



Demanda de oxígeno por sedimentos en diferentes tramos del río Negro Rionegro, Antioquia, Colombia¹

Carlos Augusto Benjumea Hoyos², Geraldine Álvarez Montes³

Sediment Oxygen Demand in different sections of the Río Negro, Rionegro, Antioquia, Colombia

Demanda de oxígeno por sedimentos em diferentes partes do Rio Negro. Rionegro, Antioquia, Colômbia

RESUMEN

Resumen. Introducción. Este trabajo tuvo como objetivo principal determinar la demanda de oxígeno por sedimentos (SOD, por sus siglas en inglés) en cuatro diferentes tramos del río Negro (Rionegro, Antioquia) durante tres épocas climáticas en el año 2014 (época seca, lluviosa y transición). **Materiales y métodos.** Las tomas de muestra de sedimento se realizaron mediante draga Ekman, para su posterior análisis de humedad y contenido de materia orgánica en el laboratorio. La medición de la demanda bental se realizó con base en la técnica del sistema Batch. De igual manera, en cada punto de monitoreo se hicieron seguimiento a las variables pH, conductividad, oxígeno disuelto, % saturación y temperatura mediante un equipo multiparamétrico. **Resultados.** Se destaca el comportamiento obtenido de la SOD en la estación Puente Autopista con valores bajos que oscilaron entre 0.05 - 0.15 g O₂*m²/día, lo cual contrasta con variables ambientales como el oxígeno disuelto y porcentaje de saturación en ese mismo sector; resultados que también fueron muy bajos. Para las demás estaciones los valores oscilaron entre 0.09 - 0.25 g O₂*m²/día, demandas típicas de sedimentos con bajo contenido de material orgánico. **Conclusiones.** Se aprecia que los resultados de la SOD en esta investigación son bajos con respecto a estudios similares de carácter nacional e internacional. Adicionalmente, las variables ambientales como el pH, temperatura, conductividad, se mantuvieron en un rango de valores propios de corrientes de montaña.

Palabras clave: demanda de oxígeno por sedimentos (SOD), calidad del agua, sedimentos, parámetros físico-químicos.

1 Investigación realizada entre abril de 2014 y julio 2015 en cooperación con el Grupo de Investigación en Limnología y Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Oriente Rionegro, Antioquia y la Corporación Autónoma Regional de los ríos Negro y Nare CORNARE.

2 Ingeniero sanitario, M. Sc. Ingeniería, Grupo de Investigación en Limnología y Recursos Hídricos, docente asistente Universidad Católica de Oriente. Rionegro, Antioquia. E-mail: carlosbenju@gmail.com ORCID:0000-0002-3702-4300

3 Ingeniera ambiental. Grupo de Investigación en Limnología y Recursos Hídricos. Universidad Católica de Oriente. Rionegro, Antioquia. E-mail: geral9311@gmail.com ORCID: 0000-0001-6956-4734

ABSTRACT

Introduction. The main objective of this work was to determine the Sediment Oxygen Demand (SOD) in four different sections of the Rio Negro (Rionegro, Antioquia) during three climatic seasons in 2014 (dry and rainy seasons and a transition phase). **Materials and Methods.** The sediment samples were taken using an Ekman dredger. Analysis of moisture and organic matter content of the samples was performed later in the laboratory. The measurement of the benthic oxygen demand was made based on the Batch technique. Likewise, at each monitoring point, using a multiparameter sensor, the following environmental variables were measured: pH, conductivity, dissolved oxygen, saturation percentage and temperature. **Results.** It is worth highlighting the behavior of SOD in the Puente Autopista station, where low values of

this variable were obtained, ranging from 0.05 - 0.15 g O₂*m²/day. This contrasts with other environmental variables in the same station, such as dissolved oxygen and saturation percentage, whose results were also reported as very low. For the other stations the values ranged from 0.09 - 0.25 g O₂*m²/day, which are typical demands of sediments with low content of organic material. **Conclusions.** This study found that the results obtained for SOD measurement are low when compared to similar national and international-level studies. Additionally, other environmental variables such as pH, temperature and conductivity remained in the typical range of values for mountainous streams.

Keywords: sediment oxygen demand (SOD), water quality, sediments, physic-chemical parameters.

RESUMO

Introdução. Este trabalho teve como objetivo principal determinar a demanda de oxigênio por sedimentos (SOD, pelas suas siglas em inglês) em quatro diferentes partes do rio Negro (Rionegro, Antioquia) durante três épocas climáticas no ano 2014 (época seca, chuvosa e transição). **Materiais e métodos.** As tomas de amostra de sedimento se realizaram mediante draga Ekman, para sua posterior análise de umidade e conteúdo de matéria orgânica no laboratório. A medição da demanda inclinada se realizou com base na técnica do sistema Batch. De igual maneira, em cada ponto de monitoração se fez seguimento à variáveis pH, condutividade, oxigênio dissolvido, % saturação e temperatura mediante um equipamento multiparamétrico. **Resultados.** Se destaca o comportamento obtido da SOD na

estação Puente Autopista com valores baixos que oscilaram entre 0.05 - 0.15 g O₂*m²/dia, o qual contrasta com variáveis ambientais como o oxigênio dissolvido e porcentagem de saturação nesse mesmo setor, resultados que também foram muito baixos. Para as demais estações os valores oscilaram entre 0.09 - 0.25 g O₂*m²/dia, demandas típicas de sedimentos com baixo conteúdo de material orgânico. **Conclusões.** Se aprecia que os resultados da SOD nesta investigação são baixos com respeito a estudos similares de carácter nacional e internacional. Adicionalmente, as variáveis ambientais como o pH, temperatura, condutividade, se mantiveram em uma faixa de valores próprios de correntes da montanha.

Palavras clave: demanda de oxigênio por sedimentos (SOD), qualidade da água, sedimentos, parâmetros físico-químicos.

INTRODUCCIÓN

El oxígeno disuelto es una variable de vital importancia en el diagnóstico y control de la contaminación de los cuerpos de agua, debido a su alta sensibilidad en su concentración a la presencia de contaminantes de tipo orgánico o inorgánico, bien sea que estos se encuentren en forma disuelta o suspendida.

La calidad del agua en un cauce se ve altamente relacionada con el consumo de oxígeno disuelto debido a la descomposición de la materia orgánica y a los sedimentos presentes en el fondo de un río. La cantidad de oxígeno disuelto que es consumido por la oxidación de la materia orgánica y los sedimentos es también conocida como demanda béntica de oxígeno –SOD– (Cadwell y Doyle, 1995; Wood, 2001; Doyle y

Lynch, 2003). Este proceso juega un papel fundamental en la dinámica del agotamiento de oxígeno disuelto cuando se realiza el balance de oxígeno en una corriente (Caldwell, 1995; Chapra, 1997). La reducción severa del oxígeno por parte de los sedimentos significa un deterioro no solo en la calidad sino también en el hábitat de muchos organismos en los cuerpos de agua (Jaramillo, Largo y Villegas, 2008). El tema de la demanda de oxígeno por sedimentos (SOD) ha sido estudiado con poca rigurosidad en el mundo; sin embargo, algunos investigadores han podido encontrar relaciones directas con algunos problemas ambientales presentes en fuentes hídricas.

La SOD en un cuerpo de agua es dependiente de algunos factores que pueden influir en su comportamiento. De estos, los más representativos son: el oxígeno disuelto biodisponible en la columna de agua (Doyle y Rounds, 2003), el contenido de materia orgánica, la naturaleza y características físicas del sedimento, la temperatura del cuerpo de agua y la velocidad del agua en donde se encuentran expuestos los sedimentos acumulados en el fondo (Mateus, 2011).

En Colombia se han presentado varios estudios donde se determinó la demanda de oxígeno por sedimentos; en ellos se ha llevado a cabo un proceso de experimentación con el fin de determinar constantes bénticas en algunos ríos como el Cauca (Baena, Silva y Callejas, 2004.); el Río Pasto (López, Galindo y Romo, 2009,) el Río Bogotá (Mateus, 2011), y la quebrada La Vega en Antioquia (Grajales, Aguirre y Palacio-Baena, 2006); esto con el fin común de determinar la calidad del agua en cada sistema teniendo en cuenta el consumo de oxígeno por los sedimentos. Por su parte, para el oriente antioqueño, se encuentra el trabajo de investigación denominado “Determinación de la demanda de oxígeno por sedimentos en la quebrada La Pereira, La Ceja, Antioquia” (García y Villegas, 2008). Este trabajo presenta los resultados de las mediciones de SOD mediante la técnica Batch en laboratorio, realizadas en tres estaciones del tramo meándrico de la quebrada La Pereira, uno de los afluentes del río Negro, fuente hídrica objeto de la presente investigación.

El río Negro nace al sur del departamento de Antioquia, por el costado oriental de la Cordillera Central, a unos 3000 m. s. n. m. en el cerro Pantanillo en el municipio de El Retiro. En la cuenca del río Negro están asentados los municipios con mayor número de habitantes, así como gran parte del sector productivo, lo que genera un impacto directo en el

funcionamiento normal y en el equilibrio natural de este río (Cornare, 2014), considerado una fuente de abastecimiento importante para el municipio del mismo nombre. Las corrientes de esta cuenca se han visto afectadas por el cambio del uso del suelo en los últimos años debido principalmente al crecimiento de la población, la industrialización y el crecimiento acelerado de la zona urbanizada, lo que conlleva una mayor intervención sobre las fuentes superficiales, asociada a un mayor aporte en los sedimentos y, por ende, a una mayor influencia de la demanda béntica en términos de la calidad fisicoquímica del agua en el río.

En su recorrido el río Negro recibe la contaminación de aguas residuales domésticas e industriales de unos centros poblados con crecimiento acelerado en los últimos años, contaminación que se asienta en las subcuencas afluentes de manera marcada y en el tramo medio bajo de su recorrido; esta carga contaminante puede afectar la disponibilidad de oxígeno disuelto en la corriente, el cual es indispensable para el sostenimiento de la vida acuática. Teniendo en cuenta lo anterior, se podría esperar que la calidad del agua del río Negro esté relacionada con el consumo de oxígeno por parte de sedimentos en varias zonas de la cuenca en la parte alta y media del río, y dicho consumo es afín con algunos parámetros físico-químicos (pH, conductividad, SDT, % saturación, temperatura, OD, DBO₅, entre otros).

Para el río Negro no se encuentran reportes específicos de estudios asociados a la demanda béntica, lo cual genera un vacío de información y entendimiento en este aspecto, más aún, cuando se consideran las características particulares de esta corriente al tratarse de un río de montaña con influencias agrícolas, urbanas e industriales. El propósito de este artículo es presentar los resultados de las mediciones de SOD y de algunas variables fisicoquímicas asociadas, en 4 estaciones del río Negro (municipio de Rionegro).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se definieron cuatro estaciones de monitorización a lo largo del río Negro, las cuales se encuentran ubicadas entre los municipios de El Retiro, Rionegro, y Rionegro en límites con el municipio de Marinilla. La definición de estos sitios se basó en información analizada de las diferentes campañas de monitorización y control realizadas por la Corporación Autónoma de las Cuencas de los ríos Negro y Nare «CORNARE”, y lo propuesto por Castrillón *et al.* en 2006. Dentro de

los criterios primordiales, se encuentran la confluencia de tributarios principales y el grado de intervención debido a asentamientos poblacionales e industriales.

La tabla I presenta la descripción de los puntos de monitorización y su respectiva nomenclatura:

Tabla I. Descripción estaciones de monitorización

Estación	Nombre	Descripción	Ubicación
E1	Montenevado	Kilómetro 5, jurisdicción del Municipio de El Retiro.	
E2	Charcomanso	Kilómetro 14, sector de Llano grande, municipio de Rionegro, material de fondo aparentemente mineralizado.	
E3	Casa Mía	Kilómetro 25, municipio de Rionegro. Aportes de la Q. La Pereira	
E4	Puente Autopista	Jurisdicción de los municipios de Rionegro y Marinilla. Recoge las descargas de las empresas circundantes.	

Fuente: mapa de ubicación, autoría propia.

Se realizaron tres campañas de muestreo, durante períodos climáticos contrastantes en el año 2014: el primer período, de sequías y aguas bajas, correspondiente al mes de abril (fecha de monitorización 7 de abril); el segundo período, con altas precipitaciones, correspondiente al mes de mayo (fecha de monitorización 19 de mayo); el tercero y último período, de transición, con días representativos de sequías y lluvias, correspondiente al mes de septiembre (fecha de monitorización 19 de septiembre).

En cada estación se tomaron 3 muestras de sedimento de fondo con una draga Ekman, se almacenaron en bolsas resellables debidamente rotuladas dentro de bolsas de polietileno oscuras y se preservaron a bajas temperaturas hasta llegar al laboratorio

En el laboratorio se realizaron los análisis de caracterización fisicoquímica del sedimento de cada estación, siguiendo las metodologías estandarizadas

de la Norma ASTM (American Society for Testing Material) para ensayos como el contenido de humedad y la cantidad de materia orgánica.

En cada estación se tomaron, además, muestras subsuperficiales (10 cm debajo de la superficie) de la columna de agua; estas fueron colectadas y almacenadas en recipientes plásticos debidamente rotulados y preservados; en una nevera con hielo, se garantizó la preservación para posteriormente ser analizadas en el laboratorio de acuerdo con los procedimientos descritos en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, (ed. 22, 2012) en lo concerniente a la demanda biológica de oxígeno (DBO).

Variables fisicoquímicas del agua *in situ*

Para la determinación de las variables *in situ*: pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad, sólidos

disueltos totales, % saturación, turbidez, potencial redox y temperatura; se utilizaron sondas multi paramétricas HACH HQ40d, las cuales fueron calibradas previamente antes de cada monitorización.

La tabla 2 presenta las principales características y principios de medición de las sondas utilizadas para la cuantificación de las variables *in situ*.

Tabla 2. Principio de medición y características del equipo. Parámetros *in situ*

Parámetro	Metodología	Características
pH	Potenciométrica	Intervalo de pH de 2 a 14 unidades Pendiente -59 mV/pH (90 a 110 % a 25 °C) por valor teórico nernstiano
Conductividad	Conectividad de 4 polos de grafito	Margen de conductividad 0,01 mS/cm a 200,0 mS/cm Constante de celda 0,40 cm-1 ± 10 %
Oxígeno disuelto	Oxígeno disuelto luminiscente (LDO)	Intervalo de oxígeno disuelto 0,1 a 20 mg/L (ppm) Precisión del oxígeno disuelto ± 0,1 mg/L para 0 a 8 mg/L ± 0,2 mg/L para más de 8 mg/L
Porcentaje de saturación de O ₂	Oxígeno disuelto luminiscente (LDO)	1 a 200 % de saturación resolución del % de saturación 0,1 %
Temperatura del agua	Sensor de temperatura	Rango de temperatura de funcionamiento 0 a 50 °C (32 a 122 °F) Precisión de temperaturas ± 0,3 °C (± 0,54 °F)

Fuente: autoría propia.

Medición de la demanda de oxígeno por sedimentos en laboratorio

La medición se realizó con base en la técnica del sistema Batch. Esta metodología consiste en medir el consumo de oxígeno ejercido por los sedimentos depositados en el fondo de un reactor hermético sobre el medio sobrenadante (Murphy y Hicks, 1996).

El reactor Batch consiste de un recipiente de vidrio, con un volumen (V) de 3.1 litros y un área nominal de sedimento (A) de 0.0201 m²; estas dimensiones del reactor son importantes para garantizar la eficiencia y consistencia del experimento.

En el recipiente se deposita una capa de sedimento, extraída de las bolsas del muestreo en campo, tratando de alterar en lo más mínimo las muestras; estas se encuentran en condiciones de temperaturas bajas con el fin de conservarlas frescas para facilitar su manipulación. La capa de sedimento en el recipiente debe ser entre 5 a 6 centímetros de espesor, tratando de garantizar que se generen todos los procesos de consumo de oxígeno por parte del sedimento, y a las mismas tasas (Baena *et al.*, 2004).

El agua a utilizar en los ensayos es agua destilada, aireada mecánicamente por difusión para lograr niveles de oxígeno disuelto cercanos a la saturación, es decir, superiores a 7 mg/L en todos los ensayos. Al momento de introducir el sedimento en el fondo se tuvo la precaución para no alterar sus condiciones; posteriormente se llenó cuidadosamente el reactor con el agua antes mencionada, evitando, en la medida de lo posible, resuspensión de sedimentos; finalmente, se selló el reactor batch y se cubrió con una bolsa oscura para disminuir la incidencia de luz que puede inducir posibles errores experimentales en las mediciones.

La recirculación del agua en el sistema se realizó mediante una bomba que hace pasar el agua al tubo intercambiador, para luego retornar al reactor batch. La bomba se opera de 150 a 200 mL/min, aproximadamente, lo que garantizará una mezcla completa del agua en el sistema a los 30 segundos, sin presentarse resuspensión de sedimento (García y Villegas, 2008).

Para la medición del abatimiento de la concentración del oxígeno disuelto, se recirculó el agua por un

tubo de acrílico, al que se conecta una sonda la cual mide la concentración de oxígeno disuelto en el agua (oxímetro). Esta se conecta a la terminal donde se registran los niveles en el monitor; estos equipos pertenecen al sistema de medición multiparamétrico HACH HQ40d, el cual se describe en la tabla 2.

Se recomienda determinar la SOD a una temperatura de referencia y luego ajustarla a las condiciones locales por medio de la ecuación 1 (Thomann y Mueller, 1987; Salazar, 1984; Bowie *et al.*, 1985; Romero, 1999):

$$\text{Ecuación 1: } SOD_{20} = \frac{SOD_T}{\theta^{T-20}}$$

Donde:

SOD_{20} : Demanda de oxígeno por sedimentos en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ a 20°C .

SOD_T : Demanda de oxígeno por sedimentos en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ a una temperatura promedio medida a través del tiempo en el laboratorio o en el campo.

T: temperatura promedio en el tiempo en grados Celsius ($^\circ\text{C}$)

θ : Coeficiente de corrección por temperatura.

La SOD es calculada a través de la gráfica de concentración de oxígeno disuelto en el recipiente utilizado versus tiempo; la tasa de consumo de oxígeno disuelto por parte de los sedimentos es calculada mediante una regresión lineal, a través de la ecuación 2:

$$\text{Ecuación 2: } SOD_T = K \frac{V}{A} (-b)$$

Donde:

SOD_T : demanda de oxígeno por sedimentos medida en $(\text{gO}_2\cdot\text{m}^2\cdot\text{día}^{-1})$ a temperatura del agua en el ensayo
b: la pendiente de la gráfica consumo de oxígeno Vs. Tiempo en $(\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$

V: volumen de agua almacenado en el recipiente de medida en litros

A: área superficial que cubre el recipiente o la cual está expuesta al agua sobrenadante sobre el sedimento en metros cuadrados

K: factor de conversión de unidades

En el proceso de la determinación del SOD, a la concentración de oxígeno se le hace seguimiento en periodos entre 4 y 24 horas (Nolan, 1979). Para efectos de esta investigación se realizaron monitorizaciones de la demanda béntica en periodos de 6 horas. Estos periodos de tiempo son soportados también en otros estudios (Caldwell, 1995; Hu *et al.*, 2001; US EPA, 2001; Chau, 2002).

Para los análisis estadísticos se usó el programa Rwizard. Los análisis incluyen: un ANOVA tipo III teniendo en cuenta dos factores (estación y época); con respecto a la variable SOD, el diseño es multifactorial de factores multinivel 3×4 (épocas X estaciones); se analizaron los diagramas de cajas y se determinó la significancia de los factores sobre la variable a analizar. Adicionalmente, se realizó un análisis discriminante canónico generalizado relacionando las estaciones y las épocas climáticas con las variables ambientales estudiadas. Las variables más significativas fueron retenidas en el análisis en los primeros ejes, de acuerdo con sus contribuciones para explicar la variación total. De esta manera, se obtuvieron las valoraciones y los vectores canónicos de la matriz de variables ambientales y su relación con los sitios de muestreo y las épocas climáticas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros *in situ*

Se determinaron diferentes variables ambientales en campo durante las campañas de monitorización. Estos parámetros indican la calidad ambiental del sistema acuático en los diferentes puntos estudiados para las fechas específicas del trabajo en campo. La tabla 3 presenta los resultados obtenidos para cada una de estas variables durante este proceso. Se muestran los resultados de las estaciones monitorizadas y analizadas para cada una de las épocas climáticas (época seca, lluviosa y época de transición) en los meses de abril, mayo y septiembre del 2014, respectivamente:

Tabla 3. Resultados de parámetros fisicoquímicos *in situ*

Estación	Época	OD (mg/L)	Saturación (%)	Temperatura (°C)	pH (und. pH)	Conductividad (uS/cm)	SDT (mg/L)	Turbidez (UNT)
Montenevado	Seca	7.28	98.5	17.6	7.31	124.7	18.2	9.18
Montenevado	Lluvia	7.43	100	17.6	7.07	69.5	36.9	3.1
Montenevado	Transición	7.63	98.1	15.3	7.3	63.3	35.5	23.3
Charco Manso	Seca	8.03	112.3	19.5	7.18	46.9	24.8	3.38
Charco Manso	Lluvia	6.52	95	20.2	6.72	56.3	29	5.4
Charco Manso	Transición	6.54	92.7	20.1	6.89	71	37.5	3.85
Casa Mía	Seca	5.74	86.05	21	7.14	69	34.6	6.68
Casa Mía	Lluvia	6.13	87.6	20.3	6.77	57.6	29.8	20.7
Casa Mía	Transición	5.83	83.1	20.5	7.25	64.5	33.6	3.65
Puente Autopista	Seca	2.05	30.3	22	8.46	170.3	86.1	133
Puente Autopista	Lluvia	4.47	63.2	20.5	7.61	101.4	52.1	73.2
Puente Autopista	Transición	4.06	56.9	19.7	7.18	104.4	55.2	103

Fuente: autoría propia.

En general, los resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos con respecto a las épocas climáticas (seca, lluviosa y transición) presentaron tendencias similares en el tiempo; parámetros como el OD y el % saturación presentaron altos valores, mientras que para la DBO₅ los valores son bajos para todas las estaciones; sin embargo, para Montenevado y Charco Manso, las cuales fueron las estaciones más representativas durante todos los muestreos debido a su alta disponibilidad de este gas, los valores oscilaron entre 6.52-7.53 mg/L para OD; 92.7 %-112.3 %, para el % de saturación, y 4.77-6.57 mg/L DBO₅ en las diferentes épocas climáticas, lo que refleja bajas concentraciones de materia orgánica en el ecosistema acuático. Se observa, además, que para estas estaciones la época lluviosa presenta los valores más bajos de dichos parámetros, mientras que para la época de transición se evidencian aumentos mínimos en estos puntos de monitorización.

La estación Puente Autopista, en las diferentes épocas, presenta los niveles más bajos de OD, % Sat y DBO₅, niveles que contrastan con las mínimas concentraciones de DBO₅. Estos resultados se relacionan directamente con el material que es vertido al río en este sector por industrias aledañas y por las aguas servidas municipales; los bajos niveles de DBO₅ indican niveles bajos de materia orgánica en

el agua susceptible a ser degradada. En la época seca se presentó el valor más bajo de OD en esta estación; en términos generales el OD presentó un rango de valores entre 2.05-4.47 mg/L; 30.3 %-63.2 %, para % Saturación, y entre 1.12-5.03 mg/L para DBO₅.

Resultados similares fueron reportados por Benjumea (2013) donde se obtuvieron valores máximos de DBO₅ 6.08 mg/L para la estación de Puente Autopista, valores ligados a las épocas climáticas y con relación a las diferencias de caudales en las épocas seca, lluviosa y de transición.

Otros estudios para corrientes de montaña son los reportados por García y Villegas (2008) para la quebrada La Pereira (afluente del río Negro), en la cual se obtuvieron resultados similares a los encontrados durante 2014; los promedios de las concentraciones históricas para la DBO₅ fueron de 9.78; 7.49 y 4.69 mg/L, para las estaciones aguas arriba PTAR, Pontezuela y Puente entrada Quirama, respectivamente. Estos resultados reflejan que, aunque estos cuerpos de agua son influenciados por vertimientos líquidos, tienen una buena capacidad de autodepuración y asimilación, favorecida por la baja temperatura y procesos de reaeración propios de ríos de montaña (Benjumea, 2013).

La temperatura no presentó valores extremos en los muestreos realizados; los valores oscilaron entre 15-21 °C, para todos los puntos monitorizados, siendo la mínima temperatura en la época de transición y la máxima en época seca; los resultados obtenidos son datos típicos de corrientes de alta montaña, y están totalmente relacionadas con la hora del día en que se tomaron las muestras; estos resultados pueden compararse con estudios realizados en la misma cuenca durante épocas y años anteriores, donde las temperaturas presentan valores muy similares (Benjumea, 2013; Castrillón y Wills, 2006; García y Villegas, 2008; Jaramillo, Largo y Villegas, 2008; Montoya, Acosta, y Zuluaga, 2011).

El pH se mantuvo con tendencia a la neutralidad-basicidad con valores que oscilan entre 6.6 y 8.49 unidades de pH, presentándose el menor valor en la época de transición y el mayor valor en la época seca; la estación de Puente Autopista es la que presenta niveles más altos de este parámetro, posiblemente causados por los tipos de vertimientos cercanos de tipo industrial y doméstico que alteran las condiciones normales del cuerpo de agua; dichos valores son similares a estudios realizados en Colombia para el río Bogotá donde se tienen valores entre 5.72 y 8.16 unidades de pH (Mateus, 2011); datos similares para el río Negro han sido reportados por la autoridad ambiental (Cornare) para estas zonas de medición.

En cuanto a conductividad y sólidos disueltos totales (SDT) presentaron altos valores principalmente en la estación de Puente Autopista para todas las épocas climáticas (seca, lluviosa y transición); esta estación se encuentra ubicada aguas abajo en la cuenca del río Negro, y es una zona con altas intervenciones antrópicas evidenciadas en las descargas por parte de las empresas aledañas al punto de monitorización; esta presentó valores que oscilaron entre 101.4 y 170.3 uS/cm para la conductividad, y de 52.1 y 86.1 mg/L de SDT, valores que son más altos en la época seca lo que implica menor dilución de sales y solutos presentes en el cuerpo de agua; asimismo, la estación que presentó los valores más bajos de estos parámetros fue Charco Manso, estación ubicada en la parte alta de la cuenca del río Negro con variaciones entre 46.9 y 71 uS/cm para la conductividad y 24.8 y 37.5 mg/L de SDT; ello indica que el material disuelto en esta estación es bajo.

Resultados similares fueron reportados por Mateus (2011) en estudio desarrollado en 5 estaciones en la cuenca alta del río Bogotá, donde los valores de conductividad oscilaron entre 82-576 uS/cm, datos que son característicos para ríos con intervenciones antrópicas altas. Otros estudios reportados para el río Negro (Montoya *et al.*, 2011; Benjumea, 2013), evidenciaron que en el sector de la estación Puente Autopista, se registraron valores altos para esta variable durante los periodos de estudio; asimismo se concluye que estos valores se relacionan con la ubicación y con los vertimientos presentados en este punto.

El parámetro fisicoquímico de turbidez está directamente relacionado con los sólidos suspendidos totales (SST) que determinan, en gran magnitud, la turbidez y capacidad de absorción de rayos lumínicos y, por ende, la actividad fotosintética del sistema; se evidencian los valores más altos para Puente Autopista con valores entre 73.2-133 UNT, valores que se ven alterados por la re suspensión de los sedimentos o material de fondo y por los vertimientos (descargas) presentes en esta estación; asimismo, los valores más bajos se presentaron en Charco Manso entre 3.38 y 5.4 UNT, estación con material de fondo mineralizado (rocas y arenas). La estación de Montenevado fue la segunda estación con mayor turbidez en las épocas seca y de transición, con valores entre 9.18 y 23.3 UNT, mientras que la estación Casa Mía presentó niveles bajos en dichas épocas, pero un aumento importante en la época lluviosa con valores entre 3.65 y 20.7 UNT; esto se debió a la resuspensión del material de fondo en el punto de monitorización o a posibles descargas arrastradas por la quebrada La Pereira que es una fuente hídrica que genera diluciones y transporte importante en este punto.

Resultados equivalentes se evidencian en estudios sobre la quebrada La Pereira (afluente al río Negro) por Jaramillo, Largo, y Villegas (2008) donde se presentan valores similares, con pequeñas diferencias asociadas principalmente a la época climática y a los sitios de monitorización, además de las actividades antrópicas en mayor proporción en el río Negro.

En la figura 1 se observan los porcentajes de materia orgánica y de humedad, respectivamente, a lo largo de las monitorizaciones en las diferentes épocas y estaciones:

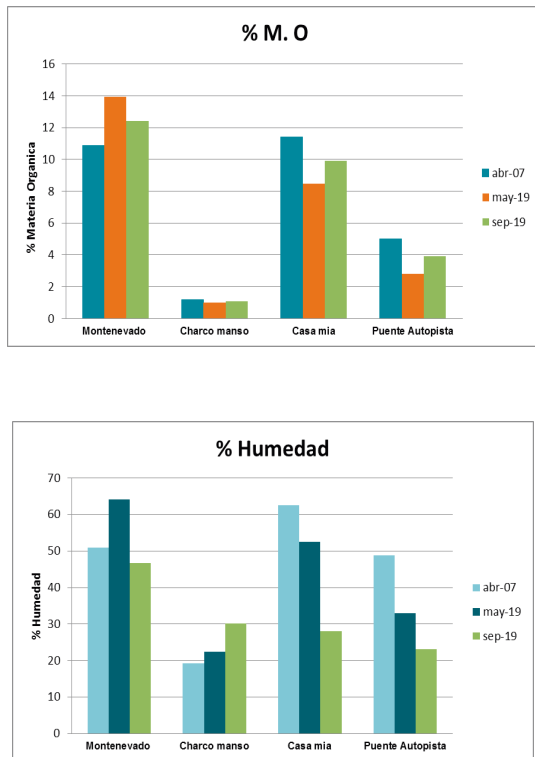


Figura 1. % MO y % humedad en las diferentes épocas y estaciones monitorizadas
Fuente: autoría propia.

Se observa que la estación con mayor porcentaje de materia orgánica (MO) es Montenevado; este valor es más alto en la época lluviosa con 13.95 %; la siguiente estación con mayor contenido de MO es Casa Mía en la época seca con 11.39 %; las estaciones con menor porcentaje de MO fueron Charco Manso y Puente Autopista; de ellas, Charco Manso es la que presenta los valores más bajos entre 1.01 y 1.16 %, valores que indican que el material de fondo o sedimento tiene tendencia a la mineralización. Para la estación de Puente Autopista se presentan valores entre 2.81 y 5.01 %, muy relacionados con las actividades e intervenciones antrópicas presentes en este punto (vertimientos).

Se evidencia que las estaciones con mayor contenido de humedad son Montenevado, Casa Mía y Puente Autopista, con valores más altos en la época lluviosa, y menores en la época de transición. Para Charco Manso los valores obtenidos fueron menores debido a que el sedimento presenta características de grava fina a gruesa, lo que implica menor retención de agua por parte de estos.

En la tabla 4 se muestran los valores de SOD (demanda de oxígeno por sedimentos) para cada una de las estaciones y épocas monitorizadas:

Tabla 4. Valores de la SOD en los puntos de monitorización

Estaciones	SOD época seca (abril 7)	SOD época lluvia (mayo 19)	SOD época transición (septiembre 19)
	(g*m ² /día)	(g*m ² /día)	(g*m ² /día)
Montenevado	0.24	0.17	0.23
Charco Manso	0.16	0.09	0.15
Casa Mía	0.25	0.18	0.17
Puente Autopista	0.05	0.07	0.15

Fuente: autoría propia

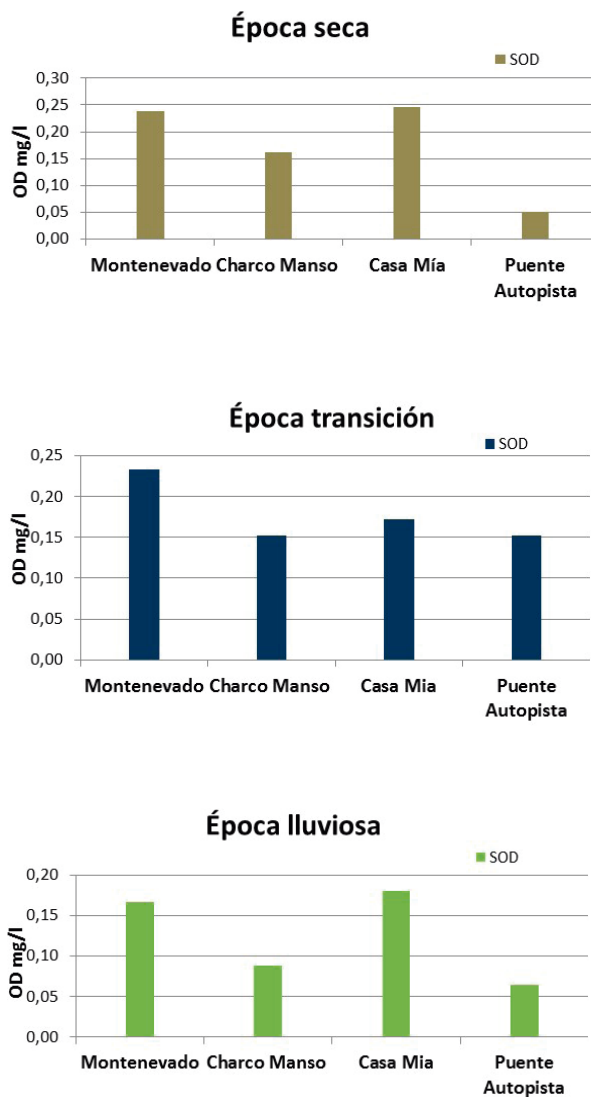


Figura 2. SOD en las diferentes estaciones y épocas monitorizadas

Fuente: autoría propia

En la figura 2 se observan los resultados para la SOD a lo largo de las monitorizaciones en las diferentes épocas y estaciones:

En cuanto a la demanda de oxígeno por sedimentos (SOD) se encontró que la estación que presenta los resultados más elevados es Montenevado con valores entre 0.17 y 0.24 g O₂*m²/día, siendo el mayor en la época seca y el menor en la época de lluvias; esta estación presenta altas cantidades de materia orgánica en los sedimentos analizados, tal como se

evidencia en la figura 2, elemento que determina una alta demanda de oxígeno en los sistemas hídricos (Mateus, 2011; García y Villegas, 2008; López et al., 2009); otra estación que presenta altos valores es Casa Mía con datos que oscilan entre 0.17 y 0.25 g O₂*m²/día siendo el menor valor en época de transición y el mayor en época seca. Como se observa en la figura 2 esta estación presenta valores altos de materia orgánica, hecho que se asocia al ingreso de una fuente hídrica importante, quebrada La Pereira, la cual es un afluente del río Negro y que recoge las

aguas residuales domésticas del municipio de La Ceja. No obstante, lo encontrado en esta investigación está por debajo de lo obtenido por García y Villegas (2008) en tres puntos de monitorización diferentes sobre la quebrada La Pereira donde se encontraron valores de la demanda bental en un rango entre 1.0 a 2.52 g O₂*m²/día.

Por otro lado, la estación Puente Autopista presentó los valores más bajos de SOD, los cuales se encontraron entre 0.05 y 0.15 g O₂*m²/día; estos resultados indican que el tipo de sedimento de esta estación tiene concentraciones reducidas de materia orgánica, lo cual se evidencia en la figura 2 donde se constatan estos bajos porcentajes en este punto de monitorización. Es importante resaltar que esta estación presenta intervenciones antrópicas relevantes en cuanto a vertimientos por actividades industriales y asentamientos poblacionales, entre las que se destaca el ingreso de las aguas residuales domésticas del municipio de Rionegro a 500 metros aguas arriba del sitio monitorizado en esta investigación. Los resultados de SOD contrastan ampliamente con la baja disponibilidad de oxígeno disuelto y la baja DBO₅, tal como se observa en la tabla 3, lo cual sugiere otro tipo de agente tensor como el responsable del consumo de este gas. Los valores encontrados para este punto de monitorización presentan una amplia diferencia con investigaciones similares; tal es el caso de la demanda béntica registrada en la cuenca alta del río Bogotá en el sitio denominado “aguas debajo de la PTAR Chocontá”, donde se registraron valores entre 0.9 y 2.24 g O₂*m²/día, sitio de monitorización con características similares en cuanto a la presencia de aguas residuales domésticas (Mateus, 2011).

Finalmente, para la estación de Charco Manso se presentaron también valores bajos entre 0.09 y 0.16 g O₂*m²/día; cabe resaltar que en esta estación el material de fondo (sedimento) es evidentemente mineralizado con presencia de rocas y arenas, lo que impide una alta demanda de oxígeno por parte de estos; se evidenció que el comportamiento de dichas estaciones es constante en las diferentes épocas climáticas.

La SOD está relacionada con parámetros como oxígeno disuelto y DBO₅; se evidencia que en las estaciones donde la DBO₅ es más baja (Montenevado y Charco Manso) la SOD es mayor; esto significa que el material orgánico no es el que demanda mayor oxígeno; sin embargo, la cantidad de OD es alta para las dos estaciones por lo que presenta

buenas condiciones para el sistema. Se puede analizar también que la estación Puente Autopista presenta bajas demandas por parte de los sedimentos y por parte del material biológico, lo que puede relacionarse con las actividades que se realizan en este punto; es recomendable, entonces, tener en cuenta la DQO o material inorgánico que puede estar demandando la mayor cantidad de oxígeno dentro del río en esta estación.

Resultados de estudios similares fueron reportados por Bowman y Delfino (1980) en corrientes hídricas en Wisconsin, USA, con valores promedio de laboratorio entre 0.21 y 1.5 g O₂*m²/día, valores semejantes a los encontrados en este proyecto; asimismo, los datos reportados por Veenstra y Nolen (1991) en sistemas hídricos de Tulsa, USA, con valores entre 1.49 y 4.08 g O₂*m²/día evidencian que los valores en estos sistemas (lagos) son más altos debido a la ausencia de corriente que recorra distancias específicas, lo que incrementa la capacidad de auto-depurarse y de permanecer con niveles altos de oxígeno.

Otros estudios en el país fueron reportados por Baena, Silva y Callejas (2004) en el río Cauca donde se encontraron valores entre 0. g O₂*m²/día, en la zona de menor afectación, hasta 15.5 g O₂*m²/día en la zona crítica del río (estación Mediacaño). Adicionalmente, López *et al.* (2009) evidencian resultados para invierno entre 0.360 y 1.038 g O₂*m²/día, y en verano en un rango 0.293 y 0.756 g O₂*m²/día; García y Villegas (2008), para la estación Aguas arriba PTAR con un valor de 2,63 g O₂*m²/día, seguido por el valor promedio de la estación Pontezuela de 1,41 g O₂*m²/día y, por último, la estación Puente entrada Quirama, con valor promedio de 1,31 g O₂*m²/día. Estos valores son mayores a los resultados obtenidos en este proyecto, lo que indica que el material de fondo en las estaciones analizadas sobre el río Negro presenta baja carga orgánica susceptible de ser oxidada por vía aerobia; no obstante, el grado de intervención antrópica en la zona de estudio se evidencia con claridad.

La prueba de ANOVA (figura 3) se elaboró teniendo en cuenta los factores estación y época; dichos factores permitieron identificar las diferencias significativas de cada uno con la SOD. Los resultados obtenidos de pruebas de normalidad Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov presentan valores de p=0.8699 y p=0.9009, respectivamente; dichos resultados se ajustan a una distribución normal (p>0.05) para los factores mencionados. Con respecto a la variable

SOD, el valor de r fue de aproximadamente $r^2= 80\%$, lo que indica un porcentaje alto de confiabilidad de dicha prueba.

En la figura 3 se observa que, con respecto a las diferentes épocas de monitorización, la demanda béntica presenta baja variabilidad en los resultados. En cuanto a la época seca (época 1) se evidencia mayor amplitud, y rango mayor de los resultados con respecto a la época lluviosa (época 2) donde se observa un rango menor de los valores de SOD. Estos resultados se pueden asociar con la deposición y lavado de los sedimentos producto del aumento de caudal en las diferentes épocas climáticas. Finalmente, se observa que para las diferentes épocas no existen diferencias significativas teniendo en cuenta que el valor de $p<0.05$ indica que la época no incide en la demanda de oxígeno por sedimentos.

Para el caso de los puntos de monitorización (figura 3) se observa que la estación Casa Mía (3) presenta valores de SOD más dispersos y, por ende, mayor

desviación (0.17 a 0.25 g O₂*m²/día); la estación Charco Manso (2) presenta valores más ajustados y mayor amplitud (0.09 a 0.16 g O₂*m²/día). En cuanto a la estación Puente Autopista (4) se presentan valores atípicos y baja amplitud en los resultados (0.05 a 0.15 g O₂*m²/día), y finalmente, en la estación Montenevado (1) se observa también que la demanda de oxígeno por parte de los sedimentos es mayor que en las demás estaciones (0.17 a 0.24 g O₂*m²/día).

Finalmente se observa que los resultados obtenidos no presentan diferencias significativas entre las estaciones 1, 2 y 3; sin embargo, para la estación 4 sí existen diferencias significativas siendo $p<0.05$, y se concluye que esta estación presenta los menores resultados en cuanto a la demanda de oxígeno por sedimentos, lo cual contrasta ampliamente con las características circundantes de este punto de monitorización (influencia de aguas residuales), tal como se discutió con anterioridad. Sin embargo, es la estación que registra menores concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua durante toda la investigación.

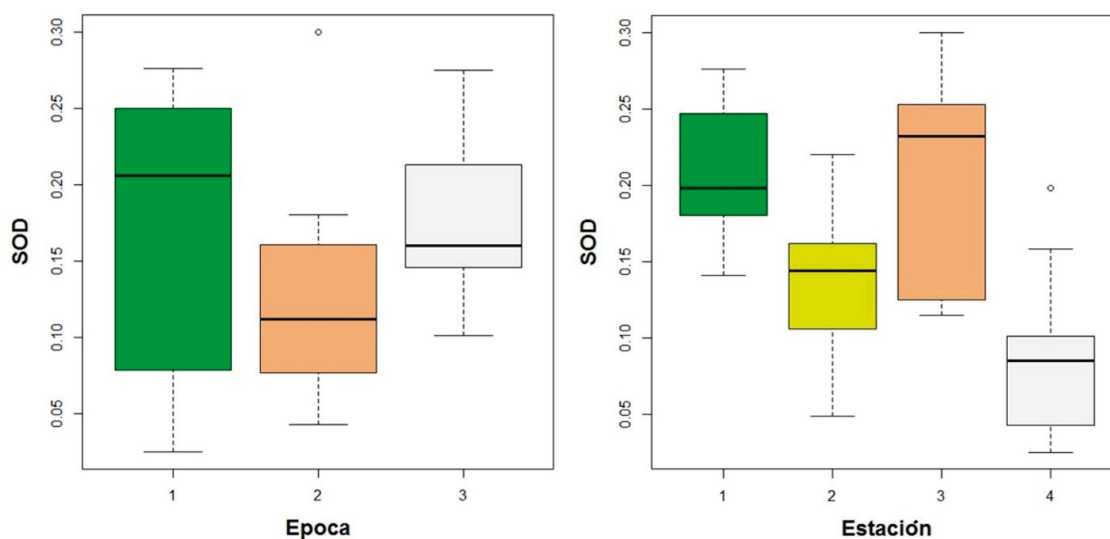


Figura 3. Diagrama de cajas para las diferentes épocas climáticas monitorizadas (1: época seca, 2: época lluviosa, 3: época transición) y las diferentes estaciones 1: Montenevado, 2: Charco Manso, 3: Casa Mía, 4: Puente Autopista) con respecto a la demanda de oxígeno por sedimentos

Fuente: autoría propia.

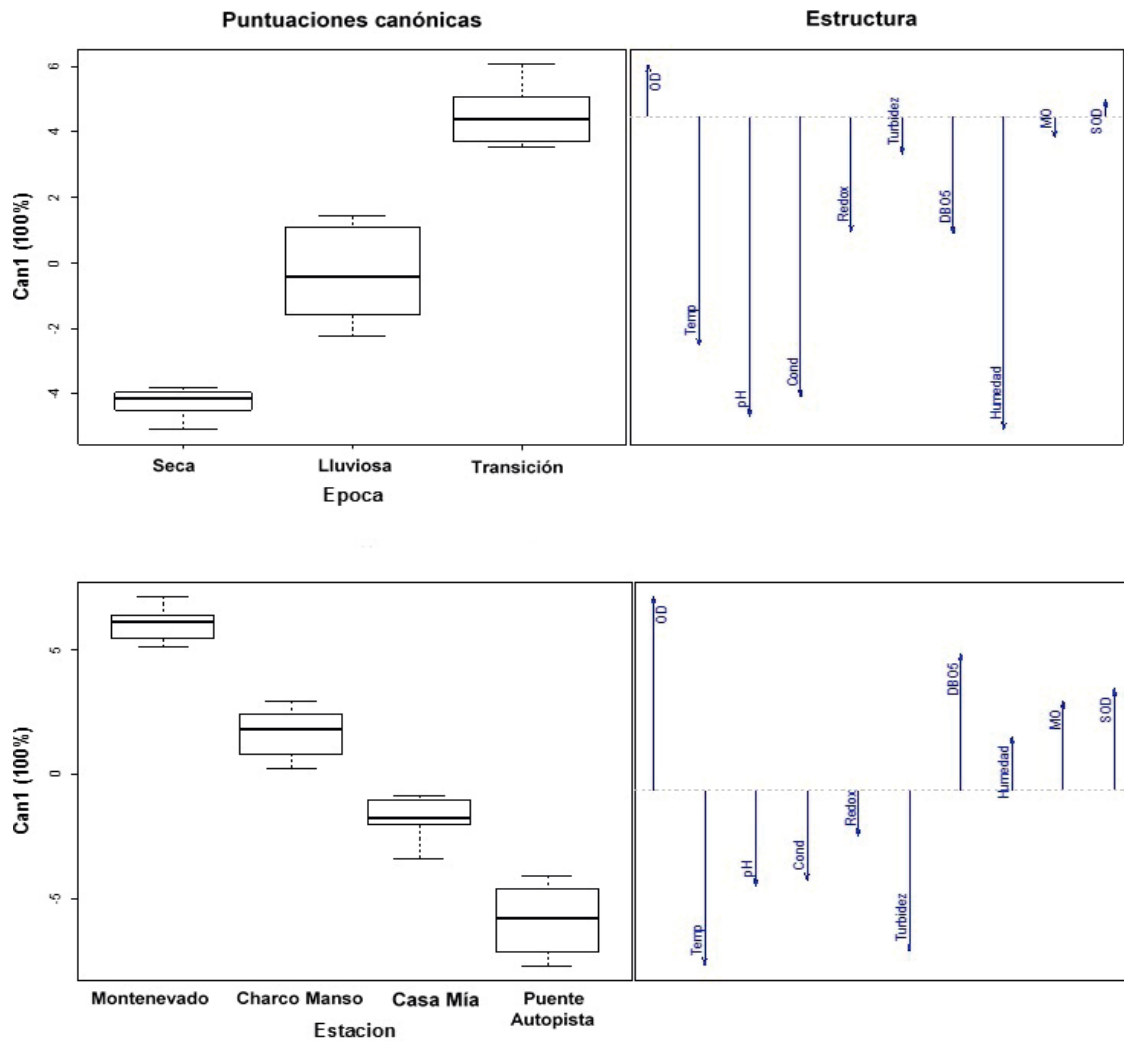


Figura 4. Análisis canónico discriminante de las diferentes variables para los factores época y estación

Fuente: autoría propia.

En la figura 4 podemos apreciar el análisis canónico discriminante entre los factores época y estación, utilizando las variables ambientales y el SOD; este mostró variaciones entre los diferentes puntos de monitorización y las épocas climáticas analizadas, separando claramente las estaciones en dirección del flujo hídrico y los periodos hidrológicos. La figura 4 presenta en forma más detallada los resultados de la discriminación obtenida para los factores descritos con anterioridad. El modelo del análisis discriminante logró explicar el 100 % de la variabilidad por época climática y por estación en el primer eje canónico.

Adicionalmente, los casos correctamente validados y la validación cruzada fueron iguales al 100 %.

Claramente se observa cómo para la época seca las variables ambientales como pH, conductividad y temperatura ejercen una mayor influencia en la discriminación de los datos; esto se relaciona con una mayor concentración de iones en solución debido al aumento de temperatura y menor flujo volumétrico de agua en la cuenca. Esto sucede particularmente en la estación Puente Autopista, donde se presentaron los mayores valores para estas variables ambientales,

en la época seca, tal y como se observa en la tabla N.º 3; adicionalmente, la ubicación del punto de monitorización en cuestión también favorece el incremento de los valores de estas variables ambientales, pues este sitio se encuentra ubicado en la cuenca media del río Negro, influenciado por los vertimientos domésticos e industriales que elevan los valores tanto de pH como de conductividad.

Para el análisis discriminante por estación, es evidente cómo los puntos de monitorización se ubican en el sentido del flujo del río Negro, logrando separar las estaciones Montenevado y Charco Manso de los sitios Casa Mía y Puente Autopista. Se destaca que para este primer grupo, variables como el OD ejercen una mayor influencia debido a las altas concentraciones registradas de este gas con valores que oscilaron entre 6.52 y 8.03 mg/L, valores que son característicos de zonas con buena calidad del agua (Roldán, 1992; Ramírez y Viña, 1998). En cuanto al segundo grupo obtenido se observa cómo la turbiedad y la temperatura ejercen una mayor influencia en estos puntos de monitorización, lo cual se asocia con la posición geográfica en la cuenca, pues al encontrarse aguas debajo de las dos primeras estaciones el aumento de la turbiedad es coherente y se relaciona con un mayor aumento de descargas puntuales y difusas producto de un mayor asentamiento poblacional e industrial en las riberas del río Negro. Las mayores turbiedades se registraron efectivamente en la estación denominada Puente Autopista con valores que oscilaron entre 73.2 y 133 UNT, valores característicos de aguas turbias con alta presencia de sólidos en suspensión (Ospina-Zúñiga, García-Cobas, Gordillo-Rivera, Tovar-Hernández, 2015). Históricamente este punto de monitorización se ha destacado por presentar una mala calidad del agua en términos de las variables ambientales medidas *in situ* y en laboratorio, tal y como lo reportan también Montoya *et al.* (2007); Cadavid, Echeverri y Gómez (2010); Montoya *et al.* (2011).

Finalmente se puede analizar que la SOD, variable de interés principal en esta investigación, no es un factor que determine una influencia marcada en términos de la calidad fisicoquímica del río Negro en los puntos de monitorización analizados en la cuenca alta y media de la corriente.

CONCLUSIONES

Mediante el análisis de la SOD y los parámetros fisicoquímicos determinados durante esta

investigación, se evidenció un cambio de la calidad del agua en el sentido del flujo del río Negro que presentó una mejor calidad en las estaciones ubicadas en la cuenca alta en comparación con las ubicadas en la cuenca media de la fuente hídrica en cuestión. En cuanto a los resultados obtenidos por la demanda béntica, estos evidenciaron claramente que los sedimentos no ejercen una influencia relevante en los procesos demandantes de oxígeno, tal y como se observó en la estación Puente Autopista, debido a que los valores encontrados de la SOD en las diferentes estaciones sobre el río Negro son relativamente bajos con respecto a valores encontrados en diferentes estudios regionales, nacionales e internacionales. Finalmente, se recomienda ampliar estudios tendientes a establecer y evaluar otros factores que afecten la calidad del recurso hídrico en cuanto a los balances y demandas de oxígeno disuelto, variable de gran importancia para el sostenimiento y calidad físico-biótica del ecosistema acuático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Grupo de Investigación de Limnología y Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Oriente, a la Corporación Autónoma Regional –Cornare– y al Semillero de Recursos Hídricos del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Oriente, por todo su apoyo durante las diferentes fases del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- American Public Health Association. (2012). *Standard methods for the examination of water and waste water*. 22st ed. American Public Health Association, Washington, DC. USA: APHA, AWWA, WEF.
- Baena, L. M., Silva, J. P., Callejas, C. (2004). Estudio experimental para la determinación de las constantes bénticas en el río Cauca. *Revista EIDENAR*, 1, 12-18.
- Benjumea, C.A. (2013). Determinación de coeficientes de degradación de materia orgánica en el río Negro. *En memorias XXXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Monterrey, México, AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales.

- Bowie, G. L., Mills, W. B., Porcella, D. B., Campbell, C. C., Pagenkopf, J. R., Rupp, G. L., Johnson, K. M., Chan, R. W. H., Gherini, S. A., Chamberlin, C. E. (1985). *Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling*. 2nd ed. Environment Research Laboratory, Environmental Protection Authority EPA / 600 / 3-85 /040.
- Bowman T. G., y Delfino J. J. (1980). Sediment oxygen demand techniques: a review and comparison of laboratory and in situ systems. *Water Research*, 14, 491-499.
- Caldwell J. M. and Doyle M. C. (1995). *Sediment Oxygen Demand in the Lower Willamette River, Oregon, 1994*. U.S. Geological survey Water-Resources Investigations Report 95-4196. Oregon, USA: University of Michigan Library.
- Cadavid, J. C., Echeverri, J. D. y Gómez, A. E. (2010). Modelación de índices de calidad de agua (ICA) en las cuencas de la región Cornare. *Gestión y Ambiente*, 13(2), 7-24.
- Castrillón, A. M. y Wills, A. (2006). *Modelación de la calidad del agua de la cuenca del río Negro a través del modelo de simulación QUAL 2E*. (Tesis de pregrado no publicada. Ingeniería sanitaria). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Chau, K. W. (2002). Field measurements of SOD and sediment nutrient fluxes and a land-locked embayment in Hong Kong. *Advances in Environmental Research*, 6, 135-142.
- Cornare. (2014). *Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los Ríos Negro y Nare*. Disponible en <http://www.cornare.gov.col/corporacion/division-socio-ambiental/cuencas>.
- Doyle, M. C. & Lynch, D. D. (2005). *Sediment Oxygen Demand in Lake Ewauna and the Klamath River, Oregon, June 2003*. Oregon, U.S.: Geological Survey Scientific Investigations Report, 2005-5228. 14 pp.
- Doyle, M. C., Rounds, S. A. (2003). *The effect of chamber mixing velocity on bias in measurement of sediment oxygen demand rates in the Tualatin River Basin*. Oregon: US. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4097, 16 pp.
- García, L. y Villegas, N. E. (2008). *Determinación de la Demanda de Oxígeno por Sedimentos en la Quebrada la Pereira, La Ceja, Antioquia*. (Tesis de pregrado no publicada. Ingeniería sanitaria). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Grajales, H.; Aguirre, N. J. y Palacio-Baena, J. A. (2006). Determinación de la demanda de oxígeno de la vegetación sumergida en la zona de represamiento de la quebrada La Vega (Antioquia). *Actualidades Biológicas*, 28(84), 75-85.
- Hu, W. F.; Lo, W.; Chua, H.; Sin, S. N.; Yu, P. H. (2001). Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong. *Environment International*, 26, 369-375.
- Jaramillo, A. M.; Largo, D. C. y Villegas, N. E. (2008). Condicionantes hidráulicos del proceso de reaeración. Caso: Quebrada La Pereira. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 18, 3-13.
- López, M. L.; Galindo, D. F. y Romo, G. D. (2009). Determinación de la constante de desoxigenación por demanda béntica en el río Pasto. *Criterios*, 23, 59-73.
- Mateus, G. S. (2011). *Determinación de la influencia de los factores hidrodinámicos y de calidad del agua en la demanda béntica de la cuenca alta del río Bogotá*. (Tesis de Maestría. Maestría en Ingeniería Ambiental). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Montoya, Y.; Acosta, Y. 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. *Caldasía*, 33(1), 193-210.
- Montoya, Y.; Acosta, Y.; Zuluaga, E. y García, A. (2007). Evaluación de la biodiversidad de insectos acuáticos y de calidad fisicoquímica y biológica del río Negro (Antioquia-Colombia). *Revista Universidad Católica de Oriente*, 23, 71-86.
- Murphy P. J. & Hicks D. E. (1986). *In situ method for measuring sediment oxygen demand*. In:

- Hatcher, K. J. (Ed). *Sediment oxygen demand: processes, modelling and measurement (307-330)*. Georgia, U.S.: Institute of Natural Resources, University of Georgia, Athens.
- Nolan P. M. y Jonson A. F. (1979). *A method for measuring sediment oxygen demand using a bench model benthic respirometer*. Boston, U.S.: Environmental Protection Agency, US EPA Region I Library.
- Ospina-Zúñiga, O. García-Cobas, G., Gordillo-Rivera, J., Tovar-Hernández, K. (2015). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia). *Ingeniería Solidaria*, 12(19), 19-36.
- Ramírez-González, A., Viña-Vizcaíno, G. (1998). *Limnología colombiana aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*. Bogotá, Colombia: BP Exploration Company -Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Rivera, N.; Encina, F.; Palma, R. y Mejías, P. (2009). La calidad de las aguas en el curso superior y medio del río Traiguén. IX Región-Chile. *Información Tecnológica*, 20(4), 75-84.
- Roldán, G. y Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Segunda edición. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Romero, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. 3.ª ed. México, D. F., México: Alfaomega.
- Salazar, A. Á. (1984). *Contaminación de recursos hídricos modelos y control*. Medellín, Colombia: Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia AINSA.
- Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface water quality modelling and control*. New York, USA: Harper & Row Publishers.
- US EPA. (2001). *Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses. Technical Manual. EPA 823-B-01-002*. U. S., Office of Water. Washington, DC., USA: Environmental Protection Agency.
- Veenstra N. J. & Nolen L. S. (1991). In-situ sediment oxygen demand in five southwestern U. S. lakes. *Water Research*, 25(3), 351-354.
- Wood, T. M. (2001). *Sediment Oxygen Demand in Upper Klamath and Agency Lakes*. Oregon, US: Geological Survey Water-Resources Investigations. Report 01- 4080, 1-13.