



Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI¹

Carlos Andrés Caho-Rodríguez², Ellie Anne López-Barrera³

Determination of the water quality index for the western section of the Torca-Guaymaral wetland using UWQI and CWQI methodologies

Determinação do Índice de Qualidade da Água para o setor ocidental da zona úmida Torca-Guaymaral empregando as metodologias UWQI y CWQI

RESUMEN

Introducción. El índice de calidad de agua (ICA) incorpora parámetros fisicoquímicos en una ecuación, para determinar la calidad de agua en un lugar y tiempo fijados. **Objetivo.** Analizar espacio-temporalmente el índice de calidad de agua del sector Guaymaral, a través dos metodologías de medición de cálculo: UWQI y CWQI. **Materiales y métodos.** Se realizó una comparación espaciotemporal, entre agosto de 2015 y abril de 2016, seleccionando cuatro puntos de muestreo y monitorizando parámetros fisicoquímicos en cuatro épocas diferentes. **Resultados.** La mayoría de puntos muestreados y valorizados por el ICA-UWQI tuvieron una valoración de regular, y para el ICA-CWQI, de pobre. **Conclusiones.** Se determinó que de las dos metodologías la UWQI es ideal para evaluar rápidamente algún uso específico del agua, pues permite inmediatez en la toma de decisiones, y que la CWQI es ideal para los estudios de evaluación espaciotemporal.

Palabras clave: ICA, humedal Torca-Guaymaral, parámetros fisicoquímicos, comparación de índices.

¹ Artículo resultado del proyecto "Evaluación espacio-temporal del Índice de Calidad de Agua en el humedal Guaymaral. Comparación de dos metodologías", realizado entre el 2015 y 2016 para la Maestría en Gestión y Evaluación Ambiental, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia.

² Magíster en Gestión y Evaluación Ambiental. Especialista en Gerencia del Medio Ambiente y Prevención de Desastres. Universidad Sergio Arboleda, IDEASA - Medio Ambiente y Sostenibilidad. Email: carcaho@hotmail.com ORCID: 0000-0003-3549-9262

³ Doctora en Ecología y Conservación con énfasis en Ecotoxicología; magíster en Sistemas Costeros y Oceánicos, Universidad Federal de Paraná, Brasil y Bióloga Marina de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia. Docente de la Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia. Investigador Grupo de investigación IDEASA- Medio ambiente y sostenibilidad. Correo electrónico: ellie.lopez@usa.edu.co ORCID: 0000-0002-4195-6354

ABSTRACT

Introduction. The water quality index (WQI) incorporates physicochemical parameters in an equation to determine the quality of the water in a fixed place and time. **Objective.** Analyze the water quality index of the Guaymaral sector; temporally and spatially, using two methodologies to measure calculations: *UWQI* and *CWQI*. **Materials and methods.** A temporal-spatial comparison was performed between August 2015 and April 2016,

selecting four sampling points and monitoring physicochemical parameters in four different seasons. **Results.** Most of the points sampled were assessed by *ICA-UWQI* as *fair*, and by *ICA-CWQI* as *poor*. **Conclusions.** From the two methodologies, it was determined that the *UWQI* is ideal to rapidly evaluate some specific use of the water, since it allows immediate decision making, while the *CWQI* is ideal for temporal-spatial evaluation studies.

Keywords: ICA, Torca-Guaymaral wetland, physicochemical parameters, index comparison.

RESUMO

Introdução. O índice de qualidade da água (ICA) incorpora parâmetros físico-químicos em uma equação, para determinar a qualidade da água num lugar e tempo fixados. **Objetivo.** Analisar espaço-temporalmente o índice de qualidade da água do setor Guaymaral, através de duas metodologias de medição de cálculo: *UWQI* e *CWQI*. **Materiais e métodos.** Se realizou uma comparação espaciotemporal, entre agosto de 2015 e abril de 2016, selecionando quatro pontos de amostragem e monitorizando parâmetros

físico-químicos em quatro épocas diferentes. **Resultados.** A maioria de pontos mostrados e valorizados pelo *ICA-UWQI* tiveram uma valorização de regular, e para o *ICA-CWQI*, de pobre. **Conclusões.** Se determinou que das duas metodologias a *UWQI* é ideal para avaliar rapidamente algum uso específico da água, pois permite um imediata toma de decisões, e que a *CWQI* é ideal para os estudos de avaliação espaciotemporal.

Palavras chave: ICA, zona úmida Torca-Guaymaral, parâmetros físico-químicos, comparação de índices.

INTRODUCCIÓN

Los humedales pueden describirse como zonas “híbridas” entre la parte acuática y la parte terrestre, caracterizados por una biota adaptada a cambios hidrológicos estacionales que presenta un cuerpo de agua que se contrae o se expande a lo largo del año conforme a los cambios de pluviosidad. Muestran vegetación hidrófila en algún período del año (Martínez, Díaz, Vargas, Rodas & Díaz, 2004). Estos ecosistemas proveen muchos servicios ambientales, entre los que se destacan: dar soporte a la cadena trófica de una región; brindar refugio (hábitat) a la biodiversidad del lugar; regular los ciclos hidrológicos de cuerpos de agua tales como ríos y aguas subterráneas; y finalmente, en algunos casos, sirven como lugares de depuración y control de contaminantes (Barbier, Acreman, & Knowler, 1997; CICEANA, s. f.).

En Bogotá, Colombia, existen 15 humedales oficialmente reconocidos por el Distrito, los cuales corresponden a la categoría de humedal de planicie y forman parte de la estructura ecológica principal de la ciudad. Estos cuerpos forman un conjunto complejo de ecosistemas que alberg una gran biodiversidad, pero al mismo tiempo, han sido objeto de un proceso histórico de transformación que ha arrojado como resultado la reducción del área original, la contaminación de las aguas y la pérdida de biodiversidad (DAMA, 2006, p. 27).

El humedal Torca-Guaymaral se encuentra ubicado en el sector norte de la ciudad de Bogotá, en las localidades de Suba y Usaquén (Bettin, Alcaraz, Benítez, & Flórez, 2007). Está conectado ecológicamente con la reserva forestal regional productora del norte de Bogotá “Van der Hammen”, la cual, a su vez, permite una conectividad con el humedal de La Conejera y

el cerro del mismo nombre y ofrece un corredor ecológico, especialmente para las aves, entre los cerros orientales y el río Bogotá, de vital importancia para la estructura ecológica principal de la ciudad (Estévez, 2002).

Este humedal, en un principio, fue un cuerpo de agua que se dividió en tres secciones en 1956 por la construcción de la autopista norte: Torca, en el fragmento oriental de la vía; la más grande (Guayamaral), al occidente de la misma, y en medio de los dos, una franja angosta denominada separador (Moreno, García, & Villalba, 2010; López-Barrera, Plata & Fuentes, 2015). Posterior a ello, el desarrollo urbano de la ciudad en ese sector se aceleró, trayendo como consecuencia un proceso de privatización de zonas de ronda, que derivó en el cambio del uso del suelo, e impactó y alteró la dinámica del ecosistema (Contraloría de Bogotá, 2012).

De igual manera, en los últimos años este humedal ha sufrido problemas serios de contaminación y mal uso, entre los que se destacan: la siembra de pastos para ganado, lo que trae como consecuencia el deterioro de los suelos; la desecación y reducción de su espejo de agua para dar paso a urbanizaciones; la eutrofización de sus aguas debido a la recepción de vertimientos domésticos por conexiones erradas del sistema de alcantarillado urbano; la sedimentación proveniente de su área aferente, acelerada por la ausencia de vegetación que amortigüe ese proceso, y la disposición de residuos en su ronda. Adicionalmente, otro problema importante es la pérdida de especies nativas por el continuo deterioro de su hábitat (Moreno, et al., 2010; DAMA, 2006; Universidad Nacional de Colombia, 2012).

Las acciones de gestión en el área han sido difíciles de realizar por parte de la Administración tanto local como nacional, puesto que existen lotes privados con afectación en su zona de ronda. Adicionalmente, el humedal se ubica en un área donde convergen la parte urbana y la rural de Bogotá, y tiene una jurisdicción compartida: por un lado, la Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR), en el saneamiento básico de los humedales relacionados con la cuenca del río Bogotá; y por el otro, la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), en la definición de directrices para la protección, manejo y conservación de los humedales en el área urbana de la ciudad. Por lo anterior, solo hasta el año 2015, por medio de la resolución conjunta CAR-SDA 02 de 2015, se aprobó el plan de manejo ambiental del área.

En dicho documento se realizó un diagnóstico de la calidad del agua del humedal, empleando la metodología UWQI, mediante la cual se identificó que posee un nivel de calidad bajo (menor a 30 sobre una escala de 100). Asimismo, se detectó la necesidad de realizar una medición de dicho índice a lo largo de un ciclo hidrológico para comprender su comportamiento (Universidad Nacional de Colombia, 2012).

Con base en lo anterior, se analizó de forma espacial y temporal la variación del índice de calidad de agua en el sector Guayamaral, por medio de dos metodologías, para establecer de qué forma varía y cuál es el estado de calidad del agua, y de forma preliminar se estimaron el efecto y los problemas que esta puede tener en la estructura ecológica presente en este ecosistema.

Índices de calidad de agua

El índice de calidad de agua (ICA) es una herramienta que permite identificar la calidad de agua de un cuerpo superficial o subterráneo en un tiempo determinado. En general, el ICA incorpora datos de múltiples parámetros físicos, químicos y biológicos, en una ecuación matemática, mediante la cual se evalúa el estado de un cuerpo de agua (Yogendra & Puttaiah, 2008). Por medio del ICA se puede realizar un análisis general de la calidad del agua en diferentes niveles, y determinar la vulnerabilidad del cuerpo frente a amenazas potenciales (Soni & Thomas, 2014). Esta herramienta surge como una alternativa para la evaluación de los cuerpos hídricos permitiendo que los procesos de formulación de políticas públicas y seguimientos de los impactos sean más eficaces (Torres, Cruz & Patiño, 2009).

En la actualidad existen diferentes metodologías para evaluar la calidad de agua de un cuerpo; la diferencia entre una y otra radica en la forma de calcularse y en los parámetros que se tienen en cuenta en la formulación del índice respectivo. En cuerpos de agua lenticos la aplicación de los ICA ha sido relativamente nueva: Pinilla (2010) desarrolló un índice limnológico para varios humedales de Bogotá empleando los parámetros y límites establecidos por la legislación colombiana para el agua potable; Castro-Roa y Pinilla-Agudelo (2014) emplearon un índice similar, pero con una variación en los parámetros fisicoquímicos y biológicos adoptados. Esto demuestra que al igual que para los demás cuerpos de agua superficiales existen muchas metodologías para la determinación de la calidad de agua en humedales.

Por lo anterior y por la problemática identificada en el humedal Guaymaral, se estableció la necesidad de analizar, de forma espacial y en cuatro épocas climáticas diferentes, la variación del ICA a través de las dos metodologías; la *UWQI*, empleada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM– y la *CWQI*, usada por la Secretaría Distrital de Ambiente –SDA–, estimando de forma preliminar el efecto y los problemas que se pueden presentar en la estructura ecológica presente en este ecosistema.

ICA UWQI-IDEAM

El IDEAM en el ENA (Estudio Nacional del Agua) adoptó la metodología *UWQI* (*Universal Water Quality Index*), la cual fue desarrollada y aplicada con el fin de obtener un índice simplificado para establecer la calidad de agua usada para el consumo humano. Para el cálculo se emplea una ecuación de tipo aditivo o suma ponderada, cuya estructura de cálculo es la que se presenta en la ecuación 1 (Torres et al., 2009):

$$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (1)$$

Donde W_i es el peso o porcentaje asignado al i -ésimo parámetro y I_i es el subíndice del i -ésimo parámetro. El IDEAM (2015) adoptó seis variables básicas para la determinación del ICA en los cuerpos de agua: una de estado (oxígeno disuelto) y cinco de presión (demanda química de oxígeno –DQO–, conductividad eléctrica –CE–, sólidos suspendidos totales –SST–, pH y relación nitrógeno total / fósforo total) (García, Vargas, Onofre, Aguirre & Sánchez, 2011).

Los valores del ICA del IDEAM comprenden una escala de cero a uno, en cinco categorías: muy mala, entre 0.00 y 0.25 (se representan con un color rojo); mala, entre 0.26 y 0.50 (color naranja); regular, entre 0.51 y 0.70, (color amarillo); aceptable, entre 0.71 y 0.90 (color verde) y buena, entre 0.91 y 1.00 (color azul) (IDEAM, 2011).

ICA CWQI-SDA

La Secretaría Distrital de Ambiente adoptó la metodología canadiense *CWQI* (*Canadian Water Quality Index*), para la determinación de la calidad de agua en las cuencas de los ríos Fucha, Tunjuelo, Salitre y Torca (al cual pertenece el humedal Torca-Guaymaral), para lo cual estableció, a través de la Resolución 5731 de

2008, los objetivos de calidad de agua para dichas cuencas, a través de 10 variables: oxígeno disuelto, pH, DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales y tensoactivos.

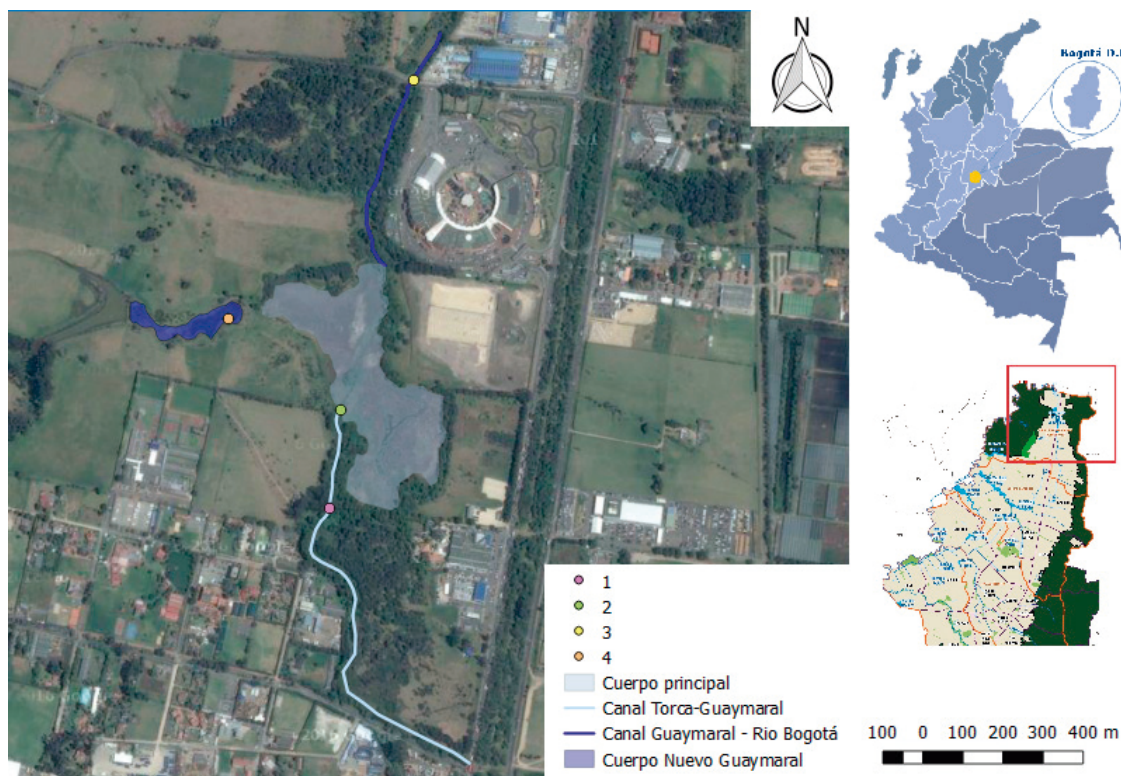
El índice está basado en la consecución de objetivos para proteger los usos de un cuerpo de agua, y dependiendo de las sustancias el objetivo se expresa de forma diferente: cuando son contaminantes el valor se expresa como el límite máximo permitido en el cuerpo de agua; cuando son sustancias esenciales (como el oxígeno disuelto) el objetivo se expresa como el valor mínimo que debe contener (Fernández & Solano, 2005). En su forma de cálculo incorpora una ecuación de promedio armónico no ponderado, cuya fórmula es la siguiente (ecuación 2):

$$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (2)$$

Donde F_1 , es el porcentaje de parámetros que exceden la norma (alcance); F_2 el porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma (frecuencia) y F_3 la magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple. La clasificación del índice se desarrolló en una escala de cero a cien: excelente, entre 95 y 100 unidades; buena, entre 80 y 94 unidades; aceptable, entre 65 y 79 unidades; marginal, entre 45 y 64 unidades y pobre, entre 0 y 44 unidades (Fernández & Solano, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrolló un estudio exploratorio descriptivo en el cuerpo de agua de Guaymaral, iniciando con la toma de muestras en puntos que ofrecían facilidad de acceso, seguridad, representatividad y un flujo permanente de agua (mapa 1). Se realizó la recolección en cuatro épocas diferentes: una de transición de temporada seca a lluviosa en el mes de agosto de 2015, una de altas precipitaciones en el mes de noviembre del mismo año; en la temporada seca en el mes de febrero y en la transición de temporada lluviosa a seca en el mes de abril de 2016, abarcando un ciclo climatológico completo. Es importante resaltar que el periodo de toma de muestras estuvo influenciado por la ocurrencia del fenómeno de El Niño en 2015-2016, el cual fue uno de los más fuertes de los últimos 50 años (Fenómeno de El Niño, 08 de enero de 2016).



Mapa I. Área de estudio sector Guaymaral

Fuente: Elaboración propia, con base en Google Maps

La toma de muestras se realizó siguiendo el protocolo establecido por el IDEAM (2007) para análisis de parámetros fisicoquímicos. Las variables de pH, conductividad y oxígeno disuelto fueron establecidas *in situ* empleando una sonda multiparamétrica HACH® HQD. En laboratorio se emplearon los métodos descritos por el *Standard Methods* (APHA, WWA & WEF, 1998) para sólidos suspendidos totales (2540-D), DBO (5210-B), DQO (5220-D), fósforo total (4500-B), coliformes fecales (9223-B), grasas y aceites (5520-D) y tensoactivos (5540-C); para la determinación del nitrógeno se empleó el método Kjendal.

El análisis estadístico consistió en la aplicación del análisis de componentes principales (ACP), un método de análisis multivariante que permite la síntesis de información recolectada en un estudio (Guzmán-Colis, et al., 2011). Se realizó el análisis a partir de una matriz de cálculo (192 casos), conformada por los valores de las 11 variables monitorizadas y precipitación registrada en las campañas realizadas, en cada uno de los 4 puntos muestreados en el período de tiempo evaluado.

RESULTADOS

Parámetros Fisicoquímicos

Los valores obtenidos para cada uno de los puntos de muestreo en el periodo 2015-2016 se registran en la tabla 1. Los valores de oxígeno disuelto se ubicaron en el rango entre 0,1 y 7,91 mg/L; el punto con valor más alto de este parámetro fue el número 4 (5,32 mg/L en promedio) y el más bajo el punto 2 (0,98 mg/L en promedio); la época que presentó en promedio los valores más altos para todos los puntos fue la temporada de lluvias con un valor de 3,31 mg/L.

El pH mostró valores neutros en el período de transición de temporada seca a lluviosa (entre 7,15 y 7,5 unidades); ligeramente ácido (entre 6,4 y 6,87 unidades) y alcalino en la temporada de sequía (entre 8 y 11 unidades). La DBO registró el valor más bajo en el punto 4 (promedio de 16,67 mg/L); en contraste con el punto 1 (promedio de 21,66 mg/L), el rango de este parámetro se ubicó entre los 15 y 25 mg/L.

en todas las épocas evaluadas. En el punto 4 fueron observadas las concentraciones más bajas de la DQO, mostrando los valores más bajos durante la época de transición de temporada lluviosa a seca (138,45 mg/L);

en el mismo punto se registró el promedio más alto de todos los lugares de muestreo con 302 mg/L para este parámetro.

Tabla I. Resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el sector Guaymaral entre agosto de 2015 y abril de 2016

		O.D (mg / L)	pH	DBO (mg / L)	DQO (mg / L)	N total (mg / L)	P total (mg / L)	C. F. (NMP / 100mL)	G y A (mg / L)	SST (mg / L)	Tnsact* (mg / L)	Conduct (μ S / cm)	Precipitación (mm)
Ago- 15	1	0,230	7,500	21,028	346,666	41,4	3,95	8,00E+05	1,19	93	4,27	529	0,99
	2	0,300	7,320	21,365	320	40,6	5,46	1,00E+06	1,19	66	5,4	543	0,99
	3	0,720	7,380	18,601	316,840	36,1	5,01	4,00E+04	1,19	38	4,95	550	0,99
	4	5,570	7,150	15,324	150	0,53	0,09	3,40E+04	1,19	26	1,22	370	0,99
Nov- 15	1	1,290	6,870	25,144	316	13,4	0,3	8,40E+05	1,19	47	1,6	379	6,68
	2	0,380	6,400	25,198	294,21	7,6	0,35	1,50E+06	1,19	32	1,78	355	6,68
	3	0,700	6,690	22,092	271,620	12,9	0,3	1,10E+06	1,19	20	1,64	332	6,68
	4	7,910	6,590	17,971	138,475	7,6	0,34	7,90E+04	1,19	61	0,41	507	6,68
Feb- 16	1	0,200	9,220	18,310	284	8,12	2,37	1,20E+07	20	25	6,18	557	0,65
	2	0,280	10,110	24,801	306	16,2	4,1	1,10E+07	15	20	8,82	551	0,65
	3	0,170	8,300	17,178	292	19,3	3,71	7,00E+06	14	40	6,71	559	0,65
	4	3,380	10,240	15,975	250	1,95	1,34	2,40E+02	5	73,333	0,06	709	0,65
Abr- 16	1	2,790	7,150	22,180	236	2,73	<0,1	7,00E+04	2,48	33	0,37	157,8	3,35
	2	2,980	7,190	18,600	266	1,82	<0,1	1,70E+04	1,19	33	0,34	137,7	3,35
	3	3,050	7,270	21,550	212	1,82	<0,1	1,00E+04	1,19	16	0,34	138,2	3,35
	4	4,420	8,400	17,425	198	17,9	<0,1	2,00E+01	1,25	40	0,06	650	3,35

*Tnsact: Tensoactivos.

Fuente: elaboración propia

Las concentraciones más altas de nitrógeno total fueron determinadas para la época de transición de temporada seca a lluviosa (con un promedio de 29,65 mg/L); en contraste, las concentraciones más bajas (promedio de 6,06 mg/L) fueron observadas para la época de lluvias. Las concentraciones de fósforo total oscilaron entre los 0,09 mg/L, durante la época de lluvia, y los 5,46 mg/L durante la época de transición de temporada seca a lluviosa. Las concentraciones de este parámetro fueron menores en el punto 4 (0,45 mg/L en promedio) y el punto 2 presentó las más altas (2,5 mg/L en promedio).

Durante la temporada seca se observaron las mayores concentraciones de coliformes fecales del período de estudio (en promedio $7,5 \times 10^6$ NMP / 100 mL). En los puntos 1, 2 y 3, se observaron concentraciones de este parámetro de más de cuatro órdenes de magnitud. Las grasas y aceites prácticamente tuvieron

concentraciones iguales (entre 1,19 y 2,48 mg/L) para todas las épocas de muestreo, con excepción de la época de sequía en la cual se registraron los valores máximos, especialmente en el punto 1 que tuvo el pico más alto (20 mg/L).

Para el parámetro de sólidos suspendidos totales, el punto 4 registró valores superiores a los demás puntos de muestreo, con excepción de la época de transición de temporada seca a lluviosa (40 mg/L para la época de lluvia; 61 mg/L para la época de transición de lluviosa a seca y 73,33 mg/L para la época seca). En general, se observa que el rango de este parámetro en el período de estudio evaluado osciló entre los 93 mg/L y los 16 mg/L. El contenido de tensoactivos registró las mayores concentraciones en cada época de muestreo en el punto 2 (8,82 mg/L para la época seca; 5,4 mg/L para la época de transición de seca a lluvia; 1,78 para la época de transición de lluvia a seca

y 0,34 para la época de lluvia). El punto 4 fue el de menor registro, con una concentración promedio de 0,43 mg/L). Los datos de conductividad tuvieron en la época seca los valores más altos (594 $\mu\text{S}/\text{cm}$), seguida de la época de transición entre seca y lluvia. Para la conductividad se registraron valores entre 137 y 709 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El punto 4 mostró en 3 campañas de muestreo, con excepción de la de transición entre temporada seca y lluviosa (la primera campaña), valores de conductividad superiores para los registrados en los demás puntos en las mismas épocas.

Resultados ICA metodología UWQI-IDEAM

Mediante la aplicación de la ecuación 1 se determinó el ICA-IDEAM para cada campaña de muestreo y punto monitorizado en el sector Guaymaral (figura 1). El promedio observado para cada punto es de 0,49 para el punto 1; 0,53, para el punto 2; 0,52, para el punto 3, y 0,599, para el punto 4 (siendo el de mayor valor).

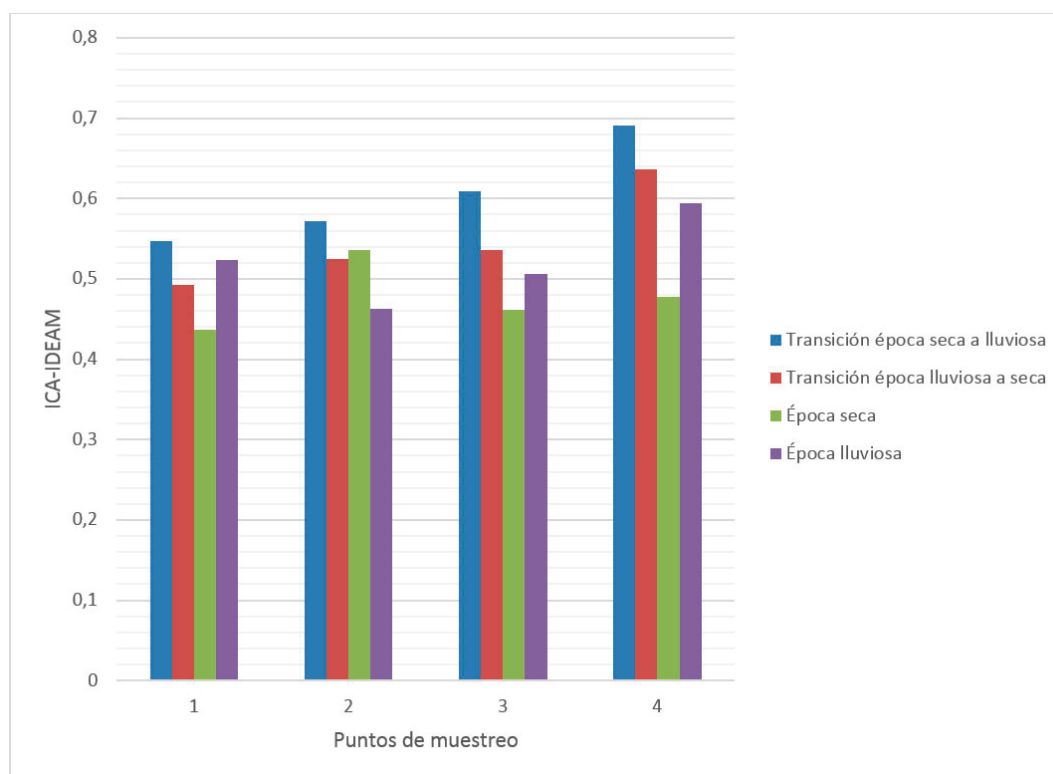


Figura 1. Valores de ICA-IDEAM para cada sitio de estudio en el sector Guaymaral durante 2015 II-2016 I

Fuente: elaboración propia

Se observa que el ICA del IDEAM presenta una clasificación de regular para todos los puntos en la época de transición seca a lluvias (en promedio de 0,60); una clasificación de regular para 3 puntos (con excepción del punto 1) en la época de transición de lluvia a seca; una clasificación de mala para tres puntos (con excepción del punto 2) en la época de seca y una clasificación de regular para tres puntos (con excepción del punto 2).

El análisis temporal del ICA muestra que existen diferencias entre las épocas de muestreo. En la época de transición de seca a lluvias la calidad, en general, para el sector Guaymaral fue de 0,60 unidades, mientras que en la época seca se tuvo una calidad de 0,47 unidades (tabla 2).

Tabla 2. ICA-IDEAM para cada mes evaluado

Temporada climática	Punto de muestreo	ICA-IDEAM	Clasificación	ICA-IDEAM promedio	Clasificación ICA-IDEAM promedio
Transición seca a lluviosa	1	0,547	Regular	0,604	Regular
	2	0,571	Regular		
	3	0,609	Regular		
	4	0,690	Regular		
Transición de lluvia a seca	1	0,492	Mala	0,54	Regular
	2	0,524	Regular		
	3	0,536	Regular		
	4	0,637	Regular		
Seca	1	0,437	Mala	0,47	Mala
	2	0,536	Regular		
	3	0,462	Mala		
	4	0,478	Mala		
Lluvias	1	0,523	Regular	0,52	Regular
	2	0,462	Mala		
	3	0,505	Regular		
	4	0,594	Regular		

Fuente: elaboración propia

La clasificación regular, determinada para el sector Guaymaral, indica que la calidad del agua se encuentra en un estado que se aleja de las condiciones naturales en algunas ocasiones, teniendo limitaciones en algunos de los usos potenciales que puede tener este cuerpo de agua.

Resultados ICA metodología CWQI-SDA

La variación espacial del ICA de la SDA fue obtenida a partir de la ecuación 2, para cada punto de muestreo. Debido a que esta metodología realiza la comparación de los valores obtenidos con estándares legislativos para un cuerpo de agua, se empleó la Resolución 573 I de 2008, la cual determina los objetivos de calidad de agua para el canal Torca, cuenca a la que pertenece el humedal Torca-Guaymaral. Los resultados muestran que el punto de menor ICA fue el punto 1 (24,343), seguido del 3 (30,711) y del 2 (37,443); mientras que el punto 4 (75,77) superó en más de dos veces los demás valores registrados (figura 2).

Los peores valores del ICA-SDA se localizan sobre el cuerpo de agua principal del sector Guaymaral (puntos 1, 2 y 3), indicando que sus condiciones en este sitio

se alejan en repetidas ocasiones de las ideales para albergar una dinámica ecológica correcta. Se observa que los valores reportados para los parámetros monitorizados en los puntos 1 y 2 incumplen, en al menos una campaña de muestreo, los objetivos de calidad de agua para la cuenca, con excepción de la DBO. En el punto 3 se cumplen en todas las campañas de muestreo los objetivos para pH, DBO y SST, y en el punto 4 solo se incumplen los objetivos en al menos una vez para el pH, fósforo total, SST y tensoactivos.

Análisis estadístico

El análisis de componentes principales presentó una variabilidad acumulada en los dos primeros factores del 64,78 %, que es estadísticamente representativo para explicar los eventos a partir de los componentes. La figura 3 muestra el grado de correlación entre las variables observadas y los factores 1 y 2. Las variables DBO, N total, DQO, SST, P total y tensoactivos presentaron las correlaciones más altas al ubicarse en el primer cuadrante de la gráfica. Estas variables están poco relacionadas con la precipitación registrada durante el período de estudio, dado que se presentan en el cuadrante 2. Se puede observar que los parámetros registrados en el cuadrante 1 tienen

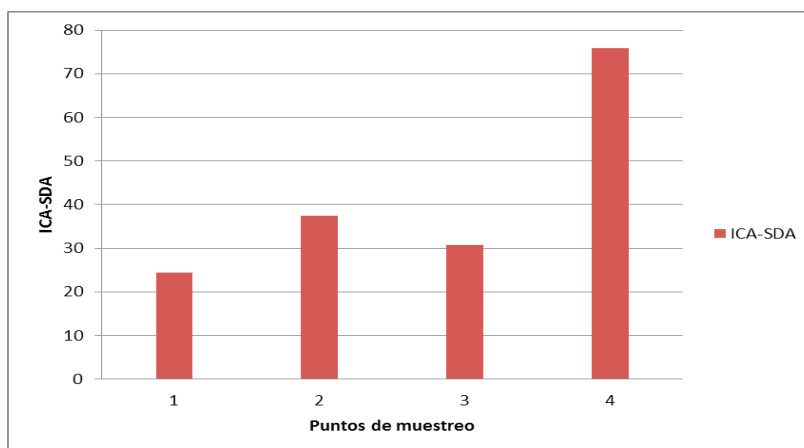


Figura 2. Valores del ICA-SDA para cada sitio de estudio en el sector Guaymaral durante 2015 II-2016 I

Fuente: elaboración propia

una correlación negativa con el oxígeno disuelto (ubicado en el cuadrante 3) al situarse en cuadrantes opuestos, lo cual concuerda con lo observado en

los fundamentos teóricos ya que la degradación y la oxidación de la materia presente en el agua provocan la reducción del oxígeno disuelto.

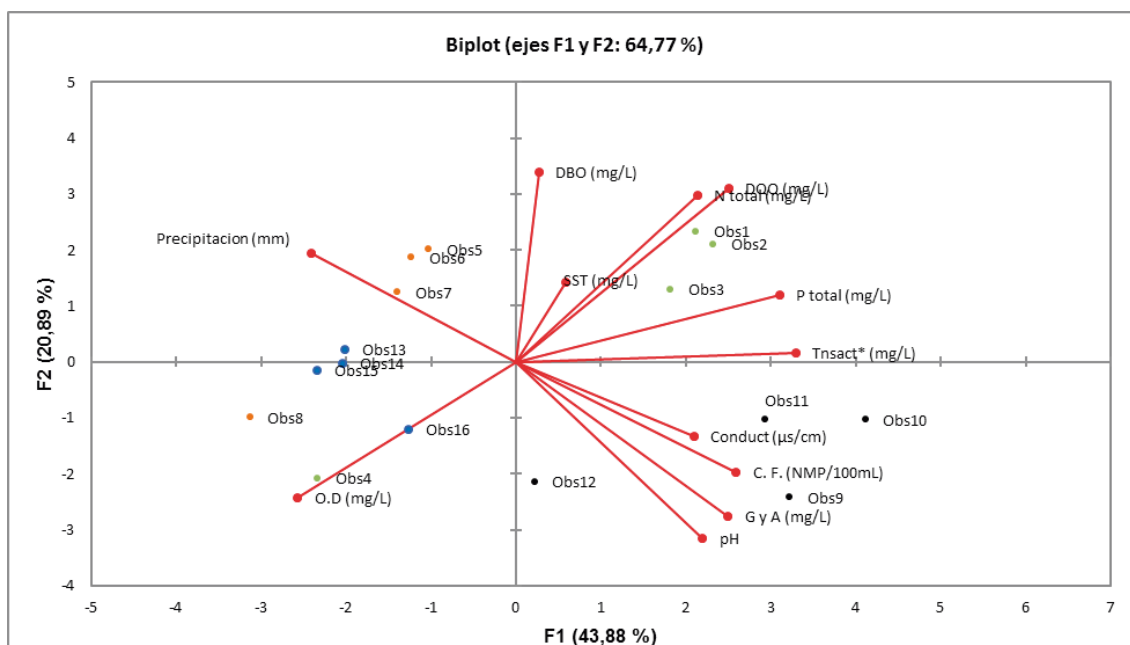


Figura 3. Análisis de componentes principales espacio-temporal para el sector Guaymaral

Fuente: elaboración propia

La conductividad, coliformes totales, pH y grasas y aceites presentan una relación inversamente proporcional con la precipitación al ubicarse en cuadrantes opuestos, lo anterior muestra que al aumentar el nivel de agua por efecto de la precipitación hace que estos parámetros se diluyan, reduciendo su concentración en el agua.

En la figura 3 también es posible observar la variación en las diferentes épocas analizadas, la época de transición de temporada seca a lluviosa se distingue con color verde, la temporada de transición de lluvia a seca, con color naranja, la temporada seca de color negro y la temporada de lluvia por el color azul. Cada una de las observaciones y su correspondencia con las campañas y puntos muestreados se observan en la tabla 3. Se distingue que las campañas de muestreo se encuentran segregadas para los puntos 1, 2 y 3 en cada uno de los cuadrantes; sin embargo, para el punto 4, las campañas tienden a agruparse en el cuadrante III. La época de transición de temporada seca a lluviosa se asocia a concentraciones altas de nutrientes (P total y N total), DBO, DQO, SST y tensoactivos; la época seca se asocia con concentraciones altas de conductividad, coliformes, grasas y aceites, y pH.

Tabla 3. Clasificación de observaciones para el ACP del sector Guaymaral, con base en las épocas y puntos monitorizados

Temporada	Punto	OBSERVACIÓN
Transición seca a lluvia	1	Obs1
	2	Obs2
	3	Obs3
	4	Obs4
Transición lluvia a seca	1	Obs5
	2	Obs6
	3	Obs7
	4	Obs8
Seca	1	Obs9
	2	Obs10
	3	Obs11
	4	Obs12
Lluvia	1	Obs13
	2	Obs14
	3	Obs15
	4	Obs16

Fuente: elaboración propia

DISCUSIÓN

El comportamiento del oxígeno disuelto (OD) en los puntos 1, 2 y 3 demuestra que persisten los vertimientos al sector Guaymaral, los cuales, además de traer consigo materia orgánica, aportan compuestos de difícil degradación biológica. La alta correlación entre el OD y la DQO (-0,93) muestra que gran cantidad de oxígeno presente es consumido por procesos de oxidación (Ramírez, Restrepo & Viña, 1997). Los puntos con influencia de vertimientos (en el punto 1: “La Margarita del Ocho” y en el 2: “Bima”) tuvieron un menor promedio en los niveles de oxígeno, por debajo del objetivo de calidad para la cuenca, 2 mg/L (Bima y Escuela Colombiana de Ingeniería, 4 de abril de 2016; Suspenden vertimientos a 4 empresas, 4 de abril de 2016).

El punto 4 tuvo niveles altos de oxígeno disuelto (superiores a 2 mg/L) al tratarse de un cuerpo de agua contiguo al principal, sin influencia de vertimientos residenciales. No obstante, presentó niveles bajos de este parámetro debido a la reducción del espejo de agua por acción del fenómeno de El Niño, en la temporada seca. El Ph, aunque no presentó correlaciones altas con las demás variables, tuvo una moderada (0,6) con la conductividad; este parámetro se ve influenciado por la evaporación del cuerpo de agua, los procesos biológicos, las fuentes de contaminación y la concentración de CO₂ y temperatura. En la época seca se registraron los valores más altos de pH al estar en una mayor concentración los iones carbonatos gracias a los bajos niveles del agua. La menor variación del pH se presentó en el punto 2, relacionada con la vegetación acuática presente, lo que permite una asimilación del carbono presente en el agua (Fuentes & Massol-Deyá, 2002; Aguilar, Montes, Ramírez & Torres, 1992, p. 35).

La conductividad aumentó en las épocas de menores precipitaciones (transición de seca a lluviosa y seca). Se registraron los mayores valores de conductividad en la temporada seca, debido a la fuerte influencia del fenómeno de El Niño, que causa un aumento de temperatura y bajas precipitaciones, promoviendo la mineralización de las sales presentes en el agua; esto se evidenció con mayor intensidad en el punto 4 (Liu, Weller, Correll & Jordán, 2000; Aguilar et al., 1992, p. 35). Se encontró una correlación moderada (0,48) entre la conductividad y la concentración de sólidos disueltos, sustentada en que la relación entre los dos parámetros es directamente proporcional (Miranda & Villamil, 2010).

Los puntos de mayor DBO registrada fueron el 1 y 3, como consecuencia de la materia orgánica proveniente del humedal Torca y los vertimientos que llegan al humedal. Es importante destacar que en ninguna de las colectas realizadas la DBO fue mayor al objetivo de calidad para la cuenca Torca (100 mg/L), lo que permite establecer que la mayor demanda de oxígeno que se presenta en este cuerpo es debida a materia difícilmente biodegradable.

En el caso de la DQO, los datos correspondientes a los puntos 1, 2 y 3 demuestran que los objetivos de calidad de agua para esta cuenca definidos para el año 2018 (250 mg/L) se superan en todas las mediciones, a excepción de la última campaña, en donde ningún punto superó el objetivo de calidad de agua para este parámetro. Lo anterior demuestra que existe una relación directa entre este parámetro y los vertimientos, puesto que en el mes de abril fueron sellados a los principales responsables de estos en el sector Guaymaral (Bima y Escuela Colombiana de Ingeniería, 4 de abril de 2016; Suspenden vertimientos a 4 empresas, 4 de abril de 2016).

En los tres primeros puntos se superó el valor de DQO para el objetivo de calidad de agua; por tanto, se realizó el cálculo de la relación DBO / DQO en las campañas de muestreo respectivas. Se obtuvo una relación de 0,061; 0,080; 0,064 y 0,0939 para el punto 1; 0,067; 0,086; 0,081 y 0,069 para el punto 2; 0,059; 0,081; 0,059 y 0,101 para el punto 3. Lo anterior indica que el consumo de oxígeno en el cuerpo de agua está relacionado con especies de difícil degradación por parte de los microorganismos, puesto que la relación DBO / DQO fue inferior a 0,3 (Aziz & Tebbutt, 1980).

Los sólidos suspendidos totales se deben principalmente a causa de procesos erosivos y reducción en los niveles de agua que aumenta la cantidad de minerales en la misma (Ramírez et al., 1997). Es por esto que en las temporadas de transición de seca a lluviosa, y seca se observan los valores más altos de este parámetro.

En la época de transición de temporada seca a lluviosa, se registró el mayor valor de concentración de nitrógeno total para los 3 primeros puntos, lo que indica que el aporte de nitrógeno proveniente de los vertimientos domésticos fue mayor, ya que esta es una de las fuentes principales de nitrógeno en el agua. Es importante mencionar que los procesos de metabolización del nitrógeno orgánico y amoniacal se ven favorecidos por niveles de oxígeno disuelto mayores a 0,3 mg/L y pH entre 6 y 9,6 unidades; estos

valores no fueron registrados en la temporada seca y, por tanto, los niveles de nitrógeno no fueron tan altos en esa época (Fuentes & Massol-Deyá, 2002).

El fósforo es un elemento que entra al sistema acuático de forma natural a través del metabolismo de animales y vegetales, lixiviación de las rocas y transporte de nutrientes desde los suelos; es por esto que cuando se detectan en fuentes de agua concentraciones elevadas de este elemento, se asocia el aporte de actividades humanas como la agricultura y vertimientos domésticos e industriales. Se encontraron correlaciones positivas del fósforo con el nitrógeno (0,83) y con los tensoactivos (0,79), teniendo un importante aporte de estos en el sector Guaymaral. En condiciones de bajo oxígeno disuelto el crecimiento de los organismos vegetales es reducido, lo que trae como consecuencia que los niveles de fósforo aumenten (tal como sucedió en las épocas de transición de seca a lluviosa y la seca). Cuando se presentan mayores condiciones oxidantes, el fósforo queda ligado a los sedimentos reduciendo su concentración en la columna de agua, y por ello se observa una reducción en los meses transición de lluvias a seca y lluviosa (Henry & Heinke, 1999). Al calcular relación N / P, se obtuvo un valor promedio de 27,89; esto indica que el elemento limitante es el fósforo para este cuerpo de agua (Ávila, 2003; Rivas et al., 2009).

Los coliformes fecales son un indicador de contaminación fecal en las aguas, ya que se encuentran exclusivamente en las heces de animales de sangre caliente. En el caso del punto 4, se evidencia que la concentración más alta tuvo lugar en medio de la época de transición de lluvia a seca, debido a la escorrentía producida por la lluvia (Behrends, et al. 2014). Se encontraron correlaciones altas entre los coliformes, y grasas y aceites (0,96), y los tensoactivos (0,79), probablemente relacionadas al metabolismo de estos microorganismos, principalmente de la *Escherichia coli*, en el cual se crean enzimas llamadas lipasas, que son capaces de hidrolizar los triglicéridos en diglicéridos, monoglicéridos, ácidos grasos y glicerol (Iram & Cronan 2006).

Las grasas y aceites son compuestos que, debido a su baja solubilidad, tienden a formar una película muy fina en la superficie del agua, lo cual interfiere en el intercambio del oxígeno proveniente de la atmósfera (Cisterna & Peña, s. f.), lo que constituye un factor influyente en la cantidad de oxígeno disuelta medida. Se nota una correlación entre tensoactivos, y grasas y aceites (0,71) debida a la acción de arrastre que

ejerce el primer compuesto sobre el segundo. El punto 3 fue el de mayor concentración en grasas y aceites; de igual forma, se evidenció un aumento de este parámetro en la temporada seca, permitiendo deducir que el mayor aporte de estos contaminantes lo poseen los vertimientos generados en esa zona.

Los tensoactivos encontrados en el estudio muestran una evolución acorde con la tendencia climática del sector, es decir, se registraron los puntos más bajos en las épocas de mayores precipitaciones, mostrando que un aumento en el nivel de agua permite diluir más fácilmente su concentración y facilita la actividad microbiana para su degradación. Es importante resaltar que el mayor valor registrado de este parámetro correspondió al punto 1, producto del impacto de las descargas en el humedal. Los puntos 2 y 3 mostraron niveles ligeramente menores, lo cual refleja que existe una asimilación por parte del cuerpo de agua principal de este compuesto, y / o los vertimientos generados aguas abajo no contienen cantidades significativas de este elemento en el agua, lo que resulta ser favorable (Ramos, Sepúlveda & Villalobos, 2002).

En la tabla 4 se muestran los ICA calculados para cada punto de muestreo. Se observa que el ICA de la metodología *UWQI*, en adelante ICA-IDEAM, para el punto 1 tuvo una calidad de agua regular (0,5 unidades), en contraste con el punto 4, el de menor intervención antrópica, el cual tuvo el promedio más alto (0,599). Se observa una relación positiva entre la precipitación y el ICA-IDEAM, puesto que en la temporada de transición de seca a lluviosa y temporada de lluvias, donde se registraron mayores niveles de precipitación, el ICA-IDEAM tuvo sus valores más altos (0,604 y 0,52), y en contraste, en la temporada seca, se obtuvo el valor más bajo (0,47). Los subíndices para oxígeno disuelto y pH tuvieron una caída mayor en comparación con los demás debido a la influencia del fenómeno de El Niño en la temporada seca, mostrando alta vulnerabilidad en el cuerpo de agua por la influencia de la anomalía climática; subíndices como el de pH y oxígeno disuelto en dicha temporada decrecieron en sus valores. Los valores de los subíndices de DQO, OD y relación N / P muestran que el humedal está en proceso de eutrofización (Ávila, 2003).

Tabla 4. ICA promedio para cada metodología obtenida de muestreo

Punto de muestreo	ICA UWQI-IDEAM	Clasificación	ICA CWQI-SDA	Clasificación
1	0,500	Regular	24,343	Pobre
2	0,523	Regular	37,443	Pobre
3	0,528	Regular	30,711	Pobre
4	0,599	Regular	75,778	Aceptable

Fuente: elaboración propia

Respecto al ICA de la metodología *CWQI*, en adelante ICA-SDA, se observa que el cuerpo principal del sector Guaymaral (donde se localizan los tres primeros puntos), presenta condiciones muy alejadas de los valores que un cuerpo de agua como este debería tener. Por sus funciones ecológicas y ambientales el humedal debería estar entre aceptable y buena, pero no fue así; los registros muestran que la calidad del agua fue pobre en el período de estudio, lo que quiere decir que las condiciones en este sitio se alejan de las ideales para mantener los servicios ambientales de un humedal. Se observa que la gran mayoría de veces, los valores reportados para tensoactivos, grasas y aceites, coliformes, DQO y oxígeno disuelto se alejan de los objetivos de calidad

para la cuenca, demostrando la influencia antrópica que está sufriendo el sector Guaymaral.

La ecuación matemática del ICA-SDA permite evaluar la calidad de agua de forma más integral, al considerar (en los factores de cálculo) la variación y comparación de parámetros considerados en la normativa que favorecen la evaluación en cuerpos de agua con amplias variaciones de calidad en el tiempo y facilitan su aplicación en condiciones particulares a la zona de estudio.

Tanto los ICA calculados por las dos metodologías como el ACP ponen de manifiesto que el punto 4 es el que presenta en general una mejor calidad de

agua debido a que se encuentra alejado de influencia antrópica y de tributarios que puedan afectar su calidad.

Como dato atípico se observó la influencia del fenómeno de El Niño, especialmente en la temporada seca, lo cual afectó todos los puntos monitorizados, principalmente en la conductividad, pH y oxígeno disuelto, especialmente en el punto 4. Durante la época seca se redujo notoriamente el espejo de agua en este punto en más de un metro, demostrando la alta vulnerabilidad de este cuerpo de agua a eventos climáticos extremos. Espinal, Sedeño y López (2013) indican que durante épocas de sequía la capacidad de dilución de los ecosistemas acuáticos es baja, lo que puede incrementar su deterioro al incrementar los tiempos de retención en lagos, embalses y humedales; las épocas de sequía implican un aumento en la temperatura del agua y la salinidad, lo que causa un deterioro generalizado de la calidad de agua. En el sector Guaymaral se detectó un aumento en todos los puntos de los valores de conductividad durante la temporada seca.

CONCLUSIONES

Los puntos 1 y 2 presentaron valores de calidad del agua bajos, debido a la influencia de las descargas de aguas residuales que reciben, especialmente del sector de Torca y separador de la autopista norte en la entrada, y el centro comercial Bima en la salida. En el punto 2, se alcanza a registrar una leve mejora en la calidad del humedal, indicando que se producen procesos de degradación y metabolización para algunos de los parámetros analizados.

El punto 4 presentó en general niveles de calidad mejores que los demás, y se vio afectado en los parámetros de conductividad, sólidos suspendidos totales y fósforo total, a causa de las dinámicas naturales que un cuerpo de agua superficial presenta a lo largo de un año; sin embargo, elementos como tensoactivos, los cuales no son de origen natural, fueron detectados indicando que de alguna forma llegan vertimientos a este cuerpo de agua que, gracias a su estado de calidad, son asimilados.

Las variaciones temporales indican que en el sector Guaymaral la calidad del agua empeoró en la época en que las precipitaciones fueron menores (época seca); sin embargo, debido a la presencia del fenómeno de El Niño, se sugiere adelantar un plan de monitorización constante para evitar que estos eventos enmascaren

otros efectos que por cuenta de los vertimientos se puedan presentar.

La metodología del ICA-IDEAM simplifica la interpretación, identificación de tendencias (deterioro, estabilidad o recuperación) y toma de decisiones para un cuerpo de agua, ya que emplea una ecuación de tipo aditivo o suma ponderada, por lo que su aplicación en estudios puntuales es muy recomendada. Sin embargo, tiene el inconveniente de ser menos sensible a variaciones extremas en la calidad del agua, por lo que su uso es limitado para evaluación de calidad de agua en fuentes superficiales que sufren alteraciones imprevistas extremas en las características fisicoquímicas y microbiológicas, como, por ejemplo, el fenómeno de El Niño. El ICA empleado por el IDEAM es una excelente herramienta para informar sobre tendencias y tomar decisiones, ya que expresa de forma más rápida el estado en el que se encuentra un cuerpo de agua. Es ideal para evaluar, por ejemplo, la amenaza a la vida acuática o algún uso específico de la misma.

La metodología ICA-SDA tiene la limitante de no poder informar el estado de calidad de agua para un uso específico y está diseñada de forma tal que pueda describir la calidad de agua de forma continua, por lo que las variaciones puntuales en este aspecto no pueden ser identificadas de forma rápida. Sin embargo, sí permite cuantificar la variación de la calidad en el cuerpo de agua luego de la ocurrencia de eventos climáticos extremos como el fenómeno de El Niño, debido a que los cambios en las variables que la componen se reflejan de mejor forma en el índice.

Para los estudios de evolución temporal de índices de calidad de agua es mejor emplear aquellos que usen en su forma de cálculo ecuaciones con promedio armónico no ponderado, ya que estos son más sensibles a los cambios en las variables individuales. Es decir que entre los dos índices empleados en el presente estudio, para un estudio de variación espaciotemporal, es más funcional el índice empleado por la Secretaría Distrital de Ambiente.

REFERENCIAS

- Aguilar, J.; Montes, T.; Ramírez, L. & Torres, A. (1992). *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. España: Instituto Técnico GeoMinero de España.

- American Public Health Association [APHA]; American Water Works Association [AWWA] & Water Environment Federation [WEF]. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington: Autor.
- Ávila, P. (Ed.). (2003). *Agua, medio ambiente y desarrollo en el siglo XXI. México desde una perspectiva global y regional*. México: El Colegio de Michoacán
- Aziz, J. A. & Tebbutt, T. H. (1980). Significance of COD, BOD and TOC correlations in kinetic models of biological oxidation. *Water Research*, 14(4), 319-324. doi: 10.1016/0043-1354(80)90077-9
- Barbier, E. B.; Acreman, M. & Knowler, D. (1997). *Valoración económica de los humedales. Guía para decisores y planificadores*. Gland, Suiza: Oficina de la convención de Ramsar.
- Behrends, F., et al. (2014). Estimación de escenarios de contaminación por coliformes fecales en una microcuenca de la Pampa Ondulada de Argentina mediante el empleo de un modelo predictivo. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 46(2), 83-96.
- Bettin, M. A.; Alcaraz, M.; Benítez, A. & Flórez. (2007). *Plan de Manejo ambiental de los Humedales Torca-Guaymaral*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Bima y Escuela Colombiana de Ingeniería, responsables de contaminar humedales. (4 de abril de 2016). *El Espectador*. Recuperado de <http://www.elespectador.com/noticias/bogota/bima-y-escuela-colombiana-de-ingenieria-responsables-de-articulo-625289>
- Castro-Roa, D., Pinilla-Agudelo, G. (2014). Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. *Limnetica*, 33(2), 297-312
- Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América [CICEANA]. (s. f.). *Funciones y valores de los Humedales*. Disponible en: <http://www.ciceana.org.mx/contenido.php?cont=239>
- Cisterna, P. & Peña, D. (s. f.). *Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf>
- Contraloría de Bogotá. (2012). *Informe de actuación fiscal 120000*. Recuperado de http://pqr.contraloriabogota.gov.co/intranet/contenido/ControlesPORTAL/Pronunciamientos/2012/D23_Impacto%20ambiental%20de%20humedales%20torca%20y%20guaymaral.pdf
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente [DAMA]. (2006). *Política de Humedales del Distrito Capital*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá
- Espinal, T.; Sedeño, J. E. & López, E. (2013). Evaluación de la calidad de agua en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 147-163.
- Estévez, T. (2002). Thomas Van der Hammen una vida en defensa de la naturaleza. *Nómadas*, 17, 147-164.
- Fenómeno de El Niño actual es el segundo más fuerte en 50 años: IDEAM. (08 de enero de 2016). *El Colombiano*. Recuperado de <http://www.elcolombiano.com/colombia/fenomeno-de-el-nino-actual-es-el-segundo-mas-fuerte-en-50-anos-ideam-JB3407139>
- Fernández, J. & Solano, F. (2005). *Índices de calidad y contaminación del agua*. Pamplona: Universidad de Pamplona
- Fuentes, F. & Massol-Deyá, F. (2002). *Manual de laboratorios ecología de microorganismos*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico. Disponible en: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/>
- García, M.; Vargas, N. O.; Onofre, C.; Aguirre, S. & Sánchez, F. D. (2011). *Marco conceptual y metodológico para las evaluaciones regionales del agua*. Bogotá: IDEAM
- Guzmán-Colis, G. et al. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad de agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(2), 89-102.

- Henry, J. G. & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería ambiental*. México: Pearson Educación.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2007). Protocolo Estandarizado para Análisis de Aguas del IDEAM: Toma y preservación de muestras. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2011). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de calidad del agua superficial*. Bogotá: IDEAM
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). *Estudio nacional del agua 2014*. Bogotá: IDEAM.
- Iram, S. H. & Cronan, J. E. (2006). The beta-oxidation systems of *Escherichia coli* and *Salmonella enterica* are not functionally equivalent. *Journal of bacteriology*, 188(2), 599-607. doi: 10.1128/JB.188.2.599-608.2006
- Liu, Z. L., Weller, D. E., Correll, D. L. & Jordan, T. E. (2000). Effects of land cover and geology on stream chemistry in watersheds of Chesapeake Bay. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(6), 1349-1365. doi: 10.1111/j.1752-1688.2000.tb05731.x
- López-Barrera, E.; Plata, A. M. & Fuentes, M. (2015). *Humedal Torca-Guaymaral: iniciativas para su conservación*. Bogotá: Universidad Sergio Arboleda.
- Martínez, Y.; Díaz, M. C.; Vargas, P. L.; Rodas, J. C. & Díaz, C. A. (2004). Aproximación general a los humedales del distrito capital. En DAMA (Ed.), *Política de humedales del Distrito Capital* (pp. 27-44). Bogotá: DAMA.
- Miranda, L. L. & Villamil, M. P. (2010). *Evaluación de las configuraciones de sistemas de suministro de agua potable en condiciones de emergencia para la sabana de Bogotá*. (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de los Andes - Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química.
- Moreno, V.; García, J. F. & Villalba, J. C. (2010). *Descripción general de los humedales de Bogotá*. Sociedad Geográfica de Colombia. Disponible en: <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/humed.pdf>
- Pinilla, G. (2010). An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá City, Colombia. *Ecological Indicators*, 10, 848-856. doi: 10.1016/j.ecolind.2010.01.006
- Ramírez, A.; Restrepo, R. y Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153.
- Ramos, R.; Sepúlveda, R. & Villalobos, F. (2002). *El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis*. México: Universidad Autónoma de Baja California.
- Rivas, et al. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, 34(5), 308-314
- Soni, H. B. & Thomas, S. (2014). Assessment of surface water quality in relation to water quality index of tropical lentic environment, Central Gujarat, India. *International journal of environment*, 3(1), 168-176.
- Suspenden vertimientos a 4 empresas por contaminaciones. (4 de abril de 2016). *El Nuevo Siglo*. Recuperado de <http://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/4-2016-suspenden-vertimientos-4-empresas-por-contaminaciones>
- Torres, P.; Cruz, C. H. & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano una revisión crítica. *Revista Ingenierías*, 8(15), 79-94.
- Universidad Nacional de Colombia. (2012). *Plan de manejo ambiental de los humedales de Torca y Guaymaral*. (Plan de acción). Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- Yogendra, K. & Puttaiah, E. T. (2008). Determination of water quality index and sustainability of an urban waterbody in Shimoga Town, Karnataka. En M. Sengupta & R. Dalwani (Eds.), *Taal 2007: The 12th world lake conference* (pp. 342-346). Jaipur, India: Ministry of Environment and Forests, Government of India