

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTUDIO NUMÉRICO DE PARÁMETROS ESTUARINOS QUE INFLUENCIAN LA
LONGITUD DE UNA CUÑA SALINA**

ALEJANDRO AGUADO¹
YARKO NIÑO²
ALBERTO DE LA FUENTE³

RESUMEN

En el presente documento se presenta un estudio numérico sobre los parámetros de la condición de borde oceánica que determinan la longitud de la intrusión salina en un sistema estuarino fuertemente estratificado. Para lo anterior, se considera un sistema de estuario simplificado con dimensiones uniformes, y mediante modelación numérica, se estudia qué condiciones de borde oceánicas determinan las características del flujo y su la magnitud de su influencia. Este análisis se hace tanto para el régimen permanente como el impermanente, y se estudia cuál es la influencia de la corriente marina transversal a la costa, el angostamiento en la boca del estuario y la marea, en la formación y alcance de la cuña salina en el estuario. Este estudio se realizará con el software de modelación numérica ELCOM, el cual es validado utilizando mediciones de los estuarios de los ríos Lebu y Tolón. Como resultados se muestra que un 15 % de reducción del ancho de escurrimiento en la desembocadura produce un acortamiento del alcance de la cuña salina a un 10 % del valor que tendría sin contracción; que la magnitud de la corriente marina paralela a la costa puede ser una barrera para la formación de una cuña salina, disminuyendo el alcance de ésta al aumentar la magnitud de las corrientes; y que el alcance de la cuña se reduce producto de la marea, lo que se debe a que nivel del mar en bajamar es el que condiciona el alcance de la intrusión salina. Los resultados obtenidos muestran que para el estudio de sistemas naturales de estuarios en presencia de una cuña salina, primero es necesario tener claridad de cómo responde el sistema ante cambios en la batimetría, la condición de borde oceánica y nivel de marea.

¹Memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - aaguado@ing.uchile.cl

²Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y AMTC, Universidad de Chile - ynino@ing.uchile.cl

³Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - aldela@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

En la desembocadura de un río (agua dulce) en el océano (agua salada), se pueden provocar distintos fenómenos dependiendo de las características del sistema. Los estuarios se pueden clasificar basados en la estructura vertical de salinidad según: estuarios bien mezclados, estuarios débilmente estratificados, estuarios fuertemente estratificados y cuña salina. Esta clasificación está dada por la interacción entre el caudal del río y la forzante de las mareas (Valle-Levinson, 2010). El estudio que se presenta en este artículo, se enfoca en estuarios fuertemente estratificados con presencia de una cuña salina. Esta clase de estuarios se caracterizan por una estratificación en dos capas claramente definidas y con poca mezcla vertical, debida a la diferencia de densidad entre el agua dulce y agua salada. En esta configuración se da lo que se conoce como cuña salina, que es una intrusión de agua salada en el río, ubicándose en el estrato inferior.

El flujo estratificado que se genera en un estuario con presencia de una cuña salina y en particular la longitud de la cuña, están determinados por el caudal del río, geometría del cauce y por la condición de borde en la boca del estuario, correspondiente a una altura de escurrimiento crítica (h_{crisis}) en el estrato superior. Esto es planteado por varios autores tales como Schijf & Schönfeld (1953), Arita & Jirka (1987), entre otros. En la Ec. 1, propuesta por Schijf & Schönfeld (1953), la longitud de la cuña salina (L), queda expresada según los términos de Arita & Jirka (1987) de la siguiente manera:

$$\frac{L}{H} = \frac{1}{\bar{\lambda}_i} \left[\frac{1}{5 \text{Fr}^2} - 2 + 3 \text{Fr}^{2/3} - \frac{6}{5} \text{Fr}^{4/3} \right] \quad (1)$$

donde H es la profundidad media del río, $\bar{\lambda}_i$ es un coeficiente de fricción interfacial y considerando g' la gravedad reducida, Q_f el caudal afluyente del río y b el ancho medio del cauce, se tiene que $\text{Fr} = \frac{Q_f/b}{\sqrt{g' \cdot H^3}}$ corresponde al Froude densimétrico.

La pluma de agua dulce del río, que escurre sobre el medio salino, se ve afectada por diversos factores externos tales como el efecto del esfuerzo de corte del viento, niveles de marea o las corrientes marinas, tal como plantea y analiza Hetland (2005). Las corrientes marinas están fuertemente ligadas a la posición geográfica debido a que están sujetas al efecto de Coriolis, sin embargo se desprejará la ubicación geográfica y estas corrientes serán impuestas como condición de borde en el sector oceánico. Al realizar las validaciones del modelo, aplicándolo a sistemas estuarinos naturales, se pudo notar que en gran parte de las desembocaduras de ríos existe una barra lateral que genera una contracción en el flujo antes de llegar al mar o incluso cambia su dirección de escurrimiento. Ejemplos en Chile de este fenómeno son los ríos Aconcagua, Maipo, Maule, Itata, Biobío, Imperial, Toltén, Bueno, entre otros.

El objetivo del estudio es determinar mediante modelaciones en ELCOM, cómo influyen la corriente marina transversal a la costa, el angostamiento en la boca del estuario y la marea, en la formación y alcance de la cuña salina en el estuario. Para ello se modeló distintos escenarios variando por separado la magnitud de cada uno de estos factores.

2. METODOLOGÍA

Validación Modelo

ELCOM es una herramienta de modelación numérica desarrollada por el Centre for Water Research (CWR) de la University of Western Australia. El nombre del software viene de la sigla en inglés ‘Estuary and Lake Computer Model’, y es internacionalmente utilizado para simular el comportamiento temporal de cuerpos de agua estratificados frente a factores ambientales, mediante modelos hidrodinámicos y termodinámicos en tres dimensiones. El detalle se puede obtener en el manual de uso de ELCOM (Hodges & Dallimore (2010b)), y su base teórica en el manual científico de ELCOM (Hodges & Dallimore (2010a)).

ELCOM adopta un esquema numérico semi-implícito de volúmenes finitos en tres dimensiones. Las ecuaciones de transporte que resuelve, corresponden a las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS) y ecuaciones de transporte escalar usando la aproximación de Boussinesq, despreciando términos de presión no hidrostática. Las condiciones de borde impuestas en la ecuación de momentum, son velocidad nula en el fondo y bordes (condición de no resbalamiento), y velocidad uniforme en la vertical en la superficie libre. La turbulencia horizontal es representada por un factor de viscosidad turbulenta (eddy viscosity), mientras que la turbulencia vertical puede representarse con esta viscosidad turbulenta o mediante un modelo de mezcla entre capas. El nivel de la superficie libre está determinado por una integración vertical de la ecuación de continuidad. La difusión horizontal es calculada con un coeficiente de difusión determinado por el usuario, en cambio la difusión vertical es calculada por un balance de energía entre celdas. El coeficiente de difusión vertical utilizado fue igual a cero, considerando que también existe difusión numérica. El viento también es un condición de borde que se representa como un esfuerzo de corte sobre la superficie libre del agua.

Este modelo es usado para estudiar numéricamente la influencia de parámetros estuarinos en la formación y alcance de una cuña salina, para lo cual se considera un estuario de geometría simplificada. Previo a ser aplicado al estudio en el estuario, se realizó una validación del modelo ELCOM. Esta validación se realizó a partir de las mediciones de salinidad en los estuarios de los ríos Lebu y Toltén, presentadas en el estudio de caudales de dilución realizado por el Departamento de Ingeniería Civil (2009) de la Universidad de Chile para la DGA y en la memoria de Booth (2010). Las mediciones presentadas en estos estudios muestran distintos comportamientos con el tipo de mezcla presente en el estuario, dependiendo de la condición de caudal afluente y características de la marea. En ambos estuarios se cuenta con mediciones de salinidad en perfiles transversales a lo largo del río, con sus respectivas mediciones del nivel del mar y caudal en el río en ese periodo. Las modelaciones de validación del modelo ELCOM consisten en reproducir las condiciones bajo las cuales se realizaron las mediciones y comparar éstas con los resultados obtenidos del modelo.

Parámetros a analizar

Con el modelo validado, se procedió a realizar las modelaciones requeridas para estudiar el efecto de los parámetros estuarinos en la cuña salina. Para esto se consideró una geometría simplificada de un sistema estuario-océano que se muestra en las Figuras 1 y 2, caracterizado por un canal de

sección transversal rectangular el cual desemboca en un sistema acuático salino, acompañado de un aumento abrupto en la profundidad de la cota de fondo. En uno de los bordes del sistema oceánico se impone una velocidad simulando las corrientes marinas paralelas a la costa, pero el resto de los bordes oceánicos se dejan abiertos. Con esta geometría simplificada se estudió la influencia de los siguientes factores en la longitud de la cuña salina:

- Corriente marina transversal a la costa: Se realizaron modelaciones en las que se mantuvieron fijos todos los parámetros del sistema (caudal, dimensiones físicas, nivel de marea), y variando solo la velocidad de las corrientes para el régimen permanente (Figura 1). Se repitió estos conjuntos de modelaciones, con distintos valores de caudales iniciales. La magnitud de la velocidad de corriente marina se contrasta con la velocidad crítica del flujo estratificado en la desembocadura del estuario, definida como:

$$v_{\text{crisis}} = \frac{Q_f/b}{h_{\text{crisis}}} = \frac{Q_f/b}{\sqrt[3]{(Q_f/b)^2/(g')}} \quad (2)$$

- Angostamiento en la boca del estuario: Tal como ocurre en gran parte de los sistemas de estuarios, existe una barra lateral en el cauce del río justo antes de entrar al océano. Por esto es que se analiza numéricamente la influencia de la longitud de esta barra sobre las características hidráulicas del sistema en régimen permanente. El tamaño de la barra utilizada para la modelación, en la dirección de escurrimiento del río, fue de 350 [m], y se realizaron modelaciones variando el ancho adimensional en la desembocadura entre $b'/b=0.87$ y 1. El caudal afluente fue de $Q_f=500$ [m³/s], en un cauce de profundidad $H_1=3$ [m] y profundidad media del mar igual a $H_2=100$ [m].
- Marea: Finalmente se estudia un caso impermanente del sistema, considerando las variaciones temporales del nivel del mar. Para ello se adopta la notación mostrada en la Figura 2, donde H_3 corresponde a la altura media de la superficie libre del mar con respecto al nivel cero del mar. Esta variable se mueve entre un mínimo y un máximo diferenciados por ΔH_3 . Se adopta una configuración de mareas semidiurnas con período de 12 horas. Considerando esta misma frecuencia de ondas marinas, se establecen dos escenarios de mareas correspondientes a los fenómenos astronómicos de sicigia y cuadratura. Para ello se considera una

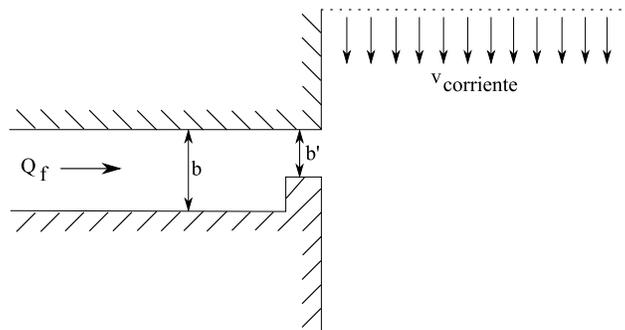


Figura 1. Esquema vista superior de un angostamiento en la desembocadura del río con corrientes oceánicas.

amplitud de onda de 0.9 [m] para sicigia y de 0.25 [m] para cuadratura, es decir, $\Delta H_3=1.8$ [m] y $\Delta H_3=0.5$ [m], respectivamente. Además se añade una marea intermedia de $\Delta H_3=1$ [m]. Estos valores fueron escogidos ya que son valores que se aproximan a la realidad en las costas de la zona centro sur de Chile. En la modelación se adoptó distintos valores de H_3 para estudiar cómo se relaciona este parámetro con la dinámica de la cuña salina. La condición de borde correspondiente a niveles de marea, se impone en los bordes oceánicos abiertos del dominio del modelo, sin embargo este nivel de marea en el modelo genera una onda que se propaga hacia aguas arriba en el río.

Dimensionamiento modelo

En la configuración de estuario simplificado generada, la grilla utilizada tiene un espaciamiento diferenciado, que en la dirección del río varía desde $dx=50$ [m] en las cercanías del umbral del cambio de cota de fondo, hasta $dx=900$ [m] aguas abajo en el océano. El espaciamiento transversal va desde $dy=10$ [m] (3.33 % del ancho del río) en las cercanías del eje central del canal hasta llegar a $dy=250$ [m] hacia los extremos. Mientras que en el eje vertical la grilla está separada desde $dz=0.1$ [m] (3.33 % de la profundidad media del río $H_1=3$ [m]) cercano a la superficie libre hasta $dz=12$ [m] en profundidades mayores.

El paso del tiempo utilizado depende de cada caso. Hay pasos de tiempo máximos que se pueden utilizar para que el modelo sea estable. Estos pasos de tiempo dependen tanto de la grilla utilizada como de las velocidades en el sistema. Es por ello que dependiendo de cada configuración se tendrá distintos límites de tiempo, ya que las corrientes, angostamientos y caudales tienen directa relación con las velocidades puntuales generadas. El orden de magnitud del paso de tiempo utilizado está en torno a los $dt=10$ [s].

Dentro de las condiciones iniciales utilizadas fueron que todo el sistema se encontraba a una misma temperatura igual a 15°C tanto en el agua como en el aire. Además los caudales entrantes fueron impuestos con la misma temperatura para despreciar el efecto de las diferencias de temperatura en los procesos de estratificación y mezcla. En cuanto a la salinidad inicial se determinó que esta fuera de 32 [psu] en el sector marino e igual 0 [psu] en el canal del río. La salinidad del caudal afluente del río se impuso nula, mientras que la salinidad del caudal correspondiente a las corrientes marinas fue igual a 32 [psu].

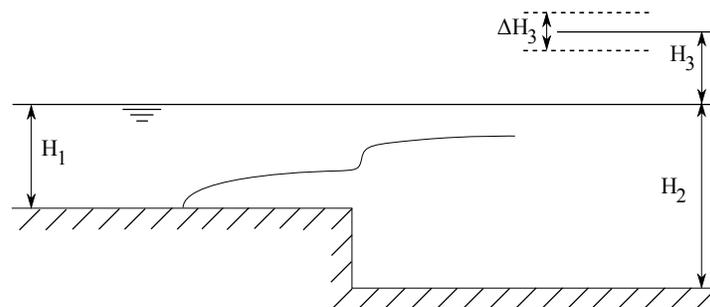


Figura 2. Esquema perfil longitudinal incorporando profundidad media del río (H_1), profundidad oceánica (H_2), nivel medio de marea (H_3) y su rango de variación (ΔH_3).

Por último, otro factor importante es la proximidad de las condiciones de borde, ya que al estar muy cerca de la zona de estudio, los resultados se pueden ver alterados. Al alejar estas condiciones de borde estos fenómenos puede que igual ocurran pero en menor medida y al ocurrir más lejos el error asociado disminuye; por ello que la dimensión del cauce del río, fue escogida de unos 21 [km], tal que la cuña no chocara en el borde del dominio y en el océano una extensión de aproximadamente 40 [km] y un ancho del orden de 5 [km].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelación estuario Río Lebu

A partir de los perfiles medidos a lo largo del río se puede tener una aproximación de la batimetría del mismo. El espaciamiento horizontal adoptado para la batimetría del Río Lebu fue de 10 metros, sobre la cual se realizó la modelación que se puede ver en la Figura 3. Estas mediciones del día 22 de Junio del año 2009, fueron realizadas con un caudal medido de 35.4 [m³/s] bajo las condiciones

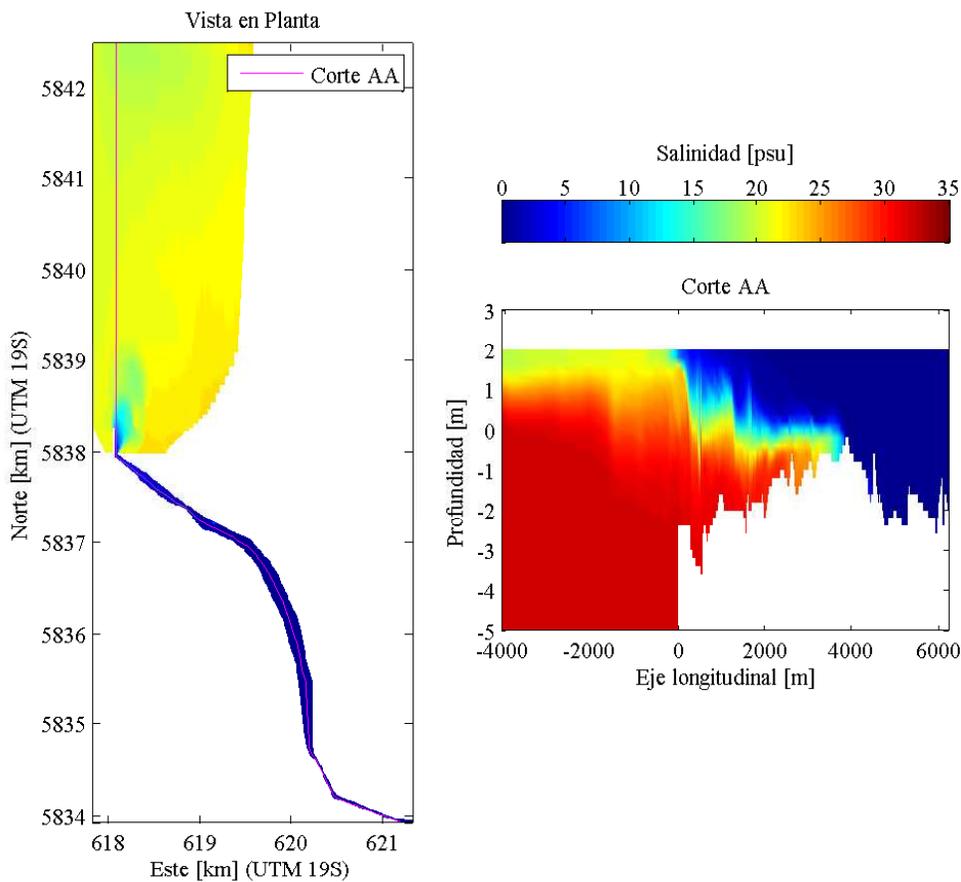


Figura 3. Modelación Estuario Río Lebu, bajo condiciones del día 22 de Junio de 2009, en estado llenante.

de marea tales que se observa estado de llenante y vaciante de la intrusión en el río. En la Figura 3 se observa el estado de pleamar correspondiente a llenante. Como resultado se obtuvo que para mareas altas la cuña alcanza una longitud levemente mayor a los 4 [km] medidos desde la boca del estuario, mientras que para mareas bajas la cuña salina se recoge hasta longitudes cercanas a los 300 [m]. Se observó la acumulación de agua salada durante marea baja en depresiones en la batimetría. Estos resultados se aproximan bastante a las mediciones, que indican que la cuña alcanzó una longitud de 4 [km], y que durante vaciante la cuña se recoge casi completamente quedando solo un resto de agua salada retenida en el fondo (Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile (2009)).

Modelación estuario Río Toltén

Al igual que el caso del Río Lebu, en el Río Toltén se tienen perfiles de salinidad medidos, de los cuales se puede generar la batimetría en coordenadas cartesianas requeridas para la modelación

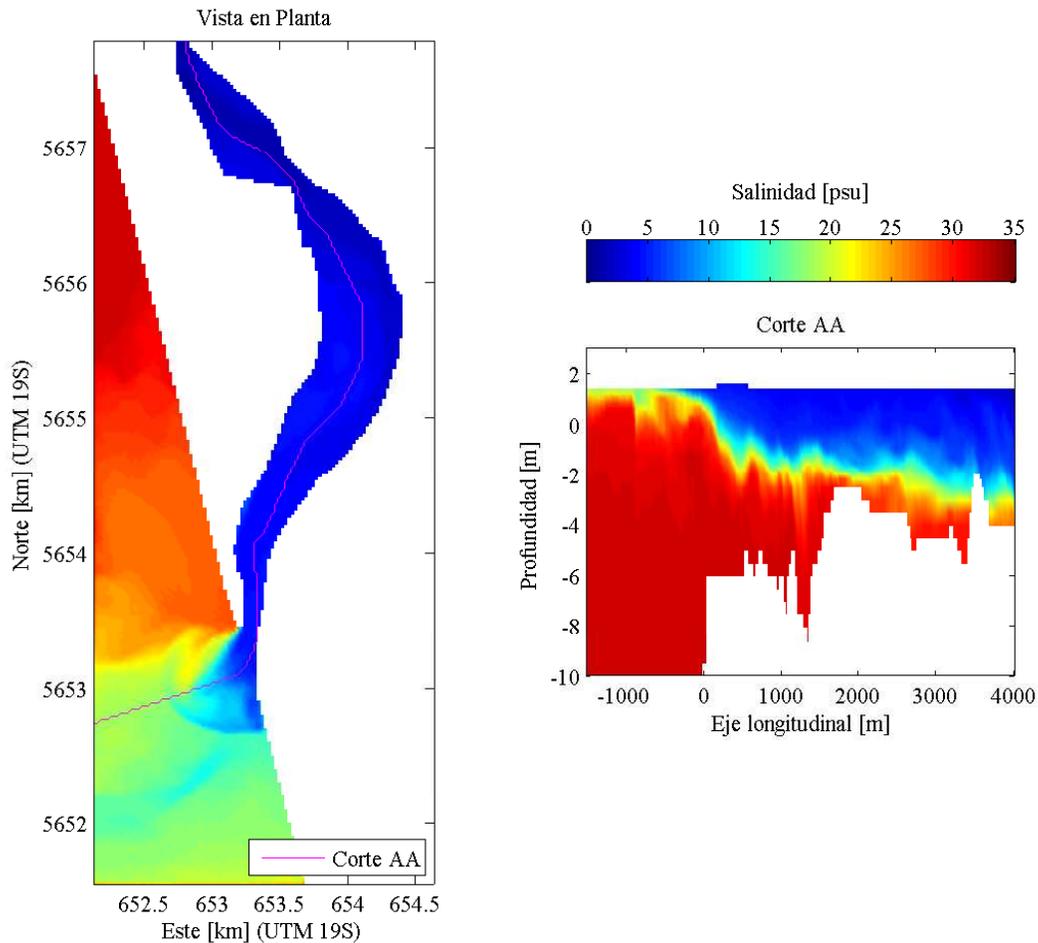


Figura 4. Modelación Estuario Río Toltén, bajo condiciones del día 9 de Marzo de 2009, en estado llenante.

en ELCOM. Se consideran para la modelación los parámetros medidos el día 9 de Marzo del año 2009, bajo las condiciones de marea de aquel día y un caudal de 186 [m³/s]. Para modelar este estuario se utilizó una grilla uniforme en la horizontal con un espaciamiento de 25 [m]. Comparando el resultado de la Figura 4, correspondiente a un estado de marea llenante, con las mediciones realizadas, se tienen alcances de la cuña similares para esta configuración. A partir de las mediciones se obtiene una intrusión de 4.4 [km] de longitud, lo cual también corresponde al resultado brindado por el modelo.

Luego de los resultados obtenidos para ambos estuarios modelados, los cuales se asemejan bastante a los datos medidos en terreno, se puede considerar ELCOM como una herramienta de modelación válida que se aproxima bastante bien a los fenómenos hidrodinámicos que ocurren en un estuario. Es por ello que se procede a estudiar distintas variables que condicionan las características hidráulicas en estuarios mediante este software.

Descripción de dinámica estuario-océano para geometría simplificada

Tal como se aprecia en la Figura 5, se impone un río de ancho $b=300$ [m] y profundidad $H_1=3$ [m], el cual llega a una zona de profundidad $H_2=100$ [m] y ancho infinito. Esta configuración representa las condiciones de un estuario formado por un río que desemboca al océano. En la Figura 5(a) la profundidad total fue acotada para visualizar de mejor manera la zona de la estratificación. En el extremo superior de la vista en planta (Figura 5(b)), se impone distintos valores de velocidad de corrientes entrantes, uniformes en la vertical, para analizar su influencia sobre las características del estuario. También se varía el caudal afluente del río (Q_f) y el ancho en el angostamiento (b') producido por la barra lateral en la desembocadura. El resto de los parámetros se mantienen constantes y las variables se modifican independientemente para realizar un análisis por separado de cada una de ellas.

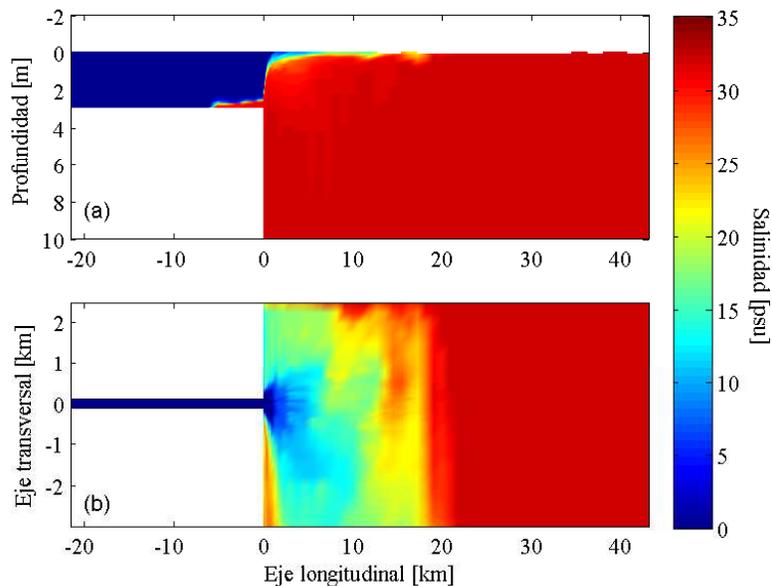


Figura 5. Estuario modelado incorporando corrientes oceánicas.

La Figura 5(a) muestra los resultados de salinidad visualizados desde el perfil longitudinal, correspondiente al plano generado por el eje vertical y longitudinal. En la Figura 5(b) se muestra la vista en planta de la salinidad superficial del sistema considerando una velocidad de corriente de $v_{\text{corriente}}=5$ [cm/s] y caudal afluente $Q_f=500$ [m³/s]. En el angostamiento el ancho es de $b'=290$ [m], con lo que se tiene una relación $b'/b=0.97$.

Angostamiento en la desembocadura

Los principales resultados de la influencia de reducción del ancho de escurrimiento en la desembocadura se muestra en la Figura 6, en la cual se muestra adimensionalizada la longitud de la cuña con la longitud de la cuña sin la presencia de la barra ($L_{\text{cuña}}^{\text{sin barra}}$). Estos resultados consideran una velocidad de corrientes marinas $v_{\text{corriente}}=0.05$ [m/s]. En la Figura 6 se puede apreciar que la presencia de la barra que genera el angostamiento tiene una gran influencia sobre la longitud de la cuña. Si la relación entre el ancho de la angostura con el ancho del canal es cercano a la unidad, la extensión de cuña salina es muy sensible, disminuyendo bastante su valor al aumentar el tamaño de la barra. Para relaciones menores entre el ancho en la boca y el del cauce, se reduce el tamaño de la cuña pero con una sensibilidad menor. Se ajustó a los datos una función exponencial que describe el comportamiento descrito en el rango de angostamientos experimentados.

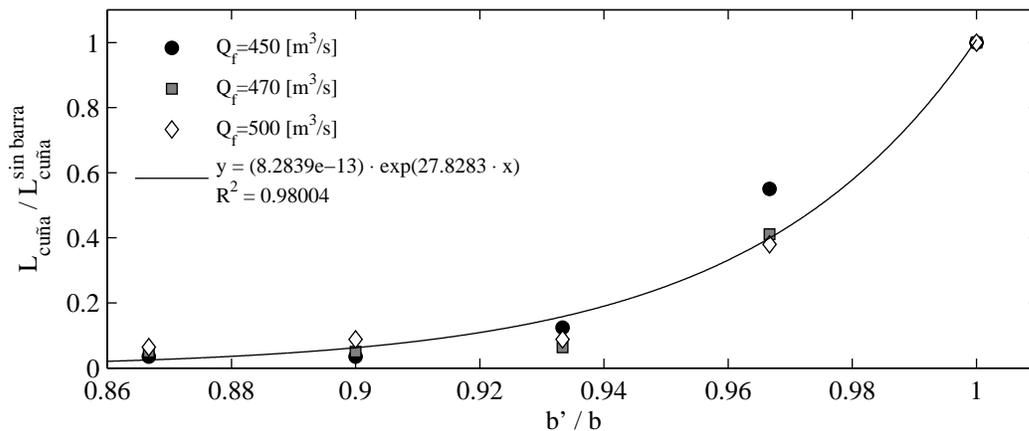


Figura 6. Relación entre longitud de la cuña salina y angostamiento en la boca del estuario.

Velocidad corriente oceánica paralela a la costa

Dependiendo de la zona de estudio y su latitud, es posible tener distintas velocidades de corrientes oceánicas, por ello se analizó su influencia en el comportamiento de la cuña y el flujo en general. Se notó que al aumentar esta velocidad, la pluma de agua dulce que llega al mar era adveccionada transversalmente en mayor magnitud, teniendo ésta un alcance menor hacia aguas adentro del océano. Además se pudo percibir la influencia de la velocidad de las corrientes sobre la longitud de la intrusión salina, dando como resultado que, dado un cierto caudal afluente del río, la longitud de la cuña disminuye tendiendo a un valor mínimo en el cual si se sigue aumentando la magnitud de las corrientes, su extensión ya no es influenciada por ellas. Este valor mínimo alcanzado para cada

caudal de denomina $L_{\text{cuña}}^{\text{ult}}$, el cual es usado para adimensionalizar la longitud de la cuña con el fin de encontrar una relación adimensional entre las corrientes y la extensión de la intrusión salina, tal como se puede ver gráficamente en la Figura 7.

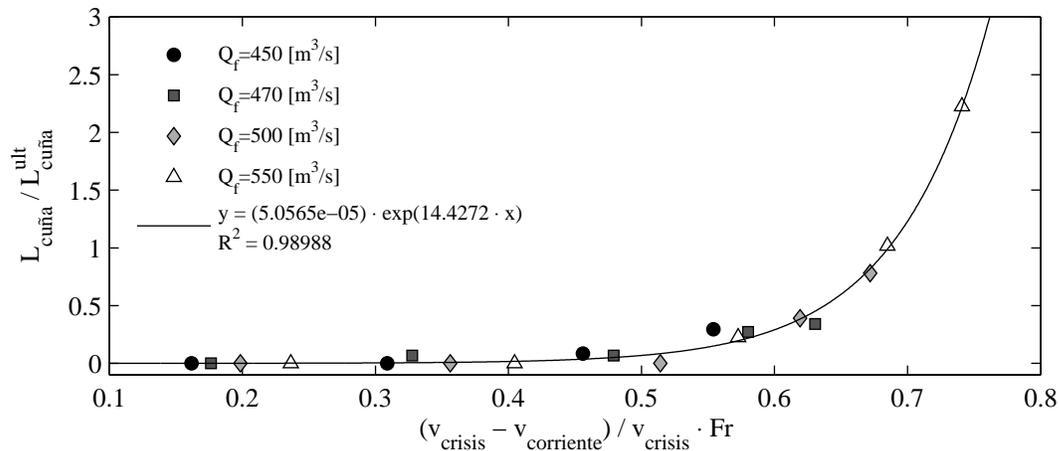


Figura 7. Relación entre longitud de la cuña salina y velocidad de corrientes oceánicas.

Al aumentar el caudal del río la intrusión salina se recoge disminuyendo así su extensión. Sin embargo en la Figura 7, se encontró una relación entre la velocidad de las corrientes oceánicas y la longitud de la cuña en una sola curva, a diferencia del caso dimensional en el cual existe una curva para cada caudal. La velocidad de la corriente fue adimensionalizada utilizando una expresión dependiente del número de Froude densimétrico del río (Fr) y la velocidad del flujo crítico (v_{crisis}) en el estrato superior asociado a la crisis en la boca del estuario. Como se puede apreciar, se realizó un ajuste exponencial a los datos adimensionalizados.

Influencia mareas

Finalmente, al incorporar el efecto de las mareas sobre el sistema, se obtiene como resultado que la intrusión salina varía su longitud y altura de escurrimiento en el tiempo. Al ser alto el nivel del mar la cuña salina tiene una extensión más grande y una altura de escurrimiento mayor. En cambio cuando el nivel del mar es bajo, la cuña retrocede disminuyendo de gran manera también su altura de escurrimiento. En la Figura 8 se tienen las alturas del nivel del mar en el extremo aguas abajo del estuario, la cual corresponde a la condición de borde impuesta en el problema (Marea CB). También se grafica temporalmente el nivel del mar en la boca del estuario (Marea boca) y paralelamente la longitud de la cuña salina ($L_{\text{cuña}}$).

En la Figura 8 se aprecia la diferencia en la suavidad de las curvas, ya que la curva correspondiente a la longitud de la cuña salina presenta saltos abruptos en el tiempo, lo cual no ocurre en las curvas de nivel de marea. Esto debido a que la resolución de la grilla vertical en los sectores cercanos a la superficie libre, es decir, donde se encuentra el nivel de la marea, es bastante fina. En cambio la grilla en el eje longitudinal, en la cual se mide la longitud de la cuña salina, es más gruesa.

A pesar de esta diferencia de resolución, en la Figura 8 se observa claramente que existen ciertos

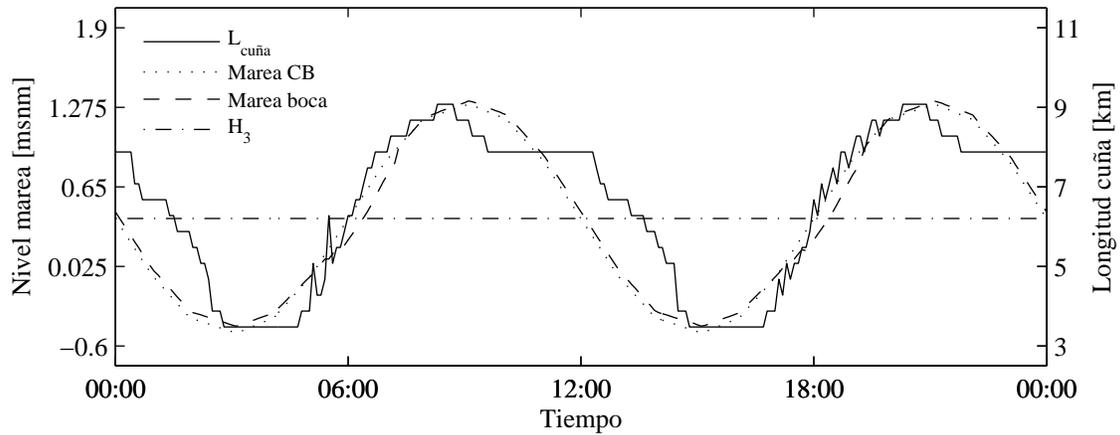


Figura 8. Resultados de la variación temporal de la longitud de la cuña salina para un día cualquiera de modelación comparado con niveles de marea en la boca del estuario y en la condición de borde correspondiente al extremo oceánico del modelo. Los valores de la extensión de la cuña están referenciados al eje derecho de las ordenadas y los niveles de marea al eje izquierdo.

tiempos de desfase entre los distintos parámetros. Iniciando la comparación entre el nivel de marea correspondiente a la condición de borde con la medida en la boca del estuario, se observa que la variación de marea en la boca del estuario es prácticamente instantánea al cambio de marea en la condición de borde del extremo aguas abajo. Por otro lado si se compara la respuesta de la longitud de la cuña ante las mareas, queda en evidencia que la respuesta de la longitud de la cuña al aumentar el nivel marino es casi inmediato. Mas no ocurre lo mismo al descender la marea, ya que se observa un desfase mayor entre la disminución de ambos.

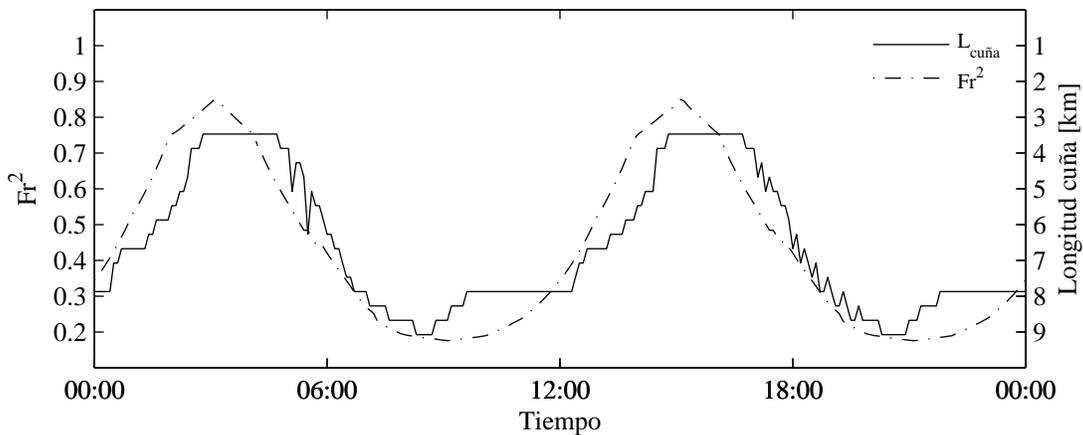


Figura 9. Resultados de la variación temporal de la longitud de la cuña salina para un día cualquiera de modelación comparado el número de Froude del río bajo los efectos de la variación en los niveles de marea. Los valores de la extensión de la cuña están referenciados al eje derecho de las ordenadas (invertido) y los valores de Froude cuadrado al eje izquierdo.

Si se analizan los máximos y mínimos de las mareas y la longitud de la cuña, se puede notar que no ocurren simultáneamente (Figura 8). Los valores mínimos se encuentran desfasados por tiempos cercanos a la hora, alcanzándose primero el mínimo de la marea y luego, como es de esperar, el de la cuña salina. Sin embargo al observar el tiempo de ocurrencia de los valores máximos, llama la atención que ocurre primero el máximo de la cuña previo al de la marea. Al realizar una comparación de la longitud de la cuña con el número de Froude al cuadrado en el río, considerando el aumento de su profundidad debido a las mareas, se puede apreciar la clara relación entre ambos (Figura 9). En esta figura se observa que la longitud de la cuña responde inversamente proporcional al valor del número de Froude al cuadrado en el tiempo, teniéndose que en periodos de baja marea, el Froude cuadrado aumenta produciendo el retroceso de la cuña y para periodos de mayor nivel de marea ocurre lo opuesto. Se puede ver un desfase del orden de una hora entre la variación del Froude cuadrado y la respuesta de la cuña, lo cual confirma la dependencia de la extensión de la cuña con el número de Froude cuadrado. La cuña salina, luego de encontrar su máxima extensión, comienza a disminuir. Sin embargo en el comienzo de su disminución, existe un intervalo de tiempo en que mantiene su longitud. En este intervalo de tiempo, en un estado de disminución de marea a baja tasa, se observa que mientras la longitud de la cuña se mantiene constante, su altura de escurrimiento se reduce bastante. Posteriormente a esto comienza a disminuir la longitud de la cuña debido a mayores tasas de disminución de marea.

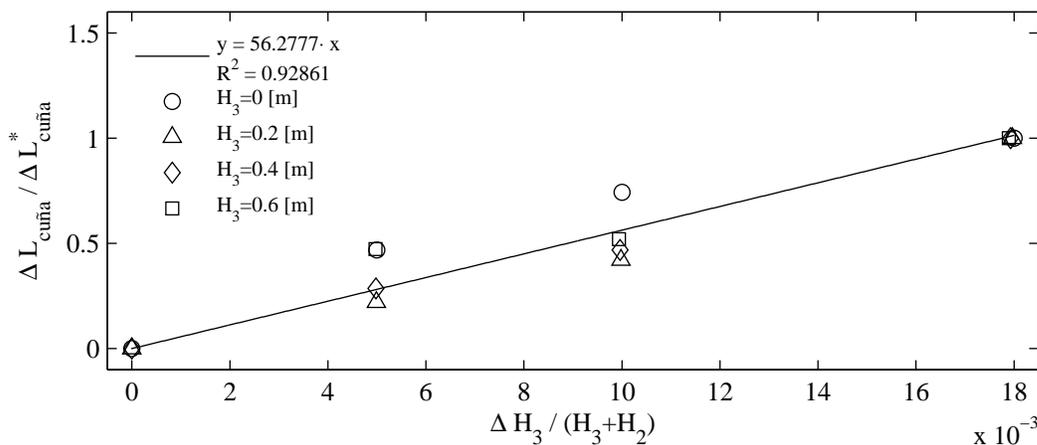


Figura 10. Relación entre rango de variación de la longitud de la cuña salina ($\Delta L_{\text{cuña}}$) con las variaciones del nivel del mar (ΔH_3). Como variables adimensionalizadoras, se utilizan: $\Delta L_{\text{cuña}}^*$, que corresponde a la variación en la longitud de la cuña para $\Delta H_3=1.8$ [m] y la profundidad del nivel del mar (H_3+H_2).

Luego, se analizan las tendencias y fluctuaciones de la longitud de la cuña salina en función de las fluctuaciones de las mareas. Como es de esperar, al aumentar la variación del nivel de marea, el rango de movimiento de la cuña es mayor. Esto se demuestra en la Figura 10, en la cual se relacionan parámetros adimensionales. La variación de la longitud de la cuña ($\Delta L_{\text{cuña}}$) se adimensionaliza en cada nivel de marea, con la variación de la longitud de la cuña correspondiente a una fluctuación de 1.8 metros en el nivel del mar ($\Delta L_{\text{cuña}}^*$), correspondiente a la máxima fluctuación analizada.

Finalmente, al analizar la relación entre el alcance promedio de la intrusión salina con el nivel

medio del mar, para distintas amplitudes de mareas, se observa en las modelaciones que estas longitudes medias aumentan al aumentar el nivel medio del mar (H_3), sin embargo se observa que la longitud de la cuña es bastante mayor cuando no existe variación de marea que cuando si la hay. Esto puede explicarse al comparar la respuesta de la longitud de la cuña salina en función del Froude densimétrico del río, tal como se hace en la Ec. 1. En la Figura 11 se grafica la relación de la extensión de la cuña con esta expresión mencionada y además en función del Froude cuadrado, para los escenarios con nula variación de marea.

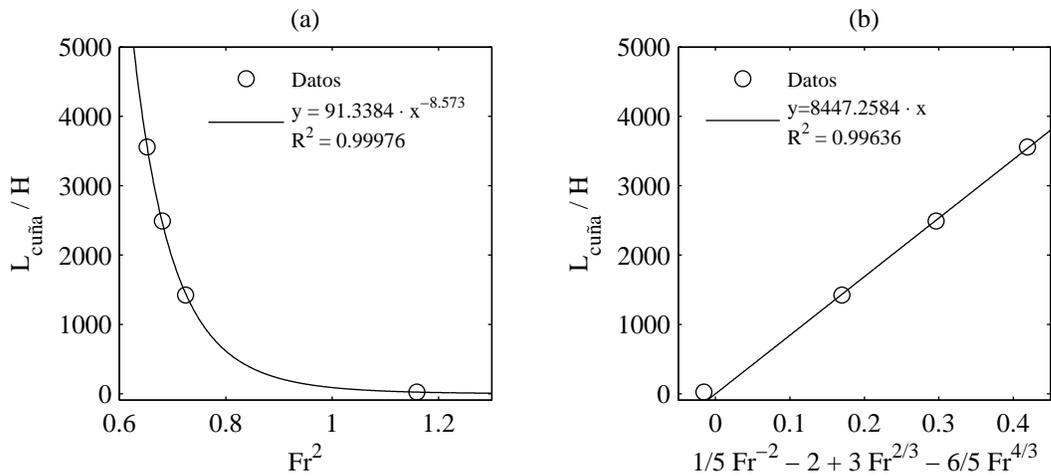


Figura 11. Relaciones de la longitud de la cuña con el número de Froude, para configuraciones sin variación de marea.

El término H , corresponde a la profundidad del cauce de río (H_1). Luego se repiten estos gráficos pero incorporando distintos niveles y variaciones de marea, como se muestra en la Figura 12. Se analizó distintos estados de la marea, para determinar qué estado de la marea era el que dominaba la respuesta de la longitud de la intrusión salina. Entre estos estados, se analizó los valores máximos,

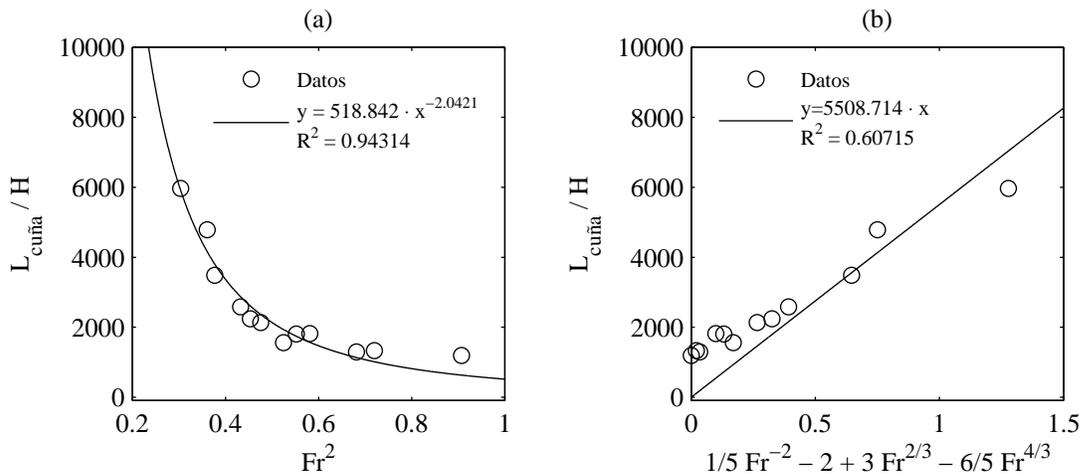


Figura 12. Relaciones de la longitud de la cuña con el número de Froude, para configuraciones con variación de marea.

medios y mínimos, siendo estos últimos los únicos que seguían la misma tendencia que el caso sin marea. En este caso, al incorporar el efecto de las mareas, se tiene que corregir H según $H=H_1+H_3-\Delta H_3/2$, con lo cual el número de Froude también se debe corregir considerando este nuevo valor de H .

Se concluye a partir de esto que la longitud de la cuña está dominada por los niveles mínimos de la superficie libre, alcanzados en cada estado de marea. Es por ello que en los casos con marea presentan menor longitud de la cuña, ya que los mínimos niveles alcanzados tienen una mayor influencia sobre la extensión de la intrusión que los niveles altos del mar. Además se puede determinar el coeficiente de fricción interfacial (λ_i) resultante en el modelo para el caso con o sin mareas. Este coeficiente se puede inferir de la pendiente del ajuste lineal generado en las Figuras 11(b) y 12(b), en las cuales se representa la Ec. 1. Se puede apreciar el aumento desde $1.18 \cdot 10^{-4}$ a $1.82 \cdot 10^{-4}$ de este coeficiente al estar bajo condiciones impermanentes del nivel del mar. El aumento de este coeficiente es de un 65 %, lo cual corresponde a un factor de corrección para el coeficiente de fricción interfacial al incorporar el efecto de mareas.

4. CONCLUSIONES

La implementación de ELCOM ha resultado ser muy útil en el estudio hidrodinámico de un sistema natural como lo es un estuario. Luego de realizar la modelación de los estuarios de los ríos Lebu y Toltén bajo condiciones específicas correspondientes a mediciones hechas en terreno, y haber comparado sus resultados con los valores de las mediciones, se puede confirmar que esta herramienta es una muy buena aproximación de los fenómenos hidrodinámicos y la influencia de parámetros estuarinos en la longitud de la cuña salina.

A modo de resumen, se puede decir que la magnitud del caudal afluente del río, tiene un efecto inverso sobre la longitud de la cuña salina. Lo mismo ocurre con la presencia de una barra transversal en un extremo del cauce, haciendo que la extensión de la intrusión sea menor al aumentar su longitud. Otro factor que restringe el avance de la cuña son las corrientes en el océano. Por el contrario, al aumentar los niveles medios del mar, la intrusión tiene un alcance mayor. Sin embargo al analizar el caso impermanente de las mareas se pudo notar que el tiempo de respuesta en el largo de la cuña no era igual en estado de marea llenante y vaciante.

Los niveles mínimos de las mareas alcanzados en régimen permanente son determinantes en la longitud media de la cuña, debido a que la extensión de ésta está condicionada por el número de Froude del río, el cual está relacionado inversamente al cubo del nivel del río. Por lo tanto la relación entre el nivel de marea y longitud de la cuña no es directa, dando como resultado que la influencia de los niveles mínimos de las mareas predominan por sobre los niveles mayores. Es por eso que a modo de análisis previo en la salinidad de un estuario, es importante saber las amplitudes de mareas, niveles medios y niveles de reducción de sonda. Los niveles de reducción de sonda corresponden a los valores mínimos que se pueden encontrar en el nivel del mar, y es importante tener estos niveles como punto de referencia.

Luego del análisis realizado sobre la respuesta del flujo estratificado en un estuario frente a algunos

factores estuarinos, se puede rescatar cuáles son más determinantes que otros. Esto puede ser de gran utilidad para tener en cuenta al realizar un estudio de la hidrodinámica de uno de estos sistemas costeros. Dados los resultados se puede concluir que uno de los factores más importantes es el dimensionamiento de la barra transversal en la boca del estuario debido a que ante leves variaciones de ésta, la extensión de la cuña cambia significativamente. Por otro lado, la velocidad de las corrientes oceánicas, si bien ante pequeñas variaciones no es tan determinante como la presencia de la barra, es importante considerarla y manejar el orden de magnitud de éstas.

REFERENCIAS

Arita, M., & Jirka, G. 1987. Two-Layer Model of Saline Wedge. I: Entrainment and Interfacial Friction. *Journal of Hydraulic Engineering*, **113**(10), 1229–1248.

Booth, T. 2010. Metodología para determinar caudales de dilución en estuarios. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile*.

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. 2009. Análisis metodológico para determinar caudales de dilución en zonas estuarinas. *Estudio realizado para la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas*.

Hetland, Robert D. 2005. Relating River Plume Structure to Vertical Mixing. *Journal of Physical Oceanography*, **35**(9), 1667–1688.

Hodges, B., & Dallimore, C. 2010a. Estuary , Lake and Coastal Ocean Model : ELCOM v2.2 Science Manual.

Hodges, B., & Dallimore, C. 2010b. Estuary , Lake and Coastal Ocean Model : ELCOM v2.2 User Manual.

Schijf, J. B., & Schönfeld, J. C. 1953. Theoretical considerations on the motion of salt and fresh-water. *Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention*, 321–333.

Valle-Levinson, A. 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press.