

Artículo original

Estado ecológico del humedal Torca-Guaymaral basado en un índice de integridad biótica desarrollado para la comunidad fitoplanctónica

Ecological status of the Torca-Guaymaral wetland based on a biotic integrity index developed for the phytoplankton community

Camilo Fonseca-Barreto, Camilo B. García, Gabriel Pinilla-Agudelo*

Grupo de investigación “Biodiversidad, biotecnología y conservación de ecosistemas”, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

La integridad biótica del fitoplancton depende de las condiciones ambientales y es, asimismo, un indicador de la salud del ecosistema. En el presente estudio se tomaron muestras de fitoplancton y se registraron variables físicas y químicas en nueve estaciones del humedal Torca-Guaymaral tanto en la temporada seca como en la de lluvias. Se detectó un gradiente de contaminación en los sitios menos deteriorados del sector de Torca, así como en las estaciones más impactadas en la sección de Guaymaral. De 67 atributos del fitoplancton, se preseleccionaron 27 y, finalmente, se escogieron nueve métricas para la elaboración del índice de integridad biótica (IIB) del fitoplancton. El IIB reflejó adecuadamente la heterogeneidad espacial del sistema, identificando las estaciones con quebradas como sitios con buena integridad biótica, en tanto que algunos ambientes lénticos y de canal se consideraron áreas con menor integridad. Al parecer, las condiciones lólicas favorecen una mejor calidad del agua, mientras que los otros hábitats tienden a acumular contaminantes, lo que podría afectar la integridad del fitoplancton. El promedio general del IIB no mostró diferencias significativas entre las épocas climáticas, lo que sugiere una relativa estabilidad funcional del fitoplancton frente a la variación estacional. No obstante, las fluctuaciones a nivel local apuntan a la necesidad de hacer monitoreos de mayor resolución espacial y temporal. El índice propuesto es una primera aproximación que debe asumirse con precaución, pero constituye una herramienta útil para el seguimiento ecológico del humedal Torca-Guaymaral y aporta información importante para la implementación de evaluaciones bióticas en los humedales urbanos de Bogotá.

Palabras clave: atributos comunitarios; calidad del agua; humedales andinos; microalgas planctónicas; salud ecosistémica.

Abstract

The biotic integrity of phytoplankton communities depends on environmental conditions and serves as an indicator of ecosystem health. Here, we collected phytoplankton samples and recorded physical and chemical variables at nine stations in the Torca-Guaymaral wetland during both the rainy and dry seasons. We detected a pollution gradient from the least-deteriorated sites in the Torca sector to the most-impacted stations in the Guaymaral section. Of 67 phytoplankton attributes, we preselected 27 and determined nine metrics to develop a biotic integrity index (BII) for the wetland phytoplankton. The BII accurately reflected the system's spatial heterogeneity, identifying stream stations as sites with good integrity and some lentic and channel environments as areas with lower integrity. Apparently, lotic conditions favor water quality, while the other habitats tend to accumulate pollutants, which could affect phytoplankton integrity. The overall average BII did not differ significantly among climatic seasons, suggesting phytoplankton relative functional stability in the face of seasonal variation. However, local fluctuations indicate the need for monitoring at

Citación: Fonseca-Barreto C, et al. Estado ecológico del humedal Torca-Guaymaral basado en un índice de integridad biótica desarrollado para la comunidad fitoplanctónica. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):804-820, julio-septiembre de 2026. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3222>

Editor: Jhon Charles Donato

***Correspondencia:**

Gabriel Pinilla-Agudelo;
gapinillaa@unal.edu.co

Recibido: 13 de mayo de 2025

Aceptado: 9 de julio de 2026

Publicado en línea: 5 de agosto de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

higher spatial and temporal resolutions. The proposed index serves as a first approximation that should be considered with caution but constitutes a useful tool for ecological monitoring of the Torca-Guaymaral wetland and provides important information for implementing biotic assessments in Bogotá's urban wetlands.

Keywords: Andean wetlands; community attributes; ecosystem health; planktonic microalgae; water quality.

Introducción

Los humedales urbanos de Bogotá abarcan actualmente cerca de 800 hectáreas, lo que representa apenas entre el 2 y el 3 % de la extensión original que tenían a principios del siglo XX (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo**, 2017). A pesar de su drástica reducción, se reconoce su contribución fundamental al mantenimiento de la estructura ecológica de la ciudad (**Cortés-Ballén**, 2017) y la provisión de servicios ecosistémicos claves, como el control de inundaciones, la recarga de acuíferos, la conservación de la diversidad biológica de múltiples grupos de organismos y el soporte de valores culturales y paisajísticos (**Guillot & Pinilla**, 2017).

Frente al deterioro y la pérdida de estos ecosistemas, resulta imperativo implementar diversas acciones orientadas a su evaluación, restauración y manejo. En este sentido, una de las herramientas más útiles son los índices ecológicos, que permiten diagnosticar el estado de salud de los humedales. Las aproximaciones más simples se cimentan en variables abióticas, como los nutrientes, los iones, los gases disueltos y los aspectos geomorfológicos e hidrológicos (**Pinilla-Agudelo**, 2016). Sin embargo, otros enfoques incorporan las comunidades acuáticas y analizan aspectos como la composición taxonómica, la abundancia y la tolerancia a la contaminación, entre otras variables. Dentro de estas perspectivas biológicas, se destacan los índices de integridad biótica (IIB), que, además de considerar la estructura de las comunidades, integran un conjunto de rasgos funcionales y de historia de vida, tales como el tamaño, la forma del cuerpo, el tipo y duración del ciclo de vida, los modos de alimentación, las estrategias reproductivas y los mecanismos de dispersión, lo que los ubica dentro de los denominados índices multimétricos o multiatributo (**Karr et al.**, 2021).

Los atributos biológicos considerados en un IIB deben reflejar aspectos de composición, estructura y función de las comunidades acuáticas (**Schmitter-Soto**, 2014), de modo que el índice logre captar adecuadamente el grado de integridad biológica, la cual se define como la “capacidad de una comunidad de organismos para soportar y mantener una condición balanceada, integrada y adaptativa, conservando una composición, diversidad y organización funcional comparables a las de los hábitats naturales de una región” (**Karr**, 1981; **Karr & Dudley**, 1981). Cada atributo o métrica se asocia con una característica específica del sitio de muestreo y su conjunto permite caracterizar la integridad ecológica subyacente de dicho sitio (**Karr et al.**, 1986). Esta integridad está vinculada a la salud ecosistémica, un concepto planteado por **Schaeffer et al.** (1988) para explicar al público el estado ecológico. Debe entenderse como una metáfora y no como una propiedad fija, pues los sistemas naturales cambian constantemente y no tienen una condición óptima (**Calow**, 1992), ya que los ecosistemas fluctúan entre diversos estados debido a variaciones ambientales y no tienen una “mejor salud”, sino la capacidad de mantener su estructura, productividad, autonomía y resiliencia al estrés (**Lu et al.**, 2015). No obstante, el concepto de salud ecológica resulta útil para comunicar y guiar políticas que preserven el medio ambiente y el bienestar humano.

En el ámbito internacional hay numerosas experiencias sobre el desarrollo y aplicación de índices de integridad biológica basados en las algas planctónicas, tanto en ambientes lóticos (**Teng et al.**, 2014; **Al-Janabi et al.**, 2016; **Wu et al.**, 2019; **Huang et al.**, 2022), como en sistemas lénticos, principalmente lagos (**Kane et al.**, 2009; **Maulood et al.**, 2011; **Zhu et al.**, 2021; **Cao et al.**, 2024). En Bogotá, algunos estudios han desarrollado índices ecológicos y de calidad del agua para los humedales, con énfasis en variables tróficas

(concentración de clorofila-*a*, nitrógeno y fósforo) (Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017) y en otros factores físicos y químicos (Caho-Rodríguez & López-Barrera, 2017; Guillot, 2017a), mientras que otros han incorporado características biológicas de comunidades acuáticas, como la composición, la abundancia y la tolerancia de algas, macrófitas e invertebrados (Pinilla, 2010; Castro-Roa & Pinilla-Agudelo, 2014; Castro & Pinilla, 2017; Pinilla, 2017). Incluso se ha propuesto el uso de tasas de crecimiento de algas encapsuladas en alginato como indicadores del estado trófico (Pinilla *et al.*, 2021), pero hasta la fecha no se ha elaborado ningún IIB para los humedales de la ciudad.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una herramienta de evaluación ecológica para el humedal Torca-Guaymaral, un índice de integridad biótica basado en la comunidad fitoplanctónica (IIB-F). Este índice permitirá monitorear cambios futuros en la salud ecosistémica del humedal y servirá como insumo para su manejo y conservación, así como para la toma de decisiones en el contexto urbano de Bogotá.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el humedal Torca-Guaymaral, situado al norte de Bogotá, a 2.565 m s.n.m., en las coordenadas 4°48'21.07" N y 74°2'36.04" W. Este humedal se divide en dos sectores: Torca (24 ha), perteneciente a la localidad de Usaquén, y Guaymaral (49 ha), ubicado en la localidad de Suba. Ambos sectores están separados por la Autopista Norte, aunque se mantienen conectados hidráulicamente mediante alcantarillas estándar y o alcantarillas de caja (*box culverts*). El clima es frío (12 - 18 °C) y húmedo (500 a 1000 mm anuales); el régimen de precipitación es bimodal tetraestacional, con la primera época de lluvias entre marzo y mayo y la segunda entre septiembre y noviembre. El primer periodo seco ocurre entre diciembre y febrero y el segundo entre junio y agosto (Montoya-Rojas & Rivera-Marroquín, 2021).

El sector de Torca recibe el aporte hídrico del río homónimo, que fluye de sur a norte a través de un canal, así como de las quebradas Aguas Calientes, Patiño y San Juan, provenientes de los cerros orientales de la Sabana de Bogotá. El sector Guaymaral, además de recibir agua a través de las conexiones artificiales con la porción de Torca, se alimenta de las quebradas La Floresta, Cañiza, Novita y Torca. Todo el caudal hídrico del sistema drena finalmente al río Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017).

Muestreos y análisis de laboratorio

Los muestreos se hicieron el 21 de septiembre de 2021 (106,7 mm de precipitación), durante la segunda época de lluvias, y el 3 de febrero de 2022 (41,4 mm), durante la primera época seca del año. Los datos de precipitación se obtuvieron de la estación climática UDCA del IDEAM (2022). Se establecieron nueve estaciones de muestreo (Figura 1) distribuidas en tres tipos de hábitats según sus características fisiográficas: quebrada (Q, estaciones 1, 2 y 4), canal (C, estaciones 5, 6 y 7) y léntico (L, estaciones 3, 8 y 9). En cada estación y época climática se registraron *in situ* el pH, la temperatura del agua, el oxígeno disuelto, el porcentaje de saturación de oxígeno y la conductividad eléctrica mediante una sonda multiparamétrica HACH-HQ40d. Además, se recolectaron muestras de agua para medir en laboratorio las variables clorofila-*a*, cloruros, demanda biológica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), ortofosfatos, nitritos, nitratos y sólidos suspendidos totales, siguiendo las metodologías estándar de la American Public Health Association (Baird & Bridgewater, 2017). Para evaluar posibles diferencias temporales en las variables físicas y químicas entre las dos épocas climáticas, se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney porque los datos no presentaron normalidad.

Las muestras de fitoplancton se obtuvieron filtrando 30 L de agua a través de una red cónica con criba de 23 µm (Guillot & Pinilla, 2017). El concentrado se conservó con un volumen equivalente de solución Transeau (agua, etanol al 90 % y formol al 40 % en proporción 6:3:1). En total, se recolectaron 18 muestras, correspondientes a tres estaciones por hábitat, en dos épocas climáticas.

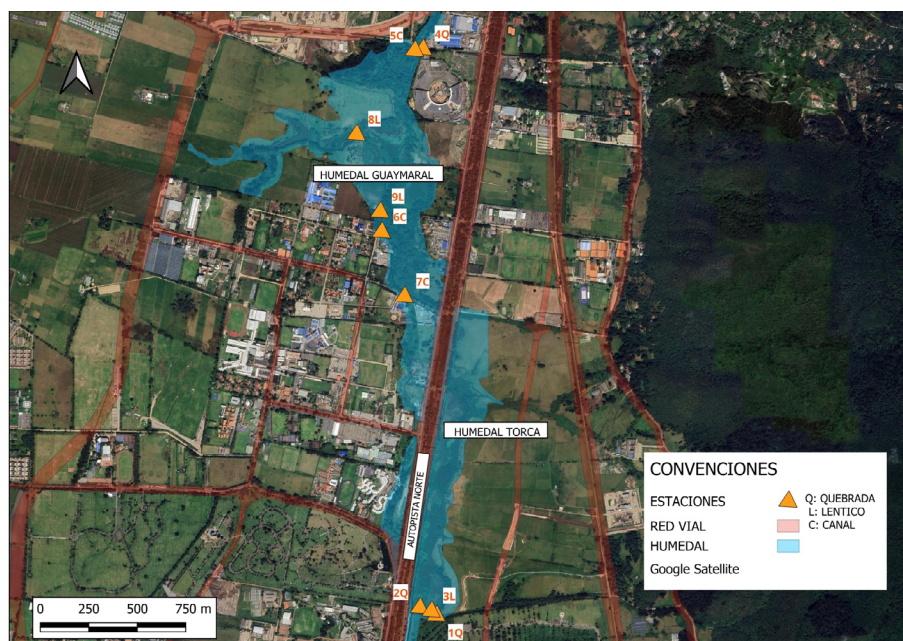


Figura 1. Ubicación del sistema hídrico Torca-Guaymaral y de las estaciones de muestreo

La identificación y el conteo de los organismos fitoplanctónicos se llevaron a cabo con cámaras Sedgwick-Rafter (50 mm de ancho x 20 mm de alto x 1 mm de profundidad, volumen: 1 ml). Las muestras se observaron a 20x y 40x (McAlice, 1971; LeGresley & McDermott, 2010). Cuando la densidad de algas o el contenido de materia orgánica eran elevados, la muestra se diluyó con agua destilada. El factor de dilución se utilizó posteriormente para calcular la densidad original. Los organismos se contaron hasta alcanzar 400 individuos del mismo taxón en las muestras de cada sitio (Francoeur *et al.*, 2013).

Las algas se identificaron hasta el nivel de género siempre que fue posible. Se emplearon claves y listados taxonómicos específicos, como los de Tell y Conforti (1986), Cardozo *et al.* (2005), Bicudo y Menezes (2006), Bellinger y Sigee (2010), Oliva-Martínez *et al.* (2014), Wehr *et al.* (2015), Necchi (2016), Dos Santos (2016) y González e Inostroza (2017). Toda la nomenclatura taxonómica se basó en Guiry y Guiry (2025). Se tomaron fotografías de los taxones utilizando un microscopio Leica con cámara equipado con el *software* de adquisición de imágenes LAS EZ. Las mediciones se realizaron con el programa ImageJ2 (Rueden *et al.*, 2017), siguiendo los modelos geométricos y las representaciones algorítmicas propuestas por Hillebrand *et al.* (1999) y Sun y Liu (2003).

Elaboración del índice de integridad biótica del fitoplancton (IIB-F)

Escogencia de los sitios de referencia. En primer lugar se hizo un análisis descriptivo de las variables ambientales mediante diagramas de violín complementados con diagramas de cajas y bigotes, con el fin de visualizar la variabilidad de dichos factores en el humedal. Posteriormente, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) a los promedios de las variables ambientales por sitio para identificar los gradientes ambientales y establecer grupos de sitios con características similares. Para este ACP se eliminó el porcentaje de saturación de oxígeno por estar estrechamente correlacionado con el oxígeno disuelto, y la temperatura por tener un coeficiente de variación muy bajo (menor del 10 %). En el ACP se incluyeron los promedios de datos físicos y químicos reportados por Pulido-López y Pinilla-Agudelo (2017) para El Salitre, considerado el humedal urbano con el menor grado de contaminación de la ciudad de Bogotá. A partir del ACP se definieron los lugares de referencia como aquellas estaciones con las mejores condiciones ambientales, es decir, los lugares menos perturbados disponibles en el sistema (Whittier *et al.*, 2007).

Determinación y selección de atributos candidatos del fitoplancton. Para seleccionar los rasgos más representativos del fitoplancton que pudieran formar parte del IIB-F, se empleó inicialmente la técnica gráfica de medias y bigotes (*box plots*), comparando los datos de los atributos candidatos de los sitios de referencia con los datos de los sitios alterados detectados mediante el ACP. El humedal El Salitre se incluyó como sitio de referencia adicional, para lo cual se utilizaron los datos reportados por **Pulido-López (2015)** y **Pulido-López y Pinilla-Agudelo (2017)**. Así, se seleccionaron como métricas candidatas aquellas cuyos bigotes (correspondientes al intervalo del 95 % del error estándar) en un determinado grupo no se superpusieron con los del otro grupo, pero que en caso de traslaparse, su media quedara por fuera de los bigotes del otro grupo. Posteriormente, se utilizó la razón señal:ruido (promedio del atributo/valor individual del atributo en cada sitio; **Wolterbeek et al., 1996**) de las variables preseleccionadas y los resultados se representaron mediante gráficas de cajas y bigotes. Cuando la razón señal:ruido se acercaba a 1 en los sitios contaminados, la métrica resultó poco adecuada, debido a que no reflejaba las variaciones en el gradiente de deterioro (**Guillot, 2017a**). Con las métricas seleccionadas en el paso anterior, se hizo un análisis de redundancia mediante la correlación de Spearman y se aplicó la corrección de Bonferroni para reducir la probabilidad de hallar resultados significativos por azar. Si los coeficientes de correlación correspondían a $r \leq 0,8$, los atributos no eran redundantes; en el caso de dos atributos que aportaban información ecológica similar y que tenían un $r > 0,8$ y un $p \leq 0,05$, se conservaba solo uno de ellos para los análisis posteriores; en estos casos, se mantenía el atributo de menor señal-ruido.

Estandarización y puntuación de los atributos seleccionados. Dado que los rasgos seleccionados se midieron en diferentes escalas (p. ej., número de individuos, número de taxones, mg/m³, µm³, porcentaje, fracción), se utilizó la estandarización de razones recomendada por **Cao et al. (2024)** debido a su precisión y eficacia. Para los atributos que disminuyeron con el grado de contaminación, se usó como valor esperado el percentil 95 del atributo en todas las muestras y la puntuación de la métrica fue igual a su valor dividido por el valor esperado (Ecuación 1). Para los atributos que aumentaron con el deterioro, se empleó como valor esperado el percentil 5 de la métrica de todas las muestras y la puntuación del atributo se calculó según la Ecuación 2. De esta manera, los puntajes variaron entre 0 y 1; cuando el puntaje era > 1 , se registraba como 1.

La ecuación para la estandarización de los atributos que decrecían con la perturbación es la siguiente:

$$Puntaje = \frac{X}{X_{95}}, \quad (\text{Ecuación 1}),$$

donde X es el valor del atributo en cada sitio y X_{95} es el percentil 95 de los valores del atributo en todos los sitios.

Para la estandarización de los atributos que aumentaban con la perturbación se utilizó la siguiente expresión:

$$Puntaje = \left(\frac{(X_{max} - X)}{(X_{max} - X_5)} \right), \quad (\text{Ecuación 2}),$$

donde X es el valor del atributo en cada sitio, X_5 es el percentil 5 de los valores del atributo en todos los sitios y X_{max} es el máximo valor registrado de ese atributo. La puntuación final del IIB-F de cada sitio fue el promedio de las puntuaciones de todos los atributos y varió entre 0 y 1.

Para establecer las escalas de calificación de la integridad biótica de la comunidad de fitoplancton y conocer el grado de contaminación en las diferentes estaciones de muestreo del humedal Torca-Guayamaral, se siguieron las sugerencias de **Gao et al. (2023)** y de **Cao et al. (2024)**. Las escalas se elaboraron con base en el percentil 95 de la puntuación final del IIB-F en todos los sitios. Dicho percentil 95 correspondió al límite superior de la escala de calificación, valor que se dividió en cuatro porciones iguales, con lo cual se obtuvieron cinco niveles de evaluación del IIB-F: un resultado superior al percentil 95 se calificó como “excelente”, en tanto que los otros cuatro niveles se escalaron en forma descendiente y se calificaron como “bueno”, “moderado”, “deficiente” y “grave”, respectivamente.

Los resultados del IIB-F de la época lluviosa se compararon con los del IIB-F del periodo seco mediante la prueba U de Mann-Whitney, ya que no se cumplieron los requisitos de normalidad y homocedasticidad necesarios para realizar un análisis paramétrico. Para este análisis se utilizó el programa PAST 5.2 (Hammer *et al.*, 2001), con el cual también se realizaron los análisis estadísticos descriptivos y multivariados mencionados anteriormente.

Resultados

El ambiente físico y químico del humedal

Los datos físicos y químicos y de la clorofila-*a* en las estaciones muestreadas en el humedal Torca-Guaymaral en los dos periodos climáticos, así como los promedios de estas variables en el humedal El Salitre reportados por Pulido-López y Pinilla-Agudelo (2017), se consignan en la **Tabla 1**. La **Figura 2** muestra la variabilidad de estos factores

Tabla 1. Valores de las variables físicas y químicas y de la clorofila-*a* en nueve estaciones de muestreo del humedal Torca-Guaymaral, registrados en septiembre de 2021 (temporada de lluvias) y en febrero de 2022 (temporada seca).

Estación	Época climática	Clorofila- <i>a</i> (mg/m ³)	Cloruros (mg/L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	DQO (mg O ₂ /L)	Ortofos- fatos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Nitritos (mg/L)	pH (Unidades)	Ox. Disuelto (mg/L)	Saturación Ox. (%)	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)
1Q	Lluvias	17	10,5	2,5	12,9	0,035	0,113	0,00304	6,87	4,3	73,1	16,4	131,2
	Temporada seca	0,1	11,4	2,5	2,5	0,035	0,113	0,00304	6,55	3,26	43,8	15	155,6
2Q	Lluvias	26,1	4,95	2,5	44,8	0,035	0,113	0,00304	6,94	0,82	13,3	13,9	192,2
	Temporada seca	0,1	4,95	2,5	2,5	0,035	0,961	0,00304	6,54	0,98	13,2	14,8	238
3L	Lluvias	36,7	4,95	2,5	77	0,252	0,113	0,00304	7,16	7,06	129,5	20,2	160,4
	Temporada seca	0,1	4,95	2,5	2,5	0,416	0,896	0,00304	6,35	0,43	5,5	6,35	168,4
4Q	Lluvias	1,01	4,95	2,5	2,5	0,035	0,113	0,00304	7,11	3,75	62,7	15,4	64,7
	Temporada seca	0,1	4,95	2,5	2,5	0,035	0,411	0,136	6,2	4,03	53,1	14,1	71,2
5C	Lluvias	20,4	25,1	2,5	39,6	0,51	0,113	0,00304	7,13	0,71	12	16	131,6
	Temporada seca	0,1	26,3	2,5	2,5	0,035	0,489	0,00304	6,81	1,19	16,3	15,6	326
6C	Lluvias	42,9	24,1	2,5	36,6	0,444	0,113	0,00304	7,18	1,59	27,9	18	477
	Temporada seca	0,1	26,4	2,5	2,5	0,035	0,415	0,0177	6,91	2,97	43	18,2	336
7C	Lluvias	32	4,95	2,5	19,2	0,501	0,5	0,00304	7,24	2,43	42,8	17,9	352
	Temporada seca	0,1	29,8	2,5	2,5	0,035	0,113	0,00304	6,72	0,75	10,3	16,1	327
8L	Lluvias	0,1	39,2	6,78	21,9	0,035	0,113	0,00304	7,05	2,45	35	18,2	335
	Temporada seca	0,1	38,2	2,5	2,5	0,035	0,961	0,00304	6,78	1,23	17,1	16,4	320
9L	Lluvias	0,1	35,1	14,1	26,4	0,12	0,113	0,00304	7	2,01	26,9	15,2	232
	Temporada seca	0,1	25,8	2,5	2,5	0,416	0,896	0,00304	6,7	0,73	10,2	17	220
Promedio Torca- Guaymaral		9,845	18,14	3,38	16,85	0,169	0,369	0,0112	6,84	2,26	35,31	15,82	235,46
Desviación estándar Torca- Guaymaral	---	15,05	12,99	2,85	21	0,19	0,33	0,03	0,29	1,73	30,71	2,87	111,69
El Salitre		40,95	---	10,3	55	0,119	0,05	0,01	6,85	6,43	93,05	18,11	98,75

Con fines de comparación, se incluyen los datos del humedal El Salitre, considerado un sistema no contaminado (Pulido & Pinilla, 2017). Q: quebrada; C: canal; L: léntico (ver la ubicación de las estaciones en la **Figura 1**)

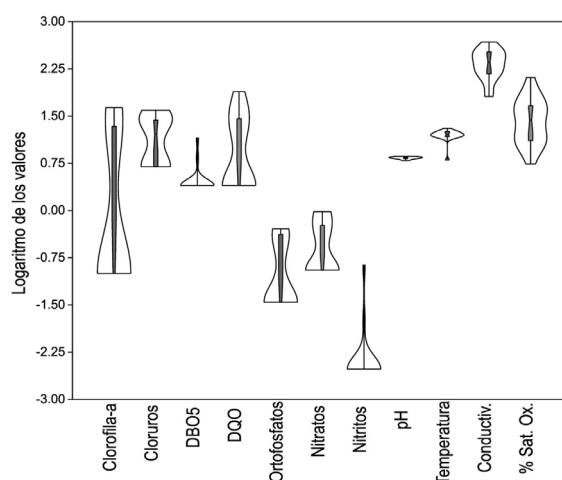


Figura 2. Diagramas de violín con cajas y bigotes de las variables ambientales del humedal Torca-Guaymaral. Las escalas de los diferentes factores se logaritizaron para facilitar la comparación.

en Torca-Guaymaral mediante una gráfica con una escala logarítmica para permitir la comparación entre las distintas variables. Los promedios de la conductividad (235,46 $\mu\text{S}/\text{cm}$), los cloruros (18,14 mg/L), la DQO (16,85 $\text{mg O}_2/\text{L}$) y la saturación de oxígeno (35,31 %) fueron relativamente altos, mientras que la clorofila-*a* (0,1 a 42,9 mg/m^3) fue el factor más variable, con una propensión a presentar un mayor número de registros en los extremos de su rango. Por el contrario, el pH (6,84 unidades) y la temperatura (15,82 $^{\circ}\text{C}$) del agua presentaron muy pocas variaciones. Los nitritos se destacaron por sus concentraciones mínimas (0,0112 $\text{mg NO}_2/\text{L}$), mientras que la DBO₅ (3,38 $\text{mg O}_2/\text{L}$), los ortofosfatos (0,169 $\text{mg PO}_4/\text{L}$) y los nitratos (0,369 $\text{mg NO}_3/\text{L}$) presentaron valores medios a bajos. Todas las características mencionadas indican que, en general, el humedal Torca-Guaymaral es un sistema de aguas frías y neutras, con tendencia a la mineralización, la eutrofia y la saprobiedad.

En cuanto a las diferencias en las características físicas y químicas entre los períodos climáticos, el análisis de Mann-Whitney mostró que la concentración de clorofila-*a* ($p = 0,001$), la DQO ($p = 0,0005$) y el pH ($p = 0,0005$) fueron significativamente mayores durante la estación lluviosa. Por otro lado, los nitratos ($p = 0,008$) aumentaron notablemente durante la temporada de sequía.

Gradiente de contaminación y sitios de referencia

Según el ACP (**Figura 3**), el gradiente de deterioro y contaminación se extendió desde los sitios más limpios del humedal Torca-Guaymaral (estaciones 4Q, 1Q y 3L) hasta los lugares de menor calidad del agua (estaciones 5C, 6C, 7C, 8L y 9L). La estación 2Q se ubicó en una posición intermedia. Los sitios más contaminados se asociaron con altos niveles de cloruros, conductividad, ortofosfatos y nitratos. Los sitios más limpios se ubicaron en el cuadrante opuesto a estas variables y se asociaron con aguas más oxigenadas. Los nitritos y las demandas de oxígeno también se relacionaron con estos lugares, pero sus concentraciones fueron bajas (promedios: 0,025 mg de NO_2/L ; DBO₅: 2,5 mg de O_2/L ; DQO: 26,6 mg de O_2/L). El vector de la clorofila-*a* se ubicó igualmente en el sector de las estaciones más limpias. Es notable la posición del humedal El Salitre en la zona izquierda del ACP, en el sector de las estaciones menos contaminadas, lo cual concuerda con el supuesto de buenas condiciones ecológicas señalado por la literatura en este cuerpo de agua (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017**).

A partir de estos datos, los sitios seleccionados como las locaciones de referencia fueron las estaciones 4Q, 1Q, 3L y el humedal El Salitre. Las estaciones 6C, 7C, 8L, 9L y 5C se definieron como lugares afectados o alterados.

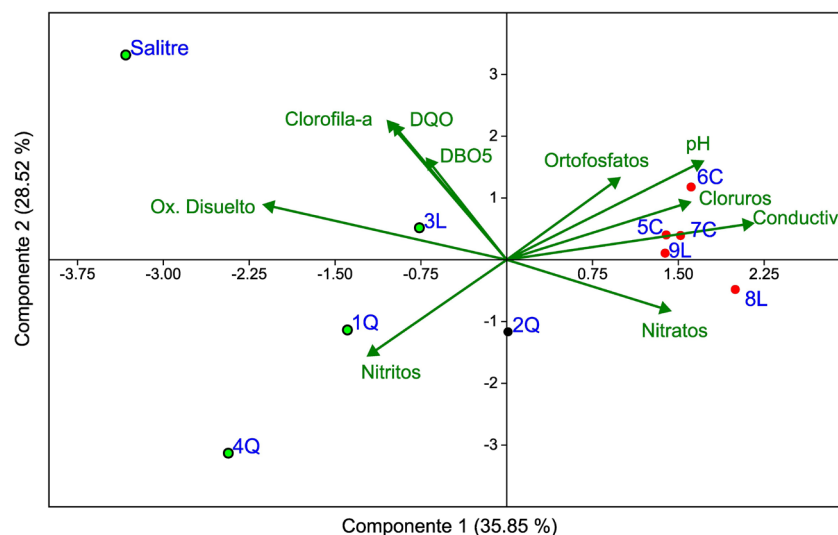


Figura 3. Análisis de componentes principales de las variables ambientales del humedal Torca-Guaymaral. Los puntos verdes corresponden a los sitios de mejor calidad del agua y los puntos rojos, a los más contaminados. Q: quebrada; C: canal; L: léntico. Se incluye el humedal El Salitre como sistema de referencia. El componente 1 explica el 35,85 % de la varianza y el componente 2 el 28,52 %.

Atributos candidatos y métricas seleccionadas

De los 67 atributos originalmente propuestos (**Tabla 1S**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5377>), la técnica de análisis con gráfico de medias y bigotes permitió reducirlos a 27 (**Figura 1S**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5378>). De estos se seleccionaron nueve que cumplieran con el requisito establecido por la razón señal:ruido, es decir, con valores del índice alejados de 1. Tales atributos fueron cuatro de composición y abundancia (concentración de clorofila-*a*, abundancia relativa de diatomeas centrales, relación de la abundancia relativa de diatomeas centrales/pennales, abundancia relativa de *Navicula+Nitzschia+Surirella*), uno morfológico (biovolumen de cianobacterias) y cuatro de diversidad y funcionalidad (riqueza de desmidias, densidad total de los tres taxones más dominantes, número de taxones filamentosos y número de taxones con aerotopos) (**Figura 4**). Las correlaciones de Spearman no hallaron redundancia alguna entre las nueve métricas definidas por la razón señal:ruido.

Estandarización de los atributos seleccionados

La estandarización de los atributos finalmente seleccionados se presenta en la **Tabla 2**, donde se observa que algunas métricas disminuyeron con el incremento de la contaminación: la clorofila-*a*, la abundancia relativa de diatomeas centrales, la relación entre la abundancia de diatomeas centrales y pennales, la riqueza de taxones de desmidias, el número de taxones filamentosos y el número de taxones con aerotopos. Los otros rasgos (abundancia relativa de *Navicula+Nitzschia+Surirella*, biovolumen de cianobacterias y densidad de los tres taxones más dominantes) aumentaron con el gradiente de deterioro. El IIB-F de cada sitio correspondió al promedio de los atributos estandarizados. Es notable el valor más alto del IIB-F para el humedal El Salitre, cuyas condiciones de aislamiento y ubicación lo alejan de las fuentes de contaminación (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017**).

Escalas del IIB-F

La técnica utilizada para establecer las escalas del IIB dio como resultado una graduación de cinco clases de integridad biótica del fitoplancton, como se muestra en la **Tabla 3**. Los valores de la escala construida fluctuaron entre <0,173 y >0,693. Cada clasificación de la

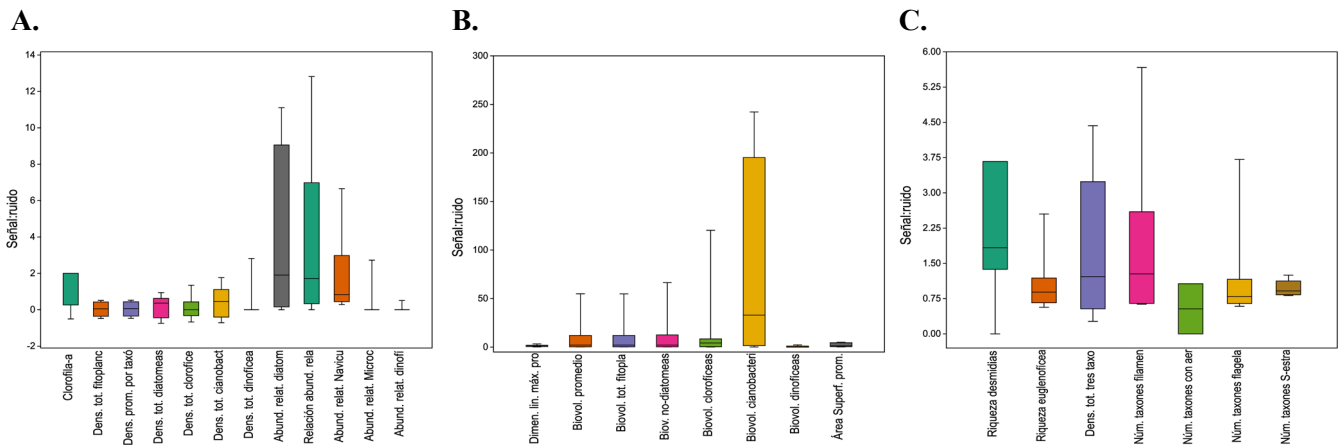


Figura 4. Análisis de la razón señal:ruido de los atributos seleccionados en los sitios contaminados. **A.** Atributos de composición y abundancia. **B.** Atributos morfológicos. **C.** Atributos de diversidad y funcionalidad. Los atributos que se alejan del valor 1 son los más adecuados para integrar el IIB-F del fitoplancton del humedal Torca-Guaymaral.

Tabla 2. Resultados de la estandarización de los atributos del IIB-F.

Atributo	Tendencia con la contaminación	Ecuación	Salitre	1Q-LL	2Q-LL	3L-LL	4Q-LL	5C-LL	6C-LL	7C-LL	8L-LL	9L-LL	1Q-SC	2Q-SC	3L-SC	4Q-SC	5C-SC	6C-SC	7C-SC	8L-SC	9L-SC
Concentración de clorofila-a	Disminuye	$X/X95$	0,997	0,404	0,621	0,873	0,024	0,485	1	0,761	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Abundancia relativa de diatomeas centrales	Disminuye	$X/X95$	0,199	1	0,903	0,075	0,129	0,184	0,012	0,021	0,023	0,373	0,344	0,085	0,008	0,255	0,041	0,17	0,096	0	0
Abundancia relativa de Navicula + Nitzschia + Surirella	Aumenta	$\left(\frac{(X_{max} - X)}{(X_{max} - X5)}\right)$	0,917	0,81	0,999	0,965	0,921	0	0,783	0,659	0,17	0,92	0,767	0,798	0,947	0,799	0,689	0,51	0,687	0,954	1
Relación entre la abundancia relativa de centrales/ pennales	Disminuye	$X/X95$	0,713	0,694	0	0,977	0,971	0,965	0,995	0,992	0,995	0,963	0,951	0,958	0,996	0,928	0,978	0,946	0,955	1	1
Biovolumen de cianobacterias	Aumenta	$\left(\frac{(X_{max} - X)}{(X_{max} - X5)}\right)$	1	0,989	0,994	0,996	0,998	0	0,985	0,988	0,999	0,53	0,982	0,864	0,977	0,997	0,998	0,986	0,981	0,999	0,999
Riqueza de desmicias	Disminuye	$X/X95$	1	0,169	0	0,169	0,508	0	0,338	0,169	0,169	0,338	0,338	0,169	0,508	0,169	0,338	0	0,169	0,508	0,338
Densidad total de los tres taxones más dominantes	Aumenta	$\left(\frac{(X_{max} - X)}{(X_{max} - X5)}\right)$	0,672	0,8515	0,886	0,824	0,983	0,758	0,855	0,713	0,939	0,369	0,998	0,947	0,392	1	0,96	0,947	0,931	0,827	0
Número de taxones que forman filamentos	Disminuye	$X/X95$	1	0,333	1	0,555	0,666	1	1	1	0,222	0,555	0,888	0,666	0,777	0,666	0,444	0,888	0,888	0,111	0,333
Número de taxones con aerotopos	Disminuye	$X/X95$	1	0,333	0,333	0,666	0,333	0,333	0	0	0	0,333	0,333	0,333	1	0,333	0,333	0	0	0,333	0
IIB-F			0,833	0,62	0,637	0,677	0,614	0,413	0,663	0,589	0,391	0,487	0,622	0,535	0,623	0,572	0,531	0,494	0,523	0,526	0,408

Se indica la ecuación de estandarización empleada para cada métrica. Se incluye el humedal El Salitre, considerado un sistema de referencia (Pulido & Pinilla, 2017). Q: quebrada; C: canal; L: ambiente léntico; LL: periodo lluvioso; SC: periodo seco

integridad biótica del fitoplancton se asoció con una descripción de la salud ecosistémica, es decir, con las condiciones ambientales que posibilitan o restringen el grado de integridad de la comunidad de microalgas planctónicas.

El IIB-F y el estado ecológico del humedal Torca-Guaymaral

Al aplicar la escala de integridad biótica (**Tabla 3**) a los datos del IIB-F de los sitios estudiados en los humedales Torca-Guaymaral (**Tabla 2**), se obtuvieron las condiciones ecológicas de cada lugar para ambos periodos climáticos. En el caso de El Salitre se utilizaron los promedios de los atributos de las épocas seca y lluviosa reportados por **Pulido-López y Pinilla-Agudelo (2017)**. Los resultados del IIB-F se ordenaron de mayor a menor valor (**Tabla 4**) para agrupar los sitios con una salud ecosistémica similar. Se destaca que el único punto con una excelente integridad biótica y, por ende, con una salud ecológica muy buena fue el humedal El Salitre. Ninguna de las estaciones de muestreo del humedal Torca-Guaymaral alcanzó esta calificación de excelencia.

Sin embargo, a pesar de no tener la integridad biótica más elevada, también debe destacarse que ningún sitio del humedal Torca-Guaymaral en los dos periodos climáticos evaluados se calificó como de integridad deficiente o grave. Durante la época lluviosa, seis estaciones se catalogaron con un IIB-F bueno (3L, 6C, 2Q, 1Q, 4Q y 7C) y tres estuvieron en la clase de integridad biótica moderada (9L, 5C y 8L). En temporada seca, solo dos lugares se catalogaron con un IIB-F moderado (6C y 9L) y los demás presentaron una buena integridad biótica. Entre el periodo lluvioso y el seco la estación 6C perdió integridad, mientras que en las locaciones 5C y 8L mejoraron las condiciones para el fitoplancton. Los promedios del IIB-F para las dos épocas fueron similares, sin diferencias significativas entre periodos (U de Mann-Whitney = 40,5, $p = 0,496$). Se puede decir que, para las fechas de muestreo (finales de 2021 e inicios de 2022), el humedal Torca-Guaymaral presentó, en general, una calidad del agua que permitió el desarrollo moderado o aceptable de la comunidad fitoplanctónica.

Es interesante observar que los tres sitios del sector Torca (1Q, 2Q y 3L) se ubicaron en la clase de integridad buena, con valores elevados en esta categoría, tanto en el periodo lluvioso como en la época seca. Por el contrario, varios sitios del tipo de canal y léntico, especialmente en el sector de Guaymaral, tendieron a mostrar una menor integridad del fitoplancton.

Tabla 3. Escala de calificación de la integridad biológica del fitoplancton del humedal Torca-Guaymaral con base en el IIB-F desarrollado

Clases	Clasificación de la integridad biótica del fitoplancton	Implicaciones sobre la salud del ecosistema
$IIB-F > 0,693$	Excelente	Las óptimas condiciones de calidad física y química del agua de estos sitios favorecen un desarrollo favorable de la comunidad de fitoplancton. La salud del ecosistema en estos sitios es muy buena.
$0,693 \leq IIB-F \leq 0,519$	Buena	Las condiciones de contaminación reducida del agua de estos lugares permiten el desarrollo de la comunidad de fitoplancton de forma aceptable. La salud del ecosistema en estos sitios es buena.
$0,519 \leq IIB-F \leq 0,346$	Moderada	El grado de contaminación del agua en estos sitios es apreciable y provoca un importante deterioro en la integridad del fitoplancton. La salud ecosistémica de estos sitios está disminuida.
$0,346 \leq IIB-F \leq 0,173$	Deficiente	La calidad física y química del agua en estos sitios es mala y no favorece un buen desarrollo de la comunidad de fitoplancton. La salud ecosistémica de estas localidades es deficiente.
$IIB-F < 0,173$	Grave	Las condiciones de calidad del agua en estos sitios son muy malas y restringen un buen desarrollo de las algas planctónicas. La salud del ecosistema en estos lugares es mala.

Tabla 4. Estado ecológico de las diferentes estaciones del humedal Torca-Guaymaral, en los dos periodos climáticos, con base en el IIB-F de las algas planctónicas. Se incluye el humedal El Salitre, considerado un sistema de referencia (Pulido & Pinilla, 2017). Q: quebrada; C: canal; L: ambiente léntico; LL: periodo lluvioso; SC: periodo seco

Sitios	IIB-F Fitoplancton	Integridad del fitoplancton	Implicaciones sobre la salud del ecosistema
El Salitre	0,833	Excelente	Calidad del agua óptima Integridad del fitoplancton muy alta Salud del ecosistema muy buena
3L-LL	0,677	Buena	Contaminación del agua reducida Integridad del fitoplancton aceptable Salud del ecosistema buena
6C-LL	0,663		
2Q-LL	0,637		
1Q-LL	0,62		
4Q-LL	0,614		
7C-LL	0,589		
9L-LL	0,487	Moderada	Contaminación del agua apreciable Integridad del fitoplancton deteriorada Salud del ecosistema moderada
5C-LL	0,413		
8L-LL	0,391		
Promedio temporada lluvias	0,592	Buena	Contaminación del agua reducida Integridad del fitoplancton aceptable Salud del ecosistema buena
3L-SC	0,623		
1Q-SC	0,622		
4Q-SC	0,572		
2Q-SC	0,535		
5C-SC	0,531		
8L-SC	0,526		
7C-SC	0,523		
6C-SC	0,494	Moderada	Contaminación del agua apreciable Integridad del fitoplancton deteriorada Salud del ecosistema moderada
9L-SC	0,408		
Promedio temporada seca	0,566	Buena	Contaminación del agua reducida Integridad del fitoplancton aceptable Salud del ecosistema buena

Discusión

La caracterización física y química indicó una tendencia general hacia la mineralización y la eutrofización moderada del sistema, especialmente en los sitios con características de canal y en las zonas lénticas. Este patrón es consistente con lo reportado por IDEA y EAAB (2008) y Guillot y Pinilla (2017), que encontraron una heterogeneidad espacial en la calidad del agua del humedal Torca-Guaymaral, ya que algunas zonas del sector Guaymaral presentaban una mayor afectación por descargas urbanas y acumulación de nutrientes, mientras que otras áreas del sector de Torca estaban menos deterioradas. En este sentido, el ACP confirmó la existencia de este gradiente ambiental, que abarcó desde estaciones con condiciones relativamente conservadas (1Q, 3L, 4Q, las dos primeras en el sector de Torca) hasta sitios con mayor deterioro (6C, 5C, 8L, 9L) en el sector de Guaymaral. Las mayores concentraciones de clorofila-*a* en los sitios menos deteriorados indican una mayor productividad del fitoplancton, lo cual es consistente con ambientes más favorables

para el desarrollo de esta comunidad. El sitio 4Q del sector de Guaymaral se encuentra en una quebrada cuyo flujo constante ayuda a diluir y limpiar el agua, a pesar de estar muy cerca del Centro Comercial Bima. En cambio, la estación 5C se encuentra en un canal con condiciones más estancadas, lo que dificulta el recambio del agua. Además, la quebrada sobre la que se ubica la estación 4Q desciende de los cerros orientales de Bogotá (**IDEA & EAAB**, 2008) y es de aguas limpias, a diferencia de la estación 5C, cuyo canal recibe aguas con cierto grado de contaminación provenientes del norte de la ciudad. Estas diferencias podrían explicar las condiciones opuestas de estas dos estaciones, pese a su proximidad.

La diferencia entre sitios coincide con estudios previos que señalan que las presiones antrópicas sobre el humedal varían en intensidad según el tipo de hábitat y la conectividad hidráulica (**Montoya-Rojas & Rivera-Marroquín**, 2021; **Guillot & Pinilla**, 2017). Así, los ambientes lóticos funcionan como corredores hidráulicos que promueven la renovación continua del agua y limitan la acumulación de materia orgánica y nutrientes, mientras que las áreas lénticas, al presentar menor recambio y mayor retención hidrológica, favorecen procesos de sedimentación y acumulación de contaminantes, así como condiciones fisicoquímicas menos favorables para la autorregulación del sistema. Esta diferenciación estructural entre hábitats explica en gran medida los contrastes en la calidad del agua observados entre estaciones próximas, lo que refuerza la necesidad de considerar la dinámica hidrológica interna del humedal como factor clave para interpretar su estado ecológico y orientar las acciones de manejo.

La selección de métricas biológicas consistentes y no redundantes es esencial para la construcción de índices de integridad biótica. En este caso, las nueve métricas seleccionadas capturaron tanto las respuestas estructurales (composición, abundancia y riqueza) como las funcionales (formas de vida, biovolumen, presencia de aerotopos), lo que refuerza el enfoque multimétrico de los índices de integridad biótica desarrollado por **Karr et al.** (1986) y **Schmitter-Soto** (2014). Así, la combinación de atributos sensibles a la contaminación como la reducción de la riqueza de desmicias o la proliferación de géneros tolerantes como *Nitzschia* y *Navicula* permitió establecer relaciones consistentes entre el deterioro ambiental y la integridad fitoplanctónica.

La aplicación del IIB-F en el humedal Torca-Guaymaral (**Tabla 4**) reveló que ninguna estación alcanzó el nivel de integridad “excelente”, con excepción del humedal El Salitre, lo que implica que los procesos de deterioro y contaminación que soporta el humedal Torca-Guaymaral obstaculizan, en alguna medida, el desarrollo óptimo de las comunidades fitoplanctónicas. Sin embargo, la mayoría de los sitios presentaron buenas condiciones de integridad biótica, tanto en la época lluviosa como en el periodo seco, lo que refleja una comunidad fitoplanctónica que aún es funcional en gran parte del sistema. Este panorama contrasta con la situación de otros humedales urbanos como La Vaca, La Conejera, Juan Amarillo y El Burro, donde se han registrado condiciones de deterioro graves que se reflejan en la dominancia de cianobacterias y en una carga orgánica extrema (**Pinilla**, 2010; **Castro-Roa & Pinilla-Agudelo**, 2014).

A pesar de estar ubicada en un ambiente léntico, la estación 3L mostró durante la temporada lluviosa el valor más elevado del IIB-F dentro del sistema Torca-Guaymaral (0,677), lo que destaca su relevancia como núcleo de buena calidad ecológica. En este sitio se encontró una gran riqueza de desmicias, un grupo de algas muy sensible a los cambios en el pH, a la conductividad elevada y al exceso de nutrientes (**Necchi**, 2016). Su presencia suele asociarse a ambientes de aguas muy oxigenadas, con menor carga contaminante y una estructura funcional compleja. Esta observación es coherente con el patrón reportado por **Guillot y Pinilla** (2017), quienes identificaron áreas lénticas dentro de los humedales con mejores condiciones físicas y químicas debido a una menor exposición directa a las fuentes de contaminación difusa, como parece ser el caso de la estación 3L en el sector de Torca.

Durante la temporada seca, esta estación también registró un IIB-F alto (0,623), lo que sugiere una tendencia a cierto grado de estabilidad temporal, independientemente del periodo climático. Ello probablemente indica que determinados sectores del sistema

poseen algún nivel de resiliencia, eventualmente vinculada a la presencia de vegetación de macrófitas, lo que amortigua los efectos de la eutrofización, y a una hidrodinámica menos expuesta a contaminantes y flujos externos.

Los sectores lóticos o de quebradas (1Q, 2Q, 4Q) también se mantuvieron en la categoría de buena integridad en ambos periodos. Estos ambientes de flujo más constante suelen estar menos expuestos al estancamiento, lo que favorece una comunidad fitoplanctónica dominada por diatomeas centrales y pennales con biovolúmenes y relaciones ecológicas estables (**Bicudo & Menezes**, 2006). En particular, la alta proporción de diatomeas centrales —métrica incluida en el IIB-F— parece asociarse con condiciones de mayor oxigenación, baja turbidez y menor carga orgánica, atributos presentes en estas estaciones. En contraste, las estaciones 5C, 6C, 8L y 9L, especialmente durante el periodo lluvioso, presentaron valores más bajos de IIB-F, ubicándose en la categoría de integridad moderada.

Las condiciones de mayor carga orgánica podrían favorecer la presencia de géneros tolerantes, como *Navicula*, *Nitzschia* y *Surirella*, cuya abundancia relativa aumenta con la contaminación (**Oliva-Martínez et al.**, 2014). La aparición de estos géneros, junto con un incremento del biovolumen de las cianobacterias observado en los sitios de menor integridad biótica, constituye una señal clara de un aumento de la eutrofización. De hecho, las cianobacterias son organismos pioneros que prosperan en ambientes con baja competencia, alta temperatura y nutrientes disponibles, especialmente fósforo, por lo que su biovolumen —otra métrica incluida en el IIB-F— aumenta con el grado de deterioro (**Gao et al.**, 2023; **Cao et al.**, 2024).

Un aspecto interesante es que, aunque el sitio 6C registró un IIB-F bueno durante la época lluviosa (0,663), este descendió a moderado en el periodo seco (0,494), lo cual puede deberse a un aumento de la acumulación de nutrientes en este hábitat de canal durante la disminución del caudal. En estos ambientes canalizados es probable que la disminución de los aportes de agua durante el periodo seco intensifique los efectos de la concentración de contaminantes, debido a que los canales recogen y acumulan sustancias provenientes de los drenajes que los abastecen, las cuales tienden a concentrarse durante la temporada de estiaje, lo que podría afectar rápidamente a las comunidades fitoplanctónicas. Por el contrario, las estaciones 8L y 5C mostraron una ligera mejora entre ambos periodos, probablemente debido a una disminución temporal de las cargas externas o a procesos de sedimentación de los sólidos suspendidos, lo que podría incrementar la transparencia y favorecer a las algas planctónicas. Sin embargo, la condición ecológica de estos lugares sigue siendo de cuidado, puesto que permanecieron dentro del rango de integridad moderada.

El promedio general del IIB-F para ambas épocas fue similar (0,592 en el periodo de lluvias y 0,566 en la fase de sequía), sin diferencias estadísticamente significativas (U de Mann-Whitney, $p > 0,05$), lo que sugiere una relativa estabilidad funcional del fitoplancton frente a la variación estacional, al menos entre los dos periodos climáticos estudiados y parece corroborarse por la homogeneidad temporal observada en muchas de las variables físicas y químicas detectada mediante la prueba de Mann-Whitney, según la cual solo la concentración de clorofila-*a*, la DQO, el pH y los nitratos presentaron cambios significativos entre épocas climáticas. Sin embargo, las fluctuaciones entre los diferentes sitios del humedal evidencian la importancia de realizar monitoreos continuos, con resoluciones espaciales y temporales lo suficientemente detalladas como para capturar las posibles respuestas dinámicas de las algas.

En síntesis, nuestros resultados demuestran que el IIB-F desarrollado permitió discriminar adecuadamente entre los distintos niveles de perturbación en el humedal Torca-Guaymaral, proporcionando un diagnóstico acertado de su estado ecológico. Por su alta sensibilidad a las condiciones locales, a la disponibilidad de nutrientes, a la estabilidad hidrológica y a la transparencia del agua, la comunidad de algas planctónicas actúa como un indicador temprano y eficaz de cambios en la calidad ambiental (**Wehr et al.**, 2015; **Bellinger & Sigee**, 2010). En este sentido, el IIB-F propuesto constituye una herramienta útil para evaluar la salud del ecosistema y complementa los enfoques previos centrados exclusivamente en las variables físicas y químicas (**Caho-Rodríguez & López-Barrera**,

2017) en las comunidades perifíticas (Castro & Pinilla, 2017) o en los macroinvertebrados (Guillot, 2017b; Venegas-Escovar, 2017). No obstante, es importante tener presente que la información utilizada proviene de unos pocos muestreos temporales y espaciales, por lo que los resultados del IIB-F, aunque coherentes, deben tomarse con la debida cautela. En el futuro, se requerirá aumentar el número de sitios evaluados y la frecuencia de los muestreos para afinar y consolidar el índice planteado. Un posible resultado de este incremento en el esfuerzo de muestreo espacial y temporal sería la creación de un mapa de zonificación que indique la integridad biológica del fitoplancton y la salud del ecosistema del humedal Torca-Guaymaral, proporcionando así una herramienta útil para su gestión y conservación. Por el momento, los resultados muestran que el sector que requiere las mayores medidas para controlar la contaminación es la zona de Guaymaral.

Información suplementaria

Tabla suplementaria: <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5377>

Figura suplementaria: <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5378>

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por facilitar el uso de sus instalaciones y por el apoyo brindado durante la realización de los análisis de las muestras fitoplanctónicas en sus laboratorios, y al Laboratorio de Hidrobiología Ambius S.A.S. por la provisión de los equipos necesarios para la ejecución del trabajo de campo, lo cual fue fundamental para el desarrollo de este estudio. También se agradece a la Secretaría Distrital de Ambiente por los permisos y el acompañamiento durante los muestreos de campo, así como a los revisores anónimos, cuyos comentarios permitieron optimizar la versión final del artículo.

Contribución de los autores

CFB concibió el proyecto y realizó los muestreos de campo y los análisis de laboratorio; CGR contribuyó con el diseño del muestreo y el análisis de los datos; GAP hizo los análisis numéricos y estadísticos del índice biótico; CFB, CGR y GAP redactaron el documento, participaron en el análisis de los resultados e hicieron aportes conceptuales a la versión final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2017). *Plan de ordenamiento zonal del norte ciudad Lagos de Torca*. Documento Técnico de Soporte. https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/anexo_n_1_documento_tecnico_de_soporte.pdf
- Al-Janabi, Z. Z., Al-Obaidy, A-H. M. J., Al-Kubaisi, A-R. (2016). Use of Phytoplankton Index of Biological Integrity (P-IBI) as a tool to evaluate Tigris River Health. *Mesopotamia Environmental Journal*, Special Issue A, 62-68.
- Baird, R. & Bridgewater, L. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.
- Bicudo, C. D. & Meneses M. (2006). *Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições*, 2^a ed. Rima Editora.
- Bellinger, E., Sigee, D. (2010). *Freshwater algae: identification and use as bioindicators*. Wiley-Blackwell.
- Caho-Rodríguez, C. A. & López-Barrera, E. A. (2017). Determination of the water quality index for the western section of the Torca-Guaymaral wetland using UWQI and CWQI methodologies. *Producción + Limpia*, 12(2), 35-49. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- Calow, P. (1992). Can ecosystems be healthy? Critical consideration of concepts. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1, 1-5. <https://doi.org/10.1007/BF00044403>

- Cao, J.-L., Liang, H.-Y., Zhang, Y.-H., Du, S.-L., Zhang, J., Tao, Y. (2024). Development and evaluation of the Plankton Biological Integrity Index (P-IBI) in dry and wet seasons for Dianchi Lake. *Ecologies*, 5, 68-82. <https://doi.org/10.3390/ecologies5010005>
- Cardozo, A. Y., Bermúdez, A., Aranguren, N., Duque, S. R. (2005). Algas planctónicas del lago de Tota: listado taxonómico actualizado. *Ciencia en Desarrollo*, 2(1), 80-88. <https://doi.org/10.19053/issn.0121-7488>
- Castro-Roa, D. & Pinilla-Agudelo, G. A. (2014). Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. *Limnetica*, 33(2), 297-312. <https://doi.org/10.23818/limn.33.23>
- Castro, D. & Pinilla, G. (2017). Índice de diatomeas perifíticas para evaluar la calidad del agua en los humedales distritales bogotanos (IDHB). En Guillot, G.H., Pinilla, G.A. (Eds), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 270-284. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Cortés Ballén, L. A. (2017). Aproximación al paisaje de los humedales urbanos de Bogotá dentro de la estructura ecológica principal de la ciudad. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(1), 118-130. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.60584>
- Dos Santos, M. (2016). *Atlas algas del Paraguay. Características e importancia, muestreos en Paraguay, claves de identificación e ilustraciones*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción.
- Francoeur, S. N., Rier, S. T., Whorley, S. B. (2013). Methods for sampling and analyzing wetland algae. En J. Anderson, C. Davis (Eds.), *Wetland Techniques*, pp. 1-58. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6931-1_1
- Gao, W., Xiong, F., Lu, Y., Qu, X., Xin, W., Chen, Y. (2023). Development of a phytoplankton-based index of biotic integrity for ecological health assessment in the Yangtze River. *Ecological Processes*, 12, 41. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00456-7>
- González, M. & Inostroza, I. (2017). *Manual taxonómico y fotográfico de géneros fitoplanctónicos (excl. Diatomeas) de 7 lagunas de Gran Concepción*. Universidad de Concepción.
- Guillot, G. (2017a). Protocolo para el muestreo y seguimiento de humedales. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 33-80. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Guillot, G. (2017b). Implementación del protocolo para valorar las comunidades de macro-invertebrados asociados a la vegetación de los humedales Guaymaral, Santa María del Lago y Tibanica. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 198-217. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Guillot, G. H. & Pinilla, G. A. (Eds.). (2017). *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Guiry, M. D. & Guiry, G. M. (2025). AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. <https://www.algaebase.org>
- Hammer, O., Harper, D. T., Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*, 4(1), 9.
- Hillebrand, H., Dürselen, C., Kirschtel, D., Kirschtel, D., Pollinger, U., Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 35(2), 403-424. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x>
- Huang, X., Xu, J., Liu, B., Guan, X., Li, J. (2022). Assessment of aquatic ecosystem health with indices of biotic integrity (IBIs) in the Ganjiang River System, China. *Water*, 14, 278. <https://doi.org/10.3390/w14030278>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2022). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia – IDEA & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB. (2008). *Plan de manejo ambiental de los humedales de Torca y Guaymaral. Diagnóstico*. EAAB.
- Kane, D. D., Gordon, S. I., Munawar, M., Charlton, M. N, Culver, D. A. (2009). The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health. *Ecological Indicators*, 9(6), 1234-1247. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.03.014>
- Karr, J. R. (1981). Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 6(6), 21-27. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1981\)006<0021:aobiuf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1981)006<0021:aobiuf>2.0.co;2)

- Karr, J. R. & Dudley, D. R.** (1981). Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 5(1), 55-68. <https://doi.org/10.1007/BF01866609>
- Karr, J. R., Fausch, K. D., Angermeier, P. L., Yant, P. R., Schollosser, I. J.** (1986). *Assessing biological integrity in running waters. A method and its rationale*. Illinois Natural History Survey.
- Karr, J. R., Larson, E. R., Chu, E. W.** (2021). Ecological integrity is both real and valuable. *Conservation Science and Practice*, 4:e583. <https://doi.org/10.1111/csp2.583>
- LeGresley, M. & McDermott, G.** (2010). Counting chamber methods for quantitative phytoplankton analysis: Haemocytometer, Palmer-Maloney cell and Sedgewick-Rafter cell. En B. Karlson, C. Cusack, E. Bresnan (Eds.), *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*, pp. 25-30. UNESCO (IOC Manuals and Guides, N°. 55.) (IOC/2010/MG/55).
- Lu, Y., Wang, R., Zhang, Y., Su, H., Wang, P., Jenkins, A., Ferrier, R. C., Bailey, M., Squire, G.** (2015). Ecosystem health towards sustainability. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1(1), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1890/EHS14>
- Maulood, B. K., Alobaidy, A. H. M. J., Alsaboonthi, A., Abid, H. S., Alobaidy, G. S.** (2011). Phytoplankton Index of Biological Integrity (P-IBI) in several marshes, Southern IRAQ. *Journal of Environmental Protection*, 2, 387-394. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.24043>
- McAlice, B.** (1971). Phytoplankton sampling with the Sedgwick-Rafter cell. *Limnology and Oceanography*, 16(1), 19-28. <https://doi.org/10.4319/lo.1971.16.1.0019>
- Montoya-Rojas, G. A. & Rivera-Marroquín, M. E.** (2021). Los componentes ambientales de la cuenca Torca: un insumo para el análisis de los escenarios de variabilidad climática en la ciudad de Bogotá, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1), e183. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1833>
- Necchi, O. (Ed.).** (2016). *River Algae*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31984-1_1
- Oliva-Martínez, M., Godínez-Ortega, J. L., Zuñiga-Ramos, C. A.** (2014). Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. 85, S54-S61. <httpS://doi.org/10.7550/rmb.32706>
- Pinilla, G.** (2010). An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá city, Colombia. *Ecological Indicators*, 10, 848-856. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.006>
- Pinilla-Agudelo, G. A.** (2016). Algunas experiencias en el uso de índices limnológicos en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), S241-248. <httpS://doi.org/10.15446/abc.v21n1sup.51073>
- Pinilla, G.** (2017). Índice de condiciones limnológicas para los humedales de la ciudad de Bogotá. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 285-309. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Pinilla, G. A., Montenegro, L. C., Melgarejo, L. M., Molano-González, N., Pineda, A., Delgadillo, I. P., Forero, M. A.** (2021). Growth rates of microalgae encapsulated in calcium alginate as a possible indicator of the trophic state of aquatic ecosystems. *Limnetica*, 40(2), 385-398. <httpS://doi.org/10.23818/limn.40.26>
- Pulido-López, P. C.** (2015). *El fitoplancton en la determinación del estado trófico del humedal El Salitre (Bogotá D.C., Colombia) en épocas climáticas contrastantes*. Tesis Maestría, Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Pulido-López, P. C. & Pinilla-Agudelo, G. A.** (2017). Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 41-50. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.411>
- Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., De Zonia, B. E., Walter, A. E., Arena, E. T., Eliceiri, K. W.** (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 18(1), 1-26. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>
- Schmitter-Soto, J. J.** (2014). Los índices bióticos de integridad en el monitoreo ambiental. En C. A. González Zuarth, S. Vallarino, J. C. Pérez Jiménez, A. M Low Pfeng (Eds.), *Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental*, pp. 65-82. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
- Schaeffer, D. J., Herricks, E. E., Kerster, H. W.** (1988). Ecosystem health. I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 12, 445-455. <https://doi.org/10.1007/BF01873258>
- Sun, J. & Liu, D.** (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 25(11), 1331-1346. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbg096>

- Tell, G. & Conforti, V.** (1986). *Euglenophyta pigmentadas de la Argentina*. J. Cramer.
- Teng, L., Zhang, B., Liu, X., Bai, C., Zhang, J., Tan, D., Huang, P.** (2014). Development and use of a phytoplankton-index of biotic integrity to assess Yongjiang River ecosystem health. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(3), 901-908.
- Venegas-Escovar, M.** (2017). Estado limnológico de los humedales Tibanica, Guaymaral, Jaboque y Meridor utilizando macroinvertebrados como bioindicadores. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 218-231. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Wehr, J., Sheath, R., Patrick, J.** (2015). *Freshwater algae of North America. Ecology and classification*, 2^{da} ed. Academic Press.
- Whittier, T. R., Stoddard, J. L., Larsen, D. P., Herlihy, A. T.** (2007). Selecting reference sites for stream biological assessments: best professional judgment or objective criteria. *Journal of the North American Benthological Society*, 26(2), 349-360. [https://doi.org/10.1899/0887-3593\(2007\)26\[349:SRSFSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1899/0887-3593(2007)26[349:SRSFSB]2.0.CO;2)
- Wolterbeek, H., Bode, P., Verburg, T.** (1996). Assessing the quality of biomonitoring via signal-to-noise ratio analysis. *The Science of the Total Environment*, 180, 107-116. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04944-4](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04944-4)
- Wu, Z., Kong, M., Cai, Y., Wang, X., Li, K.** (2019). Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 658, 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.216>
- Zhu, H., Hu, X-D., Wu, P-P., Chen, W-M., Wu, S-S., Li, Z-Q., Zhu, L., Xi, Y-L., Huang, R.** (2021). Development and testing of the phytoplankton biological integrity index (P-IBI) in dry and wet seasons for Lake Gehu. *Ecological Indicators*, 129, 107882. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107882>.