



# Eutrofización. Carga crítica de fósforo

<b>Apellidos, nombre</b>	Inmaculada Romero Gil (inrogi@dihma.upv.es)
<b>Departamento</b>	Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA)
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Camino, Canales y Puertos Universitat Politècnica de València

## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a presentar el concepto de Eutrofización y su problemática en los ecosistemas acuáticos lacustres. Tras definir la **eutrofización** y estimar la **carga crítica de fósforo**, se tratará la restauración de lagos eutróficos y la importancia de determinar la posible **carga interna** de fósforo para una correcta gestión del ecosistema acuático.

## 2 Introducción

La **Eutrofización** es el enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes [1]. Generalmente suele asociarse la eutrofización a fuentes antropogénicas de nutrientes, aunque en algunos ecosistemas acuáticos podemos encontrar una eutrofización natural.

Un ecosistema acuático eutrófico suele ser un problema a la hora de gestionar, por el aumento de la producción y biomasa de productores primarios (fitoplancton, macrófitos,...); modificación de las características del hábitat por la transformación de la vegetación; producción de sustancias tóxicas por determinadas algas; disminución del oxígeno del agua al finalizar las situaciones de proliferación de algas, lo que normalmente da lugar a una mortandad de peces; problemas de sabor y olor; reducción de la posibilidad de utilización del agua para fines recreativos; problemas en la navegación por el crecimiento de densas masas de macrófitos,...

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 conocerlo es fundamental a la hora de gestionarlo. Aunque tanto el nitrógeno como el fósforo contribuyen a la eutrofización, la clasificación del estado trófico normalmente se basa en el nutriente que representa una limitación [2]. En la mayor parte de los casos, el factor de limitación en aguas dulces es el fósforo y en aguas salinas suele ser el nitrógeno (excepto en el mar Mediterráneo donde es el fósforo). Para los lagos o embalses nos centraremos por tanto en el fósforo.

El estado trófico [3] puede ir desde la oligotrofia con bajo nivel de nutrientes hasta la hipertrofia con gran abundancia de nutrientes (Tabla 1).

Estado trófico	Materia orgánica	Promedio total de fósforo (mg/m <sup>3</sup> )	Máximo de clorofila (mg/m <sup>3</sup> )	Profundidad de Secchi (m)
Oligotrófico	bajo	8,0	4,2	9,9
Mesotrófico	medio	26,7	16,1	4,2
Eutrófico	alto	84,4	42,6	2,45
Hipertrófico	muy alto	750-1200		0,4-0,5

Tabla 1. Relación entre niveles tróficos y características de los lagos [4]

## 3 Objetivos

A partir del estudio de este documento, serás capaz de:

- Evaluar la carga de fósforo a un ecosistema acuático
- Calcular la concentración de fósforo en equilibrio y la carga interna de fósforo



- Predecir el estado trófico de un ecosistema
- Seleccionar medidas de gestión para la restauración de lagos eutróficos

## 4 Desarrollo

Existen numerosos modelos de eutrofización para estudiar los nutrientes en lagos y embalses de mayor o menor complejidad que depende básicamente de los datos disponibles y del ecosistema. Los modelos simples de eutrofización se basan en **tres etapas**:

1. Determinación o cálculo de la carga de nutrientes.
2. Predicción de la concentración de nutrientes.
3. Predicción de la eutrofización.

La base de todo modelo de eutrofización es la determinación del balance de nutrientes, lo que siempre debe tratar de lograrse midiendo las concentraciones y las velocidades de flujo de entrada y salida. Cuando no se disponen de medidas reales, es posible calcular la carga de nutrientes en base a estimaciones como las que se describen a continuación, sabiendo que se trata de valores estimativos.

Generalmente los modelos simples se abordan en base al balance de masas del nutriente limitante, esto es, el fósforo para lagos o embalses. Así, se usa el fósforo total como la variable indicadora del estado trófico. En síntesis, el esquema simplificado comprende los siguientes pasos:

- a) Estimar la carga total de fósforo que entra al ecosistema
- b) Determinar la concentración promedio anual de fósforo total en el lago
- c) Calcular las concentraciones promedio de clorofila.

### 4.1 Cálculo de la carga de nutrientes

El primer paso consiste en establecer un balance de nutrientes para el ecosistema lacustre, tomando en cuenta las diversas fuentes posibles.

#### 4.1.1 Cargas naturales provenientes del suelo

Para calcular la carga natural de nutrientes a un lago, deben conocerse el área de la cuenca de drenaje de cada tributario del lago, y clasificar cada una de ellas en base a la geología y el uso del suelo.

Denominamos  $A_i$  a la superficie de las zonas homogéneas en uso del suelo ( $m^2$ ) y  $E_{P_i}$  ( $mg/m^2/año$ ) a los valores de exportación de fósforo en base a la clasificación geológica, siendo  $i$  cada una de las zonas homogéneas del territorio que drena al ecosistema acuático. Puede calcularse entonces la cantidad total de fósforo que ingresa al lago, IPT ( $mg/año$ ), proveniente de la cuenca mediante la ecuación 1.

$$IPT = \sum_{i=1}^n A_i \cdot E_{P_i}$$

*Ecuación 1. Carga de fósforo proveniente del suelo*

La tabla 2 presenta valores de exportación de fósforo EP basado en una clasificación geológica.

Uso del suelo	EP (mg/m <sup>2</sup> año)	
	Ígneo	Sedimentario
Bosques		
Rango	0,7-9	7,0-18
Media	4,7	11,7
Bosques+pasturas		
Rango	6,0-12	11,0-37
Media	10,2	23,3
Áreas agrícolas		
Citrus	18	
Pasturas	15-75	
Labranza	22-100	

Tabla 2. Valores de exportación de fósforo, EP (mg/m<sup>2</sup>año).

#### 4.1.2 Cargas naturales provenientes de las precipitaciones

En base a la precipitación anual, P (m/año), es posible hallar la cantidad de fósforo, IPP (mg/año), aportada por las precipitaciones mediante la ecuación 2.

$$IPP = P \cdot CPP \cdot As$$

Ecuación 2. Carga de fósforo proveniente de las precipitaciones

En este caso As (m<sup>2</sup>) es el área superficial del lago y CPP (mg/m<sup>3</sup>) la concentración de fósforo en el agua de lluvia. La tabla 3 muestra las concentraciones habituales en el agua de lluvia.

	CPP (mg/l)
Rango	0,025-0,1
Media	0,07

Tabla 3. Concentración de fósforo en el agua de lluvia (mg/l)

#### 4.1.3 Cargas naturales provenientes de vertidos domésticos

El cálculo del aporte de nutrientes a un lago proveniente de vertidos domésticos, debe basarse preferentemente en cifras anuales per cápita, debiendo ponerse un gran cuidado en la selección de los valores apropiados. Deben tenerse en cuenta los siguientes puntos:

- La descarga per cápita anual de fósforo suele rondar los 800-1800 g.
- Los tratamientos mecánicos eliminan entre 10-15 % de nutrientes.
- Los tratamientos biológicos eliminan de un 10 a un 15 % de nutrientes.
- La precipitación química elimina de un 80 a un 90 % del fósforo.
- El coeficiente de retención, R, de fósforo total para lechos filtrantes sépticos es variable dependiendo de las características (espesor y componentes), entre 0,20 y 0,75 aproximadamente.

En base a las consideraciones arriba indicadas, puede estimarse la carga de fósforo, IPW (mg/año), que ingresa al lago en la forma de fuentes puntuales en función de la población mediante la ecuación 3, siendo N el número de habitantes, R el coeficiente de retención de fósforo y K la descarga per cápita anual de fósforo.

$$IPW = K \cdot N \cdot (1 - R)$$

Ecuación 3. Carga de fósforo proveniente de los vertidos domésticos

#### 4.1.4 Cargas naturales provenientes de cauces fluviales

Sabiendo las concentraciones de fósforo en los cauces fluviales que desembocan en el ecosistema acuático y los caudales de agua que desembocan, es sencillo determinar la carga de fósforo que entra, IPF (mg/año), mediante la ecuación 4, siendo  $Q_i$  el caudal del cauce fluvial  $i$  que llega al lago ( $m^3/año$ ) y  $P_i$  la concentración de fósforo en el cauce  $i$  ( $mg/m^3$ ).

$$IPF = \sum Q_i \cdot P_i$$

*Ecuación 4. Carga de fósforo proveniente de los cauces fluviales*

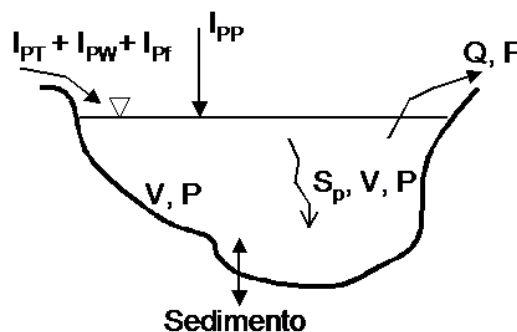
#### 4.2 Predicción de la concentración de nutrientes

Una vez estimada la carga total al lago, el siguiente paso del esquema simplificado es predecir la concentración del nutriente limitante en el lago.

Las hipótesis usadas para el análisis del modelo de balance de masas para fósforo total son:

- Lago completamente mezclado
- Condiciones de estado de equilibrio, representado por el valor promedio estacional/anual
- Limitado por fósforo
- El fósforo total se usa como medida del estado trófico

En la figura 1 se muestra un lago con las diferentes entradas estimadas conforme se ha comentado en el apartado anterior.



*Figura 1. Esquema de un lago con sus aportes y pérdidas*

Así, una vez determinados los diferentes aportes provenientes de las escorrentías IPT, de la precipitación IPP, de vertidos domésticos IPW, de vertidos fluviales IPF, podremos ya estimar la concentración de fósforo en el lago,  $P$  ( $mg/m^3$ ). Se considera que el cambio en la concentración de fósforo con el tiempo en un lago es igual al aporte agregado por unidad de volumen,  $V$  ( $m^3$ ), menos las pérdidas por sedimentación y por descarga. Asumiendo que el lago está totalmente mezclado y que su volumen es constante, el balance de fósforo viene dado por la ecuación 5.

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{IPT + IPP + IPW + IPF}{V} - SP \cdot P - r \cdot P$$

*Ecuación 5. Balance de fósforo*



Se denomina SP a la tasa de sedimentación o pérdida global ( $\text{año}^{-1}$ ) y r a la tasa de renovación o de barrido del lago ( $\text{año}^{-1}$ ) que puede determinarse en función del caudal medio anual descargado, Q ( $\text{m}^3/\text{año}$ ), mediante la ecuación 6.

$$r = \frac{Q}{V}$$

*Ecuación 6. Tasa de renovación*

Podemos denominar IP ( $\text{mg}/\text{m}^3\text{año}$ ) a la tasa de carga de fósforo por unidad de volumen del lago, determinada mediante la ecuación 7.

$$IP = \frac{IPT + IPP + IPW + IPF}{V}$$

*Ecuación 7. Tasa de carga de fósforo*

De esta manera, la ecuación 5 puede transformarse en la ecuación 8.

$$\frac{dP}{dt} = IP - (r + SP)P$$

*Ecuación 8. Ecuación diferencial del balance de fósforo*

Esta ecuación puede ser resuelta analíticamente, para la condición inicial  $P = P_0$ , para  $t = t_0$  (ecuación 9)

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-(r+SP)t} + \frac{IP}{r+S} [1 - e^{-(r+SP)t}]$$

*Ecuación 9. Balance de fósforo*

La condición de equilibrio para tiempo infinito puede darse mediante la ecuación 10.

$$Peq = \frac{IP}{r + SP}$$

*Ecuación 10. Fósforo en equilibrio*

Si llamamos Hm a la profundidad media del lago, la carga total externa de fósforo por unidad de superficie del lago y por año, LP ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{año}$ ) puede determinarse mediante la ecuación 11.

$$LP = IP \cdot Hm$$

*Ecuación 11. Carga total externa de fósforo*

De esta manera, el fósforo en equilibrio puede determinarse mediante la ecuación 12.

$$Peq = \frac{LP}{Hm(r + SP)}$$

*Ecuación 12. Fósforo en equilibrio*

La tasa de renovación o de barrido del lago, r, también suele expresarse como  $1/Tw$ , donde Tw es el tiempo de renovación del lago medido en años.

La dificultad para usar estas ecuaciones es que el coeficiente de sedimentación o, mejor dicho, la tasa neta de pérdida global SP no se conoce aún ni puede medirse en forma



experimental directa. Sin embargo, si existe información sobre las entradas y salidas de carga y caudal de un lago, además de sus características morfométricas, se puede hacer estimaciones de SP.

Para lagos templados la tasa de sedimentación puede aproximarse a la ecuación 13 [5].

$$SP = \frac{1}{\sqrt{Tw}}$$

*Ecuación 13. Tasa de sedimentación para lagos templados*

Por lo tanto, el fósforo en equilibrio puede determinarse según la ecuación 14.

$$Peq = \frac{LP}{\frac{Hm}{Tw}(1 + \sqrt{Tw})}$$

*Ecuación 14. Fósforo en equilibrio para lagos templados*

El mismo análisis efectuado en lagos tropicales, resultó en un valor de SP igual al doble del obtenido en lagos templados, con lo que el fósforo en equilibrio puede determinarse según la ecuación 15.

$$Peq = \frac{LP}{\frac{Hm}{Tw}(1 + 2\sqrt{Tw})}$$

*Ecuación 15. Fósforo en equilibrio para lagos tropicales*

### 4.3 Predicción de la eutrofización

Una vez estimada la concentración total de fósforo en equilibrio para lagos templados (ecuación 14) o para lagos tropicales (ecuación 15), el siguiente paso es predecir el nivel de eutrofia.

La clorofila es un estimador útil y simple de la densidad del fitoplancton y ha sido ampliamente utilizado en los modelos para predecir la densidad de algas en lagos. Parece existir una estrecha relación entre la clorofila y la concentración de fósforo total en la mayoría de los lagos templados.

Para lagos templados puede estimarse la clorofila estival promedio (Cla) mediante la ecuación 16, donde Peq se expresa en mg/l y Cla en µg/l.

$$\log(Cla) = 1,45 \cdot \log(1000 \cdot Peq) - 1,14$$

*Ecuación 16. Clorofila estival promedio para lagos templados*

Para lagos tropicales puede usarse la ecuación 17.

$$Cla = 332 \cdot Peq^{1,21}$$

*Ecuación 17. Clorofila estival promedio para lagos tropicales*

Generalmente para tener una estimación del nivel trófico de un lago se utilizan las figuras de probabilidad, donde en el eje horizontal se representa la concentración de fósforo (figura 2) o de clorofila (figura 3) y en el eje vertical el nivel trófico.

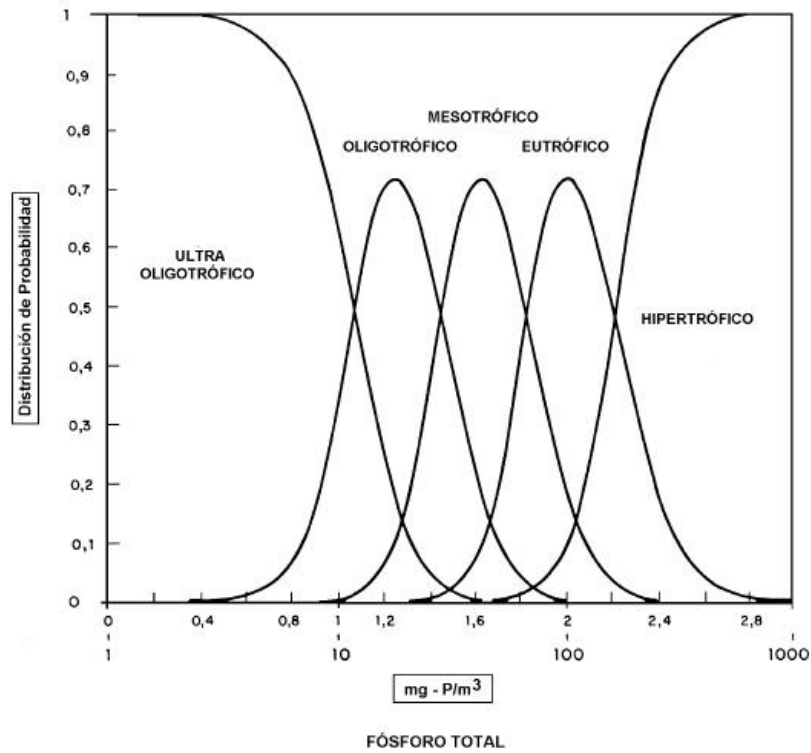


Figura 2. Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basado en fósforo total (Adaptado de [6])

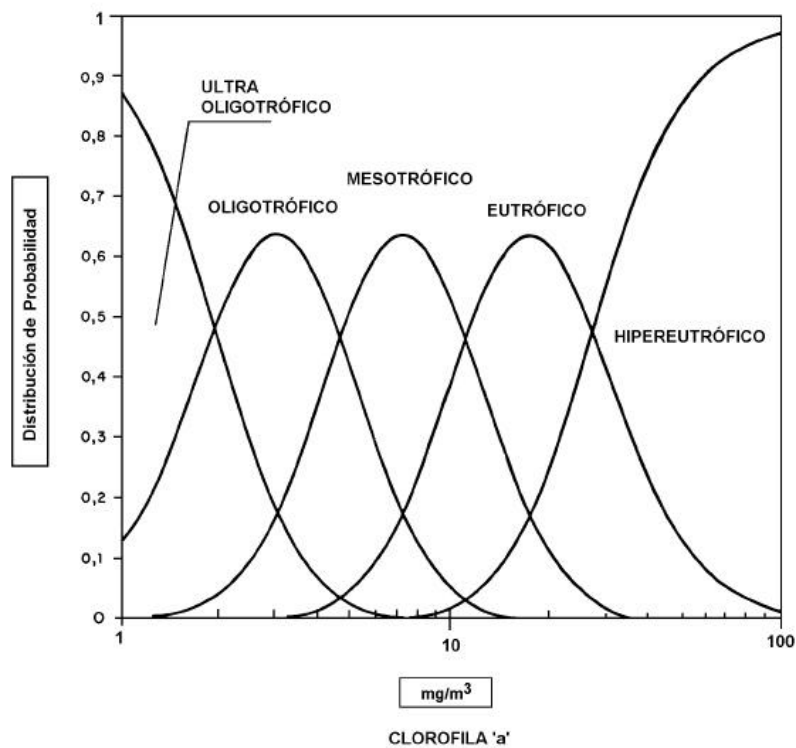


Figura 3. Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basado en clorofila (Adaptado de [6]).



#### 4.4 Carga interna de fósforo y medidas de restauración

Los lagos eutróficos e hipertróficos suelen ser poco profundos y sufren altas tasas de cargas de nutrientes procedentes de fuentes tanto localizadas como no localizadas. Cuando trabajamos con fósforo no hay que olvidar que en algunas ocasiones suele acumularse en los fondos de los ecosistemas, tras su deposición. De hecho, la deposición y acumulación de fósforo en los sedimentos es un grave problema para la restauración de lagos con altos niveles de eutrofia. Las partículas enriquecidas con fósforo caen al fondo del lago y quedan acumuladas como una reserva de nutrientes en los sedimentos. Las plantas enraizadas pueden hacer uso de dicho fósforo para su crecimiento. Y lo que es peor, en condiciones de anoxia en la columna de agua el fósforo puede redisolverse a la columna de agua, donde rápidamente puede llegar a ser utilizado por las algas.

Para determinar si existe o no dicha acumulación de fósforo en el embalse, sólo es necesario comparar la concentración de fósforo en equilibrio en el embalse ( $P_{eq}$ ) (ecuación 14 o 15) y la concentración que realmente sale ( $P_{salida}$ ). En caso de que  $P_{eq} > P_{salida}$  tendremos constancia de que el lago está “acumulando fósforo”. En caso de que  $P_{eq} < P_{salida}$  el lago estará “produciendo fósforo”. En este caso, cuando se determina el nivel de eutrofia, debe incluirse este aporte extra en el balance de fósforo (ecuaciones 5 y 7).

Esta reserva de fósforo, conocida como **carga interna de fósforo**, puede dificultar enormemente las medidas de gestión de las cuencas fluviales para combatir la eutrofización de los lagos. Si nos olvidamos de la existencia de esta fuente interna de fósforo, podemos gestionar y disminuir las entradas o aportes externos de nutrientes provenientes de fuentes puntuales o incluso de la agricultura, y seguir teniendo un alto nivel de eutrofia.

Tradicionalmente, para eliminar esta carga interna de fósforo, el dragado de los sedimentos del fondo se ha considerado el único medio disponible para solucionar este problema. No obstante, existen otros métodos alternativos y más económicos para controlar las cargas internas de fósforo mediante la oxigenación y el tratamiento químico de los sedimentos in situ con el fin de inmovilizar el fósforo.

Por ello es indispensable a la hora de gestionar, determinar cuál es la carga interna de fósforo en el lago o embalse. Tras ello podremos plantearnos medidas de gestión o de restauración.

## 5 Cierre

A lo largo de este artículo hemos visto cómo podemos determinar la carga de fósforo que ingresa a un ecosistema acuático y qué concentración de fósforo existirá en el equilibrio. Comparándola con la concentración real de salida podremos determinar si existe o no una carga interna de fósforo. Tras ello podremos estimar la cantidad de clorofila y el nivel trófico del ecosistema.

Si bien estos modelos simples no serán nunca una herramienta predictiva tan buena como los modelos que toman en cuenta más procesos, ofrecen la ventaja de ser una forma simple de obtener estimaciones iniciales que orienten sobre el desarrollo de modelos más complejos. Permiten formular primeras respuestas a preguntas como ¿qué nivel de tratamiento o eliminación de nutrientes debo lograr en los vertidos municipales para mejorar la transparencia del lago por un factor de dos o más?



## 6 Bibliografía

- [1] FAO: “Lucha contra la contaminación agrícola de recursos hídricos”, Estudio FAO Riego y Drenaje - 55. Ed. Burlington, 1997. ISBN: 92-5-303875-6.
- [2] Environmental Protection Agency: “Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs”, General Books, United States, 2011. ISBN: 9781234174194.
- [3] Vollenweider, RA; Members of the Technical Bureau: “Conclusions of the OECD Cooperative program on eutrophication”, en Unesco Nature and resources 16, 3, 1980
- [4] Janus, LL; Vollenweider, RA: “Summary report: The CECO Cooperative Programme on Eutrophication”, Ed. Burlington. Canadian contribution Scientific Series No. 131 and 131-S. Ontario, Canada: Canada Centre for Inland Waters, 1981.
- [5] Vollenweider, RA: “Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication”, en Mem Ist Ital Idrobiol 33, 1976, págs. 53-83.
- [6] Vollenweider, RA; Kerekes, JJ: “Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication”, en Proceedings of an International Symposium on Inland Waters and Lake Restoration. U.S. Environmental Protection Agency. EPA 440/5-81-010, 1980, págs. 26-36.