



Estado trófico y nutriente limitante de la producción biológica en una laguna tropical somera

Trophic status and limiting nutrient of primary production in a tropical shallow lagoon

Marín-Leal, Julio César^{1*}

Méndez-Farías, Marisabel¹

Urdaneta-Ospino, Geraldin¹

Fernández-Álvarez, Andreina²

¹Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela

²Centro de Formación Técnica CENCO, Santiago, Chile

Recibido: 08 Feb. 2023 | Aceptado: 20 Abr. 2023 | Publicado: 10 Jul. 2023

Autor de correspondencia*: jmarin@fing.luz.edu.ve

Como citar este artículo: Marín-Leal, J. C., Méndez-Farías, M., Urdaneta-Ospino, G. & Fernández-Álvarez, A. (2023). Estado trófico y nutriente limitante de la producción biológica en una laguna tropical somera. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 2(2), e502. <https://doi.org/10.51252/reacae.v2i2.e502>

RESUMEN

Las lagunas costeras son ecosistemas frecuentemente sometidos a niveles elevados de estrés ambiental debido a la fuerte influencia antrópica que se ejerce sobre ellos, lo que conlleva a la aceleración de su proceso de envejecimiento. En el presente trabajo se determinaron el estado trófico y el nutriente limitante de la producción biológica en la laguna tropical Las Peonías (Zulia, Venezuela), mediante el cálculo de cuatro índices de estado trófico (IET) y relaciones de nitrógeno/fósforo, respectivamente. Para ello, se realizaron 10 muestreos puntuales de agua superficial en 10 estaciones de muestreo, analizándose los siguientes parámetros: transparencia, saturación de oxígeno disuelto, clorofila *a*, nitrógeno total y fósforo total, mediante métodos estandarizados. De acuerdo con los resultados obtenidos (IETC e IETM >74 y TRIX >7,6), la categorización trófica de la laguna es hipereutrófica, debido al alto influjo de sustancias contaminantes a partir de la cañada Iragorri y del caño Araguato. Si bien el elemento limitante es el nitrógeno, las concentraciones generales de los nutrientes son elevadas, contribuyendo al proceso de eutrofia que se desarrolla en este cuerpo de agua. Estos hallazgos sirven de base para el entendimiento ecológico del ecosistema y la formulación de planes de manejo integral del recurso hídrico.

Palabras clave: eutroficación; índice de estado trófico; Lago de Maracaibo; laguna costera; nutrientes

ABSTRACT

Coastal lagoons are ecosystems frequently subjected to high levels of environmental stress due to the strong anthropogenic influence exerted on them, which leads to the acceleration of their aging process. In the present work, the trophic status and the limiting nutrient of biological production in the Las Peonías tropical lagoon (Zulia, Venezuela) were determined by calculating four trophic status indices and nitrogen/phosphorus ratios, respectively. To this end, 10 surface water samplings at 10 sampling stations were performed to later analyze the following parameters: transparency, dissolved oxygen saturation, chlorophyll *a*, total nitrogen and total phosphorus, using standardized methods. According to the results obtained, the trophic categorization of the lagoon is hypereutrophic, due to the high influx of polluting substances from Iragorri ravine and Araguato channel. Although the limiting element is nitrogen, the general concentrations of nutrients are high, contributing to the eutrophy process that develops in this body of water. These findings serve as a basis for the ecological understanding of the ecosystem and the formulation of integrated water resource management plans.

Keywords: coastal lagoon; eutrophication; Lake Maracaibo; nutrients; trophic status index



1. INTRODUCCIÓN

El estado trófico es una característica importante de los ecosistemas acuáticos ya que refleja la influencia antrópica sobre la calidad del agua y el funcionamiento ecológico de ríos, lagos, estuarios, embalses y lagunas. Esta condición está definida por el grado de eutrofización, el cual se desarrolla por el enriquecimiento con nutrientes inorgánicos (básicamente nitrógeno y fósforo), estimulando el crecimiento de los organismos fotosintéticos (p. ej. macrófitas, algas y cianobacterias) y de otras comunidades relacionadas (Moreno Franco et al., 2010; Fernandes Cunha et al., 2013; Pedrozo Acuña & Ramírez Salinas, 2020). Para valorar esta condición se han propuesto índices de estado trófico (IET) de diversa índole, entre los que se tienen: composición física, química y biológica del agua (Carlson, 1977; Caspers, 1984; Toledo et al., 1983; Vollenweider et al., 1998), índices de eutrofización (Karydis et al., 1983; Moreno Franco et al., 2010); sistemas de información geográfica (Cervantes-Astorga et al., 2021), imágenes satelitales (Cheng & Lei, 2001), invertebrados bénticos (Haase & Nolte, 2008), sensores remotos (Martins et al., 2020) y zooplancton (Montagud et al., 2019).

Los IET basados en las características físicas, químicas y biológicas del agua son modelos matemáticos que permiten estimar la categoría trófica de los cuerpos de agua, mediante la consideración de un grupo de variables clave que definen dicha condición (Stednick & Hall, 2003; Bekteshi & Cupi, 2014). Entre estos índices, algunos de los más usados son: IET de Carlson (IETC) (Carlson, 1977), IET modificado por Toledo (IETM) (Toledo et al., 1983), índice de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (Caspers, 1984) e IET compuesto (TRIX) (Vollenweider et al., 1998). En dichas ecuaciones como variables físicas, se suelen incluir: transparencia del agua, temperatura y luz; entre las químicas: pH, oxígeno disuelto (OD), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT); y entre las biológicas: clorofila *a* y biomasa fitoplanctónica (Stednick & Hall, 2003; O'Boyle et al., 2013; Gómez et al., 2014; Anthwal et al., 2018). Este enfoque ha permitido conocer y reportar el estado trófico de diferentes ecosistemas lagunares alrededor del mundo (López Martínez & Madroñero Palacios, 2015; Ruiz Ruiz, 2017; Orquera & Cabrera, 2020; & Mendoza-Caballero & Quiroz-Santos, 2022), sentando las bases para su entendimiento ecológico y la formulación de planes de manejo integral del recurso hídrico (Maberly et al., 2020).

Por otra parte, el conocimiento acerca del nutriente limitante de la producción biológica, por otra parte, constituye uno de los aspectos más resaltantes en los procesos de gestión y planificación de los recursos acuáticos naturales y de su biota, toda vez que la entrada de nutrientes inorgánicos (principalmente nitrógeno "N" y fósforo "P") a partir de fuentes alóctonas, altera el equilibrio ecológico y modifica las condiciones ambientales de estos ecosistemas (Glibert, 2012; Maberly et al., 2020). Es conocido que en estos ambientes el "P" suele ser el nutriente con menor suministro en relación con el nitrógeno, por varias razones: no existe en fase gaseosa, no es muy soluble en agua y se absorbe fuertemente en las partículas del suelo, entre otras; lo que hace que la erosión y la deposición seca sean una fuente importante de fósforo en el agua. No obstante, aunque el fósforo es naturalmente escaso, las actividades humanas pueden aumentar su concentración en las aguas a través de desechos humanos y animales, uso de detergentes y fertilizantes, tala de bosques, etc. (Anderson et al., 2002; Stednick & Hall, 2003; EEA, 2005). Si bien el "N" es frecuentemente más abundante que el "P" en el medio acuático, también puede actuar como limitante de la producción biológica, particularmente debido a la considerable acumulación de "P" procedente de las actividades antrópicas (Elser et al., 2009; Maberly et al., 2020). Además, se ha demostrado que el fitoplancton es comúnmente tan limitado por "N" como por "P", y la adición de ambos nutrientes generalmente produce un aumento en la producción biológica, lo que indica un colimitación (Elser et al., 2007).

Considerando los aspectos anteriores, en el presente trabajo se determinaron el estado trófico y el nutriente limitante de la producción biológica en la laguna tropical Las Peonías (Zulia, Venezuela), mediante la estimación de cuatro IET (IETC, IETM, OCDE y TRIX) y relaciones de nitrógeno y fósforo

(relación N/P y relación molar N:P), respectivamente, con la finalidad de proporcionar información fundamental para dirigir los planes futuros de gestión y sentar las bases para el uso sustentable y equitativo de este recurso hídrico, en función de los servicios ambientales que presta a su entorno.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La presente investigación se realizó en la laguna Las Peonías, que forma parte del Parque Deportivo y Recreacional Las Peonías, ubicado en el sector noroeste del estrecho de Maracaibo, entre los municipios Maracaibo y Mara (estado Zulia), dentro de la cuenca hidrográfica del sistema estuarino Lago de Maracaibo (Venezuela). El área de estudio estuvo comprendida geográficamente entre las coordenadas huso 19 N proyección UTM 1191049,27; 210319,57 de latitud norte y 1189178,13; 193657,96 de longitud oeste (Figura 1). Esta área tiene una superficie de 2.172 ha de las cuales 612 ha corresponden al cuerpo de agua. El área superficial de la laguna es de aproximadamente 600 ha, con una profundidad media de 65 cm y una cuenca hidrográfica de 5.000 ha. El relieve es plano (entre 0 y 20 m) con zonas anegadizas, orillas de playones, lagunas e islotes que están bajo constante acción de las aguas del estuario (ICLAM, 1988; ICLAM, 2005; González et al., 2012).

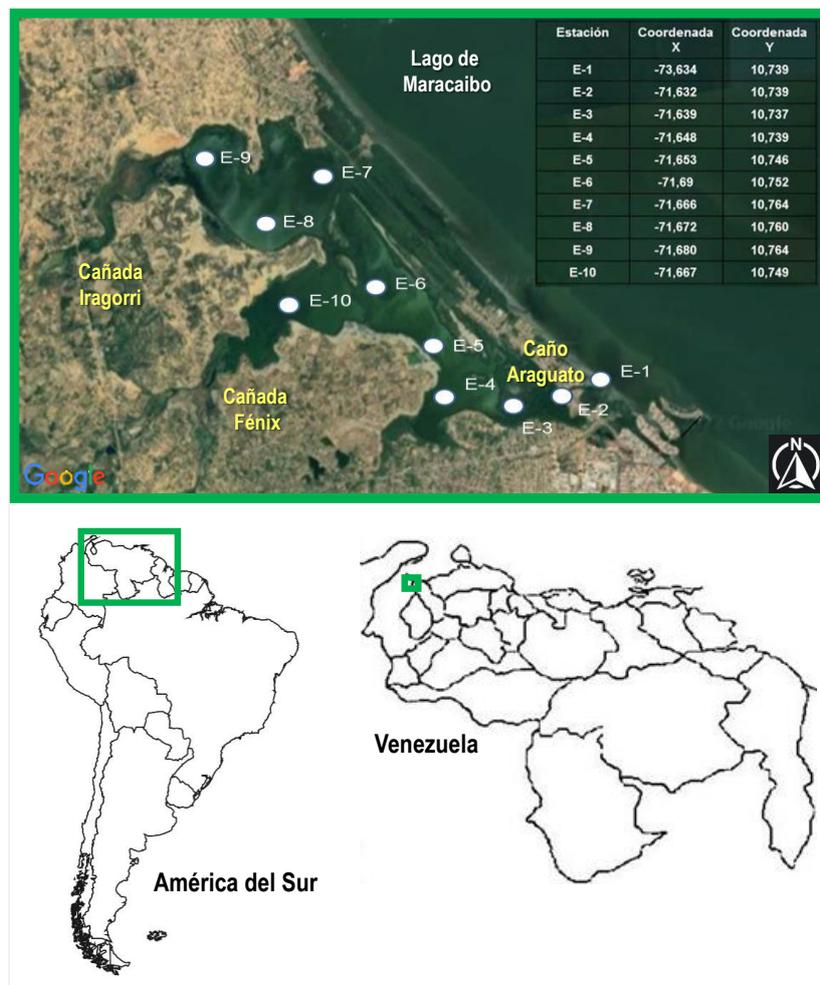


Figura 1. Área de estudio. Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo en la laguna Las Peonías (estado Zulia, Venezuela)

Esta laguna se encuentra situada en tierra firme y separada parcialmente del Lago de Maracaibo por una barrera litoral, ofreciendo también canales estrechos como el caño Araguato (aprox. 1 km de longitud; 4,0

m de ancho y 2,5 m de profundidad), que permite su comunicación con el estuario de acuerdo a las variaciones de la marea, manteniendo un régimen fluctuante de salinidad y alta producción biológica (régimen mareal de tipo semidiurno con dos picos entre 0,2 y 3,0 m de altura cada 12 h). Desde hace varias décadas este ecosistema experimenta un proceso de eutroficación como resultado del crecimiento demográfico y el desarrollo de actividades antrópicas en sus riberas, entre las que se cuentan: vertido de aguas residuales no tratadas (domésticas e industriales), procesamiento de sal y cría de animales, lo cual, aunado a las descargas de las cañadas Iragorri (375 L/seg) y Fénix (759 L/seg), contribuye con la carga de materia orgánica y otros contaminantes (p. ej. nitrógeno y fósforo) en el cuerpo de agua (Acevedo & Cañas, 1980; ICLAM, 1988; González et al., 2012; Marín-Leal et al., 2019).

2.2. Estrategia de muestreo

Se realizaron campañas de muestreo cada tres meses durante la marea alta, entre abril de 2017 y julio de 2019 (10 muestreos en total), incluyendo épocas de lluvia, sequía y transiciones (lluvia-sequía y sequía-lluvia). Para ello, se establecieron 10 estaciones de muestreo considerando la representatividad, fuentes de contaminación y accesibilidad, de acuerdo con muestreos preliminares y distribuyéndose a lo largo del canal de corriente en el cuerpo de agua (Figura 1). Estas estaciones fueron ubicadas mediante GPS en cada jornada de muestreo. El número total de muestras fue: 10 muestreos (M) x 10 estaciones (E) = 100 muestras.

La captación de las muestras de agua se realizó manualmente a nivel superficial desde una embarcación, tomando porciones de 2 L en envases plásticos identificados. Las muestras se conservaron en una cava con hielo para su traslado inmediato al laboratorio, donde fueron preservadas hasta su análisis, de acuerdo con lo establecido por APHA (2017).

2.3. Análisis de parámetros fisicoquímicos

En las muestras de agua se analizaron in situ los siguientes parámetros: transparencia (directamente en el cuerpo de agua con un disco de Secchi de 20 cm de diámetro) y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% Sat. OD) (sonda multiparamétrica Orion modelo 5 Star). En el laboratorio se cuantificaron: clorofila *a* (método espectrofotométrico a las longitudes de onda de 665 y 750 nm, previa extracción en acetona 90%), NT (sumatoria de nitrato + nitrito (método estándar de reducción en columna de cadmio) + N-Kjeldahl (método volumétrico estándar, previa digestión ácida a 380 °C) y PT (método colorimétrico estándar del ácido ascórbico, previa digestión ácida) (APHA, 2017). Todos los análisis se realizaron por duplicado.

2.4. Cálculos de índices de estado trófico

La estimación del estado trófico de la laguna se realizó aplicando cuatro índices: IETC, IETM, OCDE y TRIX, según se describe a continuación.

Índice de estado trófico de Carlson

El IETC es uno de los más empleados en la evaluación, determinación y clasificación del estado trófico de los sistemas lacustres, debido a su sencillez y objetividad (Calazans Duarte et al., 1999). En su cálculo se aplicaron transformaciones lineales de la transparencia, clorofila *a* y PT, de acuerdo con Carlson (1977), haciendo uso de las Ecuaciones 1, 2 y 3. Luego, para obtener el valor final del índice, se utilizó la Ecuación 4. A saber (Carlson, 1977; Pena Naval et al., 2004):

$$\text{IETC (transparencia)}=10^* \left(6 - \frac{\text{Ln transparencia}}{\text{Ln } 2} \right) \quad (1)$$

Donde: IETC (transparencia) es el índice de estado trófico de Carlson para la transparencia y Ln transparencia el logaritmo natural del valor de transparencia (m).

$$\text{IETC (clorofila } a)=10^* \left\{ 6 - \left[\frac{2,04-0,68*(\text{Ln clorofila } a)}{\text{Ln } 2} \right] \right\} \quad (2)$$

Donde: IETC (clorofila *a*) es el índice de estado trófico de Carlson para la clorofila *a* y Ln clorofila *a* el logaritmo natural de la concentración de clorofila *a* (mg/m³).

$$\text{IETC (PT)}=10^* \left[6 - \left(\frac{\text{Ln } \frac{48}{\text{PT}}}{\text{Ln } 2} \right) \right] \quad (3)$$

Donde: IETC (PT) es el índice de estado trófico de Carlson para el fósforo total y Ln PT el logaritmo natural de la concentración de fósforo total (mg/m³).

$$\text{IETC} = \frac{\text{IETC (transparencia)}+\text{IETC (clorofila } a)+\text{IETC (PT)}}{3} \quad (4)$$

Donde: IETC es el índice de estado trófico de Carlson, IETC (transparencia) el índice de estado trófico de Carlson para la transparencia, IETC (clorofila *a*) el índice de estado trófico de Carlson para la clorofila *a*, IETC (PT) el índice de estado trófico de Carlson para el fósforo total. Los valores adimensionales obtenidos al aplicar las Ecuaciones 1, 2 y 3 varían en una escala de 0 a 100 y el criterio de categorización fue (Carlson, 1977; Pena Naval et al., 2004; Correa & da Cunha, 2011): ultraoligotrófico <30, oligotrófico entre 30 y 44, mesotrófico entre 44 y 54, eutrófico entre 54 y 74, e hipereutrófico >74.

Índice de estado trófico modificado por Toledo

El IETM es mucho más apropiado para determinar el estado trófico de ecosistemas acuáticos tropicales, considerando su alto grado de productividad debido a las tasas de asimilación de nutrientes; teniendo una capacidad de metabolización mucho mayor a la que poseen los ecosistemas de zonas templadas (Toledo et al., 1983; Rocha, 2006). Se calculó usando los datos de transparencia, clorofila *a* y PT, mediante las Ecuaciones 5, 6 y 7. Luego, para obtener el valor final del índice, se utilizó la Ecuación 8. A saber (Toledo et al., 1983; Pena Naval et al., 2004):

$$\text{IETM (transparencia)}=10^* \left\{ 6 - \left[\frac{0,64+\text{Ln transparencia}}{\text{Ln } 2} \right] \right\} \quad (5)$$

Donde: IETM (transparencia) es el índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo para la transparencia y Ln transparencia el logaritmo natural del valor de transparencia (m).

$$IETM (\text{clorofila } a) = 10 * \left\{ 6 - \frac{2,04 - 0,695 * (\text{Ln clorofila } a)}{\text{Ln } 2} \right\} \quad (6)$$

Donde: IETM (clorofila *a*) es el índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo para la clorofila *a* y Ln clorofila *a* el logaritmo natural de la concentración de clorofila *a* (mg/m³).

$$IETM (PT) = 10 * \left\{ 6 - \left[\frac{\text{Ln} \frac{80,32}{PT}}{\text{Ln } 2} \right] \right\} \quad (7)$$

Donde: IETM (PT) es el índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo para el fósforo total y Ln PT el logaritmo natural de la concentración de fósforo total (mg/m³).

$$IETM = \frac{IETM (\text{transparencia}) + IETM (\text{clorofila } a) + IETM (PT)}{3} \quad (8)$$

Donde: IETM es el índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo, IETM (transparencia) el índice de estado trófico de Carlson modificado para la transparencia, IETM (clorofila *a*) el índice de estado trófico de Carlson modificado para la clorofila *a* e IETM (PT) el índice de estado trófico de Carlson modificado para el fósforo total. Los valores adimensionales obtenidos al aplicar las Ecuaciones 5, 6 y 7 varían en una escala de 0 a 100 y el criterio de categorización fue (Carlson, 1977; Pena Naval et al., 2004; Correa & da Cunha, 2011): ultraoligotrófico <30, oligotrófico entre 30 y 44, mesotrófico entre 44 y 54, eutrófico entre 54 y 74, e hipereutrófico >74.

Índice de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

El índice de la OCDE proporciona un esquema cuantitativo probabilístico para las diferentes categorías de estado trófico a partir del análisis de nutrientes (PT), de la capacidad de generar biomasa (clorofila *a*) y de la disponibilidad del espectro fotosintético en la columna de agua (transparencia) (Caspers, 1984; Salas & Martino, 2001). Se estimó usando los niveles de transparencia, clorofila *a* y PT, de acuerdo con los criterios presentados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Criterios de categorización del índice de estado trófico de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (Caspers, 1984)

Categoría trófica	Transparencia (m)	Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)	Fósforo total (mg/m ³)
Ultraoligotrófico	>12	<1	<4
Oligotrófico	6 a 12	1 a 2,5	4 a 10
Mesotrófico	3 a 6	2,5 a 7,9	10 a 35
Eutrófico	1,5 a 3	8 a 25	35 a 100
Hipereutrófico	<1,5	>25	>100

Índice de estado trófico compuesto

El TRIX es un índice multivariado propuesto por Vollenweider et al. (1998), que integra factores directamente relacionados con la producción y respuesta biológica (clorofila *a*), variables de presión (NT y

PT) y variables respuestas a la eutrofización (Sat. OD). Se calculó aplicando la siguiente ecuación (Ruiz Ruiz, 2017):

$$\text{TRIX} = \frac{\text{Log}(\text{clorofila a} * \text{OD} * \text{NT} * \text{PT}) + 1,5}{1,2} \quad (9)$$

Donde: TRIX es el índice de estado trófico TRIX, clorofila a la concentración de clorofila a (mg/m^3), OD el valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto ($|100 - \% \text{ Sat. OD}|$), NT la concentración de nitrógeno total y PT la concentración de fósforo total. Los valores 1,5 y 1,2 son variables introducidas para ajustar el límite más bajo del índice y la extensión de la escala trófica relacionada (de 0 a 10 unidades TRIX). La categorización del estado trófico se realizó, según Vollenweider et al. (1998); Ruiz Ruiz (2017): oligotrófico entre 0 y 2,5; mesotrófico entre 2,6 y 5,0; eutrófico entre 5,1 y 7,5; e hipereutrófico entre 7,6 y >10.

2.5. Cálculos de nutriente limitante

Se determinó el nutriente limitante de la producción biológica en la laguna, mediante los dos enfoques que se describen a continuación.

Relación N/P

Para calcular la relación N/P se dividió la concentración de NT (mg/m^3) entre la de PT (mg/m^3), de acuerdo con Parra Pardi (1979), estableciendo el nutriente limitante según los siguientes criterios:

- 1) Si la relación excede de 10, entonces P es el factor nutricional limitante.
- 2) Cuando está entre 5 y 10, cualquiera de los dos (N o P) podría serlo en un momento dado.
- 3) Si la relación está por debajo de 5, el nutriente limitante es N.

Relación molar N:P

Se calculó la relación molar N:P transformando las concentraciones de NT y PT a moles/L. Luego, se usó la proporción de 16N:1P para establecer el nutriente limitante, de acuerdo con Redfield (1958), quien expuso lo siguiente:

- 1) Si la relación molar N:P se encuentra por debajo de 16:1, las algas podrían tener menos nitrógeno disponible por unidad de fósforo y entonces experimentan limitaciones por N.
- 2) Si la relación está por encima de 16:1, se establece una condición de fósforo limitante.

2.6. Análisis estadístico de datos

Se realizaron los cálculos de estadística descriptiva (máximos, mínimos, medias aritméticas y desviaciones estándares) de los parámetros fisicoquímicos, índices de estado trófico y nutriente limitante, usando el programa Microsoft Excel versión 10. Se empleó el programa SPSS *Statistics* versión 20 para hacer un análisis de varianza (ADEVA) de dos vías (dos factores) y la prueba *a posteriori* de Tukey, con la finalidad de determinar las diferencias significativas de los valores de los parámetros fisicoquímicos, índices y nutriente limitante entre los muestreos (variabilidad temporal) y entre las estaciones de muestreo (variabilidad espacial). Como paso previo, se comprobaron tanto la homogeneidad de las varianzas (prueba de Levene), como la distribución normal de los residuos (prueba de Kolmogorov-Smirnov).

3. RESULTADOS

3.1. Características fisicoquímicas

Los niveles globales de transparencia, Sat. OD, clorofila *a*, NT y PT estuvieron entre 0,13 y 0,35 m; 32,0 y 83,2%; 22,5 y 120,0 mg/m³; 1109,6 y 13362,1 mg/m³; y 1153,2 y 5657,7 mg/m³, respectivamente. Todos los parámetros variaron significativamente ($p < 0,05$) con respecto a los muestreos y a las estaciones de muestreo (excepto Sat. OD y PT). No se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) para la interacción muestreo*estación de muestreo (Tabla 2). De manera general, la variabilidad temporal develó la conformación de 3 grupos distintivos de datos: M3, M4, M5, M7 y M8; M2, M9, M1 y M10; y M6 (Tabla 3); similarmente, la variabilidad espacial mostró también 3 grupos diferentes: E2, E3 y E4; E5, E6, E1, E7, E8 y E10; y E9 (Tabla 4).

Tabla 2.

Resultados del análisis de varianza (ADEVA) de dos vías para los parámetros fisicoquímicos, índices y relación N/P, considerando las estaciones de muestreo (variabilidad espacial) y los muestreos (variabilidad temporal)

Origen	Variable	gl	Media cuadrática	F	p
Muestreo	Transparencia	9	0,017	6,577	<0,001
	Sat. OD	9	1377,427	5,456	<0,001
	Clorofila <i>a</i>	9	20883622,123	2,500	0,013
	NT	9	5177180,809	3,466	0,013
	PT	9	20883622,123	2,500	0,001
	IETC	9	45,841	7,184	<0,001
	IETM	9	46,151	7,163	<0,001
	TRIX	9	0,356	3,151	0,002
	Relación N/P	9	20,603	4,437	<0,001
Estación de muestreo	Transparencia	9	0,021	8,421	<0,001
	Sat. OD	9	321,630	1,274	0,260
	Clorofila <i>a</i>	9	30671493,511	3,671	0,001
	NT	9	1025434,876	0,687	0,001
	PT	9	30671493,511	3,671	0,719
	IETC	9	20,598	3,228	0,002
	IETM	9	20,943	3,250	0,002
	TRIX	9	0,458	4,061	<0,001
	Relación N/P	9	7,737	1,666	0,107
Muestreo * estación de muestreo	Transparencia	81	0,003	1,227	0,165
	Sat. OD	81	172,069	0,682	0,963
	Clorofila <i>a</i>	81	7214908,265	0,864	0,753
	NT	81	1223807,073	0,819	0,753
	PT	81	7214908,265	0,864	0,823
	IETC	81	4,953	0,776	0,881
	IETM	81	4,981	0,773	0,885
	TRIX	81	0,079	0,698	0,953
	Relación N/P	81	4,049	0,872	0,738

gl: grados de libertad, F: prueba de Fisher, p: nivel de significancia, Sat. OD: saturación de oxígeno disuelto, NT: nitrógeno total, PT: fósforo total, IETC: índice de estado trófico de Carlson, IETM: índice de estado trófico modificado por Toledo, TRIX: índice de estado trófico compuesto

Tabla 3.

Variabilidad temporal de los parámetros fisicoquímicos (media±desviación estándar) en el agua superficial de la laguna Las Peonías (Venezuela)

Muestreo	Transparencia (m)	Sat. OD (%)	Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)	NT (mg/m ³)	PT (mg/m ³)
M1	0,22±0,05 ^{a,b}	58,4±11,1 ^{a,b,c}	44,9±10,9 ^{a,b}	7205,3±2435,2 ^{a,b}	2714,3±1202,4 ^{b,c}
M2	0,22±0,05 ^{a,b}	69,5±8,8 ^c	44,3±8,8 ^{a,b}	7065,8±2365,4 ^{a,b}	1737,1±304,1 ^{a,b}
M3	0,23±0,04 ^{a,b}	60,4±8,9 ^{a,b,c}	50,9±11,9 ^{a,b}	5977,6±1272,0 ^{a,b}	2417,2±773,6 ^{a,b,c}

M4	0,22±0,05 ^{a,b}	52,2±8,3 ^{a,b}	46,6±11,5 ^{a,b}	5874,6±2417,9 ^{a,b}	2533,3±746,2 ^{a,b,c}
M5	0,23±0,05 ^{a,b}	54,6±9,9 ^{a,b,c}	44,8±12,7 ^{a,b}	6276,9±1726,1 ^{a,b}	2255,6±577,8 ^{a,b,c}
M6	0,21±0,06 ^a	64,9±12,8 ^{b,c}	59,8±12,8 ^b	8386,1±3069,8 ^a	2942,0±895,7 ^{b,c}
M7	0,19±0,04 ^a	55,9±4,2 ^{a,b,c}	44,9±6,2 ^{a,b}	5447,9±2134,4 ^{a,b}	2508,0±800,0 ^{a,b,c}
M8	0,20±0,05 ^a	70,5±7,3 ^c	48,9±10,0 ^a	5138,3±2615,3 ^a	3082,3±998,6 ^c
M9	0,29±0,05 ^c	45,8±8,4 ^a	61,6±31,2 ^{a,b}	7354,5±1624,9 ^{a,b}	1424,3±191,4 ^a
M10	0,26±0,05 ^{b,c}	49,2±13,5 ^{a,b}	63,5±27,7 ^{a,b}	7357,2±1540,8 ^{a,b}	2220,0±718,4 ^{a,b,c}

Sat. OD: saturación de oxígeno disuelto, NT: nitrógeno total, PT: fósforo total, n= 10. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas ($p<0,05$), según prueba de Tukey

Tabla 4.

Variabilidad espacial de los parámetros fisicoquímicos (media±desviación estándar) en el agua superficial de la laguna Las Peonías (Venezuela)

Estación de muestreo	Transparencia (m)	Sat. OD (%)	Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)	NT (mg/m ³)	PT (mg/m ³)
E1	0,26±0,04 ^c	55,0±13,3 ^a	75,1±22,3 ^{a,b}	6334,9±1776,6 ^{a,b}	2604,7±904,4 ^a
E2	0,24±0,06 ^{b,c}	50,3±9,6 ^a	59,6±21,2 ^{a,b}	7426,4±1640,4 ^{a,b}	2394,5±617,5 ^a
E3	0,23±0,04 ^{b,c}	58,5±10,1 ^a	59,6±18,2 ^{a,b}	7651,7±2683,6 ^{a,b}	2443,4±840,0 ^a
E4	0,24±0,04 ^{b,c}	56,8±8,3 ^a	49,9±12,7 ^{a,b}	7217,6±1859,9 ^{a,b}	2279,7±744,9 ^a
E5	0,18±0,06 ^a	65,3±10,5 ^a	44,7±6,5 ^{a,b}	6503,5±1874,5 ^{a,b}	2208,2±680,9 ^a
E6	0,18±0,07 ^a	59,4±12,6 ^a	48,7±5,1 ^{a,b}	6179,5±2746,2 ^{a,b}	2112,8±925,5 ^a
E7	0,27±0,05 ^c	57,4±13,7 ^a	42,2±6,6 ^a	4780,8±2302,3 ^a	2099,4±1134,5 ^a
E8	0,24±0,05 ^{b,c}	57,2±12,5 ^a	37,6±10,9 ^a	5328,0±1941,9 ^a	2290,7±618,5 ^a
E9	0,19±0,02 ^{a,b}	62,1±15,1 ^a	42,0±13,3 ^b	8971,0±1959,3 ^b	2656,2±757,8 ^a
E10	0,23±0,03 ^{b,c}	59,5±13,3 ^a	50,6±13,3 ^a	5690,7±1560,6 ^a	2744,5±1439,4 ^a

Sat. OD: saturación de oxígeno disuelto, NT: nitrógeno total, PT: fósforo total, n= 10. Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas ($p<0,05$), según prueba de Tukey

3.2. Índices de estado trófico

Índice de estado trófico de Carlson

Los valores del IETC oscilaron entre 82,2 (E7 y E8 en M9) y 93,0 (E10 en M6) (Tabla 5), indicando el estado hipereutrófico del cuerpo de agua, de acuerdo con lo planteado por Carlson (1977); con valores mayores a 74. Estas magnitudes mostraron diferencias espaciotemporales significativas ($p<0,01$; Tabla 2), con la conformación de tres grupos de datos respecto a los muestreos (prueba de Tukey; $p<0,05$), donde M9 presentó los valores más bajos, M6 y M8 los más elevados, y el resto niveles intermedios (Figura 2A); así como dos grupos considerando las estaciones de muestreo, donde E7 exhibió los tenores menores, y E1, E5, E6 y E9 los mayores (Figura 3B).

Tabla 5.

Estadística descriptiva global para los índices de estado trófico: IETC, IETM, OCDE y TRIX en el agua superficial de la laguna Las Peonías (Venezuela)

Estadística	IETC	IETM	TRIX	OCDE		
				Transparencia (m)	Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)	PT (mg/m ³)
X	88,4	83,1	9,9	0,23	51,0	2383,4
DE	2,2	2,3	0,3	0,05	17,2	884,6
Mín.	82,2	76,9	9,2	0,13	22,5	1153,2
Máx.	93,0	87,8	10,6	0,35	120,0	5657,7

X: media aritmética, DE: desviación estándar, Mín.: mínimo, Máx.: máximo, PT: fósforo total, n= 100, IETC: índice de estado trófico de Carlson, IETM: índice de estado trófico modificado por Toledo, TRIX: índice de estado trófico compuesto, OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

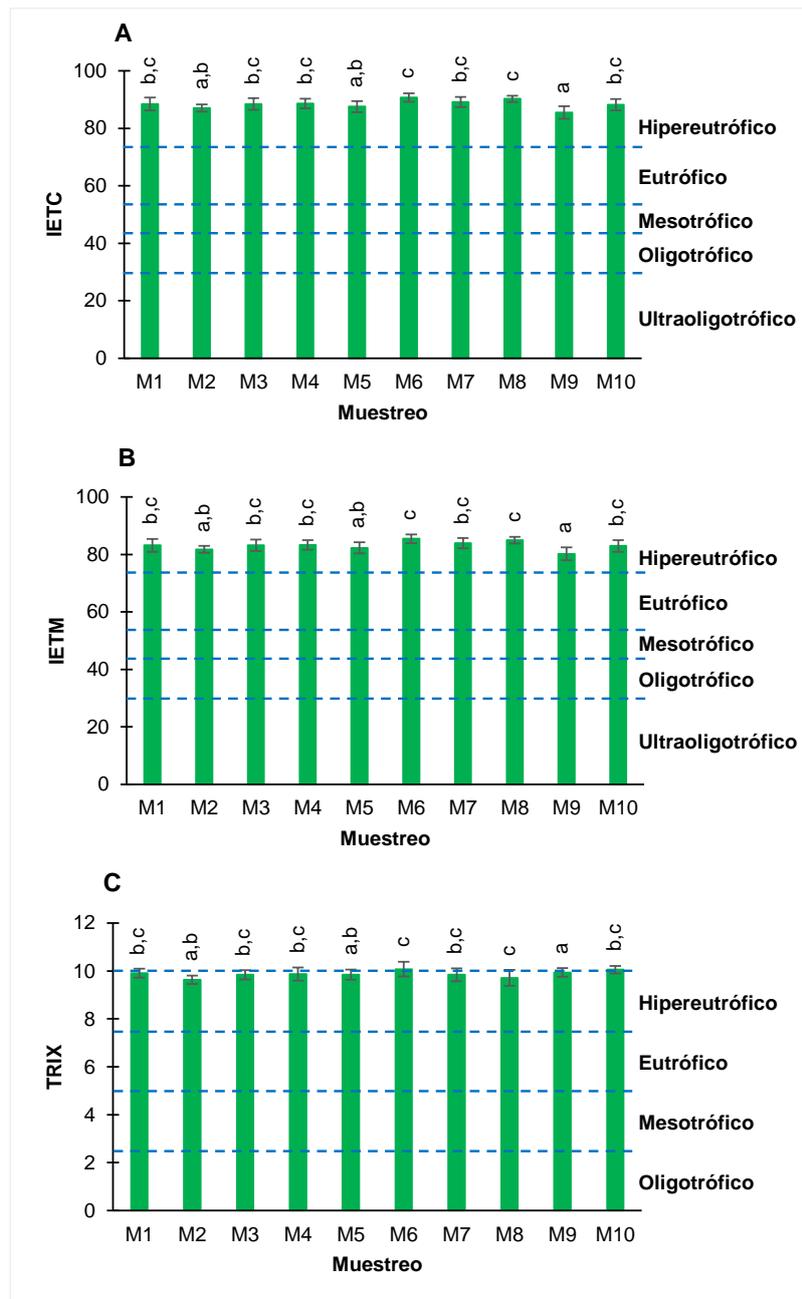


Figura 2. Variabilidad temporal del índice de estado trófico de Carlson (A: IETC), índice de estado trófico modificado por Toledo (B: IETM) e índice de estado trófico compuesto (C: TRIX) en el agua superficial de la laguna Las Peonías (Venezuela). Criterios de categorización (líneas punteadas): IETC e IETM; ultraoligotrófico <30, oligotrófico entre 30 y 44, mesotrófico entre 44 y 54, eutrófico entre 54 y 74, hipereutrófico >74 (Carlson, 1977; Pena Naval et al., 2004; Correa & da Cunha, 2011); y TRIX; oligotrófico entre 0 y 2,5; mesotrófico entre 2,6 y 5,0; eutrófico entre 5,1 y 7,5; hipereutrófico entre 7,6 y >10 (Vollenweider et al., 1998; Ruiz Ruiz, 2017). Las barras verticales indican la media aritmética \pm desviación estándar para $n = 10$. Letras diferentes entre muestreos indican diferencias significativas ($p < 0,05$), según prueba de Tukey.

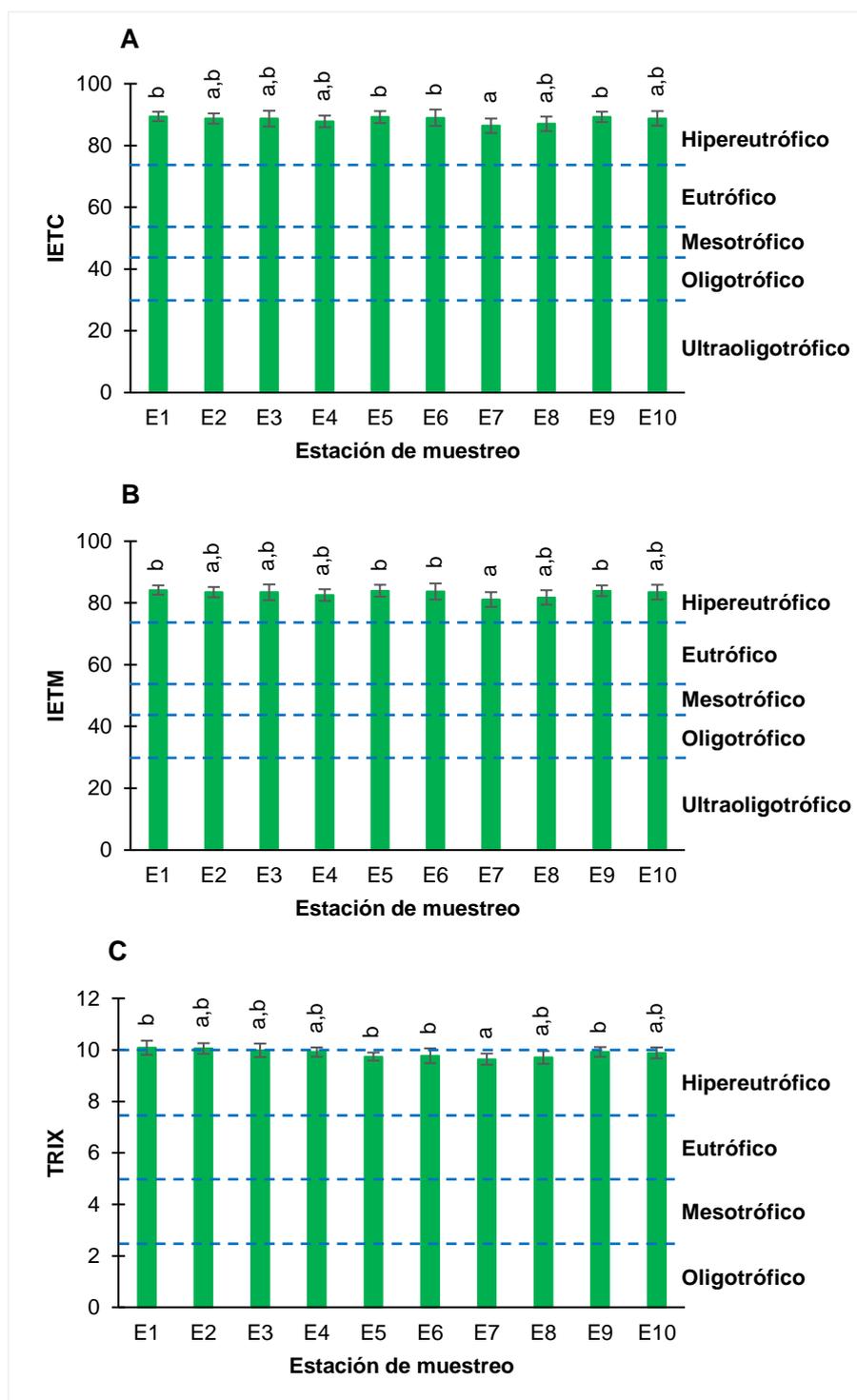


Figura 3. Variabilidad espacial del índice de estado trófico de Carlson (A: IETC), índice de estado trófico modificado por Toledo (B: IETM) e índice de estado trófico compuesto (C: TRIX) en el agua superficial de la laguna Las Peonías (Venezuela). Criterios de categorización (líneas punteadas): IETC e IETM; ultraoligotrófico <30, oligotrófico entre 30 y 44, mesotrófico entre 44 y 54, eutrófico entre 54 y 74, hipereutrófico >74 (Carlson, 1977; Pena Naval et al., 2004; Correa & da Cunha, 2011); y TRIX; oligotrófico entre 0 y 2,5; mesotrófico entre 2,6 y 5,0; eutrófico entre 5,1 y 7,5; hipereutrófico entre 7,6 y >10 (Vollenweider et al., 1998; Ruiz Ruiz, 2017). Las barras verticales indican la media aritmética±desviación estándar para n= 10. Letras diferentes entre estaciones de muestreo indican diferencias significativas ($p<0,05$), según prueba de Tukey.

Índice de estado trófico modificado por Toledo

En la laguna Las Peonías el IETM varió entre 76,9 (E7 y E8 en M9) y 87,8 (E10 en M6) (Tabla 5), indicando un estado hipereutrófico de la masa del agua, de acuerdo con lo planteado por Toledo et al. (1983), con valores superiores a 74; además de diferencias significativas ($p < 0,01$) entre muestreos y entre estaciones de muestreo (Tabla 2). Según la prueba de Tukey ($p < 0,05$), la distribución temporal develó tres grupos diferenciados, con los valores más bajos en M9, los más altos en M6 y M8, e intermedios en el resto de los muestreos (Figura 2B). La distribución espacial denotó dos grupos de datos, con los menores en E7 y los mayores en E1, E5, E6 y E9 (Figura 3B).

Índice de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

El índice de la OCDE, como fue mencionado anteriormente, considera las magnitudes de transparencia, clorofila *a* y PT para establecer el nivel nutritivo de los cuerpos de agua (Caspers, 1984); siendo las mismas de $0,23 \pm 0,05$ m; $51,0 \pm 17,2$ mg/m³ y $2383,4 \pm 884,6$ mg/m³, respectivamente, con diferencias significativas ($p < 0,05$) con respecto a los muestreos y a las estaciones de muestreo (excepto PT, Tabla 2). Consecuentemente, el estado trófico de la laguna con relación a este índice es también hipereutrófico, ya que dichos valores son $< 1,5$ m; > 25 mg/m³ y > 100 mg/m³, respectivamente (Tabla 1) (Caspers, 1984). Considerando los periodos de muestreo, la transparencia describió tres grupos de datos (prueba de Tukey; $p < 0,05$), con M6, M7 y M8 para los niveles más bajos y M9 para los mayores (el resto de los muestreos exhibió valores intermedios); clorofila *a* dos grupos: M8 con los menores y M6 con los mayores; y PT tres grupos: M9 con los más bajos y M8 con los más elevados (Tabla 3). En cuanto a las estaciones de muestreo, la transparencia describió tres grupos de datos (prueba de Tukey; $p < 0,05$), con E5 y E6 para los niveles más bajos, y E1 y E7 para los mayores (el resto de las estaciones exhibió valores intermedios); y clorofila *a* dos grupos: E7, E8 y E10 con los menores y E9 con los mayores (Tabla 4).

Índice de estado trófico compuesto

Para el índice TRIX los valores oscilaron entre 9,2 (E8 en M8) y 10,6 (E3 en M6) (Tabla 5), haciendo referencia al estado hipereutrófico de la laguna Las Peonías, de acuerdo con lo establecido por Vollenweider et al. (1998); para valores entre 7,6 y > 10 ; además de diferencias espaciotemporales significativas ($p < 0,01$; Tabla 2). Las variaciones temporales mostraron la conformación de tres grupos distintivos, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$), cuyos valores menores se obtuvieron en M2, los mayores en M6 y los intermedios en el resto de los muestreos (Figura 2C); análogamente, las variaciones espaciales señalaron tres grupos de datos (prueba de Tukey, $p < 0,05$), con los menores en E7 y los mayores en E1 y E2 (Figura 3C).

3.3. Nutriente limitante

Relación N/P

La relación N/P en el agua superficial de la laguna se encontró entre 0,4 (E8 en M8) y 9,0 (E6 en M9), con una media aritmética de $3,4 \pm 1,7$ (Figura 4) y diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) respecto a los periodos de muestreo (Tabla 2); con la formación de tres grupos distintivos de datos (prueba de Tukey; $p < 0,05$), donde los valores menores se presentaron en M8, los mayores en M9, e intermedios en el resto de los muestreos (Figura 4A). No se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) de esta relación respecto a las estaciones de muestreo (Figura 4B). Con base en estos resultados, en el 90% de los muestreos y en el 100 % de las estaciones el nutriente limitante de la producción biológica fue N, de acuerdo con lo sugerido por Parra Pardi (1979).

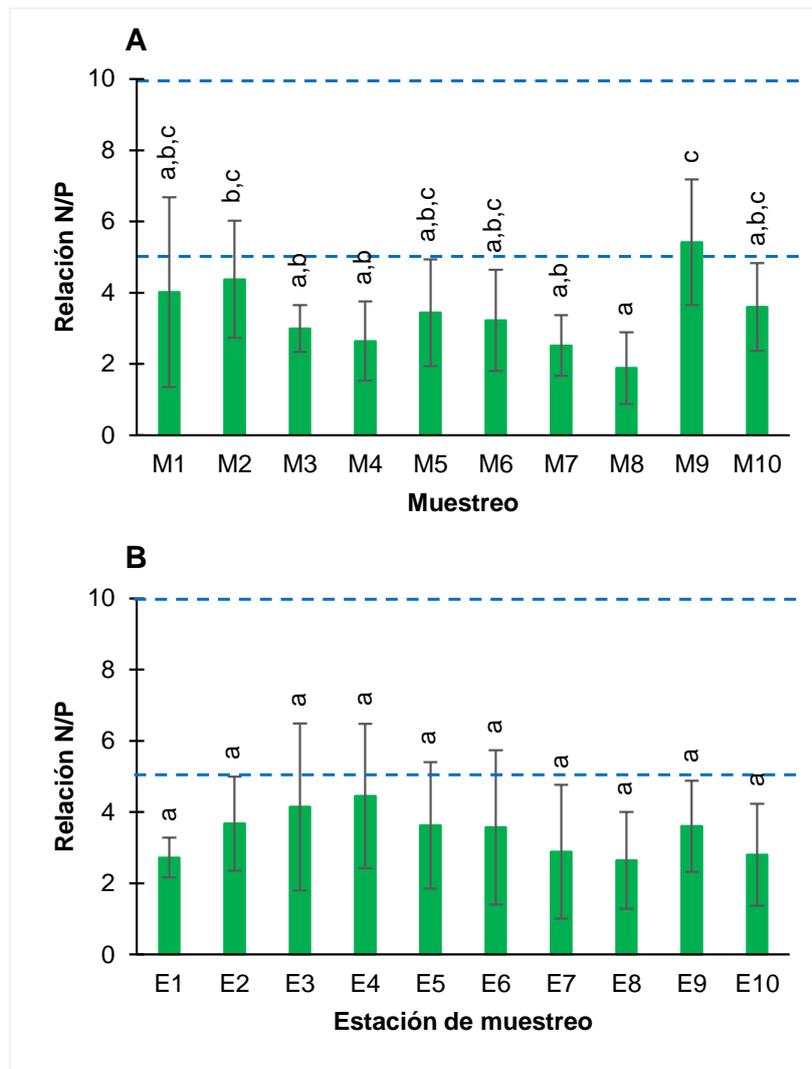


Figura 4. Variabilidad temporal (A) y espacial (B) de la relación N/P en el agua superficial de la laguna Las Peonías (Venezuela). De acuerdo con Parra Pardi (1979), si la relación es >10 el nutriente limitante es P, si es <5 el limitante es N, si está entre 5 y 10 cualquiera de los dos (N o P) puede ser limitante en un momento dado (líneas punteadas). Las barras verticales indican la media aritmética \pm desviación estándar para $n = 10$. Letras diferentes entre muestreos o entre estaciones de muestreo indican diferencias significativas ($p < 0,05$), según prueba de Tukey.

Relación molar N:P

En la Tabla 6 se incluyen los resultados de la relación molar N:P para la laguna Las Peonías, los cuales estuvieron entre 3,7:1 (M8) y 11,4:1 (M9), con una media aritmética de 6,3:1; que al ser menores a 16:1 indican la limitación de la producción biológica por N, de acuerdo a lo planteado por Redfield (1958).

Tabla 6.

Variabilidad espaciotemporal de la relación molar N:P en el agua superficial de la laguna Las Peonías (Venezuela)

Muestreo	Relación molar N:P*
1	5,9:1
2	9,0:1
3	5,5:1
4	5,1:1

5	6,2:1
6	6,3:1
7	4,8:1
8	3,7:1
9	11,4:1
10	7,3:1
Estación de muestreo	
1	5,4:1
2	6,9:1
3	6,9:1
4	7,0:1
5	6,5:1
6	6,5:1
7	5,0:1
8	5,2:1
9	7,5:1
10	4,6:1

*De acuerdo con Redfield (1958), si la relación se encuentra por debajo de 16:1 el nutriente limitante es N

4. DISCUSIÓN

4.1. Estado trófico de la laguna Las Peonías

Las magnitudes de los IET calculados permiten establecer que la condición trófica de la laguna Las Peonías es hipereutrófica (Tabla 5). Si bien se observaron diferencias espaciotemporales significativas ($p < 0,01$) respecto a los muestreos y las estaciones de muestreo (Tabla 2), todos los valores estuvieron por encima del mínimo para dicha categoría (Figuras 2 y 3). Así, E1 y E9 presentaron los valores máximos, como resultado de los aportes del Lago de Maracaibo (caño Araguato) y cañada Iragorri (Figura 1), respectivamente, que contribuyen con altos contenidos de materia orgánica y otros contaminantes (Acevedo & Cañas, 1980; ICLAM, 1988; González et al., 2012; Marín-Leal et al., 2019). Por su parte, M6 (jul-2018) y M8 (ene-2019) destacaron como los periodos de muestreo con los niveles más elevados de los índices, posiblemente debido al efecto de las precipitaciones y la mezcla interna de agua (ICLAM, 1988; Corona, 2016; Fernández, 2017). Este estado trófico es reflejo de las altas concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, NT y PT, entre otros, que han sido reportadas para este cuerpo de agua y que contribuyen al proceso de envejecimiento acelerado de las aguas (ICLAM, 2005; González et al., 2007; González et al., 2012; Fernández et al., 2017; Marín-Leal et al., 2019). Entre las principales consecuencias ecológicas de la eutrofización se encuentran la proliferación excesiva de algas y macrófitas, y las limitaciones en la penetración de luz solar, lo cual converge en el agotamiento del contenido de OD como resultado de las reacciones de oxidación de la materia orgánica, la generación de sustancias tóxicas y malos olores, entre otras (Pedrozo Acuña & Ramírez Salinas, 2020).

La categoría trófica encontrada en la laguna Las Peonías es mayor que la reportada por Orquera & Cabrera (2020) para la laguna de Yambo (Ecuador), quienes la clasificaron como eutrófica (valores entre 69,78 y 78,30) por medio de la aplicación del IETC, y cuyo resultado está asociado a la creciente influencia antrópica en su cuenca hidrográfica. También resulta mayor al estado entre oligotrófico y eutrófico (valores entre 38,29 y 65,56) encontrado en la laguna de Albufera (Perú) usando el IETM, debido a los desagües agrícolas, vertimiento de aguas residuales industriales, actividades de pastoreo, instalaciones turísticas y las estaciones de bombeo de agua instaladas en áreas adyacentes (Mendoza-Caballero & Quiroz-Santos, 2022). Para la laguna de alta montaña La Concha (Colombia), López Martínez & Madroñero Palacios (2015) indicaron un nivel entre ultraoligotrófico y oligotrófico con base en el IETC, IETM y el índice de la OCDE, debido a los bajos procesos de contaminación de origen autóctono y alóctono. Del mismo modo, Ruiz Ruiz (2017) utilizando el índice TRIX para determinar el estado trófico de las lagunas El Soldado, Guaymas,

Lobos y El Tóbari (México), reportó valores entre 0,005 y 4,803; lo que se traduce en categorías desde oligotrófico hasta mesotrófico. En el caso de la laguna El Soldado, las bajas magnitudes se debieron a que no presenta fuentes de nutrientes antrópicas, mientras que el resto de los sistemas, a pesar de recibir aguas residuales mediante drenajes de zonas agrícolas, urbanas y acuícolas, también están controlados por las surgencias costeras, reciclaje interno, precipitaciones y escorrentías (Ruiz Ruiz, 2017).

4.2. Comparación de los índices de estado trófico en la laguna Las Peonías

Como es bien sabido, la contaminación de las aguas naturales puede originarse por fuentes puntuales, mediante el vertido de efluentes domésticos e industriales; y por fuentes difusas, como resultado de la escorrentía, infiltración, precipitación, entre otros (Galaviz Villa & Sosa Villalobos, 2019; Pedrozo Acuña, 2021); que en el caso de la laguna Las Peonías está siendo ocasionada principalmente por aportes puntuales a través de la cañada Iragorri y del caño Araguato, y cuyo nivel trófico pudo ser develado mediante el cálculo de los diferentes IET descritos en este trabajo. Este hallazgo expone que el grado de degradación e impacto ambiental que ha sufrido el cuerpo de agua durante las últimas décadas, lo convierte en un recurso no apto para ciertos usos u actividades, y frágil desde el punto de vista ecológico, de acuerdo con lo establecido en normas nacionales e internacionales (Decreto N° 883, 1995; OMS, 2018; CCME, 2023), estando entre las áreas regionales más gravemente amenazadas por la actividad humana, debido al crecimiento demográfico e industrial de la zona noroeste de la ciudad de Maracaibo, lo que puede finalizar en la pérdida del recurso y de la biodiversidad asociada al mismo.

Respecto al IETC, el mismo ha sido empleado para clasificar cuerpos de agua en diferentes estados tróficos de forma confiable, siendo uno de los más ampliamente utilizados para la clasificación de lagos y reservorios; además es uno de los primeros índices propuestos para la categorización trófica mediante los parámetros: transparencia, clorofila *a* y PT (Carlson, 1977). Si bien fue desarrollado para las regiones templadas, donde el metabolismo de los ecosistemas acuáticos difiere sustancialmente del que se encuentra en los ambientes tropicales, Toledo et al. (1983) lo adaptaron para estos últimos, generando el IETM, el cual se ha considerado más adecuado para la estimación del estado trófico en general, en comparación con las formas originales (Vieira Barreto et al., 2013). Por su lado, el índice TRIX es un índice multivariado que analiza la condición ambiental y el grado de deterioro de los sistemas acuáticos, combinando logaritmos de cuatro variables: clorofila *a*, NT, PT y el valor absoluto de la desviación del porcentaje de Sat. OD (Vollenweider et al., 1998), cuya interpretación es menos compleja que la del índice de la OCDE (Caspers, 1984), ya que en este último se analiza cada parámetro por separado (transparencia, clorofila *a* y PT), sin que pueda haber una integración práctica y generándose en algunos casos resultados no congruentes. No obstante, esta diversidad en la configuración e interpretación de los distintos índices refleja claramente que el estado trófico es de carácter multidimensional, porque es imposible establecer una limitación estricta entre las distintas categorías tróficas (Moreno Franco et al., 2010).

Finalmente, considerando los aspectos anteriores, los IET más apropiados para clasificar a la laguna Las Peonías, serían el IETM y TRIX, ya que son ampliamente usados en cuerpos de aguas de zonas tropicales; además que el índice TRIX relaciona un número mayor de parámetros que influyen sobre las causas de la eutrofización. Independientemente de este hecho, todos los IET usados en este trabajo permitieron establecer el nivel hipereutrófico de la laguna Las Peonías, como ya ha sido discutido.

4.3. Nutriente limitante de la producción biológica en la laguna Las Peonías

Los dos enfoques aplicados en este estudio permitieron determinar que el nutriente limitante de la producción biológica en la laguna Las Peonías es N, debido a que las medias aritméticas generales fueron <5 para la relación N/P (Parra Pardi, 1979) y <16:1 para la relación molar N:P (Redfield, 1958); aunque en general existe una cantidad suficiente de nutrientes para generar eutrofización (Tablas 3 y 4). La carencia de diferencias significativas ($p > 0,05$) de la relación N/P entre las estaciones de muestreo (Figura 4B),

puede reflejar la abundancia de estos elementos nutritivos en todo el cuerpo de agua, con importantes aportes a partir de las distintas fuentes de contaminación. No obstante, la distribución temporal de los valores ($p < 0,05$) mostró que durante M9 (abr-2019) el nutriente limitante podría ser N o P, debido a que la media estuvo entre 5 y 10 (Figura 4A), haciendo referencia a la merma en las proporciones de PT que ingresan al sistema a través de las fuentes alóctonas, lo cual podría estar relacionado con el efecto de las precipitaciones y la mezcla interna de agua durante este periodo (ICLAM, 1988; Corona, 2016; Fernández, 2017). Estos resultados son congruentes con lo observado en la relación molar N:P (Tabla 5), cuyos valores mayores se observaron en M9 como resultado del descenso en la carga de PT (Glibert, 2012; Maberly et al., 2020). El N ha sido identificado como el elemento limitante en diversos cuerpos de agua alrededor del mundo, como en el caso de la laguna costera Homa (Turquía), debido al influjo de P a partir de fuentes agrícolas y de los sedimentos de las zonas costeras (Kutlu et al., 2012), y de la laguna tropical Chilika (India), por efecto del aporte de agua dulce rica en nutrientes (Ganguly et al., 2015).

Aunque el P ha sido considerado tradicionalmente como el principal nutriente limitante para el crecimiento de las algas en los ecosistemas acuáticos, existen numerosas evidencias de que el N también actúa como elemento limitante, sobre todo en aquellos casos de sobre-enriquecimiento por P y disminución del cociente N/P. De esta manera, específicamente en estuarios y ecosistemas costeros, el N ha sido identificado frecuentemente como el principal nutriente limitante (Anderson et al., 2002; EEA, 2005; Smith, 2006), al igual que en la laguna Las Peonías. Consecuentemente, la limitación por N es causada porque es más móvil que el P y puede ser lavado a través del suelo o saltar al aire por evaporación del amoníaco o por desnitrificación, mientras que el P es absorbido con más facilidad por las partículas del suelo y es arrastrado por la erosión o disuelto por las aguas de escorrentía superficial (Abellán & García Morote, 2006), como ya ha sido mencionado. Al respecto, Maberly et al. (2020) señalaron igualmente que la merma de las formas de N puede ser menor en ambientes con limitación de N, lo que sugiere que la remediación mediante la reducción de nutrientes sería más eficiente si se hace utilizando información específica de cada ecosistema. De esta manera, la identificación del nutriente que limita la producción biológica en un cuerpo de agua particular aporta información de base para la gestión eficaz del recurso hídrico, mediante la implementación de planes tendientes a reducir la entrada de los elementos nutritivos específicos que contribuyan a intensificar el proceso de envejecimiento de las aguas.

El avance del estado de hipereutrofia en la laguna Las Peonías, debido particularmente a la alta disponibilidad de P en el sistema, genera diversos efectos ecológicos y toxicológicos sobre el ecosistema, tales como: aumento de la biomasa del fitoplancton, crecimiento de especies de algas potencialmente tóxicas o no comestibles, crecimiento de la biomasa de algas bentónicas y epifíticas, crecimiento excesivo de macrófitas acuáticas, disminución de la biomasa de peces y moluscos cultivables, aumento de la frecuencia de mortandad de peces, reducción de la diversidad de especies, reducción de la transparencia del agua, consumo de oxígeno disuelto, reducción del valor estético del cuerpo de agua (Smith & Schindler, 2009), entre otros. Como aspecto complementario para la definición completa del elemento limitante de la producción biológica en esta laguna, queda por considerar las magnitudes de los nutrientes atrapados en el sedimento, por lo que las futuras investigaciones deben centrarse en el estudio de este compartimento.

CONCLUSIONES

La determinación del estado trófico mediante IETC, IETM, OCDE y TRIX, permitió catalogar a la laguna Las Peonías en un nivel hipereutrófico, lo que significa un grado de eutrofización avanzado, producto de una fuerte contaminación antrópica procedente principalmente de la cañada Iragorri y del caño Araguato. Las diferencias espaciotemporales de los IET fueron dependientes de las descargas puntuales y de las precipitaciones. Los IETM y TRIX resultaron más apropiados para describir esta condición trófica, ya que el primero ha sido adaptado para cuerpos de aguas tropicales, y el segundo, relaciona un número mayor de

parámetros que influyen sobre las causas de la eutrofización. Además, el TRIX considera las concentraciones de NT, que fue identificado como el nutriente limitante de la producción biológica en este ecosistema, de acuerdo con los dos enfoques aplicados (relación N/P y relación molar N:P); aunque, de manera general, las concentraciones de nutrientes fueron elevadas, contribuyendo con el estado de hipereutrofia detectado. Los resultados de este trabajo ayudan a comprender la dinámica de los nutrientes inorgánicos en la laguna, sirviendo de base para su entendimiento ecológico y la formulación de planes de manejo integral del recurso hídrico, que permitan su uso sustentable y equitativo, en función de los servicios ambientales que presta a las comunidades aledañas.

FINANCIAMIENTO

Ninguno.

CONFLICTO DE INTERESES

El artículo no presenta conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Marín-Leal, J. C., Méndez-Farías, M., Urdaneta-Ospino, G. y Fernández-Álvarez, A.: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción-borrador original y Redacción-revisión y edición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellán, M. A., & García Morote, F. A. (2006). *La evaluación del impacto ambiental de proyectos y actividades agroforestales*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Acevedo, L., & Cañas, H. (1980). *Estudio del régimen hidráulico de la laguna Las Peonías*. Universidad del Zulia.
- Anderson, D. M., Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4), 704–726. <https://doi.org/10.1007/BF02804901>
- Anthwal, T., Anthwal, A. C., & Thapliyal, M. P. (2018). Estimation of trophic status index of lakes using feed forward neural network model with two learning algorithms. *International Journal of Computer Engineering and Applications*, 12(1), 1–12. <http://www.ijcea.com/wp-content/uploads/2018/01/18-Tushar-Anthwal.pdf>
- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Bekteshi, A., & Cupi, A. (2014). Use of trophic state index (Carlson, 1977) for assessment of trophic status of the Shkodra Lake. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 15(1), 359–365. [https://www.semanticscholar.org/paper/Use-of-trophic-state-index-\(Carlson%2C-1977\)-for-of-Bekteshi-Cupi/ae06aef422057c183226c597a0ee871e5e3cfeeb](https://www.semanticscholar.org/paper/Use-of-trophic-state-index-(Carlson%2C-1977)-for-of-Bekteshi-Cupi/ae06aef422057c183226c597a0ee871e5e3cfeeb)
- Calazans Duarte, M. A., Ovruski de Ceballos, B. S., Normando de Souza Melo, H., & König, A. (1999). Comportamento dos índices do estado trófico de Carlson (IET) e modificado (IETM) em três lagoas naturais no nordeste do Brasil. *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Brazil*. <https://docplayer.com.br/48928766-Comportamento-dos-indices-do-estado-trofico-de-carlson-iet-e-modificado-iet-m-em-tres-lagoas-naturais-no-nordeste-do-brasil.html>
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>

- Caspers, H. (1984). OECD: Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. — 154 pp. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development 1982. (Publié en français sous le titre »Eutrophication des Eaux. Méthodes de Surveillance, d’Evaluation et de Lutt. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie*, 69(2), 200–200. <https://doi.org/10.1002/iroh.19840690206>
- CCME. (2023). *Canadian environmental protection act: guidelines and objectives. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life*. Canadian Council of Ministers of the Environment. <https://n9.cl/d6rg4>
- Cervantes-Astorga, E., Aguilar-Juárez, O., Carrillo-Nieves, D., & Gradilla-Hernández, M. S. (2021). A GIS Methodology to Determine the Critical Regions for Mitigating Eutrophication in Large Territories: The Case of Jalisco, Mexico. *Sustainability*, 13(14), 8029. <https://doi.org/10.3390/su13148029>
- Cheng, K.-S., & Lei, T.-C. (2001). Reservoir trophic state evaluation using lanisat tm images. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1321–1334. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03642.x>
- Corona, A. (2016). *Modelo hidrogeográfico de la cuenca de la laguna Las Peonías*. Universidad del Zulia.
- Correa, G. F., & da Cunha, H. B. (2011). *Avaliação do Grau de Eutrofização de Dois Igarapés Urbanos de Manaus - Am [XX Jornada de Iniciación Científica PIBIC INPA]*. <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/4146>
- Decreto N° 883. (1995). Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos. Gaceta Oficial N° 5021, 18 de Diciembre de 1995. <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC174040/>
- EEA. (2005). *Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment* (1st ed.). European Environment Agency.
- Elser, J. J., Andersen, T., Baron, J. S., Bergström, A.-K., Jansson, M., Kyle, M., Nydick, K. R., Steger, L., & Hessen, D. O. (2009). Shifts in Lake N:P Stoichiometry and Nutrient Limitation Driven by Atmospheric Nitrogen Deposition. *Science*, 326(5954), 835–837. <https://doi.org/10.1126/science.1176199>
- Elser, J. J., Bracken, M. E. S., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., Ngai, J. T., Seabloom, E. W., Shurin, J. B., & Smith, J. E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10(12), 1135–1142. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x>
- Fernández, A. (2017). *Aplicación de Índices de calidad y modelaje computacional en la predicción de la calidad de agua en la laguna Las Peonías*. Universidad del Zulia.
- Fernández, A., Marín, J., Stella, J., Flores, J., & Behling, E. (2017). Distribución espacial de C, N y P en la Laguna las Peonías. *Revista REDIELUZ*, 7(1), 88–93. <https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/redieluz/article/view/23736%0A>
- Fernandes Cunha, D. G., Carmo do Calijuri, M., & Condé Lamparelli, M. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). *Ecological Engineering*, 60, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>
- Galaviz Villa, I., & Sosa Villalobos, C. A. (2019). *Diffuse sources and Punctual Pollution. Quality of Surface and Groundwater*. EPOMEX-UAC. <https://doi.org/10.26359/epomex0719>
- Ganguly, D., Patra, S., Muduli, P. R., Vardhan, K. V., Abhilash, K. R., Robin, R. S., & Subramanian, B. R. (2015). Influence of nutrient input on the trophic state of a tropical brackish water lagoon. *Journal of Earth System Science*, 124(5), 1005–1017. <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0582-9>
- Glibert, P. M. (2012). Ecological stoichiometry and its implications for aquatic ecosystem sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(3), 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.05.009>

- Gómez, R., Tovilla, C., Barba, E., Castañeda, O., Valle, F. J., Romero, E. I., & Ramos, E. (2014). Índices tróficos de importancia ecológica y su relación con algunas variables físico-químicas en el sistema lagunar estuarino Chantuto-Panzacola, Chiapas, México. *Aquadocs*, 31(2), 47–57. <http://hdl.handle.net/1834/9096>
- González, M., Aldana, G., & Fuenmayor, A. (2007). Mecanismos de variación de la concentración de los nutrientes y del sedimento en la laguna Las Peonías. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería de La Universidad Del Zulia*, 30, 71–81.
- González, M., Aldana, G., & Saules, L. (2012). Ciclos de marea y condiciones climáticas sobre la variación del nitrógeno en la laguna Las Peonías. *Boletín Del Centro de Investigaciones Biológicas*, 46(2), 137–157. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/boletin>
- Haase, R., & Nolte, U. (2008). The invertebrate species index (ISI) for streams in southeast Queensland, Australia. *Ecological Indicators*, 8(5), 599–613. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.08.005>
- ICLAM. (1988). Estudio sobre el comportamiento hidrodinámico de la laguna Las Peonía. In *Informe técnico* (p. 46). Instituto para la Conservación de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Maracaibo.
- ICLAM. (2005). *Evaluación de la calidad de las aguas en caño Araguato, laguna Las Peonías y cañada Fénix*. Instituto para el Control y Conservación del Lago de Maracaibo.
- Karydis, M., Ignatiades, L., & Moschopoulou, N. (1983). An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 16(3), 339–344. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(83\)90151-8](https://doi.org/10.1016/0272-7714(83)90151-8)
- Kutlu, B., Sunlu, F., & Büyükişik, H. (2012). Carrying capacity of *Chaetoceros gracilis* in Homa Lagoon and the bay of Izmir. *African Journal of Biotechnology*, 11(13), 3197–3206. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/100721>
- López Martínez, M. L., & Madroñero Palacios, S. M. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: Caso Laguna de la Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 21. <https://doi.org/10.18359/rcin.1430>
- Maberly, S. C., Pitt, J.-A., Davies, P. S., & Carvalho, L. (2020). Nitrogen and phosphorus limitation and the management of small productive lakes. *Inland Waters*, 10(2), 159–172. <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1714384>
- Marín-Leal, J. C., Fernández-Álvarez, A. M., Flores-Nava, J. B., López-Inaudi, Y. del V., & Corona-Quintero, Á. E. (2019). Dinámica espaciotemporal de la calidad de agua en la laguna Las Peonías (Zulia, Venezuela): 2013-2016. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 15(2), 83–106. <https://doi.org/10.18359/rfcb.4204>
- Martins, I. A., Martins Pompêo, M. L., & Bitencourt, M. D. (2020). Determination of the Trophic State Index (TSI) using remote sensing, bathymetric survey and empirical data in a tropical reservoir. *Limnetica*, 39(2), 1. <https://doi.org/10.23818/limn.39.35>
- Mendoza-Caballero, W., & Quiroz-Santos, R. L. (2022). Evaluación de los estados tróficos de la laguna principal del área de conservación regional Albufera de Medio Mundo, Huaura-Lima, Perú. *Biotempo*, 19(2), 149–164. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v19i2.4988>
- Montagud, D., Soria, J. M., Soria-Perpinyà, X., Alfonso, T., & Vicente, E. (2019). A comparative study of four indexes based on zooplankton as trophic state indicators in reservoirs. *Limnetica*, 38(1), 291–302. <https://doi.org/10.23818/limn.38.06>
- Moreno Franco, D. P., Quintero Manzano, J., & López Cuevas, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78, 25–33. <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n78ne/eutrofia2.pdf>
- O'Boyle, S., McDermott, G., Noklegaard, T., & Wilkes, R. (2013). A Simple Index of Trophic Status in Estuaries and Coastal Bays Based on Measurements of pH and Dissolved Oxygen. *Estuaries and Coasts*, 36(1), 158–173. <https://doi.org/10.1007/s12237-012-9553-4>

- OMS. (2018). *Guías para la calidad de consumo humano* (4th ed.). Organización Mundial de la Salud.
- Orquera, E., & Cabrera, M. (2020). Caracterización del estado trófico de la Laguna de Yambo mediante análisis de fósforo. *InfoANALÍTICA*, 8(1), 99–111. <https://doi.org/10.26807/ia.v8i1.119>
- Parra Pardi, G. (1979). *Estudio integral sobre la contaminación del Lago de Maracaibo y sus afluentes: Estudio integral sobre la contaminación del Lago de Maracaibo y sus afluentes. Parte 2 de Estudio integral sobre la contaminación del Lago de Maracaibo y sus afluentes*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección General de Información e Investigación del Ambiente, Dirección de Investigación del Ambiente, 1977.
- Pedrozo Acuña, A. (2021). Contaminación difusa, el reto para la gestión del agua en ciudades. *Perspectivas IMTA*, 2(20). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-20>
- Pedrozo Acuña, A., & Ramírez Salinas, N. (2020). La eutrofización de cuerpos de agua: un síntoma antropogénico que requiere atención. *Perspectivas IMTA*, 1(8). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2020-08>
- Pena Naval, L., Ferreira e Silva, C. D., & Almeida de Souza, M. A. (2004). Comportamento dos índices do estado trófico de Carlson (IET) e modificado (IETM) no reservatório da UHE Luís Eduardo Magalhaes, Tocantins - Brasil. *I Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Tocantins, Brazil*. <https://n9.cl/4zmid>
- Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46(3), 230. <https://www.jstor.org/stable/27827150>
- Rocha, P. (2006). *Avaliação de Indicadores de Estado Trófico de uma Lagoa Costeira: Lagoa Jacuném (Serra,ES)*. Universidade Federal do Espírito Santo.
- Ruiz Ruiz, T. M. (2017). *Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del Estado de Sonora, México* [Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste]. <http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/574>
- Salas, H., & Martino, P. (2001). Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55330>
- Smith, V. H. (2006). Responses of estuarine and coastal marine phytoplankton to nitrogen and phosphorus enrichment. *Limnology and Oceanography*, 51(1, part 2), 377–384. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0377
- Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology & Evolution*, 24(4), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>
- Stednick, J. D., & Hall, E. B. (2003). *Applicability of trophic status indicators to Colorado Plains reservoirs* [Colorado Water Resources Research Institute]. <http://hdl.handle.net/10217/789>
- Toledo, A., Talarico, M., Chinez, S., & Agudo, D. (1983). A aplicação de modelos simplificados para avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. *Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária, Brazil*. <https://www.scienceopen.com/document?vid=2d1d409b-26ee-43b2-a91e-c392dc331244>
- Vieira Barreto, L., Mariani Barros, F., Bonomo, P., Adelnison Rocha, F., & Da Silva Amorim, J. (2013). Eutrofização em rios brasileiros. *Enciclopédia Biosfera*, 9(16), 15. <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3521>
- Vollenweider, R. A., Giovanardi, F., Montanari, G., & Rinaldi, A. (1998). 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*, 9(3), 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9)