

La modelación numérica de la calidad de embalses como herramienta la gestión ambiental: Caso Casa de Piedra, Río Colorado

Federico Horne¹, Maite Elissalde², Gabriela Polla³

^{1,2,3}ITAMA, Universidad Nacional del Comahue

¹federico.horne@faca.uncoma.edu.ar, fedeHORNE@yahoo.com

²maiteelis@gmail.com

³gabipolla@yahoo.com.ar

RESUMEN

La modelación matemática de la calidad del agua es de gran utilidad para el diagnóstico y pronóstico del estado trófico y la salubridad de los embalses y lagos. El monitoreo de constituyentes, establecido por ley, no permite la prognosis ni el análisis de diferentes escenarios, habida cuenta de la no-linealidad de los procesos involucrados, que desvalida la extrapolación temporal individual de los constituyentes.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de la aplicación en el embalse Casa de Piedra, R. N., de dos modelos numéricos de 1D y 3D respectivamente.

El embalse se monitorea de manera continua desde el año 2003. Se miden 20 constituyentes de calidad, tomado en 3 sitios a lo largo del eje del embalse, dos de ellos con registros de perfiles en profundidad. Se muestrean, además, 2 estaciones en el Río Colorado, aguas arriba y aguas abajo del embalse

El modelo unidimensional fue implementado al momento de contarse con una serie corta de datos de calidad, además de los correspondientes hidrometeorológicos y la curva de altura-volumen-área del vaso. La contrastación con los datos observados fue satisfactoria. El código base utilizado fue el WQRRS del HEC, Davis, California a partir del cual se realizaron adecuaciones y transformaciones para facilitar su implementación e interpretación de resultados. Permitted simular escenarios de años secos, aumento de fósforo (P) y nitrógeno (N) ingresante, comportamiento en el largo plazo y eventuales derrames de contaminantes en el embalse.

En base a la experiencia lograda con el modelo 1D, la disponibilidad de series de 9 años de datos y la batimetría del vaso, se implementó posteriormente el modelo numérico 3D ELCOM – CAEDYM del CWR de la University of Western Australia. Los 40 km de largo por 3 de ancho medio, se discretizaron en celdas de 200 x 200 x 1m de espesor. Se fijó un intervalo de simulación de 10 minutos y se validó con las observaciones del año 2007.

El potente módulo hidrodinámico, ELCOM, que compone el modelo permitió visualizar en detalle las variaciones térmicas en planta y a lo largo del eje del embalse, la dinámica de las “bahías” respecto del cuerpo central y el efecto de los vientos. Asimismo la simulación de trazadores proveyó detalles de los tiempos de residencia en las diferentes partes del vaso en función de las componentes advectivas y dispersivas generadas por la dinámica mecánica y térmica del embalse. Se pudo también hacer un seguimiento del comportamiento de oxígeno disuelto (OD), N, P, clorofila A (CLa) y otros parámetros de calidad, esclareciendo su dinámica.

En conclusión, se puede afirmar que la modelación numérica de la hidrodinámica acoplada con el ecosistema del embalse es una herramienta potente, eficaz y precisa para la prognosis y planificación del uso sustentable de ecosistemas acuáticos como lo es un embalse, aspectos imposibles de establecer por el simple análisis de los datos monitoreados.

Palabras claves: Calidad agua, modelación numérica, gestión embalse, monitoreo.

1 INTRODUCCIÓN

La presa Casa de Piedra se construyó para regular el caudal del río Colorado, para atenuar y controlar las crecidas del río, para aprovechar la habilitación en las áreas de riego y para producción hidroeléctrica. (Mariani et al. 2011) El espejo de agua generado a partir de la construcción de la presa tiene una longitud de 55 km de costa y se extiende sobre una superficie a cota máxima normal de 36.000 hectáreas, con profundidades máximas que varían entre 35 y 40 m

Para caracterizar al río se puede indicar que se trata de un río de escurrimiento netamente nival, con un módulo de 148 m³/s. De octubre a febrero se dan las crecidas por fusión, mientras que entre abril y agosto (inclusive) los escurrimientos medios mensuales son del orden de 85 m³/s. (Perl & Andrés 2008)

La ocurrencia de periodos críticos por escasos de aportes níveos en la alta cuenca como el iniciado en 2005, se traduce en un menor caudal para el río Colorado, cuyo aporte de agua año a año es de 4.500 hm³, por lo que durante unos seis años estuvo por debajo de la media. (Beascochea 2013). Así, debido a la situación climática las reservas del embalse Casa de Piedra disminuyeron a pesar de todas las restricciones racionales en el uso y en los consumos.

Por otra parte un monitoreo periódico de los cuerpos de agua permite estimar su estado trófico y calidad en relación a estándares, sin embargo es insuficiente para pronosticar posibles escenarios. La interacciones entre constituyentes, producto de la dinámica del ecosistema, constituyen procesos altamente no-lineales que impiden la proyección del comportamiento (Horne et al., 2006). Los modelos numéricos permiten cuantificar consecuencias ambientales producto de proyectos o escenarios climáticos adversos, lo que los convierte en una herramienta fundamental en la toma de decisiones y para establecer políticas de manejo a mediano y largo plazo. (Quirós 2000)

El objetivo del trabajo fue implementar la modelación matemática en 3D, validada con las observaciones periódicas, como herramienta de gestión ambiental de utilidad para diferentes usos: análisis de la dinámica del ecosistema, prognosis ante variaciones climáticas, diseño de un plan de monitoreo de calidad del agua, planificar sitios de extracción de agua potable y recreación, impacto ambiental de la operación del embalse, entre otras. La elección de modelar en 3D se centra en reconocer la distribución y variación espacial de concentraciones y dinámicas. No obstante se pudo comparar con los resultados obtenidos a partir de una modelación 1D realizada en 1997.

A fin de analizar las consecuencias en la dinámica: temperaturas, eutrofización, niveles de concentración de constituyentes, se aplicó un modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Model) al embalse, al cual se acopló el modelo de calidad de agua CAEDYM (Computational Aquatic Ecological Dynamic Mode).

2 METODOLOGIA

2.1 Descripción dl modelo numérico

El modelo ELCOM utiliza principios hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua estratificados (distribuciones de velocidad, temperatura y salinidad) sometidos a forzamientos ambientales externos. El modelo resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo no permanente, viscoso e incompresible usando la aproximación hidrostática para la presión. La solución numérica de las

ecuaciones se basa en el método semi-implícito de diferencias finitas desarrollado por Casulli y Cheng (Casulli & Cheng 1992).

Las ecuaciones hidrodinámicas que son utilizadas en el ELCOM, sin entrar en la descripción de las mismas (Hodges & Dallimore 2006) se detallan de la 1 a la 9:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ v_1 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_1} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ v_2 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_2} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ v_3 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3} \right\} - pdfilonpedfilon_{\alpha\beta} f U_\beta \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial x_\beta} = 0 \quad (3)$$

$$U_i = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (C U_j) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ x_1 \frac{\partial C}{\partial x_1} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ x_2 \frac{\partial C}{\partial x_2} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ x_3 \frac{\partial C}{\partial x_3} \right\} + S_c \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_\alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_0^\eta u_\alpha dz \quad (7)$$

$$(u_*)^2_a = C_{10} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} ((W_\beta W_\beta)_{1/2}) W_a \quad (8)$$

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} = \frac{(u_*)^2_a}{h} \quad (9)$$

donde U_j : representa las componentes de la velocidad (L/T); η : la altura de la superficie libre medida con respecto a un nivel de referencia asumido(L); ρ' : la densidad (M/V); ρ_0 : la densidad de referencia (M/V); v_1, v_2 y v_3 : los coeficientes de viscosidad turbulenta en dirección x , y y z (L/T) ; κ_1, κ_2 y κ_3 : los coeficientes de difusividad (para la salinidad, la temperatura o alguna otra sustancia según el caso) en direcciones x , y y z (1/T); S_c : las fuentes o sumidero del escalar transportado (P/VT) ; C : la concentración del escalar transportado; h : la profundidad de la capa con respecto al nivel de referencia asumido (L); C_{10} : el coeficiente de tensión de corte por el viento; W_y : la magnitud de la velocidad del viento en dirección (L/T) y ; W_x : la magnitud de la velocidad del viento en dirección x (L/T); ρ_{aire} : densidad del aire (M/V); ρ_{agua} : densidad del agua (de la capa superficial)(M/V); U : las velocidades de corte en la dirección x e y (L/T) (Montoya 2010).

Los procesos de simulación con el modelo ELCOM incluyen respuestas a flujos inducidos por cambios en la pendiente de la superficie del agua (respuestas barotrópicas), flujos inducidos por cambios en la densidad en cuerpos de agua no homogéneos (respuestas baroclínicas), efectos rotacionales, esfuerzos del viento, intercambio térmico superficial, caudales afluentes y efluentes y transporte de sal, calor y escalares pasivos (trazadores).(Hodges & Dallimore 2006) Este modelo se puede usar en conjunto con un módulo de calidad de aguas, CAEDYM, para simular el transporte tridimensional y la interacción física, química y biológica del flujo. (Hipsey 2013)

CAEDYM opera con cualquier paso de tiempo dentro del periodo diario para resolver los procesos de la fotosíntesis de algas (diurna y la respiración nocturna), y se ejecuta generalmente en el mismo intervalo de tiempo que el modelo hidrodinámico. Los algoritmos que resuelven de la salinidad incluyen una amplia gama de opciones para adecuar la simulación a la realidad. El usuario puede indicar si la simulación es de agua dulce, estuarios y aguas costeras.

El usuario puede elegir ejecutar varios pasos de tiempo hidrodinámicas antes de acoplarse a CAEDYM, aumentando así la velocidad de cálculo mediante la reducción del número de veces que el conjunto completo de variables de estado se vuelven a calcular a través del módulo de transporte hidrodinámico. En general, el paso de tiempo de horas es típico, 60 segundos en este trabajo, pues no se imponen restricciones de tiempo, afectando obviamente el tiempo de cálculo en la ejecución del modelo.

2.2 Datos y características de la simulación

El modelo se aplicó al periodo 2011-2012, partiendo de enero del año 2011, en oportunidad que el embalse se encontraba cerca de su nivel mínimo normal, cota de 275 m.s.n.m. (Perl & Andrés 2008). Fueron necesarios información y datos de tipo físicos, hidro-meteorológicos y aquellos provenientes de análisis de calidad del agua en el embalse y el río Colorado.

La batimetría digital del embalse se obtuvo a partir de las cartas, perfiles y mapas disponibles (IGM, Inst. Arg.de Oceanografía, específicas de la Hidroeléctrica) por vectorización de las curvas de nivel y rasterización posterior, usando software apropiados en cada etapa.

Se utilizaron los datos meteorológicos de la estación ubicada en el embalse Casa de Piedra, temperatura ambiente, humedad relativa y viento velocidad y dirección. Como no se poseían datos de radiación global se utilizaron los proporcionados por la estación meteorológica del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) ubicada en Contralmirante Guerrico - Allen -Río Negro, distante 100 km del embalse. Estos datos más los caudales en Buta Ranquil, ubicado aguas arriba, corregidos por el uso del agua en el riego de las zonas aguas arriba del ingreso al embalse y los caudales erogados, fueron utilizados para el modelo hidrodinámico ELCOM.

El embalse fue discretizado en celdas de 200 x 200 metros en el plano y 1 metro en el sentido *dz* o profundidad del lago. El intervalo de tiempo dado para la simulación fue de 600 segundos. Las condiciones de borde adoptadas para la simulación se pueden caracterizar de la siguiente manera:

- Altura del embalse con respecto al nivel máximo normal -5,7 m.
- El coeficiente de extinción para la banda de radiación apropiada para fotosíntesis (Photosynthetic Active Radiation, PAR) igual a 0,5, para la banda de radiación Ultravioleta A (UVA) igual a 1,0, la Ultravioleta B (UVB) 2,5 y para el Infrarrojo cercano 1,0.
- Flujo turbulento capa límite inferior (bottom boundary layer, BBL)

Por su parte las concentraciones de analitos y parámetros ingresados en el modelo CAEDYM son los registrados por EVARSA para Casa de Piedra en periodos trimestrales y en 5 sitios desde aguas arriba del embalse hasta el cauce a la salida de la presa, en la Figura 1 se posicionaron los puntos de monitoreo sobre el embalse. Las condiciones iniciales, tanto del estado físico como las concentraciones de constituyentes fueron tomadas de la campaña de medición correspondiente desde el 13 al 16 de diciembre de 2010.



Figura 1: Embalse Casa de Piedra.

La disponibilidad de datos observados es clave para abordar todo proceso de simulación. Se considera asimismo que el monitoreo si bien imprescindible, no es suficiente para el entendimiento del comportamiento integral del ecosistema, lo cual ha llevado a la aplicación de modelos.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

La simulación hidrodinámica del embalse permitió corroborar un ajuste satisfactorio de los volúmenes, alturas y áreas en relación a lo observado. Asimismo las temperaturas fueron comparadas con las observadas en las campañas trimestrales de marzo, junio, septiembre y diciembre.

Dado el inmenso número de valores numérico resultante de una corrida, el modelo cuenta con un dispositivo grafico que permite visualizar los resultados en una paleta de colores, generada por los valores numéricos de cada elemento dinamizados a través del tiempo, lo que facilita enormemente su interpretación. Esto puede visualizarse en planta (promedio de la columna) o en perfiles que el operador establezca.

Sin embargo, a efectos de comparar resultado con datos observados se han elaborados gráficos simples que permitan la contrastación para un determinado sitio y un determinado momento, dado obviamente por la fecha y lugar de las mediciones.

Se analizaron dos meses en particular, marzo donde el embalse es más homogéneo y en diciembre donde se encuentra más estratificado. Además, en estos meses se cuenta con los valores de las campañas de muestreo que se realizan trimestralmente. Y los sitios de muestreo elegidos fueron el SE3, en el centro del embalse y el sitio SE4 cercano a la presa, como muestra la Figura 1.

Solo se presentan en los resultados la simulación de marzo del 2011 en la estación SE3 y SE4, se muestra para los parámetros de calidad de agua temperatura, oxígeno disuelto y clorofila a, en las Figuras 2 y 3, respectivamente.

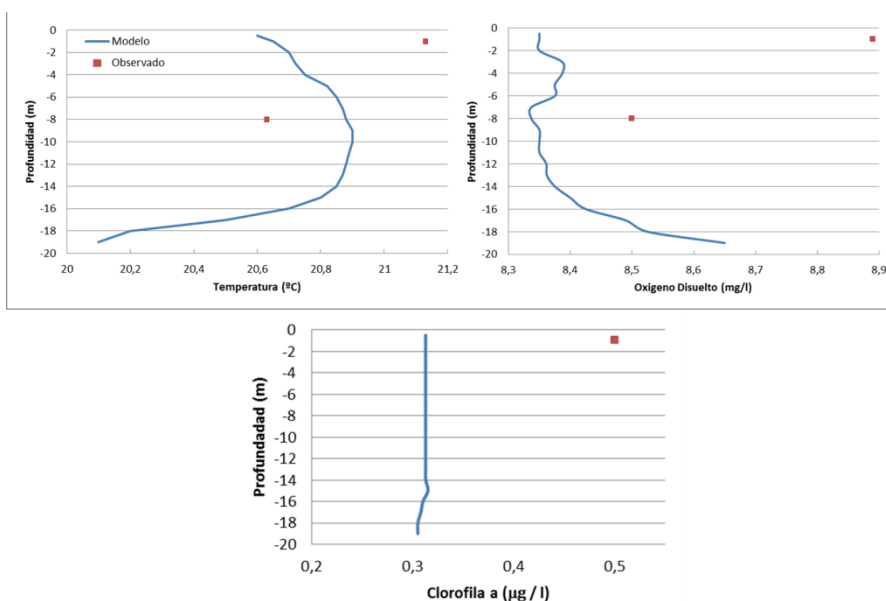


Figura 2: Comparación de valores observados y simulados en el sitio de muestreo SE3

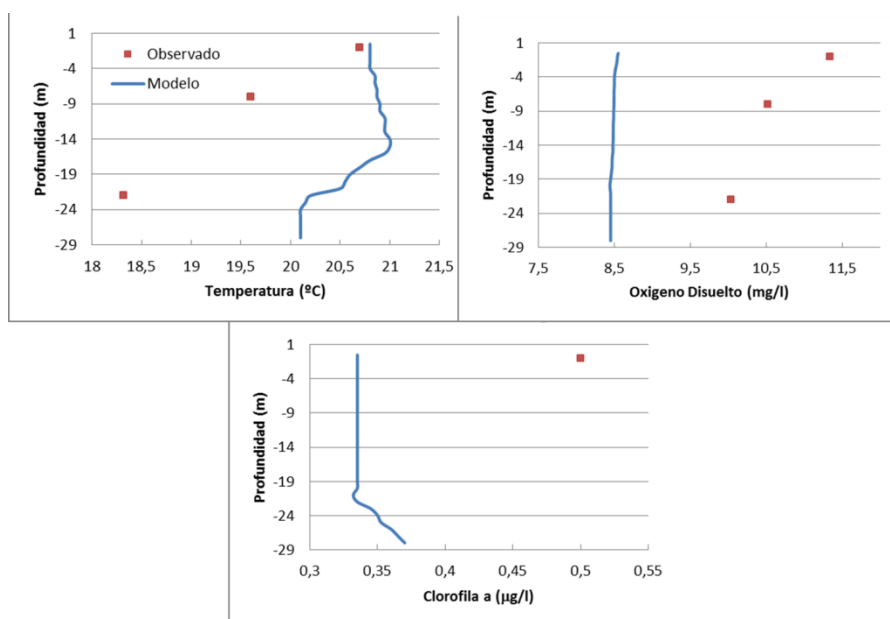


Figura 3: Comparación de valores observados y simulados en el sitio de muestreo SE4

A efectos de analizar consecuencias de escenarios de sequías posibles en el Embalse Casa de Piedra, se aplicó el modelo para simular dos años secos. Dado que el año 2012 fue un año considerado “seco” en comparación con la serie registrada de caudales históricos, se repitieron los caudales de ingreso del 2012 por 2 años. Este esquema fue preferido al que resultaría de generación sintética de años secos a partir de la serie histórica.

Comparando el mes de marzo de ambos años, es decir el 2012 registrado y el año 2012 “duplicado” como escenario seco, se obtuvieron las Figuras 4 (a) y (b), para los sitios SE3 y SE4 respectivamente.

En ambos sitios se observa un aumento de las concentraciones de clorofila a, para el segundo año del escenario seco.

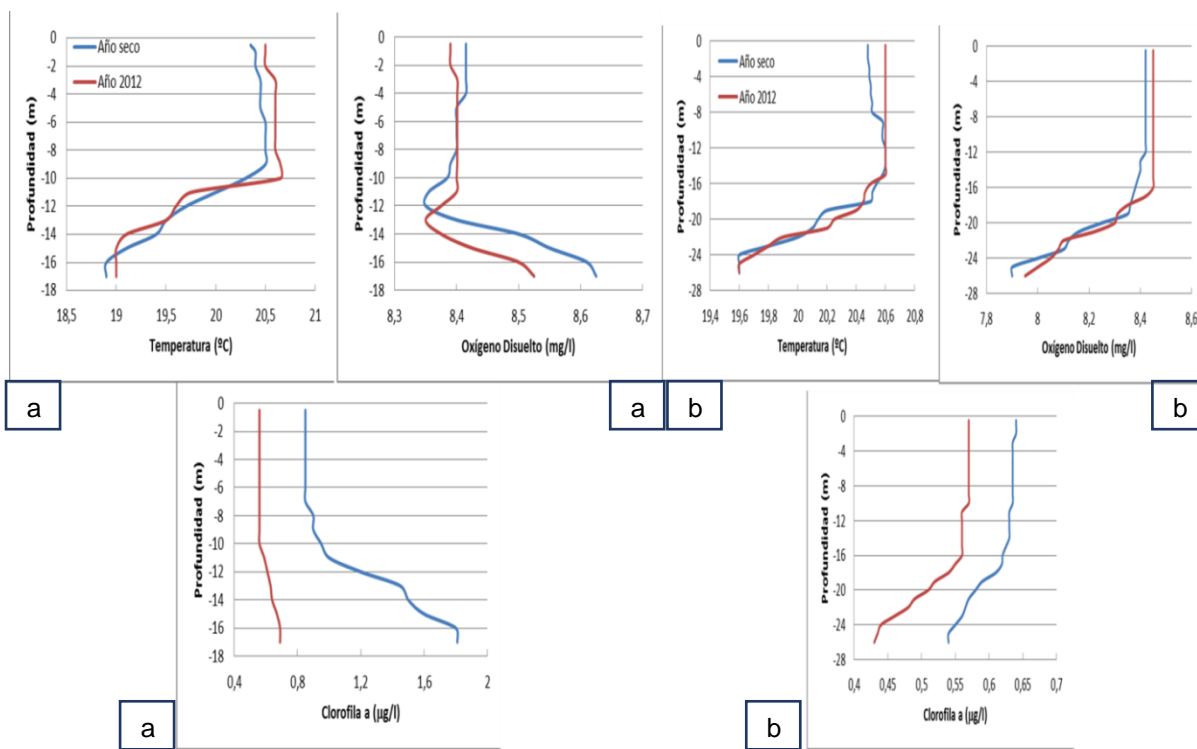


Figura 4: (a) Comparación de valores simulados en el sitio de muestreo SE3, (b) en el sitio de muestreo SE4

En el año 1997 se modeló en modo unidimensional el Embalse Casa de Piedra (Horne et al., 2001) a efecto de entender el comportamiento del embalse en el largo plazo, diagnosticar y pronosticar variaciones climáticas y eventuales derrames. Se puede observar resultados similares a los obtenidos en la simulación 3D y confirmar las conclusiones obtenidas en aquella oportunidad. Algunos de los resultados obtenidos se ven en las siguientes figuras.

Las temperaturas calculadas y observadas en noviembre de 1997 en la Figura 5 (a) y el oxígeno disuelto en profundidad para el mes de octubre del mismo año en la Figura 5 (b).

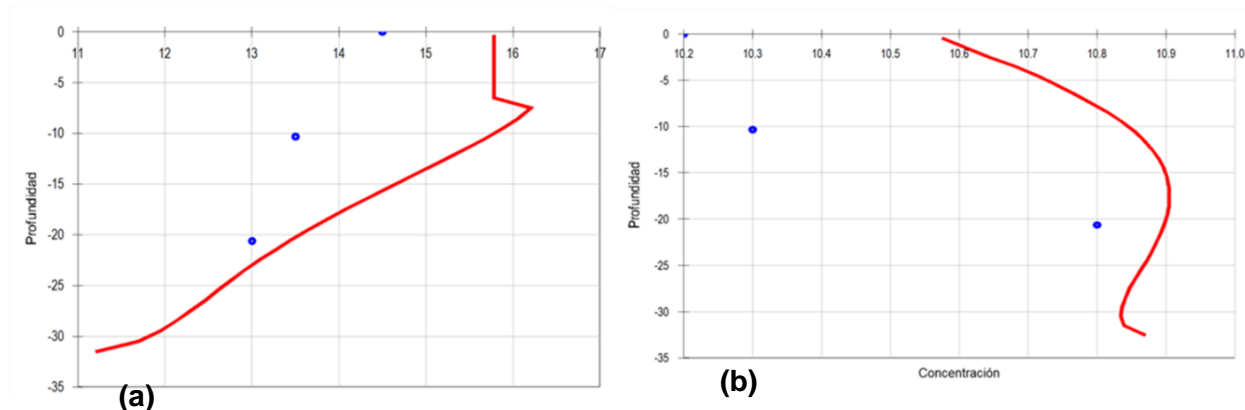


Figura 5: (a) Temperatura en Centígrados vs. Profundidad en metros, (b) OD en mg/l vs. Profundidad en metros

La comparación de valores observados y calculados permite afirmar que se asemejan en magnitud si se tiene en cuenta lo detallado de la escala de concentraciones de las abscisas y la variación que presentan estos constituyentes en su serie histórica.

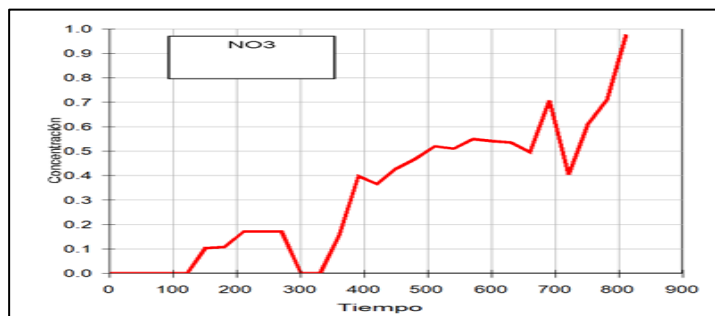


Figura 6: Comportamiento del NO₃ a 1.5 m de profundidad

De la experiencia obtenida en ambos modelamientos (1D y 3D), se puede afirmar que el ritmo del proceso de eutrofización del embalse se ve aumentado en años secos, al igual que la acumulación de biomasa. En la Figura 6 se observa el incremento de nitrato durante los 2 años de sequía.

El resultado del modelamiento del año 1997 fue de gran utilidad para el diseño del Plan de Monitoreo, para el pronóstico de la calidad del embalse ante diferentes escenarios de desarrollo regional simulados, para la toma de decisión ante eventuales derrames o situaciones hidrológicas extremas, para identificar los constituyentes que se tornan críticos y sus consecuencias. Asimismo define el criterio de la operación más beneficiosa para el ambiente aguas abajo del aprovechamiento.

El modelamiento en 3D constituye una herramienta valiosa para analizar situaciones en localizaciones que no responden al comportamiento “medio” del embalse, como bahías con dinámicas locales o áreas de escasa profundidad. En tal sentido, esto requiere como primer paso analizar el comportamiento general del modelo en relación a los datos medidos, lo cual ha sido satisfactorio.

2.3 Variaciones espaciales

Las variaciones espaciales propias de la dinámica del embalse, es uno de los aspectos más importante que resulta del modelamiento 3D. Dada la salida grafica del modelo, es posible ver en modo “movie” las variaciones de cualquier constituyente a lo largo del tiempo simulado. Así es relevante la diferencia de concentraciones que toman los constituyentes en diferentes sitios y momentos del año, afectando la calidad del agua. Se puede identificar de antemano resultados de muestreos de acuerdo al sitio seleccionado, pudiéndose obtener “buena” calidad del agua si se seleccionan ciertos sitios o “mala” en otros. Esto permite establecer los mejores locaciones para extraer agua potable, o sitios aptos para recreación por su mejor condición de calidad, sitios críticos para la fauna piscícola por el contenido de oxígeno en determinados momento, establecer estaciones de monitoreo, etc.

Se presentan en las Figuras 7, 8, 9,10 y 11, algunas salidas del año 2014 a los efectos ilustrativos.

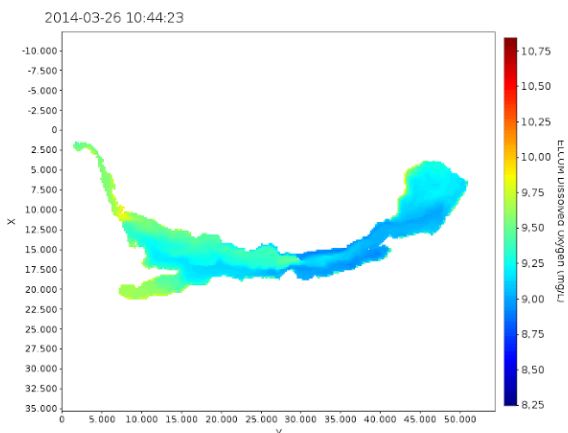


Figura 7: Oxígeno Disuelto (OD).

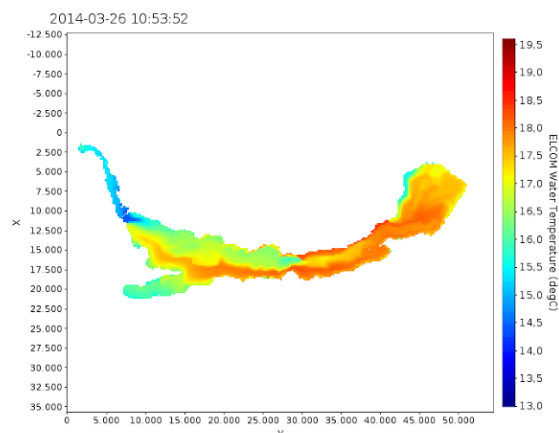


Figura 8: Temperatura

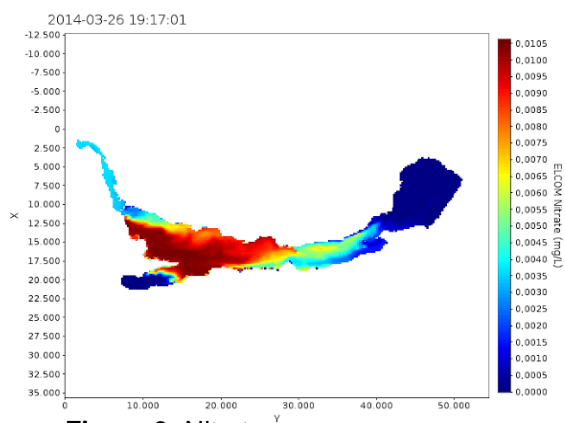


Figura 9: Nitrato

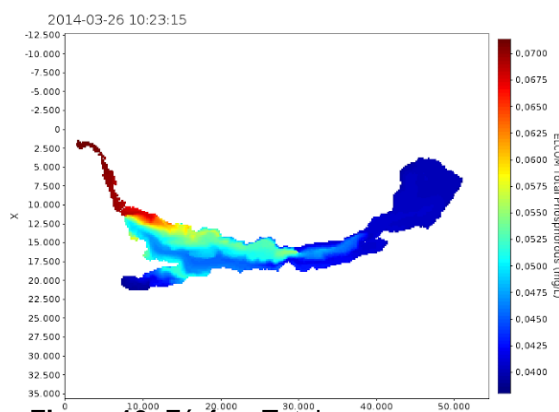


Figura 10: Fósforo Total

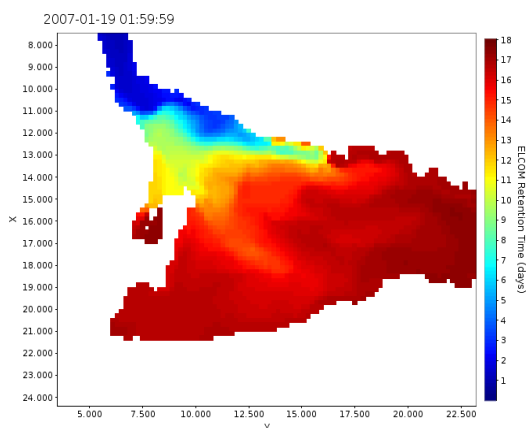


Figura 11: Distribución de tiempos De retención a la entrada del embalse.

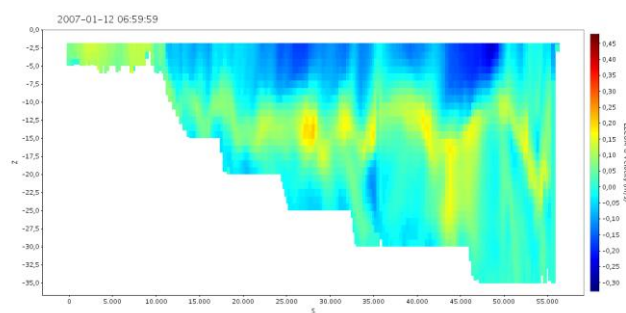


Figura 12: Distribución de velocidades verticales Sobre el eje del embalse

CONCLUSIONES

1. El modelamiento 3D resulta posible y ajusta a los valores puntuales medidos con razonable acercamiento. La veracidad de los resultados en sitios marginales deben ser validados con observaciones en esas localidades
2. El modelamiento resulta un necesario **suplemento al monitoreo** estándar en los embalses y lagos, además de re-interpretar los datos observados, explica la dinámica del embalse contribuyendo así a definir una **política de manejo** ambiental sustentable
3. El modelamiento 3D resulta posible y ajusta a los valores puntuales medidos con razonable acercamiento.
4. Las conclusiones obtenidas de la modelación 1D pueden convalidarse con el 3D.
5. Se considera muy promisorio el modelamiento 3D para el análisis del comportamiento espacial del embalse, ventaja de esta herramienta respecto de la 1D
6. Dado el conocimiento espacial de la dinámica del embalse simulado, se espera poder minimizar el monitoreo, en número de sitios observados y en frecuencia.

Agradecimientos

Al CWR, Centre for Water Research, University of Western Australia, el cual proporcionó los modelos utilizados, y ayuda para resolver inconvenientes en la simulación. Al ente Embalse Casa de Piedra que proporcionó los datos utilizados y su mirada a través de los años de funcionamiento. Al INTA por proporcionar los datos de su estación meteorológica. Al Instituto de Tierras, Agua y Medio Ambiente (ITAMA) por colaboración de investigadores en calidad de agua.

REFERENCIAS

- Beascochea, J.J. (2013). *"Embalse Casa de Piedra: La situación es crítica."* Plan B Noticias. Available at: http://www.planbnoticias.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=16600:embalse-casa-de-piedra-la-situacion-es-critica&catid=34:provinciales&Itemid=73 [Accessed April 21, 2013].
- Casulli, V. & Cheng, R.T. (1992). *"Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow."* International Journal for Numerical Methods in Fluids, 15(6), pp.629-648.
- Hipsey, M.R. (2013). *"Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model : CAEDYM"* v3.3 User Guide (DRAFT).
- Hodges, B. & Dallimore, C. (2006). *"Estuary , Lake and Coastal Ocean Model : ELCOM"* v2 . 2 Science Manual.
- Horne, F., C. Dufilho, G. Polla, S. Stangaferro, A. DallArmellina. Modelamiento matemático del embalse Casa de Piedra, río Colorado (Argentina) para formular el programa de gestión ambiental. IV Taller Internacional sobre enfoques regionales para el desarrollo y gestión de embalses. Salto Grande, Uruguay. 2006.
- Horne, F, Dufilho, C., Polla, G., Stangaferro, S., "Gestión ambiental y modelación matemática, caso estudio: Embalse Casa de Piedra". Seminario Internacional sobre Gestión Ambiental e Hidroelectricidad – Cambio hacia la sustentabilidad. Salto Grande, Argentina – Uruguay. 19 – 22 sep. 2001.
- Horne, F, C. Dufilho S.Stangaferro, G. Polla, A. Dal Armelina . "Programa De Gestión Ambiental Del Embalse Casa De Piedra, Río Colorado". III Taller sobre Gestión de Embalses. Autor. Posadas Misiones, 2001
- Mariani, D. et al. (2011). *"El agua en La Pampa: Introducción a la problemática hídrica"*, Santa Rosa.
- Montoya, J.L.J. (2010). *"Dinámica oceanografica del golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersion de contaminantes y sedimentos"*. Universidad Nacional de Colombia.
- Perl, J.E. & Andrés, F.O., (2008). *"Operación del primer embalse dentro del programa de aprovechamiento integral de la cuenca del río Colorado (Argentina)"*, Bahía Blanca.
- Quirós, R., (2000). *"La eutrofización de las aguas continentales de Argentina"*,