

# APROXIMACIÓN NUMÉRICA A LA DINÁMICA DE LAS CORRIENTES DE DENSIDAD EN UN PEQUEÑO EMBALSE TROPICAL ANDINO

Ricardo Román-Botero<sup>1</sup>, Andrés Posada-Bedoya<sup>2</sup> y Andrés Gómez-Giraldo<sup>3</sup>

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.  
E-mail: ricardo.rb.academico@gmail.com, apositadab@unal.edu.co, eagomezgi@unal.edu.co

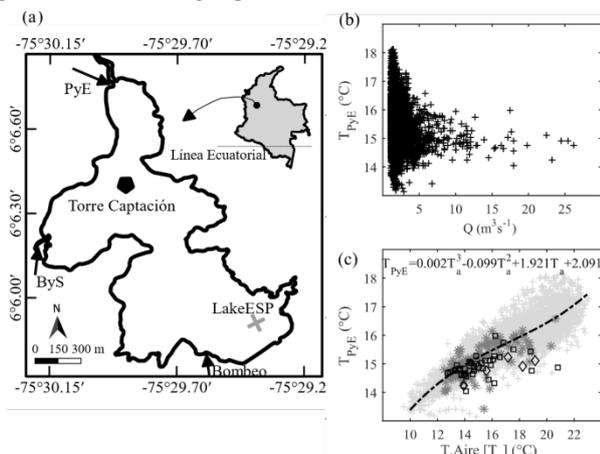
## Introducción

Las corrientes de densidad de los afluentes son agentes primordiales en la ecología de los embalses, debido a que ellas incorporan nutrientes y otras sustancias que son necesarias en los procesos biogeoquímicos al interior de la masa de agua. Adicionalmente, las corrientes de densidad interactúan con otros procesos de transporte que conjuntamente modulan la biodisponibilidad de los nutrientes. Dependiendo de la densidad del afluente y del perfil de densidad de la masa de agua, la corriente descenderá hasta la profundidad de boyancia neutra como una corriente intrusiva o de fondo, puede dividirse en múltiples plumas o permanecer superficial (ej. Cortes *et al.*, 2014).

En embalses tropicales la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo es generalmente pequeña (Lewis, 1987) y en algunos casos la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo es comparable a la amplitud en los ciclos diarios de la temperatura de los afluentes para diferentes épocas climáticas, por lo que el destino de las corrientes de densidad puede variar significativamente en diferentes escalas temporales. En el presente trabajo se estudia, usando información de campo y modelación numérica, el transporte y destino de las plumas de densidad en un pequeño embalse tropical (Fig. 1a), donde la temperatura de los afluentes en el ciclo diario (Fig. 1b y 1c) fluctúa en un rango similar al observado en el perfil de temperatura del embalse (Fig. 2c) para diferentes condiciones hidrológicas.

## Materiales y métodos

**Zona de estudio** – El embalse La Fe (Fig. 1a), ubicado en el centro occidente de Colombia, posee dos afluentes naturales (PyE y ByS) que ingresan por el cuenco norte y uno artificial que ingresa (Bombeo) en el cuenco sur. La captación se localiza en el cuenco norte y el agua captada se destina principalmente para suministro de agua potable.

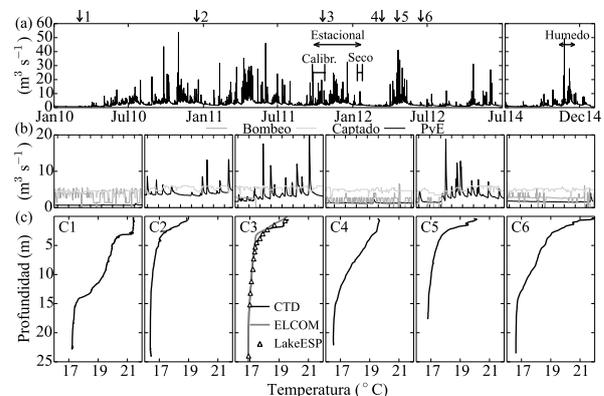


**Figura 1.-** (a) Embalse La Fe. (b) temperatura en el afluente PyE vs. el caudal a escala horaria. (c) temperatura en el afluente PyE vs. temperatura ambiente con un rezago de dos horas. En c) las cruces para caudales (en  $m^3/s$ )  $Q < 2$ , asteriscos  $2 < Q \leq 5$ , rectángulos  $5 < Q \leq 10$  y diamantes  $Q > 10$ .

**Datos de campo** – Se instaló una estación de medición (LakeESP) en el cuenco sur (Fig. 1a) para recolectar información climatológica y el perfil de temperatura en el embalse

por medio de una cadena de termistores entre el 09 de septiembre y el 27 de octubre de 2011. La información de caudales se midió continuamente entre 2010 y 2014. Información meteorológica adicional se obtuvo durante diferentes períodos entre 2010 y 2014 con una estación ubicada en el mismo lugar de la LakeESP. Perfiles de temperatura se midieron usando un CTD en diferentes instantes entre 2010 y 2012 (Fig. 2).

**Modelación numérica** – Se utilizó el modelo numérico ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) desarrollado por el CWR (Centre for Water Research) de la Universidad de Australia Occidental (Hodges y Dallimore, 2006). El modelo resuelve las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes promediadas de Reynolds, bajo la aproximación de Boussinesq y asumiendo flujo hidrostático en un sistema de coordenadas Z. Se validó la capacidad del modelo para reproducir la estructura térmica del embalse durante la campaña de campo del 2011 al comparar los resultados de la modelación con la información obtenida de la cadena de termistores y el CTD (Fig. 2 y Fig. 3). A partir de información medida en campo, se realizaron modelaciones de la evolución estacional de la estructura térmica en el embalse durante 4 meses, así como la variabilidad a escala de días durante diferentes épocas hidrológicas (entre 20 y 40 días). Se realizó un análisis de sensibilidad de la temperatura de los afluentes en la dinámica de las plumas en cada época, al comparar los resultados con el ciclo de temperatura medida y un valor típico promedio.

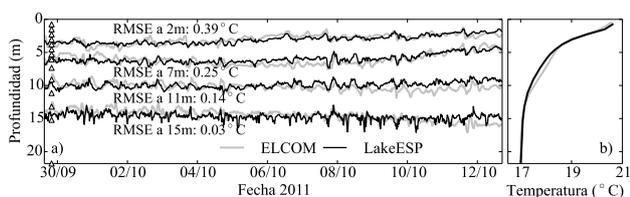


**Figura 2.-** (a) Caudal PyE en el periodo 2010-2012 y durante el segundo semestre del 2014. (b) Caudales antecedentes a la medición de cada perfil en (c). En la campaña C3 se muestran los perfiles observado y modelado. En (a) se indican los períodos de las simulaciones.

## Resultados y discusión

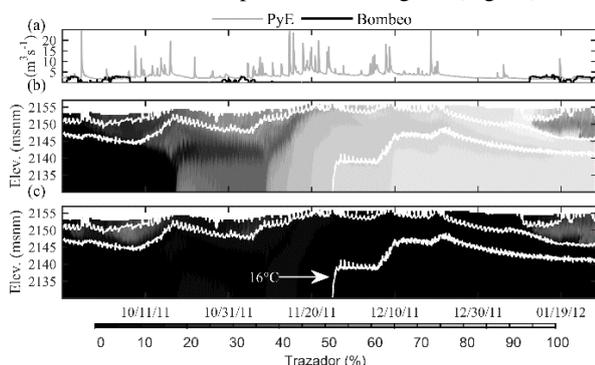
**Validación del modelo numérico** – El modelo reprodujo adecuadamente la evolución general de la estructura térmica (Fig. 3, RMSE promedio  $0.26^\circ C$ ), así como los principales gradientes en la termoclina y la profundidad de la zona de mezcla. En la zona intermedia el desempeño no fue el esperado, y se debe probablemente al efecto del bombeo que entra como un chorro, proceso físico no implementado en ELCOM.

**Modelación a escala estacional** – En la Figura 4 se muestra la evolución estacional, en el cuenco sur, de la estructura térmica y de dos trazadores conservativos inyectados continuamente en el Bombeo (Fig. 4a) y en los afluentes naturales (Fig. 4b).



**Figura 3.-** (a) Isotermas medidas y simuladas. (b) Perfil medio de la temperatura simulada y observada. Se indica el RMSE a diferentes profundidades.

Durante el período seco el cuerpo de agua es más estratificado y las plumas de los afluentes son intrusivas, con una profundidad que alcanza los 14 m. Con la llegada de las crecientes más frías del período húmedo, la temperatura del cuerpo de agua se homogeniza, excepto la superficie que recibe constante el flujo de calor atmosférico. En el período húmedo, cuando no hay bombeo, la pluma de los afluentes naturales se mueve por el fondo, alcanzando la presa y llenando el embalse verticalmente desde el fondo, lo que explica la homogenización de la temperatura del embalse. La temperatura simulada sigue bien la temperatura medida en los diferentes períodos hidrológicos (Fig. 2c).



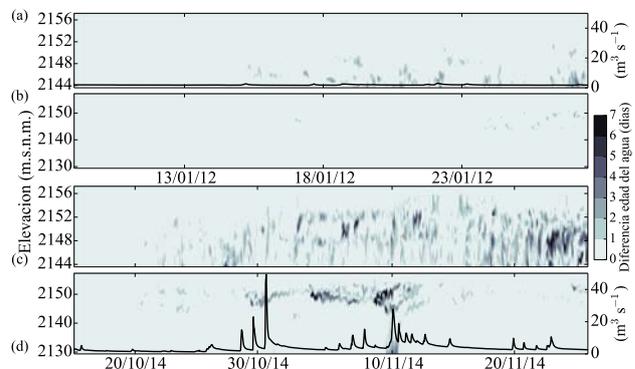
**Figura 4.-** (a) Caudal PyE y Bombeo. Isotermas (líneas blancas) y concentración de trazador simulado de (b) los afluentes naturales en LakeESP y (c) del Bombeo. Los contornos de temperatura se presentan cada 2°C.

**Modelación a escala de días** – En la Figura 5 se muestra la diferencia entre la edad del agua simulada usando, primero, el ciclo medido de la temperatura en los afluentes y, segundo, el valor promedio en la Torre Captación y en la localización de la LakeESP. La edad del agua en una celda al interior del dominio se define como el tiempo que la parcela de fluido que está ocupando esa celda ha estado presente en la simulación. Al inicio de la simulación, la edad del agua es igual a cero en todo el dominio y va aumentando con el tiempo simulado. Cada nueva parcela de fluido que entra en un tiempo posterior por las fronteras ingresa con una edad del agua igual a cero.

En el período seco no se aprecian diferencias significativas en la edad del agua en el sector norte (Fig. 5a) ni en el sector sur (Fig. 5b). Lo anterior sugiere que el ciclo de temperatura de los ríos no es imperante en el destino de las corrientes de densidad en este embalse durante el período seco. Caso contrario sucede en el período húmedo, cuando se observan diferencias de hasta 8 días en ambos cuencos (Fig. 5c y Fig. 5d) y en toda la profundidad. En particular, las diferencias son mayores en el cuenco sur durante el período de la transición de seco a húmedo mientras que en el cuenco norte las diferencias crecen conforme avanza el tiempo.

Durante el período seco, el caudal captado es similar al caudal combinado de los afluentes y la estructura de captación, que está ubicada en el cuenco norte limita la propagación de las plumas de los afluentes naturales hacia el sur del embalse, mostrando cambios poco significativos en los resultados. La temperatura del bombeo tiene poca varianza y es bien representada por la media, por lo tanto, no se espera una contribución importante desde este afluente artificial ante cambios en su temperatura. En el período húmedo, sin embargo, los afluentes naturales se propagan por ambos cuencos y en la mayoría de los

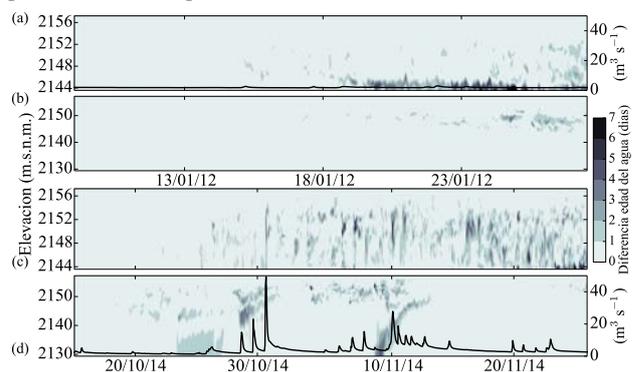
casos alcanzan el fondo del embalse en el cuenco sur. En el evento de una creciente, los afluentes tienen temperaturas menores que la temperatura promedio, produciendo diferentes mecanismos en la mezcla vertical y favoreciendo así las diferencias en la edad del agua que se observan entre los dos escenarios. En consecuencia, el transporte y destino de las corrientes de densidad son susceptibles a la temperatura de los afluentes en la época húmeda.



**Figura 5.-** Diferencias en la edad del agua simulada con el ciclo medido de temperatura de los afluentes y un valor promedio durante un período seco (a,b) y húmedo (c,d) en las estaciones Torre (a,c) y LakeESP (b,d).

**Efecto de la captación** – Con el propósito de estudiar la dinámica de un hipotético lago tropical pequeño, es decir sin influencia de la captación, y bajo las mismas condiciones forzantes, en especial de temperatura y caudal de los afluentes naturales, se cambió artificialmente la ubicación de la salida del agua para el cuenco sur y en las cotas superiores. Las demás variables permanecieron idénticas. La comparación se hizo estudiando la diferencia en la edad del agua como indicador.

Los resultados revelan que en la condición de lago hay diferencias durante el período seco (Fig 6a y Fig. 6b), de hasta 7 días en el cuenco norte y, en menor magnitud, en el cuenco sur. En el período húmedo (Fig. 6c y Fig. 6d) los resultados son similares a los originalmente obtenidos para el embalse en cuanto a la existencia de diferencias al considerar un ciclo o un valor promedio de temperatura, aunque se aprecia claramente un desarrollo diferente en la evolución de las diferencias. Esto muestra que la captación elimina (altera) el efecto del ciclo diario de temperatura de los afluentes en la evolución de las plumas durante el período seco (húmedo).



**Figura 6.-** Igual a la Figura 5 para el caso simulado como un lago.

## Referencias

- Hodges, B. and C. Dallimore (2006). *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM, Science manual*. Centre of Water Research.
- Lewis, Jr. W (1987) "Tropical Limnology". Annual Review of Ecology and Systematics.
- Cortés, A., Fleenor, W. E., Wells, M. G., de Vicente, I., & Rueda, F. J. (2014). "Pathways of River Water to the Surface Layers of Stratified reservoirs". Limnology and Oceanography.