

RESEARCHS / INVESTIGACIÓN

Determinación de coeficientes de degradación de materia orgánica en el río Negro (municipio de Rionegro, Colombia)

Determination of kinetics coefficients of organic matter degradation in Negro river (municipality of Rionegro, Colombia)

Carlos Augusto Benjumea Hoyos

DOI. 10.21931/RB/2018.03.01.10

Resumen: En el presente estudio fueron determinados los coeficientes de desoxigenación en cinco diferentes estaciones de monitoreo sobre el río Negro (municipio de Rionegro, Antioquia). Se emplearon cuatro metodologías diferentes para la determinación de estas constantes: diferencias logarítmicas, mínimos cuadrados, método de Thomas y puntos de Rhame. La metodología de las diferencias logarítmicas arrojó coeficientes altos, con una variación de resultados amplia. Mientras que las metodologías de los mínimos cuadrados y puntos de Rhame presentaron los mejores ajustes en términos de la constante K y los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de aguas superficiales con baja carga orgánica reportados por otros autores. Adicionalmente se evaluaron variables ambientales in situ y en laboratorio, con resultados generales de oxígeno disuelto alto, bajas temperaturas, un sistema acuático tendiente a la neutralidad y baja carga de sólidos en disolución. La relación DBO_5/DBO_u fue baja, indicando una baja presencia de material orgánico susceptible de ser oxidado por microorganismos de vía aerobia.

Palabras clave: Coeficientes de desoxigenación, DBO, Materia orgánica, Río Negro.

Abstract: This research deals with studies intending to determine the coefficients of deoxygenation into five different monitoring stations in Negro river (municipality of Rionegro, Antioquia). Four methodologies were used to determine this constants: logarithmic differences, minimal squares methods, Thomas method and Rhame points. The methodology of the different logarithmic showed high coefficients with a wide variation on results. While the methods of least square and Rhame points method were the most appropriate in terms of the K constant and the values obtained were within the range of surface waters with low organic load reported by other authors. Additionally environmental variables in situ and laboratory were evaluated, with overall results of high dissolved oxygen, low temperatures, a water system with a neutrality pH and low solids loading in solution. The BOD_5/BOD_u ratio was low, indicating a low presence of organic material capable of being oxidized by aerobic microorganisms.

Key words: BOD, Coefficients of deoxygenation, Negro river, Organic matter.

Introducción

En este trabajo se evalúa la velocidad de degradación de la materia orgánica en diferentes estaciones del río Negro (municipio de Rionegro, Antioquia), mediante el análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en diferentes épocas climáticas. Adicionalmente, se determinan los coeficientes cinéticos que relacionan el consumo de materia orgánica en corrientes de alta montaña (río Negro, Antioquia).

El municipio de Rionegro se encuentra localizado en la cordillera central de los andes al oriente del departamento de Antioquia. Cuenta con un área total de 196 km², hace parte de la subregión del altiplano de oriente, la cual está integrada por los municipios de El Retiro, La Ceja, La Unión, El Carmen de Viboral, El Santuario, Marinilla, Guarne, San Vicente y Concepción. El suelo urbano de Rionegro está localizado a las coordenadas 6°9'18"N 75°22'48"O, a una altura de 2125 msnm la precipitación promedio anual varía entre 1800 y 2500 milímetros y una temperatura media de 17 °C; sus suelos son derivados de cenizas volcánicas con alta resistencia a la erosión^{1,2}.

El río Negro es la más importante fuente de agua del municipio del mismo nombre. Históricamente dividía el valle en dos: El Valle de Llanogrande y el Valle de San Nicolás. Nace un poco al sur de la región y por el costado oriental de la cordille-

ra de Las Palmas a unos 2800 msnm, en el Cerro Vaca. Corre en dirección nordeste y es alimentado por el lado derecho por las quebradas del Hato, La Pereira y Cimarronas. Por la izquierda recibe las quebradas Tablazo, Tablacito, Chachafruto, Malpaso, La Mosca y La Porquera³.

Las corrientes de esta cuenca se han visto afectadas por el cambio del uso del suelo en los últimos años debido al crecimiento urbanístico, la acelerada industrialización y al aumento de la población rural proveniente principalmente del Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia), lo que conlleva a una mayor presión sobre las fuentes superficiales. El río Negro es fuente de abastecimiento para el municipio del mismo nombre, adicionalmente, parte de caudal es transferido a la cuenca del río Aburrá, mediante trasvase a la planta de tratamiento Ayurá que abastece una porción importante de la zona sur del Valle de Aburrá. Esta misma corriente, en su tramo final alimenta el embalse El Peñol, el cual tiene usos recreativos, paisajísticos y de generación de energía; principalmente. En su recorrido el río Negro recibe la contaminación doméstica de unos centros poblados con crecimiento acelerado en los últimos años (sector Llanogrande) e industrial que se asienta en las subcuencas afluentes de manera marcada y en el tramo medio bajo de su

¹ Grupo de Investigación Limnología y Recursos Hídricos, Docente Asistente programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. orcid.org/0000-0002-3702-4300.

recorrido, esta carga contaminante puede afectar la disponibilidad de oxígeno disuelto en la corriente, el cual es vital para el sostenimiento de la vida acuática.

El oxígeno disuelto constituye uno de los principales parámetros a evaluar en el comportamiento de la calidad del agua de los cuerpos hídricos, interviniendo en diferentes procesos, como son la reaeración, la fotosíntesis, la respiración, la demanda béntica y la degradación de la materia orgánica, entre otras^{4,5}.

Existen parámetros y constantes cinéticas en las ecuaciones que describen y gobiernan los procesos físicos y químicos en una corriente de agua, las cuales no siempre pueden determinarse teóricamente o por medio de una expresión matemática. Tal es el caso de la constante de desoxigenación por demanda bental (SOD), que corresponde a la demanda de Oxígeno Disuelto (OD) por la descomposición de la materia orgánica contenida en los sedimentos en un ecosistema acuático. Esta juega un papel muy importante en la depleción del oxígeno disuelto cuando se realiza un balance de oxígeno en una corriente⁶.

Para el caso específico de la materia orgánica (vertimientos de aguas residuales, materia orgánica en la escorrentía superficial, etc.) se hace necesario realizar la medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonácea (DBOC) y Demanda Bioquímica de Oxígeno Nitrogenada (DBON), demanda béntica y sus constantes cinéticas asociadas comúnmente denominadas como K_1 , K_N , K_B respectivamente, las cuales brindan información sobre la velocidad de degradación de la materia orgánica en un cuerpo de agua. Una buena aproximación al valor real de las constantes es imprescindible en un estudio de corrientes de agua, pues de ello dependerá la precisión de los resultados y predicciones que se efectúen de la calidad futura del agua⁷.

Para el río Negro, en particular, no se encuentran reportes de estudios experimentales de los coeficientes cinéticos por el material orgánico en la corriente (demanda de oxígeno), por lo cual los resultados de investigaciones en este sentido fortalecerían y complementarían los estudios y seguimiento que realiza la corporación autónoma regional Cornare (ente de control ambiental) en cuanto a los modelos implementados desde hace algún tiempo para predecir la calidad de este cuerpo de agua; los cuales propenden por la gestión, control y entendimiento del ecosistema acuático.

Para las simulaciones de calidad del agua y el diseño de sistemas de tratamiento biológico de efluentes de aguas resi-

duales, es de gran importancia obtener el parámetro que cuantifica la velocidad de oxidación de la materia orgánica por microorganismos⁵. La constante cinética de desoxigenación total, comúnmente denotada como K_c o K_1 , mide la tasa o velocidad de degradación de la materia orgánica presente en un sistema acuático; este coeficiente debe estimarse a partir de la cuantificación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) durante un tiempo adecuado; usualmente 20 días.

La constante de desoxigenación K_c es indispensable para conocer la manera como se utiliza el oxígeno en la oxidación de la materia orgánica. Este valor es característico para cada tipo de desecho, siendo necesario determinarlo en cada caso específico. Una vez conocido el valor de K_c se puede estimar el valor de la demanda bioquímica de oxígeno remanente en una corriente de agua, aguas abajo de una descarga⁷.

Materiales y métodos

Se definieron cinco estaciones de monitoreo a lo largo del río Negro, las cuales se encuentran ubicadas entre los municipios de El Retiro y Rionegro, en límites con el municipio de Marinilla. La definición de estos sitios se basó en información analizada de las diferentes campañas de monitoreo y control realizadas por la Corporación Autónoma de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare Cornare, y lo propuesto por⁸. La tabla 1 presenta la descripción de los puntos de monitoreo y su respectiva nomenclatura.

Se realizaron dos campañas de muestreo, durante periodos climáticos contrastantes. Primer periodo inicio de lluvias hasta entrada época húmeda correspondiente a la época entre abril a mayo (fecha de monitoreo 24 de abril). Segundo periodo, representativo de aguas bajas, con escasa precipitaciones, correspondiente a la época del mes de junio y julio (fecha de monitoreo 29 de julio). De esta manera se tuvo un comparativo de los momentos hidrológicos característicos de la zona (bimodal), con lo que se caracterizó el sistema hídrico y la carga orgánica asociadas a estas épocas hidrológicas.

En cada estación se tomaron muestras compuestas de la columna de agua, las cuales fueron colectadas y almacenadas en recipientes plásticos debidamente rotulados y preservadas en una nevera con hielo a $\pm 4^\circ\text{C}$. Se garantizó la preservación de las muestras durante el transporte, para luego ser analizadas en el laboratorio de acuerdo a los procedimientos descritos en⁹ en lo concerniente a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).

Tabla 1. Descripción Estaciones de Monitoreo

Nomenclatura	Nombre	Descripción
E 1	Montenevado	Kilómetro 5, jurisdicción del Municipio de El Retiro.
E 2	Charcomanso	Kilómetro 16, sector de Llanogrande. Jurisdicción del municipio de Rionegro,
E 3	Puente Real	Kilómetro 24, Jurisdicción del municipio de Rionegro, sector urbano.
E 4	Casa Mia	Kilómetro 25, Jurisdicción del municipio de Rionegro, sector urbano. Aportes de la quebrada La Pereira
E 5	Puente Autopista	Jurisdicción de los municipios de Rionegro y Marinilla. Recoge las descargas de las empresas circundantes.

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 (77 °F) por valor teórico nemstiano
Potencial de óxido reducción	Potenciométrica	Electrodo de combinación digital con una referencia de Ag/AgCl, sensor de temperatura incorporado. Rango ± 1200 mV. Resolución 0,1 mV
Conductividad	Conectividad de 4 polos de grafito	Margen de conductividad 0,01 µS/cm a 200,0 mS/cm Constante de celda 0,40 cm-1 ± 10%
Oxígeno Disuelto	Oxígeno disuelto luminescente (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 luminescente (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)

La prueba se realizó por duplicado para cada muestra tomada en las diferentes estaciones descritas anteriormente durante 20 días, mediante el bioensayo del método winkler⁹.

De acuerdo a resultados históricos obtenidos por Cornare, y complementados con un pre muestreo realizado el día 11 de marzo de 2013, se establecieron las diluciones necesarias para la cuantificación de la DBO en cada sitio de monitoreo. El volumen de muestra sembrado de muestra estuvo entre 100 y 200 ml para un volumen total con agua de dilución de 300 ml, según lo propuesto por los métodos estándar⁹.

Se realizaron los chequeos respectivos del agua de dilución para establecer la efectividad de la semilla utilizada y la técnica analítica; el método aplicado fue el de la solución de glucosa y ácido glutámico referenciado en el Standard Methods; en la cual se determina el consumo de oxígeno de la solución patrón.

VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS DEL AGUA IN SITU:

Adicionalmente se tomaron muestras para la determinación de variables *in situ*. Se midieron el pH, temperatura del agua, conductividad, potencial de óxido reducción, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de oxígeno. Estas mediciones se realizaron mediante sondas multi paramétricas HACH HQ40d, las cuales fueron calibradas previamente antes de cada monitoreo. La tabla 2, presenta las principales características y principios de medición de las sondas utilizadas para la cuantificación de las variables *in situ*.

MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DEGRADACIÓN K.

Para la determinación del coeficiente de desoxigenación global en cada estación se utilizaron los métodos de las diferencias logarítmicas¹⁰; mínimos cuadrados y pendiente de Thomas¹¹; adicionalmente se empleó la metodología de los puntos de Rhame¹². Para la cuantificación del coeficiente se utilizaron los valores medios de los resultados obtenidos en cada medida diaria de la DBO para cada época de monitoreo establecida (abril y junio).

Estas técnicas de cálculo se basan en la cinética de la reacción de la DBO carbonácea la cual es descrita ampliamente por diversos autores^{7, 10, 13, 14, 15, 16}. El comportamiento de esta variable responde a una reacción de primer orden, ecuación 1.

Este proceso se basa en la degradación bioquímica de la materia orgánica; la cual es directamente proporcional a la cantidad de material orgánico aprovechable por los microorganismos presentes en el sistema (materia orgánica biodegradable).

$$\frac{dL}{dt} = -KL$$

Dónde:

L: concentración de la materia orgánica remanente (mg/l) en un tiempo t

dL/dt: velocidad de desaparición de la materia orgánica por oxidación biológica aerobia (dL/dt<0)

t: el tiempo de incubación (días)

K: constante de biodegradación (d⁻¹), base e a 20°C

Resultados y discusión

Parámetros In Situ

Se determinaron diferentes variables ambientales en campo durante el procedimiento de toma y preservación de las muestras a analizar en laboratorio. Estos parámetros indican la calidad ambiental del sistema acuático en los diferentes puntos de monitoreo para las fechas específicas del trabajo en campo. La tabla 3 presentan los resultados obtenidos para cada una de estas variables durante los monitores de Abril y Junio de 2013.

En cuanto a los resultados obtenidos en campo, se observa como la temperatura del agua se encontró entre los 15.5 y 20.5 °C; valores típicos de esta zona que se caracteriza por tener un clima frío, las variaciones en este parámetro respondieron efectivamente a la hora del día en la cual fueron tomadas. Para el oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de este gas, se puede apreciar como la concentración de este presenta una tendencia a la disminución conforme se avanza en las diferentes estaciones, este resultado es producto de los diferentes contrastes en términos de intervención antrópica que se encuentran en las diferentes estaciones de estudio, donde se inicia (estación Montenevado) con una zona con menor densidad poblacional y menores descargas; y se termina (estación Puente Autopista) en un sector donde se han recibido las

Tabla 3. Resultados parámetros *in situ*.

Estación	Oxígeno Disuelto (mg/l)			Saturación (%)			Temperatura del agua (°C)		
	Abr	Jul	Promedio	Abr	Jul	Promedio	Abr	Jul	Promedio
Montenevado	8.04	8.02	8.0	104.1	107.8	106.0	15.5	17.1	16.3
Charco Manso	8.7	7.05	7.9	119.8	93.6	106.7	18.1	16.6	17.4
Puente Real	6.42	6.58	6.5	92	89	90.5	20.2	18.41	19.3
Casa Mía	7.08	5.8	6.4	100.9	78.8	89.9	20.5	17.9	19.2
Puente Autopista	2.22	4.11	3.2	31.8	56.6	44.2	20.3	19	19.7
Estación	pH (unidades de pH)			Conductividad (us/cm)			Potencial de óxido reducción (mv)		
	Abr	Jul	Promedio	Abr	Jul	Promedio	Abr	Jul	Promedio
Montenevado	7.05	7.81	7.43	71.1	67.9	69.5	56.7	96.9	76.8
Charco Manso	7.5	7.33	7.42	60.9	33.6	47.3	64.6	122.9	93.8
Puente Real	7.26	7.28	7.27	66.5	46.6	56.6	98.3	110.9	104.6
Casa Mía	7.06	7.21	7.14	75.4	44.8	60.1	120.1	114.2	117.2
Puente Autopista	6.91	7.16	7.04	158.4	85.7	122.1	46.7	94.1	70.4

aguas servidas y tratadas del municipio de Rionegro y algunas empresas ubicadas en el sector. Los resultados encontrados con respecto a este gas durante 2013 son similares a estudios realizados por^{8, 2}; y a los reportes que se encuentran en la base de datos de la corporación Cornare.

En términos generales el ambiente acuático analizado presenta tendencia a la neutralidad durante los dos monitoreos realizados, con valores medios que oscilaron entre 7.04 y 7.43 unidades de pH, en las estaciones Puente Autopista y Montenevado y tiene coherencia según lo reportado por^{1, 2}. Este comportamiento se ve favorecido por la buena disponibilidad de oxígeno disuelto que desplaza el gas carbónico, y por ende evita la presencia de ácido carbónico, principal agente precursor de la acidez natural en las aguas.

La conductividad eléctrica puede considerarse como media y propia de ríos de alta montaña⁴, principalmente en las 4 primeras estaciones (Montenevado, Charco Manso, Puente Real y Casa Mía) con un rango promedio que se encontró entre 47.3 y 69.5 uS/cm. Por su parte la estación ubicada aguas abajo, Puente Autopista, registró los valores más altos para esta variable durante ambos periodos de estudio (158 y 85.7 uS/cm para abril y julio, respectivamente). Este comportamiento se debe principalmente a la ubicación del punto de estudio, pues al ubicarse aguas abajo, la concentración de iones aumenta progresivamente debido a la erosión del cauce, escorrentía de lluvias, vertimientos a la corriente, entre otros. El comportamiento de esta variable presenta similitud a lo presentado por Benjumea Hoyos en el 2017²⁴ en este mismo sistema hídrico.

En cuanto al potencial de óxido reducción este se encontró con valores positivos y un rango promedio para ambos periodos de estudio entre 70.4 y 117.2 mV; siendo la estación Puente Autopista la que registró los valores más bajos, esta característica se asocia principalmente a los bajos niveles de oxígeno disuelto¹⁷; no obstante los resultados indicaron que el sistema acuático presenta características oxidativas.

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Constante de Desoxigenación K.

La figura 1 exhibe los perfiles longitudinales promedio obtenidos de las mediciones de DBO realizadas en laboratorio; los resultados promedio en el mes de abril y julio de 2013,

de la demanda biológica de oxígeno para el día cinco (DBO₅) y veinte o última (DBO_u); adicionalmente se presenta la fracción degradada entre el día quinto y día último mediante la relación DBO₅/DBO_u.

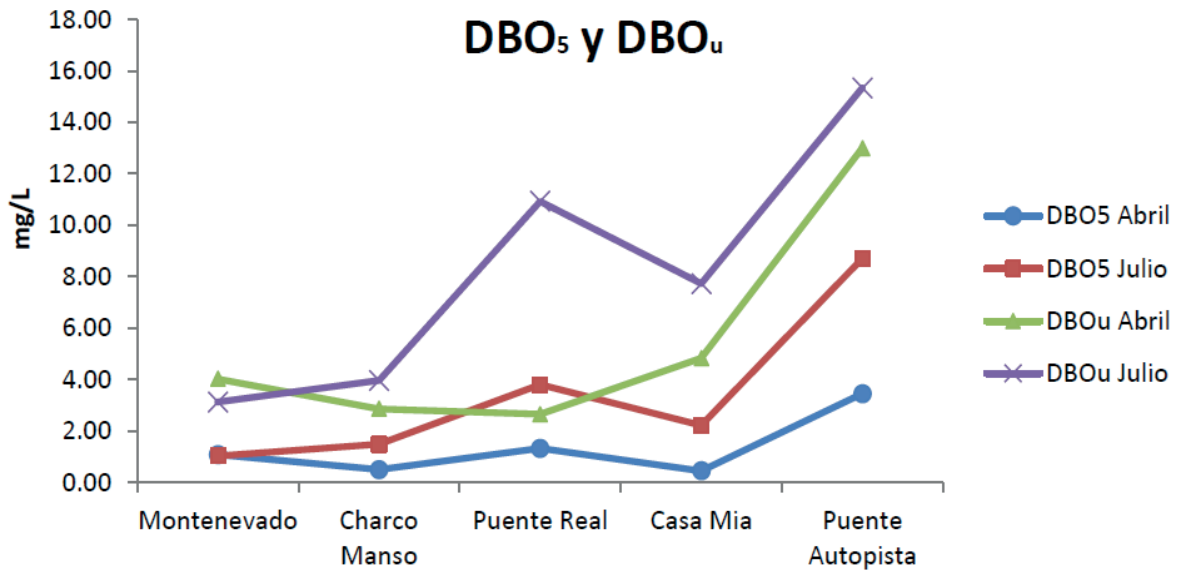
Como se puede observar en la figura 1; los resultados obtenidos reflejan un ambiente acuático con una carga orgánica muy baja, analizada como DBO. La estación con menor concentración promedio de DBO₅ fue Charco Manso (0.99 mg/L); mientras que la mayor concentración promedio de este mismo parámetro se obtuvo en Puente Autopista con un valor de 6.08 mg/L; este comportamiento es coherente con lo observado en cuanto a la concentración de oxígeno disuelto obtenida para cada punto de monitoreo, no obstante la estación Puente Autopista refleja concentraciones de este gas bajas para ambos periodos de estudio; con lo cual se podría inferir una alta concentración en el parámetro de la DBO₅, resultado que no se obtuvo mediante el análisis en laboratorio. En cuanto a los resultados entre épocas climáticas época lluviosa (abril) y seca (julio), se evidencia una leve diferencia entre ambos periodos, con la tendencia a presentarse mayor concentración de DBO₅ durante julio en comparación a lo obtenido en abril, hecho que va ligado a la diferencia de caudal entre ambos periodos.

Resultados similares fueron reportados por⁸ donde para la época lluviosa se obtuvieron valores por debajo de 13.2 mg/L como DBO₅; en las mismas estaciones de monitoreo analizadas en el presente estudio; encontrándose esta última concentración en la estación Puente Autopista, es decir exhibe un comportamiento similar a lo encontrado durante 2013.

Otros estudios para corrientes de alta montaña, son los reportados por¹⁸, para la quebrada La Pereira (afluente del río Negro), en la cual obtuvieron resultados similares a los encontrados durante 2013; 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.

Los resultados obtenidos para la relación DBO₅/DBO_u indican la baja presencia de material orgánico con resultados igua-

Figura 1. Perfiles longitudinales de DBO promedio, monitoreos de abril y julio de 2013.



les o inferiores a 0.42 (42%); estos resultados dan una primera aproximación al coeficiente de desoxigenación o degradación K, pues al presentar valores bajos se infiere que la velocidad de degradación tendera a ser baja; ya que "si la velocidad de oxidación bioquímica es muy alta, el valor de la DBO₅ se acerca mucho al de la DBO final"¹⁰.

Constante de desoxigenación (K)

La tabla 4, presenta los resultados obtenidos para el coeficiente de desoxigenación en las cinco estaciones sobre el río Negro, utilizando cuatro metodologías diferentes; Diferencias Logarítmicas, Mínimos Cuadrados, Método de Thomas y Puntos de Rhame.

Para una mejor comprensión y análisis se presenta la figura 2; donde se exhiben los valores promedio del coeficiente de desoxigenación (K) y la DBO₅ para los monitoreos realizados en abril y junio de 2013 en las cinco estaciones de interés. Se aprecia cómo, en términos generales, los resultados obtenidos para el coeficiente de desoxigenación fueron bajos guardando coherencia con lo obtenido en cuanto a las concentraciones de DBO obtenidas en cada sitio de monitoreo.

En cuanto a los resultados obtenidos por las diferentes metodologías aplicadas (tabla 4), se aprecia que la metodología de las diferencias logarítmicas arrojó los mayores valores del coeficiente de degradación de materia orgánica, con un promedio que vario entre 0.078 y 0.683 día⁻¹. Mientras que la metodología de los puntos de Rhame presentó los valores más bajos; con variaciones desde 0.016 y 0.08 día⁻¹. Para los resultados relacionados con las estaciones, se observa como

la estación Casa Mia y Puente Autopista arrojaron los mayores resultados en cuanto a los coeficientes de degradación. Mediante las metodologías de Thomas y puntos de Rhame se obtuvieron coeficientes de 0.326 y 0.080 día⁻¹, respectivamente para la estación Casa Mia; y mediante los mínimos cuadrados se obtuvo un resultado de 0.085 día⁻¹ en la estación Puente Autopista.

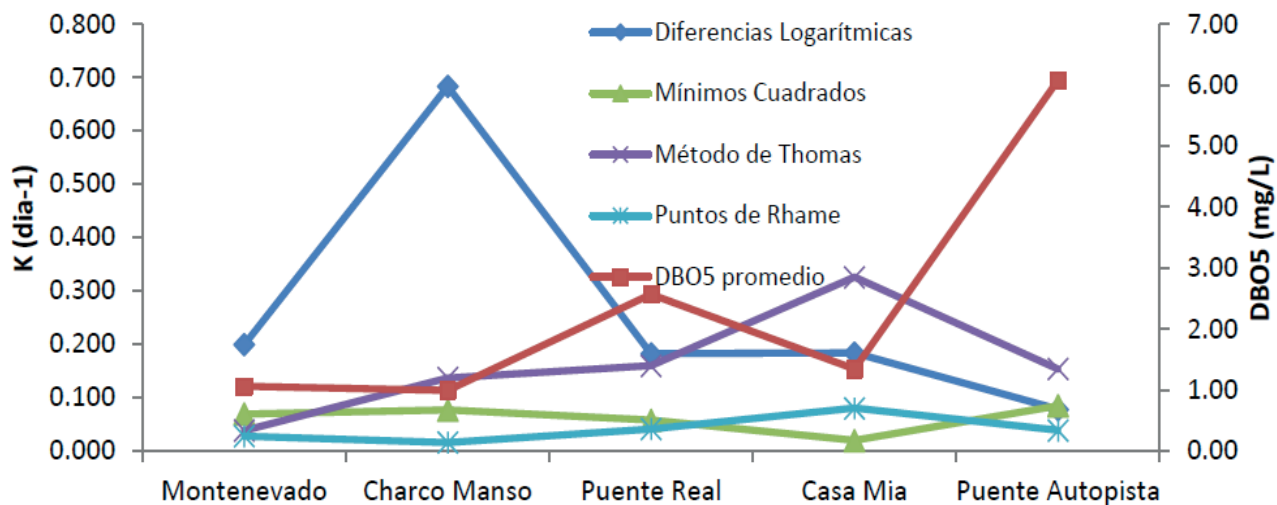
En términos generales los resultados obtenidos para el coeficiente de degradación orgánica K mediante las metodologías de los mínimos cuadrados, Thomas y puntos de Rhame ofrecieron resultados promedio bajos entre 0.016 y 0.16 día⁻¹ (con excepción de la estación Casa Mia en el método de Thomas 0.326 día⁻¹); estos valores son típicos para sistemas de aguas superficiales con baja carga orgánica y tiene concordancia con lo reportado por^{12, 19, 20}. Estos resultados son coherentes con lo encontrado en las mediciones de campo en cuanto a lo que a oxígeno disuelto se refiere (tabla 4, figura 1) y en lo que respecta a la demandada biológica de oxígeno y relación DBO₅/DBO_u obtenida en laboratorio, las cuales fueron bajas e indican baja presencia de materia orgánica susceptible de ser degradada por los microorganismos. Los valores se encuentran clasificadas dentro del rango de sistemas con tratamiento primario (K entre 0.1 – 0.3 día⁻¹ y DBO₅/DBO_u 0.63) y lodos activados (K entre 0.05 – 0.1 día⁻¹ y DBO₅/DBO_u 0.31); según lo descrito por^{11, 16, 21}.

La tabla 5, presenta los resultados de la varianza (s²) y la desviación estándar (s) obtenida para cada una de las cuatro metodologías empleadas durante los dos periodos de monitoreo (abril y julio). Se aprecia como para ambos periodos de

Tabla 4. Resultados Coeficiente de Desoxigenación K, en Cinco Estaciones Sobre el río Negro

Estación	Metodología Constante de Desoxigenación K (día ⁻¹)											
	Diferencias Logarítmicas			Mínimos Cuadrados			Método de Thomas			Puntos de Rhame		
	Abr	Jul	Promedio	Abr	Jul	Promedio	Abr	Jul	Promedio	Abr	Jul	Promedio
Montenevado	0.083	0.315	0.199	0.046	0.092	0.069	0.034	0.042	0.038	0.047	0.008	0.028
Charco Manso	0.881	0.485	0.683	0.037	0.116	0.077	0.101	0.172	0.137	0.024	0.007	0.016
Puente Real	0.105	0.259	0.182	0.057	0.058	0.058	0.269	0.050	0.160	0.041	0.041	0.041
Casa Mia	0.254	0.113	0.184	0.003	0.036	0.020	0.256	0.395	0.326	0.142	0.018	0.080
Puente Autopista	0.087	0.069	0.078	0.013	0.156	0.085	0.228	0.079	0.154	0.008	0.069	0.039

Figura 2. Perfiles longitudinales del coeficiente de desoxigenación (K) promedio y la DBO₅ promedio.



estudio la metodología de las diferencias logarítmicas presentó las variaciones de coeficientes más altas con 0.31 y 0.15 para abril y julio respectivamente. Los resultados obtenidos mediante esta metodología se ajustaron más a coeficientes de degradación propios de efluentes de aguas residuales según lo reportado por²² y no a ambientes de aguas superficiales con baja carga orgánica como se discutió anteriormente.

Tabla 5. Varianza (σ^2) y Desviación Estándar (σ) por Metodología y Periodo de Estudio

Metodología	Abril		Julio	
	σ^2	σ	σ^2	σ
Diferencias Logarítmicas	0.094	0.31	0.022	0.15
Mínimos Cuadrados	0.0004	0.02	0.0018	0.04
Método de Thomas	0.009	0.09	0.017	0.13
Puntos de Rhame	0.002	0.05	0.001	0.02

Mientras que la desviación estándar obtenida mediante las metodologías de los mínimos cuadrados (0.02 y 0.04 para abril y julio respectivamente) y puntos de Rhame (0.05 y 0.02 para abril y julio respectivamente) indican un mejor ajuste y representación de las características encontradas en cuanto al oxígeno disuelto y DBO₅; además de guardar concordancia con estudios similares para aguas superficiales con baja carga orgánica^{12, 19, 20, 23}. Estos resultados pueden asociarse a las características propias de la corriente, pues al corresponder a un río de montaña, las bajas temperaturas y características morfológicas de la corriente favorecen la disolución del oxígeno disuelto, gas fundamental para todos los procesos de oxidación de la materia orgánica por vía biológica. Adicional a esto, la gestión y control de vertimientos que se realiza en la región por parte de la autoridad ambiental Cornare, influye drásticamente en el control de la contaminación por vertimientos de tipo doméstico e industrial gracias al Acuerdo 198 de abril de 2008; en el cual se establecen remociones mínimas del 95% en términos de DBO₅ y Sólidos suspendidos totales.

Conclusiones y recomendaciones

Se realizó la cuantificación experimental de la constante de desoxigenación en cinco estaciones del río Negro (Montenevado, Charco Manso, Puente Real, Casa Mia y Puente Autopista), por medio de cuatro metodologías diferentes: diferencias logarítmicas, método de Thomas, mínimos cuadrados y puntos de Rhame. Siendo las dos últimas metodologías las más adecuadas en la representación del coeficiente, pues se aproxima a resultados similares en corrientes de agua superficial con baja intervención; además de presentar menos dispersión en los datos obtenidos.

Los rangos promedio de los coeficientes obtenidos mediante las metodologías de mínimos cuadrados y puntos de Rhame oscilaron entre 0.016 y 0.085 d⁻¹; los cuales corresponden a velocidades de degradación de corrientes superficiales con baja carga orgánica. Los resultados para la DBO₅ y DBO_u indicaron una baja carga orgánica, las cuales se asoció, en términos generales, con altas concentraciones de oxígeno disueltos y cercanos a la saturación de este gas. Los resultados obtenidos guardaron coherencia con lo reportado por otros estudios en el río Negro. Los resultados obtenidos para la relación DBO₅/DBO_u fueron bajos, indicando una baja velocidad de degradación, tal como se obtuvo mediante los resultados experimentales mediante las metodologías utilizadas.

Los rangos promedio de los coeficientes obtenidos mediante las metodologías de mínimos cuadrados y puntos de Rhame oscilaron entre 0.016 y 0.085 d⁻¹; los cuales corresponden a velocidades de degradación de corrientes superficiales con baja carga orgánica. Los resultados para la DBO₅ y DBO_u indicaron una baja carga orgánica, las cuales se asoció, en términos generales, con altas concentraciones de oxígeno disueltos y cercanos a la saturación de este gas. Los resultados obtenidos guardaron coherencia con lo reportado por otros estudios en el río Negro. Los resultados obtenidos para la relación DBO₅/DBO_u fueron bajos, indicando una baja velocidad de degradación, tal como se obtuvo mediante los resultados experimentales mediante las metodologías utilizadas.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo durante todo el proceso del proyecto al semillero de investigación en Recursos Hídricos del programa de ingeniería ambiental de la Universidad Católica de Oriente, y a la corporación autónoma regional CORNARE por el apoyo y suministro de información.

Referencias bibliográficas

1. Montoya, Y., Acosta, Y., Zuluaga, E., & Garcia, A. (2007). Evaluación de la biodiversidad de insectos acuáticos y de calidad fisicoquímica y biológica del Río Negro (Antioquia-Colombia). Universidad Católica de Oriente (23), 71-86.
2. 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. *Caldasia* 33(1):193-210.
3. Municipio de Rionegro, departamento de Antioquia. Recuperado el 12 de abril de 2014 desde <http://www.rionegro.gov.co/>
4. Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Editorial de la Universidad de Antioquia. 2 da edición. Colombia, 440 pp.

5. Duncan Mara (2004). Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. Earthscan. London.
6. Caldwell J. M., Doyle M. C. (1994). Sediment oxygen demand in the lower Willamette river, Oregon. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 95-4196. Portland, Oregon.
7. Salazar A. Á., (1984) Contaminación de Recursos Hídricos Modelos y Control. Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia AINSA, Medellín.
8. Castrillon, A. M.; Wills, A. (2006). Modelación de la calidad del agua de la cuenca del Río Negro a través del modelo de simulación QUAL 2E [archivo de computador] Tesis/Informe de práctica. U de A. Medellín : [s. n.].
9. American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF) (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed.
10. Ramalho R.S. (1996). Tratamiento de Aguas Residuales. Ed. Reverté. Barcelona, 707 pp.
11. Romero, J.A. (1999). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
12. Corporación Autónoma Regional Del Valle Del Cauca, (2007). Proyecto De Modelación Matemática Del Río Cauca – Pmc- Fase III. Convenio Interadministrativo 029 de junio 14 de 2005 entre la CVC y la Universidad del Valle. Estimación Experimental De Las Constantes Cinéticas De La Calidad Del Agua Del Río Cauca.
13. Romero Rojas (1998). Acuitratamiento por Lagunas de Estabilización. 3ª Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
14. Saracho M., Romero K., Flores M., Rodríguez C. (2011). Coeficiente Cinético para Diseño de Unidades de Tratamiento Biológico de Efluentes Cloacales. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Argentina. 15, 71-78.
15. Streeter, H. W. and Phelps, E. B. (1925). A study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River, III. Factors Concerning the Phenomena of Oxidation and Reaeration. U.S. Public Health Service. Pub. Health Bulletin No 146, february, 1925. Reprinted by U.S., Dhew, PHA, 1958.
16. Chapra, S. (1997). Surface Water-Quality Modeling. McGraw-Hill International Editions Civil Engineering Series. United States, 844 pp.
17. Dodds W. K. y Whiles M. R. (2010). Aquatic Chemistry and Factors Controlling Nutrient Cycling: Redox and O₂. Freshwater Ecology (Second Edition), Concepts and Environmental Applications of Limnology. A volume in Aquatic Ecology. 289-321.
18. Garcia, L., y Villegas, N. E. (2008). Demanda de oxígeno por sedimentos de un ambiente lotico del altiplano de San Nicolas quebrada La Pereira, municipios: La Ceja - El Carmen de Viboral - Rionegro [archivo de computador] Tesis/Informe de práctica. U de A. Medellín: [s. n.].
19. Hewitt J.P. y Hunterf J.V: (1975). Comparison of the methods used to calculate first order bod equation constants. Water Research 9, 683-687.
20. Jorgensen S.E., y Bendoricchio, G. (2001). Fundamentals of Ecological Modeling. Third edition. Elsevier Science Ltd. Netherlads.
21. Thomann, R. y Mueller, J. (1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper Collins Publishers Inc. United States. 644 pp.
22. Rosas de Alva S. G., Barceló I. D., Bussy A., Solís H. E., López E (2007). Estudio Cinético Comparativo de la Degradación de la Materia Orgánica en un Sistema Lagunar Prototipo. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. 1, Número 2. Universidad Nacional Autónoma de México.
23. Battersby N.S. (1990). A review of biodegradation kinetics in the aquatic environment. Chemosphere, 21(10-11), 1243-1284.
24. Benjumea Hoyos C. A.; Álvarez G. (2017). Demanda de oxígeno por sedimentos en diferentes tramos del río Negro, Rionegro, Antioquia, Colombia. Producción + Limpia - Julio - Diciembre. Vol.12, No.2 – 131-146

Recibido: 11 octubre 2017

Aprobado: 10 enero 2018