

Impacto Ambiental del Fósforo en Sistemas Acuáticos Regionales

Environmental Impact of Phosphorus in Regional Aquatic Systems

Presentación: 05/08/2024

Doctoranda:

Eliana CONCI

Grupo CLIOPE (Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional), CCT-CONICET Mendoza-Argentina
econci@mendoza-conicet.gob.ar

Directora:

Bárbara María CIVIT

Codirectora:

Analía Rosa BECKER

Resumen

El creciente interés en la protección ambiental ha impulsado el desarrollo de métodos para comprender y mitigar los impactos ambientales, como la técnica del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). La eutrofización de las aguas continentales es una categoría de impacto ambiental regional. Afecta la ecología, la salud y la economía, y se origina por el enriquecimiento en exceso de nutrientes en el ecosistema. El fósforo (P) es un nutriente clave que controla el crecimiento de organismos microbiológicos en estos cuerpos de agua. Argentina enfrenta serios problemas de eutrofización en algunos de sus lagos y embalses, lo que subraya la necesidad de estudios regionales en el contexto de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) dentro del ACV. Así mismo, es necesario seleccionar un método que se adapte a las condiciones del lugar. Por ello, este estudio tiene como objetivo relevar el impacto ambiental potencial del P en sistemas acuáticos significativos de Argentina, a fin de avanzar en el desarrollo de indicadores regionales de eutrofización que contribuyan a la tesis doctoral en marcha. La región pampeana muestra altos niveles de P total y clorofila a, indicando una alta eutrofización. El modelo a desarrollar busca identificar el aumento de la concentración de P en cuerpos de agua regionales y que la metodología pueda aplicarse globalmente en el marco de la EICV. Con este enfoque, se espera facilitar la toma de decisiones para la reducción de nutrientes, mejorando la calidad y salud de los ecosistemas acuáticos.

Palabras clave: Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida, indicadores, nutrientes, eutrofización.

Abstract

The growing interest in environmental protection has driven the development of methods to understand and mitigate environmental impacts, such as the Life Cycle Assessment (LCA) technique. Eutrophication of inland waters is a regional environmental impact category. It affects ecology, health and the economy, and is caused by the over-enrichment of nutrients in the ecosystem. Phosphorus (P) is a key nutrient that controls the growth of microbiological organisms in these water bodies. Argentina faces serious problems of eutrophication in some of its lakes and reservoirs, which underlines the need for regional studies in the context of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) within the LCA. Likewise, it is necessary to select a method that is adapted to local conditions. Therefore, this study aims to survey the potential environmental impact of P in significant aquatic systems in Argentina to advance the development of regional indicators of eutrophication that contribute to the doctoral thesis in progress. The Pampean region shows high levels of total P and chlorophyll a, indicating high eutrophication. The model to be developed seeks to identify the increase in P concentration in regional water

bodies and ensure that the methodology can be applied globally within the framework of the LCIA. This approach, is expected to facilitate decision making for nutrient reduction, improving the quality and health of aquatic ecosystems.

Keywords: Life Cycle Impact Assessment, indicators, nutrients, eutrophication.

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) afirma que el consumo de materiales de los recursos naturales está aumentando y los países continúan abordando los desafíos relacionados con la contaminación del aire, el agua y el suelo. Ante esto, la creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental y los posibles impactos asociados con los productos han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2006) que surgió en la década del sesenta, a fin de analizar los sistemas industriales examinando todos los procesos seguidos por la materia prima, desde su extracción, transformación y retorno a la ecosfera en forma de residuos (Arena, 1999). A lo largo de los años, se ha expresado la importancia de la incorporación de las características locales y regionales para evaluar indicadores de categoría o intervenciones ambientales dentro de los modelos de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), una de las etapas de un ACV. La EICV vincula una actividad relacionada con el ciclo de vida de un producto, servicio o tecnología con su impacto en el medio ambiente. Es decir, el impacto de la emisión de una sustancia contaminante o tóxica tiene tres dimensiones que son destino, exposición y efecto. El factor de destino se compone principalmente por degradación, acumulación, inmovilización y transporte. Tiene en cuenta los distintos compartimentos ambientales donde la sustancia puede emitirse para luego depositarse. El factor de exposición, por ingesta o inhalación, conecta y compara la cantidad de sustancia en un determinado compartimento con los valores admisibles de esa sustancia para los organismos que se encuentran en ese compartimento. En último lugar, el factor de efecto relaciona el nivel de exposición de las especies o de los ecosistemas con un valor de efecto (Civit, 2009). Por ejemplo, en el caso de la Eutrofización el indicador de punto medio establece una equivalencia entre sustancias que incluyen equivalentes de concentración de fosfato (PO_4^{3-}) para ambientes de agua dulce y equivalentes de concentración de compuestos de nitrógeno (N) para ambientes marinos y terrestres. Los CFs de punto medio son el producto de un factor de destino y un factor de exposición (Morelli et al., 2018).

La eutrofización de las aguas continentales es uno de los problemas ambientales más comunes y ejerce impactos ecológicos, sanitarios y económicos significativos. Entre todas las sustancias químicas que están presentes en un cuerpo de agua, el fósforo (P) y el N ocupan un lugar destacado, ya que son los nutrientes que, en general, controlan el desarrollo de organismos microbiológicos (Oroná et al., 2013). Si los aportes de sustancias eutrofizantes superan la capacidad de los ecosistemas para asimilar estos aportes puede haber cambios en el hábitat, en la composición de las especies y en las funciones de los ecosistemas, promoviendo el crecimiento de especies limitadas en nutrientes (Hassan et al., 2005). El proceso de eutrofización se ve también afectado por una serie de factores internos. En el caso de las aguas continentales destacan la forma del reservorio (la profundidad y la relación superficie-volumen, que condicionan la importancia relativa de los procesos de oxidación-reducción) y la composición mineralógica de las aguas (por ejemplo, la alcalinidad de las aguas se relaciona directamente con su potencial para precipitar el P) (Ministerio de Medio Ambiente, 2000). Dependiendo de las condiciones del medio el material del sedimento actuará como sumidero o como fuente de nutrientes, participando activamente en los procesos que regulan la concentración y biodisponibilidad de los mismos en el cuerpo de agua (Oroná et al., 2013).

Argentina presenta serios problemas de eutrofización en algunos de sus lagos y embalses (Quirós, 2000). Los antecedentes regionales son base para su análisis en el contexto del ACV, ya que no se han reportado estudios dentro de esta metodología (Conci et al., 2023). Varios autores discuten la mejor práctica para la eutrofización y es necesario seleccionar un método que se adapte a las condiciones del lugar (Conci et al., 2022). Debido a que no existen aún estudios de eutrofización acuática dentro de la metodología de ACV, este trabajo pretende dar un enfoque inicial al tema. El objetivo es relevar el impacto ambiental potencial del P en sistemas acuáticos regionales. Esto, permitirá avanzar en el desarrollo de indicadores regionales de eutrofización que contribuyen a la tesis doctoral en marcha.

Desarrollo

Este trabajo estudia el impacto ambiental potencial del P en cuerpos de agua dulce regionales, indagando sobre la relación entre la presencia de P en agua y el riesgo de eutrofización, particularmente en Argentina. Con ello, se persigue sentar las bases para el desarrollo o aplicación de un modelo de impacto de punto medio para la tesis doctoral.

Los ecosistemas fluviales están fuertemente vinculados a los sistemas terrestres en los que se encuentran, por lo que son muy sensibles a las actividades humanas en el paisaje circundante (Lowe y Likens, 2005). La eutrofización es uno de los problemas ambientales más frecuentes de lagos y embalses. Este fenómeno se define como un proceso de deterioro de la calidad del recurso, originándose por el enriquecimiento de nutrientes y condicionando la utilización de los mismos, ejerciendo impactos a escala regional (Stefouli et al., 2005; Girão et al., 2007). Cuando se incrementan los niveles de macronutrientes, también lo hacen las demandas de oxígeno disuelto debido a la actividad iónica generada a través de los ciclos de degradación de la materia inorgánica u orgánica presentes (Vásquez Zapata et al., 2012). Entonces, el estado trófico de un ecosistema acuático puede definirse como la relación entre el estado de nutrientes del ecosistema y el crecimiento de la materia orgánica en el mismo y normalmente se basa en el nutriente que representa una limitación (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 2011). Cuando es pobre en nutrientes se denomina oligotrófico y se caracteriza por presentar aguas con buen índice de penetración lumínica. El crecimiento de las algas es pequeño y mantiene a pocos animales. Al ir presentándose el aporte de nutrientes, el sistema hídrico tiende a convertirse en eutrófico. Las algas crecen en gran cantidad, muchos organismos mueren y son descompuestos por la actividad de las bacterias y se presentan altas demandas de oxígeno disuelto. Las zonas bentónicas de estos sistemas se van rellenando de sedimentos y la profundidad de la columna de agua va disminuyendo, perdiéndose progresivamente la capacidad hidráulica y la de carga hidrobiológica (Roldán y Ramírez, 1992; Metcalfe-Smith, 1994).

El comportamiento del P es muy sencillo y sus iones están asociados con la fase en partículas. En estudios realizados sobre el desplazamiento del P desde las tierras agrícolas, se observa que la parte más importante se incorpora a los materiales arcillosos y es transportada como producto de la erosión. El es fácilmente accesible a las plantas acuáticas, hasta el punto en que el P medido en aguas superficiales quizá represente únicamente una parte residual, después de que haya sido absorbido en su mayor parte por la vida vegetal (Spires y Miller, 1978). Entonces, el aumento del N y el P o los aportes de materia orgánica respirable pueden cambiar la estructura y la función de las comunidades de plantas y animales a través de una cadena de causa-efecto (Henderson, 2015) (Figura 1).

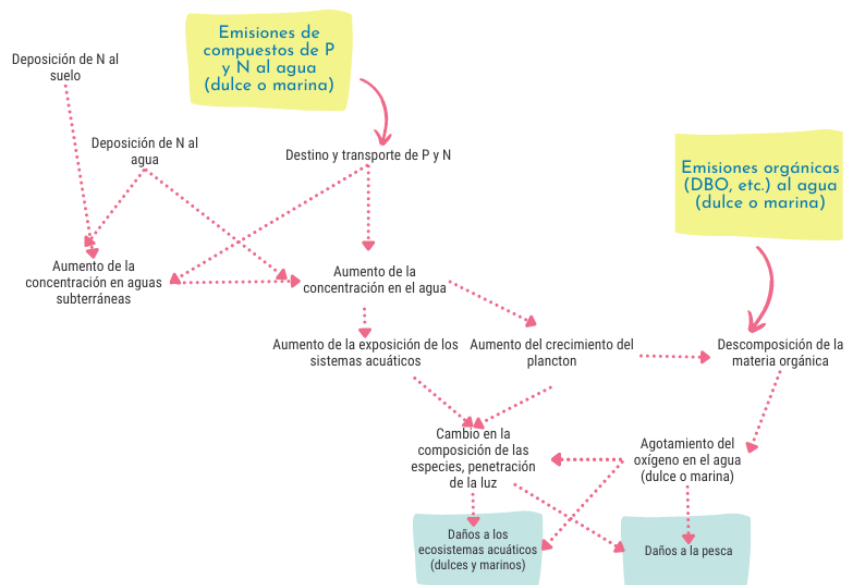


Figura 1: Vía de impacto de la eutrofización acuática (dulce y marina) (Conci et al., 2023, adaptado de Henderson, 2015).

Quirós (2000) expone las concentraciones de P total y clorofila a para lagos y embalses de Argentina, según región geográfica (Tabla 1). Los niveles de biomasa algal de los lagos se explican por los niveles de nutrientes (Quirós, 1988).

Región geográfica	Fósforo total (mg/m ³)			Clorofila a (mg/m ³)		
	media	max	min	media	max	min
Pampa	256	1288	23	64.1	405	1.6
Oeste y Noroeste	54	322	5	22.4	218	1.1
Planicie Patagónica	59	294	4	7.6	23.8	0.7
Andes Patagónicos	7	33	1	2.2	54.1	0.2

Tabla 1: Concentraciones de fósforo total y clorofila a para lagos y embalses de Argentina, agrupados por región geográfica. Valores medios y rango de variación para concentraciones (Quirós, 1997).

Autores como Vollenweider (1976) y Dillon y Rigler (1974), han creado modelos de evaluación capaces de estimar la carga crítica de un sistema. Relacionan la concentración de nutrientes presente en el lago, con la carga máxima permisible del sistema capaz de alterar las condiciones tróficas de este. Así, se pueden establecer principios para crear modelos de gestión de carga de nutrientes (Rast y Lee, 1978).

Resultados

Desde los comienzos de la metodología del ACV se han propuesto diversos métodos de EICV. Unos evalúan los impactos intermedios y otros los impactos finales (Civit, 2009). Para efectos acuáticos, los métodos de EICV pueden diferir en sus enfoques para capturar estos cambios en el ecosistema, con algunos puntos finales centrados en el enriquecimiento de nutrientes y otros en el agotamiento del oxígeno. Se puede incluir diversas formas de P, aunque la sustancia típica es el PO₄³⁻ (Henderson, 2015). Payen et al. (2019) sugieren que el indicador en el nivel medio mida la eutrofización de agua dulce potencial en equivalentes de P (P_{eq}). La eutrofización representa un impacto ambiental regional, pudiendo ser necesaria la elaboración de modelos en función del lugar (Henryson et al., 2017). Siguiendo la terminología habitual en EICV, el impacto provocado por la eutrofización acuática en un sistema (A) dentro de un área geográfica puede expresarse como sigue (Schmid, 2008, adaptado de Seppälä et al., 2004) (Ec. 1):

$$I_{Eu}(A) = \sum_{j=1}^n C_{j,i}(A) \cdot E_j(A) \quad \text{Ec. (1)}$$

donde I_{Eu}(A) representa el valor del impacto de eutrofización acuática causado por el sistema A en un área geográfica, C_{j,i}(A) el factor de caracterización de la sustancia j producida por el sistema A que alcanza una determinada zona acuática i en el área y E_j(A) la cantidad de sustancia j emitida por el sistema A en el área.

De los datos expuestos por Quirós (2000) (Tabla 1), se extrae que la región pampeana es la que presenta altos niveles de P total en sus aguas dulces, explicando también los elevados niveles de clorofila a. Si bien hay lagos que naturalmente son eutróficos, la intervención antrópica ha elevado la concentración de este nutriente, perturbando la dinámica natural. Los arroyos de la región pampeana están experimentando dos procesos: eutrofización debido al aumento de la concentración de P reactivo soluble y acidificación. Se sugiere que estos cambios están relacionados con los cambios en las prácticas agrícolas (Feijóo et al., 2023). Diversos estudios han asociado el uso de suelo agrícola-ganadero con altas concentraciones de P disuelto en ambientes de agua dulce a escala local. A escala espacial, el pH es el principal determinante de la concentración de P reactivo soluble en arroyos pampeanos (Hegoburu, 2021).

El ciclo del P en las aguas continentales y su aporte terrestre desde la cuenca son controlados por interacciones hidrológicas, químicas y biológicas (Caraco 2009). La carga crítica de P en las aguas puede ser un factor esencial en un modelo de impacto de eutrofización, considerando las fuentes, destino y transporte del nutriente hasta que alcanza el cuerpo de agua (Figura 1). Actualmente, se está trabajando en la propuesta de un modelo de impacto de punto medio que incorpore el destino, transporte y exposición del P en el agua. Este modelo busca identificar el aumento de la concentración de P en cuerpos de agua, especialmente en regiones de Argentina con significancia ambiental. Para lograr esto, se utilizarán datos de estudios que hayan efectuado mediciones a campo, lo que permite que el modelo refleje condiciones reales de los ecosistemas locales. El

modelo de impacto de eutrofización propuesto permitirá una evaluación potencial de la eutrofización. Se espera que este modelo pueda ser adaptado a escala global en la EICV.

Conclusiones

Este trabajo tiene el potencial de contribuir a la comprensión y gestión de la eutrofización en cuerpos de agua dulce regionales mediante la EICV. Al ser un impacto ambiental regional, se prevé que la metodología desarrollada o aplicada sirva de modelo para estudios similares en otras regiones del mundo. La vía de impacto de la eutrofización acuática es base para el modelo, ya que considera el destino, transporte y exposición del P en cuerpos de agua. Esto, contribuye al avance de la tesis doctoral, que persigue el desarrollo de indicadores, promoviendo una gestión sostenible de los recursos hídricos. Con este enfoque, se espera facilitar la toma de decisiones para la reducción de nutrientes, mejorando la calidad y salud de los ecosistemas acuáticos, aportando a la sofisticación de la herramienta del ACV.

Referencias

Arena, A. P. (1999). Un instrumento para el análisis y evaluación ambiental de productos y tecnologías. El análisis de ciclo de vida.-Consideraciones metodológicas, usos y limitaciones. *Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 3(2). ISSN: 0329-5184.

Caraco, N. (2009). Phosphorus. En: Likens, G.E. (Ed.), *Encyclopedia of Inland Waters* (pp. 73-78). Elsevier.

Civit, B. M. (2009). Sostenibilidad ambiental. Desarrollo de indicadores para su aplicación en estudios de análisis de ciclo de vida en la región árida del centro-oeste argentino [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional de Cuyo.

Conci, E., Becker, A. R., Arena, A. P. y Civit, B. M. (2022). A literature review of eutrophication in Life Cycle Assessment. Relevance for pampean agroecosystems in Argentina. *South Florida Journal of Development*, 3(1), 618-643. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-046>

Conci, E., Civit, B. M. y Arena, A. P. (2023). Eutrofización acuática: selección de un modelo apropiado para la estimación de nutrientes en cuencas hidrográficas de Argentina. II EnIDI, Los Reyunos, Argentina.

Dillon, P. J. y Rigler, F. H. (1974). The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes 1, 2. *Limnology and oceanography*, 19(5), 767-773. <https://doi.org/10.4319/lo.1974.19.5.0767>

Environmental Protection Agency (2011). *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*, General Books, United States. ISBN: 9781234174194.

Feijoó, C., Hegoburu, C., Messetta, M. L., Guerra-López, J., Rigacci, L., Anselmo, J., Di Franco, L. y Marcé, R. (2023). Acidification and increase of phosphorus levels in Pampean streams after 12 years of agricultural intensification. *Aquatic Sciences*, 85(3), 85. <https://doi.org/10.1007/s00027-023-00983-7>

Girão, E. G., De Andrade, E. M., Rosa, M. D. F., de Araújo, L. D. F. P. y Meireles, A. C. M. (2007). Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal. *Revista Ciência Agronômica*, 38(1), 17-24. ISSN 0045-6888.

Hassan, R., Scholes, R. y Ash, N. (2005). *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Island Press. ISBN: 9781559632270.

- Hegoburu, C. (2021). Dinámica del fósforo en arroyos pampeanos: patrones espaciales y temporales e implicancias del cambio climático [Tesis de doctorado]. Universidad de Buenos Aires.
- Henderson, A. D. (2015). Eutrophication. En M. Z. Hauschild y M. A. J. Huijbregts (Eds.), *Life Cycle Impact Assessment* (pp. 177-196). Springer. doi:10.1007/978-94-017-9744-3
- Henryson, K., Hansson, P. A. y Sundberg, C. (2017). Spatially differentiated midpoint indicator for marine eutrophication of waterborne emissions in Sweden. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(1), 70-81. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1298-7>
- Lowe, W. H. y Likens, G. E. (2005). Moving headwater streams to the head of the class. *BioScience*, 55(3), 196-197. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0196:MHSTTH\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0196:MHSTTH]2.0.CO;2)
- Metcalf-Smith, J. L. (1994). Biological water-quality assessment of rivers: use of macroinvertebrate communities. *The rivers handbook: hydrological and ecological principles*, 144-170.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2000). Libro blanco del agua en España. Centro de Publicaciones, Secretaría general Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 84-8320-128-3.
- Morelli, B., Hawkins, T. R., Niblick, B., Henderson, A. D., Golden, H. E., Compton, J. E., Cooter, E. J. y Bare, J. C. (2018). Critical Review of Eutrophication Models for Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9562-9578. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00967>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo del Milenio. Informe de 2015. <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Resources/Static/Products/Progress2015/Spanish2015.pdf>
- Organización Internacional de Normalización. (2006). Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco. 14040, ISO.
- Oroná, C., Duarte, O. y Paz-Ferreiro, J. (2013). Comportamiento del fósforo al pasar de una masa de agua dulce (Río Primero) a otra salada (Laguna del Plata), Córdoba, Argentina. *Estudios en la Zona No Saturada del Suelo. Córdoba (España) V*, 11.
- Payen, S., Civit, B. M., Golden, H., Niblick, B., Ubizeye, A., Winter, L. y Henderson, A. D. (2019). Acidification & Eutrophication. En R. Frischknecht & O. Jolliet (Eds.), *Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators (Volume 2)*, pp. 60-79). UNEP; SETAC; Life Cycle Initiative. <https://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-for-life-cycle-impact-assessment-indicators-volume-2/>
- Quirós, R. (1997, October). Classification and state of the environment of the Argentinean lakes. En *Study report for the lake environment conservation in developing countries: Argentina* (Ed. ILEC Workshop on Better Management of the Lakes of Argentina) (pp. 29-50).
- Quirós, R. (1988). Relationships between air temperature, depth, nutrients and chlorophyll in 103 Argentinian lakes. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 23(2), 647-658.
- Quirós, R. (2000). La eutrofización de las aguas continentales de Argentina. *El agua en Iberoamérica: Acuíferos, lagos y embalses*. CYTED. Subprograma XVII. Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Mar del Plata, Argentina, 43-47.
- Rast, W. y Lee, G. F. (1978). Summary analysis of the North American (US Portion) OCED eutrophication project: nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices. EPA-600/3-78-008

Roldán, G. y Ramírez, J. (1992). Fundamentos de limnología tropical. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.

Schmid, A. G. (2008). Diferenciación espacial en la metodología de Análisis del Ciclo de Vida: desarrollo de factores regionales para eutrofización acuática y terrestre [Tesis de doctorado]. Universidad de Santiago de Compostela.

Seppälä, J., Knuuttila, S. y Silvo, K. (2004). Eutrophication of aquatic ecosystems a new method for calculating the potential contributions of nitrogen and phosphorus. The International Journal of Life Cycle Assessment, 9(2), 90-100. <https://doi.org/10.1007/BF02978568>

Spires, A. y Miller, M. H. (1978). Contribution of phosphorus from agricultural land to streams by surface runoff. International Joint Commission PLUARG Report. Windsor, Ontario.

Stefouli, M., Dimitrakopoulos, D., Papadimitrakis, J. y Charou, E. (2005). Monitoring and assessing internal waters (Lakes) using operational space borne data and field measurements. Association on Water, 9, 25-33.

Vásquez Zapata, G. L., Herrera Orozco, L., Cantera Kintz, J. R., Galvis Castaño, A., Cardona Zea, D. A. y Hurtado Sánchez, I. C. (2012). Metodología para determinar niveles de eutrofización en ecosistemas acuáticos. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas, 1(24), 112-128.

Vollenweider, R. A. (1976). Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem Ist Ital Idrobiol, 33, 53-84.