajuste de los puntos de la Fig. 11, se tiene que $m \approx 1$. Despejando la función del Froude densimétrico, se obtiene la Fig. 12. En ella se observa un colapso aceptable de los puntos.

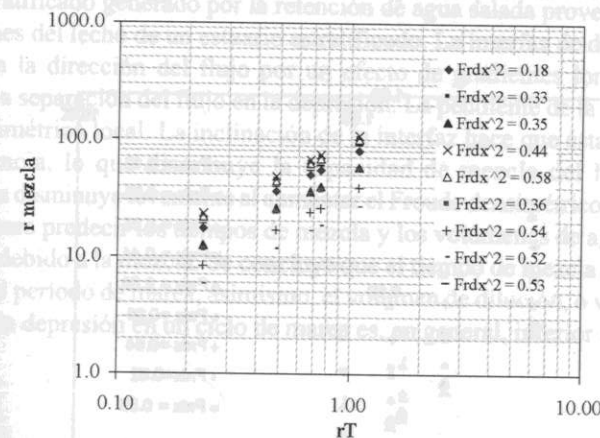


Figura 11. Razón de mezcla en función de la razón entre el tiempo de retención de la depresión y el tiempo de marea.

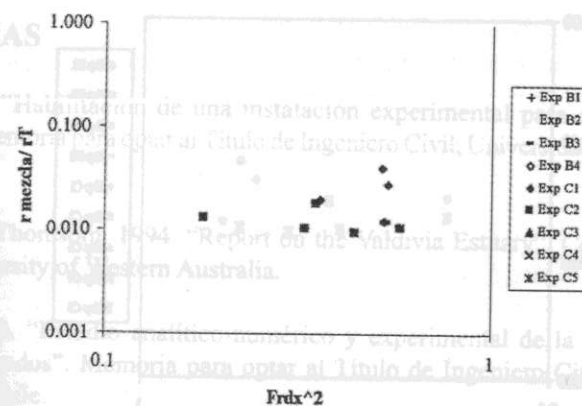


Figura 12. r_{Mezcla} / r_T en función del Fr_{dx}^2 .

En general, puede plantearse que hay una dependencia leve del término r_{Mezcla} / r_T con el número de Froude densimétrico. En efecto, es posible proponer la aproximación, $r_{Mezcla} \approx 0.02 r_T$. A partir de esto, se puede concluir que el tiempo asociado a la mezcla en las depresiones es mucho mayor que el período del ciclo de mareas. Por ello, la limpieza es sólo parcial.

Del mismo modo que el análisis de la razón de mezcla, se hace el análisis de la dilución del agua salada en la depresión. Para ello se supone que el volumen de agua renovada que se incorpora a una depresión en cada ciclo de marea es el mismo que sale de las depresiones por efecto de mezcla. Es posible calcular la razón de dilución, R , como el cociente entre el volumen

incorporando a la depresión ∇_s , y el volumen máximo de agua salada que queda entre las elevaciones después de la vaciante de la marea, ∇_d . La Fig. 13 muestra la razón de dilución en función de la razón de retención para diferentes experiencias. Se observa tendencias paralelas de los resultados para distintos valores del número de Froude densimétrico. En ella se observa que: $\nabla_s / \nabla_d = f(\text{Fr}dx^2) \cdot r_T^{-m}$. Tomando la pendiente de la curva de mejor ajuste de los puntos de la Fig. 13, se tiene que $m \approx 0.95$. Despejando la función del Froude densimétrico, se obtiene la Fig. 14. En ella se observa un colapso aceptable de los puntos.

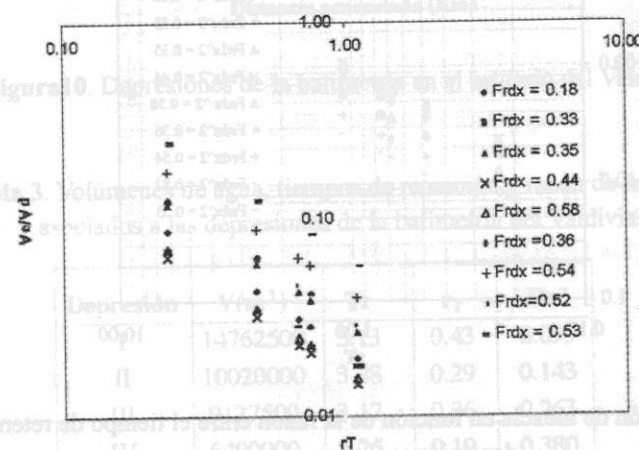


Figura 13. Razón de dilución en función de la razón de retención.

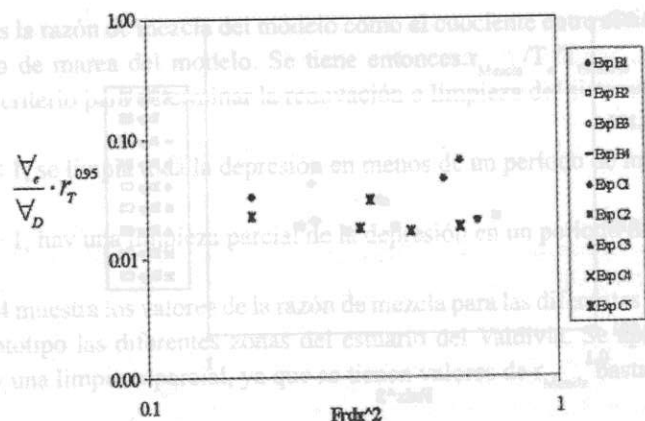


Figura 14. $\frac{\nabla_s}{\nabla_d} r_T^{-0.95}$ en función del $\text{Fr}dx^2$.

En general, puede plantearse que hay una dependencia leve del término $\nabla_s r_T^{0.95} / \nabla_d$ con el número de Froude. En efecto, es posible proponer la siguiente aproximación: $\nabla_s r_T^{0.95} / \nabla_d \approx 0.03$, o equivalentemente, $\nabla_s / \nabla_d \approx 0.03 \cdot r_T^{-0.95}$.

Si se supone un período de marea constante, $T_t = \text{cte.}$, y un caudal de agua dulce constante, entonces, r_T depende sólo del tamaño de la depresión. Es decir, $r_T = \nabla_s / Q_d T_t$. Luego, se concluye que la dilución es inversamente proporcional al tamaño de la depresión.

5. CONCLUSIONES

El estudio experimental permitió obtener información valiosa respecto de las características del flujo estratificado generado por la retención de agua salada proveniente de la cuña de sal en depresiones del lecho de un estuario estratificado. La interfaz de densidad en la depresión se inclina en la dirección del flujo por un efecto de gradientes longitudinales de presión asociados a la separación del flujo en la depresión. La pendiente de la interfaz aumenta con el Froude densimétrico local. La inclinación de la interfaz hace que ésta se ubique en zonas de baja turbulencia, lo que disminuye la capacidad de mezcla del flujo. La velocidad de incorporación disminuye levemente al aumentar el Froude densimétrico local. Esta información es utilizada para predecir los tiempos de mezcla y los volúmenes de agua salada extraídos de la depresión debido a la mezcla. Se concluye que el tiempo de mezcla está en el rango entre 5 a 100 veces el período de marea, asimismo, el volumen de dilución, o volumen de agua salada renovada en la depresión en un ciclo de marea es, en general, inferior al 30% del volumen de la depresión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT a través del Proyecto 1010483 y por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

- Abello, C. 2000 "Habilitación de una instalación experimental para el estudio de flujos estratificados". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Imberger, J y C. Thomsom. 1994. "Report on the Valdivia Estuary", Centre for Water Research, The University of Western Australia.
- Olivares, M. 2000. "Estudio analítico-numérico y experimental de la intrusión salina en estuarios estratificados". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Miranda, J.F. 2001. "Estudio experimental de los efectos de la batimetría sobre la intrusión salina en estuarios estratificados". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Miranda, J.F., y Y. Niño. 2001. "Intrusión salina en un estuario: Modelación y estudio experimental". Trabajo publicado en las Memorias del XV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica (este mismo libro).
- SINERGOS Consultores 1996. "Cuenca del río Valdivia. Algunos aportes para su conocimiento", Informe Técnico.