

Artículo original

Comportamiento de la estructura térmica y características morfométricas de un humedal de montaña tropical

Thermal structure evolution and morphometric characteristics of a tropical mountain wetland

✉ Carlos A. Benjumea-Hoyos*, ✉ Andrea Villada, ✉ Juan David Castaño

Grupo de investigación en Limnología y Recursos Hídricos, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Antioquia, Colombia

Resumen

Los humedales son ecosistemas de gran importancia ecológica y social debido a la gran variedad de servicios ecosistémicos que ofrecen. En esta investigación se evaluaron los parámetros morfométricos y la estructura térmica en un humedal del Oriente antioqueño. Se hizo un levantamiento batimétrico, se ubicaron sensores de temperatura en la columna de agua y se recolectaron los registros meteorológicos de una estación de la Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare (Cornare) ubicada en el municipio de Guarne. Construido el mapa batimétrico, se caracterizó el humedal como somero, con una profundidad media de 0,82 m, área de 1.300 m² y un volumen de 1.072 m³. Según el análisis de la dinámica de la estructura térmica con las variables meteorológicas, la columna de agua presentó un patrón de mezcla polimictico cálido continuo, que respondió a la variación de la temperatura ambiente y la radiación solar más que al patrón estacional. El mayor almacenamiento de calor durante el periodo evaluado se produjo en el mes de marzo, con un valor de 10.431,42 J/cm², entre las 18:00 y las 21:00 horas. Este proyecto hizo parte del convenio 310-2017 entre Cornare, la Universidad Católica de Oriente y el municipio de Rionegro.

Palabras clave: Humedal; Morfología; Estructura térmica; Temperatura; Calidad del agua.

Abstract

Wetlands are ecosystems of great ecological and social importance due to the great variety of ecosystem services they offer. In this research, we evaluated an eastern wetland. First, we carried out a bathymetric survey, then we located temperature sensors in the water column, and collected meteorological records from a Cornare station located in the municipality of Guarne. Once we had the bathymetric map, the wetland was characterized as a shallow wetland with a mean depth of 0.82 m, an area of 1,300 m², and a volume of 1,072 m³. In the analysis of the dynamics of the thermal structure with the meteorological variables, the water column presented a continuous warm polymictic mixing pattern, which responded to the variation of ambient temperature and solar radiation more than to the seasonal pattern. The maximum heat storage during the evaluated period occurred in March with a value of 10,431.42 J/cm² between 18:00 and 21:00 hours. This project was part of Agreement 310-2017 signed by Cornare, *Universidad Católica de Oriente*, and the municipality of Rionegro.

Keywords: Wetlands; Morphology; Thermal structure; Temperature; Water quality.

Citación: Benjumea-Hoyos CA, Villada A, Castaño JD. Comportamiento de la estructura térmica y características morfométricas de un humedal de montaña tropical. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(171):329-343, abril-junio de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1046>

Editor: Silvia Lucía Villabona González

***Correspondencia:**

Carlos A. Benjumea-Hoyos;
cbenjumea@uco.edu.co;
carlosbenju@gmail.com

Recibido: 25 de octubre de 2019

Aceptado: 14 de abril de 2020

Publicado: 30 de junio de 2020



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Colombia es un país con un alto potencial hídrico como resultado de su posición en el trópico y su amplia diversidad de ecosistemas estratégicos entre los que se destacan los humedales por su importancia para la regulación hídrica. “Los humedales son ecosistemas que, debido a condiciones geomorfológicas e hidrológicas, permiten la acumulación de agua temporal o permanente y dan lugar a un tipo característico de suelo y a organismos

adaptados a estas condiciones” (**Intituto de Investigación de Recursos biológicos Alexander Von Humboldt**, 2015). Existen algunas otras definiciones de humedales, una de las más aceptadas en Colombia proviene de la Convención de Ramsar de 1971, la cual los define como: “Extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

Colombia cuenta con una extensión aproximada de 30.781.149 de hectáreas (ha) de humedales; Antioquia reporta 6.296.306 ha, de las cuales se calcula que 69.471 están bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare (Cornare) (**Intituto de Investigación de Recursos biológicos Alexander Von Humboldt**, 2015).

Los humedales se han visto como un impedimento para la productividad de las tierras, por lo que los propietarios realizan actividades pesqueras intensivas o un posterior relleno para agricultura, industria o urbanismo (**Dugan**, 1992), fenómeno que se ha presentado en la última década en el oriente antioqueño debido al rápido y desorganizado crecimiento habitacional, el cual ha aumentado la presión antrópica sobre los humedales, que están siendo intervenidos y llenados para las construcciones civiles. Los procesos de intervención traen como resultado la disminución de las llanuras de inundación de ríos y quebradas, incrementando la vulnerabilidad de la población ante sucesos extremos del clima (**Rendón**, 2016).

En los municipios de El Carmen de Viboral y Guatapé se han realizado algunos estudios, entre ellos los de **Montoya** (2005), **Jaramillo & Gaviria** (2003), y **Ramírez** (2015), en los que se han encontrado sistemas de profundidades bajas con pequeños espejos de agua y cambios representativos diarios, mas no estacionales, en su estructura térmica. Sin embargo, estas han sido iniciativas aisladas y no han recibido promoción por parte de las autoridades de la región. En consecuencia, las entidades ambientales se han visto limitadas en el cumplimiento de su función, pues no cuentan con una adecuada identificación y registro de los humedales de la región, lo que dificulta la adopción de decisiones sobre planes de manejo. Por lo tanto, es de gran relevancia estudiar la geología, la biota y la morfometría de los humedales, siendo esta última esencial para conocer a cabalidad las formas y los elementos de los cuerpos lénticos, su génesis desde las perspectivas geográfica y geológica y sus características limnológicas (**Hakanson**, 1981). Además, se deben contemplar todas las variables físicas y químicas, entre las cuales la temperatura tiene un papel importante, pues afecta parámetros como la solubilidad de gases, la cinética de las reacciones químicas, la disponibilidad de nutrientes, la tensión superficial, el desarrollo de organismos presentes en el agua, entre otras. El tipo de aproximación metodológica adoptada para el estudio tuvo como objetivo final la comprensión de la estructura térmica y de las características morfométricas de un humedal urbano.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se determinó con base en información recopilada sobre el altiplano del oriente antioqueño mediante sistemas de información geográfica (SIG) para detectar las zonas de humedales en sus nueve municipios. Los humedales detectados alcanzaron una extensión de 174.466,67 ha (**Quijano, et al.**, 2018) y del total se seleccionaron 13 sitios para iniciar la caracterización y finalmente se escogió un humedal ubicado en El Carmen de Viboral a 06° 06' 15,3" N y 75° 23' 14,0" O (**Figura 1**) con base en su tamaño, la forma del espejo de agua y la profundidad. El humedal presenta una temperatura media del agua de 17 °C, la zona de vida predominante corresponde a bosque húmedo montano bajo, está aproximadamente a 2.100 m s.n.m. (**Quijano, et al.**, 2018) y la precipitación en el área varía entre los 2.142 y los 3.122 mm anuales (**Cornare**, 2018). El sistema presenta un ingreso de flujo de agua en el extremo oriental

y una salida de tamaño similar en la región opuesta (Quijano, *et al.*, 2018). El humedal se localiza en la seccional oriente de la Universidad de Antioquia y en adelante se le denomina humedal UdeA.

Levantamiento batimétrico

La delimitación del perímetro y del área del espejo de agua se hizo con ayuda de un receptor GPSMAPS 64s (Garmin®) (margen de error de 1 a 3 m). La información resultante se extrajo del programa BaseCamp™.

Para el levantamiento batimétrico se utilizó una ecosonda STRIKER™ 4 (Garmin®) de alta precisión (mayor al 95 %), que generó puntos en un sistema de coordenadas (X, Y, Z), donde (X, Y) indicaban la posición en el espejo de agua en un punto determinado y Z su profundidad. Los recorridos en el bote con la ecosonda se realizaron en zigzag de extremo a extremo, buscando cubrir la mayor superficie posible (Farjas, 2010).

Posteriormente, se depuraron los datos obtenidos y se organizaron en Excel; con el programa ArcGIS se hizo la interpolación de los puntos para generar el modelo batimétrico digital y, así, calcular los parámetros establecidos por Hakanson (1981).

Ubicación de los termistores y la estación meteorológica

Con base en el modelo batimétrico digital se calcularon los parámetros morfométricos (Tabla 1) y se procedió a establecer el punto de mayor profundidad, donde se ubicó una boya fijada al fondo con un lastre. En esta se ubicaron siete termistores HOBO® Water Temp Pro v2 con una precisión de $\pm 0,2$ °C distribuidos en la columna de agua para las profundidades de 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,68, 1 y 1,3 m, los cuales registraron la temperatura del agua con una frecuencia de 15 minutos por un periodo de siete meses. Los datos fueron almacenados en cada termistor.

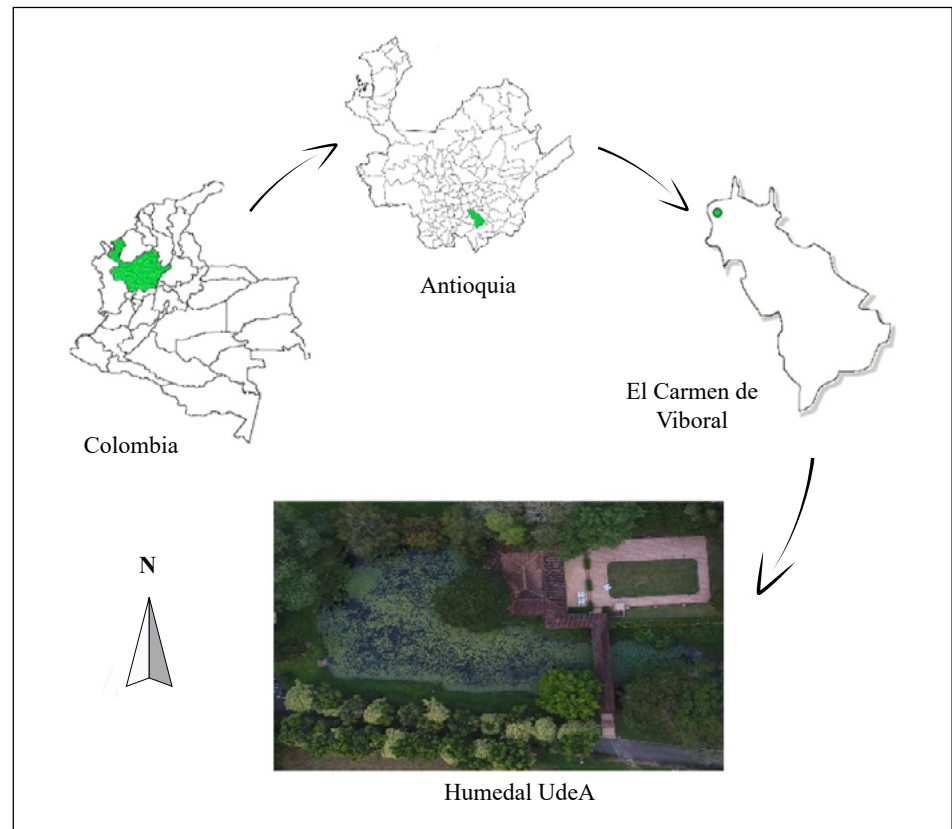


Figura 1. Ubicación espacial del humedal UdeA. Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Parámetros morfométricos del humedal UdeA

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Área (m ²)	a	1300
Perímetro (m)	l_o	204
Volumen (m ³)	V	1072
Longitud máxima (m)	L_{max}	67,00
Longitud máxima efectiva (m)	L_e	67,00
Longitud efectiva (m)	L_s	67,00
Fetch efectivo (m)	L_f	29,33
Ancho máximo (m)	B_{max}	35,00
Ancho máximo efectivo (m)	B_e	35,00
Ancho medio (m)	$B = (a/L_{max})$	19,40
Profundidad máxima (m)	D_{max}	1,46
Profundidad, media (m)	D_m	0,82
Profundidad, tercer cuartil (m)	D_{75}	1,21
Profundidad, mediana (m)	D_{50}	1,10
Profundidad, primer cuartil (m)	D_{25}	0,90
Profundidad relativa (%)	D_r	3,59
Cociente D_m/D_{max} (Adim)	D_m/D_{max}	0,56
Cociente L_{max}/B_{max} (Adim)	L_{max}/B_{max}	1,91 (subcircular)
Índice de desarrollo del volumen (Adim)	V_d	1,69
Forma del humedal	-	C_x
Dirección del eje mayor	-	E-W
Altitud (m s.n.m)	-	2116
Índice de desarrollo del perímetro	F	1,58

Fetch: distancia en que el viento sopla sobre el agua sin cambio apreciable de dirección

Datos meteorológicos

La información horaria de temperatura ambiente, radiación, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y precipitación para el período de estudio (marzo a septiembre de 2018), se tomó de la estación meteorológica más cercana, ubicada en el municipio de Guarne, a cargo de la Corporación Autónoma Regional – Cornare.

Análisis estadístico de los datos

A partir de los datos obtenidos con los termistores, se establecieron los promedios por hora de la temperatura del agua tomados diariamente cada mes; de esta manera se obtuvo el comportamiento por hora representativo del mes. A continuación se generaron gráficos de dispersión de la profundidad V_s . la temperatura del agua en Excel con un intervalo de tres horas por considerar que este representaba los principales cambios.

Para evaluar el comportamiento de la estructura térmica del agua en las diferentes profundidades registradas, se promediaron las temperaturas de cada profundidad para todos los meses y se aplicó el test de Kruskal-Wallis a partir de una comparación *post hoc* (prueba de Tukey) de la temperatura media por mes para cada profundidad en el humedal UdeA.

El análisis de la temperatura ambiente se hizo mediante un diagrama de cajas y bigotes por mes, el cual obedece a la dispersión de los datos y sus medias. Todos los procedimientos estadísticos se hicieron con el programa estadístico Rwizard, versión 2,3.

Balances de calor

El cálculo de almacenamiento, acumulación de calor y resistencia a la mezcla se basó en la metodología establecida por **Wetzel & Linkens** (2000) que se presenta a continuación.

Almacenamiento de calor. Se asume operacionalmente que el calor total contenido en un lago consiste en el contenido calórico del agua a la temperatura actual menos la cantidad de calor necesaria para calentar el hielo o la nieve y luego fundirlos. Cualquier cambio en la temperatura constituye un cambio en el término de almacenamiento de calor. Se puede determinar por la ecuación (1):

$$\Theta_w = \sum_{z=0}^{z_m} t_z A_z h_z \quad (1),$$

donde Θ_w es el calor contenido en el agua del lago (cal), z_0 es la superficie del lago (m), z_m es la máxima profundidad del lago (m), t_z es el promedio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de una capa unitaria de agua con espesor h_z (cm) y punto medio a la profundidad z , y A_z es el área a la profundidad z (cm^2). El calor contenido usualmente se expresa sobre una unidad de área de base Θ_w / A_0 en cal/cm^2 . A_0 es el área superficial en cm^2 . Operativamente es conveniente usar un área constante de 1 cm^2 en los cálculos de contenido de calor del agua. El espesor o profundidad en cm (profundidad (cm) x área (cm^2) = volumen (cm^3)) se multiplica directamente por la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ para obtener el contenido de calor.

Acumulación de calor. Representa el cambio de calor H en el sistema a través del tiempo (ecuación 2):

$$\text{Acumulación} = \frac{(\Delta(\rho C_p VT))}{\Delta t} \quad (2),$$

donde ρ es la densidad del agua (kg m^{-3}), C_p es el calor específico del agua ($\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$), V es el volumen de referencia (m^3), T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), y t es el tiempo (h).

Se asume que tanto la densidad como el calor específico del agua son relativamente constantes para el rango de temperatura del humedal y que el volumen del lago también lo es, lo que permite sacar dichos parámetros del diferencial. Por último, cuando el Δt se hace muy pequeño la ecuación anterior se reduce a (ecuación 3):

$$\text{Acumulación} = \rho C_p V \frac{dT}{dt} \quad (3).$$

A medida que la temperatura aumenta con el tiempo, el calor se acumula (dT/dt positivo) y disminuye cuando esta decrece con el tiempo (dT/dt negativo). Para un caso de estado estable, el calor permanece constante ($dT/dt = 0$). Las unidades de la ecuación de acumulación son las siguientes (**Chapra, 1997**) (ecuación 4):

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(\frac{\text{J}}{\text{Kg } ^{\circ}\text{C}} \right) (\text{m}^3) \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{J}}{\text{h}} \quad (4).$$

Resistencia a la mezcla. Desarrollada por **Birge** en 1915 y 1916, es una función de la diferencia de densidad entre la parte superior y el fondo de una capa definida de agua. Birge definió la “resistencia térmica” como la cantidad de trabajo requerida para mezclar completamente una columna de agua (ecuación 5):

$$W = \frac{AC^2}{12} (\rho_2 - \rho_1) \quad (5),$$

donde W es el trabajo (ergios), A es el área (cm^2), Z = altura de la columna de agua (cm), ρ_1 = densidad de la capa superior de la columna de agua, y ρ_2 = densidad de la capa inferior de la columna de agua. En este caso fue conveniente asumir A constante ($A = 1 \text{ cm}^2$) (**Wetzel & Linkens, 2000**).

Resultados

Morfología y morfometría

El humedal UdeA se formó mediante una barrera compactada de tierra en la parte inferior del curso de agua; presenta bordes compuestos por vegetación fragmentada y construcciones; el terreno es de pendiente baja a moderada, se observa la presencia de un gran número de macrófitas con predominio de la especie *Nymphaea elegans*, la cual cubre la mayoría del espejo de agua (**Quijano, et al., 2018**)

En la **figura 2** se presenta el mapa batimétrico del humedal UdeA; se observa que la profundidad varía en el sentido este – oeste (E – O), siendo la parte oeste donde se presentan las mayores profundidades, con una máxima cerca al dique de contención de 1,46 m. En general, el contorno de las isobatas describe una topografía simple, en donde se reconoce el cauce del arroyo que formó el sistema en el momento de su contención.

En la **tabla 1** se observan los valores de los parámetros morfométricos del humedal, y en la **figura 3** las curvas hipsográficas relativas para la superficie y el volumen.

La dirección del flujo de agua conservó el sentido original del arroyo (E – O), con una longitud máxima de 67 m indicando una forma alargada; en cuanto a la pista de acción del viento, se obtuvo un sentido noroeste ($L_f = 29,33$ m), sin barreras que impidieran su flujo. El ancho máximo fue de 35 m con una relación L_{max}/B_{max} igual a 1,91, lo que lo asemeja a una forma subcircular y coincide con el índice de desarrollo del perímetro ($F = 1,58$).

En cuanto a las profundidades, la máxima registrada fue de 1,46 m, con una profundidad media de 0,82 m, lo que cataloga el humedal como somero ($D_m < 10$ m). La profundidad mediana (D_{50}) se dio a los 1,1 m, lo que indicó que en un 75 % de la profundidad se encuentra almacenada el 50 % del agua, por lo que la mayor parte del volumen está acumulado entre el 75 y el 100 % de la profundidad (**Figura 3**). La profundidad relativa, definida como la relación entre el área superficial y la profundidad máxima, registró un valor de 3,57 %.

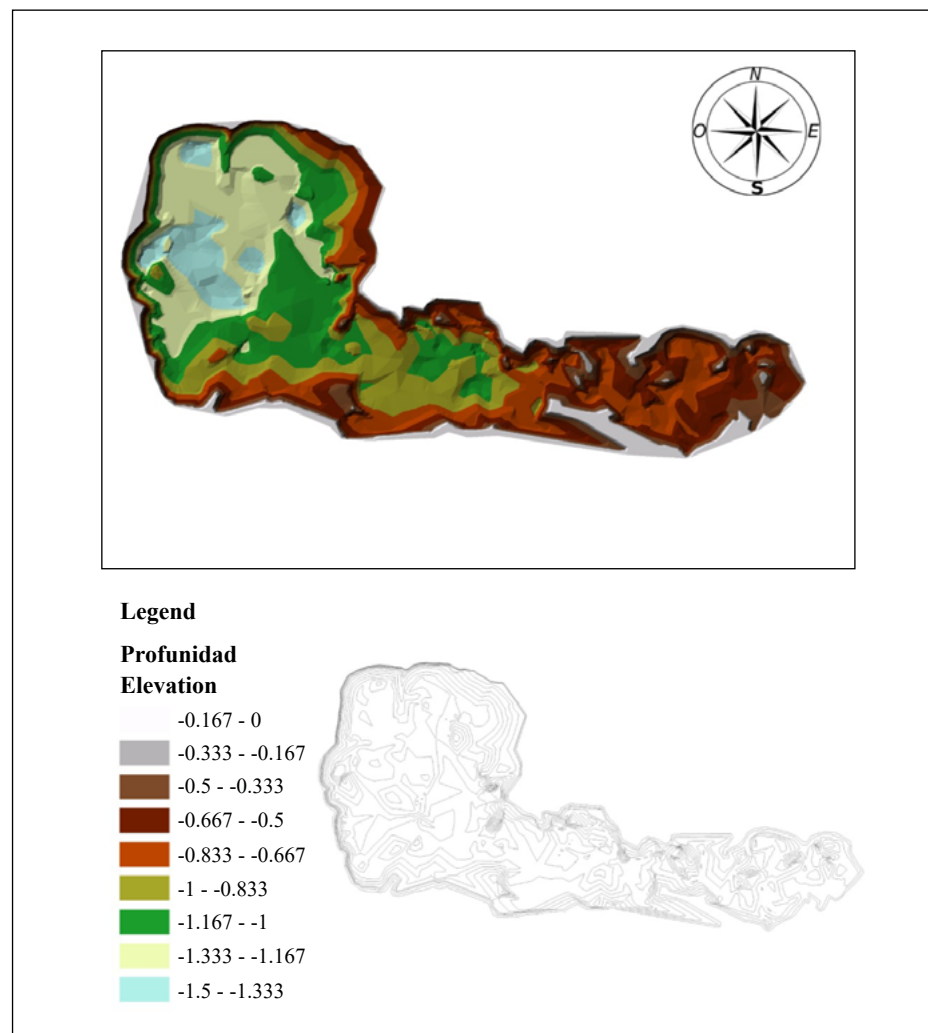


Figura 2. Mapa batimétrico y curvas de nivel del humedal UdeA

Perfiles térmicos

Se obtuvieron valores de temperatura para cada profundidad en el periodo comprendido entre marzo y septiembre de 2018. En la **figura 4** se observa que el humedal UdeA no presentó una estructura térmica estable a lo largo de todos los meses. Entre los 20 y los 40 cm se evidenciaron los cambios más pronunciados de temperatura (termoclina). Los eventos de mezcla completa se presentaron entre las 6:00 y 9:00 horas, cuando los gradientes de temperatura oscilaban entre $0 \leq x \leq 0,2$ (°C/m). Por el contrario, en el periodo de tarde a noche (15:00 a 21:00 horas) los gradientes fueron más marcados, con

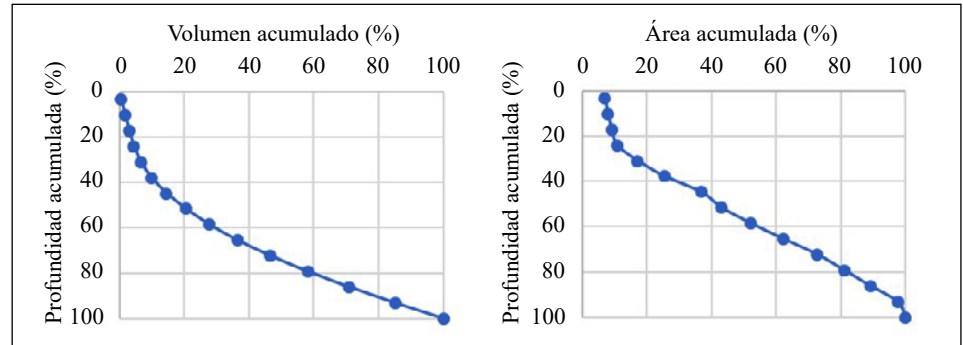


Figura 3. Curvas hipsográficas para el volumen y área acumulada del humedal UdeA

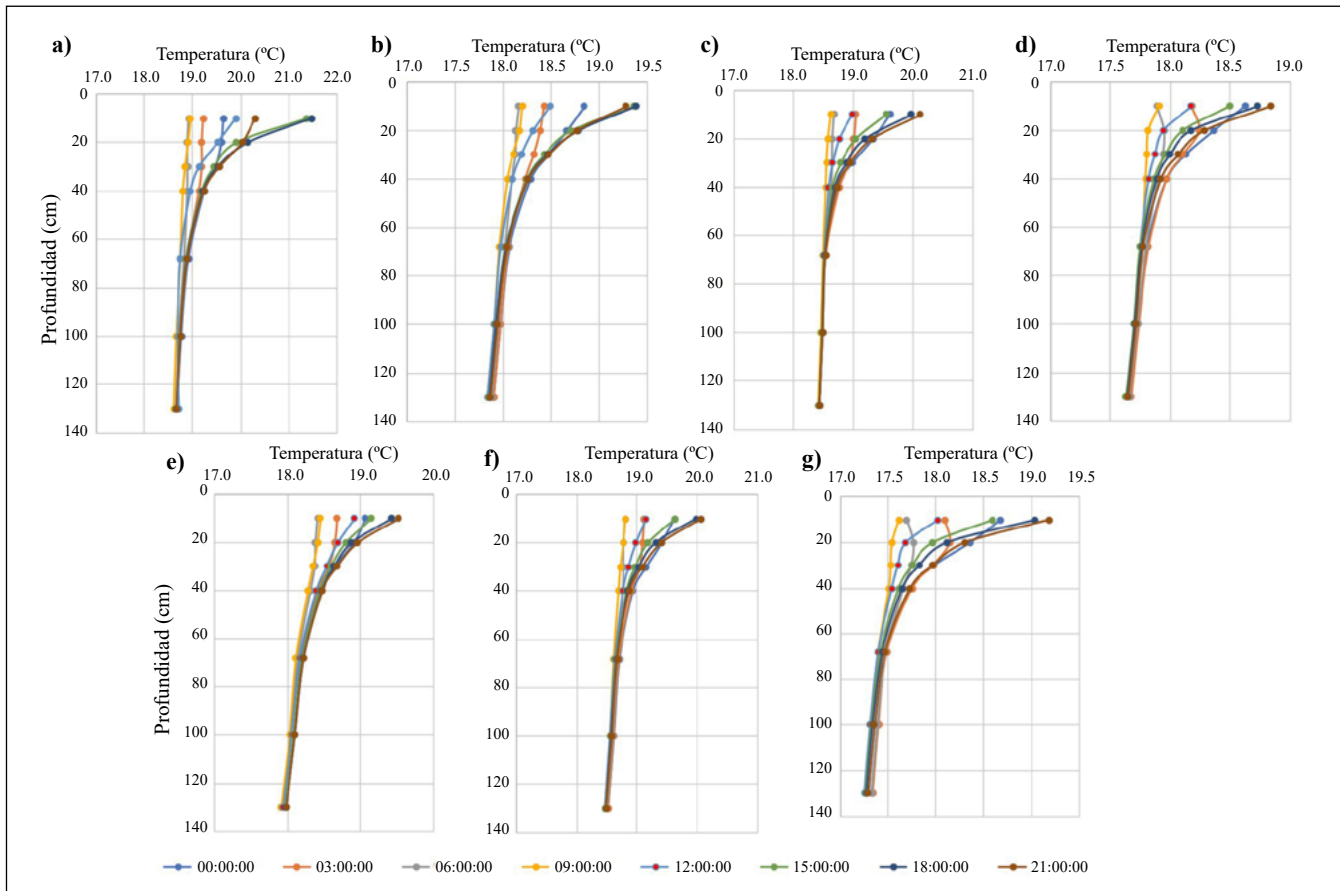


Figura 4. Perfil de temperaturas del humedal UdeA. a. marzo; b. abril; c. mayo; d. junio; e. julio, f. agosto; y g. septiembre

un promedio de 1,29 °C/m. Especialmente en marzo y abril el máximo gradiente (2,33 y 1,27 °C/m, respectivamente) se dio a las 18:00 horas. El resto de los meses el gradiente de desplazó a las 21:00 horas.

En la **figura 5a** se presenta el cambio de temperaturas con respecto a la profundidad para todo el periodo de muestreo, las cuales se clasificaron en cinco grupos según su similitud con base en los valores de p ($p < 0,05$) obtenidos en la prueba de comparación *post hoc* (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1046/2738>). Las temperaturas hasta los 0,4 m no presentaron una diferencia marcada con respecto a la superficie. A los 0,68 m se registró un cambio en la homogeneidad de la columna de agua que se mantuvo equiparable hasta los 1,3 m. Los valores de p obtenidos para las últimas tres profundidades (0,68; 1 y 1,3 metros) y la superficie evidenciaron más claramente las similitudes y las diferencias entre las profundidades con valores p de 0,026; 0,017 y 0,017, respectivamente ($p < 0,05$: diferencias significativas).

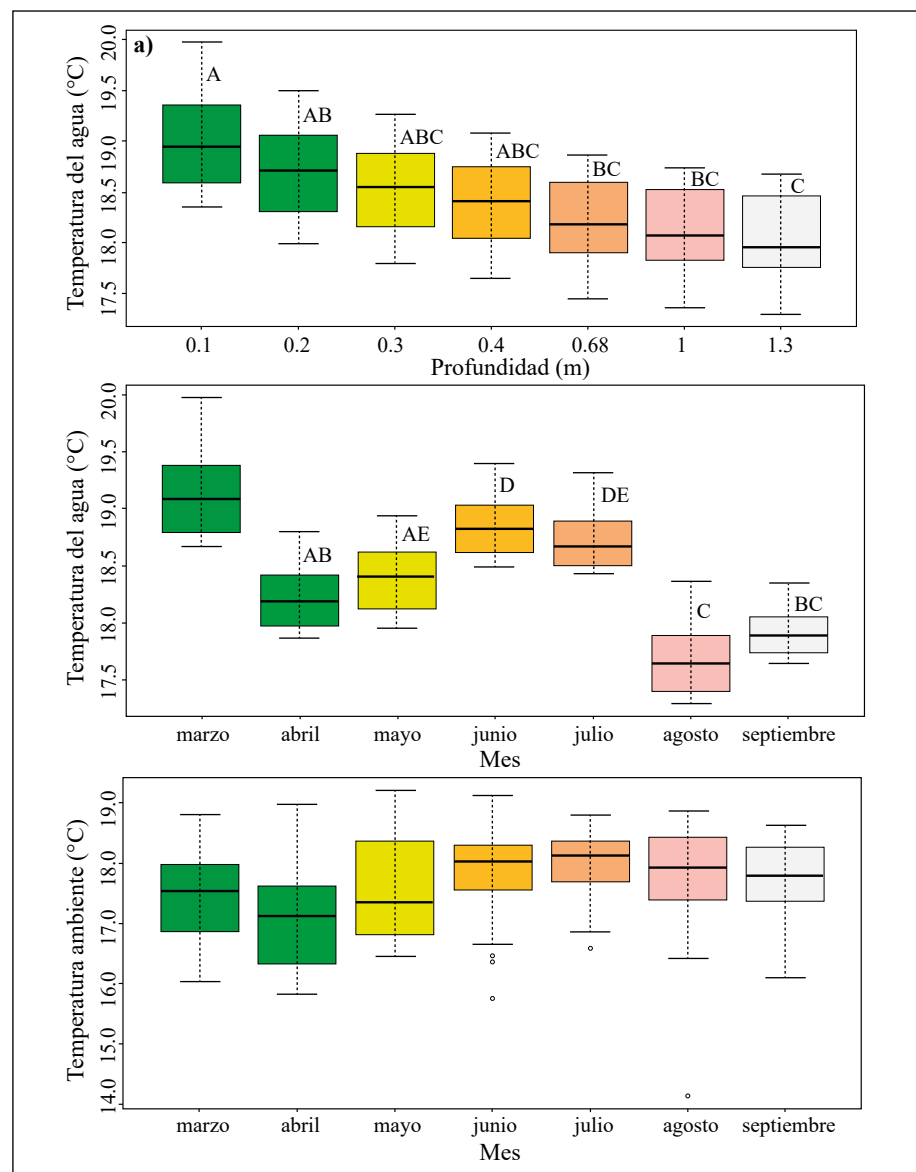


Figura 5. Diagrama de cajas de la temperatura del agua del humedal UdeA (°C) por profundidad (a), por mes (b) y temperatura ambiente por mes (c). A, B, C, D, E: resultados de la prueba *post-hoc*

En la **figura 5b** se evidencia cómo en los meses de lluvia (marzo, abril, mayo y septiembre), la temperatura en la columna de agua tuvo un descenso. Sin embargo, en los meses de marzo y mayo no se presentó esta disminución de manera marcada, ya que es el periodo de transición de sequía a lluvia y viceversa. Aunque agosto se considera como un mes de sequía, se pudo haber presentado una anomalía en el ambiente que provocara una disminución de la temperatura del agua. Asimismo, se observó que junio y julio fueron los meses en los que la temperatura tendió a aumentar en comparación con los demás meses (a excepción de marzo). Según los resultados de la prueba *post hoc*, se evidenció que junio y julio fueron los de mayor similitud, con un valor de p de 0,456, así como abril y mayo, también similares ($p=0,383$), en tanto que de septiembre a abril (0,097) y de marzo a julio (0,073) se presentó menor relación, con un valor de p menor al de la significación (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1046/2739>).

En la **figura 5c** se aprecia un descenso de la temperatura ambiente en la época lluviosa y su aumento en la temporada seca, sin embargo, a pesar de esto, la temperatura se registró siempre en el rango de 15,7 a 19,2 °C, por lo que puede decirse que la región presenta una variación moderada en esta variable.

En la **figura 6a** se presenta el comportamiento en el almacenamiento de calor durante el periodo evaluado en intervalos de tres horas para un día promedio por mes. Se evidenció que los puntos máximos se registraron en marzo, junio y julio, con valores de 10431,42; 10239,52 y 10192,55 J/cm² entre las 18:00 y las 21:00 horas. En agosto se registró el valor mínimo de almacenamiento a las 09:00 horas, con un valor de 9466,47 J/cm², en comparación con los demás meses.

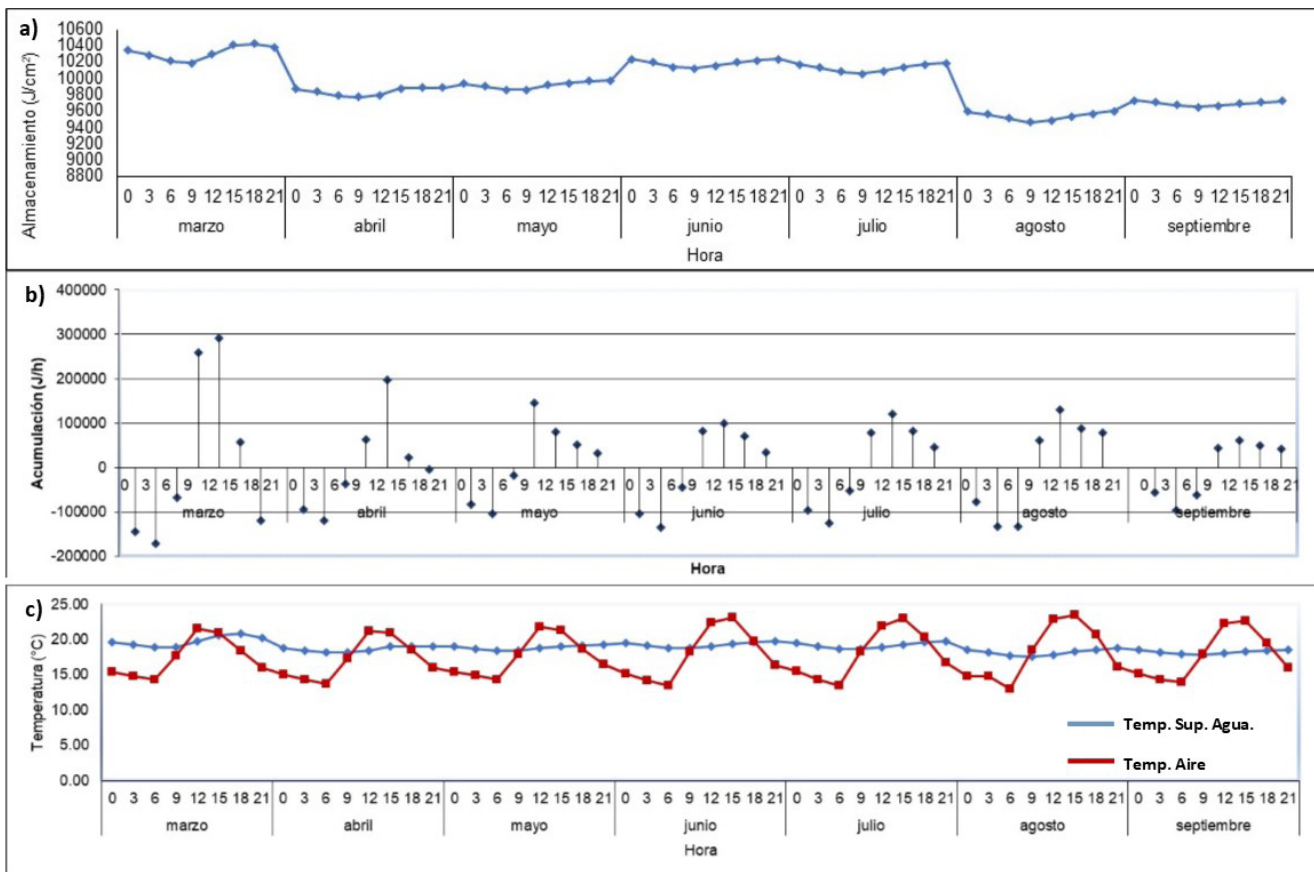


Figura 6. Comportamiento temporal del almacenamiento de calor (a); de la acumulación de calor (b) y la temperatura del agua y el aire (c) en el humedal UdeA

La acumulación de calor (**Figura 6b**) responde a la ganancia y la pérdida de energía en respuesta a la incidencia de la radiación solar y la temperatura ambiente. Se observó una oscilación con valores positivos, generalmente entre las 09:00 y las 21:00 horas, un valor máximo de acumulación de 291035,653 J/h en marzo, y valores negativos entre las 00:00 y 09:00 horas, con un mínimo de -171046,331 J/h, también en marzo. Las pérdidas y las ganancias del humedal se pueden corroborar al sobreponer las curvas de la temperatura del aire y la superficie del agua (**Figura 6c**). En cuanto al flujo de calor por convección, cuando la temperatura del aire sobrepasa la temperatura del agua la transferencia de calor se torna en el sentido aire-agua, pero cuando la temperatura de la atmósfera desciende por debajo de la temperatura del agua, la transferencia se da en el sentido contrario.

En la **figura 7a** se presentan los valores cuantificados de la resistencia a la mezcla en la columna de agua. Estos datos exhibieron un comportamiento relativamente uniforme durante el período de estudio, con excepción de marzo, que presentó el valor máximo calculado de 0,8 erg. Sin embargo, el valor máximo promedio mensual de la resistencia fue de 0,48 erg entre las 15:00 y 21:00 horas.

En la **figura 7b** se observa un patrón de desfase de tres horas entre el pico máximo de radiación y el registro de temperatura máxima en la superficie del agua. Los máximos niveles de radiación se presentaron durante el mes de agosto, con un valor pico de 781 W/m². Durante todo el periodo de monitoreo, el valor máximo mensual promedio de radiación fue de 642 W/m².

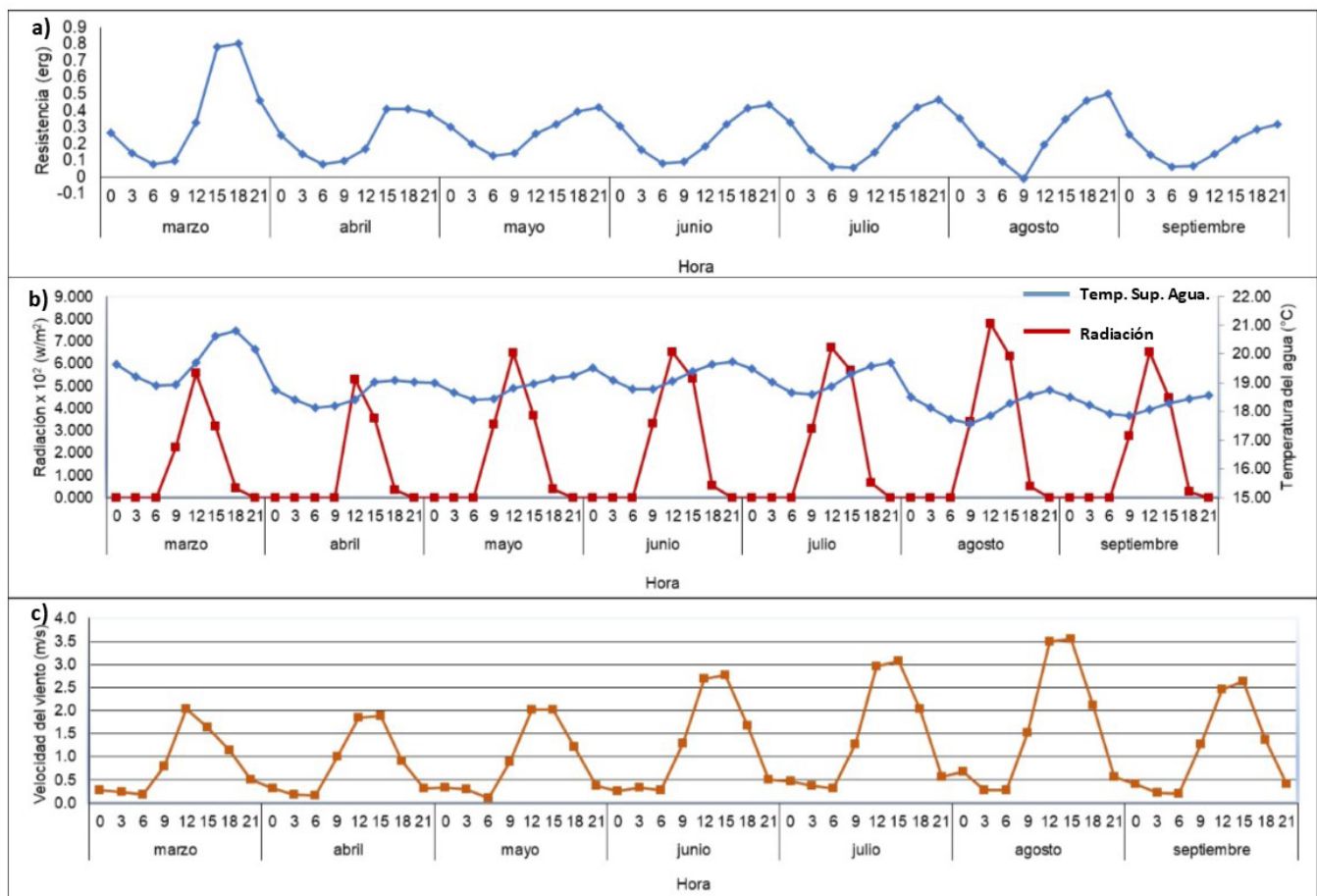


Figura 7. Comportamiento temporal de la resistencia a la mezcla (a); la temperatura del agua con radiación solar (b) y la velocidad del viento (c) en el humedal UdeA

Por último, la velocidad media del viento presentó sus mayores magnitudes durante los meses de julio y agosto, con valores de 3,1 y 3,5 m/s, respectivamente; este comportamiento coincidió con los meses de máxima radiación (**Figura 7c**).

Discusión

El humedal analizado se caracteriza como un sistema somero de poca área y agua relativamente clara, sin embargo, el paso de la luz se ve restringido por la gran cantidad de plantas acuáticas. Presenta una forma alargada en la zona este, donde luego se extiende en una figura más circular. Según **Quijano, et al.** (2018), el cuerpo de agua se considera eutrófico y hace parte de los ecosistemas lénticos que predominan en Colombia, como lo señalan **Benjumea, et al.** (2008) y **Montoya** (2005). Según el índice de desarrollo del volumen (V_d) (**Tabla 1**), se asume que el vaso se asemeja a la letra U, lo que es típico en la mayoría de los lagos (**Roldán & Ramírez, 2008**).

En cuanto a la profundidad media, este es un parámetro asociado con la productividad de los lagos según **Cole & Weihe** (2015) y presenta una relación inversamente proporcional, por lo que sería de esperarse que el humedal UdeA presentara un alto nivel de productividad, sin embargo, **Quijano, et al.** (2018) encontraron que la presencia dominante de las algas *Cryptomonas* sp. y *Peridinium* sp., de características mixotróficas, puede producir una baja incidencia de la luz en la zona fótica, que, a su vez, se ve reflejada en el bajo nivel de oxígeno registrado (3 mg/l), por lo que el humedal no presentó las condiciones propias de un sistema de alta productividad. En varios estudios se ha registrado una elevada producción primaria asociada con el fitoplancton en la zona fótica, la cual va decreciendo a medida que disminuye la luz incidente y la transparencia (**Esteves, 1998**), (**Montoya & Aguirre, 2010**).

Según **Wetzel** (2001), la mayoría de los lagos con profundidades relativas (D_r) inferiores al 2 % presenta bajas profundidades y grandes áreas superficiales, en tanto que lagos con D_r mayores al 4 % presentan características opuestas. En el caso del humedal UdeA esta condición permite la estabilidad térmica en la columna de agua, sin embargo, su origen artificial no facilita una buena relación entre estos valores como lo han registrado algunos autores (**Montoya, 2008**). El caso contrario se presentó en la cienaga de Cachimbero, con una profundidad relativa (D_r) de 0,14 % (**Benjumea, et al., 2008**), sistema acuático que evidenció poca estabilidad térmica (**Benjumea & Wills, 2007**).

La oscilación del gradiente térmico obedece a la ganancia y acumulación térmica en el cuerpo de agua por la incidencia de la radiación durante las horas del día y por el intercambio de calor con el ambiente hasta horas de la noche, cuando se alcanza el máximo gradiente. Según **Sierra** (2011), se considera que los sistemas lénticos tropicales presentan estratificación si se da una diferencia de 0,2 °C/m en la columna de agua, por lo que el humedal UdeA presenta frecuentes eventos de estratificación débil y mezcla completa en cortos periodos de tiempo, lo que coincide con lo reportado por **Benjumea & Wills** (2007) en la cienaga de Cachimbero, donde los perfiles de temperatura del agua se tornan ortógrados en algunos periodos, lo que implica un decrecimiento del gradiente de temperatura, principalmente después de la media noche, cuando la columna se hace totalmente uniforme.

No se registró estabilidad térmica del cuerpo de agua (**Figura 4**), lo cual coincide con los ecosistemas templados (**Ortega, et al., 2010**). En general, la estratificación térmica siguió un ciclo de 24 horas, tanto en la época seca como de lluvias, lo que concuerda con lo reportado en otros estudios en el trópico como los de **Ramírez & Díaz** (1995) y **Ganf** (1974).

Según la clasificación de **Lewis** (1983), el humedal UdeA presenta un patrón de mezcla polimíctico cálido continuo, al encontrarse en la denominación de lagos poco profundos tal como lo confirmó el análisis morfométrico. Por otro lado, la clasificación de **Hutchinson & Löffler** (1956) no puede considerarse porque abarca principalmente lagos con profundidades mayores a 10 m.

Según **Lewis** (1983), el hipolimnion se caracteriza por ser una capa donde el gradiente térmico ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) tiende a cero de manera constante, y para que se presente en lagos tropicales estos deben tener una profundidad mayor o igual a 100 m para alcanzar una capa gruesa e inmutable durante la estratificación que se pueda definir como hipolimnion. Por ello los lagos someros tropicales no presentan hipolimnions claramente definidos. Sin embargo, en los eventos de estratificación del humedal UdeA se pudo establecer que la capa de aguas más frías (hipolimnion) se encuentra entre los 0,68 y 1,3 m, donde los cambios de gradiente tienden a ser semejantes; a este le sigue una capa menos densa localizada entre los 0,2 y 0,68 m de profundidad (metalimnion), y los 0,2 m restantes poseen una temperatura mayor que oscila entre los 18 y 20 $^{\circ}\text{C}$ (epilimnion); en esta última, a los 0,1 m, se registraron los cambios más marcados de gradiente (termoclina). Se registraron eventos aislados el 27 de marzo y el 4 de abril, en los que el cambio de gradiente fue de 3 $^{\circ}\text{C}$ en la capa superficial del humedal (0,2 m), asumiendo que en dicha profundidad es donde se da una respuesta rápida a la variación meteorológica.

En estudios como los de **Lewis** (1983) y **Ramírez** (2015) se ha demostrado que en la zona del epilimnion se dan los mayores cambios, principalmente debidos a fenómenos de convección, ya que esta es la parte más superficial, sin embargo, es importante tener en cuenta las dimensiones de cada ecosistema léntico en el trópico, pues presentan profundidades y áreas muy superiores que las de los humedales; es relevante destacar que los estudios que abarcan la estructura térmica en Colombia se han hecho principalmente en embalses (**Marín**, 2015; **Ramírez**, 2015; **Villegas, et al.**, 2006; **Largo**, 2011; **Román, et al.**, 2013) y en lagos de alta montaña (**Ramírez & Díaz**, 1995; **López, et al.**, 2015).

Se registró una mayor temperatura en los primeros 20 cm de profundidad, sin embargo, esta no difiere mucho de la del fondo. La temperatura del agua disminuyó a medida que aumentaba la profundidad, como se reporta para ecosistemas del trópico (**Benjumea & Wills**, 2007; **Richerson**, 1991; **Aguirre**, 1995; **López, et al.**, 2015).

La temperatura de la columna de agua no obedece estrictamente al régimen hidrológico bimodal establecido para el oriente antioqueño (**Guzmán, et al.**, 2014), sin embargo, se pudo observar una tendencia similar en la oscilación de la temperatura según el ciclo de sequía – lluvia – sequía – lluvia; por otro lado, en marzo, junio y julio se registró una mayor temperatura en el agua debido a que corresponden a un régimen de sequía (excepto marzo, que es un mes de transición).

La información brindada, conjuntamente con la variación meteorológica, permite entender mejor el comportamiento de la estratificación térmica del humedal UdeA. Los estudios más recientes de este aspecto en lagos tropicales coinciden con que la respuesta de la columna de agua a la mezcla está influenciada en menor medida por los patrones estacionales debido a una menor variabilidad en la radiación solar y la temperatura del aire en el ciclo anual, condición que difiere de la de los lagos templados (**Talling & Lemoalle**, 1998; **MacIntyre, et al.**, 2002, 2014; **Augusto-Silva, et al.**, 2019). Por lo tanto, las variables de mayor importancia para el caso de estudio fueron la radiación, la temperatura del aire y la velocidad del viento.

La resistencia a la mezcla responde a las condiciones propias de cada ecosistema; un ejemplo es la ciénaga de Cachimbero, la cual se ubica en un ambiente cálido (**Benjumea & Wills**, 2007), lo que provoca que se generen mayores gradientes de densidad entre la superficie y el fondo, lo que implica que el viento debe realizar un gran esfuerzo para generar la mezcla, sin embargo, en el caso del humedal UdeA se presenta un conjunto de elementos que no favorecen la acción del viento: cercos vivos, macrófitas flotantes y construcciones, por lo que el viento no es un factor determinante en la mezcla que genera.

En cuanto la velocidad del viento, se obtuvo un valor medio de 2,5 m/s, el cual no difiere en mayor medida de los valores medios anuales registrados para el departamento de Antioquia, con valores entre 0 y 2,5 m/s, pero sí respecto a la costa atlántica y las zonas de alta montaña donde los valores fluctúan entre 3,5 y 4 m/s (**Ruíz, et al.**, 2017), sin embargo, la velocidad registrada en la estación de Guarne alcanzó la

velocidad suficiente para la mezcla en el cuerpo de agua: según **Holloway** (1980), para una profundidad de 2 metros, las ráfagas de viento deben estar entre los 0 y 2 m/s para la mezcla.

En general, se pudo observar que el humedal UdeA presenta un conjunto de condiciones morfométricas que facilitan la acción de la temperatura ambiente y, en menor medida, la velocidad del viento para generar la mezcla; entre estas se destacan la profundidad media y el área, las cuales lo caracterizan como un ecosistema pequeño y propenso a una mayor influencia de las variables meteorológicas. Específicamente se encontró una mayor relación con la temperatura ambiente, ya que la interacción con la columna de agua responde a fenómenos convectivos diarios que abarcan la totalidad de la columna, posiblemente por su baja profundidad. En contraste, no se observó que el viento fuera una variable determinante para los eventos de mezcla, ya que se registraron en las horas de mayor calma y dadas las barreras presentes fuera y dentro del sistema.

Por último, el comportamiento exhibido por la temperatura ambiente (**Figura 5c**), incluyó una oscilación que se ajusta al régimen hidrológico bimodal de Colombia (**Guzmán, et al., 2014**). Además, las variaciones en el almacenamiento y la resistencia (**Figuras 6a y 7a**, respectivamente) fueron bajas comparadas con lo registrado por **Benjumea & Wills** (2007), con valores entre 27037,4 y 26489 J/cm², aunque en horas de la tarde el dato de almacenamiento iba incrementándose por la radiación proveniente del sol.

Conclusión

Se estableció el origen artificial del humedal UdeA mediante la cuantificación de los parámetros morfológicos y morfométricos. A partir de ellos y del análisis de las dinámicas de las series meteorológicas, se pudo determinar que el humedal presenta frecuentes eventos de estratificación débil y mezcla completa en periodos de tiempo menores a un día, lo que lo clasifica como un sistema polimictico cálido continuo. Este comportamiento de la estructura térmica se explica en gran medida por la dinámica de las variables meteorológicas, principalmente la temperatura ambiente y la radiación solar, en las cuales no se observó un cambio significativo entre los diferentes periodos de lluvia y sequía, por lo que su variación se percibió en mayor medida a escala diaria. Por otro lado, el viento no se configuró como un factor clave para la variación de la estructura térmica debido a las condiciones desfavorables en su línea de acción como la presencia de cercos vivos, edificaciones y plantas flotantes. Se encontró poca bibliografía sobre el efecto de las macrófitas acuáticas en la estructura térmica, por lo que se recomienda profundizar en este aspecto en futuras investigaciones.

Este estudio aspiraba a aportar herramientas técnicas para complementar los futuros planes de manejo ambiental y de conservación de humedales de montaña, entendiendo que la estructura térmica ejerce una influencia primordial en el comportamiento de variables como la solubilidad de gases, la cinética de reacciones químicas, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo de organismos en el agua, entre otros.

Información Suplementaria

Tabla 1S. Valor de p en la prueba post hoc comparativa de la temperatura del agua y la profundidad. Las letras iguales indican similitud. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1046/2738>

Tabla 2S. Valor de p en la prueba post hoc comparativa de la temperatura del agua por mes. Las letras iguales indican similitud. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1046/2739>

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Grupo de Investigación Limnología y Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Oriente y sus semilleros asociados. Así como a la Corporación Autónoma Regional - Cornare y la Alcaldía de Rionegro. Adicionalmente a la Universidad de Antioquia seccional oriente por facilitar sus instalaciones.

Contribución de los autores

Los autores declaran haber participado activamente en cada una de las fases y secciones del estudio y en todo lo concerniente a la gestión, procesamiento, análisis y discusión de la información.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Referencias

- Aguirre, N.** (1995). Estructura térmica de un embalse neotropical. *AINSA*. **26**: 48-56.
- Augusto-Silva, P. B., MacIntyre, S., de Morales Rudorff, C., Cortés, A., Melack, J. M.** (2019). Stratification and mixing in large floodplain lakes along the lower Amazon River. *Journal of Great Lakes Research*. **45** (1): 61-72.
- Benjumea, C. A. & Wills, Á.** (2007). Evaluación de la estructura térmica y su relación con el oxígeno disuelto del agua en la ciénaga Cachimbero, municipio de Cimitarra Santander. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. **41**: 48-65.
- Benjumea, C. A., Wills, Á., Aguirre, N. J.** (2008). Principales aspectos morfométricos de la ciénaga de Cachimbero, Santander-Colombia. *Gestión y ambiente*. **11** (2): 1-8.
- Birge, E. A.** (1915). The heat budgets of American and European lakes. *Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett.* **18** (Pt. 1): 166-213.
- Birge, E. A.** (1916). The work of the wind in warming a lake. *Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett.* **18** (Pt. 2): 341-391.
- Chapra, S. C.** (1997). *Surface Water Quality Modeling*. New York: McGraw-Hill. p. 844.
- Cole, G. A. & Weihe, P. E.** (2015). *Textbook of limnology*. Illinois: Waveland Press, Inc. p. 440.
- Cornare.** (2018). Evaluación y zonificación del riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de el Carmen de Viboral. Obtenido de Evaluación y zonificación del riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de El Carmen de Viboral. Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.cornare.gov.co/GestionRiesgo/EL-CARMEN/EL-CARMEN-DE-VIBORAL.pdf>
- Dugan, P. J.** (1992). Conservación de humedales un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias. Gland-Suiza: Unión Mundial para la Naturaleza. p. 100.
- Esteves, F.** (1998). *Fundamentos de limnología*. Sao Paulo: Interciencia. p. 602.
- Farjas, M.** (2010). Levantamientos batimétricos. Universidad Politécnica de Madrid, OCW. España. Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2018. Disponible en: http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-yfotogrametria/topografia-ii/Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf
- Ganf, G. G.** (1974). Diurnal mixing and vertical distribution of phytoplankton in a shallow equatorial lake (Lake George, Uganda). *Journal of Ecology*. **62** (2): 611-629.
- Guzmán, D., Ruíz, J. F., Cadena, M.** (2014). Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través del análisis de componentes principales (ACP). *IDEAM*. p. 54.
- Hakanson, L.** (1981). *A manual of lake morphometry*. Berlin: Springer-Verlag. p. 87.
- Holloway, P. E.** (1980). A criterion for thermal stratification in a wind-mixed system. *Journal of Physical Oceanography*. **10** (6): 861-869.
- Hutchinson, G. E. & H Löffler.** (1956). The thermal classification of lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **42** (2): 84.
- Intituto de Investigación de Recursos biológicos Alexander Von Humboldt.** (2015). Colombia anfibia, un país de humedales. Bogotá: Panamericana. p. 140.
- Jaramillo L, J. C. & Gaviria, S.** (2003). Caracterización física, química y estructura de la comunidad zooplanctónica de un pequeño lago tropical, lago Santander (Rionegro, Antioquia, Colombia). *Caldasia*. **25** (2): 355-380.
- Largo-Gaviria, D. C.** (2011). Caracterización espacio-temporal de la estructura térmica del embalse Porce II. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. p. 117.
- Lewis, W. M.** (1983). Temperature, heat and mixing in Lake Valencia. *Limnology and Oceanography*. **28** (2): 273-286.
- López-Martínez, M. L., Jurado-Rosero, G. A., Páez-Montero, I. D., Madroñero-Palacios, S. M.** (2015). Estructura térmica del lago Gamués, un lago tropical de alta montaña. *Luna azul*. **44**: 94-119.

- MacIntyre, S., Romero, J. R., Kling, G. W.** (2002). Spatial-temporal variability in surface layer deepening and lateral advection in an embayment of lake Victoria, East Africa. *Limnology and Oceanography*. **47** (3): 656-671.
- MacIntyre, S., Romero, J. R., Silsbe, G. M., Emery, B. M.** (2014). Stratification and horizontal exchange in lake Victoria, East Africa. *Limnology and Oceanography*. **59** (6): 1805-1838.
- Marín-Ramírez, A.** (2015). Corrientes de densidad en embalse Amaní y su influencia en la estructura térmica y la calidad del agua. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. p. 89.
- Montoya, Y.** (2005). Caracterización morfométrica básica de tres lagos someros en el municipio de el Carmen de Viboral (antioquia), Colombia. *Actualidades Biológicas*. **27**: 79-86.
- Montoya, Y.** (2008). Caracterización morfométrica de un sistema fluvio-lacustre tropical, Antioquia, Colombia. *Caldasia*. **30** (2): 413-420.
- Montoya, Y. & Aguirre, N.** (2010). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. **55**: 76-89.
- Ortega Arango, S., Restrepo, J. P., Correo Urán, R., Gómez Giraldo, A., Toro Botero, M.** (2010). Análisis de sensibilidad para la modelación unidimensional de la estructura térmica de embalses tropicales. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta de Este. p. 1-15.
- Quijano Abril, M. A., García Duque, J. J., Gómez Hoyos, A. C.** (2018). Análisis espacial como una herramienta para delimitación de humedales urbanos. En M. A. Quijano Abril, S. L. Villabona González, J. J. García Duque, A. C. Gómez Hoyos (Eds.). *Los humedales del altiplano del Oriente antioqueño y su conceptualización* (págs. 51-94). Rionegro-Antioquia: Fondo editorial Universidad Católica de Oriente.
- Ramírez, J. J.** (2015). Comportamiento diario y estacional de las estructuras óptica y térmica en un embalse tropical colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **39** (150): 77-90
- Ramírez, J. J. & Díaz C, A.** (1995). Cambios diurnos de temperatura y variables físicas y químicas en dos épocas del año en la laguna del Parque Norte, Colombia. *Acta Limnologica Brasiliensia*. **7**: 87-104.
- Ramsar.** (1971). Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas. Ramsar-Irán.
- Rendón-Cardona, A. J.** (2016). Plan de desarrollo municipal "Rionegro, Tarea de Todos" 2016-2019. Rionegro.
- Richerson, P. J.** (1991). El régimen de estratificación termal. En C. Dejoux & A. Iltis. (Eds.). *El lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual* (p. 139-148). La Paz - Bolivia: ORSTOM.
- Roldán-Pérez, G. & Ramírez-Restrepo, J. J.** (2008). Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia. p. 440.
- Román-Botero, R., Gómez-Giraldo, A., Toro-Botero, M.** (2013). Efecto estacional de los afluentes en la estructura térmica de un pequeño embalse neotropical, La Fe-Colombia. *Dyna*. **80** (177): 152-161.
- Ruiz Murcia, J. F., Serna Cuenca, J., Zapata Lesmes, H. J.** (2017). Atlas de viento de Colombia. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. p. 124.
- Sierra-Ramírez, C. A.** (2011). Calidad del agua, evaluación y diagnóstico. Medellín: Universidad de Medellín. p. 457.
- Talling, J. F. & Lemoalle, J.** (1998). *Ecological Dynamics of Tropical Inland Waters*. New York: Cambridge. p. 390.
- Villegas, B., Toro, M., Aguirre, N., Palacio, J.** (2006). Simulación numérica de la estructura térmica del embalse Porce II en Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua*. **21** (3): 17-31.
- Wetzel, R. G.** (2001). *Limnology*. San Diego-California: Academic Press. p. 1006.
- Wetzel, R. G., & Linkens, G. E.** (2000). *Limnological analyses*. Nueva York: Springer. p. 428.