

ARTÍCULO DE REFLEXIÓN/REFLECTION PAPER

ALGUNAS EXPERIENCIAS EN EL USO DE ÍNDICES LIMNOLÓGICOS EN COLOMBIA

Experiences in the Use of Limnological Indices in Colombia

Gabriel Antonio PINILLA AGUDELO¹.

¹ Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Cra. 30 n.º 45-03, edificio 421, oficina 205. Bogotá, Colombia.

For correspondence. gapinillaa@unal.edu.co

Received: 5th June 2015, Returned for revision: 12th August 2015, Accepted: 19th October 2015.

Associate Editor: María Consuelo Burbano Montenegro.

Citation / Citar este artículo como: Pinilla Agudelo GA. Algunas experiencias en el uso de índices limnológicos en Colombia. Acta biol. Colomb. 2016;21(1) Supl:S241-248. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v21n1sup.51073>

RESUMEN

El objetivo central de este trabajo es presentar algunas experiencias realizadas por el Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia en la elaboración de índices limnológicos para evaluar el estado ecológico de sistemas acuáticos colombianos. Se presentan siete casos que van desde la construcción de un índice multimétrico para los humedales bogotanos, hasta el desarrollo de un método de biomonitorio del estado trófico basado en microalgas encapsuladas en alginato. Los índices consideran tanto variables físicas y químicas como características bióticas de los ambientes limnológicos analizados. Las comunidades acuáticas trabajadas fueron el fitoplancton, el perifiton, las plantas acuáticas y los invertebrados acuáticos. Los índices propuestos son: Índice de Condiciones Limnológicas de los humedales de Bogotá – ICOL; Índice de Diatomeas Perifíticas de los humedales de Bogotá – IDPHB; Índice de Integridad Biótica de Macroinvertebrados en ciénagas del Cesar– IIBM; Índice de Estado Limnológico para ciénagas del Canal del Dique – IEL; Índice de Estado Limnológico Fluvial para ríos de la cuenca alta del río Chicamocha– IELF; Índice de Integridad del Hábitat para ríos licenciados – IIH, los cuales permiten establecer escalas de calidad y funcionalidad de los ecosistemas estudiados. Las algas encapsuladas, por su parte, reflejan a través de sus tasas de crecimiento la condición trófica del agua. De esta manera se ponen a disposición de las autoridades ambientales una serie de herramientas técnicas y científicas que permiten tomar decisiones sobre el uso, restauración y conservación de los ambientes acuáticos continentales del país.

Palabras clave: bioindicación, estado limnológico, salud ecológica, sistemas lénticos, sistemas lóticos.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to show some experiences of the Department of Biology of the Universidad Nacional de Colombia in the development of limnological indices to assess the ecological status of aquatic systems in Colombia. Seven cases are presented ranging from the construction of a multimetric index for the urban wetlands of Bogotá, to the development of a method for biomonitoring the water trophic status, based on microalgae encapsulated in alginate. The indices shown consider physical, chemical, and biotic variables in the limnological environments analyzed. Aquatic communities worked were phytoplankton, periphyton, aquatic plants, and aquatic invertebrates. The proposed indices (Limnological Conditions Index of Bogotá wetlands–LICOL; Periphytic Diatoms Index of Bogotá Wetlands–PDIBW; Biotic Integrity Index for Macroinvertebrate of Cesar swamps BIIM; Limnological State Index for the Canal del Dique swamps–LSI; Limnological River State Index for upper basin of River Chicamocha – LRSI; Habitat Integrity Index for licensed rivers–HIH) permit to set ranges of quality and functionality of ecosystems studied. Encapsulated algae, meanwhile, reflected through their growth rates trophic status of water. Thus, technical and scientific methodologies are offered to the environmental authorities, so they can make decisions on the use, restoration and conservation of inland wetlands in the country.

Keywords: bioindication, ecological health, lentic systems, limnological state, river systems.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuáticos continentales son de vital importancia para la conservación de la biodiversidad del planeta y para la supervivencia de las poblaciones humanas. No obstante, estos ecosistemas están sometidos a una elevada presión por el uso intensivo del que son objeto y por la considerable degradación ambiental de sus cuencas, lo que ha llevado a la reducción en la cantidad y calidad de estos cuerpos de agua. Una estrategia que ha mostrado ser de gran utilidad para la conservación y restauración de ríos y lagos en el mundo, es la evaluación ecológica de sus hábitats y comunidades a través de indicadores biológicos y de índices de calidad. Por ello, en el presente documento se hace una breve reflexión sobre algunos de estos métodos y se presentan varios ejemplos de experiencias desarrolladas en el Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Más que una revisión exhaustiva, este documento es un razonamiento acerca de ciertas técnicas y enfoques conceptuales que pueden ser útiles como instrumentos para el manejo y conservación de los sistemas acuáticos.

Inicialmente se explicará, desde una perspectiva amplia, en qué consisten los métodos de indicación biológica, los cuales tienen distintos grados de complejidad. Posteriormente se reseñan ciertas metodologías de bioindicación en sistemas lénticos y en cuerpos de agua lóticos, con énfasis en los métodos desarrollados en el Departamento de Biología. Finalmente, se concluye presentando algunas ideas sobre las temáticas que se requiere abordar hacia el futuro para fortalecer y optimizar los métodos de indicación limnológica. El autor espera que este artículo despierte el interés en estas técnicas de bioindicación a fin de que su uso se amplíe y se generalice, de manera que se tengan herramientas prácticas y científicamente fundamentadas para la valoración de los ecosistemas acuáticos colombianos. De esta manera se podrán evaluar los planes de uso, conservación y restauración que se implementen en estos ambientes acuáticos, fundamentales para la vida.

LOS INDICADORES BIOLÓGICOS Y LOS ÍNDICES LIMNOLÓGICOS

Un indicador biológico acuático es aquel cuya presencia y abundancia señalan algún proceso o estado del sistema en el cual habita, en especial si tales fenómenos constituyen un problema de manejo del recurso hídrico (Pinilla, 2000). Los índices ecológicos son métodos de indicación de distinto grado de dificultad que van desde el otorgamiento de puntajes a taxones determinados, hasta modelos matemáticos complejos que estiman la respuesta de algunas especies acuáticas a las variaciones ambientales, como ocurre con el programa PHABSIM (Milhous y Waddle, 2012). Según Prat *et al.* (2009), los diferentes tipos de índices para los invertebrados acuáticos se subdividen en

cuatro grandes grupos, los índices unimétricos (usan una sola métrica), los multimétricos (varias métricas agregadas), los multivariados (por ejemplo River Invertebrate Prediction and Classification System – RIVPACS) y los rasgos biológicos. Estos últimos tratan de sustituir la lista de especies por una lista de características biológicas (tamaño, forma del cuerpo, ciclo de vida, alimentación, reproducción, etc.) y utilizan la combinación de estas características como medidas de bioindicación. Los índices de integridad biótica (IBIs) tienen este enfoque basado en rasgos biológicos (Bonada *et al.*, 2006). Esta categorización para los índices de macroinvertebrados puede aplicarse también a los índices que utilizan otros grupos biológicos.

El empleo de ecuaciones basadas en parámetros fisicoquímicos para valorar la calidad del agua se inició con un índice sumativo propuesto por Horton (1965). Este autor utilizó diez variables, dentro de las cuales estaban el oxígeno disuelto, el pH, los coliformes, la conductividad eléctrica, la alcalinidad y el cloruro (Fernández y Solano, 2007; Bharti y Katyal, 2011). Sin embargo, la expresión también incluía un multiplicador arbitrario denominado “contaminación obvia”, lo que impedía utilizar el índice para el análisis de políticas ambientales (Walsh y Wheeler, 2012). A este trabajo pionero le siguieron varias propuestas de índices fisicoquímicos que se desarrollaron durante los años 70 y 80, en las que se incluyeron técnicas sociales como el método Delphi, ponderación de las variables y valores de control de los parámetros considerados (Bharti y Katyal, 2011).

Por su parte, el monitoreo biológico se inició en Europa en el siglo XX, con énfasis tanto en la identificación de las especies indicadoras de la degradación ocasionada por la actividad humana en los sistemas acuáticos, como en la clasificación biológica de los lagos (Cairns y Pratt, 1993). Durante los primeros 20 años del siglo XX tomó gran auge el sistema sapróbico basado en los trabajos de Kolkwitz y Marsson (1908) y Kolkwitz y Marsson (1909). Hacia la mitad del siglo, los estudios fundamentados en la comunidad de macroinvertebrados fueron la base de la mayoría de los análisis biológicos de la calidad del agua (Cairns y Pratt, 1993; Roldán, 1999), pero también se emplearon otros grupos como las diatomeas (Patrick, 1949).

La integración de variables abióticas por una parte, y biológicas de otro lado, dio origen a índices multimétricos de calidad fisicoquímica y de integridad biológica, respectivamente (Pinilla, 2000). De estos últimos, el primer acercamiento fue hecho por Karr (1981) con comunidades de peces. Recientemente (años 2000 en adelante), se ha visto la necesidad de desarrollar índices que involucren en un mismo análisis los aspectos abióticos y los biológicos (técnicas multivariadas). A continuación se presentan algunos índices desarrollados para ambientes lénticos y lóticos, principalmente de tipo multimétrico.

ÍNDICES LIMNOLÓGICOS EN SISTEMAS LÉNTICOS

Los índices aplicados a ambientes lénticos son variados y numerosos. Van desde aquellos centrados en las características físicas y químicas, hasta los que involucran las comunidades bióticas. Dentro de los primeros, la concentración de nutrientes se ha utilizado como indicador de las condiciones tróficas de los sistemas acuáticos. Los índices de estado trófico de lagos, basados en dichas concentraciones, se desarrollaron hace ya varias décadas (ver Carlson, 1977). Sin embargo en la actualidad se han propuesto índices tróficos que involucran nuevas variables, como en el estudio de Coelho *et al.* (2006), quienes utilizan los índices tróficos de Carlson (1977) y de Vollenweider *et al.* (1998) para determinar el estado trófico de una laguna costera en Portugal, con base en las concentraciones de clorofila *a*, nitrógeno inorgánico, fósforo total y oxígeno disuelto. Viaroli y Christina (2003) desarrollaron otro índice de estado trófico sustentado en la relación entre la productividad planctónica máxima neta, medida bajo saturación de luz, y la respiración en oscuridad.

Dentro de los índices más antiguos que emplean el fitoplancton están los de Nygaard (1949), los cuales establecen relaciones entre el número de taxones de algas planctónicas de ambientes oligotróficos y el número de taxones de aguas eutróficas. Si las primeras predominan, se espera que el sistema sea de buena calidad, y si lo hacen las segundas, las condiciones del agua pueden ser malas. Los índices propuestos por Nygaard no tienen en cuenta las abundancias de los grupos, por lo cual Barbe *et al.* (1990) propusieron un índice trófico planctónico (ITP) que considera los grupos taxonómicos del fitoplancton encontrados en una muestra, su abundancia relativa y los valores de clorofila *a*. Por otra parte, las algas perifíticas también se han empleado en la indicación del estado ecológico de humedales, como se puede ver en los trabajos de Lane y Brown (2007) y de Gaiser (2009).

Las plantas acuáticas se han utilizado igualmente para construir índices de integridad biótica en aguas lénticas. Reiss (2006) desarrolló un índice que considera la composición de la comunidad vegetal (macrófitas) y las variables físicas y químicas de aguas y suelos. Miller *et al.* (2006) y Miller y Wardrop (2006) propusieron índices bióticos y florísticos que tiene en cuenta los porcentajes de cobertura de especies tolerantes, especies anuales, especies no nativas, especies invasoras, árboles y criptógamas vasculares. Croft y Chow-Fraser (2007) idearon un índice a partir de un análisis multivariado de datos de presencia-ausencia de macrófitas, que incluye valores óptimos y de tolerancia de cada taxón.

Índices para sistemas lénticos desarrollados en la Universidad Nacional

Para ambientes lénticos se han propuesto varios índices. El primero se refiere a un índice de estado limnológico (IEL) para las ciénagas del Canal del Dique (Pinilla *et al.*, 2010),

en el cual se emplea la teoría de los multiatributos (Schultz, 2001). Se elaboraron gráficas de calidad y se les asignaron valores de importancia a 12 variables físicas, químicas y biológicas. Este índice permite categorizar la condición ecológica de los ambientes cenagosos de esa región a fin de predecir los posibles efectos sobre su funcionamiento debido a obras de control de sedimentos. Un segundo caso de índices en ciénagas es el elaborado por Martínez-Rodríguez y Pinilla-Agudelo (2014) para Zapatoza, La Pachita y Mata de Palma (en el departamento del Cesar). Para estos cuerpos de agua se construyó un Índice de Integridad Biótica de Macroinvertebrados (IIBM) que toma en cuenta variables taxonómicas y funcionales. El IIBM propuesto es muy flexible, recoge distintos aspectos ecológicos de la comunidad de invertebrados acuáticos y parece mostrar adecuadamente la calidad del agua de las ciénagas, por lo que podría utilizarse en el futuro para hacer seguimiento a la calidad del agua en este tipo de ecosistemas.

En otro tipo de ambientes lénticos (humedales de Bogotá), se establecieron dos índices de valoración del estado ecológico, el primero de los cuales fue el Índice de Condiciones Limnológicas (ICOL) (Pinilla, 2010) que se basó en el cálculo de índices bióticos para cuatro comunidades (fitoplancton, perifiton, macrófitas y macroinvertebrados). Estos se establecieron de acuerdo a los índices de polución de los humedales calculados para 11 variables fisicoquímicas, según la metodología desarrollada por Jiang y Shen (2005) y Jiang (2006). El ICOL separa los humedales en varias clases que van desde los sistemas muy deteriorados hasta aquellos de características óptimas. Es una herramienta útil para valorar y monitorear los efectos de la intervención y de los planes de manejo que se desarrollan en estos cuerpos de agua. El otro índice para humedales utilizó la misma técnica, pero se estableció solo para las algas bacillaróficas del perifiton. Este Índice de Diatomeas Perifíticas para los Humedales de Bogotá (IDPHB) (Castro-Roa y Pinilla-Agudelo, 2014) también permite categorizar y monitorear estos ambientes, en este caso a través de las variables fisicoquímicas y de la composición de diatomeas bentónicas.

Desde una perspectiva diferente, se destaca un trabajo reciente llevado a cabo en microalgas encapsuladas en alginato. La técnica consiste en formar esferas de alginato dentro de las cuales están embebidas las algas (se usaron las especies *Chlorella vulgaris* Beijerinck y *Scenedesmus ovalternus* Chodat). Se midió el crecimiento poblacional de las algas y su eficiencia fotosintética ante diferentes concentraciones de nutrientes, tanto en laboratorio (Delgadillo, 2014) como en condiciones de campo en cuatro humedales bogotanos (Pineda, 2014). Los resultados muestran que las tasas de crecimiento son mayores a medida que se incrementan el nitrógeno y el fósforo. En consecuencia, este método (que a la fecha se sigue investigando para perfeccionarlo) promete ser una técnica novedosa para valorar el grado de eutroficación de los cuerpos de agua.

ÍNDICES LIMNOLÓGICOS EN RÍOS

En el caso de los sistemas lóticos, la cantidad y diversidad de índices propuestos es incluso mayor que para los ambientes lénticos. Los trabajos que se mencionan a continuación son solo algunos ejemplos. Para el caso de los índices fisicoquímicos, una revisión más detallada se puede consultar en Fernández y Solano (2007) y en Samboni *et al.* (2007). En general, se puede decir que los índices de calidad del agua (ICA) y los índices de contaminación del agua (ICO) son de uso muy generalizado. Los parámetros más utilizados son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), el oxígeno disuelto (OD), los coliformes fecales, el pH, los nitratos (NO_3^-), los cambios de temperatura, los sólidos disueltos totales (SDT), el fósforo total y la turbiedad (Samboni *et al.*, 2007). Es importante tener presente que los índices fisicoquímicos se ven fuertemente influenciados por las condiciones climáticas y que son el reflejo del estado instantáneo al momento del muestreo, mientras que los indicadores biológicos acumulan los eventos de disturbio de diferentes lapsos de tiempo (Mason, 1984; Alba-Tercedor, 1996; Pinilla, 2000). Las algas, por ejemplo, muestran cambios recientes ocurridos en periodos de días o semanas (Cairns y Pratt, 1993). Los peces y la vegetación ribereña, en cambio, reflejan fluctuaciones de mayor escala temporal y espacial (años a décadas) (Karr *et al.*, 1986; Barbour *et al.*, 1999). En una posición intermedia estarían las comunidades de zooplankton, macroinvertebrados y plantas acuáticas (que muestran las variaciones ocurridas en meses o años), puesto que sus ciclos de vida no son tan cortos como los de las algas ni tan largos como los de los peces (EPA, 2002). Por supuesto, el régimen de alteraciones (duración, recurrencia, permanencia, estacionalidad, etc.) que sufren los ecosistemas acuáticos afecta la respuesta de los índices basados en las distintas comunidades. Por lo tanto, la selección de la comunidad y la interpretación del índice debe tener en cuenta dicho régimen. Además, los sistemas lóticos tienen procesos de recuperación más rápidos que los ambientes lénticos, condición que también debe considerarse a la hora de seleccionar las comunidades (Yount y Niemi, 1990).

Dentro de los grupos biológicos empleados como indicadores de la calidad del agua en ríos, el de las microalgas perifíticas es uno de los más utilizados. Se pueden mencionar algunos trabajos recientes, como el de Fore y Grafe (2002), en el que utilizaron variables funcionales más que taxonómicas; el de Hill *et al.*, (2003), quienes elaboraron un índice de integridad biótica del perifiton basado en la dominancia y riqueza de especies de diatomeas, en sus gremios funcionales y en la producción y concentración de clorofila *a* de la comunidad perifítica; el estudio de Schneider y Lindstrøm (2009), en el cual valoraron la acidificación con base en la tolerancia de las especies de diatomeas al pH.

En cuanto a la vegetación, se puede mencionar la investigación de Ferreira *et al.* (2005), quienes propusieron

un índice multimétrico basado en las plantas acuáticas y en la comunidad riparia de ríos del sur de Portugal; el estudio de Muthukrishnan *et al.* (2007), en el cual se examinó la relación entre las concentraciones de nitratos en los ríos, la cobertura del suelo y la densidad de la vegetación; y el trabajo de Sirombra y Mesa (2012) fundamentado en un índice de calidad del bosque de ribera.

Un grupo muy trabajado como indicador de calidad en ríos es el de los macroinvertebrados. Existen numerosos índices que se basan en estos organismos. Algunas revisiones recientes sobre su empleo se pueden consultar en los trabajos de Bonada *et al.* (2006) y Prat *et al.* (2009). Tal vez el sistema más conocido es el BMWP (*British Monitoring Working Party*), del cual existe varias adaptaciones para Colombia (Zamora, 2000; Riss *et al.*, 2002; Roldán, 2003; Sánchez-Herrera, 2005; Zúñiga y Cardona, 2009). Este índice asigna puntajes a cada familia presente en una muestra. Otras aproximación que toman en cuenta las abundancias y aspectos funcionales son las de Hilsenhoff (1987), Thorne y Williams (1997) y Stribling *et al.* (1998). Dentro de algunas propuestas recientes se puede mencionar el estudio de Astin (2006), que involucró numerosas variables ambientales, hidrológicas y biológicas; el trabajo de Smith *et al.* (2007), que propuso índices bióticos de invertebrados y nutrientes; y el índice multimétrico diseñado por Mondy *et al.* (2012), que incluye variables taxonómicas y rasgos biológicos.

Dentro de los índices multivariados que involucran varios grupos biológicos, existen algunos ejercicios como el de Hu *et al.* (2007), quienes construyeron un índice de condiciones riverinas (ICR) con base en la hidrología, la forma física, la zona ribereña, la calidad del agua y la vida acuática. El ICR considera 17 indicadores, dentro de los cuales se incluyen un índice de integridad biótica de peces, el índice biótico familias de macroinvertebrados de Hilsenhoff (1987) y un índice de géneros de algas. Otro ejemplo es la integración de componentes hidromorfológicos, fisicoquímicos y biológicos en un modelo predictivo desarrollado por Holguin-Gonzalez *et al.* (2013), con el cual se puede prever la ocurrencia de algunos grupos de invertebrados.

Experiencias con índices lóticos en la Universidad Nacional

Para la valoración del estado ecológico de sistemas lóticos se han desarrollado dos investigaciones. Una tuvo que ver con la determinación del caudal ambiental en ríos que requieren licenciamiento por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Pinilla-Agudelo *et al.*, 2014). El licenciamiento es la autorización que otorga la autoridad ambiental para la ejecución de una obra o actividad, sujeta al cumplimiento por el beneficiario de los requisitos que establezca la licencia otorgada. Dentro de este trabajo se elaboraron un índice de integridad del hábitat (IIH) y cuatro índices bióticos (perifiton, macroinvertebrados, peces y vegetación ribereña). Las variables del IIH son modelables

matemáticamente, de manera que se puede predecir la calidad y cantidad del hábitat fluvial ante diferentes condiciones de sustracción de caudal. Los índices bióticos se basaron en características taxonómicas y funcionales de cada comunidad y son útiles para valorar las condiciones ecológicas del río antes y después de la puesta en operación del proyecto.

La otra experiencia en la construcción de índices lóticos se realizó mediante un trabajo en la cuenca alta del río Chicamocha (Martínez, 2013), donde se construyó un Índice de Estado Limnológico Fluvial (IELF) basado en nueve variables (dos biológicas, dos hidrológicas y cinco fisicoquímicas), que permite establecer cuatro condiciones de calidad: crítica, mala, aceptable y buena. El IELF permitió valorar la condición ecológica de cinco ríos de la cuenca mencionada, pero podría ser aplicable a otras corrientes del Altiplano Cundiboyacense.

PERSPECTIVAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES LIMNOLÓGICOS EN COLOMBIA

Como se ha visto en esta revisión, las estrategias y acercamientos a la valoración ecológica de los sistemas acuáticos continentales son diversas y numerosas en el ámbito mundial. Para el caso colombiano, no obstante, los esfuerzos aún son incipientes. Se requiere continuar profundizando en estas temáticas de manera que se cuente con un mayor número de herramientas científicas y técnicas de elaboración propia, que tengan en cuenta las particularidades de los ambientes acuáticos colombianos. Estos ecosistemas son muy variados en sus características limnológicas, lo cual es un reflejo de la diversidad ecológica del país. Por tal razón, los métodos de evaluación de la calidad o estado de salud de los ríos y lagos colombianos no se pueden generalizar para todas las regiones. Es preferible desarrollar índices, tanto para sistemas lóticos como lénticos, que consideren las características de las diferentes áreas del país. Por supuesto, lo anterior implica profundizar en los esfuerzos por regionalizar los sistemas acuáticos colombianos desde una perspectiva limnológica.

Por otra parte, los índices limnológicos hasta ahora desarrollados requieren una rigurosa validación. Será necesario entonces poner a prueba dichos índices y ajustarlos en la medida en que se disponga de un mayor número de datos y de casos valorados. Esta tarea puede ser abordada por las instituciones manejadoras de los recursos naturales, las cuales son las encargadas de la gestión y planificación de los ecosistemas del país.

Adicionalmente parece necesario incluir en la evaluación limnológica de los ambientes continentales otros grupos biológicos poco considerados hasta la fecha, como aves, reptiles, anfibios y mamíferos, las cuales son comunidades bióticas que pueden indicar la salud ecosistémica de los lagos y ríos de Colombia. Indudablemente, algunos grupos que ya se han tenido en cuenta como peces y vegetación

ribereña, necesitan mayor estudio y detalle para que la información que aporten sea más reveladora y eficiente. Finalmente, hay que resaltar la importancia de trabajar a escala de las especies, dado que grados taxonómicos superiores (géneros, familias) enmascaran la respuesta específica. Incluso, algunos taxones congénéricos pueden tener comportamientos ecológicos opuestos (esto se evidenció en el IDPHB, Castro-Roa y Pinilla-Agudelo, 2014), lo cual reduce la sensibilidad de los índices limnológicos.

En suma, se pueden concluir los siguientes aspectos: los indicadores biológicos son una herramienta útil para la valoración de los ecosistemas acuáticos, pero se necesita más investigación; los índices limnológicos de una región difícilmente pueden aplicarse a zonas con características ecológicas diferentes; se necesita una regionalización (tipología) de los sistemas acuáticos para desarrollar índices particulares para cada región o tipo de ecosistema; se requiere mayor esfuerzo en fortalecer el manejo estadístico de la información; la indicación gana robustez cuando se apoya en trabajos experimentales y en niveles taxonómicos finos.

AGRADECIMIENTOS

Los índices presentados en este trabajo se desarrollaron a través de varios proyectos adscritos al grupo de investigación “Biodiversidad, biotecnología y conservación de ecosistemas” del Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL). Fueron financiados por entidades como la Dirección de Investigación Sede Bogotá (DIB) de la UNAL, el grupo “Biodiversidad y Conservación” del Instituto de Ciencias Naturales de la UNAL, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena – CORMAGDALENA. Igualmente, agradezco a los estudiantes y docentes que participaron en los diferentes estudios, cuya dedicación e interés fueron invaluable; sin sus aportes y su amistad no hubiese sido posible realizar estas investigaciones.

REFERENCIAS

- Alba-Tercedor J. Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. IV simposio del agua en Andalucía (SIAGA). Almería. 1996;2:203-213.
- Astin LE. Data synthesis and bioindicator development for nontidal streams in the interstate Potomac River basin, USA. *Ecol Indic.* 2006;6:664-685. Doi:10.1016/j.ecolind.2005.08.030
- Barbe J, Lavergne E, Rofes G, Lascombe M, Rivas J, Bornard CH, *et al.* Diagnose rapide des plans d'eau. *Informations Techniques du CEMA- GREF.* 1990;79:1-8.
- Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD, Stribling JB. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2

- ed. EPA/841-B-99-002. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water; 1999. 339 p.
- Bharti N, Katyal D. Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. *Int J Environ Sci*. 2011;2(1):154-173. Doi:10.12691/ajwr-1-3-3
- Bonada N, Prat N, Resh VH, Statzner B. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches. *Annu Rev Entomol*. 2006;51:495-523. Doi:10.1146/annurev.ento.51.110104.151124
- Cairns J, Pratt JR. A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates. In: Rosenberg DM, Resh VH, editors. *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. New York: Chapman & Hall; 1993. p. 10-27.
- Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnol Oceanogr*. 1977;22:361-369. Doi:10.4319/lo.1977.22.2.0361
- Castro-Roa D, Pinilla-Agudelo G. Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. *Limnetica*. 2014;33(2):297-312.
- Coelho S, Gamito S, Pérez-Ruzafa A. Trophic state of Foz de Almargem coastal lagoon (Algarve, South Portugal) based on the water quality and the phytoplankton community. *Estuar Coast Shelf S*. 2006;71(1-2):218-231. Doi:10.1016/j.ecss.2006.07.017
- Croft MV, Chow-Fraser P. Use and development of the wetland macrophyte index to detect water quality impairment in fish habitat of Great Lakes coastal marshes. *J Great Lakes Res*. 2007;33(3):172-197. Doi:10.3394/03801330(2007)33[172:UADOTW]2.0.CO;2
- Delgadillo IP. Respuestas biológicas de *Scenedesmus ovalternus* y *Chlorella vulgaris* inmovilizadas en alginato de calcio, ante diferentes concentraciones de nutrientes en condiciones de laboratorio (tesis de maestría). Bogotá: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia; 2014. 105 p.
- Fernández N, Solano F. Índices de calidad y de contaminación del agua. Pamplona: Universidad de Pamplona; 2007. 142 p.
- Ferreira MT, Rodríguez-González PM, Aguiar FC, Albuquerque A. Assessing biotic integrity in Iberian rivers: Development of a multimetric plant index. *Ecol Indic*. 2005;5:137-149. Doi:10.1016/j.ecolind.2005.01.001
- Fore LS, Grafe C. Using diatoms to assess the biological condition of large rivers in Idaho (U.S.A.). *Freshwater Biol*. 2002;47(10):2015-2037. Doi:10.1046/j.1365-2427.2002.00948.x
- Gaiser E. Periphyton as an indicator of restoration in the Florida Everglades. *Ecol Indic*. 2009;9(6):S37-S45. Doi:10.1016/j.ecolind.2008.08.004
- Hill BH, Herlihy AT, Kaufmann PR, DeCelles SJ, Borgh MAV. Assessment of streams of the eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecol Indic*. 2003;2(4):325-338. Doi:10.1016/S1470-160X(02)00062-6
- Hilsenhoff WL. An improved biotic index of organic stream pollution. *Great Lakes Entomol*. 1987;20(1):31-39.
- Holguin-Gonzalez J, Boets P, Alvarado A, Cisneros F, Carrasco M, Wyseure G, et al. Integrating hydraulic, physicochemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the River Cuenca in Ecuador. *Ecol Model*. 2013;254(10):1-14. Doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.01.011
- Horton RK. An index number system for rating water quality. *J Water Pollut Control Fed*. 1965;37(3):300-306.
- Hu T, Wang H, Lee H. Assessment of environmental conditions of Nan-Shih stream in Taiwan. *Ecol Indic*. 2007;7(2):430-441. Doi:10.1016/j.ecolind.2006.04.003
- Jiang J. Development of a new biotic index to assess freshwater pollution. *Environ Pollut*. 2006;139(2):306-317. Doi:10.1016/j.envpol.2005.05.006
- Jiang J, Shen Y. Use of the aquatic protozoa to formulate a community biotic index for an urban water system. *Sci Total Environ*. 2005;346(1-3):99-111. Doi:10.1016/j.scitotenv.2004.12.001
- Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*. 1981;6:21-27.
- Karr JR, Fausch KD, Angermeier PL, Yant PR, Schlosser LJ. Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale. Special publication 5. Champaign: Illinois Natural History Survey; 1986. 28 p.
- Kolkwitz R, Marsson M. Ökologie der pflanzlichen Saprobien. *Ber Dtsch Bot Ges*. 1908;26A:505-519.
- Kolkwitz R, Marsson M. Ökologie der tierischen Saprobien. *Beiträge zur Lehre von des biologischen Gewässerbeurteilung*. Intern Revue Hydrobiol Hydrogr. 1909;2:126-152.
- Lane CR, Brown MT. Diatoms as indicators of isolated herbaceous wetland condition in Florida, USA. *Ecol Indic*. 2007;7(3):521-540. Doi:10.1016/j.ecolind.2006.06.001
- Martínez ID. Índice de estado limnológico riverino para los ríos de la cuenca alta del río Chicamocha (tesis maestría). Tunja: Escuela de Posgrados, Facultad de Ingeniería Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; 2013. 136 p.
- Martínez-Rodríguez MA, Pinilla-A G. Valoración de la calidad del agua de tres ciénagas del departamento de Cesar mediante macroinvertebrados asociados a *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae). *Caldasia*. 2014;36(2):305-321. Doi:10.15446/caldasia.v36n2.47489
- Mason CF. Biología de la contaminación del agua dulce. Madrid: Ed. Alhambra; 1984. 289 p.
- Milhou RT, Waddle TJ. Physical Habitat Simulation (PHABSIM) Software for Windows (v.1.5.1). Fort Collins, CO: USGS Fort Collins Science Center; 2012.
- Miller SJ, Wardrop DH, Mahaney WM, Brooks RP. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetlands in central Pennsylvania. *Ecol Indic*. 2006;6(2):290-312. Doi:10.1016/j.ecolind.2005.03.011

- Miller SJ, Wardrop DH. Adapting the floristic quality assessment index to indicate anthropogenic disturbance in central Pennsylvania wetlands. *Ecol Indic.* 2006;6(2):313-326. Doi:10.1016/j.ecolind.2005.03.012
- Mondy CP, Villeneuve B, Archaimbault V, Usseglio-Polatera P. A new macroinvertebrate-based multimetric index (I_2M_2) to evaluate ecological quality of French wadeable streams fulfilling the WFD demands: A taxonomical and trait approach. *Ecol Indic.* 2012;18:452-467. Doi:10.1016/j.ecolind.2011.12.013
- Muthukrishnan S, Lewis GP, Andersen CB. Chapter 24 Relations among land cover, vegetation index, and nitrate concentrations in streams of the Enoree River Basin, piedmont region of South Carolina, USA. In: Sarkar D, Datta R, Hannigan R, editors. *Concepts and Applications in Environmental Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier; 2007. p. 515-539. Doi:10.1016/S1474-8177(07)05024-3
- Nygaard G. Hydrobiological studies on some Danish ponds and lakes. II. The quotient hypothesis and some new or little known phytoplankton organisms. *Biol Skr Dan Vid Sel.* 1949;7(1):1-293.
- Patrick R. A proposed biological measure of stream conditions, based on a survey of the Conestoga Basin, Lancaster County, Pennsylvania. *Proc Acad Nat Sci Philadelphia.* 1949;101:277-341.
- Pineda A. Efecto del grado de trofia de tres sistemas lénticos sobre el crecimiento poblacional de las especies *Scenedesmus ovalternus* y *Chlorella vulgaris*, inmovilizadas en esferas de alginato de calcio (tesis de maestría). Bogotá: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia; 2014. 115 p.
- Pinilla G. Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano; 2000. 63 p.
- Pinilla G. An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá city, Colombia. *Ecol Indic.* 2010;10(4):848-856. Doi:10.1016/j.ecolind.2010.01.006
- Pinilla G, Duarte J, Vega L. Índice de Estado Limnológico (IEL) para evaluar las condiciones ecológicas de las ciénagas del Canal del Dique, Colombia. *Acta biol Colomb.* 2010;15(2):169-188.
- Pinilla-Agudelo GA, Rodríguez-Sandoval EA, Camacho-Botero LA. Propuesta metodológica preliminar para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Colombia. *Acta biol Colomb.* 2014;19(1):43-60. Doi:10.15446/abc.v19n1.38040
- Prat N, Ríos B, Acosta R, Rieradevall M. Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas. In: Domínguez E, Fernández HR, editores. *Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos*. San Miguel de Tucumán: Publicaciones Especiales. Fundación Miguel Lillo, Argentina; 2009. p. 631-654.
- Reiss KC. Florida Wetland Condition Index for depressional forested wetlands. *Ecol Indic.* 2006;6(2):337-352. Doi:10.1016/j.ecolind.2005.03.013
- Riss W, Ospina R, Gutiérrez JD. Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia* 2002;24(1):135-156.
- Roldán G. Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Rev Acad Colomb Cienc.* 1999;23(88):375-387.
- Roldán G. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia; 2003. 170 p.
- Samboni NE, Carvajal Y, Escobar JC. Revisión de parámetros físicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ing Investig.* 2007;27(3):172-181.
- Sánchez-Herrera MJ. El índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party score), modificado y adaptado al cauce principal del río Pamplonita, Norte de Santander. *Rev Bistua Univ Pamplona* 2005;3(2):54-67.
- Schneider S, Lindstrøm E-A. Bioindication in Norwegian rivers using non-diatomaceous benthic algae: The acidification index periphyton (AIP). *Ecol Indic.* 2009;9(6):1206-1211. Doi:10.1016/j.ecolind.2009.02.008
- Schultz MT. A critique of EPA's index of watershed indicators. *J Environ Manage.* 2001;62:429-442. Doi:10.1006/jema.2001.0451
- Sirombra MG, Mesa LM. A method for assessing the ecological quality of riparian forests in subtropical Andean streams: QBRy index. *Ecol Indic.* 2012;20:324-331. Doi:10.1016/j.ecolind.2012.02.021
- Smith AJ, Bode RW, Kleppel GS. A nutrient biotic index (NBI) for use with benthic macroinvertebrate communities. *Ecol Indic.* 2007;7(2):371-386. Doi:10.1016/j.ecolind.2006.03.001
- Stribling JB, Jessup BK, White JS. Development of a benthic index of biotic integrity for Maryland streams. Annapolis: Maryland Department of Natural Resources, Report No CBWP-EA-98-3. 1998. 62 p.
- Thorne RJ, Williams WP. The response of benthic macroinvertebrates to pollution in developing countries: a multimetric system of bioassessment. *Freshwater Biol.* 1997;37(3):671-686. Doi:10.1046/j.1365-2427.1997.00181.x
- U.S. EPA. Methods for evaluating wetland condition: Developing an Invertebrate Index of Biological Integrity for wetlands. EPA-822-R-02-019. Washington: Environmental Protection, Agency Office of Water; 2002. 50 p.
- Viaroli P, Christian RR. Description of trophic status, hyperautotrophy and dystrophy of a coastal lagoon through a potential oxygen production and consumption index—TOSI: Trophic Oxygen Status Index. *Ecol Indic.* 2003;3(4):237-250. Doi:10.1016/j.ecolind.2003.11.001
- Vollenweider RA, Giovanardi F, Montanari G, Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine

- coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*. 1998;9(3):329-357. Doi:10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9
- Walsh P, Wheeler W. Water quality index aggregation and cost benefit analysis. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Economics. Working Paper n. 12-05; 2012. 23 p. Available on: [http://yosemite.epa.gov/ee/epa/eed.nsf/44a8be610f6c5f0885256e46007b104e/742fc3186556087885257a3300538f8b/\\$FILE/2012-05.pdf](http://yosemite.epa.gov/ee/epa/eed.nsf/44a8be610f6c5f0885256e46007b104e/742fc3186556087885257a3300538f8b/$FILE/2012-05.pdf)
- Yount JD, Niemi GJ. Recovery of lotic communities and ecosystems from disturbance—A narrative review of case studies. *Environ Manage*. 1990;14(5):547-569. Doi:10.1007/BF02394709
- Zamora H. Adaptación del índice BMWP para la evaluación biológica de la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia. *Rev Unicauca Ciencia* 2000;4:47-59.
- Zúñiga MC, Cardona W. Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental. En: Cantera J, Carvajal Y, Castro L, editores. *Caudal ambiental: conceptos experiencias y desafíos*. Cali: Programa Editorial de la Universidad del Valle; 2009. p. 167-198.