

ANÁLISIS DE PERFILES ESPACIO TEMPORALES DE PARÁMETROS FÍSICO- QUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA LAGUNA DE FÚQUENE, CUNDINAMARCA

ANALYSIS OF SPACE-TIME PROFILES OF PHYSICAL-
CHEMICAL PARAMETERS OF WATER QUALITY
IN LAKE FÚQUENE, CUNDINAMARCA.

ANÁLISE DE PERFIS ESPAÇO-TEMPORAIS DE
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA QUALIDADE DA
ÁGUA NA LAGOA DE FÚQUENE, CUNDINAMARCA.

Diana Catalina Gómez-Castañeda
Diego Felipe García-Corredor
Gina Katerin Reyes-Garavito
Jaime Ricardo Lache-Aparicio
Lina Patricia Vega-Garzon

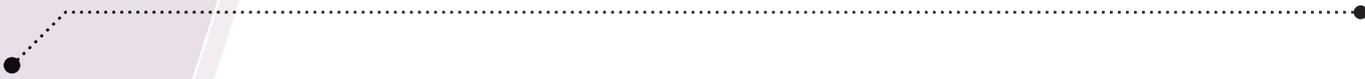
^a Facultad de Ingeniería Ambiental,
Universidad Santo Tomás Seccional Tunja,
diana.gomezc@usantoto.edu.co

^b Facultad de Ingeniería Ambiental,
Universidad Santo Tomás Seccional Tunja,
diego.garciac@usantoto.edu.co

^c Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo
Tomás Seccional Tunja,
gina.reyes@usantoto.edu.co

^d Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo
Tomás Seccional Tunja,
jaime.lache@usantoto.edu.co

^e Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo
Tomás Seccional Tunja,
lina.vegag@usantoto.edu.co*

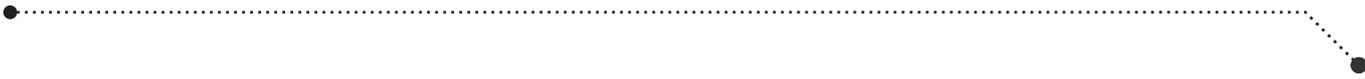


Resumen— La laguna de Fúquene es uno de los cuerpos de agua lénticos más importantes de Colombia, ya que abastece de agua a miles de personas y actividades productivas. Sin embargo, la fuerte degradación ambiental que ha sufrido a causa de la intervención antrópica, por medio de descargas provenientes de fuentes puntuales y no puntuales ha generado procesos de acumulación de nutrientes y condiciones hipóxicas que han alterado completamente su dinámica. Con el fin de analizar estos procesos, se realizaron dos monitoreos de la calidad del agua en abril y octubre de 2019 en distintos puntos geográficos de la laguna evaluando la variación espacial de las concentraciones de los parámetros analizados. Los perfiles espacio temporales de parámetros como oxígeno disuelto, pH, conductividad y ORP; así como la concentración de contaminantes como el amoníaco, evidencian su alto estado de degradación. El aporte continuo de contaminantes ha sobrepasado la capacidad de la laguna y de los procesos de mejora implementados para lograr unas condiciones de calidad del agua aceptables. De esta forma, se evidenció que especies en peligro como el pez capitán, siguen viendo seriamente afectado su hábitat a pesar de los esfuerzos realizados por descontaminar este importante cuerpo de agua.

Palabras clave— Variaciones espacio temporales, contaminación del agua, acumulación de nutrientes, Fúquene, pez capitán, manejo de lagos, macrófitas, sedimentación.

Abstract— Lake Fúquene is one of the most important lentic water bodies in Colombia, since it supplies water for thousands of people and multiple productive activities. However, the strong environmental degradation that it has suffered due to anthropogenic intervention, through discharges from point and non-point sources, have generated nutrient accumulation processes and hypoxic conditions that have completely altered its dynamics. In order to analyze these processes, two water quality monitoring were carried out in April and October 2019 in different geographical points of the lake evaluating the spatial variation of the concentrations of the parameters analyzed. The space-time profiles of parameters such as dissolved oxygen, pH, conductivity and ORP; as well as the concentration of pollutants such as ammonia, evidence its high state of degradation. The continuous contribution of pollutants has exceeded the capacity of the lake and the improvement processes implemented by agencies to achieve acceptable water quality conditions. In this way, it was evidenced that endangered species such as the captain fish continue to be seriously affected by their habitat depletion despite the efforts made to decontaminate this important water body.

Keywords— Spatial-temporal variations, water pollution, nutrient accumulation, Fúquene, captain fish, lake management, macrophytes, sedimentation.



Resumo— A lagoa de Fúquene é um dos corpos lânticos mais importantes da Colômbia, pois fornece água a milhares de pessoas e atividades produtivas. No entanto, a forte degradação ambiental que sofreu devido à intervenção antropogênica, por meio de descargas de fontes pontuais e não pontuais, gerou processos de acumulação de nutrientes e condições hipóxicas que alteraram totalmente a sua dinâmica. Para analisar esses processos, foram realizados dois monitoramentos da qualidade da água em abril e outubro de 2019 em diferentes pontos geográficos da lagoa, avaliando a variação espacial das concentrações dos parâmetros analisados. Os perfis de espaço-tempo de parâmetros como oxigênio dissolvido, pH, condutividade e ORP; assim como a concentração de poluentes como a amônia, evidenciam seu alto estado de degradação. A contribuição contínua dos poluentes excedeu a capacidade da lagoa e os processos de melhoria implementados para alcançar condições aceitáveis de qualidade da água. Dessa maneira, ficou evidenciado que espécies ameaçadas de extinção, como os peixes capitães, continuam sendo seriamente afetadas por seu habitat, apesar dos esforços feitos para descontaminar esse importante corpo de água.

Palavras chave— Variações espaço-temporais, poluição da água, acumulação de nutrientes, Fuquene, peixe-capitão, gestão do lago, macrófitas, sedimentação.

I. INTRODUCCION

La laguna de Fúquene ocupa un área de 3100ha, se encuentra a 100 km de la ciudad de Bogotá D.C a una altura de 2600 msnm [1]. En la actualidad, este cuerpo de agua se ha convertido en uno de los más importantes para el estudio científico debido a que ha sido uno de los más afectados a causa de las actividades antrópicas que se desarrollan en la región y que han generado grandes afectaciones en sus condiciones naturales. Esta afectación pone en riesgo a los pobladores y a las especies existentes en este cuerpo hídrico.

Las actividades de desecación que se han llevado a cabo en la laguna y la expansión de la frontera agrícola y urbana han causado una reducción de aproximadamente el 70% del espejo de agua [2]. Asimismo, la tala de bosques de Robledales para diversos fines, tales como combustible para la cocción de alimentos, fabricación de embarcaciones, o calefacción, constituyó el inicio de una grave problemática ya que actualmente la cobertura vegetal que protege la laguna de la escorrentía de aguas residuales provenientes de la agricultura, ganadería, entre otras industrias es escasa [3].

La creación del distrito de riego y drenaje (DRD) en extensiones de terreno antes ocupadas por el cuerpo de agua para el fortalecimiento de la actividad ganadera, ha sido otro de los factores que ha contribuido a la degradación

de la laguna. En la actualidad, el DRD sobrepasa las 22000 ha, con más de 450 km de canales [1]. Además, la industria lechera ha contribuido a la contaminación de este cuerpo hídrico debido a las descargas de aguas residuales generadas a lo largo de los años y que han favorecido la proliferación de organismos anaerobios a causa de las altas concentraciones de materia orgánica que aportan [4], lo que se traduce en un inconveniente sanitario de gran magnitud.

La agricultura es otra de las actividades antrópicas que han generado afectaciones en la laguna de Fúquene, por diversas causas, siendo la más importante la ampliación de la frontera agrícola realizada durante más de 60 años, a expensas de la extensión de la laguna. Actualmente según [5] hay más de 21000 ha alrededor de la laguna, sembradas con maíz, cereales, arveja, papa y fríjol, que generan aguas de escorrentía que contienen alta cantidad de nitratos, fosfatos, sulfatos y demás compuestos químicos nocivos para su equilibrio ecológico. De igual forma, la labranza intensiva producto de la actividad agrícola ha generado la pérdida de cobertura vegetal aledaña a la laguna causando vulnerabilidad en el suelo debido a los procesos erosivos y a las pérdidas de nutrientes a través de la escorrentía [6]. Los fertilizantes que se emplean en la actividad agrícola desde la década de 1960 ocasionan procesos de eutrofización que causan el crecimiento y proliferación desmedidos de vegetación

acuática, así como a la desecación de la laguna [7]. Como resultado, su biodiversidad está amenazada, así como su idoneidad como fuente de agua potable para las comunidades locales [8]. Del mismo modo, el agua para el riego de cultivos, la pesca y, en particular, para la ganadería se ven afectadas [9]. De acuerdo con [10] estos factores, y principalmente al exceso de extracciones de agua para el regadío causaron que la profundidad de la laguna descendiera un metro a lo largo de los últimos 30 años.

Por otro lado, los vertimientos de cargas contaminantes provenientes de las industrias locales y de las poblaciones adyacentes contribuyen en gran manera a la problemática que hoy se evidencia en la laguna. El impacto generado por estas aguas sobre la calidad del recurso hídrico, utilizado por miles de familias de la cuenca Ubaté-Suárez, es la evidente reducción del espejo de agua [11] citado por [12]. Las aguas de alcantarillados de municipios colindantes como Ubaté y de los 14 municipios aledaños llegan a la laguna, sin ningún tratamiento previo, generando entre otros, procesos de reducción de sulfatos a ácido sulfhídrico, el cual es un compuesto altamente tóxico que se caracteriza por su mal olor [13]. Además, como lo menciona [4] los vertimientos de los mataderos de Susa y Fúquene generan aguas residuales con grandes concentraciones de Coliformes Totales (frecuentemente mayores a 110 millones de unidades formadoras de colonias), Sulfatos (con concentraciones

medias de 400mg/l), y DBO y DQO (con valores próximos a 5000 mg/l).

La eutrofización de la laguna, ha traído como consecuencia la proliferación de macrófitas acuáticas como la *Eichhornia crassipes* más conocida como buchón de agua y la *Egeria densa* o elodea. Estas plantas, ocupaban en el año 2009 un área de 1237 ha [1], provocando procesos de desecación en la laguna y disminución de las especies de peces, ya que, al morir, se depositan en el fondo del cuerpo hídrico como materia orgánica consumiendo el oxígeno disuelto al degradarse. Además, las macrófitas emergentes como el buchón de agua, que se ubican en la superficie, limitan el paso de la luz, impidiendo la fotosíntesis de plantas en el fondo, por la menor radiación solar, disminuyendo la cantidad de oxígeno disuelto, trayendo como resultado la muerte de plantas y organismos acuáticos.

El fenómeno de la eutrofización provoca una transformación en las condiciones fisicoquímicas del fondo de los lagos, debido al aumento en la concentración de compuestos gaseosos contaminantes como el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfúrico (H₂S), ocasionando altas tasas de mortandad de especies de fauna y flora, lo cual contribuye al aumento en la formación de sedimentos que disminuyen la vida útil del cuerpo de agua [14].

Por todo lo anteriormente mencionado, es evidente la continua degradación de la laguna por múltiples causas; la

cual, si no es tratada en este momento, puede continuar generando impactos ambientales cuyos efectos serán irreversibles, y las consecuencias continuarán afectando directamente la población que depende de los servicios ecosistémicos que ella ofrece.

Analizar parámetros físico-químicos de la calidad del agua en esta laguna, permite colaborar con el diagnóstico y conocimiento del estado de la laguna, y de sus dinámicas. La variación en el espacio y en el tiempo, analizada en este estudio, permite conocer su estado, los procesos físico químicos y microbiológicos que pueden estarse llevando a cabo; y cómo las medidas actuales de remediación están influyendo en su calidad; así como proponer medidas de mejoramiento de sus condiciones actuales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A) Área de estudio

Los muestreos se llevaron a cabo en la laguna de Fúquene, municipio de Fúquene, Cundinamarca, Colombia, ubicación en coordenadas 5°27'24.05"N; 73°44'30.96"O. Se realizaron dos monitoreos, el primero el 3 de abril de 2019 y el segundo el 18 de octubre del mismo año, con el objetivo de realizar

una comparación temporal en épocas de lluvias con condiciones similares de precipitación en las cuales se favorecen los procesos de arrastre de contaminantes a través de la escorrentía superficial. Según [19] en el mes de abril (monitoreo 1) se presentaron precipitaciones acumuladas de 125.1 mm, mientras que en el mes de octubre (monitoreo 2) el registro acumulado fue de 108,9 mm [18]. En la primera visita se analizaron 4 puntos de la laguna, mientras que en la segunda se escogieron 5 puntos diferentes con el fin de evaluar la variación espacial de las concentraciones de los parámetros analizados. La selección de estos puntos de muestreo se realizó a partir de un análisis identificando diferentes aspectos ambientales encontrados en la laguna, como es el caso de los vertimientos, el dragado, la presencia de macrófitas flotantes y puntos estratégicos como lo son la desembocadura y salida del río Ubaté, un punto cercano al nacimiento del río Suárez y el centro de la laguna, y de esta manera evaluar la variación de los perfiles espaciales en puntos con características fisicoquímicas diferentes, como parte de un estudio preliminar para observar las dinámicas que se están desarrollando en la laguna actualmente.

La representación gráfica de los puntos de muestreo se ilustra en la Fig. 1.

Tabla 1. Puntos de muestreo

Monitoreo N°1. Fecha: 03/04/2019 Coordenadas Geográficas				
Punto 1-Río Ubaté 5°26'44" N 73°46'19" W	Punto 2-Vertedero 5°26'03" N 73°46'06" W	Punto 3- Máquina de dragado 5°26'08" N 73°44'58" W	Punto 4- Presencia de <i>Eichhornia crassipes</i> 5°27'49" N 73°45'59" W	
Monitoreo N°2. Fecha: 18/10/2019 Coordenadas Geográficas				
Punto 5- A 4 Km del nacimiento del Río Suárez 05°28'06,5" N 73°45'54,1" W	Punto 6- Centro de la lagun 05°27'46,9" N 73°45'17,1" W	Punto 7- Máquina de dragado 05°26'29,0" N 73°45'03,5" W	Punto 8- Desembocadura Río Ubaté 05°25'43,7" N 73°45'07,1" W	Punto 9- Salida Río Ubaté 05°26'14,0" N 73° 44' 38,6" W

Fuente: Autor.

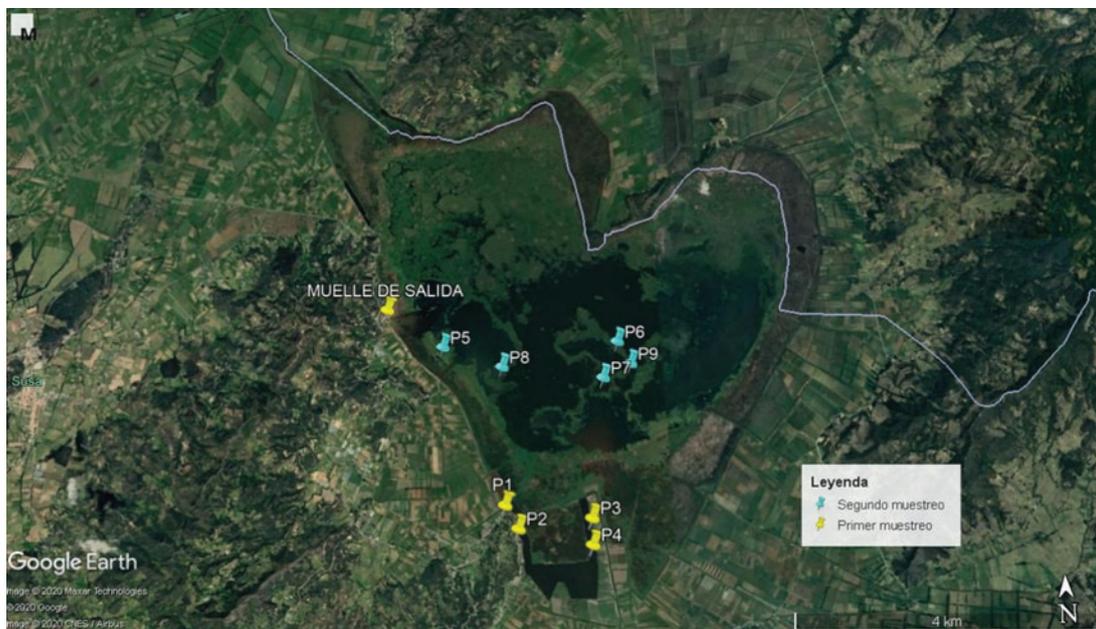


Fig. 1. Puntos de muestreo.

Fuente: Autor.

B) Técnicas de muestreo

Las muestras se recolectaron a diferentes profundidades mediante la botella de Van Dorn, la cual se sumergía a la profundidad deseada. Las profundidades máximas a las cuales se tomaban las muestras correspondían a las profundidades máximas de la laguna en cada punto de muestreo, y partir de estas se segmentaba la columna de agua en dos, tres o cuatro

secciones dependiendo del valor de la profundidad. Enseguida, se introducía la muestra tomada en un recipiente previamente esterilizado, y mediante un equipo multiparámetro de marca Hanna Instruments, referencia HI 9829, se analizaron los parámetros pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), temperatura del agua, presión atmosférica, potencial de óxido reducción (ORP) y sólidos disueltos totales (SDT).

En el primer monitoreo los parámetros medidos en laboratorio fueron hierro total (Fe), nitratos (NO_3^-) y sulfatos (SO_4^{2-}). El parámetro de hierro se midió en los puntos 2, 3 y 4, a profundidades de 1.1m (punto medio de la profundidad máxima), 4m y 2m (profundidades máximas) respectivamente. Los nitratos se midieron en estos mismos puntos al nivel de la superficie del agua; los sulfatos solo se midieron en el punto 4 a 1m de profundidad. Estos parámetros fueron medidos a partir de la muestra tomada en campo, depositando un volumen de esta en recipientes herméticos, preservándola hasta su llegada al laboratorio de procesos de ingeniería ambiental de la universidad Santo Tomás en la ciudad de Tunja, donde se realizaron los respectivos análisis.

En el segundo monitoreo los parámetros analizados fueron Demanda Química de Oxígeno (DQO), fosfatos (PO_4^{3-}), nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-), hierro (Fe) y amoníaco (NH_3), los cuales fueron estudiados a partir de una muestra integrada que se realizó en campo la cual fue transportada al laboratorio.

C) Técnicas analíticas

Los parámetros analizados en campo (pH, Conductividad eléctrica, OD, ORP, SDT, presión atmosférica y temperatura del agua) se midieron por medio del multiparámetro marca Hanna referencia HI 9829, introduciendo la sonda del equipo en la muestra durante un periodo de tiempo con el fin de que los valores de cada parámetro se estabilizaran en

la pantalla para después proceder a registrar los valores arrojados por este.

En el laboratorio de procesos de ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás sede Tunja, se empleó el fotómetro Hanna multifunción HI 83399-02 para analizar los siguientes parámetros: DQO mediante el método de la EPA 410.4 por colorimetría semiautomática, los fosfatos (PO_4^{3-}) se determinaron mediante el método del ácido ascórbico, el parámetro de nitratos (NO_3^-) se determinó mediante el método de reducción de cadmio, la determinación de los nitritos (NO_2^-) se realizó según el método de diazotación de la EPA 354.1, el parámetro de hierro (Fe) se determinó a partir del método TPTZ y el amoníaco (NH_3) a partir del método de Nessler por yodomercuriato potásico.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A) Resultados de las mediciones hechas en campo

A partir de los muestreos realizados en campo durante los dos monitoreos, se elaboraron perfiles espacio temporales de las variables medidas, relacionando la concentración de los parámetros a cada una de las profundidades analizadas, los cuales se muestran a continuación:

1) Potencial de Óxido-Reducción (ORP)

La Fig. 2 muestra los perfiles para el parámetro de Potencial de Óxido Reducción (ORP) para los dos monitoreos; el realizado en abril (A); y el realizado en

Octubre (B). En la Fig. 2(A) se observa que el punto con una mayor profundidad fue el número 3, con 4 m, y los demás tuvieron una profundidad de 2 m. En todos se obtuvieron valores positivos de ORP, entre 70 y 310 mV; siendo el punto 1 el que tuvo un menor valor (130 mV). En el punto 1, con valores de ORP entre 130 y 160 mV; y en el punto 2 (vertedero) con valores de ORP de 128.1 mV en la superficie y de 156.5 mV a 2 m de profundidad, se presentan condiciones reductoras en las que el nitrógeno se encuentra en forma de amoníaco principalmente. El aumento del ORP en estos dos puntos se debe a las condiciones reductoras en las cuales se presentan compuestos químicos como el ácido sulfhídrico (H₂S) [15].

El punto 3, por su parte fue el que tuvo una variación más amplia con la profundidad; con un valor de 70mV a 4 m y de 270mV en la superficie. En el punto 4, y en el último metro cerca de la superficie del punto 3 se presentan características oxidantes; y en estos valores de ORP entre 200 y 300 mV el ión hierro pasa de Fe²⁺ a Fe³⁺ [15]. Estos dos puntos corresponden a los sitios donde se estaba haciendo el dragado (Punto 3) y donde había gran presencia de *Eichhornia crassipes* (Punto 4). En ellos se observó una disminución del ORP con la profundidad, pasando de condiciones reductoras (70 mV) en el fondo; a condiciones más oxidantes, en las que los nutrientes como el nitrógeno, por ejemplo, se encuentran en forma de nitratos; siendo esto la causa de la alta presencia de plantas acuáticas flotantes y los valores de OD que se muestran en la Fig. 3. La alta variación de condiciones

se debe a las dinámicas que suceden con los sedimentos y su degradación en el fondo de la laguna; y la posibilidad de oxigenación y de generación de procesos más oxidantes en la superficie.

En cuanto al monitoreo realizado en el mes de octubre, Fig. 2 (B), se observan condiciones peores en cuanto a los valores de ORP en toda la laguna. Este parámetro tuvo valores negativos (entre -147 y -130 mV) en el punto 9; y valores entre 10 y 55 mV en los demás puntos, mostrando variaciones poco pronunciadas con la profundidad, aclarando que esta no superaba los 2.5 m en esta época del año (comparados con los 4 m de la campaña de monitoreo anterior). En los puntos 5 (a 4 km del nacimiento del río Suárez), 6 y 7, los valores de ORP no presentaron una gran variación con la profundidad; mientras que en el punto 8 (desembocadura río Ubaté), el valor de ORP desciende a medida que aumenta la profundidad hasta un valor cercano a cero, efecto que puede ser causado por el impacto negativo del dragado, que no incorpora nuevos contaminantes al medio acuático pero si provoca una distribución no uniforme de los sedimentos contaminados y su degradación [16]. En todos los puntos, y especialmente en el punto 9, correspondiente a la salida del río Ubaté, se tienen condiciones reductoras, lo cual está soportado por valores negativos en el potencial redox (-136.8 mV en promedio en este punto) condiciones en las que hay alta presencia de amoníaco; el azufre empieza a pasar a la forma de ácido sulfhídrico; y los niveles de oxígeno disuelto llegan a ser tan bajos como 1.5 mg/L.

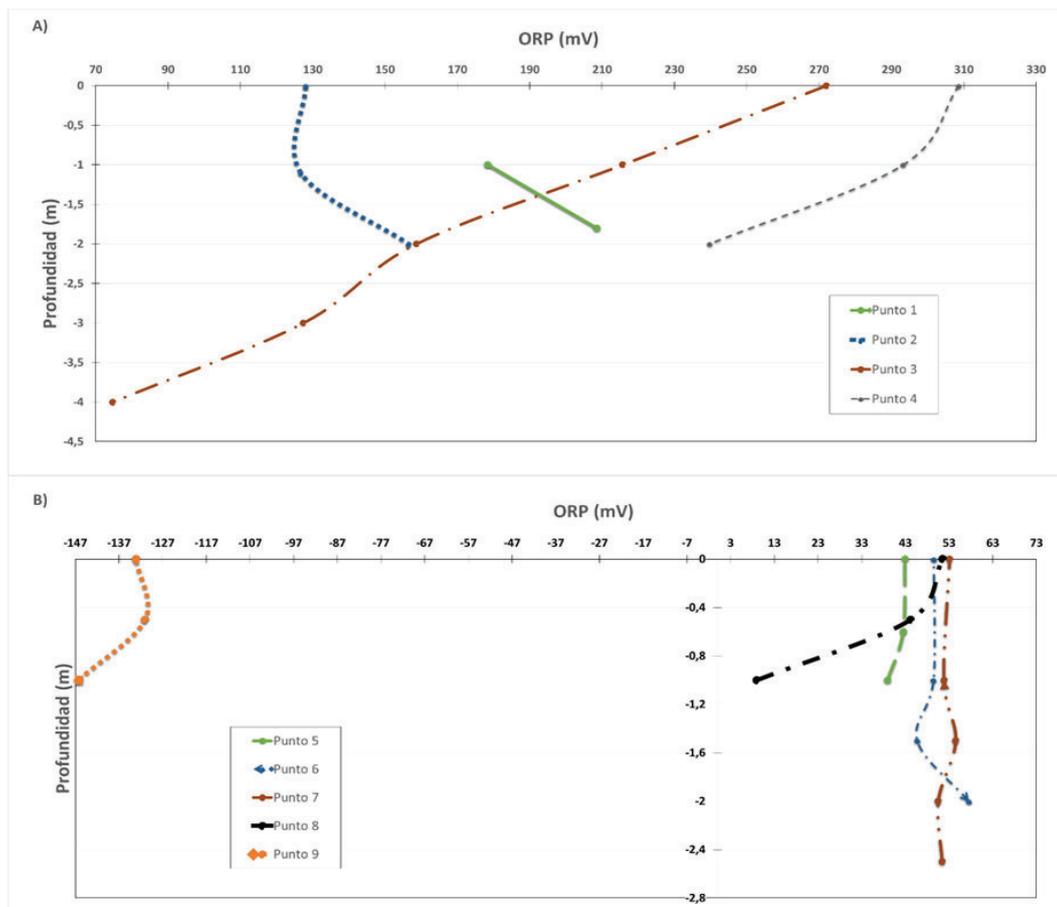


Fig 2. Perfil para el parámetro de Potencial de Óxido Reducción (ORP).
Fuente: Autor.

En general, se concluye que a pesar de que en esta época del año hay una menor profundidad de la laguna, que permitiría un mayor intercambio de oxígeno con la superficie; no hubo una mejora en las condiciones de la laguna en relación a sus procesos químicos de oxidación-reducción, hubo una mayor uniformidad del perfil de contaminación, pero con valores del ORP menores que los encontrados en abril del mismo año. Esto puede ser indicativo de que las descargas de este cuerpo de agua son principalmente de aguas residuales y contaminadas; con pocos aportes de aguas limpias y lluvias que ayuden a los procesos naturales de degradación y dilución de contaminantes,

provocando que, en épocas de baja pluviosidad, los contaminantes se acumulen y sus procesos de degradación sean más complejos debido a su alta concentración. Asimismo, los lodos acumulados durante décadas como parte de estas aguas residuales generan procesos de degradación que consumen el poco oxígeno que recibe el agua como intercambio con la atmósfera, creando condiciones hipóxicas en casi toda la columna de agua, incluyendo los puntos cercanos a la superficie.

2) Oxígeno disuelto (OD)

Como puede verse en la Fig. 3, en el primer monitoreo (A), solamente el punto 4, tuvo

condiciones cercanas a aceptables de oxígeno disuelto, con valores entre 4.1 y 5.4 mg/L; mientras que los demás puntos presentaban condiciones hipóxicas (entre 1.4 y 2.5 mg/L)

En general, a mayores profundidades hubo menor oxígeno disuelto por la acumulación excesiva de materia orgánica, en el fondo de la laguna. Asimismo, la presencia de macrófitas flotantes tales como la *Eichhornia crassipes* impiden el paso de la luz, con lo cual los procesos de fotosíntesis se reducen ya que hay menor radiación solar, provocando que gran cantidad de especies vegetales mueran y se depositen en el fondo del cuerpo de agua [17]. En general, el perfil fue el esperado, en cuanto a la estratificación térmica de la laguna; el cual se aprecia con claridad en el punto 3; con 3 capas definidas; sin embargo, todas en condiciones de hipoxia.

En el segundo monitoreo (B), los puntos 5 y 6 tuvieron altos valores de OD, entre 6.7 y 8.1 mg/L; y valores aceptables en los puntos 7 y 8; entre 4.3 y 5.6 mg/L; y valores más bajos en el punto 9, de 1.7 mg/L, donde también se encontraron los valores más bajos de ORP (-136.8 mV)

En general, en este monitoreo, la distribución del perfil de OD no fue uniforme con la profundidad, ya que los valores de este parámetro aumentan hasta ciertas profundidades y disminuyen en otras. Esto puede deberse a las

máquinas de dragado que generan distorsiones en los perfiles a lo largo de la columna de agua. Además, es de resaltar que en este monitoreo los valores en este parámetro fueron ligeramente más bajos que en el muestreo realizado en abril, debido en parte a la incidencia de las condiciones climáticas que se presentaron en estos dos meses. Según [18] en el mes de octubre (monitoreo 2) se presentaron precipitaciones acumuladas de 108.9 mm, mientras que en el mes de abril (monitoreo 1) el registro acumulado de fue de 125.1 mm [19]. Es interesante que los niveles de OD no son tan bajos comparados con los valores de ORP encontrados. Para valores de OD de 8.1 mg/L podrían esperarse condiciones más oxidantes; sin embargo, a este valor de OD se encontró un valor de ORP de 41 mV.

Por otra parte, debido a que cerca del cuerpo hídrico se encuentran ubicados algunos hoteles es importante determinar si el agua de este es apta para fines recreativos mediante contacto secundario. Solo los puntos del primer muestreo y los puntos 8 y 9 analizados en octubre, cumplieron los límites permisibles de oxígeno disuelto para este uso, el cual es de un 70% de saturación. Sin embargo, para poder comprobar si estos puntos son adecuados para la recreación deben analizarse otros parámetros como coliformes totales y tensoactivos, los cuales fueron parámetros que no se estudiaron en ninguno de los monitoreos [20].

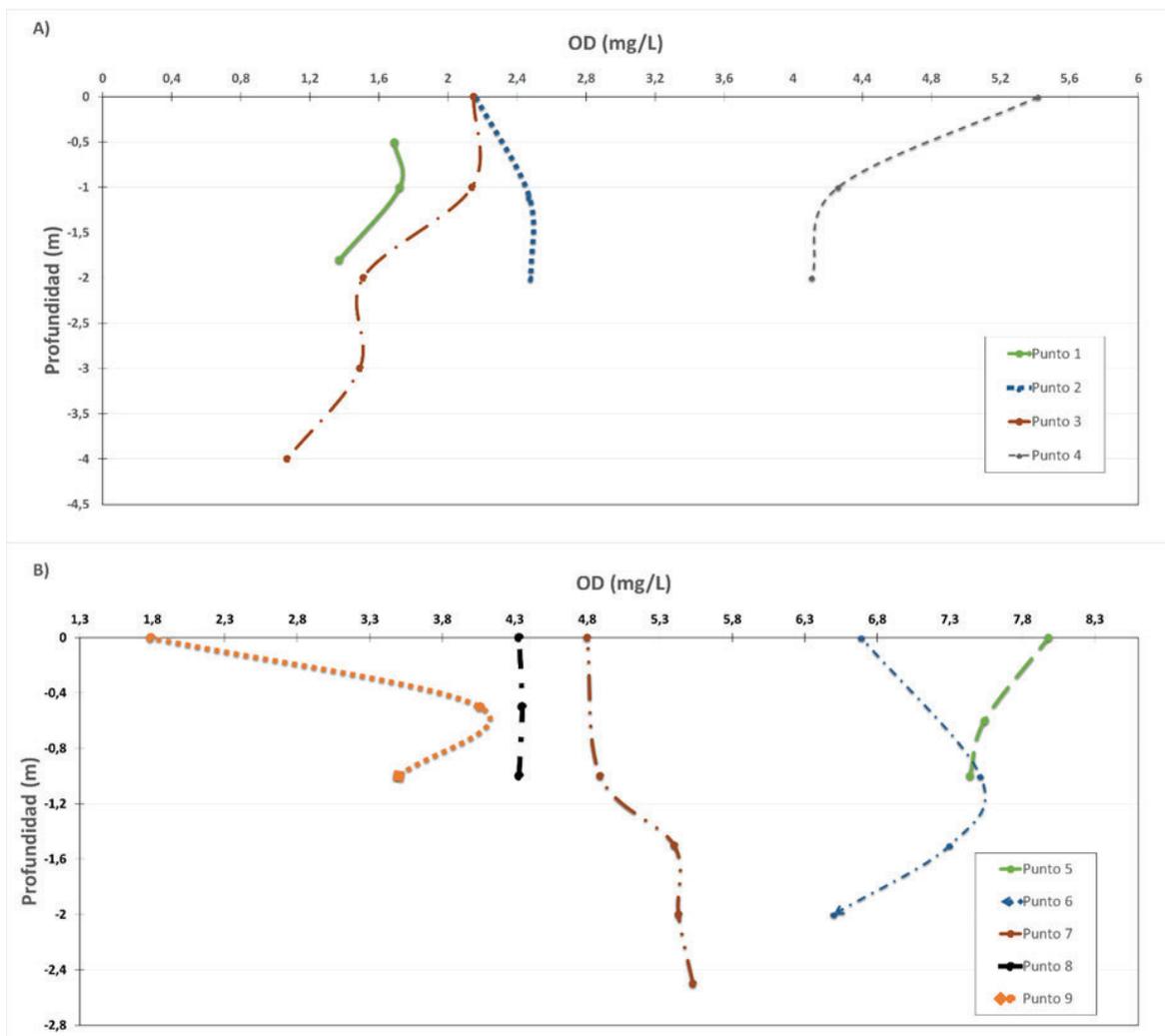


Fig. 3. Perfil para el parámetro de oxígeno disuelto (OD).
Fuente: Autor

3) Conductividad eléctrica (CE)

La Fig. 4 muestra que en el primer monitoreo (A), los perfiles de conductividad en todos los puntos no presentan una tendencia definida, esto debido a que las concentraciones aumentan o disminuyen hasta ciertas profundidades, esto puede deberse a la actividad de las máquinas de dragado como se mencionó anteriormente.

Por otro lado, en el muestreo realizado en el mes de octubre (B), todos los puntos a excepción del punto 7 (máquina de dragado) presentan un perfil de conductividad que aumenta ligeramente con la profundidad, lo cual, se debe a la mayor presencia de iones en los sedimentos.

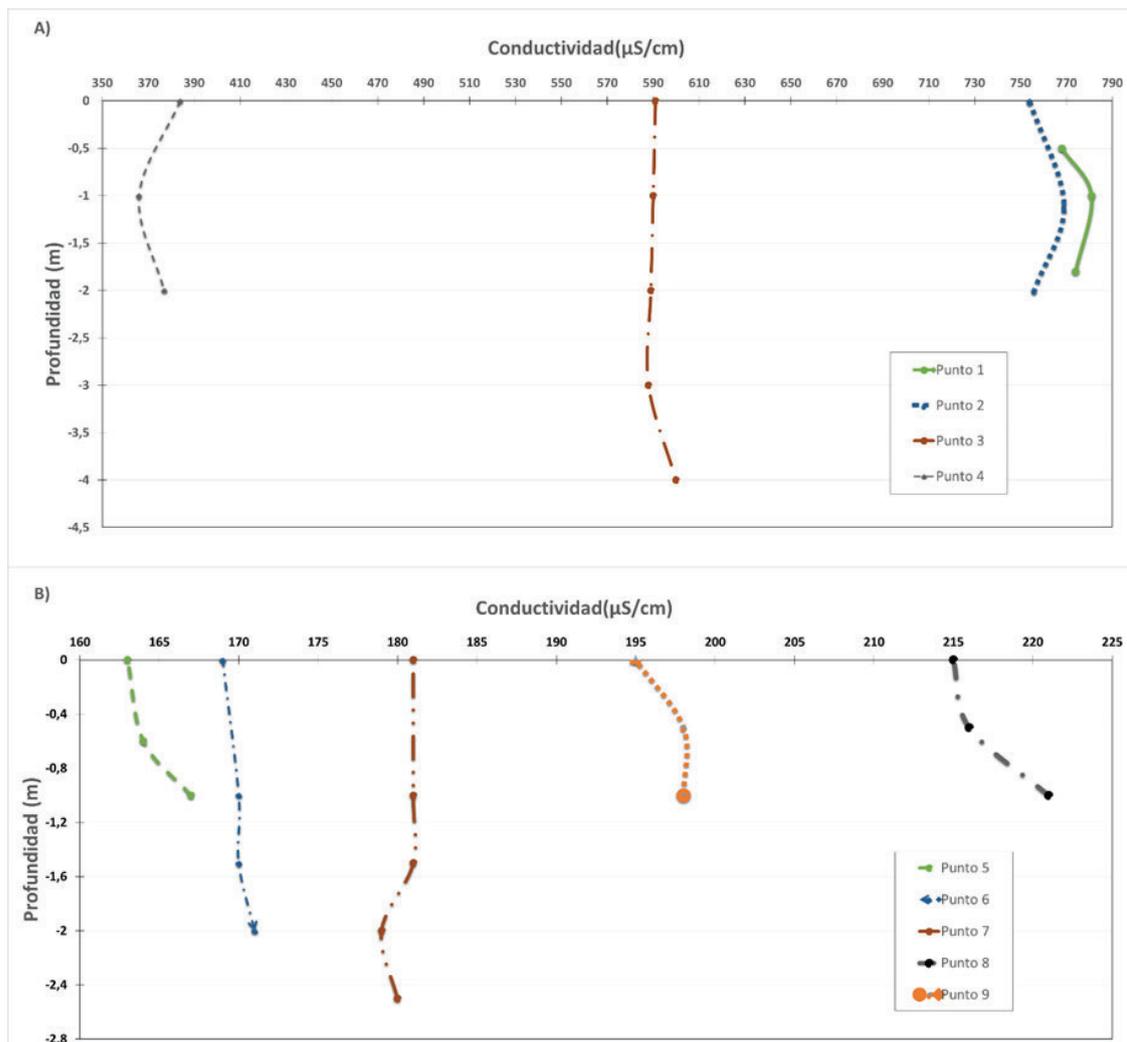


Fig. 4. Perfil para el parámetro de conductividad eléctrica (CE).
Fuente: Autor.

4) Sólidos disueltos totales (SDT)

Como puede verse en la Fig. 5, para la campaña del monitoreo 2, se presentó un comportamiento similar en los perfiles de SDT al de los perfiles de conductividad eléctrica, lo cual muestra la correlación existente entre las concentraciones estos dos parámetros. Los puntos con mayor concentración fueron el punto 8 y 9, debido a que son puntos con mayor contaminación por la desembocadura y salida del río Ubaté el cual recoge

gran cantidad de contaminantes provenientes de fuentes puntuales como alcantarillados de los municipios aledaños que no tratan las aguas residuales antes de su vertimiento en los cuerpos hídricos y los pocos que lo realizan no presentan instalaciones de tratamiento óptimas o exceden el límite de carga [21]. De igual forma, ciertas compañías lecheras vierten sin ningún control sus desechos a los cuerpos de agua colindantes, a la vez que otras realizan los vertimientos al sistema de drenaje de aguas residuales

o los reutilizan para riego de cultivos. Los contaminantes en estos 3 puntos también son mayores debido a la cercanía a fuentes no puntuales como lo son las aguas residuales provenientes de la ganadería, agricultura y zonas rurales. Además, la Fig. 5 muestra que los puntos 5 y 6 presentaron los menores valores en este parámetro, debido a que se encuentran más distanciados

de las fuentes de contaminación y particularmente el punto 1 cuenta con un nacimiento de agua cercano. Es de mencionar que en el primer monitoreo no se analizó este parámetro, por lo cual se sugiere realizar un nuevo muestreo en otra época del año con el fin de comparar las concentraciones en diferentes periodos y de esta manera obtener mejores conclusiones.

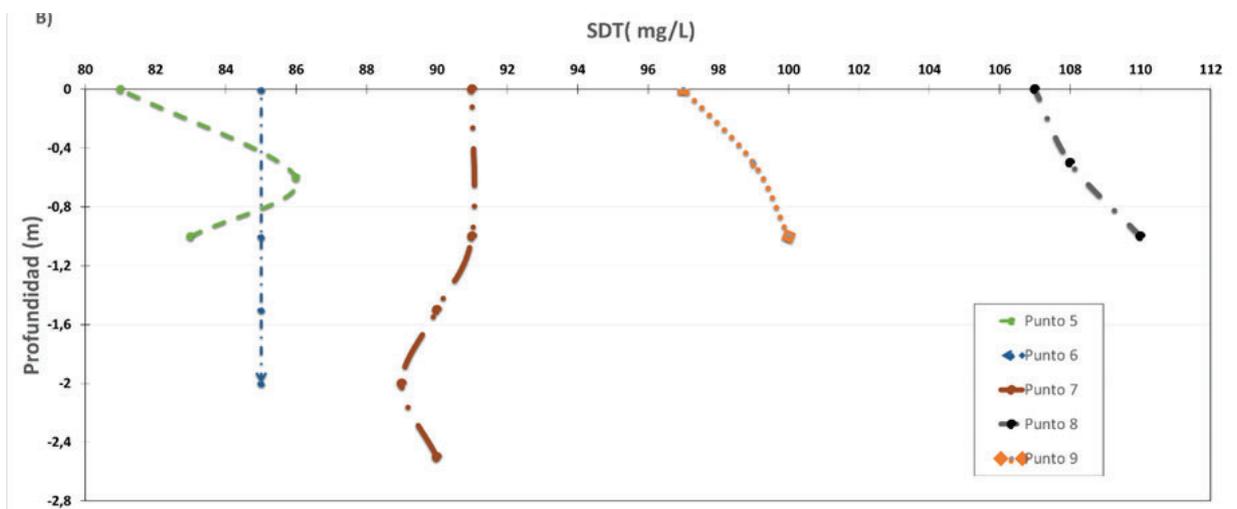


Fig. 5. Perfil de sólidos disueltos totales en el monitoreo del mes de octubre.

Fuente: Autor.

5) pH

Los valores de pH registrados en los diferentes puntos de la laguna, tanto en el primer como en el segundo monitoreo oscilaron entre 5,99 y 7,68. Estos resultados demuestran que en este cuerpo hídrico no se presentan condiciones ácidas extremas ni alcalinas en el agua, por el contrario, tiende a encontrarse en condiciones neutras lo cual contribuye al crecimiento de las distintas especies vegetales acuáticas que habitan en este

ecosistema. Los valores de este parámetro cumplen con los rangos estipulados para destinación del recurso hídrico con fines agrícolas (4.5-9.0) y fines recreativos mediante contacto secundario (5.0-9.0), [20]. No obstante, es importante resaltar que para determinar si la calidad de la laguna es apta para emplearla en la actividad agrícola y en fines recreativos deben analizarse otros parámetros tales como elementos potencialmente tóxicos los cuales no fueron estudiados en la investigación.

B) Hierro, Nitratos, Nitritos, Sulfatos, Fosfatos, Amoniac y DQO

1) Monitoreo 1

Al analizar los nitratos se encontró que estaban por debajo del límite de detección del método, que era de 0.1 mg/L (vertedero, máquina de dragado y *Eichhornia crassipes*); lo cual confirma lo encontrado en los valores de ORP, que indican que el nitrógeno está principalmente en forma reducida y no de nitratos. En cuanto al hierro total se observa que se encontraron valores menores a 5mg/L, lo cual está dentro del rango permisible del decreto 1594 de 1984 para la destinación del recurso hídrico

con fines agrícolas. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, se deben analizar otros parámetros para definir si es apto o no para este uso.

Para el parámetro de sulfatos solo se analizaron las concentraciones en el punto 4 (*Eichhornia crassipes*) a 1 metro de profundidad, con un valor de 24mg/L, lo cual tiene sentido teniendo en cuenta que este tipo de macrófitas crecen en aguas ricas en nutrientes, dentro de los que se destacan los sulfatos [22]. Este valor cumple con el límite permisible para consumo humano y doméstico (400 mg/L), [20]. No obstante, para definir si el agua es apta o no para este fin se deben analizar otros parámetros como metales pesados, tensoactivos y coliformes fecales.

Tabla 2. Resultados de las concentraciones de hierro, nitratos y sulfatos. Monitoreo 1, abril de 2019.

Punto 2					
Profundidad (m)	Hierro (mg/L)	Profundidad (m)	Nitrato (mg/L)	Profundidad (m)	Sulfatos (mg/L)
1,1	4,86	0	---	---	---
Punto 3					
Profundidad (m)	Hierro (mg/L)	Profundidad (m)	Nitrato (mg/L)	Profundidad (m)	Sulfatos (mg/L)
4	3,28	0	0	---	---
Punto 4					
Profundidad (m)	Hierro (mg/L)	Profundidad (m)	Nitrato (mg/L)	Profundidad (m)	Sulfatos (mg/L)
2	1,63	0	0	1	24

Fuente: Autor.

2) Monitoreo 2

En este monitoreo, la DQO, registró el valor más alto (120mg/L) en el punto 6, que corresponde al centro de la laguna, esto se puede deber a la convergencia de distintos contaminantes en este lugar. Los fosfatos presentaron una mayor concentración en el punto 7 (2.2 mg/L) en el cual se ubicaba la máquina de dragado, que puede provocar una

distribución de los sedimentos a largo de esta zona.

Por otra parte, se registraron valores máximos de hierro en el punto 8 que corresponde a la desembocadura del río Ubaté, lo cual puede deberse a la descarga de aguas residuales provenientes de industrias de cemento, cerámicas y bombas de gasolina aledañas a la laguna.

Para el parámetro de amoníaco (NH₃), se presentó la concentración mayor en el punto 9 (3mg/L), donde se encuentra la salida del río Ubaté, lo cual concuerda con los valores que se obtuvo del potencial de óxido-reducción (ORP) observados en la Fig. 3, el cual indica un ambiente reductor en este lugar, que es propicio para encontrar compuestos como el amoníaco. Este valor está por encima del valor permisible (1mg/L) para destinación del recurso hídrico para consumo humano y doméstico [20].

Tabla 3. Resultados de las concentraciones de DQO, fosfatos, nitratos, hierro, amoníaco y nitritos. Monitoreo 2, octubre de 2019

Parámetro	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
DQO (mg/L)	34	120	115	13	9
Fosfatos (mg/L)	0	0,4	2,2	0,29	0,7
Nitratos (mg/L)	0	0	0	0	0
Hierro (mg/L)	1,6	1,15	2,28	2,82	1,91
Amoníaco (mg/L)	0,39	0,53	1,47	0,07	3
Nitritos (mg/L)	0	0	0	0	0

Fuente: Autor.

En cuanto a los nitratos y nitritos sus valores fueron más bajos que el límite de detección del método, corroborando nuevamente que a esos valores de ORP el nitrógeno puede encontrarse

principalmente en otras formas más reducidas.

C) Relación de los valores de temperatura del agua, oxígeno disuelto, fosfatos y conductividad eléctrica con la supervivencia del pez capitán (*Eremophilus mutisii*)

El pez capitán (*Eremophilus mutisii*) es una de las especies de peces más representativas del altiplano cundiboyacense y de la laguna de Fúquene, la cual se ha visto afectada por los cambios físico-químicos del agua ocasionados por la intervención antrópica en este cuerpo hídrico. Los valores de temperatura de agua ideales para su crecimiento oscilan en un rango de temperatura de 11°C como mínimo hasta los 21°C [23]. Como puede verse en la Fig. 6, no se cumplen estas condiciones en el punto 1 y punto 3 del primer monitoreo (A) a profundidades de 1.8 m y superficial respectivamente, lo cual puede ser causante de alteraciones en la dinámica poblacional de esta especie dentro de la laguna. Por el contrario, en el segundo monitoreo (B) los perfiles de temperatura indican que las condiciones de temperatura son aptas para el desarrollo de esta especie.

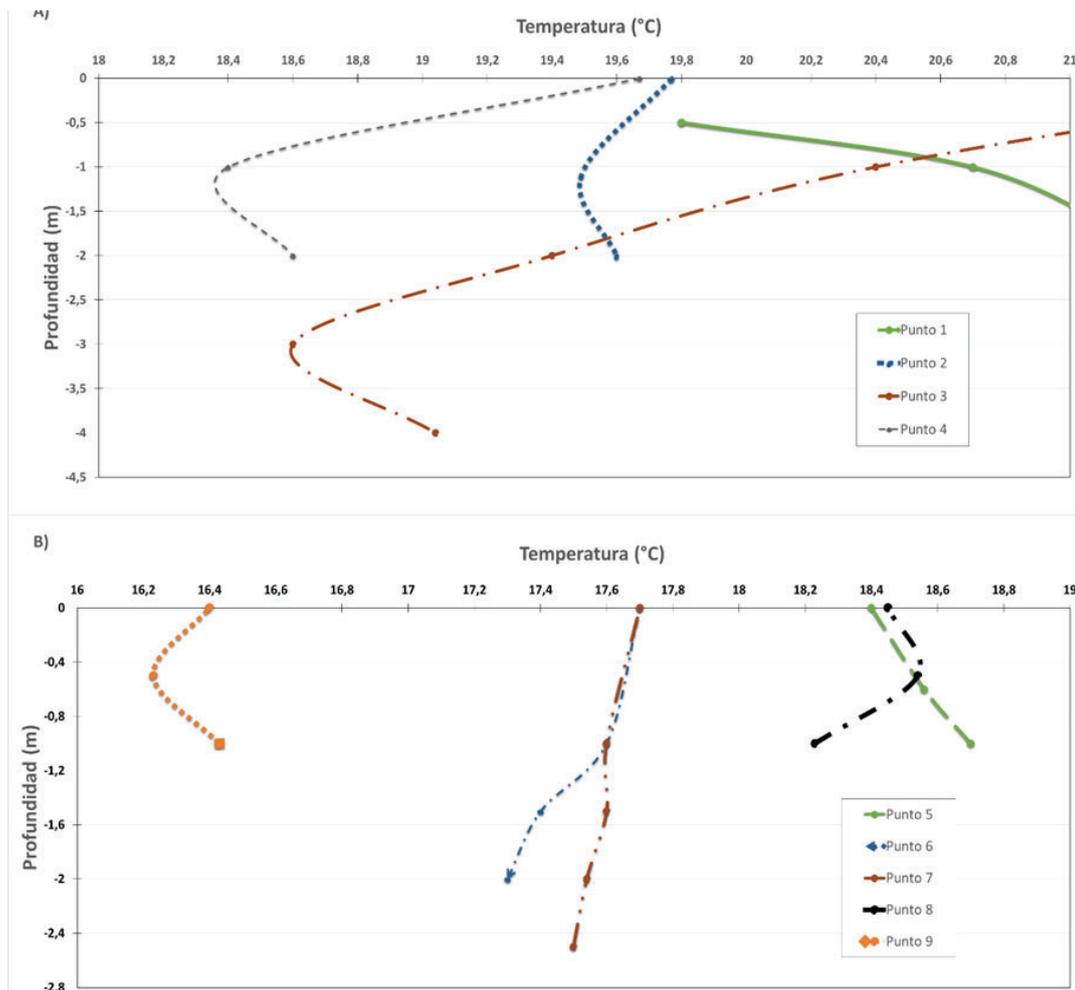


Fig. 6. Perfil para el parámetro de temperatura del agua.
Fuente: Autor.

Por otra parte, es de mencionar que esta especie sobrevive en concentraciones de oxígeno disuelto de mínimo 2,5 mg/L y máximo 6,8 mg/L. Para el primer monitoreo en los puntos 1, 2 y 3 se observaron concentraciones menores a la concentración mínima para su supervivencia de 2,5 mg/L en todas las profundidades. En el monitoreo 2, los puntos 5, 6 y 9 presentaron concentraciones de OD mayores a 6,8 mg/L y en el punto 9 en la superficie del agua la concentración de OD fue de 1,79 mg/L.

En cuanto a los valores de fosfatos óptimos para el crecimiento de esta especie los puntos 7 y 8 del monitoreo 2 no cumplen los requerimientos establecidos, ya que en el punto 7 se registró una concentración de 2,2 mg/L y en el punto 8 de 0,29 mg/L.

Finalmente, el parámetro de conductividad eléctrica demuestra que esta especie se ve seriamente amenazada debido a que en todos los puntos analizados del primer monitoreo y en los puntos 7, 8 y 9 del segundo monitoreo los valores de CE están por encima a 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Esto demuestra que esta especie característica de la laguna de Fúquene se ve seriamente afectada por las condiciones físico-químicas del agua, por lo cual, si las medidas tomadas por parte de las autoridades ambientales no son contundentes, se podría estar ante un posible caso de extinción futura de esta especie.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los dos monitoreos realizados presentaron diferencias tal como se observa en los perfiles de los parámetros analizados, y como se esperaba en función de los niveles de pluviosidad de esos dos momentos, así como de las profundidades máximas encontradas (4 m en abril, y 2 m en octubre). En el segundo monitoreo los valores de ORP fueron menores, presentando condiciones reductoras, a diferencia del primer monitoreo donde hubo combinación de condiciones oxidantes o reductoras dependiendo del punto de monitoreo, y de la profundidad a la cual se realizó la medición. A pesar que en el mes de octubre la profundidad fue menor lo que permitiría un mayor intercambio de oxígeno con la superficie, las condiciones fueron más reductoras, por lo que se concluye que los aportes de agua a la laguna son principalmente de aguas contaminadas y con bajos niveles de aireación disminuyendo la capacidad de autodepuración de la laguna.

Sin embargo, el oxígeno disuelto presentó mayores concentraciones en el monitoreo

del mes de octubre, posiblemente relacionado con una menor profundidad de la laguna, facilitando la difusión del oxígeno obtenido en intercambio con la atmósfera en el espejo de agua; la disminución de la presencia de macrófitas flotantes como el buchón de agua; y la influencia de las máquinas de dragado en el movimiento del agua y su consecuente aireación. No obstante, es interesante que los niveles de OD no son tan bajos comparados con los valores de ORP encontrados en este monitoreo. Para ciertos valores de OD podrían esperarse condiciones más oxidantes; sin embargo, se encontraron valores de ORP con tendencia a procesos reductores, lo que indica que los procesos de degradación no estaban en equilibrio, debido a la gran influencia de las actividades antrópicas, como las descargas y el dragado.

Por otra parte, los resultados de las concentraciones de conductividad eléctrica del monitoreo 1 permiten identificar mayores niveles de contaminación en la laguna de Fúquene durante este tiempo, lo cual está relacionado con aumentos en las concentraciones de iones de metales, tal como se observó en los valores de Hierro (Fe) que fueron considerablemente elevados en comparación con el monitoreo 2.

Las actividades de dragado realizadas durante el periodo de abril a octubre pueden haber influido en el mejoramiento de algunos de los parámetros de la calidad del agua. La intensificación de

estas actividades pudo remover gran cantidad de sedimentos, por consiguiente, en términos generales las concentraciones de contaminantes disminuyeron. Sin embargo, dichas acciones generaron que en diversos puntos de la laguna los perfiles de los parámetros analizados no presentaran una distribución uniforme a lo largo de la columna de agua.

Es evidente que ciertos sectores de la laguna presentan niveles críticos de contaminación, tal es el caso de los puntos 8 y 9 del monitoreo 2, que corresponden al tramo de la laguna de Fúquene que tiene contacto directo con los vertimientos de aguas residuales provenientes del río Ubaté, el cual es responsable en gran medida de las altas concentraciones de contaminantes en este cuerpo hídrico, ya que recoge aguas negras de industrias lecheras, cementeras, cultivos agrícolas y estaciones de bombeo.

Por su parte, en el primer monitoreo los puntos de más preocupación son los ubicados en inmediaciones a la máquina de dragado y donde se presentó una mayor cantidad de macrófitas emergentes, tales como la *Eichhornia crassipes* que refleja los procesos de eutrofización que se presentan en esta laguna, que han ocasionado desde hace más de 50 años una reducción en el espejo de agua, aumentando la

carga de materia orgánica que dificulta el crecimiento de diversas especies de fauna, características de este ecosistema, como es el caso del pez capitán *Eremophilus mutisii* que hoy en día se encuentra amenazado y en posible riesgo de extinción en un futuro próximo, debido a que no se están presentando las condiciones físicas y químicas óptimas para su desarrollo.

Lo anteriormente expuesto permite demostrar que el cuerpo lagunar se encuentra en un nivel de contaminación elevado, por lo cual las tareas de recuperación de esta se hacen más complejas. No obstante, aumentando los esfuerzos políticos para generar nuevas estrategias que reduzcan los vertimientos domésticos, así como la implementación de tecnologías sostenibles en las industrias aledañas al cuerpo hídrico, de la mano de una mayor investigación científica enfocada a proponer obras de restauración pueden contribuir significativamente en la recuperación ambiental de la laguna de Fúquene.

Finalmente, se recomienda plantear un programa de monitoreo en diferentes épocas del año con el objetivo de correlacionar los datos obtenidos y así obtener resultados más representativos acerca de la dinámica espacio temporal de los parámetros analizados en la laguna.

V. REFERENCIAS

- [1] Franco-Vidal, L., Ruiz Agudelo, C. A., Delgado, J., Andrade, G., y Guzmán, A. (2015). Interacciones socioecológicas que perpetúan la degradación de la laguna de Fúquene, Andes orientales de Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 19(37), 49. <https://doi.org/10.11144/javeriana.ayd19-37.isp>
- [2] Martínez Rodríguez, C. C. (2019). Elaboración del estudio de la batimetría en la Laguna de Fúquene. Tesis de maestría, Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Universidad Santo Tomás. Recuperado el 24 de 04 de 2020, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/20984/2019camilomartinez.df?sequence=5&isAllowed=y>
- [3] Franco, R. (2007). Elementos para una historia ambiental de la región de la laguna de Fúquene en Cundinamarca y Boyacá. En Fúquene, Cucunubá y Palacio. Conservación de la biodiversidad y manejo sostenible de un ecosistema lagunar andino. Bogotá: Fundación Humedales, Instituto Alexander von Humboldt.
- [4] Montañez Quiroga, D. P. (2019). Análisis de la calidad Físicoquímica de la laguna de Fúquene. Propuesta de lineamientos para la Gestión del Recurso Hídrico. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- [5] Vanegas, M. y Zapata Pineda, M. (2010). Aislamiento de levaduras capaces de producir alcohol a partir de macrófitas acuáticas extraídas mecánicamente de la laguna de Fúquene. Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- [6] Uribe, N., Corzo, G., Quintero, M., van Griensven, A., & Solomatine, D. (2018). Impact of conservation tillage on nitrogen and phosphorus runoff losses in a potato crop system in Fuquene watershed, Colombia. *Agricultural Water Management*, 209 (February), 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.006>
- [7] Khan, F. A., Naushin, F., Rehman, F., Masoodi, A., Irfan, M., Hashmi, F., y Ansari, A. A. (2014). Eutrophication: Global scenario and local threat to dynamics of aquatic ecosystems. En A. A. Ansari y S. S. Gill, Sarvajeet (eds.), *Eutrophication: Causes, consequences and control*, pp. 17-27. Springer Netherlands.
- [8] M. Hanifzadeh, Z. Nabati, P. Longka, P. Malakul, D. Apul, y D. Kim. Evaluación del ciclo de vida de la tecnología de secado por vapor sobrecalentado como un método novedoso de gestión del estiércol de vaca J. *Environ. Gestionar.*, 199 (2017), pp. 83 - 90, 10.1016 / j. jenvman.2017.05.018
- [9] Quintero, M. y Otero, W. (2006) Mecanismo de financiación para promover Agricultura de

- Conservación con pequeños productores de la cuenca de la laguna de Fúquene. Su diseño, aplicación y beneficios.
- [10] Martínez, N. (2016). Evaluación del impacto socioeconómico y ambiental, ocasionado por la temporada de lluvias del fenómeno de la niña ocurrido en el año (2007) sobre la cuenca Ubaté - Suárez en Boyacá y Cundinamarca. Tesis de grado, Bogotá, Cundinamarca, Colombia, Recuperado el 24 de 04 de 2020, de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3259/1/MartinezRochaNinfa2016.pdf>
- [11] Pernet, X. (2006). Proceso para cuantificar e interpretar las características físicas y químicas del suelo que reglan su función en relación con el agua, el almacenamiento de nutrientes y la infiltración (caso de la cuenca de la laguna de Fúquene). Lima: Centro Internacional de la Papa, LuzAzul Gráfica.
- [12] Castillo, I. M. y Rodríguez, M. Á. (2017). Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. *Revista Mutis*, 7(1), 20–33. <https://doi.org/10.21789/22561498.1183>
- [13] Agencia de Cooperación Internacional del Japón JICA. (2000). Estudio sobre el plan de mejoramiento ambiental regional para la cuenca de la laguna de Fúquene. Bogotá.
- [14] RAP-AL Uruguay. (2010). *Contaminación y eutrofización del agua*. Montevideo: RAPAL Uruguay. Obtenido de <http://www.rapaluruguay.org/agrotoxicos/Uruguay/Eutrofizacion.pdf>
- [15] Atlas, R., & Bartha, R. (2001). *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Pearson.
- [16] Landaeta, C. J. (2012). Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga de material dragado. Ingeniería UC. Recuperado el 24 de 04 de 2020, de <http://ocw.um.es/ciencias/ecologia/lectura-obligatoria-1/landaeta-01.pdf>
- [17] Mihelcic, James y Zimmerman, J. (2006). *Ingeniería ambiental Fundamentos, sustentabilidad, diseño*.
- [18] CAR. (2019b). Boletín hidrometeorológico jurisdicción CAR octubre 2019. www.clickresearch.com.
- [19] CAR. (2019a). Boletín hidrometeorológico jurisdicción CAR abril 2019. In *Gsia: Vol. Abril (Issue 4)*.
- [20] Decreto 1594. Usos del agua y residuos líquidos, Bogotá, Colombia, 26 de junio de 1984.
- [21] Fundación Humedales. (2004). *Caracterización biofísica, ecológica y sociocultural del complejo de humedales del Valle de Ubaté, Fúquene, Cucunubá y Palacio*.

(Issue 1). <https://doi.org/10.5840/eps201855113>

maestría, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

[22] Amariles, E. (2015). Influencia del pH y el tipo de macrófita en la remoción de materia orgánica y cadmio de un drenaje sintético de minería de carbón, por medio de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto. Tesis de

[23] Bastidas, J. y Lemus, C. (2013). Aporte al conocimiento de la biología y ecología del pez capitán de la sabana (*Eremophilus mutisii*). In G. De & I. en G. y C. de R. N. GEYCOR (Eds.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>