

Calidad fisicoquímica y microbiológica de los ríos asociados a un embalse tropical de montaña en el periodo 2010-2018 (ríos Nare, Nusito y San Lorenzo)¹

Carlos Augusto Benjumea-Hoyos², Andrea Carmona Ramírez³, Anlly Castro Martínez⁴

Resumen

Introducción. San Lorenzo es uno de los seis embalses que se encuentran en el departamento de Antioquia con propósitos de generación de energía y recibe las aguas de los ríos Nare, Nusito y San Lorenzo como principales tributarios. **Objetivo.** Determinar la evolución de calidad del agua mediante la evaluación de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y del índice de calidad de agua (ICACOSU) de los tres ríos asociados al embalse San Lorenzo; además de la influencia de los fenómenos ENSO sobre esta en el periodo 2010-2018. **Materiales y Métodos.** Se realizó un programa de monitoreo fisicoquímico en los periodos de sequía, lluvia y transición durante ocho años. Mediante análisis estadísticos de componentes principales, análisis de varianza y regresiones múltiples,

se establecieron las variables más relevantes y las diferencias significativas entre los ríos estudiados. Adicionalmente se estableció el comportamiento y evolución del ICACOSU durante los ocho años de interés. **Resultados.** Las variables fisicoquímicas presentaron pocas variaciones durante los ocho años de estudio. De igual manera, se pudo determinar que los ríos evaluados presentaron una calidad de agua apropiada para el sostenimiento de la vida acuática. Adicionalmente, el patrón climático ENSO no tuvo una influencia significativa en el comportamiento de fisicoquímica estudiada. En este sentido, los niveles de oxígeno disuelto fueron altos, los sólidos en solución bajos y baja DQO. Estos resultados evidencian que los ríos Nusito, Nare y San Lorenzo presentan ambientes adecuados para el buen desarrollo ecológico del sistema acuático. **Conclusión.** El índice de calidad del agua (ICACOSU), clasificó

1 Artículo original derivado del proyecto *Cambios que se han generado en las comunidades hidrobiológicas y las variables fisicoquímicas del sistema de embalses Punchiná-San Lorenzo, entre los años 2010 y 2018* de la Universidad Católica de Oriente e ISAGEN, ejecutado entre junio de 2017 y junio de 2021 por el grupo de investigación Limnología y Recursos Hídricos. Proyecto financiado por ISAGEN-UCO.

2 Magíster en Ingeniería de la Universidad de Antioquia, ingeniero sanitario, docente asociado-investigador asociado y miembro del grupo Limnología y Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Oriente Correo: cbenjumea@uco.edu.co / Orcid: 0000-0002-3702-4300

3 Ingeniera ambiental de la Universidad Católica de Oriente, miembro del grupo Limnología y Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Oriente. Correo: andrea.carmona9373@uco.net.co / Orcid: 0000-0001-5560-7924

4 Ingeniera ambiental de la Universidad Católica de Oriente, miembro del grupo Limnología y Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Oriente. Correo: anlly.castro5659@uco.net.co / Orcid: 0000-0002-3999-8483.

Autor para Correspondencia: cbenjumea@uco.edu.co; carlosbenju@gmail.com

Recibido: 17/08/2022 Aceptado: 22/05/2023

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

los ambientes acuáticos con calidad buena y excelente para los años de seguimiento.

Palabras clave: río, fisicoquímica del agua, ICACOSU, ENSO.

Physicochemical and microbiological quality of rivers associated with a tropical mountain reservoir in the period 2010-2018 (Nare, Nusito and San Lorenzo rivers).

Abstract

Introduction: The San Lorenzo reservoir is one of the six reservoirs found in the department of Antioquia for power generation purposes; It receives the waters of the Nare, Nusito and San Lorenzo rivers as main tributaries. **Objective:** to determine the evolution of water quality through the evaluation of physicochemical, microbiological parameters and the water quality index (ICACOSU) of the three rivers associated with the San Lorenzo reservoir; in addition to the influence of the ENSO phenomena on it, in the period 2010-2018. **Materials and Methods:** a physicochemical monitoring program was carried out in the periods of drought, rain and transition, for eight

years. Through statistical analysis of main components, analysis of variance and multiple regressions, the most relevant variables and the significant differences between the rivers studied were established. Additionally, the behavior and evolution of ICACOSU during the 8 years of interest was established. **Results:** The physicochemical variables presented few variations during the 9 years of study. In the same way, it was possible to determine that the evaluated rivers presented an appropriate water quality for the maintenance of aquatic life. Additionally, the ENSO weather pattern did not have a significant influence on the behavior of the physicochemical studied. In this sense, the dissolved oxygen levels were high, the solids in solution low and COD low. These results show that the Nusito, Nare and San Lorenzo rivers present adequate environments for the good ecological development of the aquatic system. **Conclusion:** the Water Quality Index (ICACOSU) classified the aquatic environments with good and excellent quality for the 9-year follow-up.

Keywords: River, Physicochemistry of Water, ICACOSU, ENSO.

Qualidade físico-química e microbiológica dos rios associados a um reservatório de montanha tropical no período 2010-2018 (rios Nare, Nusito e San Lorenzo)

Resumo

Introdução: O reservatório San Lorenzo é um dos seis reservatórios encontrados no

departamento de Antioquia para geração de energia; recebe como principais afluentes as águas dos rios Nare, Nusito e San Lorenzo. **Objetivo:** determinar a evolução da qualidade da água através da avaliação dos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e do índice de qualidade da água (ICACOSU) dos três rios associados ao reservatório San Lorenzo; além da influência dos fenômenos ENSO sobre ele, no período 2010-2018. **Materiais e Métodos:** foi realizado um programa de monitoramento físico-químico em períodos de seca, chuva e transição, durante oito anos. Por

meio de análise estatística de componentes principais, análise de variância e regressões múltiplas, foram estabelecidas as variáveis mais relevantes e as diferenças significativas entre os rios estudados. Adicionalmente, foi estabelecido o comportamento e evolução do ICACOSU durante os 8 anos de interesse.

Resultados: As variáveis físico-químicas apresentaram poucas variações durante os 9 anos de estudo. Da mesma forma, foi possível determinar que os rios avaliados apresentam qualidade de água adequada para a manutenção da vida aquática. Adicionalmente, o padrão climático ENOS não teve influência

significativa sobre o comportamento do físico-químico estudado. Nesse sentido, os níveis de oxigênio dissolvido foram altos, os sólidos em solução baixos e a DQO baixa. Estes resultados mostram que os rios Nusito, Nare e San Lorenzo apresentam ambientes adequados para o bom desenvolvimento ecológico do sistema aquático. Conclusão: o Índice de Qualidade da Água (ICACOSU) classificou os ambientes aquáticos com boa e excelente qualidade para o seguimento de 9 anos.

Palavras-chave: rio, físico-química da água, ICACOSU, ENSO.

Introducción

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2018) afirma que Colombia es uno de los países más ricos en recursos hídricos, en ese sentido, la preservación de los ecosistemas acuáticos se convierte en un factor trascendental para la conservación de la biodiversidad que depende de dichos ambientes. Para ello, se requiere conocer las dinámicas de las variables ambientales que pueden alterar las condiciones normales del ecosistema, como es el caso de la calidad física, química y biológica que no solo alteran el ecosistema, sino también la salud humana (Pereira y Marques, 2021; Fontalvo Julio y Tamaris-Turizo, 2018).

Los recursos hídricos colombianos incluyen gran cantidad de ríos, los cuales son considerados sistemas sumamente dinámicos y complejos. Su principal función es el transporte de agua, sedimentos, nutrientes y seres vivos, pero, además, conforman corredores de gran valor ecológico, paisajístico, bioclimático y territorial. Por lo general, los ríos son importantes en sectores rurales y urbanos (Kaboré *et al.*, 2022), debido a que aportan condiciones de vida favorables

derivadas de la función del agua como fuente de suministro en la agricultura, ganadería, industria, consumo humano e incluso la generación de energía; adicional a los servicios ecosistémicos inherentes a esos sistemas (Liévano-León y Cadena-Monroy, 2020). Estos servicios van de la mano de características adecuadas en términos de calidad del agua, es decir, características físicas, químicas y biológicas que den soporte en el tiempo y espacio al aprovechamiento del recurso hídrico.

La calidad del agua en los ríos depende, principalmente, de diferentes factores antrópicos (Álvarez-Cabria *et al.*, 2016) que modifican la variabilidad natural de los ríos, afectando sus características fisicoquímicas y microbiológicas (Burneo y Gunkel, 2003; Calizaya-Anco *et al.*, 2013; Chamorro *et al.*, 2013) e hidromorfológicas (Hamilton *et al.*, 2007). Sin embargo, las perturbaciones también tienen un origen natural, como la variación estacional en las precipitaciones, que generan una degradación de suelos (Correa *et al.*, 2016), lo que provoca que los ríos transporten una cantidad significativa de material alóctono. Además, el incremento en la temperatura genera una disminución en

la concentración de oxígeno disuelto. Ambos orígenes —antrópico y natural— tienen fuertes efectos en la concentración de contaminantes en el agua (Vega *et al.*, 1998).

Con el objetivo de minimizar los impactos negativos de la falta de agua, se han propuesto obras hidráulicas como una solución viable, en este sentido los embalses son un tipo de obra con la capacidad de incrementar la disponibilidad del recurso hídrico en el tiempo y de esta manera dar solución a la escasez futura.

Este tipo de ecosistemas son cuerpos de agua intermedios entre corrientes y sistemas lénticos. Un embalse es un ecosistema acuático en permanente relación con su entorno, por esta razón, las variables fisicoquímicas en este tipo de ecosistemas lénticos estarán directamente influenciadas por las particularidades del río afluente (Villabona-González *et al.*, 2020). Los afluentes presentan diferencias fisicoquímicas y bióticas, las cuales pueden perturbar los procesos naturales del ambiente acuático receptor con una influencia directa en la calidad del agua del embalse (Benjumea-Hoyos *et al.*, 2014), desencadenando procesos de eutroficación, aumento en la turbiedad, disminución en la disponibilidad de oxígeno; todo esto se encuentra directamente relacionado con una pérdida en la calidad ambiental.

El presente estudio tiene como finalidad analizar el programa de monitoreo realizado en el periodo 2010-2018, relacionado con la evolución espacial y temporal de la calidad del agua de los afluentes del embalse San Lorenzo y la influencia de los eventos climáticos ENSO, con base en variables fisicoquímicas y microbiológicas.

Materiales y métodos

La información utilizada se obtuvo en campo por el equipo de investigación del grupo Limnología y Recursos hídricos, en convenio con ISAGEN en desarrollo del proyecto *Estudio del comportamiento histórico del sistema Punchiná-San Lorenzo-Calderas y los cambios que se han generado en términos de variación o afectación de las comunidades hidrobiológicas y las variables fisicoquímicas entre los años 2010 y 2018*.

Área de estudio

Los ríos Nare, San Lorenzo y Nusito forman parte de la cuenca del río Nare, esta se ubica al este de la cadena andina central (**figura 1**) en el departamento de Antioquia (Ideam, 2019). La temperatura promedio varía de 19 °C a 23 °C y la precipitación promedio anual es de 1.800 mm a 2.500 mm (Forero *et al.*, 2014). Además, el régimen de lluvias es bimodal pues están divididas en dos épocas lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos épocas secas (diciembre-marzo y junio-septiembre) (Barrera, 2018).

Para simplificar los nombres de los sitios de muestreo de cada río, se establecieron códigos de la siguiente forma: río Nusito (AECNUSI), río San Lorenzo (ACSLOR) y río Nare (ACNARE), estos sitios de monitoreo se encuentran en un área de la cuenca que está relacionada con cambios significativos en el paisaje y el uso del suelo debido a la disponibilidad de agua, la temperatura constante y la fertilidad del suelo. Factores relacionados con el crecimiento de la población y el desarrollo agrícola e industrial, actividades que tienen impacto directo en la calidad fisicoquímica del agua (Forero *et al.*, 2014).

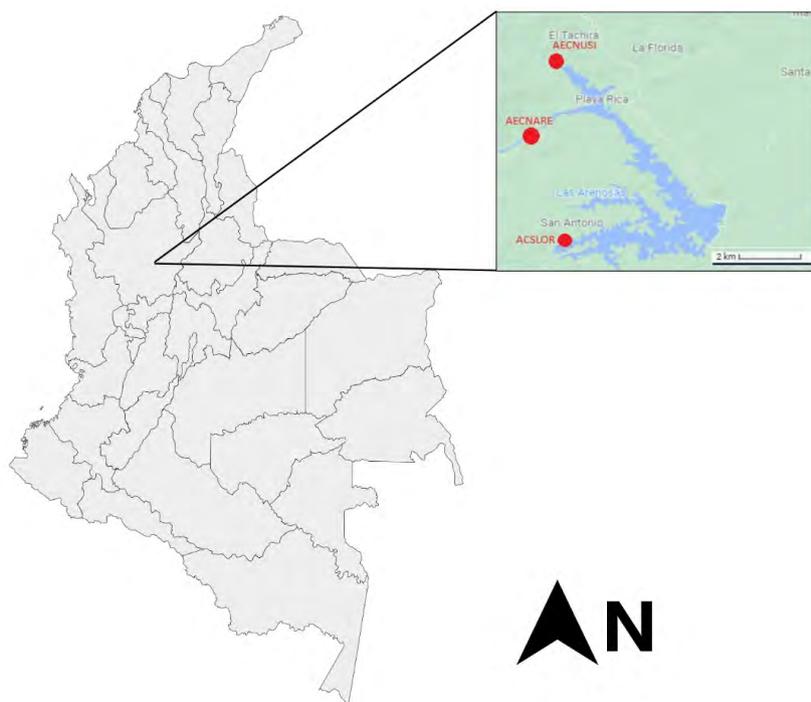


Figura 1. Área de estudio, ubicación del embalse San Lorenzo y los puntos de monitoreo

Nota: elaborado por los autores.

Análisis fisicoquímicos y microbiológicos

El monitoreo de los sitios de interés AECNUSI, ACSLOR, ACNARE, se llevó a cabo en tres jornadas de campo y se realizó en diferentes épocas del ciclo hidrológico, durante cada año, desde el 2010 hasta el 2018. A su vez, los períodos de muestreo se clasificaron teniendo en cuenta las condiciones reinantes de los fenómenos ENSO, esta información se obtuvo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica y de los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (2019) e Ideam (2019).

Los parámetros fisicoquímicos *in situ* se midieron con un equipo multiparamétrico marca HACH HQ40D y un turbidímetro HACH 2100Q, con los cuales se obtuvieron variables como el pH, la conductividad, los sólidos disueltos totales, la temperatura del

agua, el oxígeno disuelto, la saturación de oxígeno y la turbiedad. Antes de cada jornada de monitoreo se llevó a cabo el proceso de calibración de las diferentes sondas según el procedimiento establecido por el fabricante. Para las variables *ex situ*, como, el fósforo total, los ortofosfatos, los sólidos suspendidos totales, los nitratos, el nitrógeno total Kjeldahl, el nitrógeno amoniacal, la DQO, DBO, el hierro total, los coliformes totales y fecales, se tomaron muestras de agua para el análisis en laboratorio en las que se utilizaron los criterios presentados en el Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water (Baird y Bridgewater, 2017).

Índice ICACOSU

El índice ICACOSU es un índice de calidad del agua adaptado a partir del Water Quality

Index (WQI) desarrollada en 1970 (National Sanitation Foundation, NSF). Con la obtención del ICA_{fa}, se cataloga en diferentes categorías (Ideam, 2009) como se muestra en la **tabla 1**.

Luego de obtener los datos arrojados por el ICACOSU se recolectó, seleccionó, clasificó y organizó la información.

Tabla 1. Descriptores del índice ICACOSU

Clasificación	Valor numérico	Uso
Muy malo	0-0,25	Restricciones para el contacto humano y limita vida acuática
Malo	0,26-0,50	Restricciones para el contacto humano y limita vida acuática
Medio	0,51-0,70	Restricciones para el contacto humano y limita vida acuática
Bueno	0,71-0,90	Contacto humano, vida acuática
Excelente	0,91-1,00	Contacto humano, vida acuática

Nota: adaptada de Ideam (2009).

Análisis de los datos

El análisis de los datos se llevó a cabo a través de los *softwares* estadísticos R Commander, RWizard y Jasp. Se realizaron gráficos de componentes principales, con el objetivo de identificar las variables estadísticamente más significativas en cada año y de evaluar la variación temporal de los ríos. Adicionalmente, se elaboraron gráficos de cajas y bigotes para determinar si existen o no diferencias significativas entre los ríos e identificar la dispersión de los datos. Por otra parte, se elaboró la tabla ANOVA con el fin de observar los grupos homogéneos; además, se realizaron gráficos lineales para observar el cambio de las variables en los años y evidenciar el aporte de nutrientes al embalse y una regresión múltiple con el propósito de identificar la influencia de las variables, finalmente, se desarrolló el índice de calidad del agua (ICACOSU) para establecer cuáles eran las aptitudes de las aguas de los ríos evaluados.

Resultados

En general, la temperatura promedio del agua fue de 21,4 °C, además, el pH fue levemente básico con tendencia a la neutralidad, el cual osciló entre 7,4 y 7,5. A través del análisis descriptivo se identificó que no existen diferencias estadísticamente significativas, por lo que los ríos evaluados pueden ser considerados sistemas homogéneos, en términos de temperatura y pH.

Así mismo, desde el punto de vista ambiental las diferencias no fueron relevantes en cuanto al oxígeno disuelto (OD), puesto que su concentración varió entre 7,3 y 7,7 mg/L (**figura 2a**) que es un nivel adecuado para la vida acuática (Benjumea-Hoyos y Álvarez Montes, 2017). Por otro lado, los tres ríos presentaron concentraciones bajas (< 80 mg/L) de sólidos disueltos; parámetro que presenta una relación inversa a la concentración de OD.

Con respecto a la conductividad eléctrica, se caracterizó por presentar valores por debajo de 45 $\mu\text{S}/\text{cm}$; no obstante, en la **figura 2b** se evidencia que existe una gran diferencia estadística entre los ríos evaluados, sin embargo, estas diferencias estadísticas no son relevantes en términos ambientales, es decir que los valores monitoreados están dentro de los rangos propicios para el normal desarrollo de los procesos ecológicos del ecosistema.

En cuanto al análisis microbiológico, en la **figura 2c** es posible evidenciar que los ríos contienen bajas concentraciones de coliformes totales, las cuales oscilan entre 10.000-27.000 NMP, no obstante, las diferencias

estadísticas son mínimas entre los ríos, siendo ACANRE (a) y ACSLOR (b) diferentes; mientras que AECNUSI (ab) presentó similitud estadística con estos dos últimos.

Los ríos ACNARE y AECNUSI presentaron promedios de turbiedad relativamente altos 43,19 NTU y 25,89 NTU respectivamente en comparación con ACSLOR, lo que hace referencia a la presencia de sólidos en suspensión en estos dos puntos. Por otra parte, el río ACSLOR presenta valores menores de turbiedad, y por ende bajas concentraciones de sólidos suspendidos, lo que explica la gran diferencia que se genera en el valor de validez (**figura 2d**).

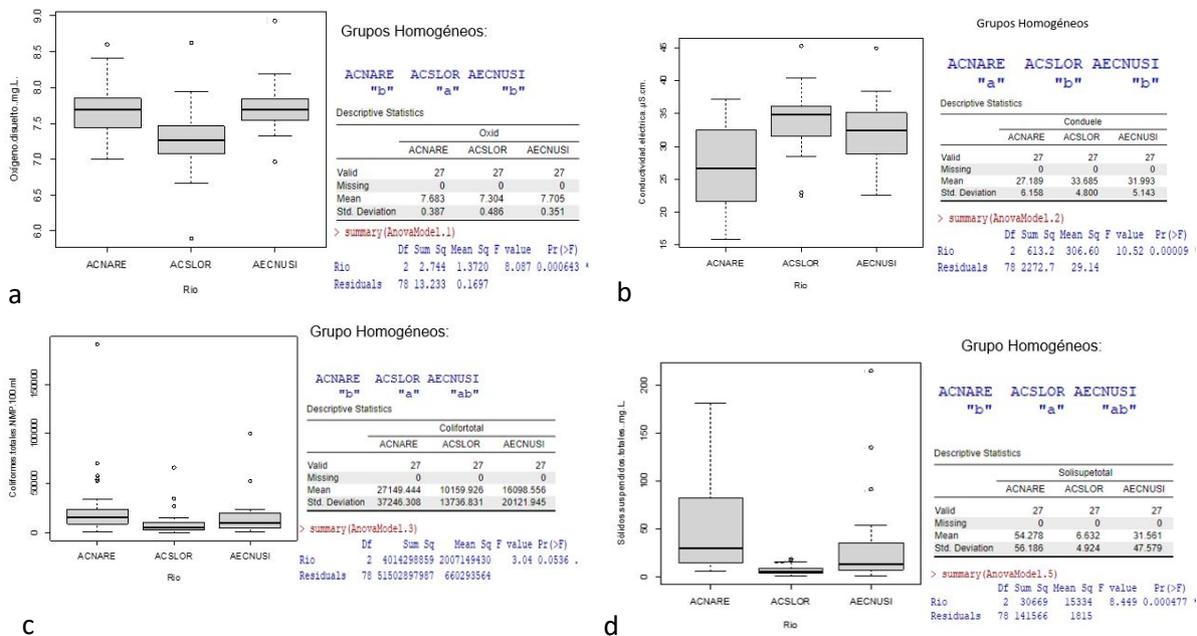


Figura 2. Comportamiento del oxígeno disuelto (a), conductividad eléctrica (b), coliformes totales (c) y turbiedad (d) en los ríos de interés.

Nota: elaborado por los autores.

La DQO en los tres ríos fue baja (< 25mg/L) (**figura 3a**), lo que significa que los ríos requieren bajas cantidades de oxígeno para degradar la materia orgánica. Esta

concentración está directamente relacionada con los valores de la demanda biológica de oxígeno (DBO), cuyos valores estuvieron por debajo del límite de detección del método

en todos los monitoreos realizados. La **figura 3b** presenta el comportamiento de los nitratos en los ríos, donde se observa que los ríos tienen concentraciones muy bajas para esta variable ($< 1,5$ mg/L), además, no exhibieron diferencias estadísticas significativas, es decir, son sistemas homogéneos. Es importante mencionar que las concentraciones de nitritos y de nitrógeno total Kjeldahl se encontraron por debajo del límite de detección del método $0,01$ mg/L y $0,05$ mg/L respectivamente. Las concentraciones de fósforo total fueron bajas, incluso, en ACSLOR se encontraron

por debajo del límite de detección del método ($0,053$ mg/l), no obstante, no se presentaron diferencias estadísticas ni ambientales entre los tres ríos (**figura 3c**). En la **figura 3d** se pueden observar que las concentraciones de hierro total en los sistemas estudiados fueron bajas, no obstante, se encontraron diferencias estadísticas significativas entre ACNARE y ACSLOR, dado que la estación sobre el río Nare presentó mayor concentración ($1,8$ mg/l) y dispersión en los datos, Por otro lado, AECNUSI es estadísticamente similar a los demás ríos.

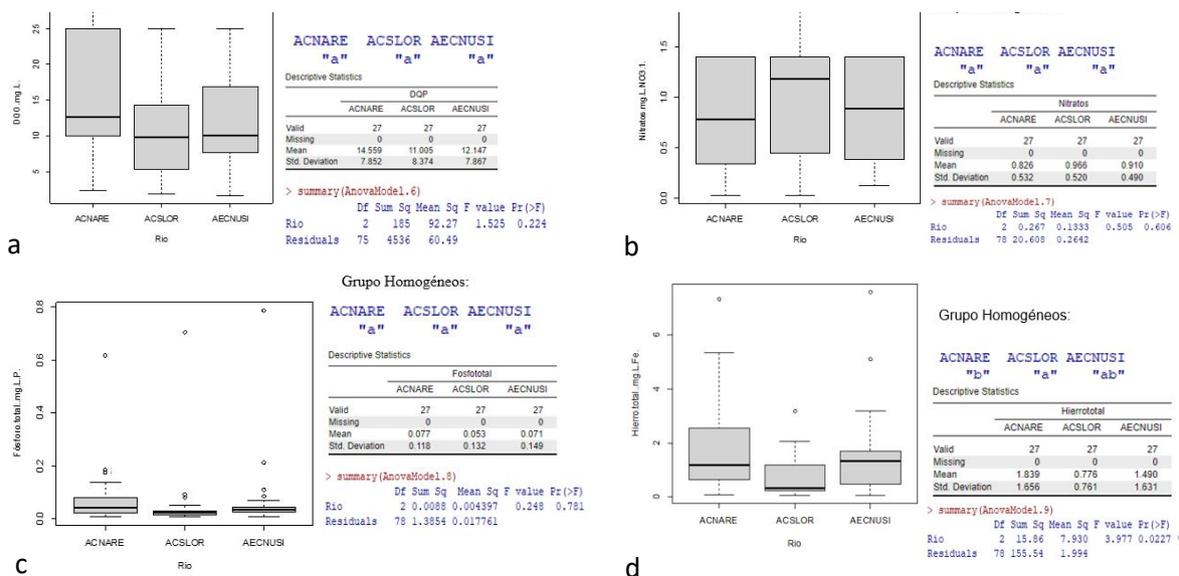


Figura 3. Comportamiento de DQO (a), nitratos (b), fósforo total (c) y hierro total (d) en los ríos de interés

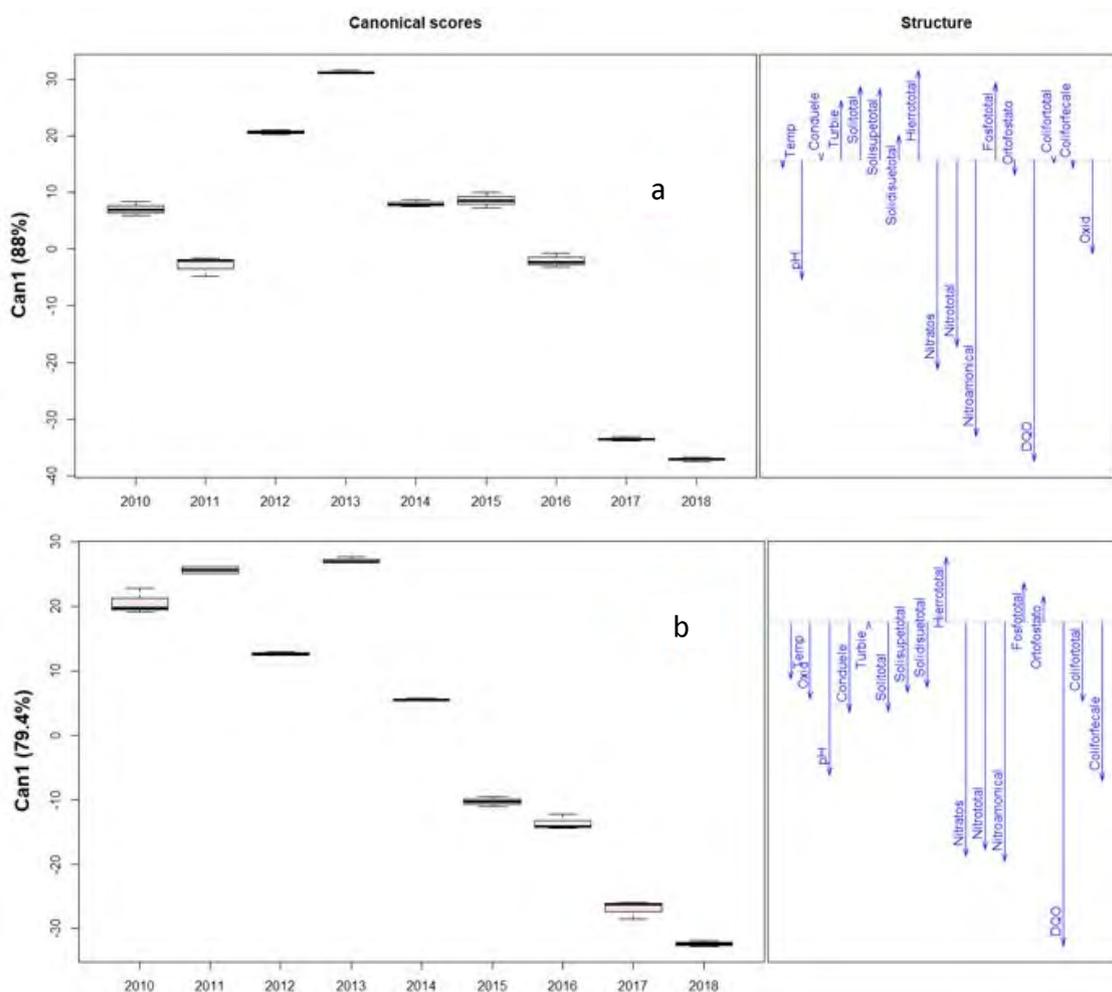
Nota: elaborado por los autores.

Según el análisis discriminante temporal (**figura 4**) para el río AECNUSI (88% de varianza explicada por el primer eje canónico) existen diferencias entre 2013, 2017 y 2018 respecto a los demás años analizados debido a que el hierro total presentó la mayor significancia en el año 2013, y la DQO y el nitrógeno amoniacal presentaron mayor significancia en los años 2017 y 2018, en comparación con los demás años (**figura 4a**). Por otro

lado, en el río ACSLOR (79,4 % de varianza explicada por el primer eje canónico) se evidenciaron diferencias entre el 2011 y 2013 en comparación con los demás años puesto que el hierro en esta temporalidad presentó la mayor significancia dado que exhibe valores de hasta $1,1$ mg/l. Además, en el 2017 y el 2018 también evidenciaron diferencias respecto a los demás años, dado que la DQO presentó gran significancia (**figura 4b**).

Finalmente, el río ACNARE (68% de varianza explicada por el primer eje canónico) mostró diferencias entre el 2012 y el 2017 ya que el hierro y el fósforo totales presentaron la mayor significancia en el 2012, en comparación a los demás años, y en el 2017, la variable con mayor significancia fue la DQO en relación con las

demás variables (figura 4c). Cabe destacar que, a pesar de que estos valores fueron más altos en los años indicados, respecto a los demás años analizados, no significa que sean valores extremos ni relevantes desde el punto de vista ambiental.



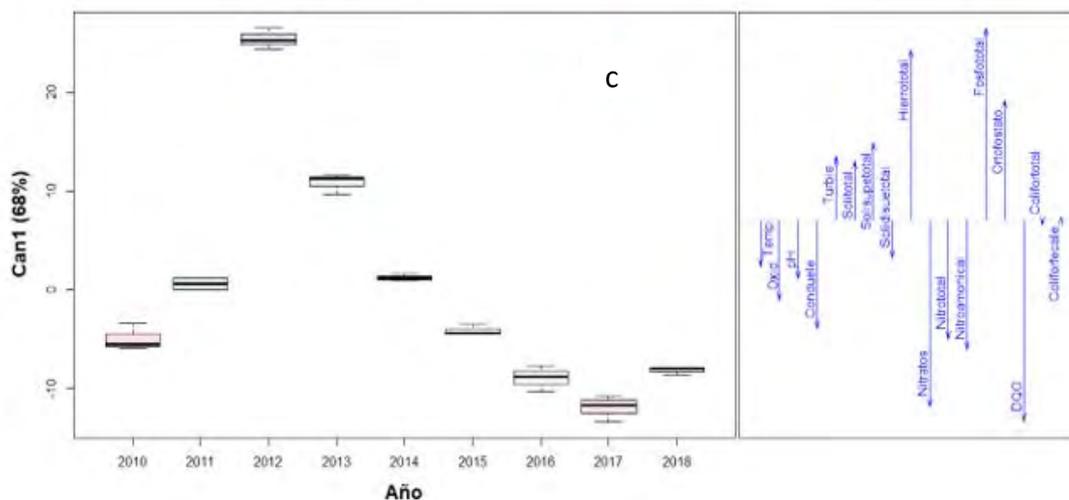


Figura 4. Análisis discriminante del período de estudio, basados en variables fisicoquímicas y microbiológicas. Río Nusito (a); río San Lorenzo (b), río Nare (c).

Nota: elaborado por los autores.

De acuerdo con el análisis discriminante para eventos ENSO (**figura 5**), en la temporalidad neutral, en el río AECNUSI (61,9 % de varianza), la DQO y los sólidos disueltos presentaron la mayor significancia en comparación a las otras variables con valores de 14 mg/l y 47,1 mg/l respectivamente, y para la época de La Niña, la variable con mayor significancia fue el oxígeno disuelto (7,9 mg/l) respecto a las demás variables (**figura 5a**). En el río ACSLOR (81,6 % de varianza), el oxígeno disuelto y el hierro total presentaron mayor significancia en la temporalidad de La Niña

respecto a las demás variables (7,6 mg/l y 1,2 mg/l respectivamente) y en la época neutra presentaron mayor significancia la DQO y la temperatura (12,3 mg/l y 22,7 °C respectivamente) en comparación con las demás variables (**figura 5b**). Finalmente, en el río ACNARE (72,7 % de varianza), la temperatura tuvo la mayor significancia en la temporalidad neutra (21,1 °C) respecto a las demás variables, y en la temporalidad de La Niña el oxígeno disuelto (7,9 mg/l) presentó la mayor significancia en comparación con las otras variables (**figura 5c**).

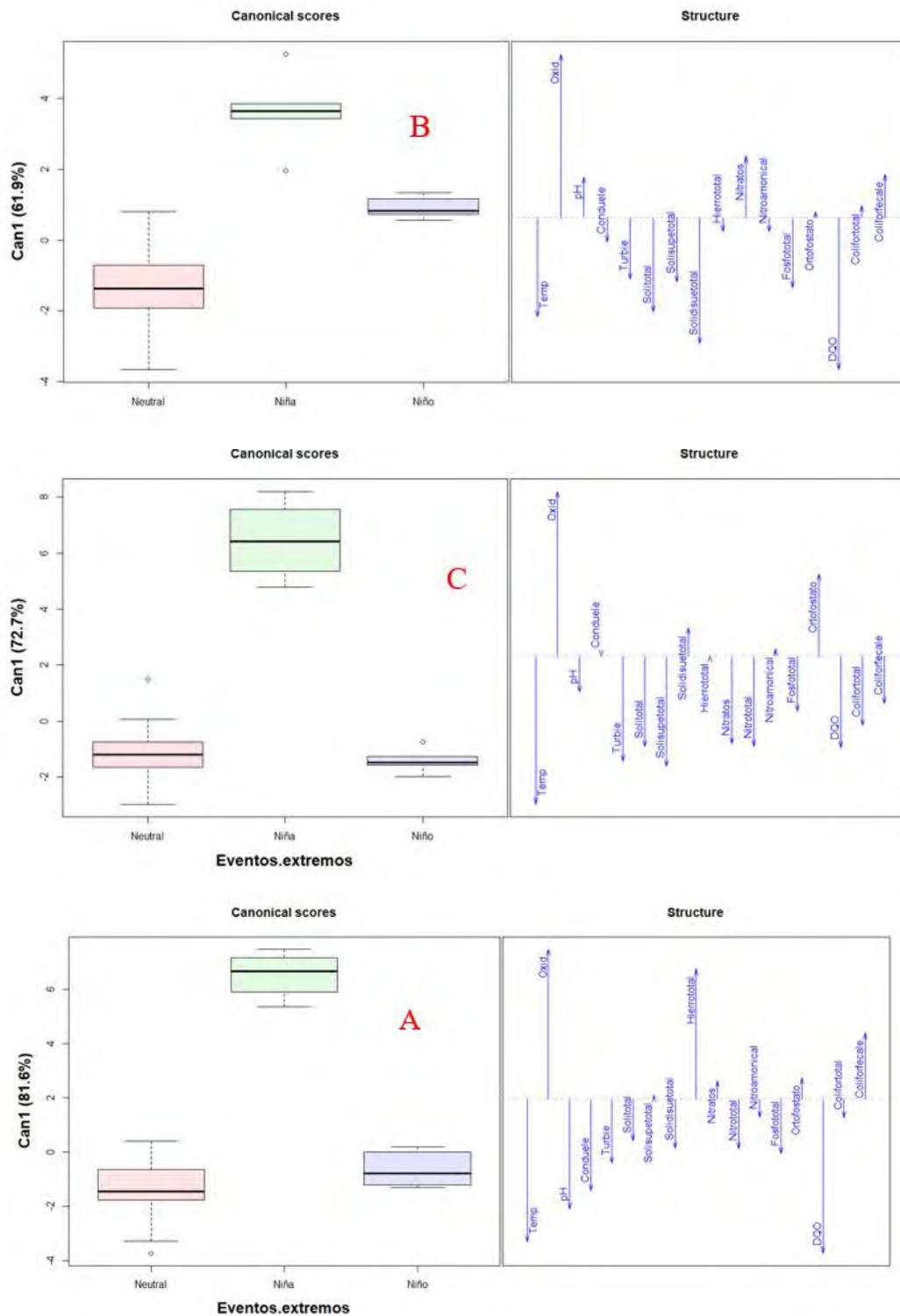


Figura 5. Análisis discriminante para eventos ENSO, basados en variables fisicoquímicas y microbiológicas. Río Nusito (a); río San Lorenzo (b), río Nare (c).

Nota: elaborado por los autores.

De otro lado, el índice de calidad del agua ICACOSU (figura 6), exhibió un comportamiento de buena calidad a lo largo de los ocho años (2010 a 2018) de estudio en los tres ríos monitoreados. Así mismo, durante los años analizados, ACNARE reportó buena calidad de acuerdo con este índice, por otro lado, ACSLOR,

entre 2010 y 2014 se caracterizó por tener excelente calidad, sin embargo, de 2015 a 2018, disminuyó someramente a calidad buena. En cuanto a AECNUSI, en términos generales registró una calidad buena, exceptuando el 2011, en el que se describió con una calidad excelente.

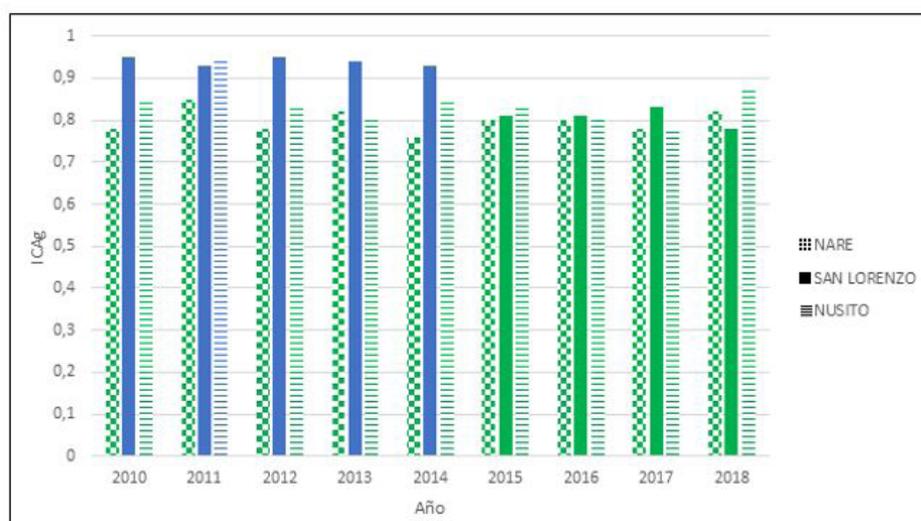


Figura 6. Índice de calidad ICACOSU río Nusito, río San Lorenzo, río Nare.

Nota: elaborado por los autores.

Discusión

Las variables fisicoquímicas y microbiológicas (coliformes totales y fecales) evaluadas en este trabajo tienen gran importancia sobre los ríos del sistema San Lorenzo, ya que son indicativos de la composición y dinámica de dichos ecosistemas. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede determinar que no existieron diferencias ambientalmente relevantes en la calidad del agua entre los tres ríos evaluados durante todo el período de muestreo. Según García-Alzate *et al.* (2007), los bajos coeficientes de variación pueden estar asociados a la posición geográfica y a

la topografía de estos ecosistemas de alta montaña tropical, en donde las variaciones son bajas. No obstante, es importante mencionar que existieron variables con diferencias estadísticas significativas, sin embargo, en términos ambientales, no son relevantes, debido a que los valores están dentro de los parámetros establecidos para albergar vida acuática.

Generalmente la temperatura del agua influye en los procesos físicos, químicos y biológicos, de ahí su importancia en la valoración de la calidad del agua. La temperatura promedio del agua de los ríos evaluados osciló entre 20 y 24 °C durante todo

el periodo de muestreo, datos acordes con la ubicación geográfica de los ríos de estudio. Lo anterior se debe a que en el trópico la temperatura es relativamente estable durante el año (Roldán y Ramírez, 2008), por lo que la poca variabilidad otorga estabilidad al hábitat. De modo similar, Machado y Roldán (1981) expusieron que los organismos acuáticos de ambientes tropicales están adaptados a medios en los que la temperatura no tiene variaciones importantes, es por esto que las respuestas fisiológicas de estos se perturban con facilidad cuando se presentan cambios abruptos; de igual manera esta variable es de suma importancia debido a que, en condiciones de alta temperatura, las concentraciones de oxígeno disuelto tienden a disminuir. Es importante destacar que para el río ACNARE la temperatura tuvo la mayor significancia en la temporalidad neutra por la gran cantidad de "altos valores" (24 °C) que se presentaron, según el discriminante macroclimático, pero ambientalmente no presentó mayor relevancia por lo mencionado anteriormente.

Otra variable que afecta los ecosistemas acuáticos es el oxígeno disuelto, el cual está condicionado en primera instancia por la temperatura y los procesos de descomposición de la materia orgánica. Esta es una variable de gran importancia pues su concentración establece la presencia de los organismos, de acuerdo con su capacidad de adaptación, estableciendo la distribución y funcionamiento biótico de estos ecosistemas (Benjumea-Hoyos y Álvarez Montes, 2017). El oxígeno disuelto presentó niveles adecuados para la albergar gran diversidad, por ejemplo, la concentración de oxígeno para hábitat de peces debe ser mayor a 4 mg/L en aguas cálidas (Benjumea-Hoyos *et al.*, 2018). Lo anterior tiene relación con la poca presencia de sólidos disueltos encontrados, además, el discriminante macroclimático mostró que, para los tres ríos evaluados, la concentración de oxígeno disuelto en la temporalidad de La Niña fue significativa porque en este

fenómeno prevalece la lluvia, lo que conlleva a un aumento en la velocidad fluvial, y por ende en la concentración de oxígeno (Kaboré *et al.*, 2022), además de los procesos de reaireación en la interfaz aire-agua.

En este estudio se encontraron valores óptimos para el desarrollo de procesos biológicos, lo que coincide con Posada *et al.* (2000) y García-Alzate *et al.* (2007). Los valores presentados tienen gran similitud con lo reportado por Cadavid *et al.* (2010) y Benjumea-Hoyos *et al.* (2018) para la cuenca del río Negro, valores que se consideran adecuados en aguas naturales de montaña. Por otra parte, la conductividad eléctrica en los tres ríos evaluados se caracterizó por ser baja (<45 $\mu\text{S}/\text{cm}$), este valor es típico de aguas con poca cantidad de iones o sólidos en disolución y se encuentra en el rango establecido para ríos de montaña (30-60 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Gualdrón, 2016 y Montoya-Moreno y Naranjo-Cardona, 2020). La conductividad eléctrica en ambientes acuáticos tropicales se relaciona con el entorno geoquímico y su valor varía principalmente con la época de lluvias. Según los resultados del discriminante canónico los eventos ENSO (Niña) presentaron una influencia marcada sobre esta variable. Estos bajos valores de conductividad permiten inferir que las concentraciones de sólidos disueltos son igualmente bajas en los ríos que fluyen al embalse San Lorenzo, los cuales presentaron concentraciones por debajo de 80 mg/L de sólidos disueltos, estos resultados concuerdan con lo establecido por Gualdrón (2016) en diferentes ríos de Colombia, donde se pudo observar que la conductividad eléctrica de los ambientes estudiados era baja. Por otra parte, Machado y Roldán (1981) y Roldán y Ramírez (2008) exponen que la diversidad de organismos se ve afectada por la alta conductividad y las altas concentraciones de cloruros, por ende, se establece que los ríos evaluados podrían presentar gran diversidad de especies, dada la baja conductividad. Además, es coherente con lo mencionado

anteriormente acerca de las concentraciones de oxígeno, ya que la relación existente entre la concentración de sólidos disueltos totales y la disponibilidad de oxígeno es inversa.

Los coliformes son indicadores de contaminación fecal en las aguas, estos microorganismos se asocian principalmente en las excretas de animales de sangre caliente. En general, las concentraciones de coliformes totales y fecales no representan un alto grado de contaminación y podrían estar relacionados con las actividades antrópicas presentes en la zona de influencia, tales como, la ganadería. No obstante, los valores son muy similares a los registrados en la cuenca media del río Cuenca, Ecuador (Jerves-Cobo *et al.*, 2020) y los ríos asociados a la zona rural de Villapinzón, Colombia (Barragán *et al.*, 2021), donde no se evidenció un fuerte impacto por actividades antrópicas relacionadas con vertimientos de aguas residuales.

En términos de turbiedad, los ríos ACNARE y AECNUSI presentaron medidas de nivel medio (43,19 y 25,89 NTU respectivamente), lo que significa que estos ríos cuentan con una transparencia adecuada, asimismo, hace referencia a una cantidad moderada de partículas en suspensión, ya que según Benjumea-Hoyos *et al.* (2021), la turbiedad es la medida del grado de transparencia del agua, debido a la presencia de material particulado en suspensión. Estos resultados contrastan con lo reportado por Gallo *et al.* (2021) donde se encontraron valores de hasta 400 NTU para diversos ríos de la cuenca del Cauca, los cuales se relacionaron con alta intervención antrópica. Por otra parte, el río ACSLOR presentó los valores más bajos de turbiedad (6,1 NTU), permitiendo un paso adecuado de la luz, lo que repercute positivamente en los organismos que requieren directamente de las plantas para su alimentación, lo cual, potencia la producción primaria (referencia), lo anterior puede atribuirse a que ACSLOR hace referencia

a un río de aguas claras, por lo tanto, tiene una baja concentración de partículas suspendidas.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), los tres ríos presentaron concentraciones bajas (< 25 mg/L), lo cual concuerda con lo expuesto por Roldán-Pérez *et al.* (2019) que plantean que valores por debajo de 50 mg/l se consideran bajos cuando de aguas superficiales se trata. Por su parte Zhang *et al.* (2017) afirman que aguas naturales no contaminadas presentan valores hasta de 25 mg/l, lo que implica que la mayoría de la materia presente en los cuerpos de aguas no es biodegradable y puede estar relacionada con la geología de la región, lo que concuerda con los valores obtenidos de DBO, los cuales se encontraron por debajo del límite de detección del método. Para los ríos AECNUSI y ACSLOR, la DQO, fue la variable que presentó mayor relevancia en el discriminante canónico temporal, ya que esta variable presentó una mayor significancia en comparación a los otros años, lo que puede atribuirse a los altos valores obtenidos en 2017 y 2018 (25 mg/L), esto puede deberse a las continuas lluvias que se generaron en estos años, provocando mayor arrastre de sedimentos. En cuanto al discriminante para eventos ENSO, para AECNUSI (**figura 5a**) y ACSLOR (**figura 5b**), esta variable fue relevante en la temporalidad neutra, debido a los altos valores presentados en los últimos años del muestreo (2017 y 2018), no obstante, este resultado se puede asociar con material de carácter mineral, más asociado con partículas en suspensión que con contaminación orgánica según lo descrito anteriormente en cuanto a la DBO.

Una de las formas más importantes de nutrientes en el agua es el nitrógeno, que se encuentra en diferentes estados, como los nitratos, los cuales, pueden verse afectados por variables como el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y por procesos metabólicos de asimilación de los microorganismos asociados (Chlot *et al.*, 2011). Este nutriente se produce

por la desolubilización de rocas y minerales, la degradación del material vegetal y animal y la polución por vertimientos; sin embargo, la concentración de nitratos en los ríos evaluados fue muy baja ($< 1,5$ mg/L), en contraste con lo registrado en el río Medellín (8 mg/L) (Giraldo *et al.*, 2010); el cual es un sistema lótico con alto impacto antropogénico. Por otra parte, esta variable presentó gran importancia en el discriminante temporal de ACNARE puesto que, en los años 2016, 2017 y 2018 evidenció mayor significancia, debido a que se dieron los valores más altos (1,4 mg/L) en comparación con los demás años de estudio, lo cual puede relacionarse con las altas concentraciones de oxígeno, las cuales favorecen los procesos de nitrificación. Es importante mencionar, que las concentraciones de nitritos se encontraron por debajo del límite de detección del método (0,01 mg/l) durante todo el período de estudio, esto porque los nitritos son la forma de nutrientes más inestable, es decir, de rápida metabolización en el proceso de nitrificación. No obstante, el nitrógeno total Kjeldahl mostró el comportamiento de los compuestos nitrogenados y amoniacales, los cuales no presentaron diferencias entre los ríos y sus valores fueron relativamente bajos y constantes (0,7 mg/l), dada la relación inversa existente con la temperatura (Benjumea-Hoyos *et al.*, 2014).

Otro tipo de nutriente relevante es el fósforo, este es un elemento que ingresa al sistema acuático de forma natural por procesos metabólicos de animales, degradación vegetal, lixiviación de minerales y transporte de nutrientes desde los suelos. Por ello, cuando se detectan en los sistemas acuáticos concentraciones altas de este elemento, se puede asociar con intervención antrópica como la agricultura y los vertimientos de aguas residuales (Caho-Rodríguez y López-Barrera, 2017). De modo similar a las formas de nitrógeno, se encontraron concentraciones de fósforo total bajas (0,07 mg/l) en todos los ríos, lo que puede atribuirse a una gran estabilidad

en los procesos de aprovechamiento de nutrientes por los organismos ribereños; ya que, estos presentan una importante influencia en el ciclo biogeoquímico del fósforo (Benjumea-Hoyos *et al.*, 2018); además, la velocidad del río podría lavar el fósforo, lo que conlleva a una rápida eliminación del nutriente. Cabe aclarar que, esta variable tuvo mayor significancia en ACNARE, de acuerdo con el discriminante temporal, debido a que, en los años 2012 y 2013 se dieron los valores más bajos y altos (0,01 mg/L y 0,6 mg/L respectivamente), en comparación con los otros años, lo que concuerda con Masese *et al.* (2017), quienes exponen que bajo condiciones de altas concentraciones de oxígeno disuelto el desarrollo de los organismos vegetales es adecuado, lo que deriva en que los niveles de fósforo disminuyan. Por lo anterior, es posible afirmar que en el embalse San Lorenzo no se den procesos de eutrofización según las concentraciones de nitrógeno y fósforo encontradas (Esteves, 2011). Sin embargo, la Environmental Protection Agency (2009; 2012), considera que concentraciones mayores a 0,04 g/L conllevan a la eutrofización de los ríos y lagos, pero durante los periodos estudiados no se evidenciaron signos.

Las concentraciones de hierro total (Fe) en el agua provienen de la disolución de rocas y minerales. En general, la concentración típica de hierro varía entre 0,01 mg/L y 0,8 mg/L para aguas naturales superficiales (Roldán-Pérez *et al.*, 2019). Por lo tanto, es posible afirmar que los resultados promedios obtenidos se encontraron dentro del rango permitido Según el discriminante temporal, el hierro en ACNARE (**figura 4c**), en 2012 presentó las concentraciones más altas (4,2 mg/L) y en 2013, las más bajas (0,6 mg/L); para ACSLOR, (**figura 4b**), en el 2011 se dieron los valores más altos (1,2 mg/L) y, finalmente para AECNUSI, (**figura 4a**), en el 2013 se encontraron los valores más altos (1,7 mg/L) en comparación a los otros años. Estas concentraciones pueden atribuirse a la buena disponibilidad

de hierro que hay en los suelos de la zona (Hermelin, 1992), lo que favorece su dilución en cualquier temporalidad. Si se presentan lluvias se genera arrastre (2011 y 2013) y en sequía (2012) disminuye la velocidad fluvial y se consiguen los valores de oxígeno, aquí vale mencionar que, en este caso, los valores de oxígeno durante todo el periodo de muestreo no presentaron fluctuaciones significativas, por lo tanto, el hierro permaneció disuelto en el agua.

En cuanto al índice de calidad (ICACOSU), en términos generales, los ríos evaluados se caracterizaron por tener calidad excelente y buena en todo el período de muestreo, lo que significa que los ríos presentaron condiciones favorables para la vida acuática e incluso para el uso humano (contacto primario), durante todo el periodo de muestreo. Caso contrario sucede en el río Negro (también perteneciente a la cuenca del río Nare), cuya calidad a lo largo del perfil longitudinal se relaciona con una combinación de varios impactos humanos tales como el represamiento de agua, actividades agrarias en planicies de inundación, procesos de erosión en cuencas, modificación de canales y descarga de aguas residuales (Montoya *et al.*, 2011).

Las categorizaciones encontradas mediante el ICACOSU indican que estos son ríos poco influenciados por las actividades antrópicas. Además, los resultados obtenidos sugieren que los tres sistemas evaluados, tienen un buen mecanismo para la depuración de sus propias aguas; lo cual puede hacer referencia a la posibilidad natural de una corriente para degradar los contaminantes, lo que contribuye a la creación de un ecosistema apto para la vida de muchas especies acuáticas, además, esa categorización, puede implicar que son ríos poco influenciados por las actividades antrópicas.

Lo encontrado en esta investigación contrasta con cuencas de alta intervención antrópica, como la del río Cauca y del Magdalena, las cuales a lo largo de su recorrido varían en las categorías regular y mala, lo que puede ser atribuido a los vertimientos de residuos de agroquímicos y aguas residuales domésticas (Ideam, 2018).

Conclusiones

Mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos y la aplicación del índice de calidad de agua (ICACOSU), se estableció que los tres ríos evaluados presentan características favorables para albergar gran diversidad de vida acuática. Adicionalmente, con los resultados obtenidos se determinó que los afluentes del embalse San Lorenzo no generan un aporte significativo de nutrientes (nitrógeno y fósforo), ya que sus concentraciones, si bien son normales en los ríos del trópico, son considerablemente bajas.

Se evidenció que los eventos climáticos ENSO no presentaron mayor influencia en el comportamiento de las variables estudiadas durante los años de seguimiento. Además, este estudio, sirve como aporte en la gestión adecuada del recurso hídrico en el tiempo, lo que puede dar pie a realizar proyectos de mitigación o remediación de los sistemas acuáticos y orientar adecuadamente la toma de decisiones aportando herramientas técnicas que complementen la gestión del recurso.

Referencias

- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica [NOAA] and Centros Nacionales para la Predicción Ambiental [NCEP]. (2019). *ENSO: Recent Evolution, Current Status and Predictions*. <https://bit.ly/2VZRR3G>
- Álvarez-Cabria, M., Barquín, J. and Peñas, F. J. (2016). Modelling the spatial and seasonal variability of water quality for entire river networks: Relationships with natural and anthropogenic factors. *Science of the Total Environment*, 545, 152-162.
- Baird, R. and Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (23ª ed.). American Public Health Association.
- Barragán, J. M., Cuesta, L. D. and Susa, M. R. (2021). Quantitative microbial risk assessment to estimate the public health risk from exposure to enterotoxigenic *E. Coli* in drinking water in the rural area of Villapinzón, Colombia. *Microbial Risk Analysis*, 18, 100-173.
- Barrera, J. (2018). *Estimación de caudal ambiental mediante enfoques ecosistémicos para la cuenca del río Nare en el departamento de Antioquia, enmarcada en la metodología de Eloha* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://bit.ly/3H2l1p3>
- Benjumea-Hoyos, C. A. y Álvarez Montes, G. (2017). Demanda de oxígeno por sedimentos en diferentes tramos del río Negro Rionegro, Antioquia, Colombia. *Producción + Limpia*, 12(2), 131-146.
- Benjumea-Hoyos, C. A., Bedoya Castaño, C. L. y Álvarez Alzate, D. A. (2014). Evolución en la carga de nutrientes de ríos de montaña que fluyen a un embalse, cuenca media del río Magdalena. *Revista EIA*, 11(22), 77-91.
- Benjumea-Hoyos, C. A., Suárez-Segura, M. A. y Villabona-González, S. L. (2018). Variación espacial y temporal de nutrientes y total de sólidos en suspensión en la cuenca de un río de alta montaña tropical. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(165), 353-363.
- Benjumea-Hoyos, C. A., Martínez, M. T. y Marín, V. L. (2021). Evaluación de la eficiencia de extractos naturales en el proceso de coagulación floculación de aguas crudas, con fines de potabilización. *Bionatura*, 6(2), 1770-1777.
- Burneo, P. C. and Gunkel, G. (2003). Ecology of a high Andean stream, río Itambi, Otavalo, Ecuador. *Limnologia*, 33(1), 29-43.
- Cadavid Gallego, J. C., Echeverri Ruiz, J. D., & Gómez Gutierrez, A. E. (2010). Modelación de índices de calidad de agua (ICA) en las cuencas de la región Cornare. *Gestión y Ambiente*.
- Caho-Rodríguez, C. A. y López-Barrera, E. A. (2017). Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Producción + Limpia*, 12(2), 35-49.
- Calizaya-Anco, J., Avendaño-Cáceres, M. y Delgado-Vargas, I. (2013). Evaluación de la calidad del agua fluvial con diatomeas (Bacillariophyceae), una experiencia en Tacna, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 30, 58-63.

- Chamorro, S., Hernández, V., Matamoros, V., Domínguez, C., Becerra, J., Vidal, G. and Bayona, J. (2013). Chemical characterization of organic microcontaminant sources and biological effects in riverine sediments impacted by urban sewage and pulp mill discharges. *Chemosphere*, 90(2), 611-619.
- Chlot, S., Widerlund, A., Siergieiev, D., Ecke, F., Husson, E. and Öhlander, B. (2011). Modelling nitrogen transformations in waters receiving mine effluents. *Science of the Total Environment*, 409(21), 4585-4595.
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N. and Norton, L. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110-124.
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2009). *National recommended water quality criteria*. United States Environmental Protection Agency.
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2012). *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Rivers and Streams*. <https://bit.ly/41M69mE>
- Esteves, F. (2011). *Fundamentos de limnología*. (3ª ed.). Interciência.
- Fontalvo Julio, F. A. y Tamaris-Turizo, C. E. (2018). Calidad del agua de la parte baja del río Córdoba (Magdalena, Colombia), usando el ICA-NSF. *Intropica*, 13(2), 101-111.
- Forero, L. C., Longo, M., Ramírez, J. J. y Chalar, G. (2014). Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICE RN-MAE), Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 62, 233-247.
- Gallo, J. A., Pérez, H., Figueroa, R. and Figueroa, A. (2021). Water quality of streams associated with artisanal gold mining, Suárez, Department of Cauca, Colombia. *Heliyon*, 7. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07047.
- García-Alzate, C., Román-Valencia, C., Vanegas-Ríos, A. y Arcila-Mesa, D. (2007). Análisis fisicoquímico y biológico comparado en dos quebradas de alta montaña neotropical. *Revista de Investigaciones de la Universidad del Quindío*, 17, 57-80.
- Giraldo, L. C., Agudelo, R. A. and Palacio, C. A. (2010). Spatial and temporal variation of nitrogen in the Medellín River. *Dyna*, 77(163), 124-131.
- Gualdrón, L. E. (2016). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos. *Dinámica Ambiental*, (1), 83-102. <https://bit.ly/3LgI0PK>
- Hamilton, S. K., Kellndorfer, J., Lehner, B. and Tobler, M. (2007). Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Perú). *Geomorphology*, 89(1-2), 23-38.
- Hermelin, M. (1992). Los suelos del oriente antioqueño. Un recurso no renovable. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 21(1), 25-36.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2009). Índice de Calidad General en Corrientes Superficiales (*Icacosu*). Versión 2.0. Ideam.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2018). *Estudio nacional del agua 2018*. Ideam. <https://bit.ly/3UUj1Fc>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019). *Boletín climatológico mensual*. <https://bit.ly/41M5SQz>
- Jerves-Cobo, R., Eurie Forio, M. A., Lock, K., Van Butsel, J., Pauta, G., Cisneros, F., Nopens, I. and Goethals, P. L. (2020). Biological water quality in tropical rivers during dry and rainy seasons: A model-based analysis. *Ecological Indicators*, 108. <https://bit.ly/43MBqrB>
- Kaboré, I., Ouéda, A., Moog, O., Meulenbroek, P., Tampo, L., Bancé, V. and Melcher, A. (2022). A benthic invertebrates-based biotic index to assess the ecological status of West African Sahel Rivers, Burkina Faso. *Journal of Environmental Management*, 307. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114503.
- Liévano-León, A. y Cadena-Monroy, L. (2020). Valores y principios bioéticos que identifican las comunidades en los servicios ecosistémicos que prestan los ríos y quebradas. *Revista Colombiana de Bioética*, 15(1), 1-26.
- Machado, T. y Roldán, G. (1981). Estudio de las características fisicoquímicas y biológicas del río Anorí y sus principales afluentes. *Actualidades Biológicas*, 10(35), 3-19.
- Masese, F. O., Salcedo-Borda, J. S., Gettel, G. M., Irvine, K. and McClain, M. E. (2017). Influence of catchment land use and seasonality on dissolved organic matter composition and ecosystem metabolism in headwater streams of a Kenyan river. *Biogeochemistry*, 132, 1-22. doi: 10.1007/s10533-016-0269-6.
- Montoya, Y., Acosta, Y., & Zuluaga, E. (2011). Evolución de la calidad del agua en el río Negro y sus principales tributarios empleando como indicadores los índices ICA, el BMWP/COL y el ASPT. *Caldasia*, 33(1), 193-210.
- Montoya-Moreno, Y. y Naranjo-Cardona, J. W. (2020). Efectos asociados al cambio del cauce del río San Lorenzo, el Carmen de Viboral-Antioquia. *Revista Politécnica*, 16(32), 120-128. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n32a11>
- Pereira, M. A. and Marques, R. C. (2021). Sustainable water and sanitation for all: Are we there yet? *Water Research*, 207. doi: 10.1016/j.watres.2021.117765.
- Posada, J. A., Roldán, G. y Ramírez, J. (2000). Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad de aguas de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 48(1), 59-70.
- Roldán, G. y Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Universidad de Antioquia.
- Roldán-Pérez, G., Campuzano, C., Chalarca, D., Molina, F., Rodríguez, D., Benjumea-Hoyos, C., Lucía, S. and Ríos-Pulgarín, M. (2019). Water Quality in Colombia. En K. Vammen, H. Vaux and A. de la Cruz (coords.), *Water Quality in the Americas. Risks and Opportunities* (pp. 192-227). Interamerican Network of Academies of Sciences.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E. and Debán, L. (1998). Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river

water by exploratory data analysis. *Water Research*, 32(12), 3581-3592.

Villabona-González, S. L., Benjumea-Hoyos, C. A., Gutiérrez-Monsalve, J. A., López-Muñoz, M. T. y González, E. J. (2020). Variables fisicoquímicas y biológicas de mayor influencia en el estado trófico de cinco embalses andinos colombianos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 344-359.

Zhang, W., Jin, X., Zhu, X., Meng, X., Zhu, Y., Zhang, C., Tang, W. and Shan, B. (2017). Do NH₃ and chemical oxygen demand induce continuous release of phosphorus from sediment in heavily polluted rivers. *Ecological Engineering*, 102, 24-30.