

## RIESGOS DE EUTROFIZACIÓN Y SUS IMPLICACIONES EN LAGOS Y EMBALSES

### Eutrophication risks and their implications for lakes and reservoirs

*Ernesto J. González Rivas*

Instituto de Biología Experimental, Universidad Central de Venezuela. Caracas,  
Venezuela. ernesto.gonzalez@ciens.ucv.ve

#### RESUMEN

La eutrofización en aguas continentales se debe a varios impactos resultantes del tratamiento ineficiente o inexistente de las aguas residuales, la expansión agrícola con usos inadecuados del suelo y la aplicación de fertilizantes químicos, la urbanización de cuencas hidrográficas, el aumento de la cría intensiva de ganado, el aumento de la acuicultura, la construcción de embalses y la destrucción de los ecosistemas naturales. Estos factores incrementan la carga interna de nitrógeno y fósforo generando un aumento en la productividad biológica de los cuerpos de agua, trayendo como consecuencia el crecimiento excesivo de fitoplancton y de macrófitas, la proliferación de floraciones de cianobacterias tóxicas, la mortalidad de peces, la proliferación de hábitats adecuados para vectores de enfermedades tropicales, el deterioro de la calidad del agua y la pérdida de biodiversidad. Finalmente, también se ha encontrado una correlación positiva entre la eutrofización y la abundancia de virus, lo cual es un hecho importante a la luz de la actual pandemia de COVID-19.

**Palabras clave:** eutrofización, humedales, lagos y embalses, calidad del agua, floraciones de cianobacterias.

**Keywords:** Eutrophication, wetlands, lakes and reservoirs, water quality, cyanobacterial blooms.

#### INTRODUCCIÓN

El envejecimiento natural de un lago resulta de un proceso denominado eutrofización, que lleva consigo el enriquecimiento biológico de sus aguas (Powers y Robertson, 1966). Un lago recién formado, comienza siendo una masa de agua fría, transparente, casi estéril. Gradualmente, los tributarios de su cuenca de drenaje van introduciendo en él sustancias nutritivas, tales como fosfatos y nitratos, y la fertilidad creciente de las aguas lacustres provoca un crecimiento acumulativo de organismos acuáticos, tanto vegetales como animales. Según se incrementa la materia viviente y se acumulan depósitos orgánicos en el fondo, el lago va haciéndose más pequeño y más somero, sus aguas se calientan, las plantas arraigan en el fondo y roban cada vez más espacio, al tiempo que sus restos aceleran el llenado del lecho. Con el tiempo, el lago se transforma en una ciénaga, resulta invadido por la vegetación circundante y termina por desaparecer. Así, el concepto clásico de eutrofización se refiere al proceso natural de envejecimiento de las cuencas de los cuerpos de agua, los cuales sostenidamente se convierten en menos profundos y más productivos desde un punto de vista biológico (Schindler, 2006).

Sin embargo, debido a la intensa expansión urbanística, en conjunto con las actividades industriales, ocurre un aumento considerable en la descarga de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas acuáticos, provocando una eutrofización acelerada de los mismos (Rocha y Branco, 1986; Roldán y Ramírez, 2008; Tundisi y Matsumura-Tundisi, 2008), lo cual se conoce como “eutrofización cultural” (Schindler, 2006). Este enriquecimiento con nutrientes, a partir de fuentes antrópicas puntuales y no puntuales, resulta en un aumento rápido en la productividad biológica y en las reducciones significativas de la transparencia en la columna de agua y puede crear un amplio intervalo de cambios indeseables en la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos (Schindler, 2006). Así, Ryding y Rast (1992) prefieren definir la eutrofización como el enriquecimiento en nutrientes de las aguas, que provoca la estimulación de una serie de cambios sintomáticos, entre los que el incremento de la producción de algas y macrófitas, el deterioro de la calidad del agua y otros cambios resultan indeseables e interfieren con la utilización del agua.

Las actividades humanas, como por ejemplo la agriculturización y la urbanización, han desencadenado procesos de eutrofización y degradación de los humedales (Quirós *y col.*, 2006), generando su disminución en escala global, tanto en extensión como en calidad (RAMSAR, 2015). En vista de que la eutrofización es un problema creciente a nivel global (González *y col.*, 2020), se planteó el objetivo de enumerar y describir brevemente los riesgos y las implicaciones de este proceso sobre humedales como los lagos y embalses, dada su importancia por los servicios ecosistémicos que proporcionan a la sociedad.

## **ORIGEN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN LAS AGUAS**

Los materiales disueltos en los cuerpos de agua que constituyen los nutrientes, tienen tres fuentes geoquímicas (Cole, 1994; Harper, 1992; Horne y Goldman, 1994; Wetzel, 2001):

(1) Atmosférica: Constituyen una gran reserva de elementos en estado gaseoso que pueden difundir hacia los cuerpos de agua, siendo el dióxido de carbono y el nitrógeno molecular ( $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ ) ejemplos de ello.

(2) Precipitación: Nutrientes que se originan en los océanos y son transportados en forma de gases y aerosoles a los cuerpos de agua. El azufre (S), el boro (B), los elementos halógenos y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) son ejemplos de ello.

(3) Litosfera: Los elementos de esta fuente no poseen una fase gaseosa y, por lo tanto, sus proporciones en los cuerpos de agua son menores a los provenientes de las dos fuentes previas. Entre estos elementos se cuentan el fósforo (P), los cationes biológicos y los metales trazas.

En el medio acuático, la proporción de los elementos carbono, nitrógeno y fósforo (C:N:P) en el plancton es 106:16:1 (Redfield, 1958; Klausmeier *y col.*, 2008), lo cual refleja la naturaleza u origen de estos elementos y explica la limitación del fósforo en el crecimiento y desarrollo de los organismos planctónicos. Esto fue señalado por J. von Liebig en 1840 como el concepto del factor (nutriente) limitante, o “Ley del Mínimo de Liebig”, que establece que la cosecha total de cualquier organismo estará determinada por la abundancia de la sustancia que, en relación con las necesidades del organismo, sea la menos abundante en el ambiente (Ryding y Rast, 1992). De esta manera, un aumento en los aportes de fósforo a los ecosistemas acuáticos haría que este elemento dejara de ser restrictivo para el fitoplancton (Hutchinson, 1973; Schindler, 2006). De hecho, Schindler *y col.* (2008) señalan que el fósforo es el elemento clave en el control de la eutrofización de los cuerpos de agua.

## **LA EUTROFIZACIÓN COMO UN PROBLEMA A NIVEL MUNDIAL**

La eutrofización cultural es el problema primario que enfrentan las aguas superficiales en la actualidad (Smith y Schindler, 2009), la cual se ha reconocido como problema de contaminación en los lagos de Europa y Norteamérica desde mediados del siglo XX (Ansari *y col.*, 2011), mientras que la preocupación por los problemas de eutrofización en los países tropicales es aún más reciente (Harper, 1992). Desde entonces, los estudios han mostrado que el 54% de los lagos en Asia, 53% en Europa, 48% en Norteamérica, 41% en Suramérica y 28% en África se encuentran eutrofizados (ILEC, 1991; Ansari *y col.*, 2011).

Entre algunos de los problemas más generalizados en los cuerpos de agua se cuentan, según Smith y Schindler (2009), los siguientes:

1. Incremento en la biomasa del fitoplancton y de las macrofitas.
2. Incremento en la biomasa de especies de consumidores.
3. Cambios en la estructura comunitaria del fitoplancton hacia especies de algas formadoras de floraciones, las cuales pueden ser tóxicas o no comestibles para el zooplancton.
4. Aumento en la frecuencia de floraciones de algas.
5. Cambios en la composición de especies de macrofitas.
6. Aumento de los episodios de mortandad masiva de peces.
7. Reducción de la diversidad de especies.
8. Disminución de la transparencia del agua.
9. Agotamiento del oxígeno en el cuerpo de agua.
10. Problemas de sabor, olor y en el tratamiento del agua con fines de consumo.
11. Disminución en la percepción del valor estético del cuerpo de agua.

Sobre los problemas ecológicos se discutirá posteriormente.

## **FUENTES PUNTUALES Y NO PUNTUALES DE EUTROFIZACIÓN**

Las fuentes de contaminación de los cuerpos de agua generalmente se dividen en puntuales y difusas o no puntuales (Straškraba y Tundisi, 2000). Las fuentes puntuales, también conocidas como localizadas (Harper, 1992), se refieren a las aguas residuales domésticas e industriales que no reciben tratamiento alguno o reciben un tratamiento inadecuado antes de ser vertidas a través de tuberías y desagües directamente sobre los tributarios o los cuerpos de agua (Straškraba y Tundisi, 2000; González y Roldán, 2019). De esta manera, se introduce gran cantidad de materia orgánica y diversos contaminantes y nutrientes a los lagos y embalses.

Por su parte, las fuentes no puntuales o difusas incluyen la escorrentía de las tierras de las cuencas hidrográficas que han sido erosionadas, modificadas o deforestadas; la escorrentía de las tierras agrícolas que contiene los residuos de productos químicos agrícolas, incluidos los fertilizantes y los plaguicidas; la escorrentía de las aguas pluviales de los paisajes urbanos que contiene todo tipo de productos químicos, incluidos hidrocarburos y sedimentos (Harper, 1992; Straškraba y Tundisi, 2000). El control de estas fuentes no puntuales es de mayor dificultad que las puntuales.

## **RIESGOS DE EUTROFIZACIÓN EN LAGOS Y EMBALSES**

Los riesgos de eutrofización cultural de los lagos y embalses tienen su origen en varias causas, las cuales se enumerarán a continuación (Tundisi y Matsumura-Tundisi, 2008; Abellán, 2016; Roldán *y col.*, 2019; González *y col.*, 2020):

1. Tratamiento inexistente o inadecuado de las aguas residuales puntuales, que pueden representar la mayor fuente de carga de nutrientes.
2. Expansión agrícola y uso excesivo de fertilizantes, que generan fuentes no puntuales o difusas de nutrientes, los cuales llegan a los tributarios o directamente a los cuerpos de agua por escorrentía.
3. Urbanización en las cuencas de drenaje. Las actividades humanas dentro de las ciudades producen un gran volumen de residuos de muy diversa naturaleza que en muchos casos son depositados sobre la superficie de las cuencas urbanas y, posteriormente, arrastrados hacia los cauces receptores durante el proceso de precipitación-escorrentía. La escorrentía de las aguas pluviales de los paisajes urbanos contiene todo tipo de productos químicos, incluidos hidrocarburos y sedimentos.
4. Aumento intensivo de la cría de ganado vacuno, porcino y avícola los cuales generan grandes cantidades de materia orgánica y de nutrientes que, sin las precauciones adecuadas de tratamiento y disposición, también pueden enriquecer los cuerpos de agua, tal como se ha registrado en numerosos países.
5. Incremento de las actividades de acuicultura, particularmente aquéllas que se ejecutan dentro de los propios cuerpos de agua, aportan gran

- cantidad de nutrientes a las aguas y sedimentos a partir de los residuos de los alimentos para los peces y de las excretas de estos organismos, contribuyendo así con el proceso de eutrofización.
6. Construcción de embalses, los cuales se forman por el represamiento de los ríos, aumentando el tiempo de retención del agua y funcionando como trampas de nutrientes, todo lo cual favorece el proceso de eutrofización.
  7. Destrucción de los ecosistemas naturales, deforestación y erosión. La pérdida de vegetación por deforestación y urbanización, y la consecuente erosión, evitan la retención de nutrientes en las cuencas de drenaje y conlleva al transporte de materiales sedimentarios y nutrientes a los cuerpos de agua.

## **IMPLICACIONES DE LA EUTROFIZACIÓN PARA LOS LAGOS Y EMBALSES**

La eutrofización representa un problema para los lagos y embalses porque genera varios efectos ecológicos indeseables y significativos (Ryding y Rast, 1992; Tundisi y Matsumura-Tundisi, 2008; González y Roldán, 2019; González *y col.*, 2020), como el crecimiento excesivo de fitoplancton y de macrófitas, la proliferación de floraciones de algas y de fitoplancton tóxico (algunas cianobacterias), la mortalidad de peces por asfixia debido a la drástica caída de la concentración de oxígeno, la proliferación de hábitats adecuados para vectores de enfermedades tropicales, deterioro de la calidad del agua y la pérdida de biodiversidad. Las floraciones de algas nocivas, causadas por algunas especies de cianobacterias, son particularmente importantes si los cuerpos de agua afectados se utilizan para el suministro de agua potable, ya que la eliminación de las toxinas requiere procesos de tratamiento avanzados y un tratamiento inadecuado plantea graves riesgos para la salud pública.

## **CONSECUENCIAS BIOLÓGICAS DE LA EUTROFIZACIÓN EN LAGOS Y EMBALSES**

La eutrofización trae numerosas consecuencias biológicas para los lagos y embalses, en cuanto a aumentos y disminuciones de sus componentes, los cuales se pueden resumir en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Aumentos y disminuciones de componentes bióticos en lagos y embalses eutrofizados. Fuente: Elaboración propia a partir de Tundisi y Matsumura-Tundisi (2008).

<b>Aumentos</b>	<b>Disminuciones</b>
Frecuencia de las floraciones	Diversidad del fitoplancton
Biomasa del fitoplancton	Diversidad de la fauna bentónica
Concentración de clorofila- <i>a</i>	
Biomasa del zooplancton	
Biomasa de los peces	
Biomasa de la fauna bentónica	
Densidad de la vegetación litoral	

Así, la eutrofización genera enormes pérdidas de biodiversidad y reduce la calidad y disponibilidad del agua (Jorgensen, 2001). Además, algunos de los cambios en los componentes bióticos de los cuerpos de agua pueden representar riesgos significativos para la salud de animales y humanos. Esto se debe principalmente al crecimiento explosivo de las algas microscópicas que, una vez muertas, en su proceso de descomposición liberan una de las más potentes clases de toxinas conocidas: las cianotoxinas.

Tanto la descomposición en las orillas, como la sedimentación y descomposición de la biomasa del fitoplancton y macrófitas en el fondo, requieren cantidades muy grandes de oxígeno y otros donadores de electrones (Pizzolón, 1996). Las condiciones altamente reductoras favorecen la producción de metano sulfhídrico y otros compuestos con azufre, que también confieren sabores y olores desagradables al agua, todo lo cual puede desfavorecer su aprovechamiento para diversos propósitos, particularmente el suministro de agua potable a las poblaciones humanas.

## **EUTROFIZACIÓN Y CALENTAMIENTO GLOBAL: EFECTO SINÉRGICO**

El calentamiento de las aguas superficiales puede promover de manera selectiva la proliferación de las cianobacterias, ya que sus tasas de crecimiento se optimizan a temperaturas relativamente altas (González *y col.*, 2020). La rápida expansión de floraciones de especies como *Raphidiopsis raciborskii* (cianobacteria) en lagos y embalses a nivel global es una de las consecuencias de este proceso sinérgico (Kratina *y col.*, 2012; Paerl y Paul, 2012). Moss *y col.* (2011) denominan este proceso sinérgico como un “ataque aliado”, ya que la eutrofización y el calentamiento global pueden reforzar los síntomas que ellos expresan y, por ende, los problemas que ellos causan.

## **EUTROFIZACIÓN Y PATÓGENOS**

La eutrofización puede influenciar la abundancia de patógenos indirectamente mediante la modificación de la abundancia y distribución de sus hospedadores y vectores (Smith y Schindler, 2009). Por ejemplo, los aumentos en la abundancia de hospedadores impulsados por la eutrofización aumentan la tasa de contacto entre individuos infectados y no infectados. Otro ejemplo también lo representa el aumento en la abundancia de copépodos vectores de *Vibrio cholerae*, de manera que el incremento en la carga de nutrientes puede influenciar la probabilidad de epidemia de cólera en las poblaciones humanas susceptibles.

Así mismo, se ha encontrado una correlación positiva entre la eutrofización y la abundancia de virus (Cabral *y col.*, 2017), con un riesgo concomitante adicional para la salud pública, lo cual es un hecho importante a ser tomado en cuenta por los responsables del manejo de los ecosistemas acuáticos, a la luz de la pandemia de COVID-19 actualmente en curso (González *y col.*, 2020).

## **CONSIDERACIONES FINALES**

Los lagos y embalses son susceptibles de varios impactos generados por las actividades humanas y, por lo tanto, sufrir un proceso de eutrofización acelerado.

La eutrofización conlleva al deterioro de la calidad del agua y a la pérdida de diversidad biológica, además de aumentar los riesgos para la salud pública.

El tratamiento adecuado de las aguas residuales domésticas e industriales, así como la protección de las cuencas de drenaje, son medidas adecuadas para mitigar los efectos de la eutrofización de los lagos y embalses. Así, para reducir la eutrofización, el enfoque de la gestión debe basarse en la reducción de la entrada de fósforo a los cuerpos de agua.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se deja constancia del agradecimiento del autor a los organizadores del “III Simposio: Humedales, Agua, Biodiversidad” por la invitación a participar en este encuentro científico.

## **LITERATURA CITADA**

- Abellán, A. 2016. Los impactos de la urbanización en el ciclo del agua. En: <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua> [Consulta: 17 de marzo de 2021].
- Ansari, A.A., S.S. Gill y F.A. Khan. 2011. Eutrophication: Threat to aquatic ecosystems. En: A.A. Ansari, S.S. Gill, G.R. Lanza y W. Rast (eds.). Eutrophication: Causes, consequences and control. Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht: 143-170.
- Cabral, A.S., M.M. Lessa, P.C. Junger, F.L. Thompson y R. Paranhos. 2017. Virioplankton dynamics are related to eutrophication levels in a tropical urbanized bay. *PLoS One*, 12(3): 1-16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0174653>.
- Cole, G.A. 1994. *Textbook of Limnology*. 4<sup>th</sup> edition. Waveland Pres, Inc. Long Grove, 412 pp.

- González, E. J. y G. Roldán. 2019. Eutrophication and phytoplankton: Some generalities from lakes and reservoirs of the Americas. En: M. Vitová (ed.). *Microalgae - From Physiology to Application*. IntechOpen. London: 25-44. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89010>
- González, E. J., G. Roldán, J. G. Tundisi, K. Vammen, B. Örmeci y M. Forde. 2020. Eutrophication: A growing problem in the Americas and the Caribbean. *Braz. J. Biol.* 80(3): 688-689. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.200001>.
- Harper, D. 1992. *Eutrophication of freshwaters. Principles, problems and restoration*. Chapman & Hall. London, 321 pp.
- Horne, A.J. y C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. 2<sup>nd</sup> edition. McGraw Hill, Inc. New York, 576 pp.
- Hutchinson, G.E. 1973. Eutrophication. *Am. Sci.* 61: 269-279.
- International Lake Environment Committee – ILEC. 1991. *Data book of world lake environments. Survey of the state of the world's lakes*. Lake Biwa Research Institute and International Lake Environment Committee. Otsu, Japón, 426 pp.
- Jorgensen, S.E. 2001. *Lakes and reservoirs. Vol. 3. Water quality: The impact of eutrophication*. The United Nations Environment Programme – International Environment Technology Centre (UNEP-IETC) y the International Lake Environment Committee Foundation (ILEC). Shiga, 25 pp.
- Kratina, P., H.S. Greig, P.L. Thompson, T.S. Carvalho-Pereira y J.B. Shurin. 2012. Warming modifies trophic cascades and eutrophication in experimental freshwater communities. *Ecology* 93(6): 1421-1430.
- Klausmeier, C.A., E.T. Litchman, T. Daufresne y S.A. Levin. 2008. Phytoplankton stoichiometry. *Ecol. Res.* 23: 479-485.
- Moss, B.M., S. Kosten, M. Meerhoff, R.W. Battarbee, E. Jeppesen, N. Mazzeo, K. Havens, G. Lacerot, Z. Liu, L. De Meester, H. Paerl y M. Scheffer. 2011. Allied attack: Eutrophication and global warming. *Inland Waters* 1: 101-105.
- Powers, C.F. y A. Robertson. 1966. The aging Great Lakes. *Sci. Am.*, 215(5): 94-106.
- Quirós, R., M.B. Boveri, C.A. Petracchi, A.M. Rennella, J.J. Rosso, A. Sosnovsky y H.T. von Bernard. 2006. Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas. En: J.G. Tundisi, T. Matsumura-Tundisi y C. Sidagis-Galli (eds.). *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gestão*. Instituto Internacional de Ecologia, Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental, Academia Brasileira de Ciências, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, InterAcademy Panel on International Issues, InterAmerican Network of Academies of Sciences. São Carlos, Brasil: 1-16.
- Paerl, H.W. y J.V. Paul. 2012. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research* 46(5): 1349-1363.
- Pizzolón, L. 1996. Importancia de las cianobacterias como factor de toxicidad en las aguas continentales. *Interiencia* 21(6): 239-245.
- RAMSAR. 2015. Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: Una recopilación de análisis recientes. *Nota Informativa Ramsar 7*. En: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>. [Consulta: 12 de marzo de 2021].
- Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* 46: 205-222.
- Rocha, A.A. y S.M. Branco. 1986. A eutrofização e suas implicações na ciclagem de nutrientes. *Acta Limnol. Brasil.* 1: 201-242.
- Roldán, G. y J.J. Ramírez. 2008. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. 2ª edición. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín, 440 pp.
- Roldán, G., J.G. Tundisi, B. Jiménez-Cisneros, K. Vammen, H. Vaux, E.J. González y M. Doria (eds.). 2019. *Water quality in the Americas. Risks and opportunities*.



- Inter American Network of Academies of Sciences (IANAS), The Interacademy Partnership (IAP) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). México, 624 pp.
- Ryding S.O. y W. Rast. 1992. *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*. Ediciones Pirámide S.A. Unesco. Madrid, 385 pp.
- Schindler, D.W. 2006. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnol. Oceanogr.* 51(1, part 2): 351-355.
- Schindler, D.W., R.E. Hecky, D.L. Findlay, M.P. Stainton, B.R. Parker, M.J. Paterson, K.G. Beaty, M. Lyng y S.E.M. Kasian. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 105(32): 11254-11258. DOI: [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0805108105](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0805108105).
- Smith, V.H. y D.W. Schindler. 2009. Eutrophication science: Where do we go from here? *Trends. Ecol. Evol.* 24(4): 201-207.
- Straškraba, M. y J.G. Tundisi. 2000. *Diretrizes para o gerenciamento de lagos*. Vol. 9. Gerenciamento da qualidade da água de represas. International Lake Environment Committee, Instituto Internacional de Ecologia. Rima Artes e Textos. São Carlos, 258 pp.
- Tundisi, J.G. y T. Matsumura-Tundisi. 2008. *Limnologia*. Oficina de Textos. São Paulo, 631 pp.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology. Lake and river ecosystems*. 3<sup>rd</sup> edition. Academic Press. San Diego, 1006 pp.