

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

IMPORTANCIA DEL CICLO DIARIO DE LA TEMPERATURA DE LOS
AFLUENTES EN LA ESTRUCTURA TÉRMICA DE EMBALSES
TROPICALES

Ricardo Román-Botero¹, Andrés Gómez-Giraldo² y Mauricio Toro Botero³

Universidad Nacional de Colombia - Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

¹I.C. - Estudiante de Maestría, rroman@unal.edu.co; ²Ph.D - Profesor Asociado, eagomezg@unal.edu.co;

³Ph.D - Profesor Titular, fmtoro@unal.edu.co.

RESUMEN

En el trópico, las variaciones de los flujos de calor durante el día imponen un ciclo diario en la temperatura de los afluentes que ingresan a un embalse, la cual es importante en el comportamiento espacio-temporal de la estructura térmica en embalses tropicales. En el embalse La Fe, El Retiro-Antioquia-Colombia, se estudió, mediante el modelo numérico ELCOM, la importancia del ciclo diario de la temperatura de los afluentes en la variación espacio temporal de la estructura térmica y la evolución de las corrientes de densidad. Con ayuda de mediciones de temperatura en el cuerpo de agua, en sus dos principales afluentes, y de las variables hidroclimáticas en la zona del embalse, se calibró el modelo numérico para luego establecer cuatro casos de análisis de temperatura en uno de sus afluentes. En él se consideró un ciclo diario de temperatura y tres de temperatura constante. Los resultados mostraron que al definir adecuadamente el ciclo diario de temperatura de los afluentes, la variación espacio-temporal de la estructura térmica es correctamente caracterizada. La Evolución de la corriente de densidad mostró ser de carácter intrusivo en dos de los casos, y de fondo en uno de ellos. En el caso donde se consideró el ciclo diurno, la evolución de la pluma mostró una combinación entre los dos patrones anteriormente señalados. La dinámica de la estructura térmica cambió significativamente de acuerdo a cada uno de los cuatro casos planteados, con diferencias en temperatura de hasta 3.2°C entre ellos.

ABSTRACT

In tropical areas, variations in the heat fluxes during the daily cycle impose a daily cycle in the temperature of the incoming discharges of a reservoir, cycle that is very important in the space and time thermal structure of this tropical water bodies. In this work, the numerical model ELCOM was used to study the importance of the daily cycle of the incoming discharges into de reservoir on the space-time variation of the thermal structure and the evolution of the density currents of the La Fe Reservoir located in the municipality of El Retiro, Antioquia, Colombia. Using field measurements of hydroclimatological parameters, temperature of the water body and temperature the incoming discharges, a numerical model was calibrated. Four temperature distributions of one incoming discharge were defined for the study. The results showed that using a daily cycle for these discharges is a key point for the correct modeling of the water body space-time distribution of the thermal structure. The simulated density currents showed an intrusive behavior in two of the cases, and a bottom transport for one of the cases. For the daily cycle case, the density current showed a combination of previous cases. The temperature distribution showed important variations among the four cases, with differences up to 3.2°C.

PALABRAS CLAVES

Limnología Física, Embalses Tropicales, Modelación numérica, Corrientes de densidad

INTRODUCCIÓN

Las corrientes de densidad influyen en la variabilidad espacio-temporal de la estructura térmica de un sistema léntico y por lo tanto en el comportamiento de la dinámica de procesos biológicos y químicos. Cuando los ríos se encuentran con un cuerpo de agua, usualmente se observan diferencias en temperatura, salinidad y turbidez. Esa diferencia hace que el flujo de entrada, el cual puede ser más o menos denso que el agua de la superficie, siga una trayectoria particular dentro del cuerpo de agua. Si la energía cinética turbulenta no es suficiente para generar una mezcla total, el afluente fluirá hacia una capa con igual densidad en el cuerpo de agua y se moverá a lo largo de ésta, definiéndose entonces direcciones preferenciales de flujo conocidas como corrientes superficiales, intrusivas y de fondo (Imberger y Patterson, 1990).

Estas corrientes son afectadas por procesos de mezcla, y la estructura térmica, así como los patrones de circulación, son modificados según características de las corrientes de densidad como, por ejemplo, su temperatura. Al ser alterada la estructura térmica, cambia la dinámica de los procesos que son influenciados directamente por ésta, como lo son la tasa de transporte vertical de nutrientes, los modos de oscilación interna o la evolución futura de la misma pluma. Los procesos físicos que son modificados por el efecto de la corriente de densidad afectan directamente la calidad del agua embalsada y por lo tanto se requiere estudiar sus efectos y seguir detalladamente su evolución.

En los embalses tropicales, a diferencia de los sistemas en zonas templadas, los flujos de calor no son dominados por los cambios estacionales sino por altos cambios durante el ciclo diario en variables como la temperatura del ambiente, la humedad relativa y, especialmente, la radiación de onda corta. Este ciclo diario de las variables climáticas, impone cambios en la temperatura de los afluentes naturales que entran a los sistemas tropicales. Algunas mediciones de temperatura en los afluentes del embalse La Fe (Antioquia, Colombia) muestran cambios del orden de 6°C en un intervalo de aproximadamente 6 horas. Estos cambios en la temperatura de los ríos pueden generar importantes alteraciones en la dinámica de la estructura térmica ya que la variación de temperatura de los afluentes es del orden de la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo del embalse. Por lo tanto, se hace relevante establecer la importancia del ciclo diario de la temperatura de los afluentes sobre la estructura térmica de los sistemas tropicales.

Mediante simulaciones numéricas con el modelo hidrodinámico ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) se estudió la sensibilidad de la estratificación térmica respecto a la temperatura de entrada en uno de los afluentes en el embalse La Fe y se estableció la influencia de los cambios de temperatura del afluente en la dinámica de la corriente de densidad.

Actualmente el modelo numérico se encuentra en etapa de calibración detallada, pero los resultados mostrados en este artículo, obtenidos de una calibración previa, muestra que los perfiles de temperatura simulados conservan una buena correspondencia con los perfiles medidos. Es importante resaltar por lo tanto que, aunque en la actualidad no se encuentre con un modelo completamente calibrado, el objetivo de evaluar la importancia del ciclo diario de la temperatura de los ríos en la estructura térmica de sistemas tropicales, es obtenido con los resultados que se presentan a continuación, y dan un claro panorama de que estas variables deben ser bien cuantificadas para lagos y embalses que se encuentren en el trópico.

OBJETIVO

Evaluar la importancia del ciclo diario de la temperatura de los ríos afluentes a un embalse sobre la estructura térmica del cuerpo de agua y en la evolución de corrientes de densidad en embalses tropicales, utilizando la simulación numérica como herramienta.

ZONA DE ESTUDIO

El embalse La Fe está ubicado al oriente del departamento de Antioquia, Colombia, en el municipio de El Retiro (Figura 1). Sus principales afluentes son las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo, las cuales confluyen 1 km aguas arriba de la entrada al embalse en un sólo afluente (llamado en adelante Afluente 1). Al Sur-Oeste del afluente 1 se encuentran Las quebradas Boquerón y San Luis, que se unen 0.3 km aguas arriba del embalse y que llamaremos Afluente 2 y, finalmente, las aguas de los ríos Buey, Piedras y Pantanillo contribuyen al embalse a través de un sistema de bombeo (Bombeo). Las aguas captadas en el embalse se utilizan para el abastecimiento de agua potable de varios municipios del departamento. De la batimetría del embalse, Figura 1, se puede observar que éste está formado por dos cuencos unidos por un estrecho de baja profundidad, el cual corresponde a la presa de la primera fase de desarrollo del proyecto. El embalse cubre un área de 1.32 km² con una profundidad media de 7.0 m y una profundidad máxima de 18.2 m en el cuenco norte, mientras en el cuenco sur la profundidad media es de 14.7 m y la profundidad máxima de 27.2 m.

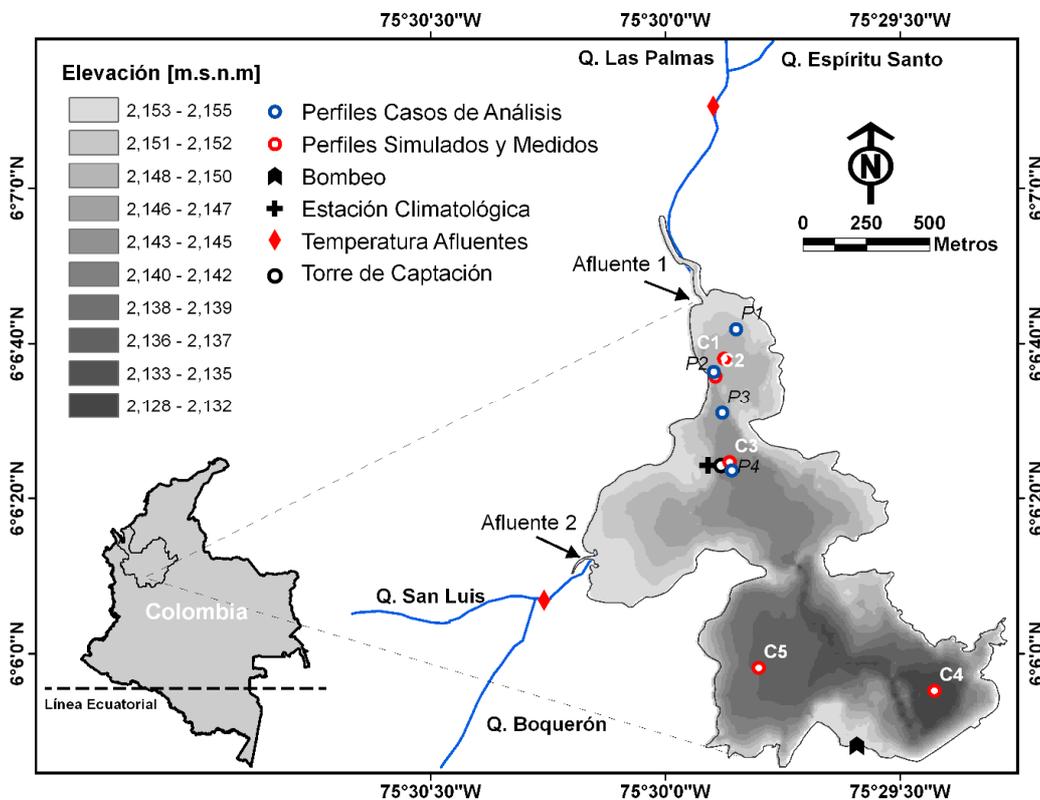


Figura 1. Embalse La Fe. Localización y batimetría. Los puntos marcados con “C” indican posiciones donde se compararon los perfiles de temperatura simulados con los medidos. Con “P” se marcan las posiciones donde se analiza el avance y desarrollo de la corriente de densidad.

METODOLOGÍA

Haciendo uso de la modelación numérica como herramienta, se simuló la variación espacio-temporal de la estructura térmica, definiendo diferentes casos de temperatura de entrada de los afluentes. Para la simulación se utilizó el modelo numérico Estuary, Lake and Coastal Ocean Model (ELCOM), desarrollado por el Centre for Water Research (CWR) de la Universidad de Australia Occidental (Hodges y Dallimore, 2006). ELCOM es un modelo tridimensional, hidrodinámico y termodinámico que simula la variación espacio-temporal de variables como la temperatura, salinidad y velocidad en sistemas estratificados. Este modelo ha sido utilizado en embalses ubicados en latitudes tropicales con resultados satisfactorios (Villegas et al., 2006; Fernández, 2006; Marín, 2008).

En la actualidad, el modelo se encuentra en la etapa de calibración, luego de haber sido sometido a una rigurosa etapa de sensibilidad a parámetros numéricos y físicos. En la etapa de sensibilidad se evaluaron sistemáticamente los cambios en los perfiles de temperatura debido a cambios en variables numéricas como el tamaño en la malla horizontal, vertical y el cambio en el intervalo de cálculo de simulación. Los parámetros físicos evaluados fueron el coeficiente de extinción de la luz, la magnitud y dirección del viento, la cobertura de nubes, y la temperatura de los caudales afluentes, entre otros. Con base en los resultados obtenidos en la etapa de sensibilidad, se seleccionó un tamaño de malla horizontal de celdas de 30x30 metros, un paso de tiempo computacional de 40 segundos y una discretización de la malla vertical de 49 capas. Respecto a los parámetros físicos, se observó la importancia de medir adecuadamente los forzantes externos como el viento, los flujos de calor, la temperatura de los afluentes, y otras variables propias del agua como es el coeficiente de extinción de la luz, ya que cambios en estas variables producen cambios significativos en los perfiles de temperatura. Estos parámetros se encuentran en la actualidad siendo analizados con el fin de realizar la calibración detallada del modelo.

Con base en los análisis realizados en la etapa de sensibilidad, y al observar la incidencia de los cambios de temperatura de los afluentes en la estructura térmica de un embalse tropical, se plantearon cuatro casos de simulación basados en algunas mediciones realizadas en los afluentes tributarios al embalse. Los forzantes externos con los que se realizaron las simulaciones numéricas fueron medidos directamente en campo y se muestran en la Figura 2.

Comparando los perfiles de temperatura obtenidos de los cuatro casos de simulación planteados y los perfiles de temperatura medidos en campo, se analizó la influencia que tiene sobre la estructura térmica cada uno de los escenarios propuestos. Se analizó también el efecto de los cuatro casos propuestos sobre la evolución espacio-temporal de la corriente de densidad.

INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA Y MEDICIONES DE CAMPO

En el embalse La Fe se realizó una campaña de campo entre los días 11 y 13 de mayo del 2010 donde se muestrearon perfiles de temperatura, conductividad y turbidez mediante un CTD SBE 25 de SEABIRD, con una frecuencia de muestreo de 8 Hz. La Figura 1 muestra la ubicación de los puntos de muestreo que fueron objeto de comparación con resultados de las simulaciones.

Las variables climatológicas fueron medidas por un período de 10 días directamente sobre el cuerpo de agua con una estación climatológica portátil DAVIS Vantage pro2 plus ubicada en la torre de captación. La información de nivel del embalse, caudal captado, caudal bombeado y caudales de las quebradas Palmas y Espíritu Santo fue suministrada por EPM (Empresas Públicas de Medellín), empresa operadora del embalse. Las series de caudales del Afluyente 1 y del Afluyente 2, en el sitio de entrada al embalse, se estimaron mediante el método de rendimiento hidrológico. En la Figura 2 se muestran las series de las variables utilizadas en la simulación.

La temperatura de los afluentes se midió aguas arriba de su entrada al embalse (Figura 1) con una sonda multi-paramétrica Hydrolab MS5 durante dos muestreos en dos períodos climáticos diferentes, tratando de capturar la variabilidad del ciclo diurno en dos épocas del presente año. El primer muestreo se realizó en el período comprendido entre los días 1 y 3 de marzo (denominado Temporada 1) y el segundo entre el 11 y 13 de mayo (Temporada 2). Las mediciones se hicieron en diferentes horas del día, desde las primeras horas de la mañana, aproximadamente a las 07:00, cuando la radiación solar empieza a calentar la corriente, hasta entrando en la noche, aproximadamente a las 17:00 horas, cuando la radiación incidente es muy poca. La Figura 3

muestra los valores de temperatura medidos.

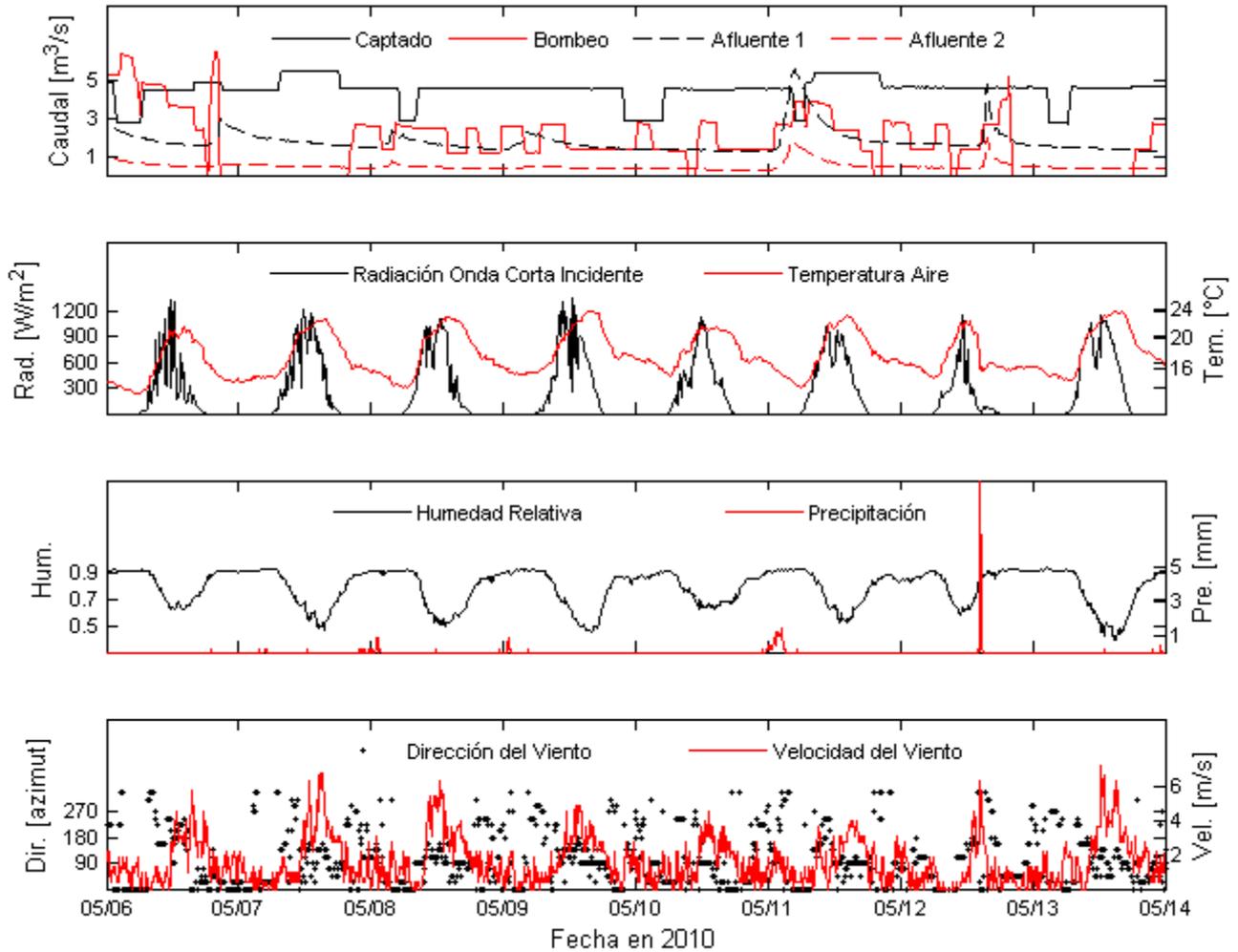


Figura 2. Forzantes externos: variables climatológicas y caudales de entrada y salida en 8 de los 10 días de la simulación.

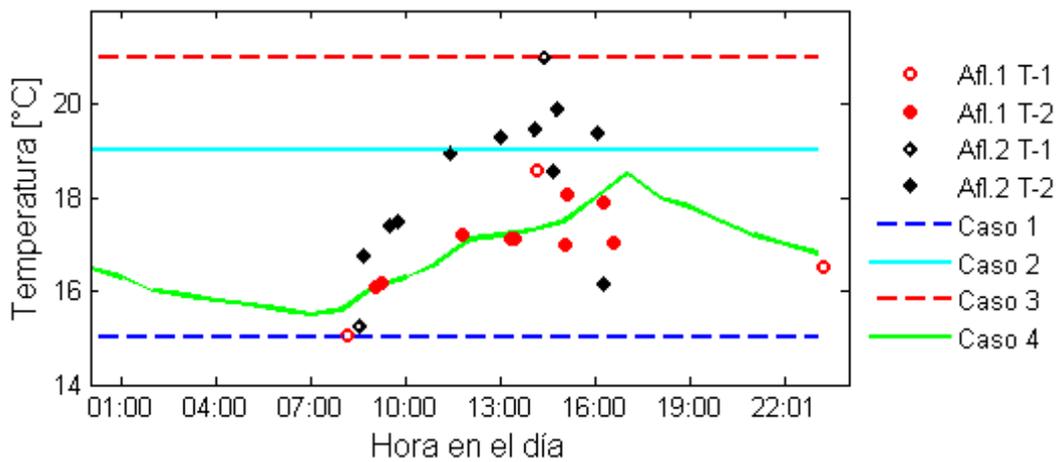


Figura 3. Temperatura de los afluentes medida y según los casos planteados del Afluente 1 considerados en las simulaciones. T-1: Temporada 1; T-2: Temporada 2.

La Figura 2 muestra que en el sistema se presenta un ciclo diurno en todas las variables climáticas, resultado propio de los ambientes tropicales, con valores de máxima temperatura del aire y radiación neta a mediados del día (entre las 10.00 y 14:00 horas) y de mínima temperatura del aire, entrada la tarde, y hasta las primeras horas de la mañana (entre las 15:00 horas y 06:00 horas). De

igual forma, en la Figura 3, se observa que la temperatura medida en los afluentes muestra un patrón similar a lo observado en las variables climáticas, con valores de mínima temperatura en las horas de la mañana y terminando la tarde (entre las 05:00 y 07:00 horas y entre las 16:00 y 17:00 horas respectivamente), que oscilan entre los 15°C y 17°C. En las horas de la tarde, el agua de los afluentes es más caliente, con valores registrados hasta de 21°C y un promedio de 19°C en las horas de la tarde. Aunque no se cuente con suficientes registros de temperatura en la Temporada 1, se puede observar que los valores medidos en las horas de la tarde son mayores a los que se midieron en la Temporada 2. Esto es acorde a lo que se presentó en el régimen climático de la región, donde se observó que la Temporada 1 fue de estiaje, con mayores temperaturas del aire, mientras que la Temporada 2 fue el inicio de la temporada de lluvias en la zona, cuando al aire es más frío.

Los cambios de temperatura en intervalos cortos de tiempo en los afluentes son muy apreciables. Durante la Temporada 1 se detectaron cambios de hasta 6°C en aproximadamente 6 horas en el Afluente 1 y del orden de 4°C, en el mismo lapso de tiempo, en el Afluente 2. En promedio, los cambios máximos de temperatura observados, considerando los valores máximos y mínimos en ambas temporadas, son de 2.9 °C y 4.5 °C para el Afluente 1 y el Afluente 2 respectivamente. Estos cambios son comparables a los cambios medidos de temperatura entre la superficie y el fondo del embalse (Figura 4).

ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones se realizaron para un período de 10 días, teniendo en cuenta que en la etapa de sensibilidad, el modelo necesitó un período de calentamiento de 5 días, considerando tres perfiles iniciales de temperatura, similares a perfiles medidos. Los forzantes externos que se utilizaron son los reportados en la Figura 2. La radiación de onda larga, la cual no se midió directamente, la estima el modelo teniendo en cuenta la cobertura de nubes (no mostrada), la cual fue determinada visualmente en la campaña de muestreo.

A partir de las mediciones de temperatura realizadas en el Afluente 1 y en el Afluente 2, y de las variables climatológicas, se plantearon cuatro casos para la temperatura del Afluente 1, los cuales se consideran representativos según los datos recolectados y mostrados en la Figura 3.

Caso 1: Temperatura constante de 15°C: El valor mínimo registrado en los datos de campo.

Caso 2: Temperatura constante de 19°C: El valor promedio de las mediciones que se realizaron entre las 08:00 y las 16:00 horas.

Caso 3: Temperatura constante de 21°C: El valor máximo registrado en los datos de campo.

Caso 4: Temperatura variable en el ciclo diurno: temperatura mínima de 15.5°C a las 06:00 horas, ascendiendo hasta las 17:00 horas en un máximo de 18.5°C y luego disminuyendo, siguiendo de manera aproximada la variabilidad detectada en las mediciones, especialmente de la Temporada 2, donde se tienen más mediciones de temperatura.

Los casos planteados se muestran en la Figura 3 para un solo día; sin embargo, se replicaron en los 10 días de simulación.

Las temperaturas del Afluente 2 y del Bombeo se establecieron igual al caso 4 en todos los casos analizados. La idea de los escenarios es observar lo que sucede con la dinámica de la estructura térmica en el embalse, especialmente en la zona norte del sistema, donde se espera una importante influencia de la corriente de densidad del Afluente 1.

Para analizar los resultados, se establecieron las estaciones P1, P2, P3 y P4, en donde se evaluaron perfiles de temperatura y de un trazador inerte con flotabilidad neutra inyectados con los afluentes. El trazador se simuló ingresando por el Afluente 1 para rastrear la evolución espacial y temporal de la corriente de densidad.

RESULTADOS

La Figura 4 muestra la comparación entre los perfiles de temperatura simulados y los perfiles de temperatura medidos.

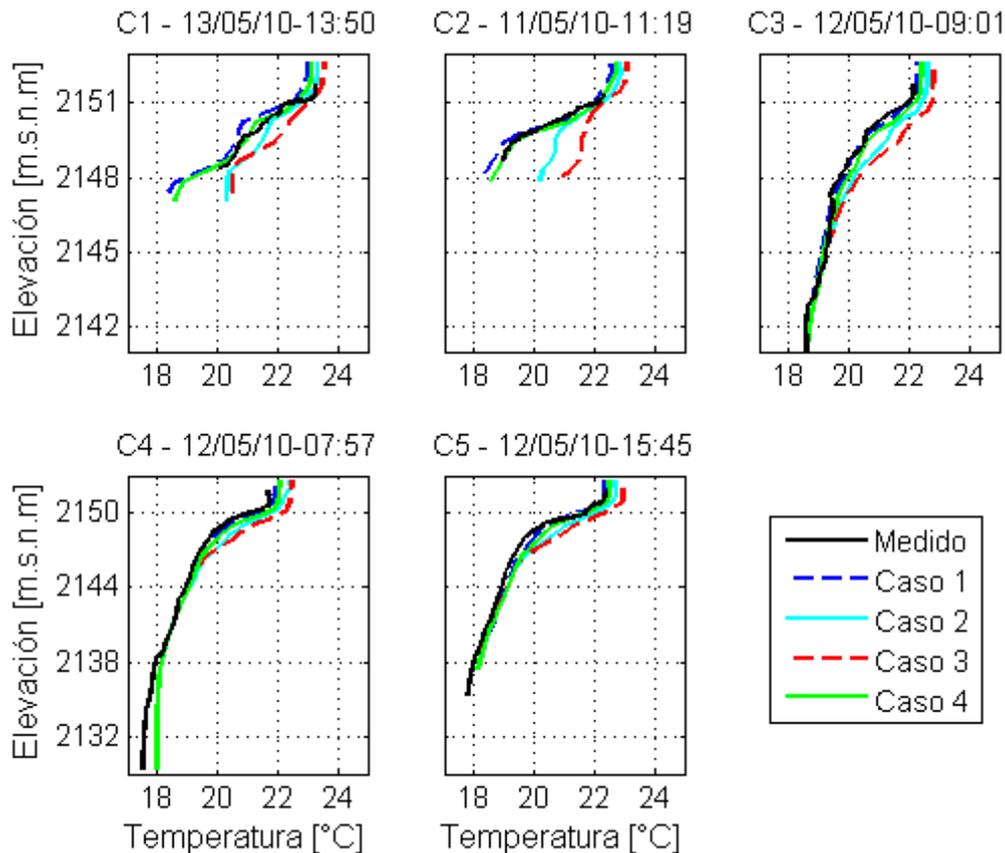


Figura 4. Perfiles de temperatura medidos y simulados bajo los cuatro escenarios. En la parte superior de cada panel se especifica el punto y el tiempo de toma del perfil.

Dos de los cuatro perfiles de temperatura presentados (C1 y C2, ubicados cerca a la entrada del Afluente 1) mostraron, según el caso, diferencias significativas respecto al perfil de temperatura medido. Los casos que reproducen mejor las mediciones son el 1 y el 4, con diferencias máximas de 0.8°C y 0.3°C respectivamente. Contrario a los buenos resultados obtenidos en los casos 1 y 4, son los resultados de los casos 2 y 3, donde las discrepancias en temperatura son del orden de 2.5°C y 3.5°C respectivamente. Estas diferencias se observan principalmente en las capas profundas, donde la pluma se comporta como una corriente de fondo.

En C3 los perfiles de temperatura obtenidos en los casos 2 y 3 muestran diferencias en los primeros metros del orden de 1.5°C , principalmente en las capas del epilimnio y metalimnio. La distribución vertical de la temperatura en el hipolimnio es igual en todos los casos analizados y con valores cercanos a los medidos. Los resultados de los casos 1 y 4 evidencian, igual que en C1 y C2, que al

representar adecuadamente la temperatura de entrada del Afluyente 1, el perfil de temperatura simulado se asemeja bastante al medido, con diferencias menores a 0.6°C . La principal diferencia que se observa en los casos 2 y 3 respecto al perfil medido, y que se da entre las cotas 2151 y 2148 m.s.n.m, es debido al comportamiento de la corriente de densidad, la cual siempre presenta en las simulaciones (Figura 5) un carácter de corriente intrusiva. El comportamiento intrusivo que tiene el Afluyente 1 en el caso 2 y 3 dentro del medio, calienta las capas superiores e inferiores de su zona de influencia, por lo tanto, los perfiles simulados presentan altas temperaturas en la zona donde la pluma se desarrolla, la cual coincide donde se dan las mayores diferencias entre el perfil medido y los perfiles simulados.

En lugares más alejados a la entrada del Afluyente 1 (C4 y C5), las diferencias en temperatura entre los distintos perfiles son menores debido a la poca influencia directa que ejerce la corriente de densidad. Sin embargo, entre el caso 3 y el medido, el cual representa el peor de los casos, se observan diferencias en temperatura del orden de 0.6°C en los primeros metros, principalmente en la zona del epilimnio. Las diferencias entre el caso 4, resultado más cercano al medido, son del orden de 0.3°C . Estos resultados muestran que la temperatura de entrada del Afluyente 1, dependiendo del caso analizado, induce efectos globales en la estructura térmica de todo el cuerpo de agua.

En la Figura 5 se muestran los perfiles de temperatura simulados en las estaciones P1, P2, P3 y P4, y de concentración de trazador de los cuatro casos planteados. Los Resultados de las simulaciones (Figura 5) evidencian la fuerte influencia que ejerce la temperatura de entrada de los ríos en la variación espacio-temporal de la estructura térmica y en el desarrollo de la corriente de densidad. Los resultados muestran que se produce una corriente intrusiva si la temperatura del río es sólo un poco menor a la temperatura de las primeras capas de la zona superficial (caso 2 y 3), una corriente de fondo si la temperatura es mucho más fría que la temperatura en el hipolimnio (caso 1) y, una pluma cuyo comportamiento varía entre los dos patrones anteriormente mencionados, si se introduce el ciclo diario de la temperatura del afluyente (caso 4).

En el caso 4 los perfiles de concentración del trazador inerte muestran que a las 07:30 horas, cuando la temperatura del afluyente es la menor esperada, en P1, cerca a la entrada al sistema, la pluma se comporta como una corriente de fondo y en P2 el comportamiento es muy similar, teniendo en cuenta que existe un retardo aproximado de 2 horas mientras llegan las aguas de temperaturas más frías a dicha localización. En P3 la corriente de densidad empieza a adquirir un carácter intrusivo debido a que se calienta por atrapamiento de agua del medio mientras avanza, hasta que encuentra un nivel de flotación neutro en el medio estratificado. En P4 el comportamiento es intrusivo, con una trayectoria que se localiza entre las cotas 2148 y 2151 m.s.n.m. Sin embargo, se observan residuales en la concentración del trazador en algunos sectores del fondo, lo que indica una combinación de dos factores; aguas frías que se localizaron allí con anterioridad y la mezcla en la pluma intrusiva, debido al atrapamiento, no se ha desarrollado completamente y por lo tanto aguas frías aún se mueven cerca al fondo.

Al observar los perfiles de temperatura a las 07.30 horas, se aprecia que el perfil de temperatura asociado al caso 4 se acerca considerablemente al perfil asociado al caso 1 en todos los lugares analizados, con algunas diferencias de hasta de 0.4°C a una misma profundidad. En el caso 3 el perfil de temperatura muestra diferencias mayores a 2°C en el metalimnio e hipolimnio respecto al caso 1 para dos lugares de observación (P1 y P2). A medida que el análisis se hace en un lugar más alejado de la entrada del afluyente, P3 y P4, las diferencias en temperatura son menos apreciables, en especial en las capas más profundas. Sin embargo, en el metalimnio, lugar donde se desarrolla la pluma intrusiva, las diferencias son de hasta 1°C .

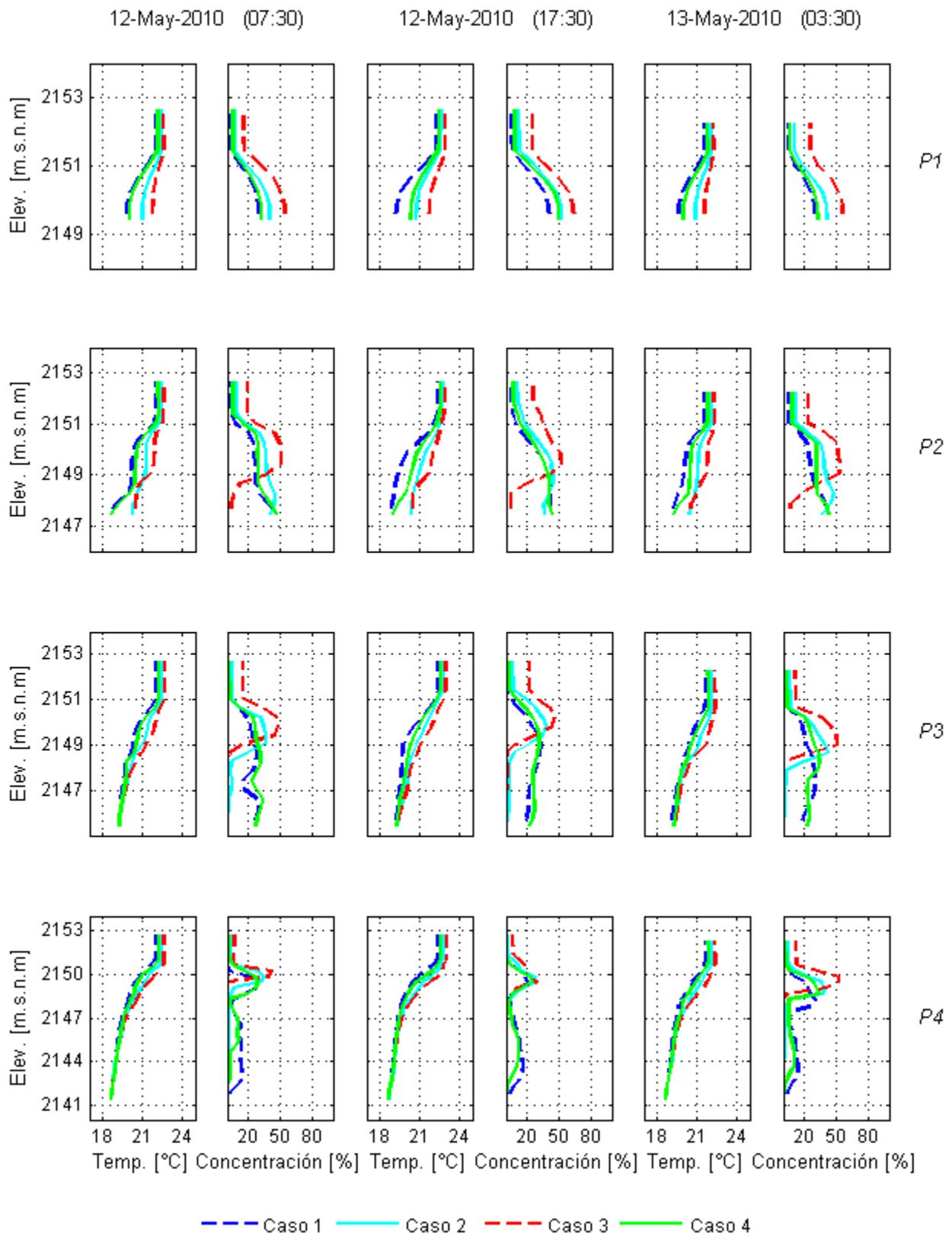


Figura 5. Perfiles de temperatura y de concentración de trazador en las estaciones P1, P2, P3 y P4 en 3 diferentes horas del día.

A las 17:30 horas, cuando la temperatura del río ha aumentado, el perfil de temperatura del caso 4 se aleja significativamente del perfil de temperatura del caso 1 y se acerca al perfil de temperatura del caso 2, notándose claramente la incidencia del ciclo diario. Debido a la alta temperatura con la

cual ingresa el afluente, éste consigue que aumente la temperatura en las diferentes profundidades y por lo tanto, el perfil de temperatura se calienta, así la corriente de densidad del caso 4 se torna intrusiva desde P1, debido precisamente a la mayor temperatura que el perfil ha alcanzado. En las horas de la mañana, 03:30, el perfil de temperatura del caso 4 se aproxima al perfil de temperatura del caso 1, acorde a las bajas temperaturas con la que entra el Afluente 1. La concentración de trazador muestra siempre una corriente de fondo para el caso 1, entre P1 y P3, y una pluma intrusiva en P4. Según el caso 4, la corriente de densidad es siempre intrusiva, y desde P2 hasta P4, excepto en P1, donde debido a la poca profundidad la pluma entra por el fondo.

Los perfiles de temperatura y de concentración de trazador de los cuatro casos objeto de análisis son muy diferentes entre sí, tanto en espacio como en el tiempo, notándose diferencias hasta de más de 2°C en los perfiles de temperatura y de 30% en la concentración del trazador, lo que implica que los procesos de mezcla también han sido afectados por la variabilidad de la temperatura de entrada.

CONCLUSIONES

Los análisis realizados demuestran que la estructura térmica de los sistemas lénticos tropicales es sensible a las variaciones de las características de los afluentes en el ciclo diurno, en especial las de la temperatura. Las diferencias de temperatura entre la superficie del agua y el fondo en los embalses tropicales pueden ser del mismo orden al observado en el ciclo diario de la temperatura de los afluentes. Por lo tanto, este parámetro es importante en la dinámica de la estructura de los sistemas tropicales, a diferencia de lo que pasa en los sistemas en zonas templadas, donde la variación vertical de temperatura es mayor, por lo cual los efectos del ciclo diario de la temperatura de los afluentes (cuya variación es menor) no son representativos en los cambios de la estructura térmica ni en la evolución de la corriente de densidad.

Los perfiles de temperatura simulados muestran buena correspondencia a los perfiles de temperatura medidos, si la temperatura de los afluentes es bien caracterizada. Los buenos resultados obtenidos en los casos donde la temperatura de entrada del Afluente 1 era similar a las mediciones de campo, particularmente el caso 4, donde se estableció el ciclo diurno de la temperatura, indicaron la fuerte influencia de este parámetro en la dinámica de la estructura térmica y la importancia de caracterizar adecuadamente su variación temporal. Por lo tanto, al realizar simulaciones numéricas con el objetivo de establecer la dinámica de la estructura térmica en un embalse tropical, se hace necesario conocer el ciclo de la temperatura de los ríos afluentes, ya que modifica considerablemente su comportamiento y por ende la dinámica de otros procesos que afectan la calidad del agua.

AGRADECIMIENTOS

Los Autores agradecen al Centre for Water Research (CWR) de la Universidad de Western Australia, por permitir la utilización del modelo ELCOM y a Empresas Públicas de Medellín (EPM) por cofinanciar el proyecto de investigación y por facilitar la información necesaria para la investigación.

Los Autores agradecen a todos los participantes del proyecto “Embalses EPM”: Grupo de Gestión y Modelación Ambiental - GAIA de la Universidad de Antioquia y al Posgrado en Aprovechamientos de Recursos Hidráulicos – PARH de la Universidad Nacional. Especialmente a todos los integrantes del proyecto “Limnología Física”, por su constante crítica constructiva y valiosos aportes en el desarrollo de la presente investigación.

REFERENCIAS

- Fernández, J (2006). *Modelamiento de la estructura térmica en el sistema hidroeléctrico de los embalses Porce II–Porce III*, Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. PARH (Posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos).
- Hodges, B. y C. Dallimore (2006). *Estuary, lake and coastal ocean model: ELCOM, science manual*. Centre of Water Research: Univ. of Western Australia.
- Imberger, J. y J.C Patterson (1990). *Physical limnology*. Advances in Applied Mechanics, Volume 27.
- Marín, L (2008). “Exploración Numérica de los efectos de la temperatura de entrada de los ríos afluentes y de la profundidad de captación en la estructura térmica de un embalse”. I congreso Nacional de Ciénagas y Lagunas de Colombia. ISBN: 978-958-44-3967-3.
- Villegas, B., M. Toro., N. Aguirre., J. Palacio (2006). “Simulación numérica de la estructura térmica del embalse Porce II, Colombia”. Revista: Ingeniería Hidráulica en México. Volumen XXI, número 3, julio-septiembre de 2006. ISSN. 0186-4076. Registrada en: índice de revistas Mexicanas de investigación científica; CONACYT.