

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

ESTRATIFICACIÓN SALINA E INTRUSIÓN DE AGUAS COSTERAS EN EL LAGO BUDI: ESTUDIO DE TERRENO Y MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.

CLAUDIA RODRIGUEZ.¹
YARKO NIÑO.²
MANUEL CONTRERAS.³

RESUMEN

Se presentan resultados de un estudio sobre la termo-hidrodinámica e intrusión salina en el lago Budi (lago costero ubicado en la IX Región), aspectos que hasta el momento no han sido abordados en estudios anteriores sobre este sistema. El estudio incorpora información batimétrica y la estructura salina, térmica y de oxígeno disuelto en el lago y río Budi obtenida en campañas de terreno, y resultados de simulación numérica obtenidos a partir de la aplicación de diversos modelos de la hidrodinámica del río y el lago, forzada por parámetros hidro-meteorológicos y por la eventual intrusión de aguas costeras en el sistema. En la modelación se implementó la hipótesis de que, cuando la desembocadura del río Budi se encuentra abierta (lo cual ocurre durante breves periodos en el ciclo anual), la entrada de agua salada al lago se realiza mediante una corriente de densidad durante los periodos de llenante, mientras que durante las vaciantes se produce la salida de agua dulce desde el lago. Esta modelación, validada con datos de terreno, logra explicar la dinámica de cómo ocurriría la intrusión salina en el sistema. Cuando la desembocadura se cierra, el lago Budi exhibe una estratificación salina que podría mantenerse por más de 5 meses, al cabo de los cuales la energía cinética turbulenta inducida por el viento mezclaría completamente la columna de agua. La modelación predice que en este periodo ocurre un rápido descenso de los niveles de oxígeno en la capa de fondo, tal como se observó en terreno durante las campañas, situación que se mantiene durante todo el periodo de estratificación por la inhibición de la mezcla que imponen los fuertes gradientes de densidad. Un análisis más profundo de este sistema y de alternativas para su remediación requiere nuevas y más completas campañas de terreno.

¹ Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. e-mail: crodrigu@ing.uchile.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. e-mail: ynino@ing.uchile.cl

³ Director Ejecutivo, Centro de Ecología Aplicada. e-mail: mcontreras@cea.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las lagunas costeras, conocidas también como ICOLLS (Intermittently Closed and Open Lakes and Lagoons) o estuarios cerrados, han sido definidas como cuerpos de agua costeros, abiertos periódicamente al mar y dentro de los cuales existe una variación mensurable de salinidad debido a la mezcla de agua de mar con agua dulce. La comunicación de estos estuarios con el mar se desarrolla, generalmente, a través de un canal estrecho, de bajas profundidades comparadas con las desarrolladas en la laguna (Australian Government, National Land & Water Resources, 2001).

El desarrollo de barreras en la desembocadura es un componente distintivo de estos sistemas, las que se forman por una depositación progresiva del sedimento que es arrastrado por el oleaje. Debido a la carencia de una entrada significativa de agua dulce y a un oleaje de baja magnitud, las barreras permanecen en el tiempo, dando como resultado el aislamiento de la laguna de la influencia costera durante largos periodos (Ranasinghe et al., 1999). Situaciones extremas como tormentas o grandes crecidas pueden erosionar la barra, hasta provocar su rompimiento total o parcial, generando un cambio generalizado en el sistema (Ranasinghe et al., 1999).

Las diferencias de densidad, que regulan la estratificación de los lagos, no siempre son producidas por la temperatura. Diferencias de salinidad en la columna de agua pueden producir una estratificación similar, la que en combinación con la provocada por la temperatura, puede generar una estratificación aun más estable. Se puede llegar a casos en los cuales los gradientes no pueden ser destruidos y la circulación del lago es intermitente o bien no se produce. Los lagos que presentan este tipo de estratificación química se denominan meromícticos (Wetzel, 1981). Este tipo de estratificación se caracteriza por un estrato más profundo, que permanece sin mezclarse con el resto de la masa de agua, denominado monimolimnion, y una capa superior donde existe circulación, llamada mixolimnion. Ambos estratos se separan por la zona de máximo gradiente de salinidad o quimioclina.

Existen varios tipos de meromixis de acuerdo al origen del agua salada que produce esta condición (Wetzel, 1981). Uno de éstos es la meromixis de tipo ectogénica, que se produce cuando existe un aporte de agua salada, debido a un suceso externo, a un lago de agua dulce. Este tipo de meromixis es común en zonas costeras, donde es frecuente el fenómeno de intrusión salina sobre lagos formados sobre pequeñas depresiones. La entrada de una gran cantidad de agua dulce, tanto de forma natural, durante periodos lluviosos o de manera artificial durante periodos de riego, produce una estratificación meromíctica.

El lago Budi, único lago salado de la zona centro sur de Chile, es un estuario cerrado que presenta el tipo de comunicación con el mar característico de estos sistemas. Se ubica a 10 km al sur-este de Puerto Saavedra, en las coordenadas geográficas 38° 52' latitud Sur y 73° 18' longitud Oeste. Geográficamente está compuesto por varias islas y penínsulas; su espejo de agua posee una forma muy irregular y alcanza los 51 km². La profundidad máxima del lago se estima en unos 8 m.

El canal que une el lago Budi con el mar, es de tipo meandroso, tiene aproximadamente 10 km de largo y una profundidad media de 4 m. De acuerdo con Stuardo (1980) esta unión se realiza de manera esporádica desde fines de otoño hasta comienzos de la primavera, luego la desembocadura del río Budi se cierra por la formación de una barra, transformándose de esta

manera en un sistema aislado del mar. La información recolectada en terreno indica que actualmente, y desde aproximadamente 10 años, la conexión se establece por el dragado artificial que se realiza sobre la barra, cuando así lo solicitan los pobladores de los lugares ribereños, debido a inundaciones. No existe un registro de cuándo y con qué frecuencia se abre la barra, pero se sabe que normalmente el dragado se efectúa al final del periodo de lluvias (julio o agosto) y puede ocurrir más de una vez si los niveles en el lago así lo requieren.

El lago se encuentra dentro de una zona declarada Area de desarrollo indígena (ADI) existiendo alrededor de 107 comunidades mapuches-lafquenes, que usan el lago para navegación y pesca artesanal. Actualmente en la zona existen serios problemas medioambientales, de los cuales los más significativos corresponden a la degradación del suelo, pérdida de bosque nativo y la contaminación por residuos domésticos que afectan a los cuerpos de agua; existiendo antecedentes que muestran un avanzado proceso de eutroficación en el lago (Peña et al., 2004).

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio sobre la termo-hidrodinámica e intrusión salina en el lago Budi, aspectos que hasta el momento no han sido abordados en estudios anteriores sobre este sistema. Se desea determinar, específicamente, la validez de la hipótesis sobre la causa de las elevadas concentraciones de sal existentes en el lago, atribuidas a la ocurrencia de intrusión salina en el río Budi, y determinar los efectos del manejo de la barra Budi sobre el comportamiento termo-hidrodinámico del lago. Para lograr los objetivos propuestos se han implementado diversos modelos numéricos cuyos resultados han sido calibrados y validados mediante los datos registrados en dos campañas de terreno realizadas en la zona de estudio.

2. CAMPAÑAS DE TERRENO

El objetivo de las campañas de terreno fue obtener una base de datos actual y confiable de la zona de estudio, conformada por datos físico-químicos e información morfológica del lago. La primera campaña de terreno se realizó entre los días 19 y 23 de noviembre de 2003, la segunda los días 27 y 28 de noviembre de 2004. En esta última se investigaron, además, las características de la desembocadura del río Budi.

La metodología se basó en la realización de muestreos en estaciones definidas a lo largo de transectas o recorridos que cubrieron las zonas de mayor interés para el estudio, correspondientes a los lugares más profundos del lago y el río Budi en su extensión longitudinal. Se midieron los siguientes parámetros físico-químicos en la columna de agua: conductividad eléctrica (μs), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), oxígeno disuelto (mg/l) y pH. Además, en la primera campaña, se midió la profundidad y coordenadas planimétricas en un total de 168 puntos, información con la cual se trazó la batimetría del lago Budi.

En la primera campaña se realizaron en total tres transectas longitudinales: a) una desde Puerto Domínguez en dirección sur hasta el borde del lago (marcado amarillo en la Figura 1) b) una en dirección norte y que comprende parte del eje principal del lago (paralelo a la línea de costa) y el río Budi (marcado con rojo en Figura 1), c) uno en dirección oeste-este sobre la zona transversal (perpendicular a la línea de costa) de mayor extensión del lago (marcado negro en la Figura 1). La toma de datos físico-químicos se realizó en un total de 23 estaciones. La distribución espacial de éstas y las transectas realizadas se observan en la Figura 1.

En la segunda campaña se realizó una visita de reconocimiento a la desembocadura o boca Budi y una transecta desde la desembocadura del río Budi hasta el brazo sur del lago frente a Puerto Domínguez. El registro de perfiles físico-químicos se realizó en un total de 18 estaciones. La Figura 2 muestra el recorrido y las estaciones de medición.

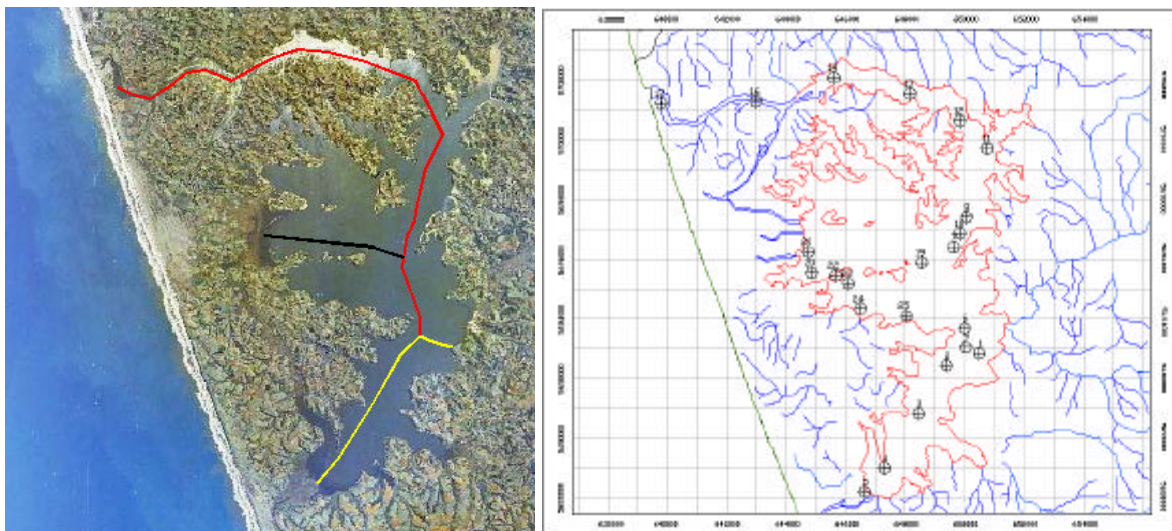


Figura 1: Transectas y estaciones usadas en la primera campaña de terreno.

3. MODELACIÓN TERMO-HIDRODINÁMICA

La termo-hidrodinámica del lago Budi se modeló mediante el programa DYRESM, el cual acoplado con el modelo ecológico CAEDYM permitió estudiar el comportamiento del oxígeno disuelto en el sistema.

DYRESM (Dynamic Reservoir Simulation Model) consiste en un modelo unidimensional, que predice la distribución vertical de la temperatura, salinidad y densidad en lagos en función del tiempo. El supuesto de unidimensionalidad implica que las variaciones verticales son mucho más significativas y representativas del comportamiento del lago, que aquellas que se desarrollan en el plano horizontal. Este supuesto es válido cuando las fuerzas desestabilizadoras del sistema no actúan durante periodos de tiempo demasiado prolongados. De ser así podrían ocurrir fenómenos que están directamente relacionados con variaciones horizontales importantes de las variables del flujo y que se refieren básicamente a la ocurrencia de surgencia o la generación de ondas superficiales o internas debidas a la fuerza de Coriolis.

El cuerpo de agua es modelado a través de una serie de capas horizontales y homogéneas pero de anchos variables. El espesor varía de acuerdo a la magnitud de los afluentes y efluentes, produciéndose una expansión o contracción de las capas en función de los cambios de volumen del sistema.

Los aspectos relacionados con la calidad de agua del lago Budi fueron estudiados mediante la aplicación del modelo ecológico CAEDYM acoplado al modelo hidrodinámico DYRESM. Este modelo permite modelar una gran cantidad de variables y parámetros de calidad de agua, para lo

cual requiere que estos posean una condición inicial y se consideren en los aportes al lago. En este trabajo el modelo se aplicó para estudiar el comportamiento del oxígeno disuelto en el sistema.

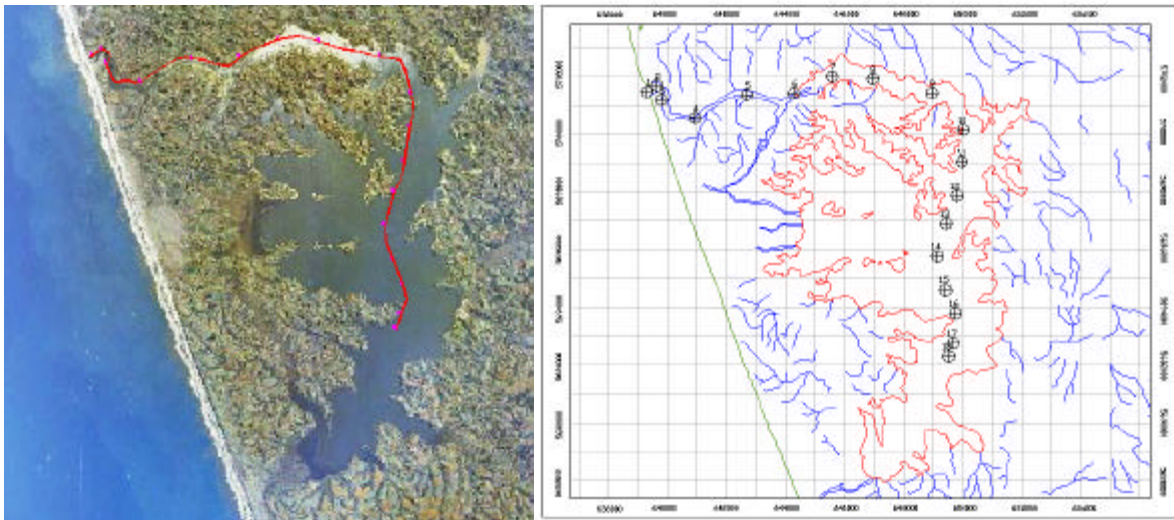


Figura 2: Transecta y estaciones usadas en la segunda campaña de terreno.

Tomando en cuenta la información disponible, se determinó que un periodo apropiado de modelación comprende los años 2001 hasta el 2004 y sería de tipo diaria. Para la implementación de este modelo se requiere de una gran cantidad de información de tipo meteorológica, hidrológica, morfológica y de calidad de aguas.

- a) Meteorología: La información meteorológica a nivel diario, requerida por el modelo es la siguiente: radiación de onda corta, radiación de onda larga, temperatura media del aire, presión de vapor media, velocidad media del viento y precipitación. Gran parte de esta información fue obtenida de los registros de la estación meteorológica de Puerto Saavedra perteneciente a la DGA ($38^{\circ}47'22''$ S, $73^{\circ}23'36''$ O) ubicada aproximadamente a 3 km de la boca Budi, esta estación es la más cercana al lago y por lo tanto, la más representativa de las condiciones meteorológicas del lugar.
- b) Hidrología : En el lago Budi no existe control sobre caudales afluentes o efluentes. Por lo tanto, fue necesario generar esta información. Para estimar los caudales de agua dulce se aplicaron dos procedimientos: el primero corresponde a un balance hídrico durante el periodo en que se conoce la información de niveles, esto es, desde febrero de 2002 hasta abril de 2004 (Figura 3); el segundo corresponde al método de la curva número, para obtener los valores correspondientes al resto del periodo de modelación propuesto, desde marzo de 2001 hasta enero de 2002.

Como se observa de la Figura 3, durante el mes de julio de 2003 existe un descenso abrupto en los niveles del lago, lo cual se asocia al dragado de la barra en la boca Budi. Por lo tanto, es posible despreciar los aportes de agua salada que ocurran mientras la barra permanece cerrada y considerar una entrada de agua salada una vez que se realiza el rompimiento de la barra. La dinámica considerada una vez que la barra se abre, es que se

produce primero el vaciamiento del lago, caracterizado por una gran salida de agua dulce y luego, cuando se ecualizan los niveles entre el lago y el mar, se efectúa un intercambio de agua dulce y salada, característico de un proceso de intrusión, lo que genera una entrada neta de agua salada al sistema.

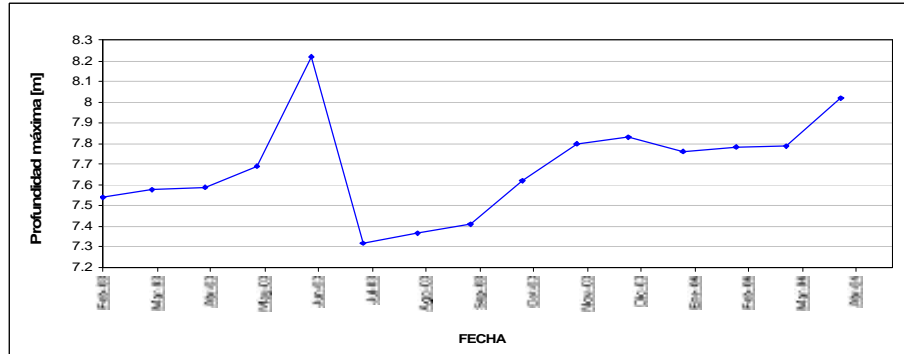


Figura 3: Niveles limnimétricos medidos en el lago Budi. Datos registrados por la DGA.

La cuantificación de los caudales de agua salada se realizó en base a la calibración del modelo DYRESM, imponiendo un afluente superficial con una alta concentración de salinidad posterior al mes en que se produce el rompimiento de la barra, tal que fuesen reproducidas las mediciones obtenidas durante la primera campaña realizada en noviembre de 2003.

- c) Morfología: La información recogida en la primera campaña de terreno permitió determinar la batimetría del lago Budi, a partir de lo cual se confeccionó la curva hipsométrica del lago.
- d) Calidad de aguas: Prácticamente no existe información de calidad de agua disponible en el lago Budi. Para aplicar el modelo DYRESM-CAEDYM se requiere conocer, por lo menos, algunos parámetros de calidad de los afluentes; entre éstos, la concentración de oxígeno disuelto, la de nutrientes esenciales de tipo orgánico e inorgánico y la concentración de fitoplancton. Para estimar estos parámetros en los afluentes al lago se realizaron simulaciones sucesivas hasta obtener un nivel eutrófico para los nutrientes inorgánicos esenciales y la clorofila a. Esta condición impuesta se justifica por antecedentes recogidos en las campañas de terreno, que dan cuenta de un acelerado proceso de eutrofización en el lago.

4. INTRUSIÓN SALINA EN EL RÍO BUDI

El estudio de intrusión salina en el río Budi se realizó mediante la aplicación de un modelo numérico unidimensional que permite estudiar el fenómeno de intrusión salina en estuarios bien mezclados (Niño, 1999). En particular, para este análisis, se introduce una modificación al modelo original, que incorpora el efecto sobre el estuario que impone la comunicación con el lago Budi.

El modelo utiliza como ecuaciones fundamentales las de Saint Venant para flujo unidimensional e impermanente (Chow et al., 1988), las cuales han sido modificadas para incorporar el efecto de la salinidad sobre el balance de momentum, utilizando para ello la aproximación de Boussinesq (Niño, 1999), resultando las ecuaciones (1) y (2).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (b Q^2 / A)}{\partial x} + g A (1 + f) \frac{\partial h}{\partial x} + g A S_f = -\frac{1}{2} g A H \frac{\partial f}{\partial x} \quad (2)$$

En las ecuaciones anteriores, Q denota el caudal, A el área de escurrimiento, h el nivel de la superficie libre, H la altura de escurrimiento, f el incremento relativo de densidad debido a la salinidad media en la sección, S_f la pendiente del plano de carga, b el coeficiente de Boussinesq, g la aceleración de gravedad, x la coordenada longitudinal y t el tiempo.

Además de las ecuaciones para el flujo, se utiliza (3) para calcular la variación de salinidad en el sistema, obtenida promediando en la sección de escurrimiento la ecuación de advección-difusión de salinidad (Niño, 1999). En esta expresión K denota el coeficiente de dispersión longitudinal de salinidad y f denota el incremento relativo de densidad por salinidad.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial f}{\partial x}) \quad (3)$$

La comunicación del estuario con el lago Budi, se modela mediante la aplicación del teorema de cantidad de movimiento en un volumen de control definido entre la sección de aguas arriba del estuario y una sección en el lago, y de la ecuación de continuidad sobre el lago (ver Figura 4). De esta manera, se obtienen las siguientes ecuaciones para el cálculo del caudal en la sección de entrada al estuario y la altura superficial del lago en función del tiempo.

$$\frac{dZ_L}{dt} = -\frac{Q_s}{A_0} \quad (4)$$

$$\text{Si } H_L \geq H_s \quad Q_s = B_s \sqrt{\frac{g h_s (H_L^2 - H_s^2)}{2}} \quad (5)$$

$$\text{Si } H_L < H_s \quad Q_s = B_s \sqrt{\frac{g h_s (H_s^2 - H_L^2)}{2}} \quad (6)$$

donde $H_L = Z_L - Z_F$, Z_L corresponde a la elevación de la superficie del lago, Z_F es la elevación del fondo, A_0 es el área superficial en el lago, la que se supone constante en profundidad, H_s es la altura de escurrimiento en la sección de entrada al estuario (sección de aguas arriba) y Q_s y W_s corresponden al caudal y ancho en dicha sección, respectivamente.

El modelo de conexión con el lago se basa en la hipótesis de que, al ingresar agua salada al sistema durante los periodos de llenante ($Q_s < 0$), se produce una corriente de densidad en el lago, de modo que ésta conduce dicha agua hacia la capa profunda. Por otro lado, durante los periodos de vaciante ($Q_s > 0$), se supone que sale agua dulce desde la capa superficial del lago, con salinidad igual a cero. El modelo resuelve acopladamente las ecuaciones de flujo usando un esquema implícito de diferencias finitas (Chow et al., 1988), en tanto que la ecuación de salinidad se resuelve explícitamente con un paso de tiempo más fino que el del flujo para lograr estabilidad de la solución numérica.

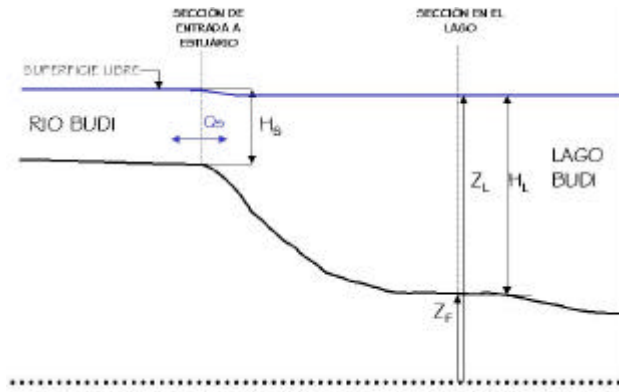


Figura 4: Variables del modelo unidimensional para modelar la comunicación entre el río y el lago Budi.

5. RESULTADOS

Las Figuras 5 y 6 presentan la variación de la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en función de la profundidad y la distancia horizontal obtenidos en las campañas de terreno. Como los perfiles registrados representan datos discretos los valores fueron interpolados linealmente. El valor de la salinidad para cada uno de los registros se determinó mediante el método de escala de salinidad práctica (Perkin and Lewis, 1978), el cual requiere conocer la temperatura, conductividad eléctrica y presión en el punto de medición. La Figura 5 muestra los resultados para el recorrido de la primera campaña (transecta 1) sobre el lago Budi (ver Figura 1).

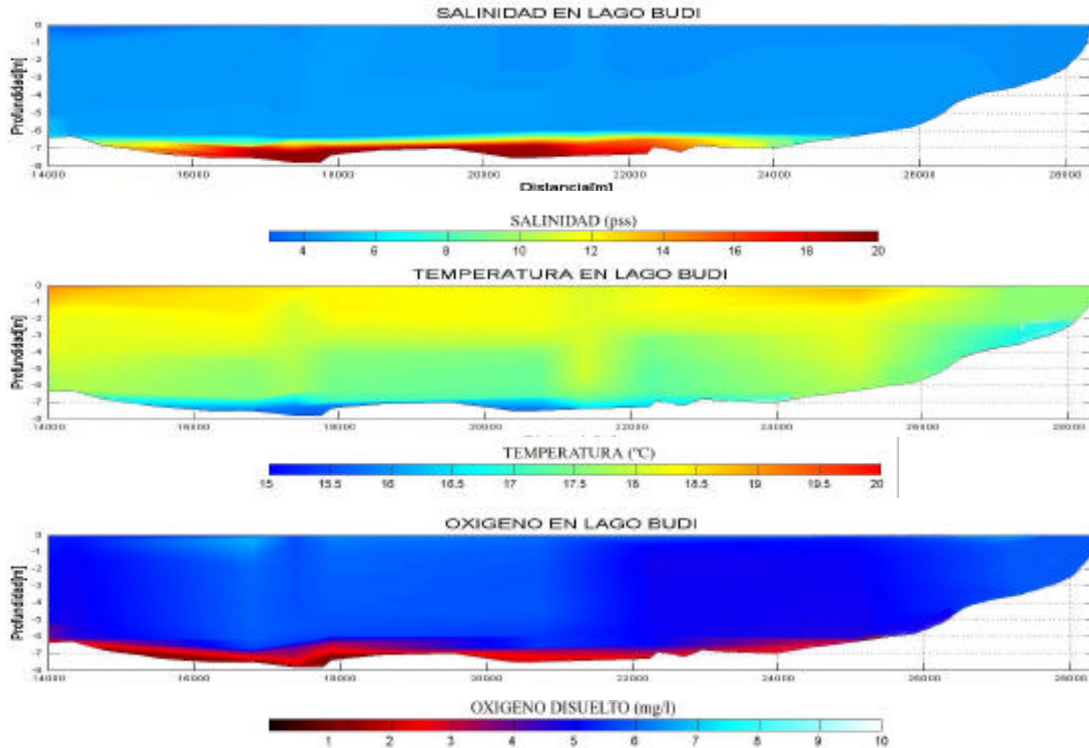


Figura 5: Salinidad, temperatura y oxígeno disuelto correspondiente a la transecta longitudinal 1 de la campaña 1.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos en la segunda campaña a lo largo del río Budi para la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto. Además de la ubicación planimétrica de las estaciones, se eligieron estos resultados debido a que en esta campaña se realizó un número superior de perfiles a lo largo del río y se abarcó la zona de la desembocadura o boca Budi.

El modelo DYRESM fue calibrado utilizando los registros de terreno. El procedimiento se basó en variar elementos forzantes, que tenían una influencia importante sobre el comportamiento hidrodinámico del sistema, con el objetivo de que el modelo reproduzca de forma precisa los datos registrados en la campaña 1. Los parámetros considerados fueron: magnitud del viento; coeficiente de extinción de luz; y volumen, concentración de sal y temperatura en el afluente salino. El resultado de este procedimiento de calibración indica que los valores y rangos impuestos sobre los parámetros forzantes considerados deben ser los indicados en la Tabla 1.

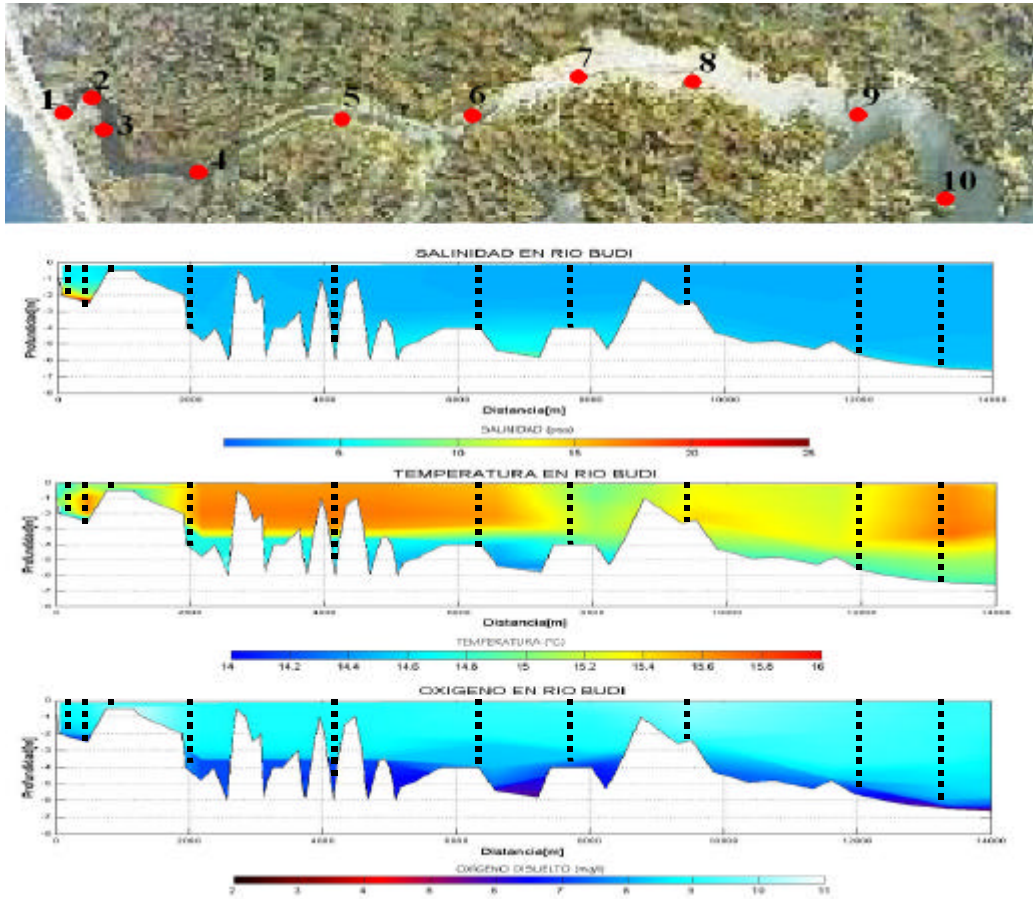


Figura 6: Salinidad, temperatura y oxígeno disuelto correspondiente a la transecta en el río Budi de la campaña 2.

Tabla 1: Valores impuestos sobre elementos forzantes

Meteorológicos		Caracterización de afluentes salinos			
Magnitud del Viento (m/s)	Coefficiente de extinción de luz (m^{-1})	Frecuencia y periodo	Volumen (hm^3)	Concentración de sal (pss)	Temperatura ($^{\circ}C$)
1-5.2	0.8	1 vez al año durante 30 días	25	24	Constante igual a $14^{\circ}C$

Para comparar los resultados modelados con los reales, se promediaron los perfiles registrados en las zonas más profundas del lago obteniéndose un perfil representativo de terreno. Para la modelación se promediaron los perfiles simulados correspondientes al mismo periodo en que se efectuó la campaña. Los resultados de la modelación hidrodinámica, correspondiente a las variables de temperatura, salinidad y densidad, y del oxígeno disuelto para el periodo comprendido entre los años 2001 hasta 2004 se presentan en las Figuras 7 y 8. Éstas consisten en perfiles verticales para cada una de las variables modeladas en función del tiempo. La Figura 9 muestra una comparación entre los perfiles modelados y los registrados en terreno, donde es posible observar el nivel de ajuste logrado mediante el procedimiento de calibración.

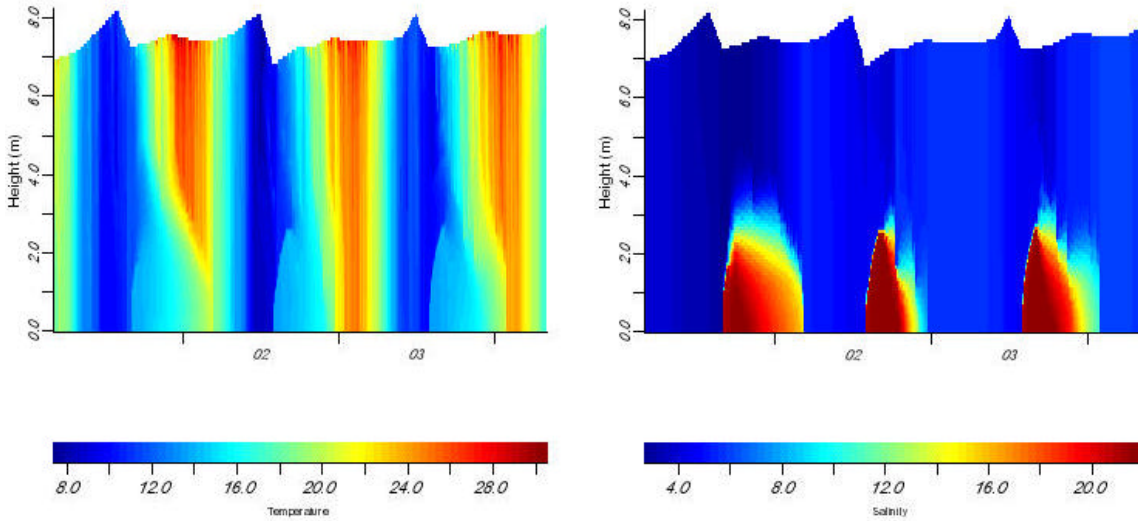


Figura 7: Perfiles de temperatura(°C) y salinidad (pss) en función del tiempo.

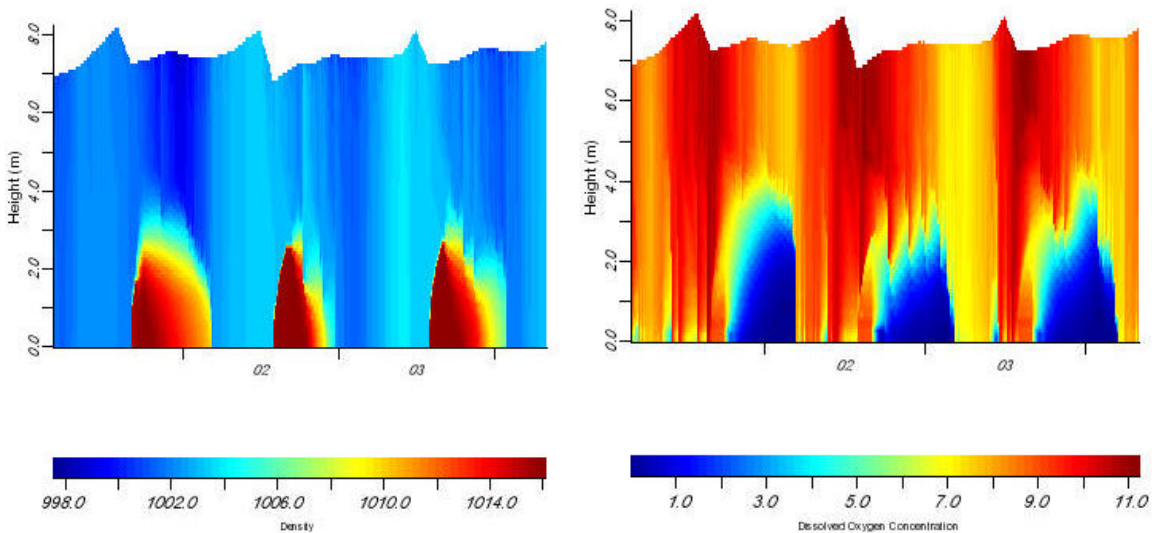


Figura 8: Perfiles de densidad (Kg/m³) y oxígeno disuelto (mg/l) en función del tiempo.

Los parámetros considerados para la modelación de la intrusión salina se presentan en la Tabla 2. La marea fue caracterizada a partir de datos estimados en la boca Budi. En cuanto a la discretización espacial y temporal, estos parámetros se fijaron en $\Delta x = 400$ m y $\Delta t = 50$ s. El tiempo total de modelación corresponde a 24.84 hr. Las Figuras 10, 11 y 12 muestran los resultados de la modelación para las series de tiempo correspondientes a la altura, flujo y salinidad en las siguientes secciones de control: sección de aguas arriba del estuario (entrada), sección de aguas abajo (desembocadura), sección intermedia definida en la mitad del estuario.

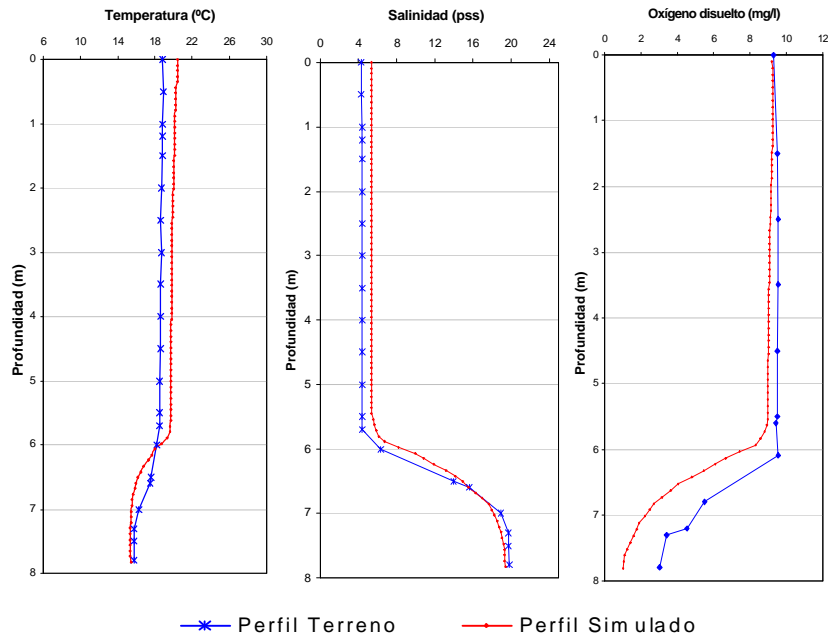


Figura 9: Perfiles de salinidad, temperatura y oxígeno disuelto simulados y representativos de terreno.

Tabla 2: Parámetros utilizados en la modelación

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Largo del estuario	L	12	[km]
Ancho medio	W	340	[m]
Pendiente media	i	0.2×10^{-4}	
Número de Manning	n	0.025	
Amplitud de marea	A	1	[m]
Periodo de marea	T	12.42	[hr]
Altura inicial de escurrimiento	d	4	[m]
Incremento relativo de densidad en agua de mar	ϕ	0.035	

6. DISCUSIÓN

Los resultados de las dos campañas de terreno mostraron que el lago Budi, en los sectores más profundos, presenta una fuerte estratificación por salinidad, conformada por una capa superior, donde los valores de salinidad son bajos y aproximadamente constantes (4 ‰), y una capa inferior que posee altas concentraciones, cercanas a los 20‰, valor que equivale a un 80% de la salinidad del agua de mar. La profundidad de la haloclina puede variar en función de los eventos de mezcla en el sistema. Es así como en la primera campaña de terreno, realizada entre el 19 y el 23 de noviembre de 2003, ésta se encontraba a 6 m y en la segunda campaña, realizada los días 27 y 28 de octubre de 2003, a 6.5 m desde la superficie. En cuanto a la estructura termal de la columna de agua, también se observó estratificación, aunque menos intensa, con una termoclina cuya posición coincide con la haloclina y que separa una capa superior de temperaturas aproximadamente constantes (18 a 19°C) de una capa inferior más fría, con valores de temperatura que bordean los 15°C. Con respecto al oxígeno disuelto, existe una curva clinógrada en las zonas estratificadas por salinidad y temperatura. El mínimo valor de oxígeno disuelto registrado en la capa de fondo fue de 0.8 mg/l (Figura 5).

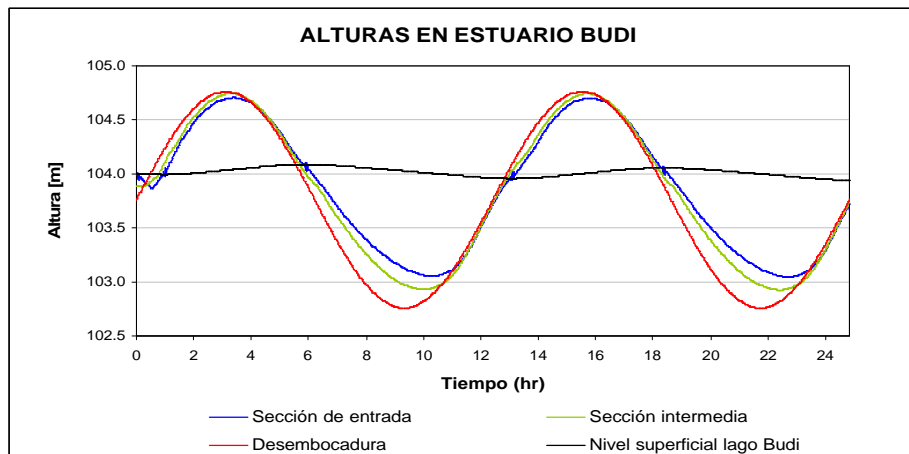


Figura 10: Variación temporal del nivel superficial en las distintas secciones de control.

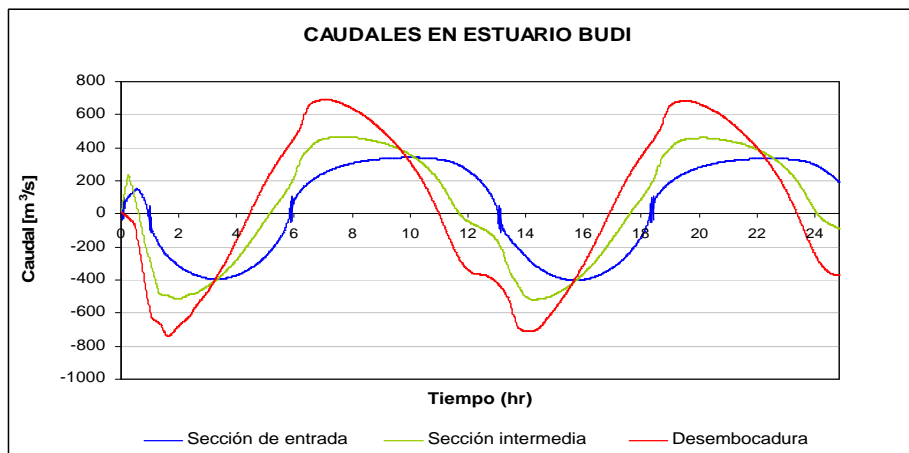


Figura 11: Variación temporal del caudal en las distintas secciones de control.

En el río Budi se observó una intensificación paulatina de la salinidad en función de la profundidad, sin la presencia de gradientes máximos. Es así como a pocos metros de profundidad las concentraciones de sal eran cercanas a 6 ‰, mientras los valores máximos medidos en la capa de fondo no superaron el 8 ‰. Al igual que en los sectores más profundos del lago, en algunos tramos del río más profundos las concentraciones de oxígeno disuelto son bastante bajas.

La modelación mediante DYRESM-CAEDYM logra reproducir de forma bastante precisa la estructura térmica, salina y de oxígeno disuelto observada en las campañas de terreno (Figura 9). En esta modelación fue aplicada la hipótesis de que la causa de la meromixis es de tipo ectogénica y, por lo tanto, se genera por la ocurrencia de intrusión salina en el río Budi una vez que se produce el rompimiento de la barra en la desembocadura, que de acuerdo a la información disponible se realiza una vez por año (Figura 3). Tal situación fue modelada por medio de un afluente superficial con una concentración de sal de 24 ‰ y un volumen constante por un periodo de 30 días, tiempo estimado para la duración de la intrusión salina en el sistema (Tabla 1).

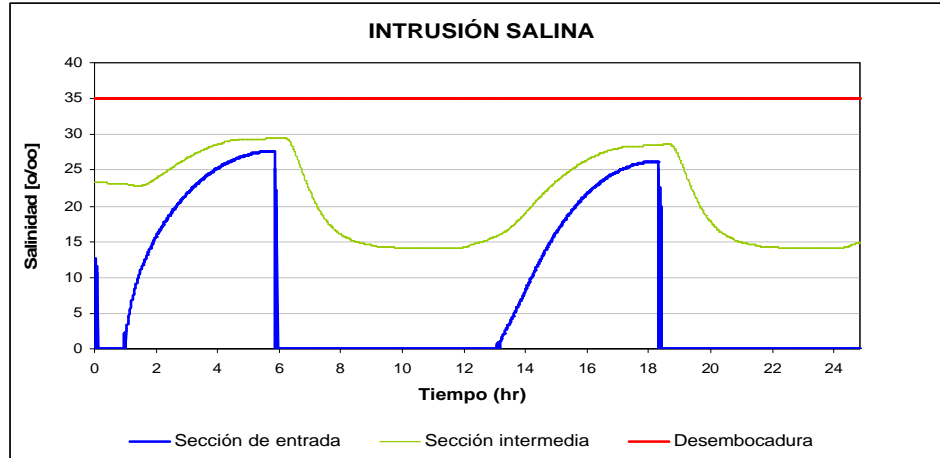


Figura12: Variación temporal de la salinidad en las distintas secciones de control.

Los resultados de la modelación muestran que estos afluentes, por su alta densidad, ocupan los sectores más profundos del lago, lo cual causa la estratificación por salinidad en dos capas, observada en terreno. Esto ocurriría por medio de la inmersión y desarrollo de una corriente de densidad. En el transcurso de este proceso, por la mezcla que ocurre en la interfaz de la corriente de densidad y el fluido ambiente, se incorporaría agua del lago al flujo, resultando en una disminución de su densidad y un aumento en el volumen depositado finalmente en el fondo del lago. El modelo reproduce este proceso, lo cual se verifica esencialmente por la disminución en los valores de salinidad modelados en la capa inferior, cercanos a 20 ‰, con respecto al valor impuesto en los afluentes salinos. La modelación muestra que la meromixis no sería permanente sino que existiría suficiente energía proveniente del viento capaz de mezclar la totalidad de la columna de agua. Sin embargo, la estratificación causada por los afluentes salinos podría mantenerse por más de 5 meses. Durante este periodo, es inminente la formación de las tres capas características de la meromixis donde la haloclina permanece a una altura desde el fondo de aproximadamente 2 m. En este periodo ocurre también el rápido descenso de los niveles de oxígeno en la capa de fondo, situación que se mantiene durante todo el periodo de estratificación por la inhibición de la mezcla que imponen los fuertes gradientes de densidad.

Al comenzar la primavera los estratos superficiales aumentan su temperatura pero los gradientes impiden el transporte de calor hacia las capas más profundas, se produce entonces la estratificación termal con una termoclina alojada a la misma altura que la haloclina. Durante el periodo de estratificación, después de ocurrida la intrusión salina, los gradientes se van debilitando a causa de la mezcla provocada por el viento y los aportes de agua dulce. Hasta que son suficientemente bajos como para que un evento de mezcla produzca halomixis y la reoxigenación de las capas inferiores.

Con respecto a la aplicación del modelo 1D, los resultados indican que la extensión de la intrusión salina varía en función de las mareas, cuyos efectos advectivos logran tener una mayor influencia sobre el transporte de salinidad. La intrusión salina se extendería por más de 12 km, alcanzando a esa distancia un valor máximo de salinidad cercano a los 26 ‰ al final del periodo de llenante, muy cercano al valor impuesto sobre los afluentes salinos en la modelación hidrodinámica, igual a 24‰ (Figura 12). El modelo predice además que los niveles en el lago se ven influenciados por el efecto de las mareas con una amplitud aproximada de 0.2 m y un desfase

de 1.5 hr (Figura 10), en tanto que los caudales medios a lo largo del estuario son del orden de los 500 m³/s (Figura 11).

7. CONCLUSIONES

En el modelo 1D fue posible, por medio de condiciones de borde, implementar la hipótesis de que la entrada de agua salada al lago se realiza mediante una corriente de densidad durante los periodos de llenante, mientras que durante las vaciantes se produce la salida de agua dulce desde el lago. Este modelo se complementa con DYRESM, de cuyos resultados es posible inferir efectivamente la ocurrencia de corrientes de densidad al interior del lago Budi. Por medio de la aplicación de ambos modelos se logra explicar la dinámica de cómo ocurriría la intrusión salina en el sistema. En el caso del lago Budi, las diferencias de densidad, que regulan la estratificación del sistema, dependen fundamentalmente de los gradientes de salinidad. Estos condicionan la estructura térmica del sistema, al imponer una zona de máxima resistencia a la mezcla que impide el calentamiento de las capas más profundas durante el periodo de estratificación. A su vez, hace que se mantenga la anoxia en las capas de fondo debido a que inhibe la mezcla y por tanto, la reoxigenación del sistema. Una mejor comprensión del funcionamiento de este sistema y un análisis de alternativas de remediación del mismo requiere mayor información de terreno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el Proyecto Fondecyt 1040494, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas y el Centro de Ecología Aplicada.

REFERENCIAS

- Australian Government, (2001). Página web. <http://www.ozesrtuaries.org>. Sección hidrología y transporte de sedimento.
- Chow et al. (1988). “Applied Hydrology”. Mc Graw Hill.
- Niño, (1999). “Modelación de la intrusión salina en estuarios bien mezclados”. Memorias del XV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Peña et al. (2004). “Estimación del Balance Hídrico en la cuenca del río Budi, sector Romopulli. Una base para determinar su comportamiento ambiental”.
- Perkin y Lewis (1980). “The Practical Salinity Scale 1978: Fitting the Data”.
- Ranasinghe et al. (1999). “The seasonal closure of tidal inlets: Wilson Inlet”. The University of Western Australia. Department of Environmental Engineering.
- Stuardo (1980). “Caracterización general del lago Budi: una laguna costera salobre de Chile Central” Universidad de Concepción, Dpto. Oceanología. Cienc. y Tec. Del Mar.
- Wetzel, (1981). “Limnología”, 71-75 p.