

Simulación numérica de la estructura térmica del embalse Porce II en Colombia

Beatriz Villegas
Mauricio Toro

Universidad Nacional de Colombia

Néstor Aguirre
Jaime Palacio

Universidad de Antioquia, Colombia

Se presenta una metodología para simular la estructura térmica del embalse Porce II. El desarrollo del trabajo se fundamenta en el uso del modelo numérico Elcom, desarrollado por el Centro para el Estudio del Agua (CWR) de la Universidad del Oeste de Australia. Las mediciones de campo utilizadas fueron tomadas por la universidad de Antioquia (2002). Durante la fase de calibración se compararon perfiles de temperatura medidos y simulados en nueve estaciones de monitoreo y se encontraron dos parámetros principales: la temperatura del afluente principal (río Porce) y la distribución espacial del viento. En general, los perfiles simulados fueron siempre más fríos que los medidos. La forma de estos perfiles muestra un ambiente acuático estratificado (sin mezcla). Se presenta, además, la simulación de la estructura térmica del embalse durante un ciclo de 24 horas, en donde se compararon perfiles de temperatura medidos y simulados en tres estaciones de monitoreo. Se encontró una alta correspondencia entre perfiles medidos y simulados. Sin embargo, durante las horas de luz diurna, el embalse simulado es más frío que el medido. Los perfiles de temperatura del agua localizados en la zona léntica del embalse permanecen con la misma forma durante el ciclo de 24 horas, sugiriendo que no hubo suficiente enfriamiento convectivo durante la noche para mezclarlo. Se construyeron mapas de estratificación térmica a partir de los datos simulados durante de calibración, para mostrar el tipo de resultados que pueden alcanzarse usando esta metodología.

Palabras clave: estructura térmica, simulación, numérica, embalse, perfiles, temperatura.

Introducción

La aplicación de modelamiento numérico a la solución de problemas de ingeniería es ahora una práctica común en todo el mundo. Estos modelos y su asociado *software* especializado hacen hoy posible el estudio de muchos fenómenos naturales antes imposibles de manejar. A través del estudio de la estructura térmica de una gran masa de agua se puede determinar la existencia de gradientes estables de temperatura; la presencia de perfiles térmicos estables influye en los procesos de intercambio de gases disueltos y nutrientes entre las diferentes capas de agua, especialmente en lo referente a la disponibilidad de nitrógeno y fósforo. Este proceso químico se relaciona directamente con la producción bioló-

gica en la zona eufótica del cuerpo de agua y, a su vez, con el fenómeno de eutroficación. La calidad de aguas, entonces, es asociada con el fenómeno de eutroficación y el manejo de este último se fundamenta en el conocimiento básico de la estructura térmica del embalse y en el movimiento de los nutrientes en la columna de agua mientras ésta se mezcla.

En el caso de un embalse tropical típico, como el investigado a través de este artículo (Porce II), el embalse se comporta como un gran colector de sustancias de origen orgánico e inorgánico provenientes de sus afluentes. El represamiento de esta agua en el embalse incrementa el deterioro de la calidad del agua (malos olores y corrosión de equipos, entre otros) y estimula el crecimiento masivo de especies fitoplanctónicas. El proceso

de transporte y distribución de los contaminantes y nutrientes que ingresan al embalse están asociados con la estructura térmica de la masa de agua.

Debido a todo lo anterior, el primer paso a seguir en el estudio de problemas de calidad de agua en embalses como el presentado aquí es entender su hidrodinámica y estructura térmica. Para lograr esta meta, se presenta una metodología para ser usada cuando un modelo numérico es escogido como herramienta principal en el análisis de datos de campo. Como se precisará, antes de que el significado físico de los resultados de un modelo sea útil, tienen que resolverse primero algunos aspectos relacionados con el modelo numérico.

El modelo Elcom (*Estuary and Lake Computer Model*) fue seleccionado entre un grupo de modelos de características similares debido a que, además de ser la mejor herramienta disponible para la simulación de ambientes lacustres, ha sido exitosamente utilizado en ambientes tropicales como el lago de Maracaibo, Venezuela, en estudios para el manejo del sistema de calidad de agua en el lago Kinneret, Israel, en la exploración de medidas de restauración en el lago Pamvotis, Grecia, y en el estuario del río Swan, Australia.

El modelo Elcom

El modelo Elcom es una herramienta de modelamiento numérico tridimensional para lagos y embalses desarrollada por el Centro de Estudios del Agua (*Center for Water Research, CWR*) de la Universidad del Oeste de Australia. Esta herramienta usa módulos hidrodinámicos y termodinámicos para simular, bajo forzamientos ambientales externos (viento, gradientes de densidades, mareas, afluentes, etcétera), el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua estratificados, usando como parámetros del modelo velocidades, niveles de agua, y distribuciones de salinidad y temperatura. Los módulos hidrodinámicos resuelven 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 fundamentales se basa en un método semi-implícito de diferencias finitas desarrollado por Casulli y Cheng (1992). El modelo simula los esfuerzos verticales de Reynolds en las ecuaciones de *momentum* y transporte usando una aproximación tridimensional de capas de mezcla derivada de un presupuesto de energía de mezcla desarrollado para la simulación unidimensional de lagos (Imberger y Petterson, 1981).

Los procesos implementados en el modelo incluyen respuestas a efectos barotrópicos, baroclínicos y rotacionales, esfuerzos del viento, intercambio térmico su-

perficial, caudales afluentes y efluentes, y transporte de sal, calor y escalares pasivos. Este modelo puede ser usado en conjunto con un módulo de calidad de aguas CAEDYM para simular el transporte tridimensional y la interacción física, química y biológica del flujo.

Una completa descripción del modelo Elcom se puede consultar en el *Model Scientific Manual* (CWR, 2002).

Una simulación requiere de parámetros geométricos, condiciones iniciales y de borde, así como también de parámetros de configuración y de control que deben proveerse en la forma de archivos de entrada. Una completa descripción de este proceso puede consultarse en el *Elcom User's Manual* (CWR, 2002).

Localización del proyecto y datos de campo

El proyecto hidroeléctrico Porce II se localiza en el departamento de Antioquia, Colombia, a 120 kilómetros de la ciudad de Medellín (ilustración 1); su principal fuente de abastecimiento es el río Porce, que nace en el alto de San Miguel a los 2,660 metros sobre el nivel del mar (msnm) y desciende atravesando el centro del departamento de Antioquia en dirección noreste hasta desembocar en el río Nenchí, afluente del río Cauca, después de 232 kilómetros. En sus primeros sesenta kilómetros, este afluente se conoce como río Medellín y se caracteriza por ser el medio de transporte de una gran carga de material orgánico y particulado procedente del área metropolitana del departamento de Antioquia, que tiene una población de cerca de dos y medio millones de habitantes, y una industria pesada en textiles, entre otras.

El efecto del embalse sobre estas aguas está agravando las ya pobres condiciones de calidad del agua del río, de por sí delicadas, debido a las altas temperaturas dominantes en la región (media mensual de la temperatura del aire: 28 °C). La presa del proyecto, de 123 m de altura, genera un lago de 229 millones de metros cúbicos. La conformación del embalse es bastante encañonada y con condiciones climatológicas propias de un clima cálido y húmedo. La cuenca tiene una extensión de 3,020 km² y el río Porce alimenta el embalse con una descarga promedio de 113.6 m³/s. La precipitación anual de la cuenca tiene un régimen bimodal, con un rango comprendido entre los 2,300 a 3,000 mm con la estación seca, entre los meses de noviembre y mayo, y la estación lluviosa entre abril y octubre. Julio y agosto son moderadamente secos. La velocidad superficial del viento tiene una distribución uniforme a lo largo del año, con un promedio diario comprendido entre los 0.3 y 2.0 m/s.

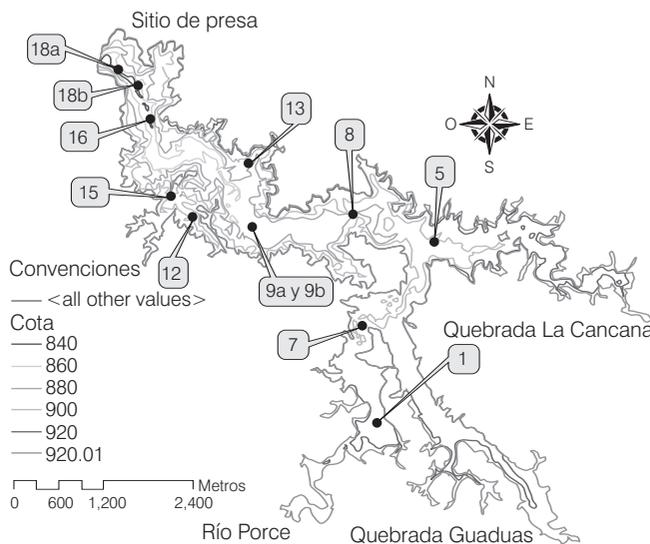
La batimetría del área de estudio se procesó en formato digital usando la aplicación ArcGis; por medio de este *software* se obtuvieron diferentes resoluciones

Ilustración 1. Localización del área de estudio.



de tamaño de malla (100, 150 y 200 m) y se localizaron diez estaciones de control. En la ilustración 2 se muestra la zona del embalse y la localización de las estaciones de control seleccionadas para el análisis de sensibilidad realizado con el modelo Elcom.

Ilustración 2. Área del embalse y localización de estaciones de control y monitoreo.



Para la simulación numérica relacionada con el análisis de sensibilidad inicial, se definió una serie de parámetros físicos considerados como valores promedios (típicos) en el embalse. Estos parámetros fueron estimados a partir de la información disponible y se listan en el cuadro 1. Una distribución diaria típica de radiación solar muestra una función en forma de campana invertida, con un valor máximo cercano a los 100 W/m² al mediodía. La temperatura del aire se comporta de forma similar al ciclo de radiación solar.

El dueño del proyecto (Empresas Públicas de Medellín) suministró dos meses (octubre y noviembre de 2001) de información hidrológica, meteorológica y operativa del proyecto hidroeléctrico Porce II para la aplica-

Cuadro 1. Parámetros físicos usados en la fase de análisis de sensibilidad.

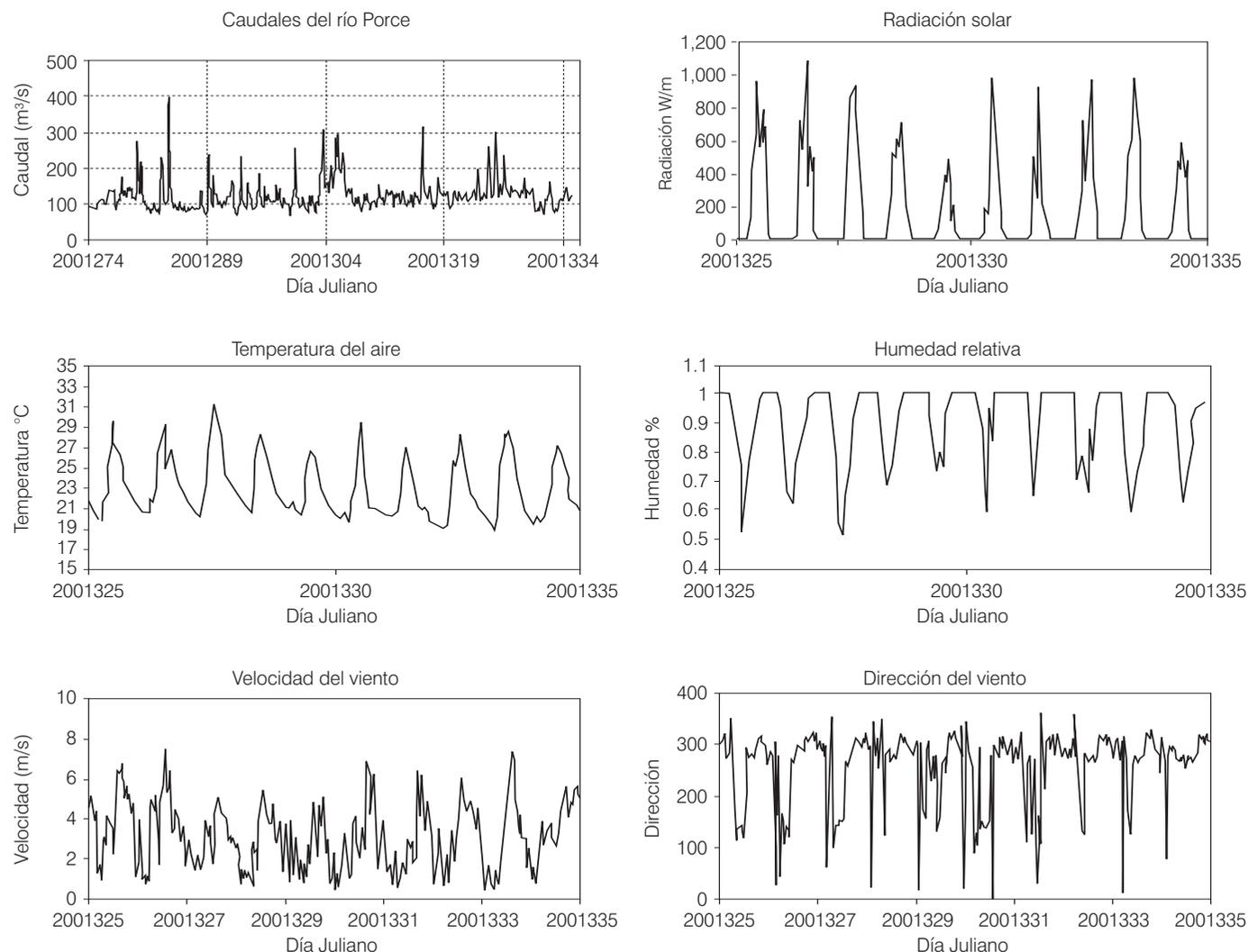
Parámetro	Valor
Temperatura inicial del agua	24 °C; constante en todo el embalse
Caudal del río Porce (afluente)	100 m ³ /s; constante
Caudal quebrada Guaduas	5 m ³ /s; constante
Caudal quebrada La Cancana	5 m ³ /s; constante
Caudal de Retiro (efluente de la planta de generación)	110 m ³ /s; constante
Radiación solar	Variación del ciclo diario (máx. 900 W/m ²)
Temperatura del aire	Ciclo diario (máx. 30 °C; mín. 17 °C)
Humedad del aire	90% (constante)
Viento	No
Nubes	No

ción del modelo. La ilustración 3 muestra gráficamente la información suministrada; en esta ilustración, la fecha se especifica a través de un formato que define el año y el día usando un número real de siete dígitos; los primeros cuatro dígitos corresponden al año y los subsecuentes tres dígitos corresponden al día Juliano. La información hidrológica consiste de caudales afluentes y datos operativos como series de descargas de la planta de generación. La información climatológica incluye lluvia, radiación solar, temperatura, humedad del aire, y dirección y velocidad del viento. No se dispuso de información relacionada con otras afluencias o caudales relacionados con la operación del vertedero. La radiación solar medida en el sitio de presa sigue un patrón diario que se inicia a las 6:00 a.m., se incrementa a una tasa casi constante hasta un máximo a la 1:00 p.m., decreciendo con

forma parabólica hasta cero a las 6:00 p.m. La dirección del viento sigue un patrón cíclico típico: de 00 a 08 h, la dirección del viento oscila entre los 300 y los 120°; de 08 a 12 h, la dirección del viento es casi constante en dirección y de las 12 h a las 14 h un cambio brusco ocurre alrededor de los 300° hasta el final del ciclo diario. La velocidad del viento muestra una alta variabilidad durante el ciclo diario, con la mayor magnitud de viento (6 m/s) ocurriendo con una dirección de 300°.

Información relacionada con una campaña de mediciones de parámetros de calidad de agua llevada a cabo entre el 19 y el 22 de noviembre del 2001 estuvo también disponible (ver Universidad de Antioquia, 2002). Durante esta campaña se elaboró un diagnóstico de las características físico-químicas del embalse Porce II. Este diagnóstico se realizó a través de un muestreo general de al-

Ilustración 3. Hidrología y climatología del área de estudio.



gunas variables físico-químicas en la superficie del agua en 19 estaciones de monitoreo, por medio de perfiles a través de la columna de agua en 12 estaciones de monitoreo y a través del seguimiento de algunas variables (químicas y biológicas) durante un ciclo de 24 horas en tres estaciones de monitoreo. Las características biológicas del sistema se evaluaron por el estudio de la comunidad fitoplanctónica en 18 estaciones de monitoreo. Los perfiles de temperatura fueron medidos usando botellas de muestreo profundo en nueve estaciones de monitoreo a lo largo de ocho profundidades diferentes. Los perfiles verticales se tomaron para identificar eventos de estratificación física y química en la columna de agua por medio del seguimiento de variables físico-químicas. Las variables medidas incluyen temperatura del agua, PH, dióxido de carbono, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno y conductividad eléctrica. De toda la información recolectada durante esta campaña, sólo se usó la relacionada con perfiles de temperatura y profundidades de disco Secchi en las estaciones de monitoreo 1, 5, 7, 9a, 9b, 12, 13, 15, 16 18a y 18b (ver ilustraciones 7 a 10).

Parametrización numérica del modelo

El trabajo de parametrización geométrica y temporal del modelo se basó en la realización de análisis de sensibilidad. Para el modelo Elcom, los parámetros definidos fueron el tamaño de la malla (distribución horizontal y vertical) y la longitud del intervalo de cálculo. Para obtener los valores óptimos, se desarrollaron en secuencia los siguientes pasos: a) se definieron tamaños base para el intervalo de cálculo, el tamaño de malla horizontal y el tamaño de la malla vertical; b) el modelo se corrió para diferentes tamaños de malla horizontal, conservando los valores base de malla vertical e intervalo de cálculo; c) se seleccionó el tamaño óptimo de malla horizontal, comparando los resultados obtenidos para las diferentes mallas horizontales en términos del RMS y del coeficiente de variación (CV) calculado con respecto a los valores de la malla base (más información relacionada con el cálculo del CV puede consultarse en Van Rijn *et al.*, 2002, y Klein *et al.*, 2002); d) una vez seleccionada la malla horizontal, el procedimiento previo se aplicó para la malla vertical; e) después de definir las mallas horizontal y vertical, el mismo procedimiento se aplicó para obtener el intervalo de cálculo óptimo. Un detallado análisis de la utilización del parámetro RMS en un análisis de sensibilidad para la validación de un modelo numérico se presenta en la tesis doctoral de Palacio (2002) y en una serie de publicaciones desarrolladas por el mismo autor durante 2002.

El anterior análisis de sensibilidad dio como resultado una malla horizontal cuadrada de 150 x 150 m, 18 capas verticales no uniformes y un intervalo de cálculo de noventa segundos. Una descripción detallada de este procedimiento se presenta en Toro y Villegas (2003).

Metodología para los estudios de la estructura térmica

Después de hacer los análisis de sensibilidad de parámetros geométricos y temporales del modelo, se desarrolló el análisis de sensibilidad para determinar los parámetros físicos. Este estudio se concentró en dos parámetros físicos principales: el coeficiente de extinción de la luz, y la dirección y velocidad del viento. En una primera fase se llevaron a cabo tres corridas del modelo para tres diferentes coeficientes de extinción de la luz (CEL): 0.4, 1.0 y 2.0, manteniendo las mismas condiciones iniciales y de borde usadas previamente (sin influencia del viento). Una vez finalizada esta fase, se analizó el efecto del viento, considerando corridas del modelo para diferentes series temporales de viento.

Antes de iniciar el proceso de calibración se preparó una corrida del modelo usando una serie de viento medida en una estación climatológica localizada en la presa (CSDam12). Con este campo de viento se corrió el modelo y se compararon los niveles de agua simulado y medido en el embalse. Después de revisar el nivel del agua en el embalse, se simuló la distribución de la temperatura en el embalse usando los datos hidrológicos, operativos y climatológicos disponibles, y los parámetros geométricos y temporales definidos en el análisis de sensibilidad (Toro y Villegas, 2003). Por conveniencia, los parámetros obtenidos antes se presentan otra vez: una malla horizontal regular de 150 x 150 m, una resolución de malla vertical variable con un máximo de 18 capas, un intervalo de cálculo de 90 s y una temperatura inicial en el embalse de 23 °C. En cuanto a las condiciones de borde, se usaron el caudal del río Porce, la radiación solar medida, el campo de viento y las descargas de la planta de generación del proyecto. El CEL se estimó a partir de mediciones de profundidades de disco Secchi (los valores reportados de esta variable para cada una de las estaciones de monitoreo se muestran en la ilustración 7) y correlaciones reportadas por la literatura (Martín y McCutcheon, 1999). El nivel inicial en el embalse se fijó a los 918.98 msnm y se usó un periodo de simulación de 26 días para garantizar la desaparición del efecto de las condiciones iniciales.

Con los parámetros y condiciones definidos arriba, el procedimiento de calibración del modelo se concentró en dos parámetros, principalmente: la temperatura del

agua del río Porce y la distribución espacial del viento. La temperatura del agua del río Porce se definió a partir de los datos del ciclo de 24 horas tomados durante la campaña de medición realizada entre el 21 y el 22 de noviembre en la estación de monitoreo 1. Respecto al viento, la calibración del modelo se hizo usando las series de viento disponibles en la estación CSDam12, tomándola como constante (sin variación espacial) para todo el embalse. Una mejor representación debería basarse en un mayor entendimiento de la dinámica del lago, en la recolección de datos de campo en algunos lugares estratégicos del embalse y en estudios como el reportado por Laval *et al.* (2003).

Es importante anotar que las simulaciones mostradas en este artículo no tienen en consideración el efecto de la biomasa y el material particulado en el embalse. El reporte de las mediciones de noviembre de 2001 mostró un crecimiento importante de biomasa fitoplanctónica en el embalse, así como evidencia de un altamente desarrollado estado hipertrófico en el sistema (Universidad de Antioquia, 2002). La radiación solar que alcanza el embalse no sólo es absorbida por el agua sino también por el material presente en ella (sustancias disueltas, tripton, seston y macrófitas). Estos materiales y sus procesos químicos y biológicos producen un equilibrio calórico en el sistema del lago que, en general, pierde calor más lentamente que un lago de aguas claras. Durante el proceso de calibración, todos los perfiles verticales de temperatura medidos son comparados con los perfiles simulados.

Para continuar con la etapa de aplicación se utilizaron perfiles verticales de temperatura medidos en tres estaciones de monitoreo (1, 9a y 18a), a fin de compararse con los datos simulados en la etapa de calibración. Los datos simulados en la calibración también se usaron en la elaboración de mapas de estratificación térmica en cuatro horas diferentes del día, 06, 12, 18 y 24 horas del último día de simulación (22 de noviembre de 2001).

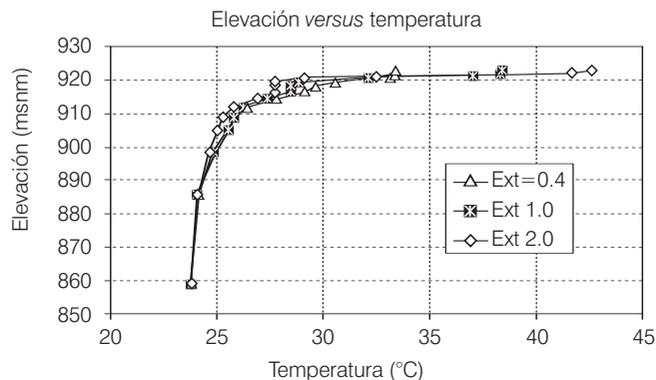
Resultados

Las aplicaciones del modelo se presentan en los siguientes párrafos, considerado aspectos de la parametrización física, estructura térmica durante un ciclo diario y mapas de estratificación térmica.

Parametrización física

La ilustración 4 presenta los resultados obtenidos capa por capa en la estación de monitoreo 1 (ver ilustración 2) a las 12:00 del último día de simulación para tres valores diferentes del CEL y sin acción del viento. Los resultados

Ilustración 4. Perfiles de temperatura del agua en la estación de monitoreo 1 a las 12 h 00 del último día de simulación para varios coeficientes de extinción de la luz.



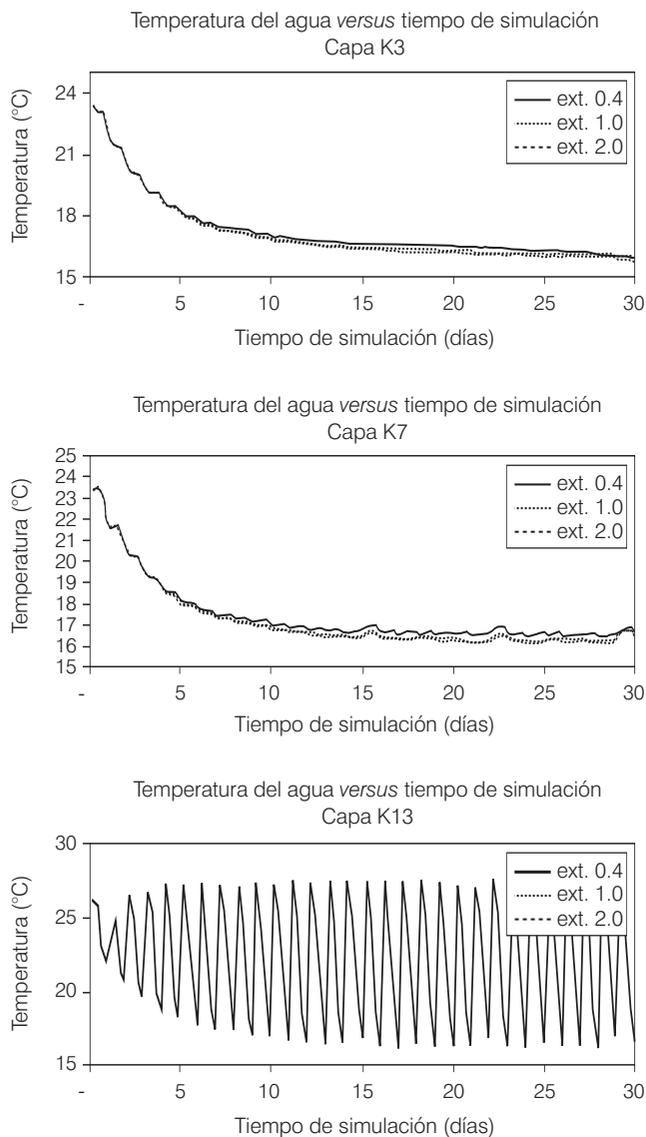
reflejan diferencias significativas en las temperaturas superficiales, aunque en todos los casos la influencia del CEL en las temperaturas cercanas al fondo (capas uno a siete) es despreciable. Este comportamiento fue típico en todos los sitios de monitoreo. El efecto del viento se analiza considerando corridas del modelo para diferentes condiciones de viento. En la ilustración 5 se presenta la comparación gráfica de los resultados obtenidos para la estación 1 en tres capas horizontales diferentes (K3, K7 y K13, siendo K13 la capa cercana a la superficie libre). Estos gráficos muestran claramente la poca influencia del CEL en los valores de la temperatura en presencia del viento. Es también evidente la dinámica del ciclo diario (calentamiento y enfriamiento) en la capa más superficial y no en las capas profundas, indicando la presencia de estratificación térmica en el lago en esta estación durante el día. Volveremos a este punto más tarde. Otros parámetros físicos como coeficientes de fricción en el fondo, y las paredes y coeficientes de viscosidad de Eddy no mostraron ninguna influencia en los resultados. Los resultados indicaron que el efecto combinado del viento y el CEL necesita ser evaluado.

Simulación de perfiles generales

Antes de estudiar en detalle la estructura vertical de la temperatura en el lago, se compararon los niveles de agua medido y simulado en el embalse para tener una confirmación de la conservación de masa durante la simulación. Como se muestra en la ilustración 6, los resultados del modelo coinciden bastante bien con las mediciones.

A continuación, los perfiles verticales medidos son comparados con dos perfiles simulados en seis estaciones de monitoreo, tal y como se muestra en la ilustración 7. Los dos perfiles simulados corresponden a aquellos

Ilustración 5. Comportamiento temporal de la temperatura del agua en la estación 1 en capas K3 (a), K7 (b) y K13 (c).



obtenidos al principio y al final de la medición (durante estas mediciones se tomaron perfiles verticales para 18 variables físicas, químicas y biológicas en la misma estación, labor que tomó aproximadamente dos horas para ser completada (Universidad de Antioquia, 2002)).

Respecto al viento, se llevaron a cabo diferentes simulaciones cambiando la magnitud de las mediciones disponibles. Una comparación entre los resultados de las simulaciones y los datos medidos reflejaron una gran incidencia sobre la temperatura superficial del embalse a cambios en este parámetro, como también patrones de calentamiento y enfriamiento superficial que sugieren

una relación espacial fuerte, fácilmente atribuible a la conformación encañonada del embalse.

En los gráficos de la ilustración 7 puede observarse que los perfiles calculados tienen la misma forma y orden de magnitud que los perfiles medidos; esta similitud mejora a medida que el sistema pasa de un ambiente lóxico (estación 1) a uno léntico (estación 18b). La forma de estos perfiles sugiere un ambiente acuático estratificado y también una tendencia del lago a alcanzar (en sus capas profundas) la temperatura del agua del río Porce.

Respecto a los resultados obtenidos en la estación de monitoreo 1, es importante resaltar que debido a la resolución de la información batimétrica disponible no fue posible obtener una buena representación para la malla vertical en esta zona del embalse. La representación batimétrica de la malla de cálculo en esta zona se asimila a la forma de un canal recto, ancho y poco profundo. Esta característica explica las diferencias entre los perfiles medidos y simulados. Los perfiles medidos reflejan el efecto predominantemente turbulento causado por la corriente principal del río, mientras que los perfiles simulados reflejan el efecto del calentamiento debido a la radiación solar sobre una corriente que fluye de manera uniforme (canal).

La estación de monitoreo 13 se localiza en una zona del embalse con características hidrodinámicas (protegida de la circulación del viento por accidentes topográficos) que conllevan a que la presencia de plancton sea particularmente importante (Universidad de Antioquia, 2002). La presencia de altas concentraciones de plancton (*Cyanophyta bloom*) explicaría las diferencias en temperatura entre los perfiles medidos y simulados, al ser éste no sólo un mejor agente absorbente de energía que el agua clara, sino al tener la tendencia a presentar una mayor resistencia a liberarla. La presencia de plancton también se reporta en las estaciones de monitoreo 8 y 9b (Universidad de Antioquia, 2002), aunque de forma

Ilustración 6. Niveles de agua en el embalse: simulado y medido.

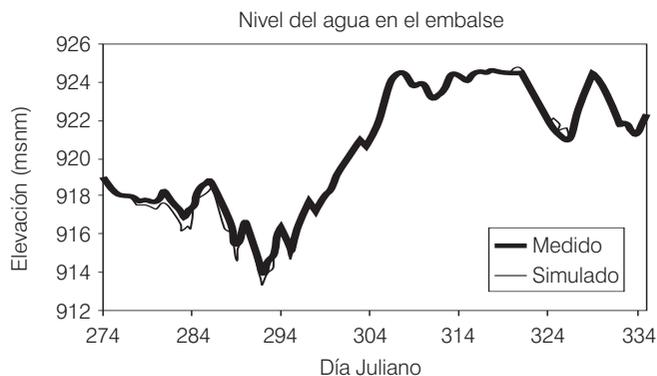
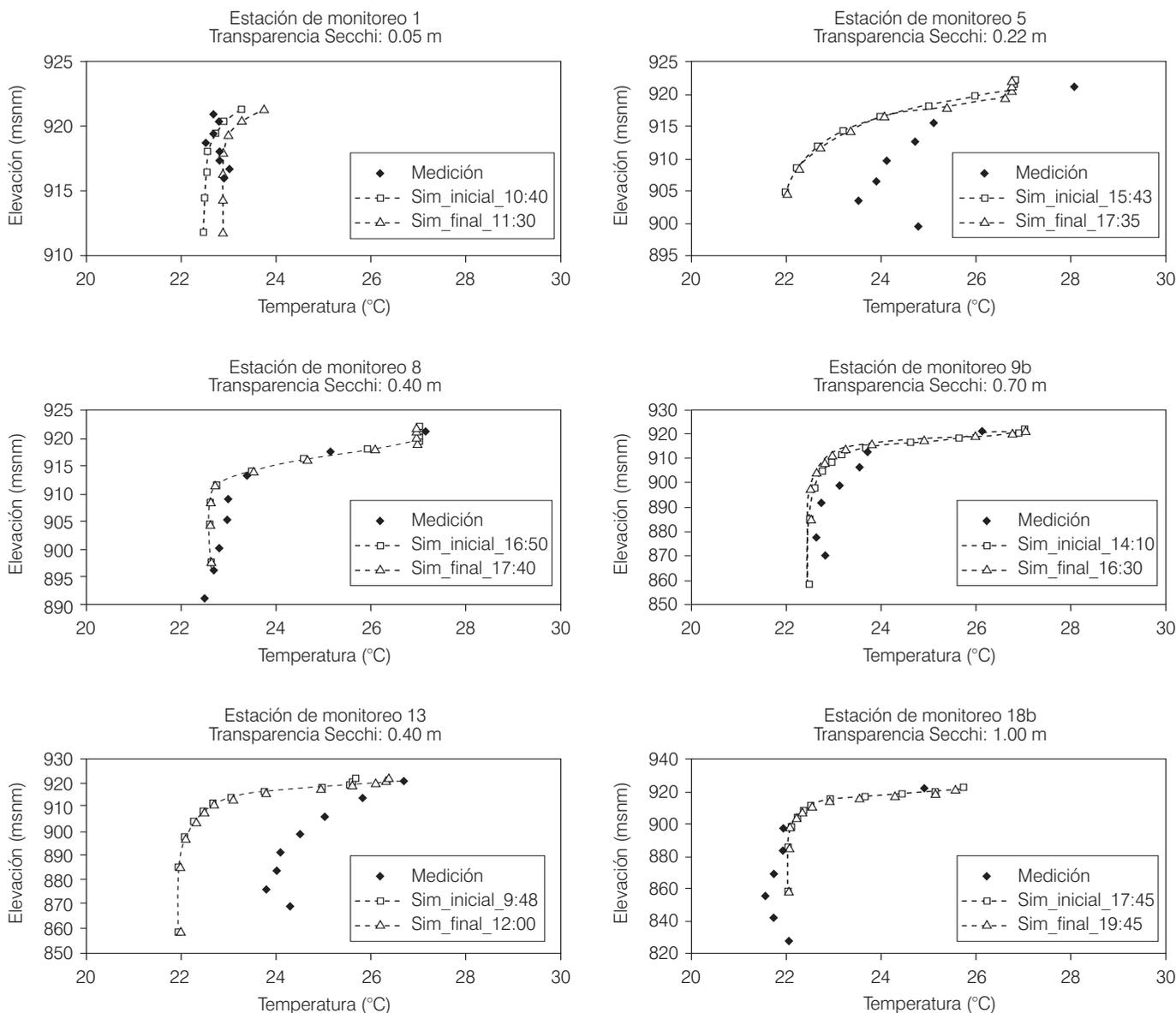


Ilustración 7. Perfiles verticales de la temperatura del agua en las estaciones de monitoreo.



más moderada. Los perfiles simulados en estos sitios muestran una buena correspondencia con los medidos, aunque se conserva la tendencia de un perfil simulado más frío que el medido, reforzando la hipótesis de un embalse que sufre procesos biológicos generadores de calor. Respecto a las temperaturas superficiales, los valores simulados y medidos en el sitio 8 concuerdan bastante bien, mientras que en el sitio 9b existe una diferencia de cerca de 1 °C entre uno y otro. Un vistazo a la disposición espacial de estos dos sitios refuerza la necesidad de emplear una distribución espacial del viento en

este embalse para futuras simulaciones. La estación de monitoreo 18b (ambiente léntico) muestra un ajuste bastante bueno entre perfiles medidos y simulados, resultado que refuerza la hipótesis del efecto de la biomasa en la distribución de la temperatura presentada anteriormente, dado que estas estaciones tiene aguas más limpias y claras, y un comportamiento hidrodinámico más lacustre que las estaciones ubicadas cerca de la entrada del río Porce. Un resultado relacionado con la temperatura superficial que vale la pena resaltar es que, a pesar de que ninguno de los perfiles simulados presenta un

buen acople con las temperaturas superficiales medidas, los resultados numéricos sugieren una distribución espacial en su comportamiento: las temperaturas superficiales simuladas en los sitios localizados sobre la dirección principal del viento son siempre mayores que las temperaturas superficiales medidas, ocurriendo lo contrario en los demás sitios. Siendo el viento el principal agente mezclador en la superficie del lago, este comportamiento refuerza la necesidad de usar distribuciones espaciales del viento y considerar un trabajo futuro a ser realizado.

Estructura de la temperatura durante un ciclo diario

Durante esta etapa, todos los perfiles de temperatura medidos y simulados en tres estaciones de monitoreo (1, 9a y 18a) fueron comparados (ver ilustraciones 8 a 10). En la estación de monitoreo 1, localizada en la zona lítica del embalse, los perfiles simulados reflejan la pobre representación de la malla vertical en esta zona del embalse. La representación batimétrica de la malla en esta zona es similar a un canal recto, ancho y poco profundo. Los perfiles medidos reflejan suavemente el efecto del calentamiento debido a la radiación solar y el

Ilustración 8. Ciclo diario de 24 horas para la estación de monitoreo 1.

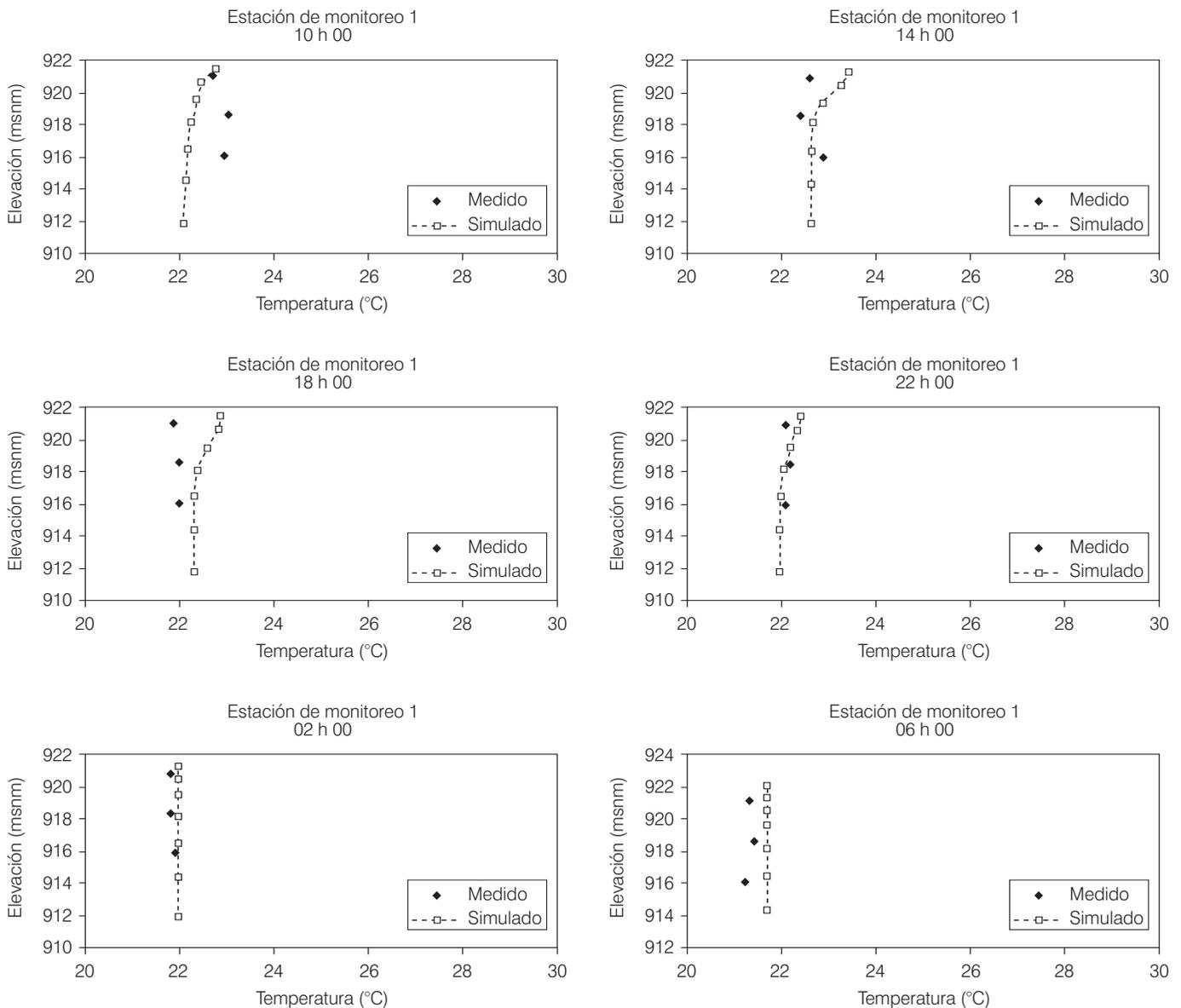
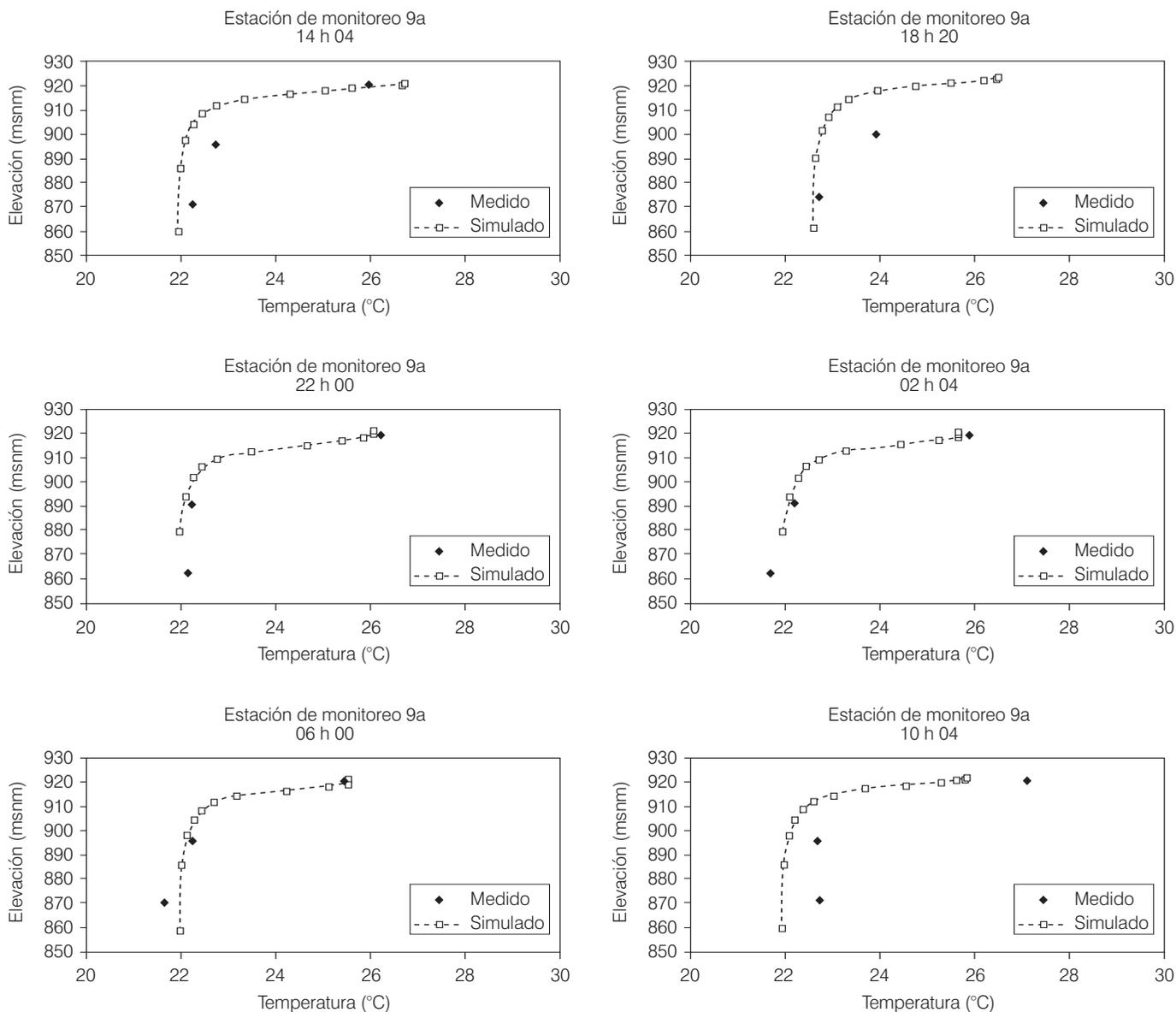


Ilustración 9. Ciclo diario de 24 horas para la estación de monitoreo 9a.

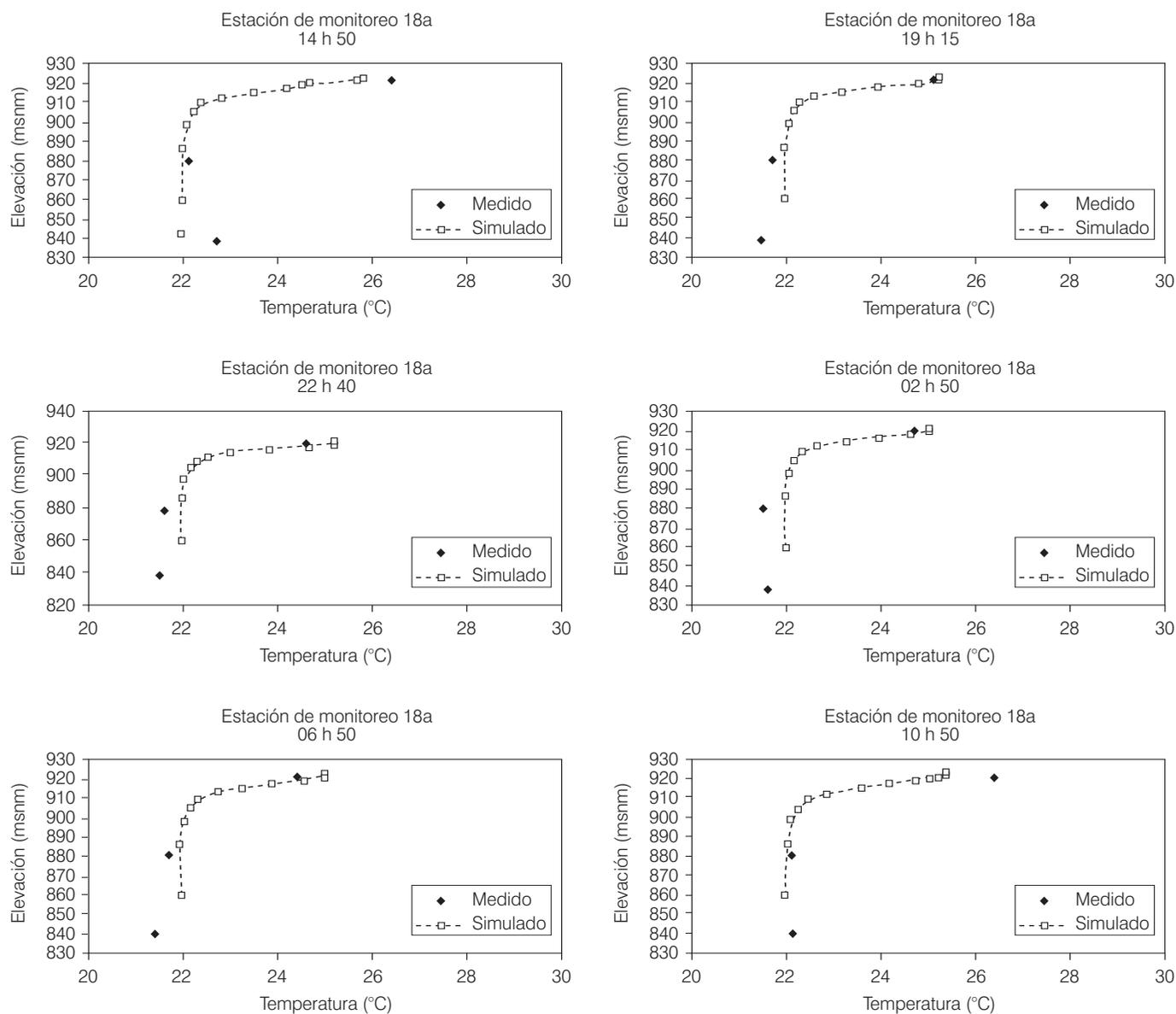


efecto turbulento dominante generado por el flujo del río principal (Porce). De igual manera, debido a que la resolución de la malla no pudo representar apropiadamente la forma topográfica del sitio y el efecto turbulento generado de ella, los perfiles simulados reflejan el perfil típico debido a los patrones de calentamiento y enfriamiento dictados por la influencia de la radiación solar (ver ilustración 8). En la estación de monitoreo 9a, perfiles simulados y medidos conservan la misma forma a lo largo del ciclo diario, sugiriendo que no existe suficiente enfriamiento convectivo durante la noche para mezclar (ilustración 9). Hay un mejor ajuste entre perfiles medidos y

simulados durante la noche, pero los perfiles simulados durante las horas con luz son más fríos que los medidos. El comportamiento general de los perfiles simulados y medidos en la estación de monitoreo 18a, localizada en la zona léntica del embalse, es similar al comportamiento expuesto por los perfiles de la estación de monitoreo 9a (ilustración 10). La forma de los perfiles se conserva a lo largo del ciclo diario y hay un mejor ajuste entre perfiles nocturnos que entre perfiles diurnos.

En general, los perfiles calculados presentan la misma forma y orden de magnitud que los perfiles medidos. Esta similitud mejora a medida que el sistema cambia de

Ilustración 10. Ciclo diario de 24 horas para la estación de monitoreo 18a.



un ambiente lóxico (estación 1) a un ambiente léntico (estación 18a). La forma de estos perfiles sugiere un ambiente acuático estratificado y también una tendencia del lago a alcanzar, en sus capas profundas, la temperatura del agua del río Porce.

Respecto de las temperaturas superficiales del agua, los resultados del modelo difieren de las mediciones debido a la distribución espacial del viento. Se encontró que en la estación de monitoreo 9a, la temperatura superficial del agua medida a las 10:04 horas fue 1.2 °C, más caliente que la simulada; para las 14:04 horas hubo

una inversión notoria en este comportamiento, con una temperatura medida de casi 1 °C, más fría que la simulada. De igual forma, en la estación de monitoreo 18a, los perfiles de temperatura del agua medidos fueron siempre más cálidos que los simulados. Esta situación es importante, considerando el cambio diario brusco en la dirección del viento que ocurre en el embalse entre las 12 y las 14 horas. Estos resultados sugieren que debería hacerse una detallada investigación de campo relativa al comportamiento del viento para identificar el apropiado campo de viento actuando sobre la superficie del embalse.

Mapas de estratificación térmica

El metalimnio es usualmente definido como la región del dominio donde ocurre un cambio de temperatura mínimo de 1 °C por metro de profundidad (Martín y McCutcheon, 1999). Usando esta definición se elaboró una serie de mapas para diferentes horas del día (las ilustraciones 11 y 12 muestran los correspondientes a las 12:00 y 18:00 horas, respectivamente). Estos mapas muestran zonas del embalse donde ha ocurrido estratificación térmica; los diferentes grises representan la profundidad del metalimnio en esos lugares. Los resultados obtenidos muestran el comportamiento esperado para los patrones de calentamiento y enfriamiento dictados por el ciclo diario: zonas estratificadas débilmente para el final de la noche debido al enfriamiento convectivo a la atmósfera y zonas fuertemente estratificadas al mediodía cuando hay un mayor contraste entre la temperatura superficial y la temperatura de las capas inferiores.

La elevación del metalimnio sigue también un patrón diario, con tendencia a profundizarse en la noche. El metalimnio más superficial ocurre alrededor del mediodía. La estratificación térmica ocurre entonces a una escala de tiempo horaria influenciada por los ciclos diarios de radiación solar, dirección y velocidad del viento y los patrones de operación del embalse; todas estas, funciones de fuerza altamente variables en la misma escala de tiempo. Algunos lugares del dominio permanecieron

Ilustración 11. Estratificación térmica, 12 h.

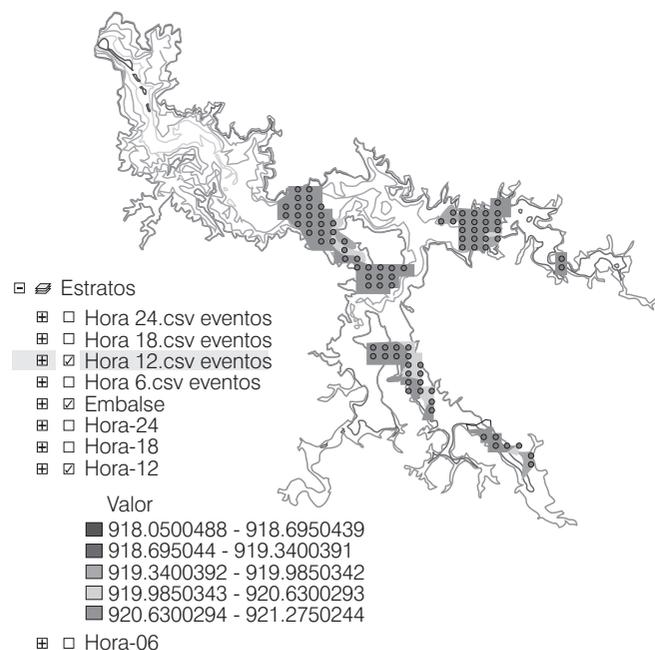
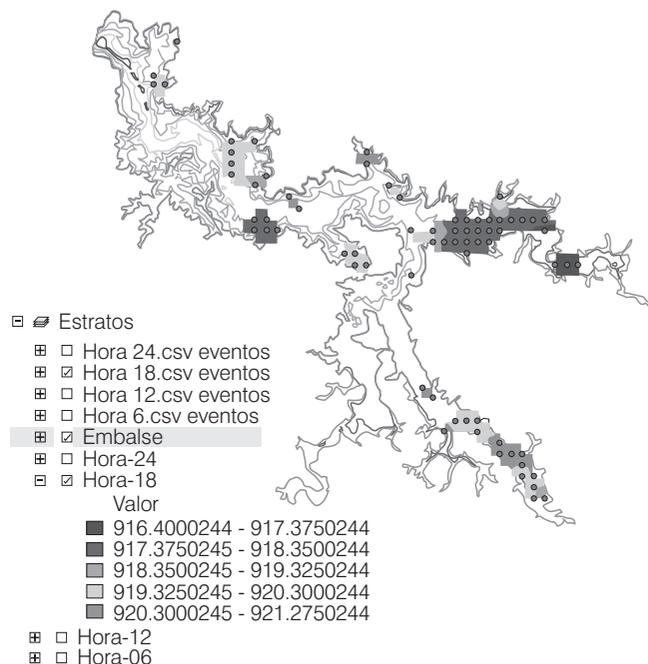


Ilustración 12. Estratificación térmica, 18 h.



estratificados durante el periodo estudiado, sugiriendo que en ellos el enfriamiento convectivo hacia la atmósfera que tiene lugar durante la noche no es suficiente para romper las diferencias de temperatura en la columna de agua.

Con tan escasa información sería riesgoso sacar conclusiones acerca del comportamiento de la estratificación térmica en el embalse Porce II. Sin embargo, los mapas de estratificación térmica podrían ser herramientas útiles en la determinación del comportamiento de la dinámica del metalimnio para identificar su influencia en variables del sistema de tipo biológico, geométrico, climático y operativo.

Conclusiones y recomendaciones

La comparación entre perfiles de temperatura del agua medidos y simulados mostró un buen ajuste en forma y orden de magnitud, comportamiento que mejora mientras el ambiente cambia de lótico a léntico. La forma de estos perfiles sugiere un ambiente acuático estratificado.

Los resultados numéricos muestran cómo la dinámica de la capa superficial es dominada por influencias externas, tales como radiación solar, mezcla debida al viento, extinción de luz y otros; mientras que la dinámica de las capas profundas tiende a conservar la temperatura del agua del río Porce. Este comportamiento podría

explicarse debido a las condiciones de operación del embalse (filo de agua), el cual evita que las influencias externas se acumulen en la columna de agua.

Los resultados subrayan principalmente la importancia de una buena resolución de malla en la representación del dominio y el efecto de materiales orgánicos y particulados en los procesos de ganancia y pérdida de calor de las masas de agua. La existencia de patrones de variación en la temperatura superficial del agua fue evidente también, y esto podría estar asociado con la forma topográfica del embalse y su efecto en la distribución espacial del viento, pero ello sólo puede ser probado a partir de una base de datos de campo más completa.

La representación del modelo en la estación de monitoreo 1 es pobre debido principalmente a la baja resolución de malla en esta zona del embalse. Por otro lado, los perfiles de temperatura simulados en las estaciones de monitoreo 9a y 18a tienen la misma forma a lo largo de todo el ciclo diario (24 horas), sugiriendo que no hubo suficiente enfriamiento convectivo durante la noche para mezclarla.

Los mapas de estratificación térmica mostraron el comportamiento esperado para los patrones de enfriamiento y calentamiento dictados por el ciclo diario: zonas con menor estratificación para el final de la noche debido al enfriamiento convectivo y zonas con mayor estratificación para el mediodía cuando hay una mayor diferencia de temperatura entre capas superficiales y profundas.

Los resultados son importantes, porque a través de ellos se evidencian las capacidades del modelo como una herramienta de predicción. La implementación de esta herramienta sobre la base de un proceso de calibración sólido (más datos de campo) permitiría el seguimiento en tiempo real del comportamiento del embalse y, con él, la posibilidad de predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios operativos. El conocimiento de la respuesta del sistema a estos escenarios permitiría la localización temporal y espacial *a priori* de diferentes condiciones de riesgo. De esta forma podría estar disponible información importante en el proceso de toma de decisiones, permitiendo al proyecto llevar a cabo sus objetivos, al igual que sus compromisos con el medio ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias por su patrocinio del proyecto *Modelamiento de calidad de aguas en embalses*, del cual hace parte esta publicación; a las empresas públicas de Medellín por la información de campo proveída para el proyecto, y al *Center for Water Research* de la *University of Western*, Australia, por proveernos con la licencia del modelo Elcom y su apoyo técnico.

Recibido: 09/11/2004

Aprobado: 21/09/2005

Referencias

- CASULLI, V. y CHENG R. Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. Vol. 15, 1992, pp. 629-648.
- CENTER FOR WATER RESEARCH. *Elcom Model. Science Manual*. University of Western Australia [en línea] http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadm/cwrsoft/doc/elcom_sciences/elcom_sciences150.pdf. 2006.
- CENTER FOR WATER RESEARCH. *Elcom Model, User's Manual*. University of Western Australia [en línea] http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin/cwrsoft/doc/elcom_user/index.html. 2006.
- IMBERGER, J. y PATTERSON J. A Dynamic reservoir simulation model - DYRESM:5. *Transport Models for Inland and Coastal Waters*. New York: H.B. Fischer, 1981, pp. 310-361.
- KLEIN, M., ELIAS, E., WALSTRA, D.J. y VAN RIJN, L.C. Simulation of nearshore hydrodynamics and morphodynamics on the short term time scale of storms using 2DH area model. Delft: *Delft Hydraulics*. Delft University of Technology. 2002.
- LAVAL, B., IMBERGER, J., HODGES, B.R. y STOCKER, R. *Modeling circulation in lakes: spatial and temporal variations*. American Society Limnology and Oceanography. 2003.
- MARTIN, J.L. y McCUTCHEON, S.C. *Hydrodynamic and transport for water quality modeling*. Boca Raton: Lewis Publishers. 1999.
- PALACIO, C.A. y TORO, F.M. Metodología para la validación de un modelo hidrodinámico específico en zonas intermareales. *Avances en Recursos Hidráulicos*. Núm. 9, 2002, pp. 37-46.
- PALACIO, C.A., MAYERLE, R. y TORO, F.M. Metodologías para la definición de las condiciones de borde en las fronteras abiertas en modelos costeros. *Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Hidrología e Hidráulica*. La Habana, Cuba, del 1º al 5 de octubre, 2002.
- PALACIO, C.A., MAYERLE, R. y TORO, F.M. Modelo anidado de gran escala para simular tormentas en el Mar del Norte. *Memorias del XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Medellín, del 29 al 31 de agosto, 2002.
- PALACIO, C.A. Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la bahía Meldorf en la Costa del Mar del norte alemán. Tesis doctoral. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- TORO, F.M. y VILLEGAS, B. Metodología para la definición del tamaño óptimo de la malla de cálculo en un modelo numé-

- rico: aplicación al estudio de la estructura térmica de un embalse. *Avances en Recursos Hidráulicos*. Núm. 10, 2003, pp. 113-122.
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, CENTRO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES Y DE INGENIERÍA. *Evaluación y diagnóstico del estado actual del embalse Porce II*. Medellín: Universidad de Antioquia, Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería. 2002.
- VAN RIJN, L.C., GRASMEIJER, B.T. y RUESSINK, B.G. Accuracy of Measurement Instruments. Delft: *Delft Hydraulics*. University of Utrecht. 2002.
- VAN RIJN, L.C., WALSTRA, D.J., GRASMEIJER, B., SUTHERLAND, J., PAN, S. y SIERRA, J.P. Simulation of nearshore hydrodynamics and morphodynamics on the time scale of storms and seasons using process-based profile Models. Delft: *Delft Hydraulics*. University of Utrecht. 2002.

Abstract

VILLEGAS, B., TORO, M., AGUIRRE, N. & PALACIO, J. Numerical simulation of the thermal structure of the Porce II reservoir in Colombia. *Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XXI, no. 3, July-September, 2006, pp. 17-31.

In this paper, a methodology in terms of the physical parameterization and calibration, used to simulate the thermal structure of the Porce II reservoir, is presented. The Elcom numerical model developed by Center for Water Research (CWR) of the University of Western Australia (UWA) is used. The field measurements were taken by the Universidad de Antioquia (2002). During the calibration stage both, measured and simulated temperature profiles on 9 Monitoring Stations were compared and two mayor parameters were found: The inflow river water temperature and the wind spatial distribution. After calibration, simulated profiles were found in general cooler than measured profiles. The shape of these profiles shows an unmixed aquatic environment. A simulation of the thermal structure during a 24 hour cycle of the Porce II reservoir is also presented. During the simulation, both measured and simulated temperature profiles on 3 Monitoring Stations were compared. A good correspondence between both, measured and simulated night profiles was found. However, during the day-light hours, the simulated reservoir is cooler than the measured one. Water temperature profiles located on the lentic zone of the reservoir stayed on the same shape along the 24 hour cycle suggesting that there were not enough convective cooling during the night to mix it. Thermal stratification maps were built with the calibration data in order to show the kind of results that can be achieved through this methodology.

Keywords: thermal structure, simulation, numerical, reservoir, profiles, temperature.

Dirección institucional de los autores:

Beatriz Villegas
Mauricio Toro

Licenciatura en Recursos Hídricos.
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia,
teléfonos: + (57) (4) 421 8670 y 4 425 5123,
beatriz.villegas@gmail.com,
fmtoro@unalmed.edu.co

Néstor Aguirre
Jaime Palacio

Universidad de Antioquia, Colombia,
Medellín, Colombia,
teléfono: + (57) (4) 210 5570,
naguirre@edea.edu.co,
jpalaci@udea.edu.co