

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PRONÓSTICOS DE LA CALIDAD DEL EMBALSE CASA DE PIEDRA MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA 3D

Federico E. Horne, Maite N. Elissalde

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue

Ruta 151 – Cinco Saltos (Río Negro) Tel.(0299) -4980005 Telefax (0299) -4982200 E-mail maiteelis@gmail.com

RESUMEN

El embalse estudiado, Casa de Piedra (55 kilómetros de largo, 360 km² de superficie y el 4.000 hm³) se ubica sobre el Río Colorado, a 110 km aguas abajo de la ciudad de 25 de Mayo y a 100 km aguas arriba de la ciudad de La Japonesa, ambas de la provincia de La Pampa.

La escasez de nieve en la alta cuenca del río Colorado en el actual invierno y por ende los caudales entrantes al embalse, sumado los requerimientos de erogación fundamentalmente por riego y dilución por salinidad demandado en la cuenca inferior, han resultado en muy bajas reservas y niveles (históricos) del embalse.

Con el propósito de analizar las consecuencias de escenarios de años secos en la dinámica se aplicó un modelo y se estimaron temperaturas, ritmo de eutrofización, y niveles de concentración de constituyentes. Se utilizó un modelo hidrodinámico tridimensional (ELCOM) al embalse Casa de Piedra, al cual se acopló a un modelo de calidad de agua (CAEDYM). En primer lugar, se simuló 21 meses comprendidos entre el año 2011 y 2012 para calibrar el modelo, con resultados satisfactorios, reproduciendo el rango de variación y la tendencia espacial para los constituyentes observados.

Posteriormente se simuló escenarios críticos para evaluar la consecuencia esperable de dos años secos consecutivos, donde se observó el incremento en las concentraciones de los parámetros de calidad marcando una mayor tendencia a la eutrofización del embalse.

Los resultados también se compararon con las conclusiones obtenidas de haber aplicado un modelo 1D en 1997, con los cuales hubo significativa concordancia.

Palabras clave: embalse, calidad de agua, modelo matemático.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del Río Colorado, desde las nacientes de los ríos Grande y Barrancas, hasta su desembocadura en el océano Atlántico, presenta asentamientos poblacionales y desarrollo de actividades productivas sobre ambas márgenes. Sus aguas abastecen las necesidades de consumo humano en dichos asentamientos y áreas de regadío de las provincias ribereñas, que en la actualidad superan las 134.000 hectáreas. Esto constituye la base de la producción cerealera, forrajera, frutícola, hortícola, vitícola y ganadera en la cuenca.

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 $148 \text{ m}^3/\text{s}$. 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 $85 \text{ m}^3/\text{s}$. (Perl & Andrés 2008)

Actualmente existe una situación crítica en el Embalse Casa de Piedra, porque desde el 2005 en adelante se acumulan mermas en la disponibilidad de nieve en altas cuencas, que se traduce en un menor caudal para el río Colorado, cuyo aporte de agua año a año es de 4.500 hm^3 , por lo que hace unos seis años que se está por debajo de esa media. (Beascochea 2013). Como se mencionó, debido a la situación climática las reservas que había en el embalse Casa de Piedra han disminuido 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. 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 es aplicar la modelación matemática en 3D, validarla con las observaciones periódicas, analizar la dinámica para años secos y comparar las conclusiones con las obtenidas 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).

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

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).

En la Figura 1 son mostradas las ecuaciones hidrodinámicas que son utilizadas en el ELCOM, sin entrar en la descripción de las mismas (Hodges & Dallimore 2006):

Transporte de momento:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ \nu_1 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_1} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ \nu_2 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_2} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ \nu_3 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3} \right\} - \rho \beta \Delta \eta_\alpha \beta f U_\beta$$

Continuidad:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0$$

Condiciones de borde de momento en superficie libre:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3} = 0$$

Condiciones de borde de momento en fondo y lados:

$$U_i = 0$$

Transporte de escalares:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (C U_j) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ \kappa_1 \frac{\partial C}{\partial x_1} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ \kappa_2 \frac{\partial C}{\partial x_2} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ \kappa_3 \frac{\partial C}{\partial x_3} \right\} + S_c$$

Condiciones de borde de escalar:

$$\frac{\partial C_\alpha}{\partial x_j} = 0$$

Evolución de la superficie libre:

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

Viento en superficie libre:

$$(u_\alpha)_\alpha^2 = C_{10} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} (W_\beta W_\beta)^{\frac{1}{2}} W_\alpha$$

Aporte al momento por el viento:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} = \frac{(U_\alpha)_\alpha^2}{h}$$

Figura 1: Ecuaciones Hidrodinámicas

donde U_α representa las componentes de la velocidad; η la altura de la superficie libre medida con respecto a un nivel de referencia asumido; ρ' la densidad; ρ_0 la densidad de referencia; ν_1, ν_2 y ν_3 los coeficientes de viscosidad turbulenta en dirección x , y y z ; 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 ; S_c las fuentes o sumidero del escalar transportado; C la concentración del escalar transportado; h la profundidad de la capa con respecto al nivel de referencia asumido; C_{10} el coeficiente de dragado del viento; W_β la magnitud de la velocidad del viento en dirección y ; W_α la magnitud de la velocidad del viento en dirección x ; ρ_{aire} densidad del aire; ρ_{agua} densidad del agua (de la capa superficial); U_α^* las velocidades de corte en la dirección x e y . (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. (Hipse 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.

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 2 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 2: Embalse Casa de Piedra.

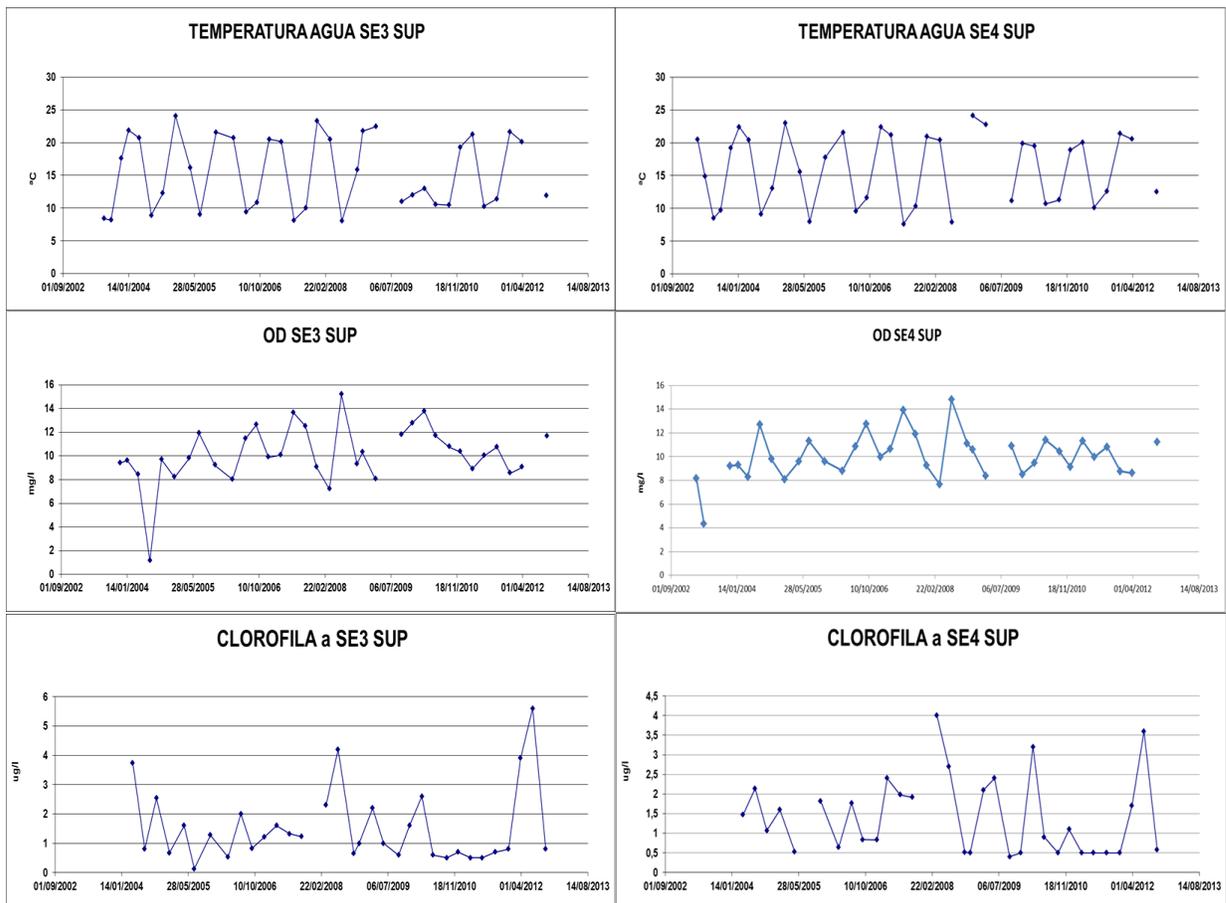


Figura 3: Valores históricos de los parámetros

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.

Las variaciones a lo largo de los años en diferentes parámetros se muestran en la Figura 3. Esta imagen presenta las variaciones de la temperatura, del oxígeno disuelto y de la clorofila a en las estaciones de muestreo SE3 y SE4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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 gráfico 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.

Los resultados que se observan en la Figura 4, se corresponden con el promedio de temperatura de celdas que conforman cada columna vertical de elementos, expresados en paleta de colores. Se corresponde con la simulación del día 16 de enero 2011. Esta es una muestra en imágenes de la película gráfica donde se puede observar el cambio de temperatura a través del tiempo.

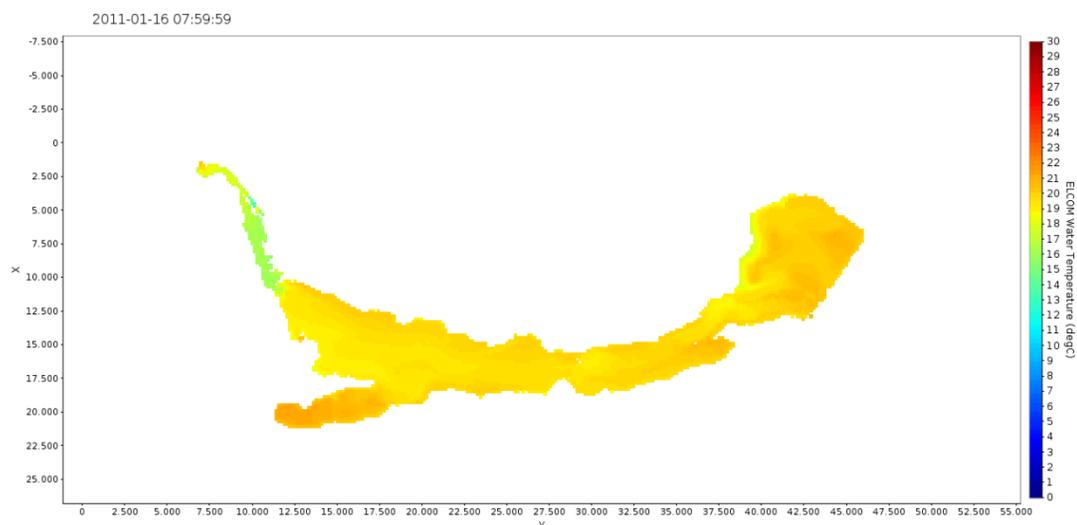


Figura 4. Temperaturas medias simuladas para el 16 enero 2011

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 2.

El mes de simulación 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 5 y 6, respectivamente.

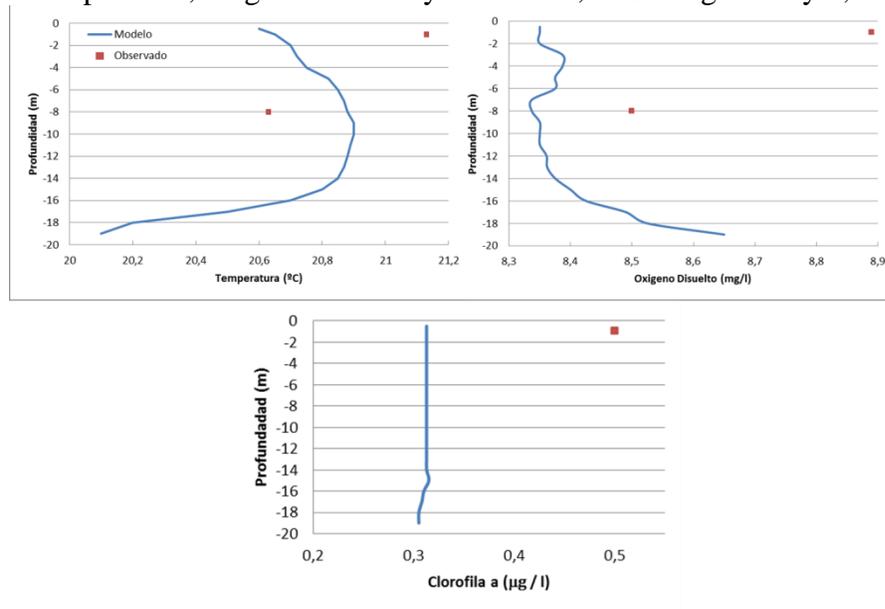


Figura 5: Comparación de valores observados y simulados en el sitio de muestreo SE3

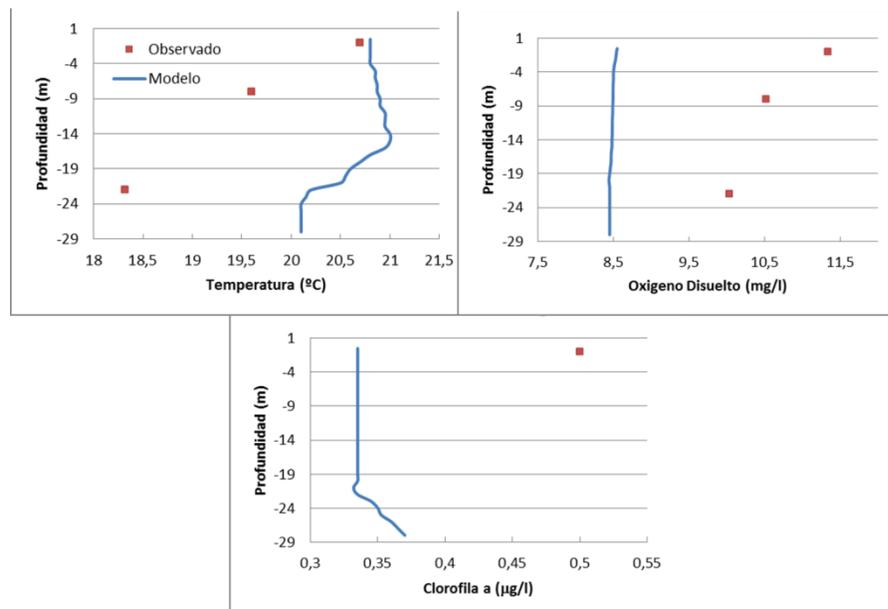


Figura 6: Comparación de valores observados y simulados en el sitio de muestreo SE4

Pasando al mes de diciembre de 2011 vemos la estratificación en las Figuras 7 y 8 en ambos sitios de muestreo.

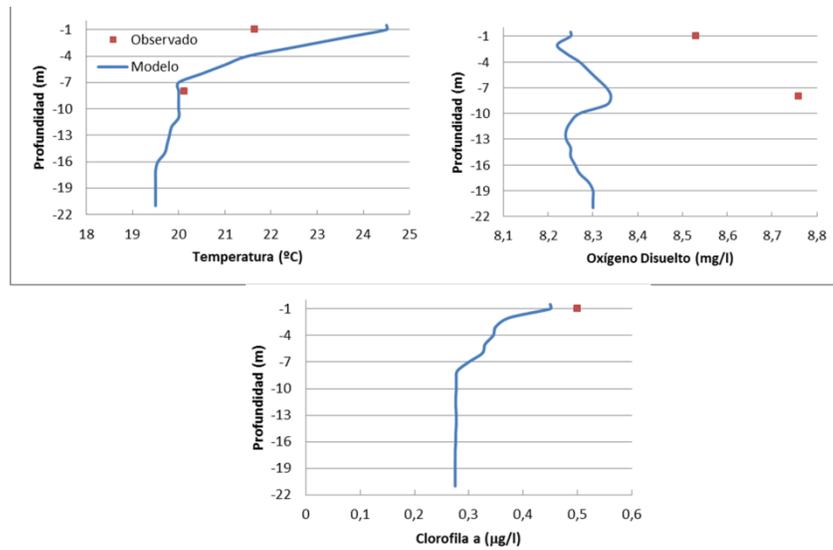


Figura 7: Comparación de valores observados y simulados en el sitio de muestreo SE3

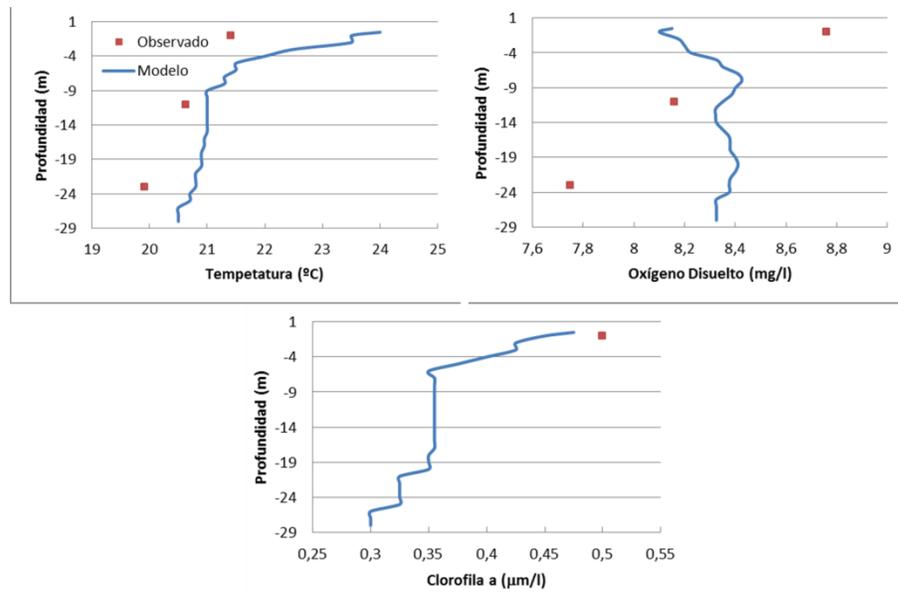


Figura 8: Comparación de valores observados y simulados en el sitio de muestreo SE4

Resultados del mes de marzo del año 2012 se presentan en las Figuras 9 y 10 con los valores puntuales observados en las campañas de medición.

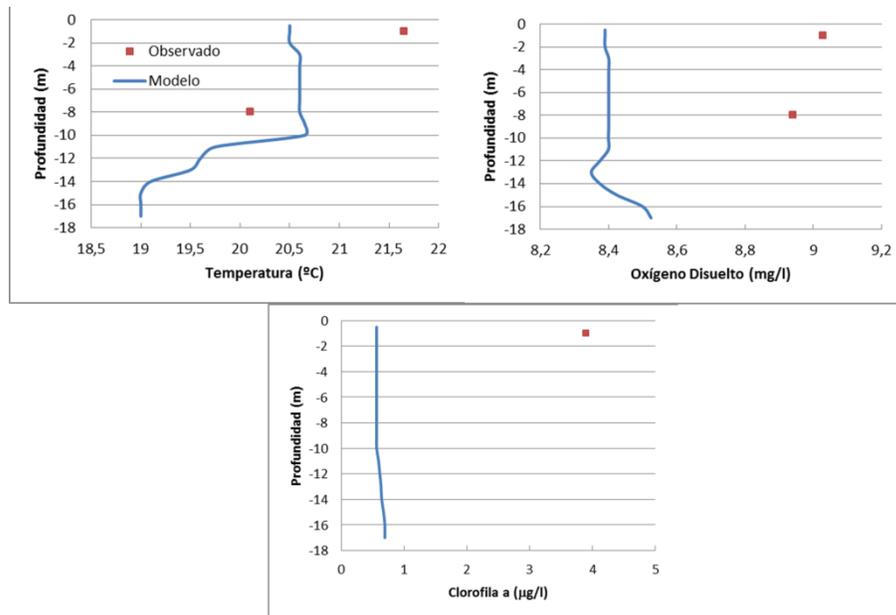


Figura 9: Comparación de valores observados y simulados en el sitio de muestreo SE3

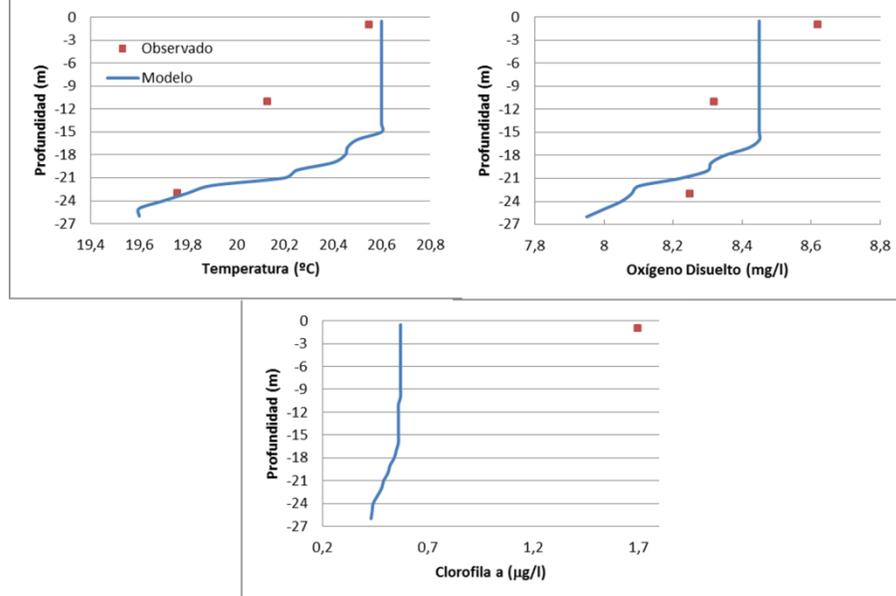


Figura 10: Comparación de valores observados y simulados en sitio de muestreo SE4

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 2011 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 y el año 2012 escenario seco, se obtuvieron las Figuras 11 (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 seco.

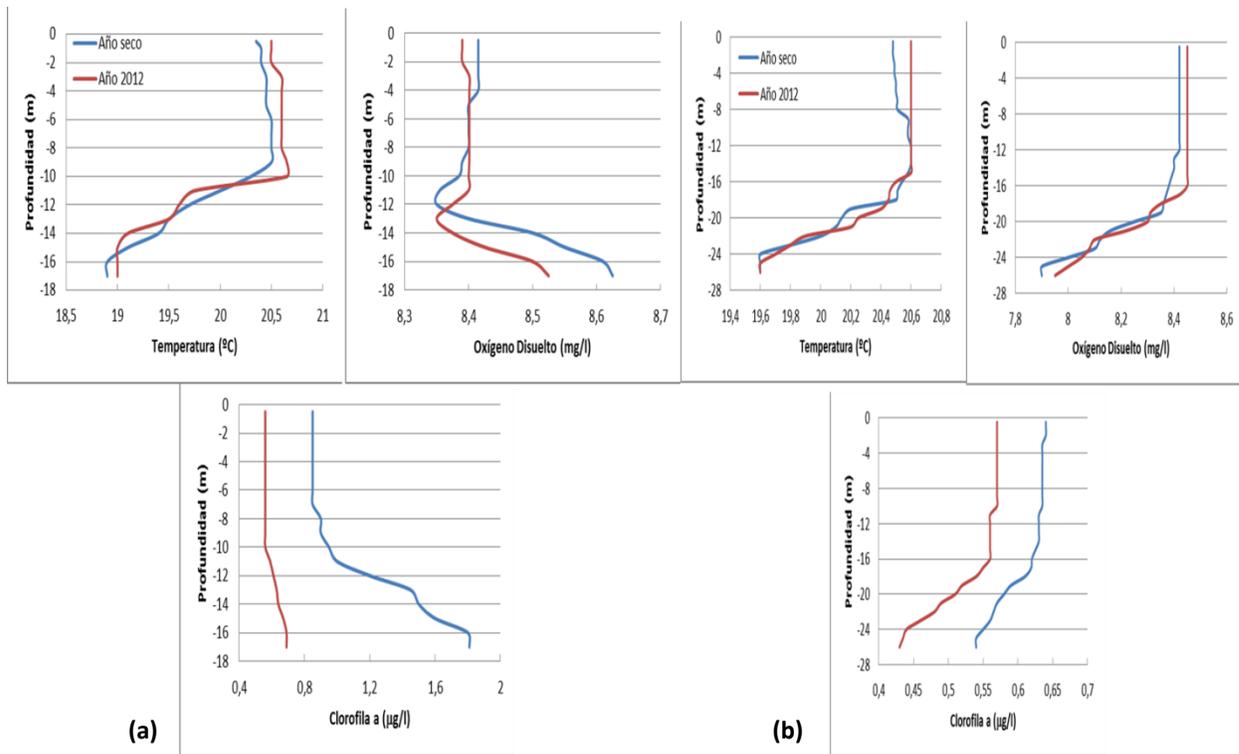


Figura 11: (a) Comparación de valores simulados en el sitio de muestreo SE3, (b) en el sitio de muestreo SE4

En el año 1997 se modeló en modo unidimensional el Embalse Casa de Piedra (Horne et al. 2002) 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 12 (a) y el oxígeno disuelto en profundidad para el mes de octubre del mismo año en la Figura 12 (b).

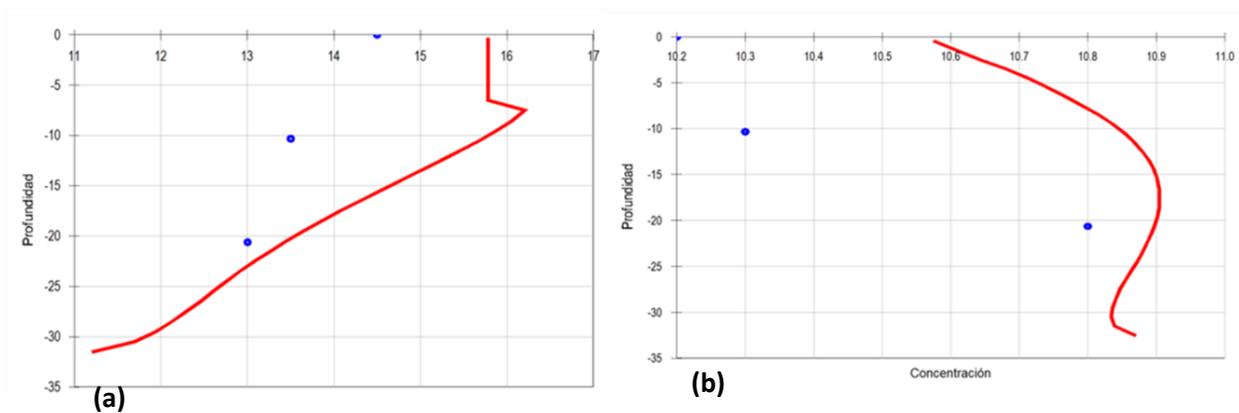


Figura 12: (a) Temperatura en Centígrados vs. Profundidad en metros, (b) OD en mg/l vs. Profundidad en metros

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. No obstante es parte del desarrollo y trabajo futuro lograr un mayor acercamiento y explicación de las diferencias encontradas. Asimismo es importante la tendencia entre lo calculado y observado, en profundidad (en general espacialmente) y en el tiempo.

El perfil de temperatura de diciembre muestran un embalse estratificado con termoclina ubicada alrededor de los 4 metros de profundidad, profundizándose en marzo, previo a la rotación anual

Se aprecia un mejor ajuste de los resultados del 2do año de simulación que en el primer año. Esto puede responder a que los valores iniciales asignados al embalse fueron los promedios de las mediciones para las estaciones observadas. Dada las características de forma y variación de profundidad del embalse, estos valores pueden no ser representativos de la condición “media” del embalse. Dado que se trata de una simulación 3D estos desvíos espaciales iniciales pueden ir atenuándose a lo largo del tiempo.

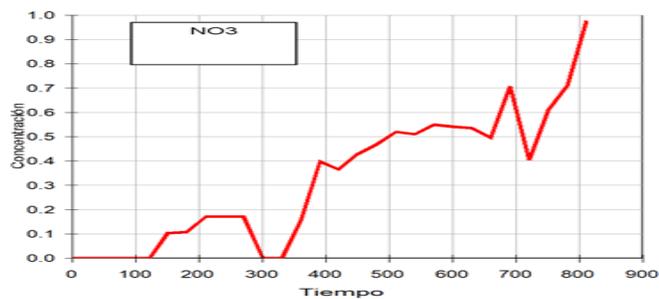


Figura 13: Comportamiento del NO₃ a 1.5 m de profundidad

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 13 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.

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. La veracidad de los resultados en sitios marginales deben ser validados con observaciones en esas localidades
4. Las conclusiones obtenidas de la modelación 1D pueden convalidarse con el 3D.
5. Se requiere continuar el trabajo de modelación para mejorar el ajuste y poder interpretar las razones en el comportamiento del embalse, tanto hidrodinámico como de la dinámica del ecosistema
6. Se considera muy promisorio el modelamiento 3D para el análisis del comportamiento espacial del embalse, ventaja de esta herramienta respecto de la 1D
7. 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 los datos de calidad de agua.

BIBLIOGRAFÍA

- 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. et al.,** (2002). *"Modelo matemático calidad embalse"*.
- Mariani, D. et al.** (2011). *"El agua en La Pampa: Introducción a la problemática hídrica"*, Santa Rosa.
- Montoya, J.L.J.** (2010). *"Dinámica oceanográfica 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"*,