

Parámetros morfométricos y estado limnológico del embalse Calima, Valle del Cauca, Colombia

Morphometric parameters and the limnological status of the Calima reservoir, Valle del Cauca, Colombia

Gustavo A. Peñuela¹   Fabio Vélez²  Susana Velásquez²  Rubén Molina²  Néstor Aguirre² 

¹Grupo de Investigación Diagnóstico y Control de la Contaminación – GDCON, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín Colombia.

²Grupo de Investigación Geolimna, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia; Medellín Colombia.

¿Cómo citar?

Peñuela GA, Vélez F, Velásquez S, Molina R, Aguirre N. Parámetros morfométricos y estado limnológico del embalse Calima, Valle del Cauca, Colombia. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(2)e-20914771

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i2.14771>

Recibido: 26/02/25

Revisado: 26/03/25

Aceptado: 21/07/25

Online: 08/08/25

Correspondencia

gustavo.penuela@udea.edu.co

Abstract

Introduction: The bathymetry of the Calima Reservoir has changed in the fifty-six years following its construction. This is essentially reflected in the loss of useful volume, average depth, and changes in the shape of the reservoir, which are due to sediment deposits in the reservoir's tailwaters and to changes in the terrestrial biotopes associated with the water surface.

Objective: To determine the bathymetric structure of the Calima Reservoir in 2023, locating the main spatial domains where the water body is most affected by the ingress of contaminants that likely promote the growth of algae and cyanobacteria and that may, in the near future, limit the use of the water for recreation, water sports, sport fishing, and other activities.

Methodology: A bathymetric profile was created over the surface or water surface, following lines in a zigzag trajectory during the month of April 2023. An echosounder with a side-facing radar transducer and GPS was used. Subsequently, using the collected field information, a data matrix was constructed in Excel and coupled with ArcGIS Pro version 3.1.3 for the bathymetric survey and to obtain the main physical parameters of the reservoir.

Results: Three bathymetric zones of the reservoir were observed. Zone A is where material has been deposited at the bottom of the water body and corresponds to the entrance of the Calima River, where the reservoir's shallowest isolines are located. Zone B corresponds to the narrow strip of the reservoir where depths range between 40 and 60 m. Zone C corresponds to the dam site, where depths close to 70 m were found. In Zone A, near the reservoir's tail, two streams enter the reservoir, collecting most of the wastewater from the municipality of Calima El Darién, where algal blooms have occurred.

Conclusions: The reservoir has an elongated shape associated with the flow axis of the Calima River. Upon entering the reservoir, this river loses its horizontal flow energy, depositing suspended solids. The reservoir then continues through a lentic zone, or still water zone, which narrows toward the deeper dam area. Thus, the dendritic zones are isolated from the main reservoir axis, and Zone A receives the largest amount of discharges, especially wastewater from the urban area of the municipality of Calima. This situation favors the massive growth of phytoplankton algae at the tail of the reservoir, located in Zone A.

Keywords: Reservoir, bathymetric map, morphometric parameters, water resources

Resumen

Introducción: La batimetría del Embalse Calima ha cambiado en los cincuenta y seis años posteriores a su construcción. Esto se refleja esencialmente en la pérdida de volumen útil, profundidad promedio y cambios en la forma del embalse, debido a los depósitos de sedimentos en sus aguas de cola y a cambios en los biotopos terrestres asociados a la lámina de agua.

Objetivo: Determinar la estructura batimétrica del Embalse Calima en 2023, localizando los principales dominios espaciales donde el cuerpo de agua se ve más afectado por la entrada de contaminantes que probablemente promueven el crecimiento de algas y cianobacterias y que, en un futuro próximo, podrían limitar el uso del agua para actividades recreativas, deportes acuáticos, pesca deportiva y otras.

Metodología: Se creó un perfil batimétrico sobre la superficie del agua, siguiendo líneas en zigzag durante el mes de abril de 2023. Se utilizó una ecosonda con un transductor de radar lateral y GPS. Posteriormente, utilizando la información de campo recopilada, se construyó una matriz de datos en Excel y se acopló con ArcGIS Pro versión 3.1.3 para el levantamiento batimétrico y la obtención de los principales parámetros físicos del embalse.

Resultados: Se observaron tres zonas batimétricas del embalse. La Zona A corresponde a la zona de depósito de material en el fondo del cuerpo de agua y corresponde a la entrada del río Calima, donde se ubican las isolíneas más someras del embalse. La Zona B corresponde a la franja estrecha del embalse, donde las profundidades oscilan entre 40 y 60 m. La Zona C corresponde al sitio de la presa, donde se encontraron profundidades cercanas a los 70 m. En la Zona A, cerca de la cola del embalse, dos arroyos ingresan al embalse, recolectando la mayor parte de las aguas residuales del municipio de Calima El Darién, donde se han presentado floraciones de algas.

Conclusiones: El embalse presenta una forma alargada asociada al eje de flujo del río Calima. Al ingresar al embalse, este río pierde su energía de flujo horizontal, depositando sólidos en suspensión. El embalse continúa entonces por una zona léntica, o zona de aguas estancadas, que se estrecha hacia la zona más profunda de la presa. Por lo tanto, las zonas dendríticas quedan aisladas del eje principal del embalse, y la Zona A recibe la mayor cantidad de descargas, especialmente aguas residuales del área urbana del municipio de Calima. Esta situación favorece el crecimiento masivo de algas fitoplanctónicas en la cola del embalse, ubicada en la Zona A.

Palabras clave: Embalse, mapa batimétrico, parámetros morfométricos, recursos hídricos



Introducción

Los embalses son ecosistemas artificiales de agua dulce con propósitos con diferentes como disponer del recurso hídrico para la generación de energía, agua de abastecimiento de plantas de potabilización, la pesca, la recreación y práctica de deportes náuticos. Debido a las demandas de energía en Colombia, la construcción de embalses desde mediados del siglo XX fue la ruta a seguir para obtener energía hidroeléctrica (1). El embalse Calima, ubicado en la vertiente occidental colombiana, en jurisdicción del municipio Calima El Darién, Valle del Cauca en Colombia, fue construido en 1967 para la generación hidroeléctrica. La Tabla 1 presenta las características de cuatro embalses colombianos, también construidos con fines de generación energética en biotopos altoandinos. Estos embalses no solo se utilizan para la producción de electricidad, sino que también se aprovechan para otros usos (1).

Tabla 1. Características físicas de algunos embalses de generación de energía hidroeléctrica en los Andes Colombianos (1).

Embalse	Año de inicio	Zona presa Prof.máx. (m)	Área (ha)	Nivel máx. (m)	Cap. Instalada (Kw)	Vol. Útil Millones (m³)	Caudal (m³/s)	TRH (días)	Principal uso
Calima	1967	98	1980	1400	120	438	76	66.6	Energía
Guatapé	1973	60	6365	1887	560	1169	88	153.7	Energía
Guavio	1993	232	1160	1640	1000	950	72	152.7	Energía
Río Grande	1989	59	1100	-	325	100	50	231.0	Energía

TRH Tiempo de retención hidráulico. Ha hectáreas

Los paisajes donde se establecen reservorios de agua se convierten en un atractivo para diferentes actividades humanas, desde el turismo hasta el mercado inmobiliario, lo que impacta en el ordenamiento territorial, aumenta el precio de la tierra, copa la capacidad de recepción de población del entorno, y genera finalmente problemas de contaminación tales como las aguas residuales domésticas, que, de manera directa, afectan la calidad de agua del Embalse. Por ejemplo, el desarrollo urbano incrementa la producción de aguas residuales domésticas que, para el caso del Embalse Calima, éstas fluyen hacia el espejo de agua aportando materia orgánica particulada y disuelta, aporta nutrientes en forma mineral y microorganismos de tipo bacteriano.

Convergen en el territorio asociados a los embalses diferentes intereses, tanto económicos como sociambientales afectando las condiciones fisicobióticas de un ecosistema artificial como lo es el embalse Calima. Así, la empresa generadora de electricidad orienta sus esfuerzos hacia la producción de energía hidroeléctrica, en tanto los operadores turísticos se consideran motores de la economía local; los dueños de las fincas aledañas extienden su propiedad más allá de los límites normativos y se escudan en la propiedad privada para incumplir con las obligaciones como ciudadanos. Las corporaciones autónomas en cada departamento, creadas en Colombia para la protección ambiental de los recursos naturales, poseen recursos limitados para cubrir un área enorme bajo su custodia para ejercer labores de control, promoción, y cuidado del medio ambiente; las autoridades civiles locales por otro lado, se limitan al ejercicio administrativo sin

ir más allá de los mínimos exigibles, frente a una comunidad escasamente sensibilizada y con prioridades e intereses que no necesariamente están en armonía con la naturaleza.

Como se observa en la tabla 1, el embalse Calima es uno de los primeros embalses construidos en nuestro país, y aún hoy, presta servicios de generación de energía, turismo, recreación, deportes acuáticos y pesca. Es un embalse profundo, con 98 m de columna de agua en la zona de la presa durante la época de aguas altas.

Margalef (2) consideró a los embalses como ecosistemas híbridos entre un río y un lago, y hoy, esta consideración cobra relevancia puesto que la condición de aguas represadas de un embalse está fuertemente asociada a sus tributarios tanto en cantidad como calidad de agua. Para analizar un embalse es necesario partir de su configuración física, esto es, su análisis batimétrico que permita determinar los principales parámetros físicos del cuerpo de agua, en tanto su forma, tamaño, volumen, y en sí, sus posibles cambios morfológicos en el tiempo empleando métodos actuales del modelamiento espacial que son ya bastante precisos.

Para la presente investigación se planteó la siguiente pregunta: ¿Cómo es la batimetría del embalse Calima y la variación de los parámetros morfométricos entre los años 1967 y 2023? Como hipótesis se plantea que pasados 56 años el embalse ha cambiado respecto a su batimetría y esto se refleja esencialmente en la pérdida de volumen útil, la profundidad media y los cambios en la morfología de la línea de borde, esto debido a los depósitos de sedimentos en la zona de cola del embalse y los procesos erosivos en la línea de borde debida al oleaje en una zona donde la actividad del viento es relevante.

Los estudios de batimetría y morfometría de lagos y estanques se han beneficiado significativamente de los avances en tecnología y metodología en los últimos años. Los embalses y lagos presentan diferencias en sus características morfométricas, profundidad promedio, longitud de la línea de costa, área de espejo de agua, calidad de agua, entre otros (3,4). Estas diferencias se pueden cuantificar utilizando relaciones de escala.

Los problemas que ocurren en los cuerpos de agua pueden ser estudiados e investigados utilizando datos batimétricos, y tecnologías geoespaciales (5). En Brasil entre los años 2014 a 2023 y en diferentes cuerpos de agua, encontraron relaciones entre la batimetría y aspectos de calidad de agua como la turbidez. Esta variable se incrementa especialmente en la región norte del Brasil, donde convergen grandes cuencas hidrográficas.

El uso de cartas batimétricas históricas y presentes, pueden ofrecer información relevante en tanto cambios biofísicos de los cuerpos de agua que permitan un análisis comparativo de algunos parámetros físicos de ambientes como embalses y lagos (6). Por ejemplo, en Polonia se desarrolló un método para reconstruir el relieve del fondo de un estanque basándose en mapas antiguos y tasas de hundimiento del terreno, que puede utilizarse para estimar la capacidad hídrica del estanque con fines industriales o de infraestructura (7). En el lago Guatavita en Colombia, se realizó un estudio morfométrico, analizando parámetros como área, perímetro, profundidad máxima y volumen (8).

En la Bahía de Buenaventura en Colombia, se comprobó que el efecto de los cambios batimétricos en el tiempo de residencia produjo cambios en la morfometría de la bahía impactando significativamente su hidrodinámica y renovación de agua (9).

Los anteriores estudios en Brasil, Polonia y Colombia, son ejemplos que demuestran el valor de los análisis batimétricos y morfométricos para comprender las características y dinámicas de lagos, embalses y otros cuerpos de agua, que pueden informar su gestión y utilización.

Según los estudios, la cobertura terrestre y el terreno influyen en las relaciones de escala entre las características morfométricas de los lagos más que en las de los embalses. Los exponentes de escala que relacionan el área del lago, el volumen y la longitud de la costa difieren más de las expectativas teóricas basadas en restricciones geométricas para los lagos en comparación con los embalses. Esto sugiere que la cobertura terrestre y el terreno desempeñan un papel más importante en la configuración de la morfometría real de los lagos frente a la morfometría más restringida y diseñada de los embalses.

Por ejemplo, el exponente de escala volumen-área es mayor para los lagos que para los embalses, lo que indica que los lagos cubren una gama más amplia de volúmenes para una superficie determinada. El exponente de longitud área-costa también difiere más del valor esperado para los lagos en comparación con los embalses.

Estos hallazgos implican que la cobertura del suelo y el terreno pueden afectar significativamente las relaciones de escala de tamaño y la morfometría general de los lagos naturales, probablemente a través de procesos como la erosión, la sedimentación y el crecimiento de la vegetación.

Por el contrario, la morfometría de los embalses artificiales está más limitada por su diseño y construcción.

Comprender estas diferencias en las relaciones de escala entre lagos y embalses puede proporcionar información sobre cómo la cobertura del suelo y el terreno influyen en los procesos hidrológicos y los servicios ecosistémicos en estos cuerpos de agua (10). Así, los datos batimétricos se pueden utilizar para evaluar la sedimentación en cuerpos de agua, como el estudio de los sedimentos fluviales a la deforestación en la cuenca del Amazonas (11).

Las técnicas más modernas en este campo incluyen mapeo batimétrico de alta resolución: utilización de equipos de sonar avanzados, como ecosondas multihaz, para generar mapas 3D muy detallados de los fondos de lagos y estanques. Estos mapas proporcionan información valiosa sobre la topografía submarina y la distribución de sedimentos. Entre las tecnologías de teledetección se encuentran: integración de datos de teledetección de satélites, aviones o drones para monitorear los cambios en los niveles del agua, la dinámica de la costa y la cubierta vegetal alrededor de lagos y estanques. Estos datos ayudan a evaluar la salud ambiental y los cambios en estos cuerpos de agua, tal como los utilizados por Ariza Ortiz et al., 2018(12), Rodrigo, 2006(13), y Carreño et al., 2011(14).

Los sistemas de información geográfica (SIG) se usan para analizar datos batimétricos y morfométricos, lo que permite hacer modelos espaciales sofisticados, cálculos de volumen y mapeo de hábitat en lagos y estanques, que ayuda a gestionar los ecosistemas de forma eficaz.

Los métodos acústicos como sonar de barrido lateral, perfiladores del subfondo y perfiladores de corriente Doppler acústicos son usados para estudiar las características submarinas, la composición de los sedimentos y los patrones de movimiento del agua en lagos y estanques. Estos estudios proporcionan datos cruciales para la investigación ecológica y geológica.

Los estudios de campo integrados y la combinación de estudios de campo tradicionales con tecnologías modernas son fundamentales para una comprensión integral de las características de lagos y estanques. Esto puede incluir extracción de muestras de sedimentos, muestreo de la calidad del agua y evaluaciones biológicas junto con instrumentación de alta tecnología. Al emplear una combinación de estas técnicas de vanguardia, los investigadores y gestores ambientales pueden obtener conocimientos más profundos sobre la compleja dinámica de lagos y estanques. Esto, a su vez, facilita una mejor toma de decisiones para los esfuerzos de conservación, gestión de recursos y restauración de ecosistemas (Mariana Maestri 2020 (15), Agustín Monteoliva, P. Schneider 2005 (16), T. Arruebo 2014 (17), Juan Daniel Fabián Roland 2002 (18), L. Pineda-Alarcón, J. E. Cañón Barriga 2023. (19).

Materiales y métodos

Se realizó un perfil batimétrico sobre el espejo de agua, siguiendo las líneas con recorrido transecto en zigzag durante la campaña de muestreo de abril de 2023. Para esta tarea, se empleó una lancha con motor fuera de borda de 1150 HP, provista con ecosonda marca Hummbird 920c con transductor de radar lateral, y GPS. Se levantaron en total $n = 9553$ puntos midiendo la profundidad en metros, y las coordenadas en sistema de referencia geográfica WGS84. Previamente, se corroboraron las profundidades de 10 de los sitios más representativos, medidos manualmente para comprobar la precisión instrumental hasta el nivel del centímetro, encontrando que las diferencias no superaban los 5 cm (2"). Este número de sitios se considera óptimo en la medida que se mantengan diferencias en el rango de aceptación, en este caso 2", ya que implican un tiempo adicional apreciable en la labor de levantar la mayor cantidad de puntos del embalse en el menor tiempo posible, que corresponde a un día de muestreo.

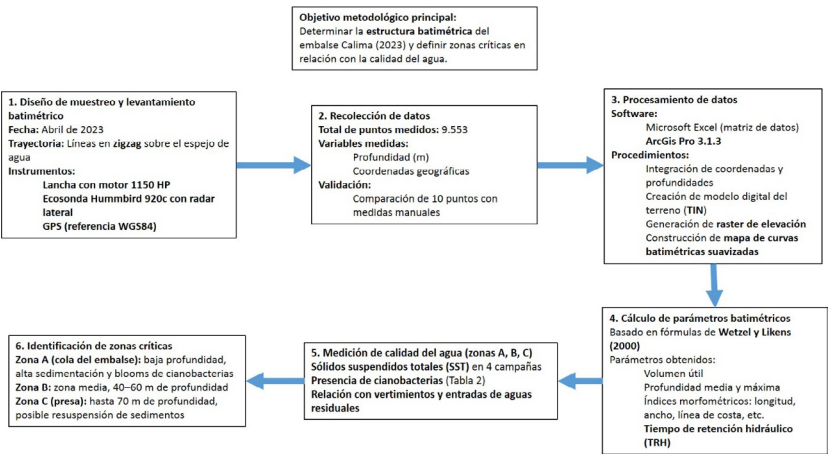


Figura 1. Conceptualización de la metodología

Posteriormente, con la base recopilada, se construyó una matriz de datos en Excel y se acopló a ArcGis Proversión 3.1.3. para el levantamiento batimétrico. Luego, a partir de la cartografía digital y la matriz de datos se procedió a la elaboración de un modelo digital TIN, con él se generó un Ráster de elevaciones que conduce a la producción de un mapa de curvas batimétricas que fue suavizado. Con estos insumos es posible calcular los parámetros batimétricos, teniendo en cuenta las ecuaciones propuestas en Wetzel y Likens (2000) (20).

Resultados

En la figura 2 se presenta el resultado final del mapa batimétrico obtenido con las mediciones de campo. Se observan tres zonas batimétricas del embalse: una zona A (porción superior derecha del mapa); donde se ha depositado material en el fondo del cuerpo de agua como se observa en el mapa batimétrico del año 2023 donde se encuentra la zona más somera del embalse, y que corresponde a la entrada del río Calima, allí se ubican las isolíneas de menor profundidad del embalse Calima. Es esta la zona de mayor pérdida de almacenamiento de agua del embalse. Una zona B que corresponde a la franja estrecha del embalse donde se encuentran profundidades entre 40-60 m, y la zona C en el sitio de Presa donde se pueden encontrar profundidades cercanas a los 70m. En el presente estudio en estas 3 zonas en el año 2023 se hicieron mediciones de sólidos suspendidos en el agua en 4 épocas del año (Figuras 3-5) en las campañas 1 y 2 ocurrieron la mayor cantidad de lluvias. En la zona A en ocasiones se encuentran floraciones de cianobacterias, como en el año 2023 (Tabla 2), pero no en las zonas B y C.

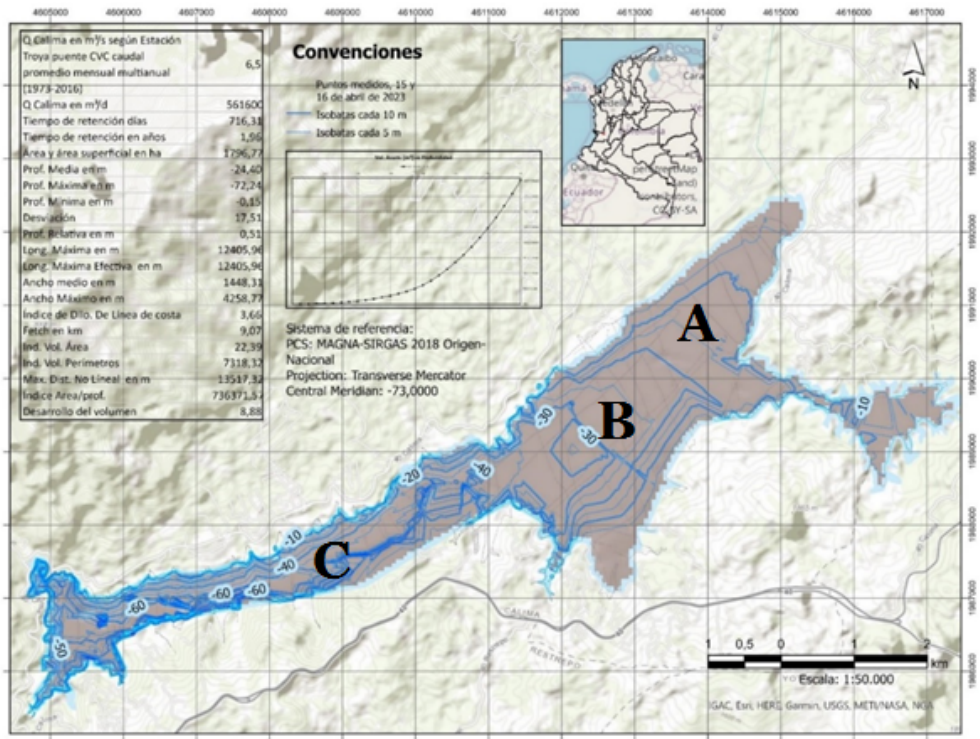


Figura 2. Mapa batimétrico del embalse Calima en el año 2023

En la figura 1 nótese la distribución de zonas A, B, y C que corresponden a la dirección de flujo del Embalse, esto es la zona A de ingreso del río Calima, en tanto la zona C corresponde a la zona estrecha del embalse cerca a la Presa.

En la tabla 2 se pueden observar los datos de densidad algal en las tres zonas delimitadas para el Embalse.

Tabla 2. Número de individuos de cianobacterias en muestras volumétricas en el embalse de Calima en el año 2023.

Profundidad/Punto	Total células/mL		
	Zona A	Zona B	Zona C
E1 (Superficie)	138.000.000	0.0	0.0
E2 (Zona media)	33.433.333	0.0	0.0
E3 (Fondo)	5.500.000.0	0.0	0.0

Como se observa en la tabla 3 se presentan diferencias significativas en el caudal medio del río Calima y por tanto en el tiempo de residencia.

Tabla 3. Parámetros batimétricos del embalse Calima para los años 1967 y 2023.

Parámetro	Año 1967 (1)	Año 2023
Q Calima en m³/s aguas arriba antes del Embalse		6.5
Q Calima en m³/d		561.600
Tiempo de retención días	66.6	308.3
Tiempo de retención en años		0.84
Área superficial en ha	1980	1796
Prof. Media en m		-24.40
Prof. Máxima en m	98	72.24
Prof. Mínima en m		-0.15
Desviación		17.51
Volumen útil Mill. m³.	438	402
Prof. Relativa en m		0.51
Long. Máxima en m		12.406
Long. Máxima Efectiva en m		12.405
Ancho medio en m		1.448
Ancho Máximo en m		4.258
Índice de Desarrollo De Línea de costa		3.66
Fetch en km		9.07
Ind. Vol. Área		22.39
Ind. Vol. Perímetros		7.318
Max. Dist. No Líneal en m		13.517
Índice Área/prof.		73.637
Desarrollo del volumen		8.88

Es importante resaltar que obtener datos batimétricos de un embalse permite una mejor gestión del recurso hídrico, y en nuestro país se requiere obtener la información básica de los embalses para poder tomar decisiones en tanto la disponibilidad de almacenamiento de agua, los depósitos de sedimento, el tiempo de vida útil de un embalse, entre otros. Se considera en esta investigación que a medida que pasa el tiempo, se debe completar la información física de un embalse, y por ello se considera relevante recuperar la información histórica del cuerpo de agua así no esté completa, y en años futuros con más estudios limnológicos se podrá tener una base de datos cada vez más completa.

Discusión

La zona A es probablemente la de mayor pérdida de almacenamiento de agua del embalse, es la menos profunda, menos de 3 m, y aunque no se tienen datos históricos de pérdida de volumen, es evidente que es una zona de depósitos de materiales. A esta zona llegan la mayoría de los tributarios del embalse, como es el río Calima del cual se originó el embalse, y 2 quebradas, una que recoge aguas tratadas en la planta de tratamiento de aguas residuales y aguas residuales no tratadas principalmente domésticas del municipio de Calima El Darién, y otra quebrada San José y quebrada la Virgen que también recoge aguas residuales de la misma municipalidad. Estos 3 tributarios llegan cerca a la cola del embalse, precisamente donde desemboca el río Calima. El municipio que lleva su nombre, ubicado a la orilla del embalse, a unos 5 Km de la cola, tiene ca. 19.000 habitantes. Sin embargo, su población aumenta ostensiblemente los fines de semana y en vacaciones debido al amplio turismo que atrae el embalse, donde existen más de 30 hoteles y una gran cantidad de personas de otras ciudades que tienen casas de vacaciones en este lugar.

En la cola del embalse en la zona A llegan una gran cantidad de contaminantes orgánicos y nutrientes, y por esta razón en ocasiones en el embalse en la zona cercana a la cola, por donde llegan los 3 tributarios, proliferan en ocasiones cianobacterias. Figuras 3,4,5.

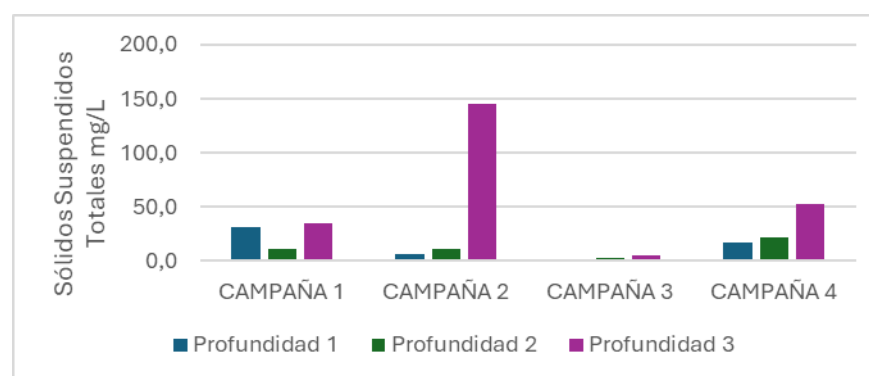


Figura 3. Perfil de los sólidos suspendidos totales en la zona A del embalse Calima en el año 2023.

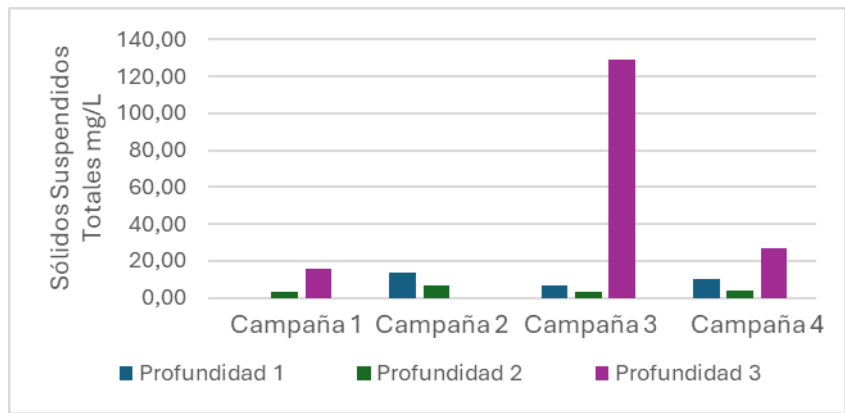


Figura 4. Perfil de los sólidos suspendidos totales en la zona B del embalse Calima en el año 2023.

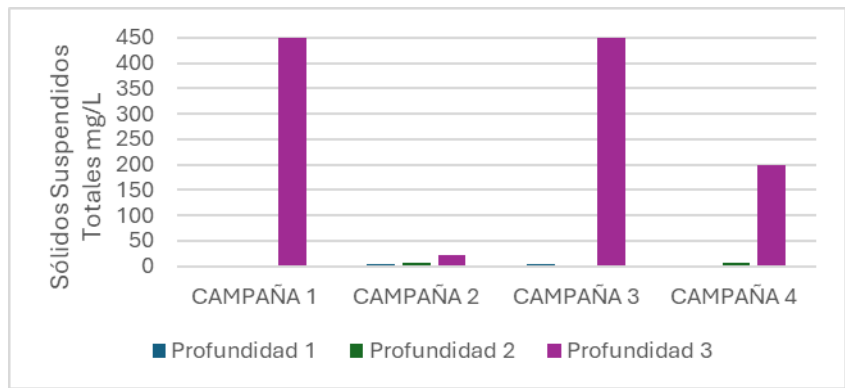


Figura 5. Perfil de los sólidos suspendidos totales en la zona C del embalse Calima en el año 2023.

El embalse cerca a la cola tiene baja profundidad, en épocas que no hay lluvias una parte de la zona A queda seca, y en épocas de lluvias puede tener una profundidad de 2 a 3 metros, pero normalmente tiene una profundidad de 1 a 1.50 metros, por esta razón cuando hay floraciones de cianobacterias las hay en toda la columna de agua y también en dicha zona hay una gran cantidad de peces, que son pescados por habitantes de Calima para el consumo en dicho municipio, esta zona se caracterizó por presentar temperatura del agua de mayores a 23 °C, transparencia Secchi entre menores a 1m, y alta disponibilidad de nutrientes. En la zona B se estrecha el embalse Calima donde se encuentran profundidades entre 40-60 m, y la zona C en el sitio de presa donde se pueden encontrar profundidades cercanas a los 70 m. En las zonas B y C, los vientos son muy propicios para la práctica de deportes acuáticos tales como vela, esquí náutico, windsurf, kitesurf, entre otros, ya que son los mejores vientos de América (Municipio Calima-Darién recuperado de <https://comunales.valledelcauca.gov.co/municipios-del-valle-del-cauca/calima-el-darien>), Juegos Nacionales Juveniles (recuperado de <https://www.nacionalesjuveniles.gov.co/escenario/escenario/412>) y terceros a nivel mundial y una gran cantidad de personas practican deportes náuticos. El agua del embalse en las zonas B y C es de buena calidad, en los 30 m más superficiales el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es de más del 80%, la DQO es menor de 20 mg/L y el límite de la zona fótica está alrededor de 5 m. En las zonas B y C nunca se han presentado floraciones de cianobacterias, lo cual puede ser debido

a que en estas zonas llegan muy pocos tributarios, los cuales tiene mucho menor caudal y menor contaminación, que los tributarios que llegan a la zona A. Si algunos de estos tributarios que llegan a la zona B y C contienen nutrientes, tienen una mayor dilución en el embalse porque en estas zonas el volumen de agua es muy superior que en la zona A. Además, los fuertes vientos de las zonas B y C, destruyen las masas algales que pudieran existir.

Para la zona A del embalse de Calima en las 2 campañas de lluvias el agua contenía sólidos suspendidos que provienen de los tributarios, que en época de lluvias tiene mayor cantidad de sólidos suspendidos, que corresponde a material arrastrado por escorrentía de los suelos aledaños del río Calima y riachuelos, gran parte de este material en suspensión cuando llega a la zona A se sedimenta en la zona A.

En la zona B, el agua lleva menos cantidad de sólidos suspendidos. Con relación a la zona C, que corresponde a la presa del embalse, en 3 campañas de muestreo, el agua del fondo contenía una gran cantidad de sólidos suspendidos, esto se debe a que sólidos sedimentados en la zona de la presa son resuspendidos por el agua que llega con gran fuerza (en especial cuando hay lluvias) por una tubería que las conduce desde el río Bravo hasta cercanía de la presa, lo cual se hace para aumentar el volumen de agua en el embalse Calima. En el presente estudio se hicieron caracterizaciones de los sedimentos, mostrando que los sedimentos de la zona A tienen un alto contenido de materia orgánica y los de la zona C contienen alto contenido de material inorgánico. El tiempo de retención hidráulico fue de 0.84 años es decir 308.35 días. Se encontró un dato de profundidad media más bajo al histórico lo cual podría estar relacionado con la pérdida de volumen útil.

Como se puede observar en la figura 2 la línea de borde noroccidental en la que está asentada la cabecera municipal y gran parte de la población del municipio, está en la zona A del embalse o cola, que tiene el área mayor, y que recibe al principal tributario del reservorio, el río Calima. Se nota el antiguo cauce del río y la distancia a dicho borde. Esta condición genera una zona de mezcla con una amortiguación de la energía que trae el río, lo que genera una relativa calma en momentos de niveles altos del embalse. Esto a su vez, propicia que los demás tributarios de la costa noroccidental también encuentren condiciones hidráulicas que frenan la mezcla y que pueden potenciar con la suma de otros factores, como nutrientes, la aparición de blooms algales.

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian transformaciones sustanciales en la estructura morfométrica y la calidad limnológica del embalse Calima, las cuales son consistentes con los procesos naturales y antrópicos que afectan a los cuerpos de agua artificiales a lo largo del tiempo. La reducción del volumen útil en un 8.2% y la disminución de la profundidad máxima de 98 m (en 1967) a 72.24 m (en 2023) indican una progresiva colmatación del embalse, particularmente acentuada en la zona A, donde confluyen los principales tributarios contaminados.

La zonificación batimétrica permitió identificar tres sectores con condiciones físico-químicas diferenciadas. La zona A, ubicada en la cola del embalse, mostró características propias de un sistema altamente eutrofizado: menor profundidad (<3 m), altas concentraciones de sólidos suspendidos totales y presencia de floraciones de cianobacterias, especialmente durante las épocas secas. Esta situación está directamente relacionada con la descarga de aguas residuales domésticas

tratadas y no tratadas provenientes del casco urbano del municipio de Calima El Darién, lo que ha intensificado los procesos de sedimentación y aporte de nutrientes.

En contraste, las zonas B y C mantienen condiciones limnológicas más favorables. La mayor profundidad (40–70 m), el bajo ingreso de contaminantes, y la alta dinámica de mezcla inducida por los vientos característicos de estas zonas, permiten una mayor oxigenación de la columna de agua, limitando así la aparición de floraciones algales. Estas diferencias espaciales resaltan la importancia de considerar la heterogeneidad limnológica en la gestión de embalses.

Asimismo, el incremento del tiempo de retención hidráulico de 66.6 a 308.3 días es un indicador de alteración en la dinámica hidrológica del sistema, favoreciendo condiciones de estancamiento que propician la sedimentación de partículas y el desarrollo de procesos de eutrofización en zonas específicas. Este hallazgo coincide con estudios similares en otros embalses andinos, donde se ha reportado una relación directa entre la morfometría, el tiempo de residencia y la calidad del agua (Wetzel & Likens, 2000; García-Rentería & González-Chirino, 2019) (20).

Finalmente, se concluye que la evolución morfométrica del embalse Calima está fuertemente influenciada por factores antrópicos, particularmente el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento adecuado. Esta condición exige una intervención urgente mediante acciones de restauración ambiental, control de vertimientos, y planificación territorial orientada a la sostenibilidad del ecosistema acuático y de sus múltiples usos (energía, recreación, pesca, turismo).

Conclusiones

El río Calima presentó un caudal medio de ingreso al embalse de 6.5 m³/s, con un TRH de 308.35 días y una pérdida de volumen útil del embalse de 8.2%, en un lapso aproximado de 56 años, de información abierta disponible.

Dada su condición morfométrica con un índice de desarrollo de 3.66, se puede observar que el embalse presenta una forma alargada asociada al eje de flujo de río Calima. Este río al ingresar al embalse pierde su energía de flujo horizontal, depositando los sólidos en suspensión. Luego el embalse continúa por una zona lenítica o de aguas quietas que se hace más estrecha hacia la zona de presa que es más profunda. Así, las zonas dendríticas quedan aisladas del principal eje del embalse, y la zona A es la que recibe la mayor cantidad de vertimientos, especialmente las aguas residuales del casco urbano del municipio de Calima. Esta situación favorece el crecimiento masivo de algas fitoplanctónicas en la cola del embalse ubicada en la zona A, que crecen especialmente en época seca cuando la condición dendrítica y de aislamiento de agua se acentúa. Este fenómeno físico, unido a la alta radiación en época seca ha permitido que, en este lugar, en zonas dendríticas se puedan evidenciar algunos blooms algales. En términos generales se concluye que:

1. Pérdida significativa de volumen útil del embalse

En los 56 años transcurridos desde su construcción, el embalse Calima ha perdido aproximadamente un 8.2% de su volumen útil, especialmente por la acumulación de sedimentos en la zona A, lo que afecta su capacidad de almacenamiento y funcionalidad operativa.

2. Zonificación batimétrica revela diferentes condiciones limnológicas

Se identificaron tres zonas diferenciadas (A, B y C) con características batimétricas y ecológicas distintas. La zona A, menos profunda, presenta las mayores afectaciones por sedimentación y contaminación, mientras que las zonas B y C conservan mayor profundidad y calidad de agua.

3. Relación directa entre tributarios contaminantes y floraciones de cianobacterias

Las floraciones de cianobacterias se concentran exclusivamente en la zona A, coincidiendo con la descarga de aguas residuales domésticas no tratadas o parcialmente tratadas, lo cual representa un riesgo ecológico y sanitario.

4. El cambio en la morfometría evidencia alteración de la dinámica hidrológica

El embalse ha experimentado una reducción en profundidad media y un aumento del tiempo de retención hidráulico a 308.3 días en el momento de las mediciones), lo que contribuye a condiciones lentas del agua y favorece procesos de eutrofización.

5. Necesidad urgente de intervención en vertimientos y ordenamiento ambiental

Los resultados evidencian que la gestión inadecuada de aguas residuales y el crecimiento urbano sin control están deteriorando la calidad del agua. Se requiere implementar medidas correctivas, como el tratamiento efectivo de vertimientos y una mejor planificación del uso del suelo en la cuenca del embalse.

Agradecimientos

El proyecto fue financiado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad de Antioquia, por el convenio 0168 de 2022.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Fabio Vélez, Néstor Aguirre, Gustavo Peñuela. Curación de datos: Fabio Vélez, Susana Velásquez. Análisis formal: Fabio Vélez. Investigación: Fabio Vélez, Susana Velásquez. Metodología: Fabio Vélez, Rubén Molina. Dirección de Proyecto: Gustavo Peñuela. Recursos: Gustavo Peñuela. Supervisión: Fabio Vélez, Gustavo Peñuela. Validación: Fabio Vélez, Susana Velásquez. Redacción - borrador original - Elaboración: Fabio Vélez. Redacción - revisión y edición - Elaboración: Gustavo Peñuela.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

Referencias

- (1) Roldán G, Ramírez JJ. Fundamentos de limnología neotropical. 3^{ra} ed. Medellín: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; 2022. ISBN 978 958 52969 0 9.
- (2) Margalef R. Ecología, 9^{na} ed. Barcelona: Ediciones Omega;1998. ISBN: 978-84-282-0405-7

- (3) Montoya Y, Vélez F, Aguirre N. Características morfométricas de un lago de plano inundable tropical (ciénaga Hoyo Los Bagres, Colombia). *Rev. Fac. Ing.* 2011; 59:203-214. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/13825>
- (4) Sjöberg Y, Dessirier B, Ghajarnia N, Jaramillo F, Jarsjö J, Panahi D, Xu D, Zou L, Manzoni S. Scaling relations reveal global and regional differences in morphometry of reservoirs and natural lakes. *Sci. Total Environ.* 2022; 822:153510. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153510>
- (5) Pereira Júnior A, Morales G, Beltrão N, Pontes A. Application of bathymetry in water bodies in urban areas of the five Brazilian regions. *Rev. Cient. Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.* 2024; 02:104-138. <https://doi.10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/environmental-engineering-en/application-of-bathymetry>
- (6) Van Der Wal D, Pye K. The use of historical bathymetric charts in a GIS to assess morphological change in estuaries. *Geogr. J.* 2003; 169(1):21–31. <https://www.jstor.org/stable/3451537>
- (7) Wita P, Szafraniec JE, Absalon D, Woźnica A. Lake bottom relief reconstruction and water volume estimation based on the subsidence rate of the post-mining area (Bytom, Southern Poland). *Sci. Rep.* 2024; 14:5230. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55963-0>
- (8) Rivera-Rondón CA, Zapata ÁM, Rondón JCD. Morphometric study of Lake Guatavita (Colombia). *Acta Biol. Colomb.* 2010; 15(3):131-144. <http://hdl.handle.net/10261/56590>
- (9) García-Rentería F, González-Chirino M. Effect of bathymetric changes on residence time in Buenaventura bay (Colombia). *Dyna.* 2019;86(211): 241-248. <https://doi.10.15446/dyna.v86n211.79649>
- (10) Yin Y, Peng S, Ding X. Multi-scale response relationship between water quality of rivers entering lakes from different pollution source areas and land use intensity: a case study of the three lakes in central Yunnan. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2024; 31(7):11010-11025. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31506-4>
- (11) Narayanan A, Cohen S, Gardner JR. Riverine sediment response to deforestation in the Amazon basin. *Earth Surf. Dyn.* 2024;12(2):581–599. <https://doi.org/10.5194/esurf-12-581-2024>
- (12) Ariza Ortiz A, Roa Melgarejo O, Serrato P, León H. Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspect. Geog.* 2018;23(1):105-122. <https://doi.10.19053/01233769.5863>
- (13) Rodrigo, C. Caracterización y clasificación de la bahía de Puerto Montt mediante batimetría de multihaz y datos de backscatter. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 2006; 34(1): 83-94. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-71782006000100007>
- (14) Carreño F, López I, Payán J, Arranz C, Castellanos E. Aplicación del análisis textural a datos de retrodispersión de sonda multihaz para la clasificación de fondos marinos. *Revista de teledetección.* 2011;36:5-19. <https://dialnet.unirioja.es/metricas/documentos/ARTREV/3846354>

- (15) Maestri M. Modelos matemáticos y computacionales para el análisis de la dinámica ecológica de las lagunas de la región pampeana. Tesis de Centro Científico tecnológico CONICET - TANDIL 2020. <http://hdl.handle.net/11336/111723>
- (16) Monteoliva A, Schneider P. Aplicación de un nuevo método para la evaluación censal de la ictiofauna de embalses: hidroacústica digital con haz vertical y horizontal. *Limnetica*. 2005; 24(1):161-170. <https://doi.10.23818/limn.24.16>
- (17) Arruebo T. Valoración integral de los lagos glaciares del Pirineo aragonés: una propuesta para su gestión. Tesis doctoral Universidad de Zaragoza. 2014. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=203702>
- (18) Fabián Roland J. Diversidad, composición funcional y estructura de tamaños del plancton en un sistema eutrófico y otro hipereutrófico: Las albuferas de Adra (Almería). Tesis doctoral Universidad de Granada. 2002. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=143014>
- (19) L. Pineda-Alarcón, J. E. Cañón Barriga. Modelación de la relación predador-presa para la comunidad de macroinvertebrados en el litoral del lago de Tota. *Acta Bio. Colomb.* 2024;28(2):189-203 <https://doi.org/10.15446/abc.v28n2.97983>
- (20) Wetzel G, Likens G. *Limnological analyses*, 3rd ed. New York: Springer Verlag; 2000. ISBN 0-387-98928-5.