



EJEMPLOS DE LA INTERACCIÓN ENTRE PROCESOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS APLICADOS AL EMBALSE RAPEL

ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER Y YARKO NIÑO CAMPOS

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Av. Blanco Encalada 2120, 4to. piso. Santiago, Chile.

Teléfono: 678-4400; Fax: 689-4171

e-mail: beto@esfera.cl; ynino@ing.uchile.cl

RESUMEN

Se presentan y discuten dos ejemplos basados en resultados de la simulación del comportamiento hidrodinámico y ecológico del Embalse Rapel, que ilustran la interacción que existe entre los procesos biológicos, químicos y físicos al interior de este embalse. En el primer ejemplo se analiza la influencia que tienen los parámetros físicos, como la temperatura y el tiempo de retención, en el comportamiento del fitoplancton en el sistema. Se concluye que las diferencias observadas de abundancia entre cada una de las cubetas del embalse Rapel se deben principalmente a diferencias en el tiempo de retención, dado que las condiciones químicas, representadas a través de las constantes cinéticas del fitoplancton, son similares en las tres cubetas. También se concluye que la temperatura en el embalse es la variable que determina la época del año en que crecen o mueren las algas. En el segundo ejemplo se analiza la influencia de la abundancia de fitoplancton sobre la estructura térmica de la columna de agua en la cubeta Alhué, concluyéndose que la presencia de fitoplancton aumenta la turbiedad del agua evitando que la energía solar penetre a capas más profundas, produciendo un gradiente de temperatura en la columna que no se generaría si no se considerara el efecto reductor del fitoplancton sobre la transparencia de la columna de agua.

ABSTRACT

Two examples, based on the hydrodynamic and ecological modeling of Rapel reservoir, illustrating the interactions among biological, chemical and physical processes occurring within the reservoir, are presented and discussed. In the first example, the influence of physical parameters, such as temperature and retention time, on the behavior of the phytoplankton in the system is analyzed. It is shown that the differences in algae concentration observed within the 3 basins of the reservoir are caused mainly by differences in retention time, since chemical conditions, represented by the kinetic constants of the phytoplankton, remain homogeneous throughout the reservoir. It is also concluded that temperature is the main parameter controlling the time of year when the phytoplankton grows or decays. In the second example, the effect of phytoplankton concentration on the temperature structure of the water column in Alhué basin is studied. It is concluded that the presence of phytoplankton increases the turbidity of the water column, precluding the penetration of short wave radiation to deeper waters and creating high temperature gradients near the free surface that wouldn't occur without the presence of the phytoplankton that reduces the transparency of the water.



EJEMPLOS DE LA INTERACCIÓN ENTRE PROCESOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS APLICADOS AL EMBALSE RAPEL

1 Introducción y Objetivos

1.1 Motivación

Al interior de un cuerpo de agua dulce o salada es posible identificar procesos que usualmente son considerados puramente químicos, biológicos o físicos, sin embargo el estudio y la comprensión del comportamiento del sistema ambiental necesariamente debe integrar el conjunto de estas áreas.

Por ejemplo, si se analiza la concentración de un compuesto que se encuentra diluido en un volumen de fluido, es posible demostrar que ella depende de dos factores principales: las constantes cinéticas de las reacciones químicas y biológicas que dicho compuesto puede experimentar y el tiempo de retención del fluido dentro del volumen de control. El primer factor da cuenta de la tasa a la cual ocurren los cambios internos de la concentración del compuesto al interior del volumen de control, mientras que el segundo se relaciona con la tasa a la cual ingresa el compuesto al volumen de control, en caso que la concentración afluente sea mayor que al interior del volumen de control, o la capacidad de dilución de los afluentes, en caso contrario.

Una aplicación de estas ideas se presenta en la ecuación 1, la cual se deriva a partir de plantear la ecuación de continuidad de la materia para un elemento al interior de un volumen de control, V , donde este elemento reacciona siguiendo una relación de primer orden con constante cinética K , que puede ser positiva o negativa. Además, se supone que al volumen de control ingresa un caudal, Q , y que la concentración del elemento en este afluente es nula. El cociente entre V y Q se define como el tiempo de retención θ .

$$C(t) = C_0 \cdot \exp\left(\left(K - \frac{1}{\theta}\right) \cdot t\right) \quad (1)$$

En un lago o embalse, esta expresión puede representar la concentración de un grupo de algas, las cuales se reproducen o mueren en función de las condiciones químicas en el cuerpo de agua, nutrientes por ejemplo, de las condiciones biológicas, como la presencia de zooplancton, y de las condiciones físicas como la luz y temperatura. Además, la concentración depende directamente del tiempo de retención del sistema que también da cuenta de las condiciones físicas en el cuerpo de agua.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar dos casos que muestren la interacción que existe entre procesos químicos, biológicos y físicos que ocurren al interior del embalse Rapel y las implicancias que tienen en el comportamiento de este embalse. Los casos a analizar son: relación entre el crecimiento de algas del tipo clorofíceas y el tiempo de retención (primer ejemplo) y relación entre la abundancia de clorofíceas y la distribución espacial de la temperatura en la cubeta Alhué (segundo ejemplo).



El análisis se realiza utilizando los resultados obtenidos de modelar la calidad del agua en cada una de las tres cubetas de este embalse durante el período comprendido entre Enero de 1991 y Marzo de 1992, utilizando como herramientas de análisis los modelos DYRESM y CAEDYM desarrollados en la University of Western Australia (www.cwr.uwa.edu.au).

2 Antecedentes

El embalse Rapel (34° S, 71° W) fue construido en el año 1968 por Endesa con fines de generación eléctrica. Debido a su morfología, el embalse puede subdividirse en tres cubetas: Alhué, con profundidades máximas de 17 m y un volumen aproximado de 120 Hm³, Las Balsas, con profundidades máximas de 24 m y un volumen de 210 Hm³ y Muro, que nace de la confluencia de las dos cubetas anteriores, donde se alcanzan las máximas profundidades del lago. El volumen aproximado de esta cubeta es de 340 Hm³. Los principales tributarios son los ríos Cachapoal y Tinguiririca y el estero Alhué. Los dos primeros alimentan al sector Las Balsas. El río Cachapoal tiene caudales medios mensuales de 180 m³/s en julio y 120 m³/s en diciembre y el río Tinguiririca de 100 m³/s en julio y 40 m³/s en diciembre. El estero Alhué, que alimenta a la cubeta Alhué, muestra un régimen principalmente pluvial, con caudales medios mensuales mucho más pequeños que los de los otros dos afluentes y con un máximo de 19 m³/s en el mes de julio.

Sin considerar alguna interacción de caudales entre las cubetas, se define el tiempo de retención para los caudales máximos mencionados para cada una de las cubetas, siendo este igual a 73 días, 8.7 días y 13.2 días, para las cubetas Alhué, las Balsas y Muro, respectivamente.

La información disponible para el estudio es la misma descrita en Niño et al. (2001). Mayores antecedentes se presentan en de la Fuente (2003) y Ahumada (2000).

3 Metodología

3.1 Modelos DYRESM – CAEDYM

Para realizar las modelaciones de la calidad del agua en el embalse Rapel, se utilizaron los modelos DYRESM y CAEDYM del Centre for Water Research, University of Western Australia que, considerando homogeneidad en la áreas horizontales, calculan perfiles verticales de diversos parámetros tales como: temperatura, salinidad, nutrientes, oxígeno disuelto, fitoplancton. etc.

El modelo DYRESM es un modelo que resuelve perfiles de densidad, por lo tanto de temperatura y salinidad, en cuerpos de agua dulce o salada, considerando los procesos de intercambio de calor atmosférico, mezcla inducida por afluentes, efluentes y el viento. En este estudio se analizan los cambios del coeficiente de extinción de luz, que determina cuanta energía solar penetra a capas más profundas del embalse, en función de la abundancia de fitoplancton en el sistema.

En cambio, CAEDYM, corresponde al módulo de calidad del agua del modelo DYRESM, que, para determinar la evolución de la concentración de un parámetro representativo de la calidad del agua, utiliza ecuaciones, generalmente de primer orden, que permiten determinar las tasas a la cual reaccionan estos parámetros, tasas que en



general dependen de la concentración de otros parámetros de calidad del agua del sistema. En función de estas tasas y los aportes de los caudales, se calcula la evolución de la concentración en función del tiempo.

Para la evolución temporal del fitoplancton se consideran solo dos procesos: el crecimiento y la muerte. Ambos procesos se expresan mediante una cinética de primer orden, siendo las constantes representativas de estos procesos dependientes, para estas modelaciones, de la temperatura, la salinidad, luminosidad, y las concentraciones de nitrógeno, fósforo y sílice. El crecimiento se modela mediante la Ecuación 2:

$$\frac{\partial(\text{ChlA})}{\partial t} = \left(a^{\max} \cdot \text{MIN}(f(I), f(\text{Si}), f(\text{P}), f(\text{N})) \cdot f(T) - k_r \cdot e^{T-20} \cdot f(S) \right) \cdot \text{ChlA} \quad (2)$$

donde el crecimiento de los microorganismos se representa en función de una tasa máxima, castigada por las limitaciones de luz ($f(I)$), nutrientes ($f(N)$, $f(P)$ y $f(\text{Si})$) y temperatura ($f(T)$). La muerte de microorganismos se representa como una tasa estándar ponderada por una función dependiente de la temperatura y otra de la salinidad para distinguir entre microorganismos de agua dulce y salada.

3.2 Simulaciones

Para el análisis tanto de la relación entre el tiempo de retención y el fitoplancton (primer ejemplo) como de los perfiles de temperatura en función de la concentración de fitoplancton (segundo ejemplo), se modeló la calidad del agua en cada una de las cubetas del embalse Rapel utilizando el método de separación de cubetas descrito en de la Fuente (2003). Para ello se consideraron las concentraciones de nutrientes afluentes a cada una de las cubetas como parámetros a calibrar del modelo dado que no se cuenta con dicha información para el periodo de modelación. Los parámetros de salida del modelo son la abundancia de clorofíceas en términos de concentraciones de Clorofila A.

Para el primer ejemplo, relación entre el tiempo de retención y abundancia de fitoplancton, se utilizan las concentraciones de clorofíceas superficiales modeladas y conociendo las concentraciones de nutrientes, condiciones de luz, etc., es posible calcular las constantes cinéticas de reacción, analizando cuál parámetro es el de mayor relevancia para estas algas, y además, al comparar estas constantes con el inverso del tiempo de retención, se cuantifica la relación que existe entre esos dos parámetros, el primero considerado como biológico, mientras que el segundo representa el sistema físico.

Para el segundo ejemplo, se comparan los resultados de la modelación de la temperatura de la cubeta Alhué obtenidos primero considerando un coeficiente de extinción de luz constante (usando solamente DYRESM con ese fin) y luego un coeficiente de extinción de luz dependiente de la concentración de fitoplancton existente en el sistema (para lo cual es necesario usar acopladamente DYRESM y CAEDYM).



4 Resultados

4.1 Primer Ejemplo

La Figura 1 compara los resultados de las simulaciones con las mediciones realizadas en terreno (Vila et al. 1997,2000) de concentraciones de clorofila A de clorofíceas para cada una de las cubetas. Las Figuras 2, 3 y 4 muestran los valores superficiales modelados de la temperatura, fósforo (PO_4) y nitrógeno ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$), respectivamente, junto con el factor limitante asociado. Finalmente, la Figura 5 muestra el mínimo entre los factores asociados a los nutrientes. De esta última figura, el porcentaje del tiempo durante el cual fue limitante el fósforo corresponde a 85%, 68% y 41% para las Balsas, Alhué y Muro, respectivamente.

La Figura 6 Compara el inverso del tiempo de retención con la constante cinética del crecimiento de los microorganismos para cada una de las cubetas.

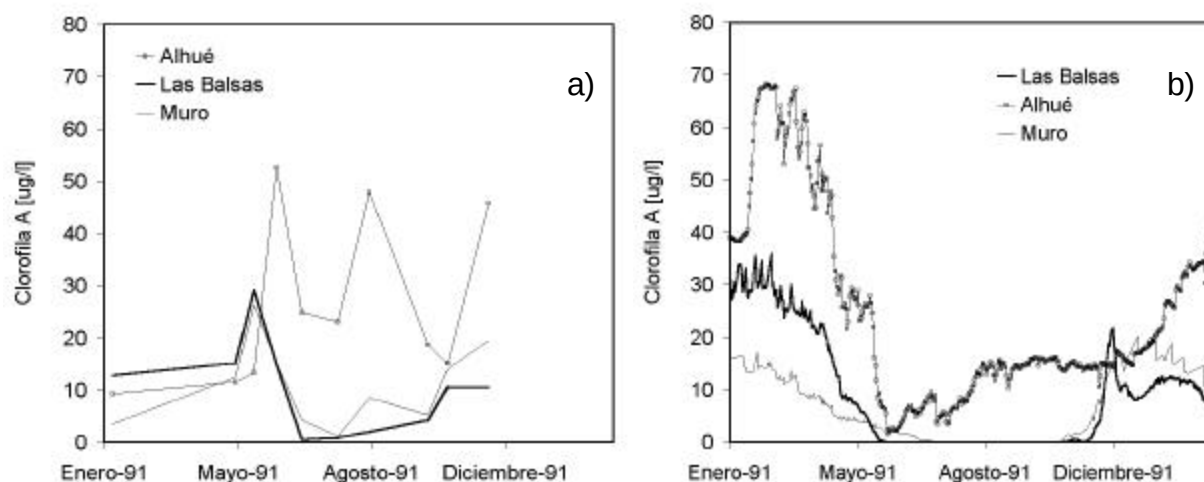


Figura 1: Clorofila A Superficial a) Medida y b) Simulada.

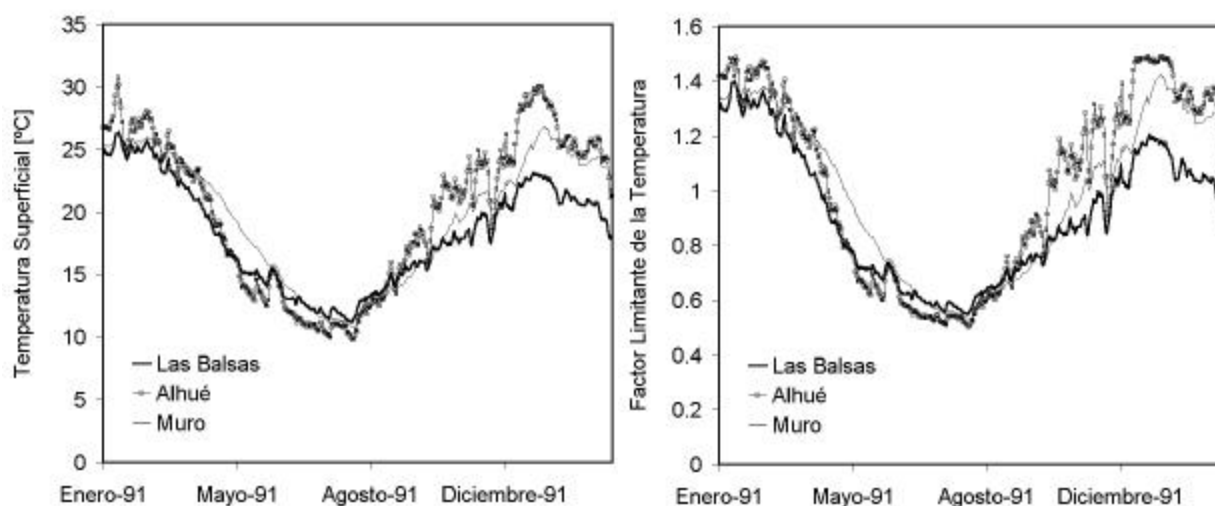


Figura 2: Temperatura Superficial Modelada y Factor Limitante Asociado

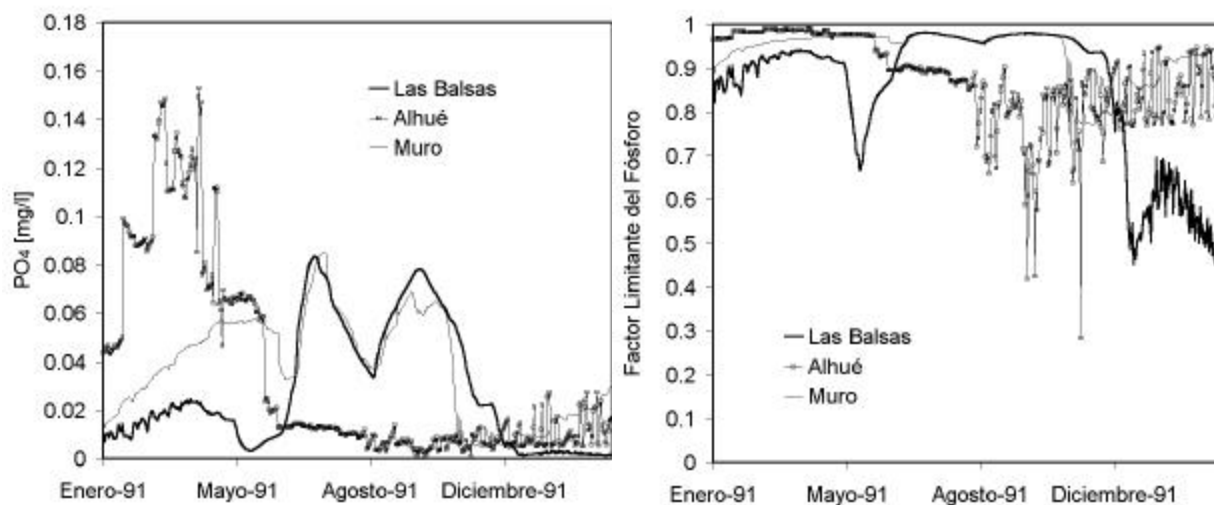


Figura 3: Fósforo Superficial Modelado y Factor Limitante Asociado

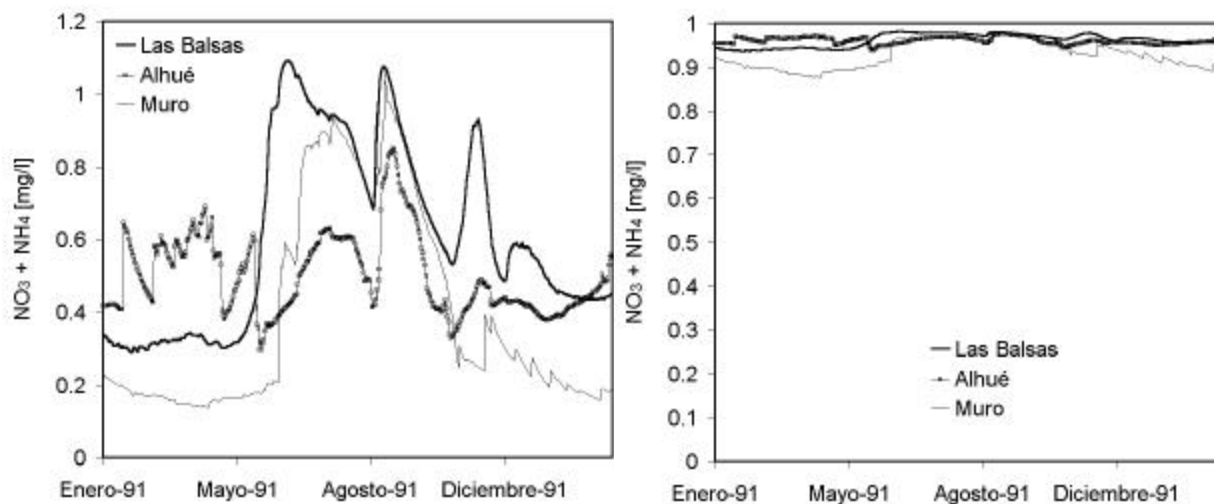


Figura 4: Nitrógeno Superficial Modelado y Factor Limitante Asociado.

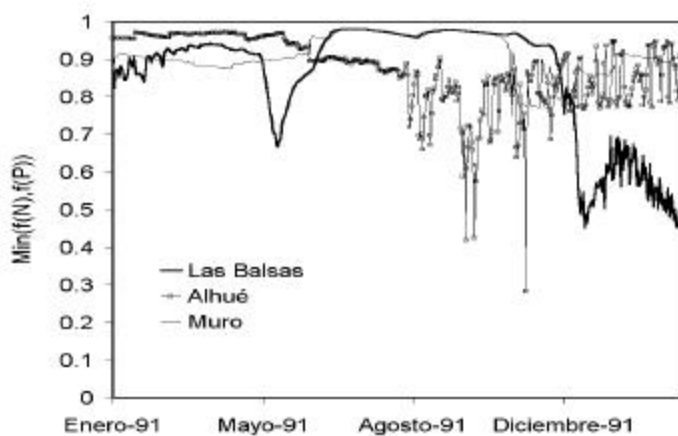


Figura 5: Mínimo entre el Factor Limitante del Fósforo y del Nitrógeno.

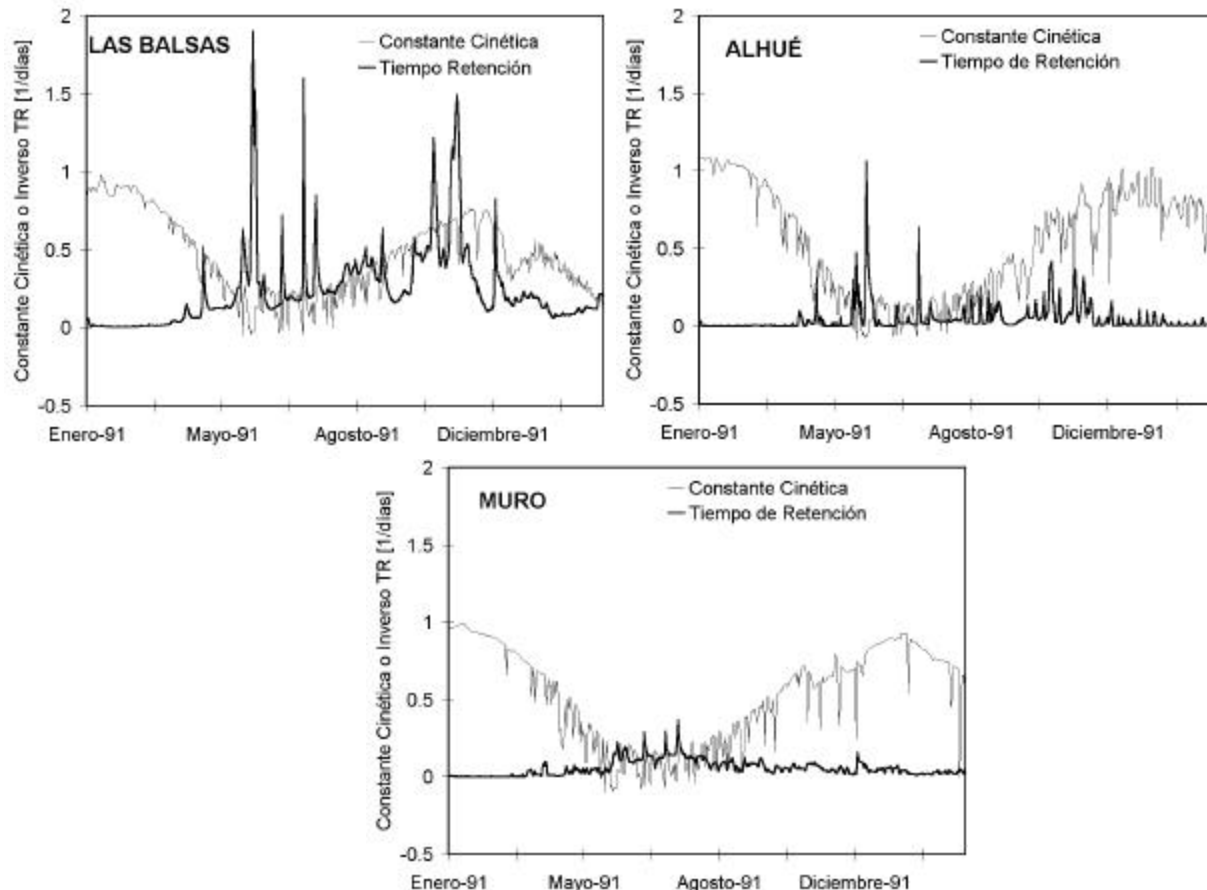


Figura 6: Comparación entre Constante Cinética e inverso del Tiempo de Retención.

4.2 Segundo Ejemplo

La Figura 7 compara los resultados de la temperatura en la cubeta Alhué para las modelaciones sin considerar la presencia de microorganismos (Izquierda) y aquella que los considera (derecha). La Figura 8 muestra la concentración de clorofila A total en esta cubeta y la Figura 9 muestra el valor del coeficiente de extinción de luz resultante de las modelaciones de calidad de agua, cabe mencionar que en las modelaciones considerando solo aspectos físicos, este coeficiente se consideró constante igual a 0.25 [1/m]. En ambas simulaciones se consideró que el agua sale de la cubeta por el fondo.

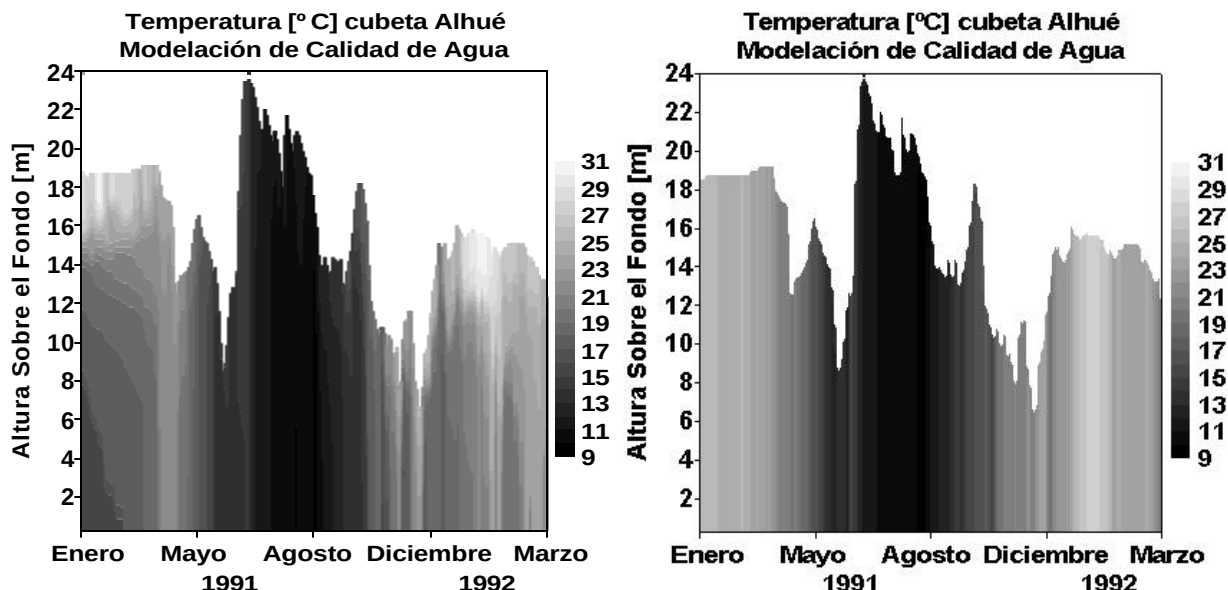


Figura 7: Temperatura del Agua Cubeta Alhué. A la izquierda cálculo sin considerar efecto del fitoplancton en el coeficiente de extinción de luz. A la derecha cálculo considerando dicho efecto.

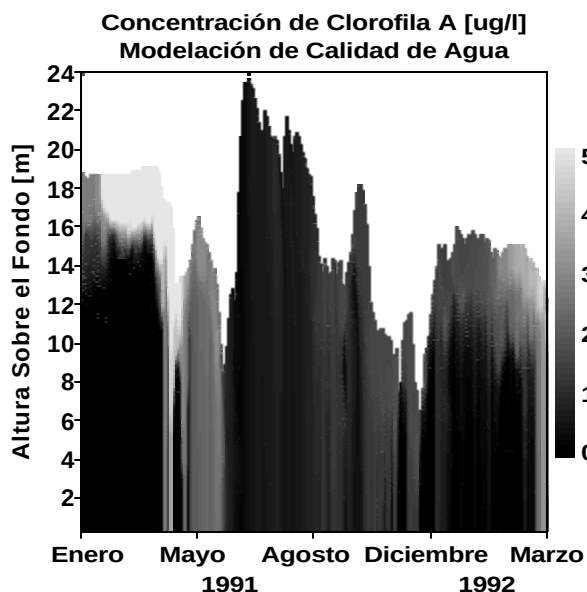


Figura 8: Fitoplancton cubeta Alhué.

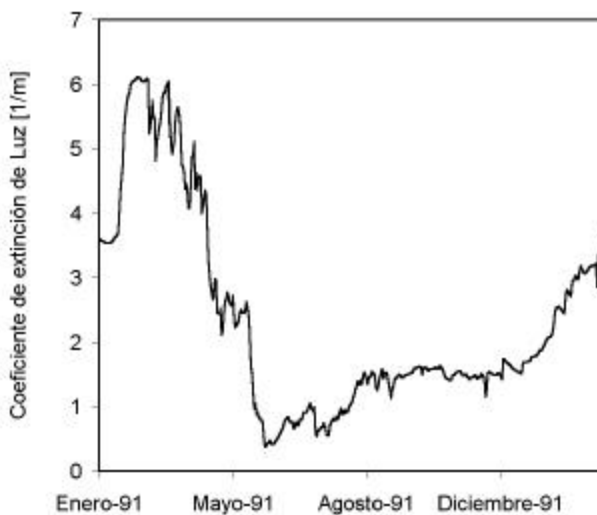


Figura 9: Coeficiente de Extinción de luz

5 Análisis de Resultados y Conclusiones

En el análisis de los resultados que se presenta a continuación, no se consideran aquellos previos a otoño de 1991, dado que en ese período los resultados se encuentran sesgados por las condiciones iniciales impuestas para la simulación.

Un segundo punto a considerar es que las limitaciones debidas a la luz no son consideradas en el análisis porque se comparan resultados superficiales, y las condiciones de irradiación solar en la superficie son iguales para las tres cubetas.



5.1 Validación de los Resultados

Al comparar las mediciones realizadas en terreno con los resultados obtenidos de las modelaciones se aprecia que estos últimos se asemejan a la realidad, tanto en órdenes de magnitud como en tendencias. Si bien para la cubeta Alhué las modelaciones se encuentran algo alejadas de las mediciones, en órdenes de magnitud los resultados del modelo se asemejan y se representa el hecho que este indicador se mantiene alto durante todo el período. Por ejemplo, las modelaciones indican que la cubeta Alhué es aquella en la que se registran los mayores valores de clorofila A, alcanzando máximos de 30 $\mu\text{g/l}$ para el verano de 1992, con un valor medio cercano a 20 $\mu\text{g/l}$. Las mediciones, en tanto, registran concentraciones que oscilan entre los 50 y 10 $\mu\text{g/l}$ y se mantienen altas durante todo el año. Por otro lado, tanto para el Muro como para las Balsas los resultados de las modelaciones tienen un buen ajuste con las mediciones, registrándose bajas para los meses invernales, alcanzando valores casi nulos, y aumentos en verano, alcanzando, tanto para las mediciones como para las modelaciones, valores cercanos a 10 $\mu\text{g/l}$.

5.2 Influencia del Tiempo de Retención en el Crecimiento de los Microorganismos

Al analizar temporalmente las concentraciones de microorganismos en el agua, se aprecia que existen diferencias entre las estaciones del año, disminuyendo las concentraciones en invierno, cuando las temperaturas son menores y los caudales mayores, y aumentando en verano, cuando la temperatura aumenta también y los caudales afluentes disminuyen. La periodicidad anterior no es tan clara para los nutrientes, los que se mantienen relativamente constantes durante el año.

Teniendo en cuenta la información proporcionada acerca de los nutrientes se concluye que el nitrógeno no es un factor que influya de sobremanera en el crecimiento de los microorganismos, sino que el fósforo es el de mayor importancia. Si bien los porcentajes del tiempo en que es más limitante este último nutriente indican que el nitrógeno si es un limitante al crecimiento de las algas, esta dependencia ocurre principalmente en los meses de invierno, época para la cual la limitación de los nutrientes es despreciable en comparación con la de la temperatura. Los bajos niveles de nutrientes registrados en verano de 1992 responden a que en esta época los nutrientes fueron consumidos por los microorganismos.

Integrando el comportamiento descrito anteriormente, se concluye que los factores que explican de mejor manera el comportamiento del fitoplancton en cada una de las cubetas de este embalse son la temperatura y el tiempo de retención, no así los nutrientes:

- La temperatura corresponde al parámetro que determina la época del año en que se dan las mejores condiciones para un buen crecimiento de las algas. Este punto se aprecia al comparar los valores de las constantes cinéticas de cada una de las cubetas, las variaciones de este valor se descomponen en una serie periódica debida a la temperatura, y perturbaciones diarias debidas a los nutrientes, donde estas últimas, al ser diarias, no son determinantes en el crecimiento del fitoplancton.

- Comparando el valor de las constantes cinéticas entre las cubetas se aprecia que no existen mayores diferencias entre éstas, por lo tanto, las diferencias entre las



concentraciones de algas entre cada uno de estos subsistemas se debe al tiempo de retención. Dado que la cubeta Alhué presenta los mayores tiempos de retención, los procesos internos que ocurren en ella son de mayor importancia, por lo tanto, de acuerdo al resultado expresado en la Ecuación 1, las tasas de crecimiento neto de las algas son mayores que en las otras cubetas. Para las otras dos cubetas el escenario es opuesto, es decir, menores tiempos de retención se traducen en menores tasa netas de crecimiento de los microorganismos.

5.3 Influencia de la Abundancia de Microorganismos en los Perfiles de Temperatura

Algunos perfiles de temperatura obtenidos de la modelación considerando la influencia de la concentración de fitoplancton sobre el coeficiente de extinción de luz se contrastan con mediciones realizadas en el embalse en la Figura 10. De ésta se aprecia que el modelo predice una variación vertical de temperatura en el embalse cercana a aquella observada en el embalse (Vila et al. 1997,2000).

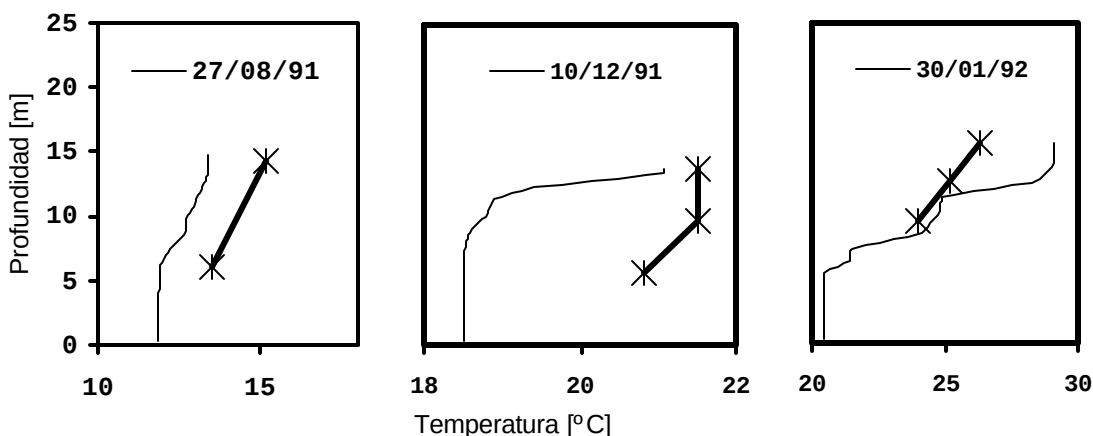


Figura 10: Comparación entre Perfiles Modelados (línea continua) y Medidos (línea con asteriscos).

Los resultados obtenidos a partir de la modelación exclusiva de la física del embalse indican que en la cubeta Alhué no habría diferencias de temperatura en la vertical, en cambio, al considerar la presencia de microorganismos, dicho comportamiento cambia de manera tal que se desarrolla una cierta estratificación térmica a poca profundidad bajo la superficie libre, lo cual es validado por las mediciones mostradas en la Fig. 10.

La región superficial donde se alcanzan las mayores temperaturas corresponde también a la zona donde se produce el mayor crecimiento de los microorganismos, por lo tanto se plantea que la presencia de éstos aumenta la turbiedad del agua, impidiendo que la energía solar penetre a zonas más profundas de esta cubeta. La atenuación de la energía solar que penetra la columna de agua con la profundidad se expresa exponencialmente y queda controlada por el coeficiente de extinción de luz. En la modelación del problema físico se consideró que este coeficiente tiene un valor constante igual a 0.25 [1/m], pero en las modelaciones que incorporan el efecto de la concentración de fitoplancton en dicho coeficiente, este valor es en promedio igual a 2.



La profundidad para la cual se alcanza una atenuación del 90 % para uno y otro caso es igual a 9.2 m y 1.2 m, respectivamente. El que el gradiente de temperatura que se genera a partir de la presencia de los microorganismos se mantenga en el tiempo, permite establecer que los agentes que entregan energía al sistema, viento y afluentes principalmente, no son lo suficientemente intensos como para homogenizar las condiciones físicas en la columna de agua.

6 Conclusiones y Comentarios Finales

En este trabajo se estudian dos ejemplos que muestran la interacción que existe entre los procesos biológicos, químicos y físicos que ocurren al interior del embalse Rapel. Mediante el primer ejemplo se analizó la influencia que tienen los parámetros físicos, como la temperatura y el tiempo de retención, en el comportamiento del fitoplancton. Se plantea que las diferencias que ocurren entre cada una de las cubetas del embalse se deben a diferencias en el tiempo de retención principalmente, dado que las condiciones químicas, analizadas a través de las constantes cinéticas del fitoplancton, son similares en los tres subsistemas. También se plantea que la temperatura en el embalse es la variable que determina la época del año en que crecen o mueren los microorganismos. En el segundo ejemplo, influencia de la abundancia de fitoplancton en los perfiles de temperatura, se determinó que la presencia de fitoplancton en la cubeta Alhué aumenta la turbiedad del agua evitando que la energía solar penetre a capas más profundas, produciendo un gradiente de temperatura en la columna que no se generaría si no se considerara el efecto reductor del fitoplancton sobre la transparencia de la columna de agua.

7 Agradecimientos

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

8 Referencias

Ahumada, C. (2000). Diagnóstico de la calidad de agua del Embalse Rapel y propuesta de vigilancia y monitoreo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

de la Fuente, A. (2003). Modelación Hidrodinámica del sistema ambiental del Embalse Rapel. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Niño, Y., de la Fuente, A., Martínez, G., Contreras, M., y Vila, I. (2001). Evolución del fitoplancton en el Embalse Rapel. Modelación de la interacciones entre los sistemas físico y biológico. Memorias del XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS-Chile, Santiago, Chile.

Vila, I., Contreras, M., Montecinos, V., and Pizarro, J. (1997). Eutrophication and phytoplankton selective response in a temperate reservoir. Verh. Internat. Verein. Limnol., 26, pp. 798-802.

Vila, I., Contreras, M., Montecinos, V., Pizarro, J., and Adams, D. (1997). Rapel, 30 years temperate reservoir. Eutrophication or Contamination? Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol., 55, pp. 31-44.