



I CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA AMBIENTAL EN SISTEMAS ACUÁTICOS, CChIASA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJOS DE CALOR EN LA INTERFAZ AGUA-SEDIMENTO DE LAGUNAS SOMERAS

SALVADOR LÓPEZ¹
ALBERTO DE LA FUENTE¹
FRANCISCO SUÁREZ²
CAROLINA MERUANE^{1,3}

RESUMEN EXTENDIDO

Lagunas extremadamente someras se pueden encontrar en el Altiplano de la Cordillera de los Andes. Estos sistemas se ubican en el desierto a aproximadamente 3500 msnm. Estudios previos muestran que las temperaturas en estos cuerpos de agua varían entre 20°C y 30°C en un día, y que los sedimentos ubicados en el fondo actúan como una reserva de calor que reduce las amplitudes térmicas del ciclo diario al retener y liberar calor durante el día y la noche, respectivamente (de la Fuente, 2014). El objetivo de este trabajo es estudiar los flujos de calor que ocurren en la interfaz agua-sedimentos (IAS), mediante experimentos de laboratorio.

Previamente, de la Fuente & Meruane (2016) identificaron dos números adimensionales que describen el fenómeno (Ec. (1)). El número adimensional Π_1 cuantifica la influencia de los sedimentos (matriz de sólidos más agua) en el balance de calor del agua, donde $(\rho c_p)_s$ representa la capacidad calórica del medio, ω la frecuencia de la forzante, h la altura del cuerpo somero de agua, κ_s el coeficiente de difusión de calor en los sedimentos y $\alpha = \sqrt{\omega / 2\kappa_s}$ el inverso del largo característico difusivo en los sedimentos. Así, si $\Pi_1 \rightarrow 0$ no existe almacenamiento de calor en los sedimentos, y si $\Pi_1 \rightarrow \infty$ los sedimentos absorben/liberan todo el calor proveniente de la atmósfera. El número adimensional Π_2 cuantifica la influencia de la velocidad de transferencia k_t asociada al transporte turbulento del flujo de calor.

$$\Pi_1 = \frac{(\rho c_p)_s \kappa_s \alpha}{(\rho c_p)_w \omega h} \quad \Pi_2 = \frac{k_t}{\omega h} \quad (1)$$

$$\frac{T_{wn}}{T_{wn}^*} = \frac{1}{2} \left(i + \Pi_2 \left(1 - \frac{\Pi_2}{\Pi_2 + \left(1 + \frac{i|n|}{n} \right) \Pi_1} \right) \right)^{-1} \quad (2)$$

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, slopez@ing.uchile.cl

²Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, fsuarez@ing.puc.cl

³Modelación Ambiental SpA, cmeruane@modelacion.cl



$$T_W(t) = \sum_{n=-N}^N T_{wn} e^{i\omega_n t} \quad (3)$$

Un esquema de la instalación experimental utilizada en esta investigación se presenta en la **Figura 1**, donde se utilizó sedimentos de una laguna del Parque O'Higgins debido a su alto contenido orgánico y textura arcillosa. Para medir simultáneamente la temperatura del aire, agua y sedimentos, se usó un sistema de mediciones distribuidas de temperatura (DTS, por sus siglas en inglés) utilizando cables de fibra óptica, dispuesto de manera similar al presentado por Suárez et al. (2011). La altura de agua (h) varió entre 2.5 y 10 cm. Sobre el recipiente se instaló un set de dos focos LED de 400 W cada uno, que se encendieron y apagaron periódicamente cada 0.5, 1, 2 y 3 horas. Además, la capacidad calórica de los sedimentos se obtuvo mediante un equipo KD2Pro.

La **Figura 2** muestra un ejemplo de los resultados experimentales para un tiempo de encendido de 3 horas, igual al de apagado, y $h = 3.5$ cm, donde se puede ver que existe un desfase entre el periodo de excitación del experimento y la aparición de fenómenos turbulentos debido a la inercia térmica del suelo y agua respectivamente. En la **Figura 2A** se muestra la forzante atmosférica (H), adimensionalizada por la radiación total que entrega el set de focos. En **Figura 2B** se presentan los valores de k_t^* (Ec. (4)), donde la velocidad de transferencia k_t se obtuvo como el cociente entre el coeficiente de difusión de calor en el agua κ_w y el espesor de la subcapa difusiva δ_c . Por último, con las expresiones de de la Fuente & Meruane (2016) se calculó la temperatura del agua (Ecs. (1), (2) y (3)), obteniéndose un buen ajuste entre las mediciones y la aproximación teórica (**Figura 2C**). Cuando se enciende la luz, Π_1 toma importancia, dado que los sedimentos absorben gran parte del calor, reduciendo así la temperatura que podría alcanzar el agua. Producto de la mayor temperatura de los sedimentos respecto del agua, se genera un flujo de calor turbulento desde los sedimentos hacia el agua (ver velocidad k_t en **Figura 2B**), el que se representa con el adimensional Π_2 . En consecuencia, se evidencia que los sedimentos reducen la amplitud térmica diaria del agua, y este efecto queda bien representado por el análisis combinado de Π_1 y Π_2 .

$$k_t^* = \frac{k_t h}{\kappa_w} \quad ; \quad k_t = \frac{\kappa_w}{\delta_c} \quad (4)$$

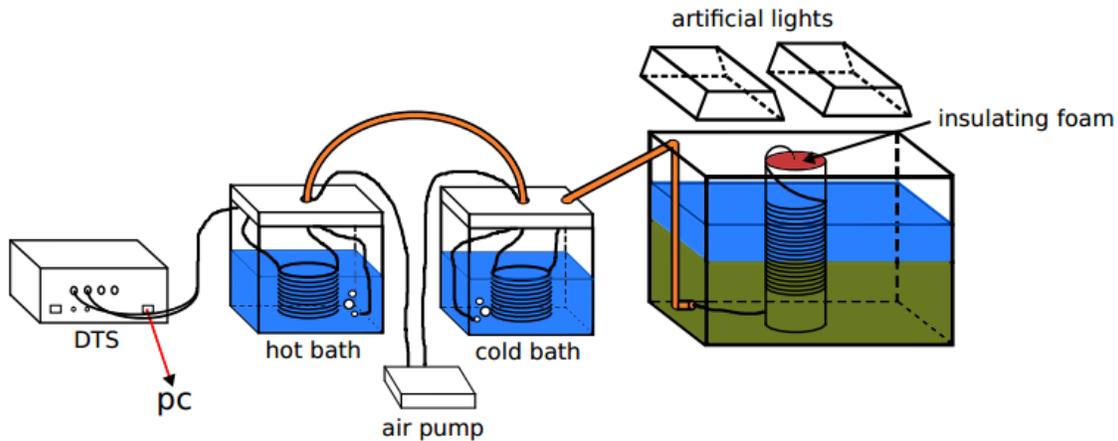


Figura 1: Instalación experimental. En ella se observa una caja de acrílico aislada térmicamente con plumavit de 1 cm de espesor, que impone la condición de borde de flujo nulo, rellena con sedimentos de la laguna del Parque O'Higgins, un equipo *XT-DTS* (Silixa, Hertfordshire, UK) conectado mediante una fibra óptica *simplex tight-buffered* de 0.9 mm de diámetro, a un set de 2 neveras con agua a $\approx 20^{\circ}\text{C}$ y $\approx 31^{\circ}\text{C}$ respectivamente, para posteriormente enrollarse en un tubo de PVC de 10 cm de diámetro y volver por el mismo camino hasta el instrumento DTS. Además, se muestra la posición referencial de los focos en la instalación experimental.

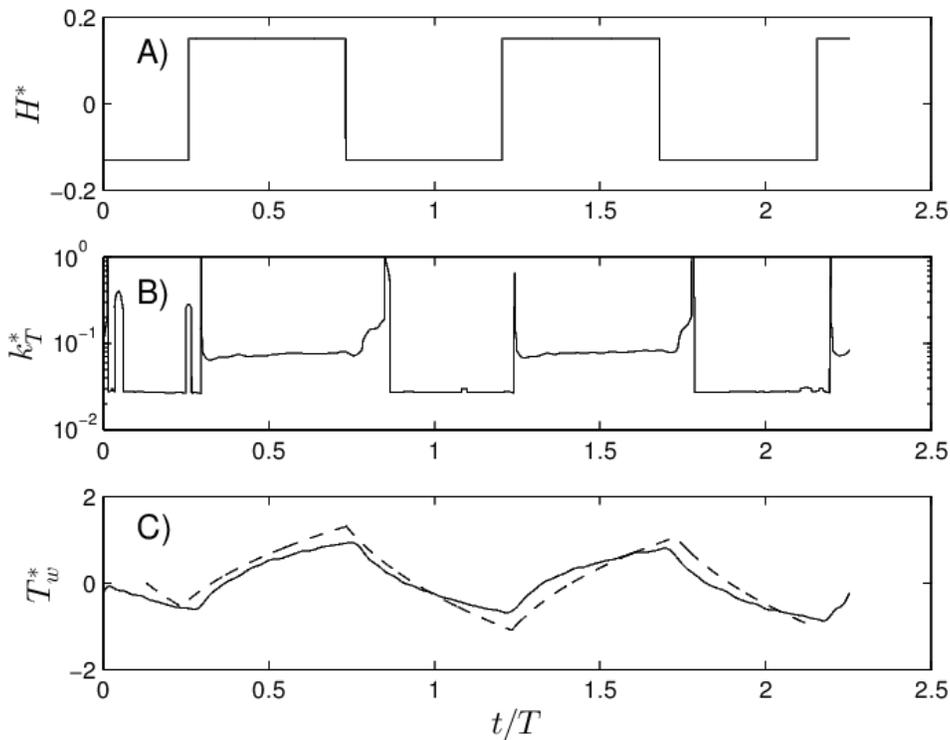


Figura 2: A) Series de tiempo de la forzante atmosférica neta, normalizada por el máximo valor de H . B) Series de tiempo de k_t^* . C) Series de tiempo de la temperatura del agua medida (línea continua) y la temperatura teórica (línea segmentada) obtenida a partir de Π_1



y Π_2 . El tiempo está adimensionalizado por el valor del periodo de la forzante (6 hrs. para este experimento).

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento de proyecto Fondecyt 1 1140821.

REFERENCIAS

- de la Fuente, A. (2014). Heat and dissolved oxygen exchanges between the sediment and water column in a shallow salty lagoon. *Geophysical Research: Biogeosciences*, 596-613.
- de la Fuente, A., & Meruane, C. (2016). Dimensionless numbers for classifying the thermodynamical regimes that determine water temperature in shallow lakes and wetlands. *Submitted to Environmental Fluid Mechanics*.
- de la Fuente, A., & Niño, Y. (2010). Temporal and spatial features of the thermohydrodynamics of shallow salty lagoons in northern Chile. *Limnology and Oceanography*, 279-288.
- Suárez, F., Aravena, J., Hausner, M., Childress, A., & Tyler, S. (2011). Assesment of a vertical high-resolution distributed-temperature-sensing system in a shallow thermohaline environment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1081-1093.