

SIMULACION NUMÉRICA DE PROCESOS DE TRANSPORTE Y DE CALIDAD DEL AGUA EN EL EMBALSE LOS MOLINOS

Corral M.¹, Rodríguez A.¹, Oroná C.¹, Bazán R.¹, Cossavella A.^{1,3}, Del Olmo S.²,
Rodríguez M.I.¹, Larrosa N.¹, Bonfanti E.² y Busso F.²

¹ Laboratorio de Hidráulica, FCEFyN, UN de Córdoba.
Av. Vélez Sarsfield 1601, Córdoba, Argentina, CP 5000. Te/fax. (0351) 433-4446
e-mail: mcorral@com.uncor.edu

² Aguas Cordobesas.

³ DIPAS, Córdoba

Palabras Clave: modelación, eutroficación, embalses

Resumen. *Este trabajo presenta un estudio de la problemática de la eutroficación, algunos aspectos hidrodinámicos y la evolución de la calidad del agua en el embalse Los Molinos (Dpto. Calamuchita, Córdoba) que constituye la fuente alternativa por excelencia para la provisión de agua potable a la ciudad de Córdoba. Los antecedentes demuestran características eutróficas en este cuerpo de agua y los estudios más recientes señalan claros signos de problemas derivados del estado de eutrofia del embalse como el agotamiento del oxígeno hipolimnético, incremento de nutrientes cerca del fondo, crecimiento excesivo de algas, y el deterioro generalizado en la calidad del agua.*

La metodología empleada consiste en la calibración del modelo DYRESM y el módulo ecológico CAEDYM desarrollados para lagos y reservorios, con el objeto de simular la dinámica del intercambio de masa, calor y cantidad de movimiento en el cuerpo de agua considerando procesos de mezcla y transporte de constituyentes en el perfil vertical de la columna de agua. Las fuentes de información necesarias para la modelación del embalse Los Molinos comprenden datos hidrometeorológicos provistos por diversas instituciones y la realización de campañas sistemáticas de monitoreo en el embalse y sus tributarios. La información recopilada ha permitido la calibración del modelo ecológico mencionado.

Los resultados obtenidos constituyen elementos concretos sobre la dinámica de los procesos físicos, químicos y biológicos en el embalse Los Molinos, observándose un buen ajuste en la etapa de calibración. Además han permitido realizar conclusiones generales acerca del comportamiento estacional del embalse.

1. INTRODUCCIÓN

El embalse Los Molinos constituye la fuente alternativa por excelencia para la provisión de agua potable a la ciudad de Córdoba, mereciendo especial atención su preservación y adecuado manejo. De allí surge como importante un conocimiento acabado del estado trófico del embalse y de las causas que lo deterioran.

Los antecedentes describen características eutróficas en este cuerpo de agua (Bonetto *et al.*, 1976, DiPAS, 1993; Donatti y Reartes, 1997) y los más recientes (Cosavella *et al.* 2003, Rodríguez *et al.* 2003) puntualizan sobre la existencia de problemas derivados del estado de eutrofia del embalse Los Molinos, tales como el agotamiento del oxígeno hipolimnético, el incremento de nutrientes cerca del fondo, el crecimiento excesivo de algas y el deterioro generalizado en la calidad del agua.

El principal objetivo de este trabajo se concentra en aplicar al caso de estudio herramientas numéricas que permitan estudiar estos procesos, analizar los resultados obtenidos y compararlos con los relevados durante las campañas de muestreo. Además, se pretende establecer conclusiones y recomendaciones que permitan mejorar el conocimiento de la problemática de la eutroficación en el embalse los Molinos, posibilitando de esta manera la formulación de criterios de resguardo y estrategias de manejo del recurso hídrico.

El comportamiento estacional de lagos y embalses y los procesos que determinan su estructura de densidad, han motivado el desarrollo de una variedad de herramientas de modelación que asumen comportamiento unidimensional en vertical de los cuerpos de agua lénticos. La especial importancia que tienen los procesos que ocurren en la porción superior de un lago o embalse, han dado lugar a diferentes aproximaciones para representar esta región del epilimnio. Las últimas teorías se fundamentan en una tasa de incorporación basada en el balance entre la energía cinética turbulenta (TKE) producida por la tensión cortante del viento y la energía requerida para incorporar agua por debajo de la termoclina.

En este caso se ha utilizado el modelo hidrodinámico DYRESM (Dynamic Reservoir Simulation Model) propuesto por Imberger y Patterson (1981). DYRESM discretiza la columna de agua en capas Lagrangianas, de espesor variable y con movilidad vertical, de modo que los cambios de volumen del lago simplemente cambian el espesor de las capas afectadas. Este modelo computa la producción de TKE a través de diferentes procesos discretos en base a resultados teóricos, de laboratorio y de campo.

En el aspecto calidad del agua se ha utilizado el modelo ecológico CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model) propuesto por Herzfeld y Hamilton (2000), acoplado directamente al hidrodinámico DYRESM, incorporando rutinas para el crecimiento de fitoplancton, ciclos de nutrientes, balance de oxígeno y dinámica de sólidos en suspensión.

2. INFORMACIÓN BÁSICA UTILIZADA

La información relevante para la simulación con el modelo DYRESM comprende datos meteorológicos, batimetría del embalse y tributarios, dimensión y ubicación de las estructuras de descarga, series de aporte y descarga del embalse. Las descargas y niveles del embalse se registran en forma periódica por instituciones provinciales como EPEC (Empresa Provincial de Energía de Córdoba) y DiPAS (Dirección Provincial de Hidráulica), dichos datos han sido utilizados para estimar los aportes hídricos al embalse.

El conocimiento de las variables hidrometeorológicas de la zona de estudio, resulta indispensable para la modelación del sistema acuático. Entre las variables meteorológicas involucradas en los procesos físicos del embalse se incluyen radiación de onda corta, radiación de onda larga (porcentaje de nubosidad), temperatura del aire, presión de vapor, velocidad del viento y precipitación. Estas variables se han obtenido de las estaciones meteorológicas existentes en la zona, como las instaladas en la localidad de Villa Gral. Belgrano (VGB), en la cuenca del río La Suela (Centro CIRSA), aunque en algunos casos han sido completadas con los registros de la estación automática remota del CIRSA ubicada a orillas del embalse San Roque.

Las variables físicas, químicas y biológicas necesarias para la calibración del modelo se han obtenido de las campañas de monitoreo sistemático del cuerpo de agua en estudio y de sus tributarios (Bazán, 2002 y Cossavella, 2003). Durante el período analizado se fijaron en el embalse nueve estaciones de muestreo denominadas M1 a M8 y S (Figura 1) correspondientes a las desembocaduras de los tributarios, puntos intermedios, centro y garganta del embalse.

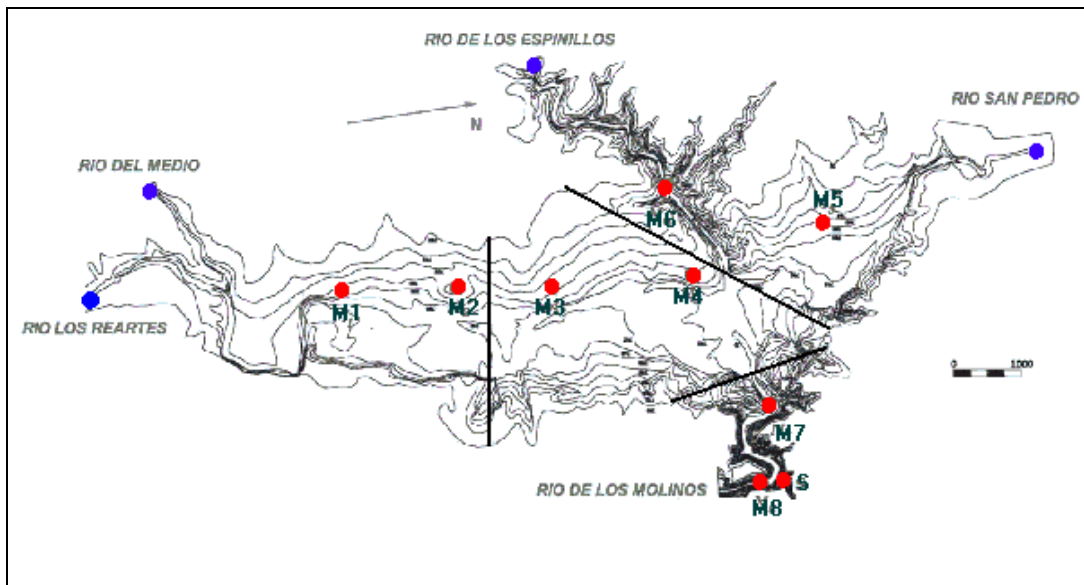


Figura 1. Ubicación de estaciones de muestreo para el período 99-00

El período de simulación ha abarcado el 1 de enero de 2000 hasta el 31 de diciembre de 2002, esta elección ha sido fundamentada en la disponibilidad de prácticamente la totalidad de los datos necesarios para el ingreso de información en los modelos de simulación. Se ha adoptado una escala temporal horaria para la modelación, mientras que para visualizar los resultados la escala es diaria.

2.1. Radiación de onda corta

Las estaciones meteorológicas experimentales del CIRSA tanto en la cuenca del río La Suela ($31^{\circ}39'$) como en Villa Carlos Paz ($31^{\circ}22'$) cuentan en su equipamiento con un sensor de radiación incidente, que almacena datos en forma horaria como energía recibida por unidad de superficie en Langley/min. Se ha utilizado la radiación medida en la estación La Suela, por localizarse más cercana al embalse Los Molinos, aunque los baches de información se han completado con el apoyo de relaciones lineales entre las mencionadas estaciones. En la Figura 2 se presenta la radiación de onda corta estimada para el embalse Los Molinos.

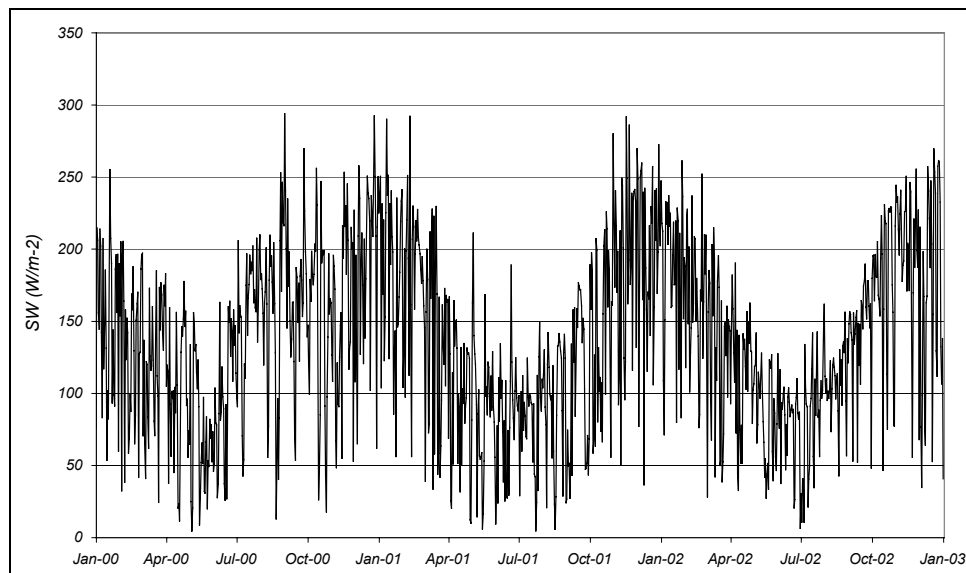


Figura 2. Estimación de Radiación de Onda Corta SW en embalse Los Molinos

Para estimar la radiación de onda larga se ha utilizado el concepto de nubosidad, definido como la fracción del cielo cubierta por nubes (C).

2.2. Temperatura del aire

En función de la ubicación de las estaciones disponibles se han utilizado los registros de Villa Gral. Belgrano y La Suela, para conformar una serie única y continua que se pueda utilizar en el embalse Los Molinos. Sin embargo, existen períodos con falta de información por lo que se han establecido relaciones entre estas estaciones y la ubicada en Villa Carlos Paz. De los análisis efectuados se ha determinado que la temperatura no sufre una diferencia

significativa entre las estaciones utilizadas, concluyéndose que la misma no presenta una variación espacial importante. En la Figura 3 se presenta la serie de temperatura media diaria en el embalse Los Molinos.

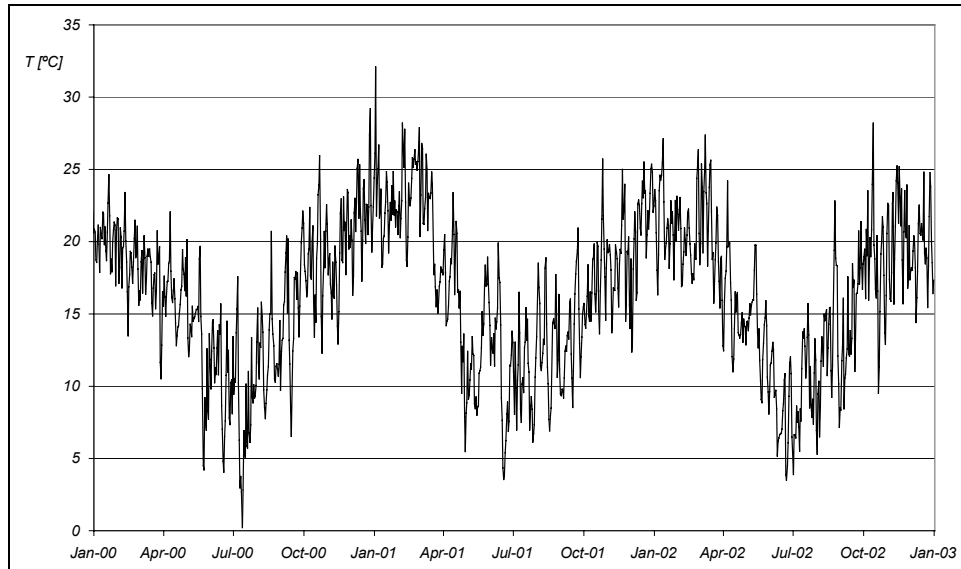


Figura 3 Estimación de la Temperatura Media Diaria (°C) en embalse Los Molinos.

2.3. Viento

Para caracterizar el régimen de vientos en la zona de estudio se han utilizado los registros de las estaciones La Suela (CIRSA) y VGB, fundamentándose esta elección en la continuidad de información para el período 2000-2002. El requerimiento básico de datos de entrada en el modelo hidrodinámico se compone de la intensidad media diaria del viento, limitando de esta manera la posibilidad de caracterizar procesos que ocurren a escalas menores de tiempo.

Las condiciones de la estación de VGB resultan similares a las de la zona del embalse Los Molinos, particularmente las características orográficas y altitud absoluta (796 y 765 msnm para VGB y Los Molinos respectivamente). Es por este motivo que se ha utilizado la velocidad del viento de la estación de VGB, completando los baches de información mediante relaciones lineales de ésta con la estación La Suela. La serie estimada para el embalse Los Molinos se presenta en la Figura 4.

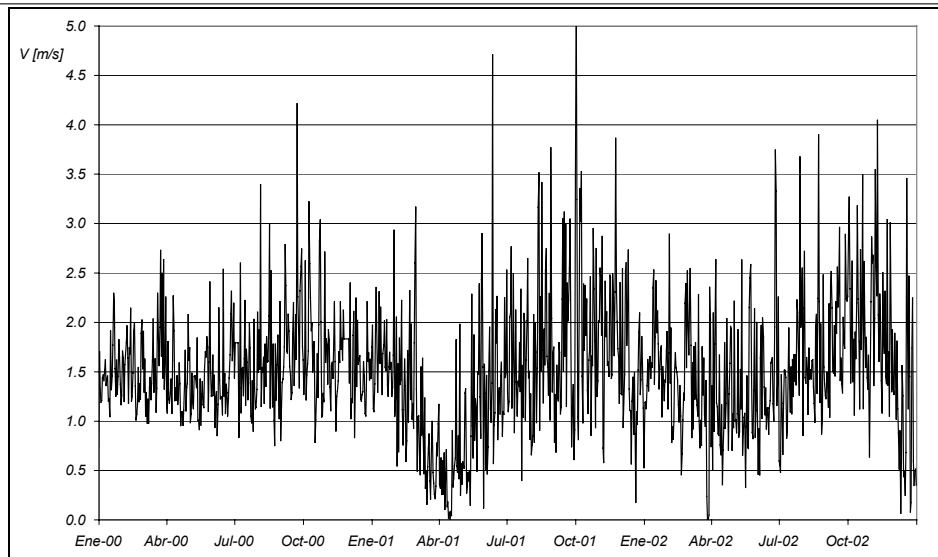


Figura 4. Velocidad del viento media diaria (m/s) en embalse Los Molinos

Si bien existe incertidumbre acerca de la variación espacial de la velocidad del viento, la no disponibilidad de datos en cercanías del embalse impide verificar esta hipótesis. Por ello es que la intensidad del viento obtenida sólo puede ser contemplada asumiendo las limitaciones mencionadas.

2.4. Estimación de aportes

Para estimar el ingreso de agua al embalse se ha utilizado la ecuación de balance de masa sin considerar la infiltración a través del cierre y del fondo. La expresión utilizada para calcular el volumen de ingreso ha sido:

$$Q_{int} = \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_{out} - \frac{(P - E) \cdot A}{\Delta t}$$

donde Q_{in} es el volumen afluente, ΔV la variación en el almacenamiento, Q_{out} el volumen efluente, P la precipitación, E la evaporación y A el área del embalse.

El término ΔV y el área superficial A han sido estimados a través de la curva altura-volumen realizada en el año 1953, por la DPH (Dirección Provincial de Hidráulica).

El embalse Los Molinos presenta tres fuentes principales de erogación: un vertedero para la evacuación de crecidas tipo Creager con la cresta a cota 765 msnm, dos válvulas descargadoras de fondo del tipo chorro hueco de 700 mm de diámetro a cota 736 msnm y la obra de toma para la central hidroeléctrica a cota 736 msnm. Los caudales erogados por el embalse Q_{out} para la generación de energía hidroeléctrica, han sido relevados de la base de datos de la DIPAS, aunque éstos son medidos por la EPEC en la central hidroeléctrica Los Molinos N°1.

La evaporación sobre el embalse E ha sido estimada con expresiones semi-empíricas basadas en la ley de Dalton. Las fórmulas utilizadas han sido Lungeon, Fitzgerald, Rohwer, Meyer citados en Chow (1994) y Da Porta (1993). La expresión predictora propuesta por Da Porta y Caamaño (1993), ha sido desarrollada en base a estudios de la cuenca del río La Suela y calibrada en el embalse San Roque por Taravella (2002), tiene la expresión:

$$E = C \cdot d^a \cdot e^{[b \cdot (t-c)]}$$

donde C es un coeficiente de transferencia de vapor fijo o variable, de acuerdo al cuerpo de agua ($C = 367381,2$), d la diferencia psicrométrica en $^{\circ}\text{C}$ obtenida como la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y húmedo ($d = t_{\text{bs}} - t_{\text{bh}}$), a , b , y c coeficientes de ajuste ($a = 0,23167$; $b = 0,06086$, $c = 13,1143$) y t la temperatura media en $^{\circ}\text{C}$. Del análisis de resultados se ha adoptado los valores de evaporación correspondientes a la ecuación de Da Porta y Caamaño. A su vez para determinar la precipitación directa P sobre el embalse se han utilizado los registros de la estación pluviométrica Los Reartes.

El balance de masa planteado para el embalse Los Molinos se ha realizado con escala temporal diaria, debido en primer lugar a que la información disponible así lo permite y en segundo lugar por las condiciones impuestas por el modelo de simulación. Además, se ha realizado la distribución de caudales por tributarios y la comparación de los valores obtenidos con los medidos in situ. Los resultados obtenidos y los caudales aforados se presentan en la Figura 5.

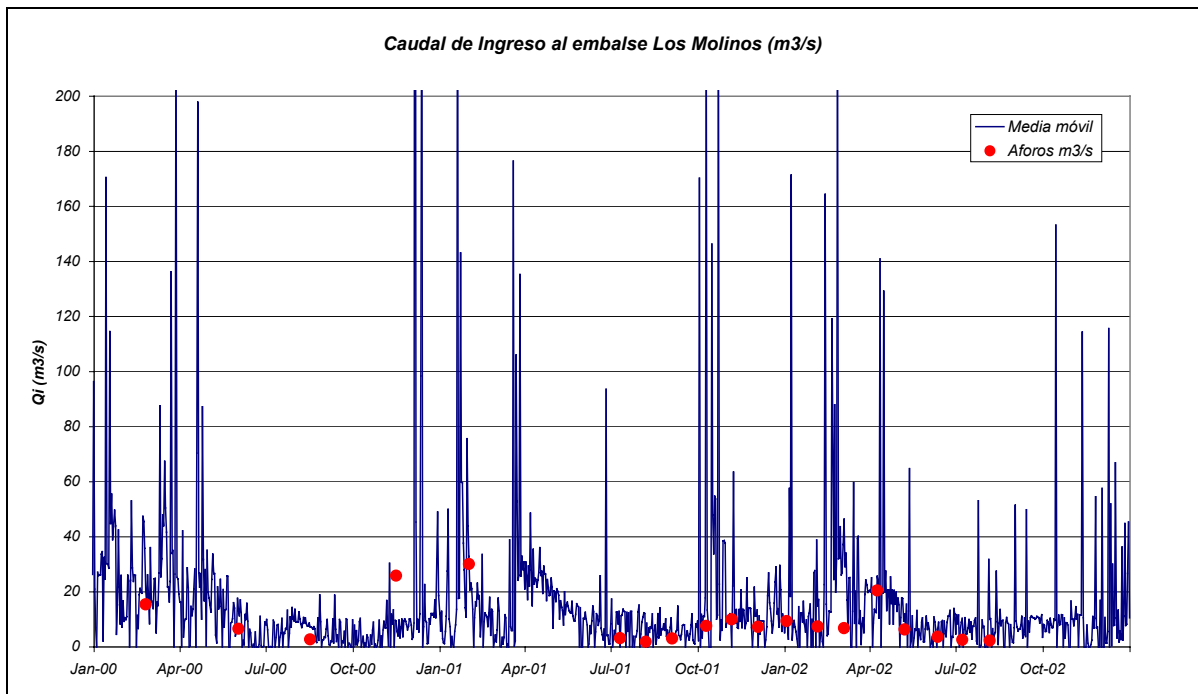


Figura 5. Estimación de Aportes al embalse Los Molinos en m^3/s

3. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DYRESM-CAEDYM

El modelo DYRESM permite interpretar procesos de mezcla, duración e intensidad de la estratificación, ingreso de afluentes, egreso de efluentes, etc. En el embalse Los Molinos la estratificación vertical se produce por efecto de la temperatura por lo que la misma será la variable de referencia de los procesos físicos del embalse.

La hipótesis de comportamiento unidimensional del embalse requiere la adopción o elección de un punto representativo de muestreo que refleje las condiciones del embalse. En el presente estudio se adopta la estación de muestreo del centro del embalse (M4) como lugar de referencia para las modelaciones numéricas.

La calibración del modelo DYRESM ha sido realizada en una sola etapa, incorporando todos los datos obtenidos durante las campañas de muestreo en el período de análisis. El procedimiento ha consistido en variar el coeficiente de atenuación de la luz, en el rango $0,60$ a $1,70 \text{ m}^{-1}$.

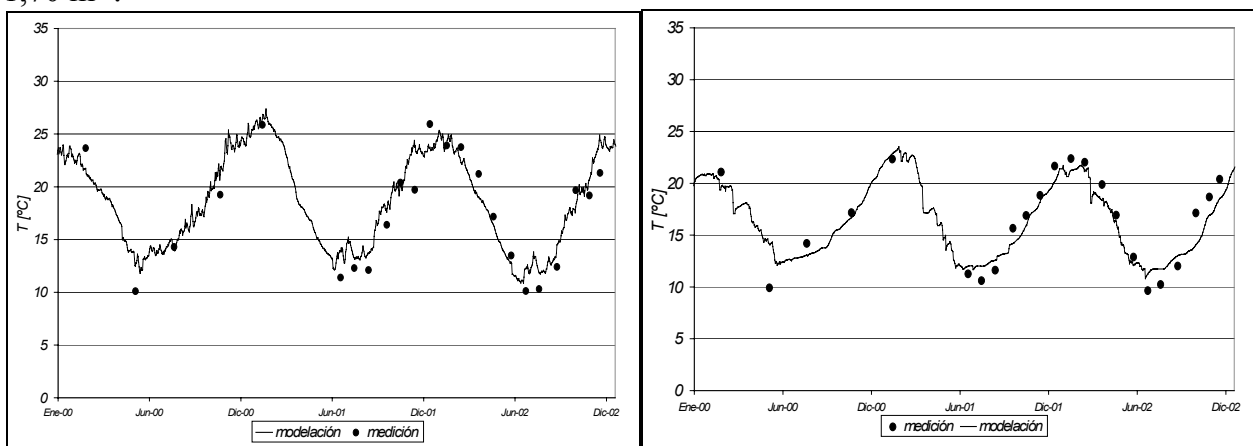


Figura 6. Temperatura superficial y en fondo en embalse Los Molinos.

En la Figura 6 se observa que la simulación numérica representó en forma adecuada la temperatura superficial del agua durante el verano. Sin embargo, en el invierno los valores simulados fueron mayores a los que se registraron in situ en aproximadamente $3 \text{ }^\circ\text{C}$. En el fondo se han estimado valores de temperatura que se correspondieron con los de campo durante todo el año, a excepción de la época invernal en donde las temperaturas estimadas fueron mayores a las registradas.

Como resultado del proceso de calibración se concluye que el coeficiente de atenuación de la luz, para el período en estudio, asume un valor de $0,85 \text{ m}^{-1}$, comparable con $0,9 \text{ m}^{-1}$ obtenido de similar manera para el embalse San Roque (Morillo, 2001).

La simulación con el modelo ecológico CAEDYM exige el ingreso de las condiciones de borde, especialmente la concentración de los diferentes parámetros físicos y químicos de los tributarios y las condiciones iniciales a través de perfiles verticales para cada constituyente.

M. Corral, A. Rodríguez, C. Oroná, R. Bazán, A. Cossavella, S. Del Olmo, M. Rodríguez, N. Larrosa, E. Bonfanti, F. Busso

Los parámetros necesarios para la simulación son fitoplancton, zooplancton, fósforo reactivo soluble (PRS), fósforo total (PT), nitratos, amonio, nitrógeno total, sílice, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH y sólidos suspendidos. Durante las campañas realizadas no se han medido la totalidad de los parámetros necesarios para aplicar la herramienta CAEDYM, por lo que se realizaron algunas simplificaciones y estimaciones que se consideran válidas en el contexto del presente trabajo.

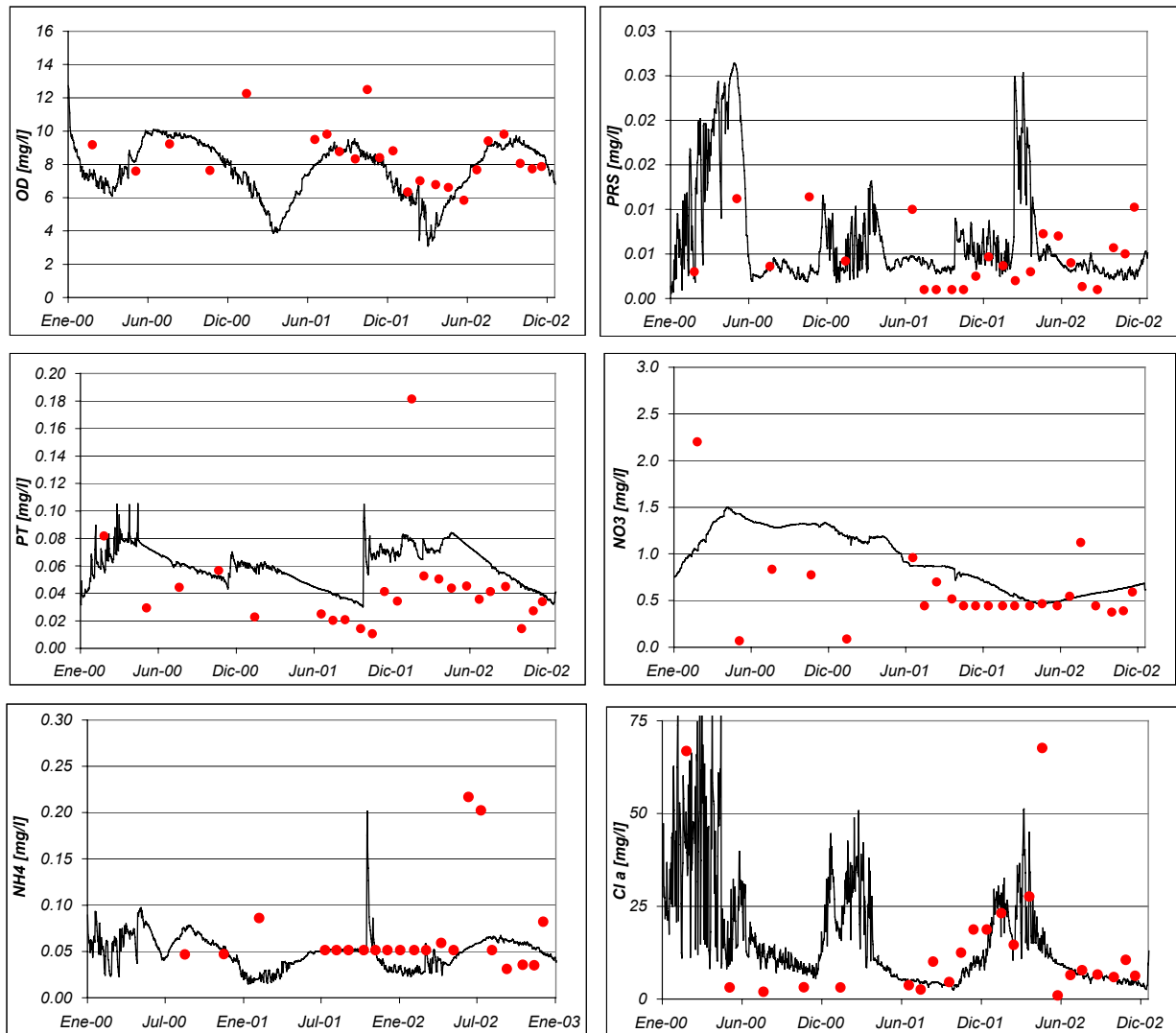


Figura 7. Medición (•) y simulación (—) en epilimnion del embalse Los Molinos

La calibración del modelo CAEDYM ha incorporado toda la información existente durante el período 2000-2002 y el procedimiento ha consistido en calibrar los parámetros principales para cada componente, buscando que la representación se aproxime a la medición en prototipo. El parámetro de calibración ha sido la concentración media de cada componente en el epilimnio e hipolimnio del embalse, determinada ésta como la media ponderada por área de

las estaciones de muestreo disponibles, utilizado este método anteriormente por Cossavella (2003). Como hipótesis se asume que la comunidad del fitoplancton ha sido representada por dos grupos de algas (dinoflageladas y diatomeas) debido a que predominaron durante el período en estudio (Bazán *et al.*, 2002).

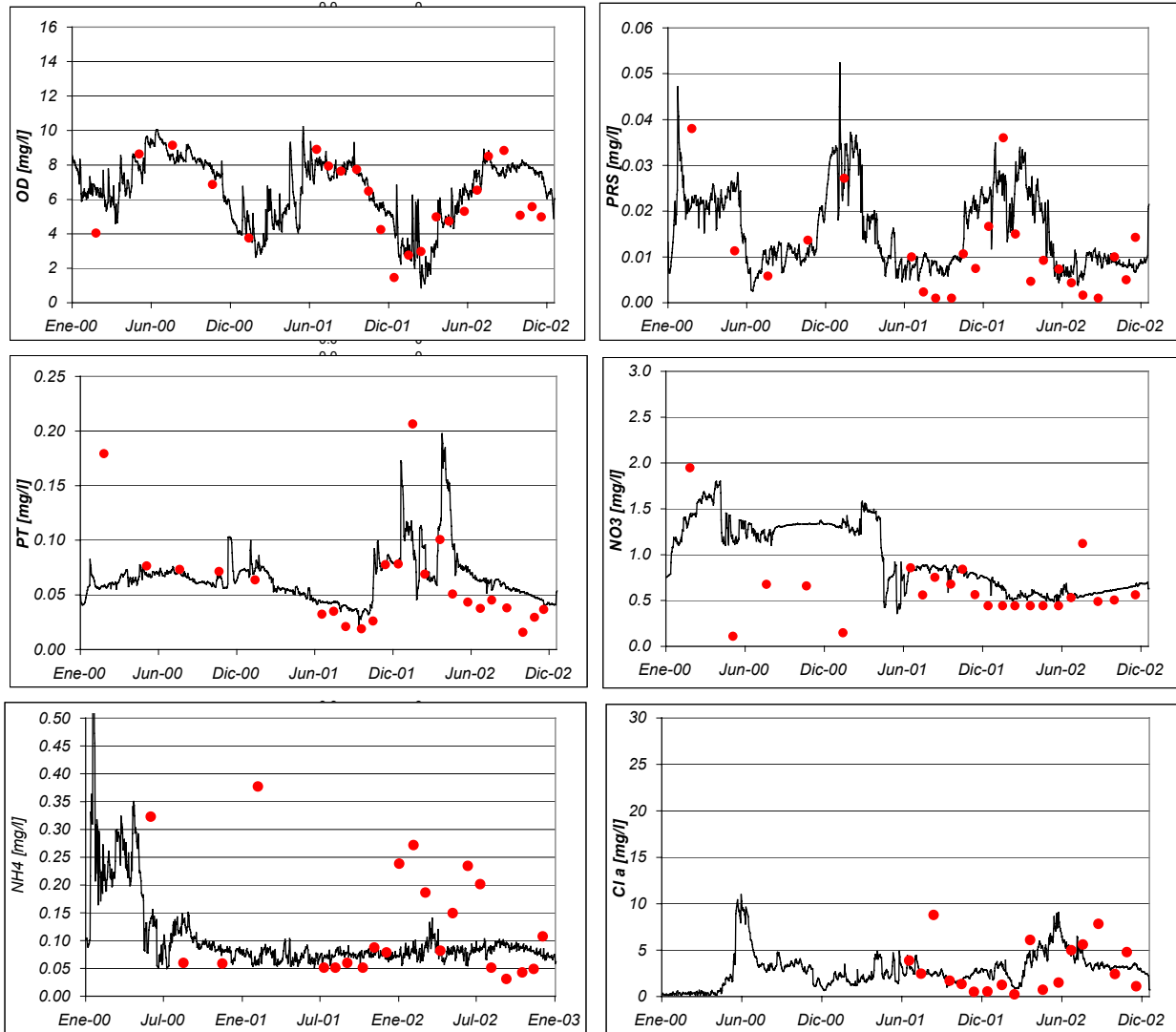


Figura 8. Medición (●) y simulación (—) en hipolimnion del embalse Los Molinos

Las concentraciones de OD tanto a nivel superficial como de fondo (Figura 7 y 8) se encontraron en fase, es decir que los valores extremos se presentaron simultáneamente. Sin embargo la amplitud de las variaciones de concentración de OD simulada (6 mg/l) fue menor que la medida (10 mg/l). El OD en superficie fue adecuadamente reproducido por el modelo durante su decaimiento, no así sus picos estivales. La simulación inadecuada de los valores extremos se debe a que las mediciones se realizaron durante días de marcada actividad fotosintética que superaron el valor de saturación teórica de OD en el agua, por lo que el modelo no puede reproducir esta condición dado que no está contemplada en sus hipótesis.

El contenido de OD en fondo presentó un claro descenso durante los períodos de estratificación térmica, alcanzando valores mínimos entre 1,5 y 3 mg/l. Se destaca que la simulación representó satisfactoriamente este comportamiento, alcanzándose condiciones de hipoxia y anoxia hipolimnética. El modelo reprodujo aceptablemente la amplitud de las variaciones medidas, lográndose un seguimiento de la fase de variación y un buen ajuste de los valores extremos (máximos y mínimos).

El modelo predijo aceptablemente la ocurrencia de picos de PT en superficie pero sobreestimando su valor un 30 % respecto de los datos medidos (Figura 7). Además, se observa que el comportamiento del modelo fue levemente mejor para el PT del fondo que en el caso superficial, aunque se observa una sobrestimación en los picos de aproximadamente un 40 % (Figura 8). Durante el período simulado se observó un buen comportamiento del modelo en la predicción de Cl-a tal como se muestra en la Figura 7, a excepción del verano de 2001 en donde la simulación calcula la presencia de un pico de Cl-a que no se corresponde con los valores medidos.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Temperatura

Las temperaturas superficiales y del fondo del embalse demostraron una marcada estacionalidad que se corresponden con la variación temporal de los factores meteorológicos, es decir durante la época estival se evidencian las mayores temperaturas y en invierno ésta disminuye como consecuencia del descenso en la radiación y la temperatura del aire. En la Figura 9 se presenta la dinámica estacional simulada de la temperatura en el embalse Los Molinos para el período 2000-2002. Se observa que al comienzo de los períodos estivales se hace presente el proceso natural de estratificación térmica produciendo la división de la columna de agua en la dirección vertical en dos regiones claramente definidas (epilímnio e hipolímnio). Avanzando en dicho período este fenómeno se intensifica, observándose diferencias de temperatura entre superficie y fondo de hasta 5 °C.

El comportamiento estacional del embalse Los Molinos es típico de lagos monomícticos cálidos (Wetzel, 1981), en donde se reconoce durante el período invernal la mezcla completa de la columna de agua y la estratificación térmica en el verano, además de que la temperatura superficial nunca desciende por debajo de los 4°C.

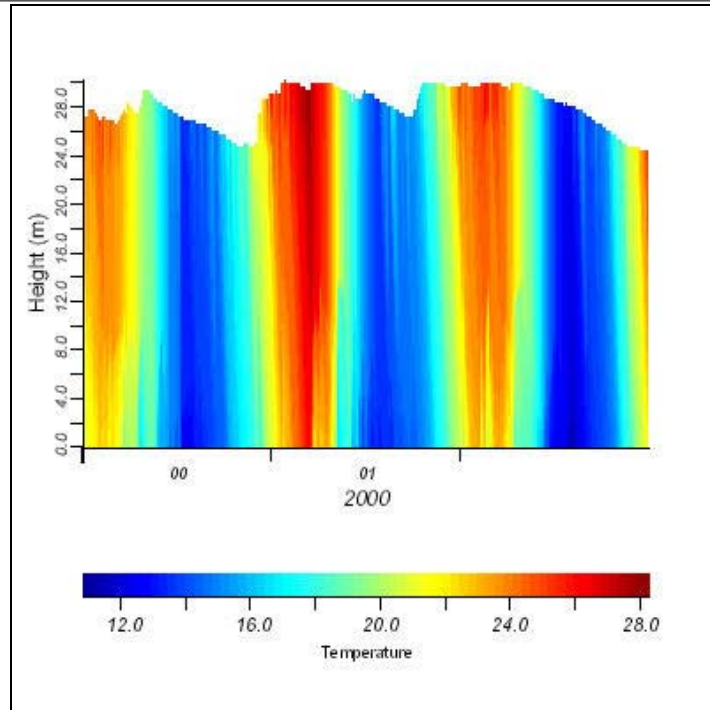


Figura 9. Temperatura según modelación en embalse Los Molinos

4.2. Ciclo del oxígeno disuelto (OD)

La distribución de oxígeno disuelto simulada para el embalse Los Molinos resulta típica de cuerpos de agua productivos (eutróficos) con excesiva concentración de nutrientes y producción orgánica, en los que se produce la disminución o agotamiento en profundidad. En la Figura 10 se observa que la concentración de oxígeno disuelto en el perfil vertical sigue un patrón estacional que se corresponde en forma directa con los procesos hidrodinámicos y térmicos que ocurren en el embalse. Los resultados obtenidos evidencian que en los períodos estivales ocurren situaciones de hipoxia y anoxia hipolimnética.

A partir de la simulación, aparecen valores mínimos de OD durante el verano y en la zona profunda del embalse, en coincidencia con períodos de estratificación térmica.

De los resultados numéricos se desprende que en la capa de fondo el principal consumo de OD se produce por la suma de los procesos de oxidación de la materia orgánica (DBO) y el intercambio de OD por difusión en la interfase agua-sedimento. Cabe resaltar que el consumo de OD por el fitoplancton no es despreciable, debido a que la concentración de algas simulada para el fondo del embalse no ha resultado nula.

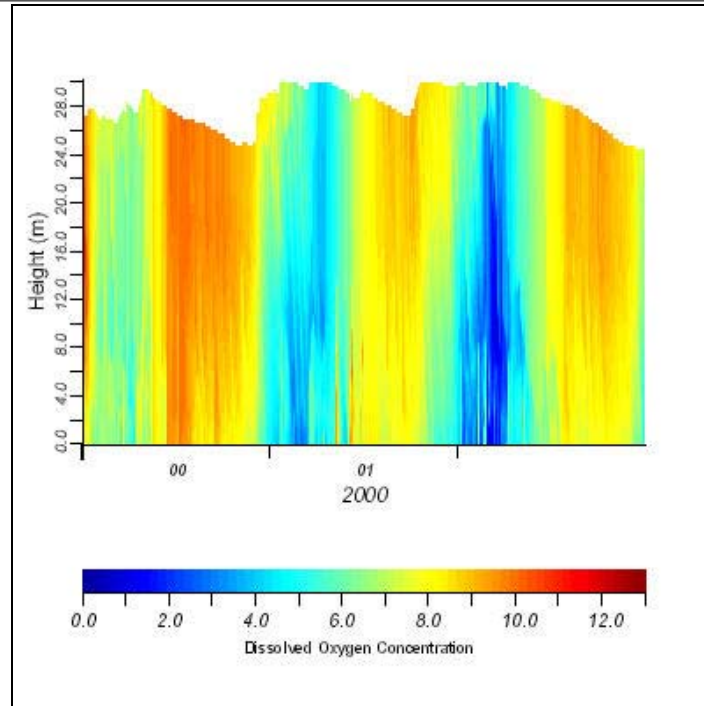


Figura 10. Simulación de OD en embalse Los Molinos

4.3. Fósforo Total y Fósforo Reactivo Soluble (PT y PRS)

Del análisis temporal presentado en la Figura 11 se desprende que el contenido de PT en la superficie del embalse se incrementa en la época estival, determinado esto por el aumento del caudal y la concentración de nutrientes en los tributarios. A partir de estos valores picos se observa el decaimiento temporal en la concentración de PT superficial, debido principalmente a la escasa introducción de nutrientes durante el período de estiaje de los ríos.

En el fondo el comportamiento es similar, tanto en la temporalidad del proceso como en la amplitud de variación, de modo que durante la mayoría del período analizado la columna de agua se presenta prácticamente mezclada y posiblemente la concentración de los ingresos controla la concentración de PT en el embalse. Sin embargo, existen períodos con estratificación térmica en coincidencia con estados de hipoxia hipolimnética, en donde se observa un incremento en la concentración de PT en el fondo del embalse. Dicho aumento podría deberse a los procesos generados por déficit de oxígeno que producirían la liberación de fósforo hacia la columna de agua desde los sedimentos. Un comportamiento similar presentó el PRS, aunque en la simulación se observa que el aumento en su concentración se extiende prácticamente hasta la superficie del embalse.

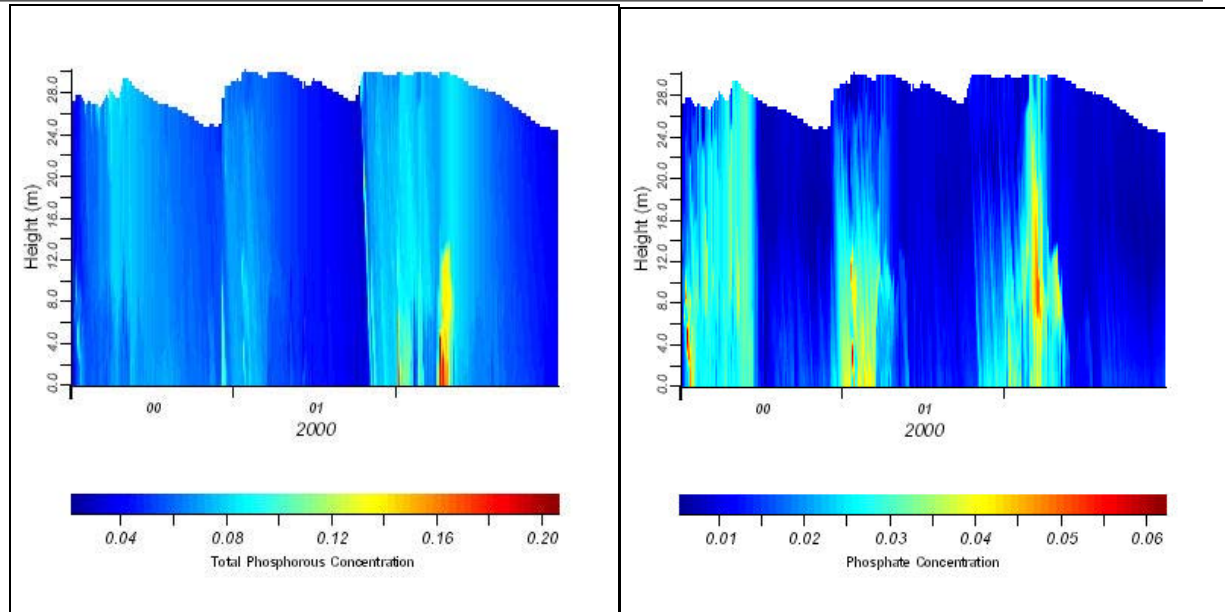


Figura 11. Simulación de PT y PRS en embalse Los Molinos

4.4 Clorofila-a (Cl-a)

En la Figura 12 se presenta el contenido de Cl-a producida por las dinoflageladas y las diatomeas, debido a que la comunidad fitoplanctónica ha estado representado sólo por estos dos grupos de algas.

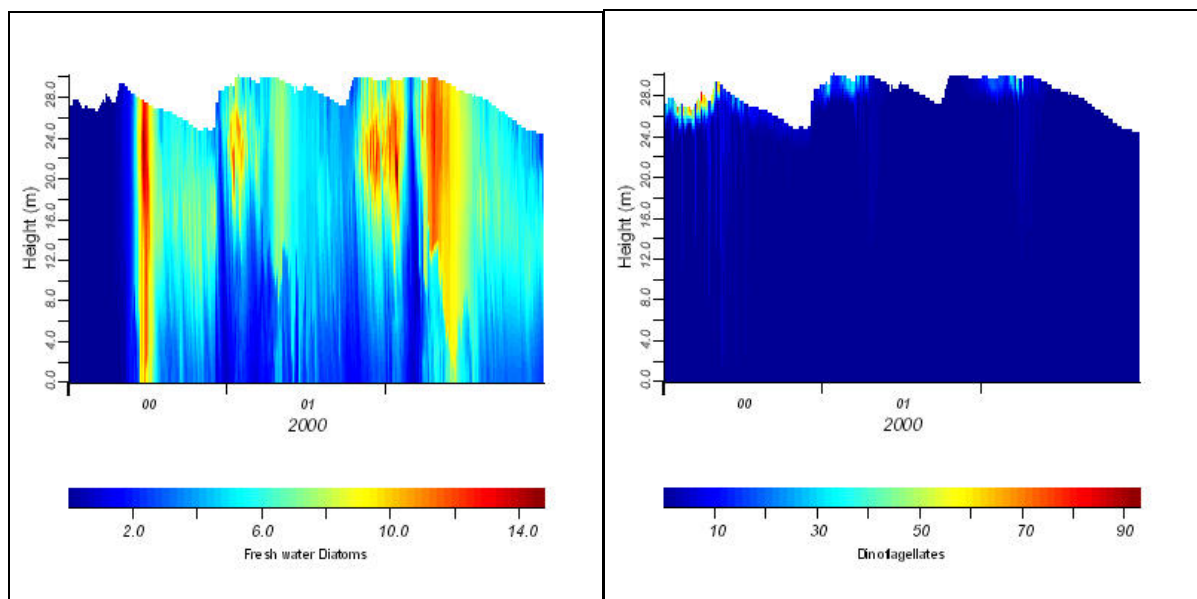


Figura 12. Simulación de Cl-a (Diatomeas y Dinoflageladas) en embalse Los Molinos

La concentración de Cl-a producida por las diatomeas presenta poca variabilidad en el tiempo manteniéndose en un rango de variación de 2 a 14 $\mu\text{g/l}$ en el período analizado. Es importante destacar que el contenido de Cl-a disminuye a medida que aumenta la profundidad y en general se mantiene una diferencia casi constante de 5 $\mu\text{g/l}$ entre la superficie y el fondo del embalse. Se destaca que el grupo de dinoflageladas se ha mantenido con escasa presencia durante el otoño, invierno y primavera, mientras que al comienzo del verano aumentó abruptamente su concentración, pero sólo a nivel superficial.

A partir de estas observaciones se puede inferir que durante el período citado la concentración de Cl-a simulada ha sido representada principalmente por las diatomeas, presentes en toda la columna de agua. En verano se evidenció la presencia de dinoflageladas manteniéndose como grupo dominante durante el período estival, incrementando en forma notable la concentración de Cl-a a nivel superficial, debido a que este grupo presenta mayor biovolumen y por lo tanto contiene mayor contenido del pigmento fotosintético.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el modelo DYRESM-CAEDYM permiten validar la aplicación de herramientas numéricas para representar procesos físicos en el embalse, apoyada esta conclusión en el buen ajuste de los perfiles de temperatura tanto en condiciones de estratificación como de mezcla vertical, como así también la temperatura superficial y de fondo del embalse.

Con relación al proceso de estratificación que se presentó en este cuerpo de agua, se desprende que durante el verano los gradientes térmicos, entre superficie y fondo, fueron considerables, en un rango comprendido entre 3 y 5 $^{\circ}\text{C}$. Las máximas diferencias observadas se registraron en verano, tendiendo a desaparecer este proceso a comienzos del otoño.

Las concentraciones de OD tanto a nivel superficial como de fondo se encontraron en fase, es decir los valores extremos se presentaron simultáneamente. En superficie el OD ha sido adecuadamente reproducido por el modelo durante la etapa de decaimiento, pero en los picos estivales subestima su valor, debido a una marcada actividad fotosintética con abundante producción de OD, que no es contemplada en las hipótesis de simulación.

El contenido en fondo de OD ha presentado un claro descenso durante los períodos de estratificación térmica, alcanzando condiciones de hipoxia y anoxia hipolimnética con valores menores a 3 mg/l . Esta situación ha sido correctamente reproducida por el modelo lográndose un seguimiento de la fase de variación y un buen ajuste de los valores extremos (máximos y mínimos).

La distribución de oxígeno simulada para el embalse Los Molinos ha resultado ser la típica de cuerpos de agua productivos (eutróficos) con excesiva concentración de nutrientes y producción orgánica, con disminución o agotamiento en la profundidad y exceso de oxígeno

en la superficie por actividad fotosintética. Los datos de campo sugirieron que la principal fuente de producción de OD a nivel superficial proviene de la actividad fotosintética del fitoplancton. Los resultados numéricos indican que para el fondo el principal consumo de OD se produce por la suma de los procesos de oxidación de la materia orgánica (DBO) y el intercambio de OD por difusión en la interfase agua-sedimento.

El modelo predijo aceptablemente la variación temporal de PT, pero sobrestima la concentración en superficie y en fondo (30 y 40 % respectivamente), esto podría deberse posiblemente a una incorrecta estimación de las cargas externas. En general, la simulación ha representado mejor la concentración de PT en el fondo, aunque se han producido diferencias importantes con las mediciones durante la ocurrencia de valores máximos.

De acuerdo a la simulación numérica el incremento de PT en superficie durante la época estival se debe al aumento de la carga de nutrientes. Durante la mayor parte del período analizado la columna de agua se presentó prácticamente mezclada, aunque existieron períodos con estratificación térmica e hipoxia del hipolimnio con un notable incremento en la concentración de PT en el fondo del embalse, causados según los resultados numéricos por procesos de liberación de PRS hacia la columna de agua.

Durante el período simulado también se observó un buen comportamiento del modelo en la predicción de Cl-a, aunque se observaron que las diferencias entre los valores medidos y simulados se encontraron dentro de los rangos esperados.

La simulación sugiere que el grupo de algas diatomeas ha sido dominante durante el otoño, invierno y primavera, con una escasa variación en el tiempo (2 a 14 $\mu\text{g/l}$). En cambio el grupo dinoflageladas aparece al comienzo del verano aumentando abruptamente la concentración de Cl-a pero sólo a nivel superficial.

Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo se encuentran condicionadas a la información básica utilizada y a la disponibilidad de datos de campo. Sin embargo, se considera que los resultados son representativos de los patrones de comportamiento observados durante las campañas de monitoreo.

Agradecimientos:

Los autores agradecen a la Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (DiPAS), Departamento de Química Industrial y Aplicada de la F.C.E.F.y N. de la U.N.C., Agencia Córdoba Ciencia S.E., Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (Proyecto CONICET PIP 2959), Club Bahía Thonon, Club Bahía El Negro, Club Aeropuerto y al Ente Intercomunal Lago Los Molinos por el valioso apoyo brindado.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antenucci J. (2000): “The coupled CWR Dynamic Reservoir Simulation Model and Computational Aquatic Ecosystems Dynamics Model DYRESM-CAEDYM”, User Guide, Centre for Water Research, The University of Western Australia.
- [2] Antenucci J. (2000): “The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM”, User Manual, Centre for Water Research, The University of Western Australia.
- [3] Antenucci J., y Imerito A. (2000): “The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model, DYRESM”, Science Manual, Centre for Water Research, The University of Western Australia.
- [5] Bazán, R. (2002): “Monitoreo de la calidad del agua del embalse Los Molinos.” Informe final de beca. Agencia Córdoba Ciencia S.E.
- [6] Bazán, R.; Oroná, C.; Cossavella, A.; Corral, M.; Rodríguez, M.; Del Olmo, S.; Borgnino, L.; Larrosa, N.; Rodríguez, A.; Busso, F.; Bonfanti, E. (2002): “Análisis y modelado de las características limnológicas del embalse Los Molinos. Seminario-Taller Calidad de aguas en embalses de la provincia de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- [7] Bonetto, A.; Maglianessi, R.; Di Persia D. y Corigliano, M. . (1.976): Caracteres limnológicos de algunos lagos eutróficos de embalse de la región central de Argentina - Ecosur (Argentina), Vol 3 , N° 5, 47-120 pp.
- [8] Cossavella, A.(2003):”Influencia de efectos antrópicos y naturales en el proceso de eutroficación de las aguas del embalse Los Molinos I” Tesis de Maestría. Maestría en Ingeniería Ambiental, UTN, Córdoba.
- [9] DiPAS (1993): Informe técnico sobre monitoreo de calidad de aguas de la cuenca del río Los Molinos- 169 pp.
- [10] Donatti, O. y Reartes, J. (1997): “Diagnóstico del estado trófico del Embalse Los Molinos, Subsecretaría del Ambiente de la Municipalidad de Córdoba”–29 pp.
- [11] Da Porta W. Y Caamaño Nelli G. (1993): “Psicrómetro y Evaporación”. INCYTH-CONICET-CIHRSA. Córdoba. Argentina.
- [12] Da Porta W. (1993): “Física de la Evaporación y Evapotranspiración Real y Potencial, Aplicaciones Prácticas”. INCYTH-CONICET-CIHRSA. Córdoba. Argentina.
- [13] Fischer, H. B.; List, E. G.; Koh, R. C. Y.; Imberger, J. and Brooks, N. H. (1979): “Mixing

M. Corral, A. Rodríguez, C. Oroná, R. Bazán, A. Cossavella, S. Del Olmo, M. Rodríguez, N. Larrosa, E. Bonfanti, F. Busso

in Inland and Coastal Waters”, Academic Press.

- [14] Herzfeld M. y Hamilton D. (2000): “The CWR Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model CAEDYM”, User Manual, Centre for Water Research, The University of Western Australia.
- [15] Imberger, J. and Patterson, J. C.(1981): “A dynamic reservoir simulation model - DYRESM:5. In Transport Models for Inland and Coastal Waters. H.B. Fischer (Ed.):. Academic. pp 310-361.
- [16] Morillo S. (2001): “Modelación Unidimensional de la Limnología Física del Embalse San Roque, Córdoba”. Tesis de Grado de la Universidad Nacional de Córdoba.
- [17] Rodríguez, A.; Avena, M.; Rodríguez, M. I.; Cossavella, A.; Oroná, C.; Del Olmo, S., Larrosa, N.; Bazán, R. y Corral, M. (2002): “Caracterización ambiental y modelado de los embalses San Roque y Los Molinos. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
- [18] Taravella R. A. (2002): “Identificación y cuantificación de componentes del balance hídrico en el embalse San Roque”. Tesis de Grado de la Universidad Nacional de Córdoba.
- [19] TVA: Tennessee Valley Authority (1972): “Heat and mass transfer between a water surface and the atmosphere”. Water Resources Research Laboratory Report 14, Report No. 0-6803.
- [20] The Centre for Water Research (2000): “The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model, Science Manual”.
- [21] Tucci, C. E. M., (1993): “Hidrología: Ciencia y Aplicación”. Segunda edición. UFRGS.
- [22] Wetzel, R. (1981): Limnología, Ediciones Omega S. A., Barcelona.