

**EUTROFIZACIÓN DE EMBALSES: DESCRIPCIÓN, PREVENCIÓN Y MANEJO**

**RAÚL ERNESTO SIERRA ORDOÑEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2010**

**EUTROFIZACIÓN DE EMBALSES: DESCRIPCIÓN, PREVENCIÓN Y MANEJO**

**RAÚL ERNESTO SIERRA ORDOÑEZ**

**Monografía para optar al Título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**DIRECTOR**

**Dr. CRISOSTOMO BARAJAS FERREIRA  
INGENIERO QUÍMICO**

**CODIRECTOR**

**Profesor. HUMERTO GARCIA PINZÓN  
BIOLOGO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2010**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	12
1. EI ECOSISTEMA ACUÁTICO.....	14
1.2. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA.....	15
1.2. ESTADO TRÓFICO DE UN CUERPO ACUÁTICO.....	17
1.3. COMUNIDADES BIOLÓGICAS Y RELACIÓN CON LA PRODUCTIVIDAD.....	21
1.3.1. Bacterioplancton y algas.....	22
1.3.2. Zooplancton.....	23
1.3.3. Macroinvertebrados.....	23
1.3.4. Macrófitas.....	24
2. LOS EMBALSES: ENTRE EL RÍO Y EL LAGO.....	26
2.1. EUTROFIZACIÓN EN EMBALSES.....	29
2.1.1. Dinámica biológica.....	31
2.1.2. Desoxigenación y proceso químico.....	32
2.1.3. Principales consecuencias de la eutrofización.....	35
2.2. ALGUNOS EMBALSES COLOMBIANOS.....	37
2.2.1. Embalse La Fe.....	37
2.2.2. Embalse El Peñol.....	38
2.2.3. Embalses de Porce II y Riogrande II.....	39
3. PREVENCIÓN Y MANEJO DE LA EUTROFIZACIÓN EN EMBALSES.....	41
3.1. MEDIDAS PREVIAS A LA CONSTRUCCIÓN DEL EMBALSE.....	44
3.2. CORRECCIÓN DE LA EUTROFIA.....	45
4. CONCLUSIONES.....	49
5. RECOMENDACIONES.....	50
BIBLIOGRAFIA.....	51

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla No. 1. Valores límites de la OCDE de clasificación trófica.....	16
Tabla No. 2. Características de un lago/represa dependiendo del estado trófico.	17
Tabla No. 3. Gradiente de estado trófico y posibles cambios en un lago. ....	18
Tabla No. 4. Principales toxinas producidas por cianobacterias según la OMS. ...	36
Tabla No. 5. Niveles y aspectos a considerar para el control de la eutrofización.	42
Tabla No. 6 Medidas para la corrección de la eutrofia.....	45

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura No. 1. Relaciones entre el ecosistema acuático y el medio que lo rodea.....	14
Figura No. 2. Esquema de las zonas de un cuerpo de agua léntico. .	27
Figura No. 3 Zonas de un embalse formadas por los gradientes.....	28
Figura No. 4. Interacciones orgánicas e inorgánicas que influyen en el metabolismo de las algas en un lago eutrófico. ....	31

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto No. 1. Embalse ubicado en el municipio de Berlín - Santander .....	26

**TITULO:** EUTROFIZACIÓN DE EMBALSES: DESCRIPCIÓN, PREVENCIÓN Y MANEJO

**AUTOR:** RAÚL ERNESTO SIERRA ORDOÑEZ

**PALABRAS CLAVES:** Eutrofización, estado trófico, biomanipulación, productividad, tiempo de retención

La aceleración del proceso de eutrofización en los embalses ha conllevado una serie de consecuencias drásticas y perjudiciales a nivel económico, social y ecológico, por lo tanto al mismo tiempo que se acelera la construcción de los embalses en nuestro país y en particular en la región santandereana es necesario consolidar una base de información de los aspectos biológicos, técnicos y económicos que implica la eutrofización de los embalses.

Este proceso conlleva la transición hacia un estado trófico de mayor productividad caracterizado por el aumento de los nutrientes (principalmente Nitrógeno y Fósforo), desoxigenación y acumulación de sedimentos y materia orgánica e inorgánica en el ecosistema acuático. Así mismo se produce una sucesión biológica caracterizada por la reducción en la biodiversidad tanto de organismos productores como consumidores, un aumento de la vegetación acuática y frecuentes afloramientos de algas verde azules. Aunque la eutrofización hace parte de la dinámica natural de los cuerpos de agua, para el caso de muchos embalses la influencia antrópica producto de las actividades agroindustriales, la deforestación de las cuencas y la misma dinámica de la presa aceleraron este proceso hasta situaciones extremas como la del embalse Porce II del departamento de Antioquia.

Se revisaron las medidas propuestas tanto para la prevención como para la corrección de la eutrofización entre las cuales se abarca desde la remoción de la mayor parte de la materia orgánica en la zona de inundación, la localización de las compuertas y la disminución en los tiempos de retención hasta el tratamiento de las aguas residuales vertidas a las cuencas y la biomanipulación de las comunidades implicadas en las cadenas tróficas del cuerpo de agua. Al ser el estado trófico de un embalse un reflejo del estado de sus cuencas, las medidas preventivas son las más importantes para evitar mayores problemas económicos y ecológicos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira y Codirector: Humberto García Pinzón.

**TITLE:** EUTROPHICATION OF RESERVOIRS: DESCRIPTION, PREVENTION AND MANAGEMENT

**AUTHOR:** RAÚL ERNESTO SIERRA ORDOÑEZ

**KEYWORDS:** Eutrophication, trophic state, biomanipulation, productivity, retention time

The acceleration of eutrophication process in reservoirs has led to a series of dramatic and damaging consequences in the economic, social and ecological level, so while at the same time that wich accelerates the construction do dams in our country and particularly in the region of Santander in necessary to consolidate a base of information from biological, technical and economic means eutrophication and reservoirs.

This process involves the transition to a more productive trophic state characterized by increased nutrients (primarily nitrogen and phosphorus), deoxygenation and accumulation of sediments, organic and inorganic matter in the aquatic ecosystem. Also there is a biological succession characterized by the reduction in the biodiversity of both producers and consumers organism, an increase in aquatic vegetation and frequent blue-green algal blooms. Although eutrophication is part of the natural dynamics of water bodies, in the case of many reservoirs the anthropogenic influence product of agroindustrial activities, deforestation of watersheds and the same dynamic of the dam have accelerated this process until extreme situations like the reservoir Porce II in Antioquia department.

Finally reviewed the proposed measures for both prevention and for correction of eutrophication among which ranges from the removal of most of the organic matter in the flood zone, the location of the gates and the reduced time retention to the treatment of wastewater discharged into the basin and biomanipulation of the communities involved in the food chains of the water body. The trophic state of a reservoir is a reflection of the state of their watershed, therefore preventive measures are most important to avoid major economic and ecological problems.

---

• Thesis

•• Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Enginner School. Enviromental Enginner Especialist.  
Director: Crisóstomo Barajas Ferreira and Codirector: Humberto García Pinzón

## GLOSARIO

**Abundancia:** Número de individuos que pertenecen a una determinada especie dentro de una comunidad.

**Anoxia:** Ausencia de oxígeno que para el caso de los lagos es más probable que se presente en las zonas de profundidad.

**Fitoperifiton:** Comunidad de algas que se desarrollan adheridas a diferentes sustratos como rocas, arena o restos vegetales.

**Floculante:** Sustancia química que aglutina y coagula sólidos en suspensión, muy útiles para la separación sólido – líquido.

**Hipolimnion:** Zona más profunda de un lago donde el agua permanece aislada por una termoclina con igual temperatura durante todo el año.

**Homeostasis:** Característica de los sistemas abiertos o cerrados de mantener una condición estable y constante por medio del ajuste de sus condiciones y la autorregulación.

**Influencia antropogénica:** Presión y efectos provenientes de cualquier actividad humana sobre los ecosistemas.

**Sistema léntico:** Sistema acuático que generalmente presenta vegetación acuática emergente y carece de corrientes evidentes como los lagos, humedales y lagunas.

**Sistema lótico:** Sistema acuático que presenta una corriente como ríos y arroyos.

**Polución:** Contaminación generada por los residuos industriales o naturales que al entrar en el ecosistema modifica sus características físicas, químicas y/o biológicas.

## INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la producción mundial y el respectivo aumento de la demanda energética han conllevado el uso de diferentes fuentes para la generación de energía. El uso de combustibles fósiles que comprende altas emisiones de contaminantes a la atmósfera y sus reservas limitadas han impulsado la construcción de embalses y plantas hidroeléctricas como una de las alternativas menos contaminantes y fuente de seguridad energética para los países industrializados como en vías de desarrollo. Así mismo la construcción de los embalses ha favorecido la disponibilidad de agua para el consumo humano, funcionando como reservas que amortiguan los devastadores efectos de las sequías que hoy en día son cada vez más frecuentes en algunas regiones. Tanto los usos mencionados anteriormente como la acuicultura, deportes náuticos y en general todo el ecosistema aledaño al embalse se pueden ver afectados por las alteraciones de la dinámica energética natural del cuerpo de agua.

La eutrofización de los embalses entendida como un aumento excesivo e irregular de los nutrientes y en general de la productividad primaria del agua, conlleva alteraciones en la diversidad, abundancia y dinámica de todas las comunidades bióticas que allí habitan como lo son el fitoplancton, zooplancton, macroinvertebrados y macrófitas, entre otras. Así mismo con respecto a las características físicas y químicas del agua, la eutrofización conlleva procesos de anoxia, sedimentación, acumulación de iones, aumento de turbidez y en los casos más graves una total colmatación del cuerpo de agua. Para el caso de los embalses con fines energéticos la concentración de sedimentos altera la dinámica del agua en la salida ya que disminuye la velocidad del flujo de agua y al aumentar la concentración de nutrientes, favorece los procesos de colonización y formación de biofilms sobre todas las superficies.

Las medidas para mitigar la eutrofización deben comprender una serie de aspectos antes, durante y después de la construcción de un embalse. Tal es el caso de la previa remoción la mayor cantidad de masa vegetal que se encuentre en la zona de inundación, el aislamiento de aguas residuales domésticas y de cultivos, menores tiempos de retención y altura de la salida de agua, etc. , todo esto en conjunto apunta a mitigar la alteración que se está generando al crear un ecosistema artificial y conservar una dinámica estable de los procesos biogeoquímicos que permitan alcanzar un equilibrio entre la utilidad del embalse y la conservación del ambiente. Es de esta manera como las investigaciones científicas en el área de la limnología aportan pautas básicas para el diseño de planes de manejo ambiental de los embalses, incluyendo aspectos físicos, químicos y biológicos que constituyen herramientas para el monitoreo del estado trófico de un embalse y evitar así, mayores costos tanto ambientales como económicos.

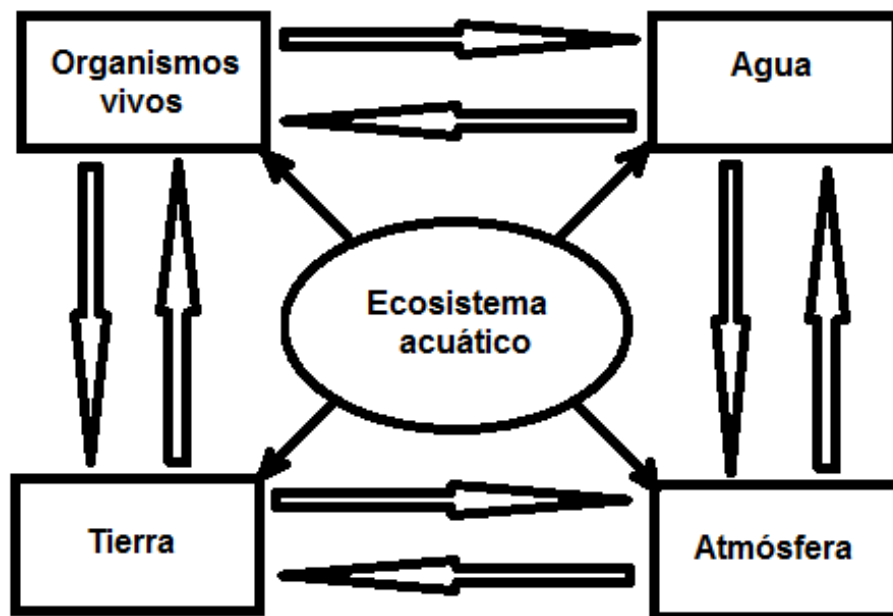
Bajo este marco se establece el objetivo de este documento el cual pretende aportar una revisión actualizada de los estudios y casos relacionados con la eutrofización en los embalses desde sus aspectos generales hasta las medidas que se proponen para su prevención y manejo, teniendo en cuenta que en nuestra región santandereana se está ejecutando el megaproyecto de Hidrosogamoso y se avecina el embalse del río Tona.

## 1. EI ECOSISTEMA ACUÁTICO

El agua es el mayor componente de nuestro planeta, esencial para el mantenimiento y desarrollo de la vida y en general de todos los procesos metabólicos que realizan las unidades biológicas y las reacciones químicas de la superficie terrestre. Así mismo interactúa con el componente terrestre y atmosférico para consolidar los ecosistemas acuáticos y la dinámica de los procesos geoquímicos propios de los cuerpos de agua.

De esta forma el ecosistema acuático se caracteriza por la interacción de las partes físicas, químicas y biológicas y la transformación de la materia y la energía (1).

**Figura No. 1.** Relaciones entre el ecosistema acuático y el medio que lo rodea.



Fuente: ROLDÁN G., 2003.

Al igual que los ecosistemas terrestres, los ecosistemas acuáticos poseen propiedades de resistencia al cambio y la propiedad de resiliencia que permite regresar al estado inicial que se presentaba antes de que se diese alguna alteración, pero este cambio tiene un límite que al excederse puede llevar a un estado de no retorno y modificación permanente del ecosistema. Si este deterioro es continuo el ecosistema desciende cada vez más a diferentes estados con diferentes propiedades de resistencia y resiliencia y por lo tanto se aleja cada vez más de su estado inicial anterior a la alteración. Así mismo, para la conservación de un ecosistema acuático, se tiene como objetivo el mantenimiento de los entornos naturales y sus respectivas especies nativas con una estructuración y funcionalidad homeostática autónoma (3).

## **1.2. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA**

El control de la productividad primaria en lagos naturales y embalses adquirió una gran importancia durante la década de 1970 debido a la proliferación de las algas y las macrófitas que generaron problemas significativos para el uso humano de estos cuerpos de agua (4).

La producción primaria de los ecosistemas en general está determinada por los organismos que sintetizan materia orgánica a partir de reacciones de oxidación y reducción, principalmente con el proceso fotosintético. Dentro de este grupo para el caso de los ecosistemas acuáticos, se destacan las microalgas y las plantas acuáticas y al ser medida esta productividad en el agua, se expresa la tasa de incorporación de carbono inorgánico a través del proceso fotosintético que realiza el fitoplancton (1). La producción primaria expresa la captación de energía por parte de los organismos autotróficos que para el caso de los lagos, corresponde a la suma de la productividad que se origina dentro del lago (producción primaria

autóctona) más la que llega al sistema acuático que ha sido sintetizada fuera de él (producción primaria alóctona) teniendo en cuenta que para el caso particular de la zona del Ecuador el proceso de producción primaria depende principalmente de la disponibilidad de radiación dentro del propio lago (radiación subacuática) y de la concentración de nutrientes en comparación de las altas latitudes; la radiación solar es el principal factor (5).

La productividad definirá el estado trófico del agua, el cual se mide principalmente con la clorofila pero también con otros parámetros complementarios como se observa en la tabla 1:

**Tabla No. 1.** Valores límites de la OCDE de clasificación trófica.

<b>Categoría trófica</b>	<b>TP</b>	<b>Chl Media</b>	<b>Chl Máxima</b>	<b>Media de Secchi</b>	<b>Mínimo de secchi</b>
<b>Ultraoligotrófico</b>	< 4,0	< 1,0	< 2,5	> 12,0	> 6,0
<b>Oligotrófico</b>	< 10,0	< 2,5	< 8,0	> 6,0	> 3,0
<b>Mesotrófico</b>	10 – 35	2,8 – 8	8 – 25	6 – 3	3 – 1,5
<b>Eutrófico</b>	35 – 100	8 – 25	25 – 75	3 – 1,5	1,5 – 7
<b>Hipereutrófico</b>	> 100	> 25	> 75	< 1,5	< 0,7

TP: media anual de la concentración de fósforo total en el lago (ug/l).

Chl media: media anual de la concentración de clorofila a en las aguas superficiales (ug/l).

Chl máxima: pico anual de la concentración de clorofila a en las aguas superficiales (ug/l).

Media de Secchi: media anual de transparencia de la profundidad de Secchi (m).

Mínimo de Secchi: mínimo anual de transparencia de la profundidad de Secchi (m).

## 1.2. ESTADO TRÓFICO DE UN CUERPO ACUÁTICO

Los dos extremos de productividad determinan un sistema oligotrófico de un lado con baja productividad y de otro lado el sistema eutrófico que demuestra las características de una mayor productividad y concentración de nutrientes como ocurre en un embalse con estas características. Generalmente los embalses ubicados a una mayor altitud presentan propiedades de sistemas oligotróficos y hacia el nivel del mar se favorecen las condiciones eutróficas (Tabla 2).

**Tabla No. 2.** Características de un lago o represa dependiendo del estado trófico.

<b>FACTOR</b>	<b>SISTEMA OLIGOTRÓFICO</b>	<b>SISTEMA EUTRÓFICO</b>
<b>Nutrientes</b>	Bajas concentraciones; dinámica lenta.	Altas concentraciones; Dinámica rápida.
<b>Oxígeno disuelto</b>	Poca fluctuación día – noche; alta disponibilidad tanto en la superficie como en el fondo.	Gran fluctuación día – noche; alta disponibilidad en la superficie y anoxia en el fondo.
<b>Comunidades</b>	Poca biomasa; alta diversidad.	Alta biomasa; baja diversidad.
<b>Transparencia</b>	Alta; zona eufótica profunda.	Baja; zona eufótica superficial.
<b>Morfometría</b>	Poca intervención generalmente cuerpos de agua de alta montaña.	Alta influencia antrópica; lagos poco profundos en zonas cálidas o templadas.
<b>Apariencia</b>	Aguas claras y limpias, no se observan grandes masas de microalgas o vegetación acuática.	Aguas con tonos de color verde o amarillo, densa vegetación acuática flotante o sumergida.

Con respecto a la comunidad fitoplanctónica, en los lagos de características oligotróficas se presenta una dominancia de las crisofíceas, dinofíceas y

bacilariofíceas, a comparación de los lagos eutróficos en los cuales cambia la estructura de esta comunidad para dar paso al dominio de las cianofíceas, clorofíceas y euglenofíceas (1).

Para establecer el estado trófico de un cuerpo de agua y poder realizar comparaciones con el estado de otros ecosistemas acuáticos, se utilizan índices calculados con base en diferentes variables y parámetros (6). Una herramienta importante es la Índice de Estado Trófico (TSI) de Carlson, que utiliza tres variables que representan de manera indirecta la biomasa algal: Clorofilas, Profundidad de Secchi y el fósforo total. Para cada uno de estas variables se tienen las ecuaciones de manera resumida (7):

Disco de Secchi (SD):  $TSI(SD) = 60 - 14,41 \ln(SD)$

Clorofilas (CHL):  $TSI(CHL) = 9,81 \ln(CHL) + 30,6$

Fósforo total (TP):  $TSI(TP) = 14,42 \ln(TP) + 4,15$

Este índice permite calcular valores que varían en entre 0 que es el extremo de baja productividad o estado oligotrófico y 100 que es la mayor productividad o estado eutrófico, con un valor medio de 50 ajustado a la mesotrofia (6). Para relacionar estos valores con las demás variables se presenta en la tabla 3 los valores de TSI y una especificación mayor de los rangos presentados por la OCDE en la tabla 1:

**Tabla No. 3.** Gradiente de estado trófico y posibles cambios en un lago.

<b>TSI</b>	<b>Clorofila (ug/l)</b>	<b>Disco de Secchi (m)</b>	<b>de fósforo total (ug/l)</b>	<b>Estado trófico y otras características.</b>
<b>&lt; 30</b>	<b>&lt; 0,95</b>	<b>&gt; 8</b>	<b>&lt; 6</b>	Oligotrófico: aguas claras con buena oxigenación en todo el año en el hipolimnion.

<b>30 - 40</b>	0,95 – 2,6	8 – 4	6 – 12	Oligotrófico pero puede presentarse periodos de anoxia en el fondo.
<b>40 - 50</b>	2,6 – 7,3	4 - 2	12 - 24	Mesotrófico: Aguas moderadamente claras con mayor probabilidad de anoxia, turbidez y problemas de olores.
<b>50 - 60</b>	7,3 - 20	7,3 - 20	24 - 48	Eutrófico: Hipolimnion anóxico con proliferación de macrófitos.
<b>60 - 70</b>	20 - 56	20 - 56	48 - 96	Eutrófico: Dominio de cianofíceas, proliferación de macrófitas y espumas de algas.
<b>70 - 80</b>	56 - 155	56 - 155	96 - 192	Hipereutrófico: Mayor densidad de algas y macrófitas.
<b>&gt;80</b>	> 155	> 155	192 - 384	Hipereutrófico: espumas de algas y reducción en la diversidad de macrófitas.

Es importante resaltar que la calidad del agua no debe ser confundida con el estado trófico a pesar de que estos conceptos están relacionados, ya que por una parte el estado trófico es una escala absoluta que representa la condición biológica de un cuerpo de agua basada en su productividad , independiente del uso y localidad del agua, y por otra parte el concepto de calidad de agua depende de las necesidades humanas ya sea la recreación, piscicultura o la generación de energía, lo cual es un término sujeto al uso del cuerpo de agua (7).

Algunas recomendaciones adicionales para definir el estado trófico de un lago según Carlson & Simpson (7) son:

- Usar una definición simple para el estado trófico.
- La base para la una medición simple es la biomasa de las plantas que puede se predecir a partir de nutrientes y que está relacionada con otras características biológicas.
- El termino eutrofización es simplemente el cambio del estado trófico de un lago hacia una mayor biomasa de productores.
- Un método sencillo para calcular y explicar los estados tróficos es el Índice de Carlson.
- El principal dato para el cálculo del índice de estado trófico es la clorofila y tanto el fósforo como la profundidad de Secchi pueden ser utilizadas como una información complementaria.
- El índice no solo representa los nutrientes que aumentan la eutrofización de un lago sino que puede ser relacionado con otras variables como el depósito de sedimentos que hace las aguas menos profundas y aumenta el crecimiento de macrófitas. La discusión de los resultados debe ser relacionada con la oxigenación, comunidades ícticas y efectos en las cadenas tróficas del lago.
- Hay que tener mucho cuidado con el término calidad de agua cuando se habla de estado trófico.

### **1.3. COMUNIDADES BIOLÓGICAS Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCTIVIDAD.**

La zona litoral comprende la interface entre la tierra de la cuenca de drenaje y el agua abierta de los cuerpos acuáticos, siendo dicha zona la principal sintetizadora de materia orgánica gracias a la ocupación de los macrófitos y de la comunidad fitoperifítica (8). La disponibilidad de materia orgánica en la zona litoral se ve favorecida gracias a su cercanía con la vegetación de la ribera, el carbono terrestre y productos de la planicie de inundación como invertebrados terrestres, frutos y semillas que son incorporados a las redes tróficas acuáticas (9). En general se observa que el conjunto alga epifita - macrófito es la unidad principal de productividad primaria de la zona litoral pero no menos importante la comunidad bacteriana de carácter heterotrófica contribuye a la degradación y liberación de compuestos orgánicos e inorgánicos y a la conformación de las comunidades perifíticas en general.

Dentro de toda la biota de los ecosistemas acuáticos los microorganismos son muy sensibles a las perturbaciones del ambiente, manifestándose una profunda alteración en la riqueza y abundancia de estas comunidades. Además de esto, los microorganismos representan la mayoría de la biomasa acuática cumpliendo un papel fundamental dentro de los ciclos de los nutrientes y en general en la productividad de los cuerpos de agua. Sus características biológicas de tasas de crecimiento rápido y las respuestas a los mínimos niveles de polución o en general de cualquier cambio físico, químico o biótico los posiciona como óptimos indicadores de cambios ecológicos (10).

En general la alteración de las condiciones naturales de un sistema acuático como el derrame de un contaminante afecta a los organismos que allí habitan y dicho efecto depende de la intensidad, tiempo y naturaleza del factor de perturbación. Dentro de los fenómenos relacionados con el proceso de eutrofización que se

pueden determinar mediante el uso de indicadores biológicos se encuentran la: anoxia, condiciones de pH, estratificación térmica y de oxígeno en la columna de agua, sedimentación, transparencia y hasta cambios estructurales y sucesionales (11).

### **1.3.1. Bacterioplancton y algas.**

Las bacterias es uno de los grupos más diversos y más abundantes en los ambientes acuáticos cuyos organismos presentan las características propias de los procariotas, pero a diferencia de las cianobacterias, presentan características heterotróficas de nutrición (12).

Las algas tanto procariotas como eucariotas, corresponden a una grupo artificial de organismos que presentan las características comunes de tener un hábitat acuático, fotosintéticos, estructuras vegetativas simples sin sistemas vasculares y estructuras reproductivas sin protección (13).

Para varios ecosistemas acuáticos se ha encontrado una estrecha relación entre las microalgas y las bacterias, donde el carbono orgánico disuelto liberado por el fitoplancton influye sobre el crecimiento de la comunidad bacteriana y esta a su vez libera nutrientes utilizables por las microalgas, proceso por el cual se relaciona positivamente de manera indirecta a las bacterias con la producción primaria (14). Así mismo varios estudios ha investigado la relación entre las diatomeas con variables como pH, salinidad, polución y niveles de nutrientes tanto orgánicos como inorgánicos. En el caso de los Índices Tróficos de Diatomeas (TDI, siglas en inglés), se utilizan las abundancias de esta comunidad con el enriquecimiento de fósforo para determinar un valor del ensamblaje de diatomeas encontrado, donde los valores bajos evidencian condiciones oligotróficas y los valores altos, condiciones eutróficas del sistema acuático (15).

### **1.3.2. Zooplancton.**

Esta comunidad está conformada por animales microscópicos como protozoos, rotíferos y microcrustáceos que en conjunto influyen de manera importante en la productividad secundaria en los cuerpos de agua (1). También se incluyen en este grupo varias larvas de insectos, la larva del mejillón cebra, ácaros de agua y las larvas de peces (16). Esta comunidad es muy importante ya que en lagos, océanos y sistemas lóticos de poca corriente el zooplancton constituye los consumidores primarios del fitoplancton, además, para el caso de las aguas con un alto grado de contaminación o con una alta productividad, (característica de los embalses eutrofizados) estos organismos transportan una gran cantidad de la energía a través de la cadena trófica al consumir las bacterias y detritos abundantes en un medio eutrófico (16).

### **1.3.3. Macroinvertebrados.**

Dentro de la categoría general de macroinvertebrados se incluyen los poríferos, hidozoos, turbelarios, oligoquetos, hirudineos, insectos, arácnidos, crustáceos, gasterópodos y bivalvos (1). Entre estos los animales del macrozoobentos (longitud > 2mm) han sido utilizados como bioindicadores en los cuales los quironomidos y oligoquetos de las profundidades sirven para biomonitoreo, las comunidades de las zonas litorales y macroinvertebrados acuáticos evidencian las perturbaciones antropogénicas e inclusive los estudios paleolimnológicos con estos grupos muestran la historia de la contaminación de un cuerpo de agua (17). Con respecto al estado trófico del sistema, se considera que la producción relacionada con la comunidad de macroinvertebrados, se incrementa con la eutrofización de lagos, embalses y sistemas lóticos ya que para condiciones de oligotrofia, existe una alta diversidad de especies pero con una baja abundancia debido a la poca disponibilidad de nutrientes y alta presión por depredación entre

las diversas especies. Esta condición cambia en los medios eutrofizados en los cuales se presenta una baja diversidad pero con una alta abundancia de individuos por especies (principalmente quironomidos, moluscos y turbificidos) que aprovechan la alta disponibilidad de nutrientes y la menor depredación (1).

#### **1.3.4. Macrófitas.**

La vegetación terrestre ha colonizado en gran medida las aguas epicontinentales y su aporte a la producción primaria es generalmente mucho mayor que el de las comunidades de algas planctónicas y bénticas (18). La dinámica de los macrófitos y su distribución a través del cuerpo acuático especialmente en la zona litoral depende de sus hábitos de crecimiento dentro de los cuales se encuentran los macrófitos flotantes libres y aquellos fijos al sustrato que pueden ser emergentes, de hojas flotantes o sumergidos (19). Así mismo la pendiente de la zona litoral determina su distribución debido al potencial para la acumulación de sedimentos y el área disponible para la penetración de la luz, diferenciándose tres tipos de vegetación (20):

1. Zona de vegetación emergente: La productividad de estos macrófitos está determinada principalmente por el proceso fotosintético que utiliza el gas carbónico atmosférico y además utilizan los nutrientes acumulados en el sedimento (20).
2. Zona de plantas con hojas flotantes: En este caso los macrófitos obtienen los nutrientes principalmente del sedimento pero sus hojas todavía pueden capturar el gas carbónico de la atmosfera (20).
3. Vegetación sumergida: Obtiene los nutrientes del suelo y del agua principalmente y a comparación de los dos tipos de vegetación anteriores, la disponibilidad del CO<sub>2</sub> que se encuentra en el agua determina el proceso fotosintético (20).

Las macrófitas acuáticas son componentes fundamentales de los cuerpos de agua como reguladores de la degradación de la calidad del agua, siendo afectada su riqueza y diversidad por los cambios en los niveles de nutrientes y condiciones físicas debido al proceso de eutrofización, lo cual generalmente disminuye la disponibilidad de luz con un aumento en la turbidez y favorece la sucesión de macrófitos sumergidos a macrófitos emergentes que se expanden por el espejo de agua (21).

## 2. LOS EMBALSES: ENTRE EL RÍO Y EL LAGO.

A comparación de los lagos, los embalses se diferencian principalmente en la edad, origen, morfología, forma, ubicación de la cuenca, usos y dinámica limnológica. De estas características la forma de la cubeta, la profundidad y el punto de desagüe tiene una gran relevancia ya que determinan el tipo de mezcla a través de toda la columna de agua, el viento y la radiación solar son los que determinan la mezcla en los lagos naturales pero en los embalses también actúa una corriente horizontal que va desde la entrada del río hacia la salida del embalse.

**Foto No. 1.** Embalse ubicado en el municipio de Berlín - Santander



**Fuente:** Propia.

El embalse como un ecosistema similar a un lago se diferencia en tres zonas físicas:

- Aguas abiertas o zona limnética: Esta se encuentra en el centro del cuerpo de agua hasta la profundidad donde se produce el proceso de mezcla.
- Zona litoral: comprende la zona de ribera de agua somera y parte del fondo, con una gran proliferación de plantas y depósitos orgánicos.
- Zona béntica: corresponde a la zona profunda o fondo del cuerpo de agua donde no penetra la radicación solar.

La estratificación es favorecida en los meses de verano donde se establecen capas o zonas dentro de toda la columna de agua. La zona superior donde predomina la productividad primaria a través del proceso fotosintético, se denomina zona eufótica o epilimnion. A medida que aumenta la profundidad hay un punto en el cual hay una disminución considerable de la temperatura donde se presenta una termoclina, esta zona es una zona de transición denominada metalimnion, la cual se conecta con la última capa más profunda donde no penetra la luz solar, denominada hipolimnion.

**Figura No. 2.** Esquema de las zonas de un cuerpo de agua léntico.



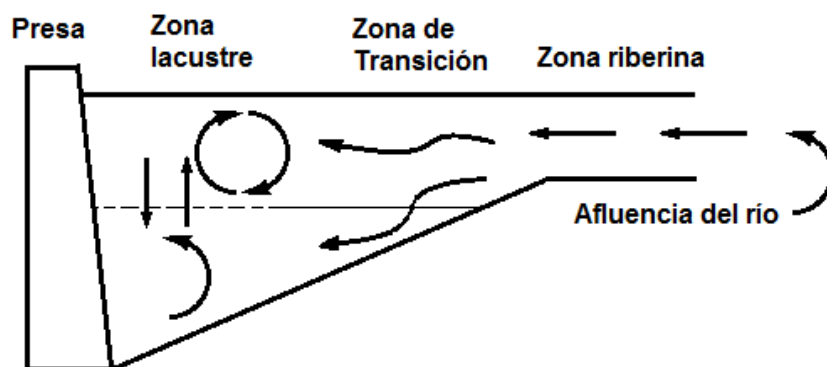
Fuente: MARGALEF R., 1983

Aunque no se tiene muy claro su relación con estos grupos, la comunidad bacteriana es la primera colonizadora de los sustratos de la zona litoral y actúa como una importante productora de micronutrientes y dióxido de carbono que favorece la formación de capas mucoides de polisacáridos y péptidos para la adhesión de algas perifíticas y de estructuras especializadas como los pedúnculos gelatinosos formados por géneros como *Cymbella* y *Gomphonema* (23).

Por otro lado esta asociación en las regiones más someras también es hábitat para los macroinvertebrados que encuentran una fuente de alimento y refugio tanto en los macrófitos como en el bentos (24). Así mismo existen peces que se alimentan de partes de macrófitos favoreciendo la dispersión de semillas y también obtienen gran cantidad de nutrientes a través del raspado de las capas perifíticas como es el caso del bocachico (23) e incluso la zona litoral es utilizada como sitio de desove y hábitat de estadio larvarios y juveniles de especies de peces pelágicos (25).

Así mismo para el caso particular del embalse se diferencian tres zonas específicas ilustradas en la figura 4.

**Figura No. 3** Zonas de un embalse formadas por los gradientes.



**Fuente:** THORNTON W., 1990

Zona riberina (cola del embalse): En esta zona se presenta una mezcla de restos vegetales con una gran cantidad de roca formada por los fragmentos preexistentes, además, la velocidad del flujo que trae el sistema lótico se disminuye rápidamente con un proceso de sedimentación de materia orgánica y partículas gruesas de arena y limo. Esta zona por lo general es poco profunda con una gran oxigenación y mezcla pero por otro lado se presenta una alta turbidez que limita el hábitat de las algas y por lo tanto la fotosíntesis (1).

Zona de transición (zona media del embalse): En esta zona también se produce una sedimentación de arcillas y limos de tamaño grueso pero a diferencia de la zona riberina, predomina la anoxia debido a la alta tasa de consumo de oxígeno que genera la degradación de toda la materia orgánica. Al presentarse estas condiciones de ausencia o poca disponibilidad de oxígeno también se produce una alta tasa de desnitrificación, resolubilización del hierro, manganeso y fósforo y además una liberación de ácido sulfhídrico a través de toda la columna de agua.

Zona lacustre (zona de presa): En esta zona se alcanza la mayor profundidad con un predominio de organismos planctónicos, que para el caso de las algas al haber una mayor penetración de luz y menor sedimentación, favorece la fotosíntesis de estas y por lo tanto una mayor productividad primaria. Hay una limitación potencial de nutrientes y en esta zona es donde se puede producir un exceso de producción de materia orgánica que favorezca la eutrofización debido al desborde de los límites para el procesamiento de la misma (1).

.

## **2.1. EUTROFIZACIÓN EN EMBALSES.**

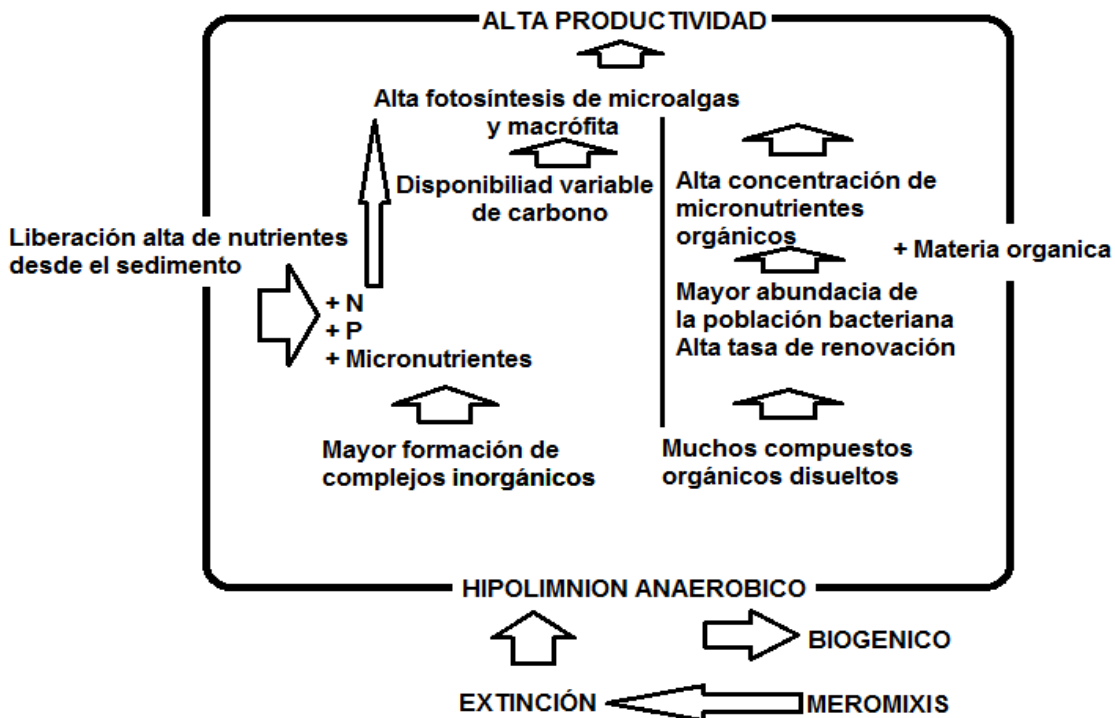
La eutrofización como proceso de alteración es una condición relacionada a la construcción de los embalses y a su respectiva explotación, especialmente en zonas de alta radiación solar, semiáridas, de régimen hidrológico estacional y con

afluentes hidrográfica de uso humano como poblaciones, agricultura o ganadería. Esta particularidad de los embalses hacia la eutrofización es favorecida debido a varios factores entre ellos la gran cantidad de materia orgánica que se debe degradar desde sus inicios y la alta relación entre las superficies de la cuenca y de lámina de agua que mantiene un alto suministro de nutrientes por unidad de superficie (27).

La construcción de un embalse genera la transformación de un ecosistema terrestre en uno acuático y de un ecosistema lótico en uno léntico, lo cual conlleva una reducción en la tasa de renovación y el flujo del agua (1). Así mismo, el aumento en la construcción de embalses desde hace unos 50 años para diferentes necesidades humanas ha permitido el desarrollo de estudios relacionados con la eutrofización, los cuales permiten tener referentes de las condiciones óptimas y manejos ecológicos que se les ha dado en algunos casos e identificar y cuantificar la influencia del hombre en los procesos de eutrofización (4).

La eutrofización, más que un simple problema de contaminación, debe ser vista como un cambio en la tasa de suministro de carbono y energía en un ecosistema, siendo este aumento de materia orgánica proveniente de una fuente alóctona y/o autóctona que al generar un cambio fundamental en la base energética esto se puede manifestar de diferentes formas en todo el sistema (28). Para el ecosistema acuático la eutrofización, sedimentación y pérdida de la biodiversidad, entre otros, son los problemas más comunes y negativos de los embalses. Estos procesos se interrelacionan (figura 5) y pueden afectar el estado del embalse de manera importante, como por ejemplo el caso de los embalses que se encuentran en valles de bosques profundos tienden a recibir una alta descarga de materia orgánica que aumenta la eutrofización, pero la remoción del bosque que aporta dicha materia orgánica aumentaría la sedimentación por la erosión del suelo por lo tanto también aumentaría la eutrofización (29).

**Figura No. 4.** Interacciones orgánicas e inorgánicas que influyen en el metabolismo de las algas en un lago eutrófico.



Fuente: MATINO P., 1989

### 2.1.1. Dinámica biológica.

Una característica importante para evidenciar el proceso de eutrofización es el reemplazo de las algas verdes por la dominancia de las cianobacterias que forman grandes espumas flotantes y son consideradas como las más “molestas” de las algas. Su abundancia en el proceso de eutrofización se debe, además de la gran disponibilidad de nutrientes, a otros factores como la falta de predadores que en el caso del zooplancton y los peces, son más afines a otros grupos de algas como las clorofíceas y también a la capacidad fijadora de nitrógeno atmosférico que les confiere una gran ventaja en los casos que este nutriente escasea en el agua (4).

Un ejemplo de este reemplazo de algas verdes por cianofíceas se presenta en el estudio de Fontúrbel (30) para el lago Titikaka en el cual se concluyó que la composición de las comunidades fitoplanctónicas se modifica con el proceso eutrófico con una predominancia de una o dos algas entre ellas la cianofícea *Oscillatoria* sp., además en este mismo estudio se observa como la aparición y proliferación de macrófitas flotantes contrasta con la reducción de las macrófitas sumergidas a medida que se acelera la eutrofización. En general el proceso de eutrofización reduce la diversidad de la comunidad de microalgas bénticas y planctónicas, favoreciendo la tendencia hacia la dominancia de unas cuantos géneros de algas más tolerantes a las nuevas condiciones como las algas verde – azules *Microcystis*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*; diatomeas *Melosira*, *Fragilaria*, *Asterionella*; Chlorococcales *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Ankistrodesmus*; y los dinoflagelados *Peridinium* y *Ceratium*, siendo las desmicias poco afines a las condiciones eutróficas (31).

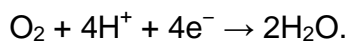
Por otro lado, no solo la comunidad fitoplanctónica es relevante en el proceso de eutrofización ya que la respuesta del zooplancton a la eutrofización está regulada por la disponibilidad de nutrientes, las características ambientales y la dinámica de sus predadores como peces e invertebrados. Al respecto de este punto es difícil crear un modelo generalizado de la modificación en la estructura del zooplancton pero varios estudios muestran como en algunos casos los ciclopoideos, cladóceros y rotíferos se vuelven más abundantes a comparación de los calanoideos que tienden a desaparecer en el proceso de eutrofización (13).

### **2.1.2. Desoxigenación y proceso químico.**

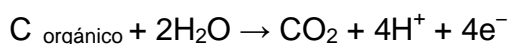
La concentración de nutrientes determina la productividad en los embalses, que para el caso de los embalses neotropicales generalmente no se espera una alta productividad primaria debido a que el fitoplancton es afectado por la alta

turbiedad y la pobreza de nutrientes, registrando visibilidades de disco Secchi entre 2,0 y 3,0m en promedio (1).

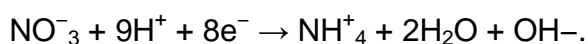
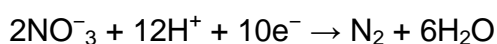
En las primeras etapas el embalse presenta una condición heterotrófica debido a la gran cantidad de materia orgánica que queda en el fondo de la zona inundada, conformando una acumulación de material que requerirá alto consumo de oxígeno y que favorece la anoxia. Una de las consecuencias más graves del proceso de eutrofización es el consumo excesivo de oxígeno en sus aguas tanto en las profundidades como en diferentes niveles. De esta forma cuando hay un exceso de productividad, el hipolimnion es anóxico y pierde su capacidad de regulación, con lo cual el fósforo acumulado en el sedimento se libera constantemente, además organismos del bentos, macrófitas y hasta los peces, contribuyen a la movilización del fósforo del sedimento con procesos de absorción y bioturbación (33). Los procesos fisiológicos microbianos influyen sobre la degradación de la materia orgánica y la fijación del fósforo al sedimento, alterando el equilibrio del estado de oxido-reducción (redox). En los sistemas con una alta disponibilidad de oxígeno, este elemento es el principal aceptor de electrones con la reacción (33):



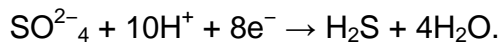
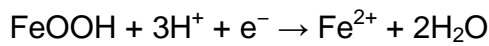
Así mismo para la materia orgánica se presenta la reacción:



A medida que el oxígeno es consumido con la aceleración de la eutrofización, la materia orgánica, continúa a través de una serie de reacciones que representan menor potencial redox. En las bacterias el nitrato es utilizado como aceptor de electrones cuando el oxígeno está ausente o en concentraciones muy bajas:



Así mismo el hierro y algunos sulfatos participan de otras reacciones con menor potencial redox:



La reducción de estos compuestos disminuye la capacidad de acumulación de fósforo en el sedimento ya que el producto  $\text{FeS}_x$  tiene menos sitios de absorción para el fósforo, los productos reaccionados como el FeOOH.

Algunos mecanismos de regulación alterados en la eutrofización según Margalef (18), son:

- La producción primaria aumenta hasta un límite establecido por el proceso fotosintético y sus productos se sedimentan o siguen la vía detrítica.
- La dinámica mineralizadora y reciclada del fósforo es limitada por la disponibilidad de oxígeno en el hipolimnion.
- La solubilidad de los componentes Ca y Fe limita la concentración de fosfatos en el agua.
- Parte del fósforo es retenido en el sedimento pero en condiciones reductoras y de altas concentraciones de hierro, se acelera el retorno del fósforo que se encuentra en el sedimento hacia el agua.
- El nitrógeno inorgánico se regula de manera secundaria con una eliminación de exceso a través del proceso de desnitrificación.

### **2.1.3. Principales consecuencias de la eutrofización.**

Dentro de las consecuencias directas e indirectas que genera la eutrofización en el cuerpo de agua y el abastecimiento del embalse se encuentran (1, 10):

- Aumento de la biomasa relacionada con el aumento de la productividad.
- Menor diversidad de especies.
- Fluctuaciones drásticas de oxígeno disuelto, dióxido de carbono y pH en el ciclo día- noche.
- Aumento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el fondo.
- Aumento de la comunidad de macrófitas y densas masas de algas que impiden el paso de la luz.
- Aumento en los reactivos necesarios para la depuración y tratamiento.
- Obstrucciones en los filtros.
- Inoperancia de los sistemas convencionales de decantación, cambio por sistemas de flotación.
- Afloramientos de cianofíceas que generan ambientes de malos olores, sabores y altamente tóxicos.

Al respecto de este último punto el aumento de los nutrientes, altas temperaturas y una alta intensidad lumínica originan los denominados afloramientos de cianobacterias. La temperatura más favorable para estos blooms es de 25°C

aproximadamente y sus consecuencias perjudiciales aumentan cuando se dan con especies capaces de producir cianotoxinas (tabla 4).

**Tabla No. 4.** Principales toxinas producidas por cianobacterias según la OMS.

<b>Toxina</b>	<b>Actividad</b>	<b>Géneros</b>	<b>Estructura</b>	<b>N° de variantes</b>
<b>Anatoxina – a</b>	Neurotoxina	Anabaena, Aphanizomenon, Oscillatoria, Microcystis	Alcaloide	1
<b>Toxinas PSP (Saxitoxinas)</b>	Neurotoxina	Aphanizomenon, Anabaena	Alcaloide	Al menos 8
<b>Nodularina</b>	Hepatotoxina	Nodularia	Pentapéptido Cíclico	6
<b>Microcistinas</b>	Hepatotoxina	Microcystis, Anabaena, Oscillatoria	Heptapéptido Cíclico	Más de 50
<b>Cilindrospermin</b>	Hepatotoxina	Cylindrospermopsis	Alcaloide cíclico	1
<b>LPS</b>	Toxicidad G - I	Muchos géneros	Lipopolisacárido	Al menos 3

Así mismo cuando se modifican las condiciones del agua embalsada como la temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto, también se afecta la estructura de la comunidades de organismos acuáticos que habitan aguas abajo de los embales (35).

## 2.2. ALGUNOS EMBALSES COLOMBIANOS.

La mayor parte del desarrollo de embalses en Colombia se ha desarrollado en las tres últimas décadas con una producción de energía del 10% del potencial hidroeléctrico de Colombia (1). En la tabla 5 se presentan algunos embalses de Colombia con los valores de clorofila promedio que evidencian su estado trófico:

**Tabla 1: Valores promedio de clorofila en algunos embalses de Colombia.**

<b>Embalse</b>	<b>Valor promedio de clorofila (ug/L)</b>
<b>Amaní (Caldas)</b>	0,011
<b>Porce II (Antioquia)</b>	11 – 230 (rango muy amplio; hipereutrofizado)
<b>La Fe (Antioquia)</b>	0,03
<b>Piedras Blancas (Antioquia)</b>	0,02
<b>Río Grande (Antioquia)</b>	0,05
<b>Punchiná (Antioquia)</b>	1,7 – 11,6 (rango variable)
<b>San Lorenzo (Antioquia)</b>	0,5 – 12, 2 (rango variable)

### 2.2.1. Embalse La Fe.

Este embalse se encuentra ubicado a una altitud de 2,155 m.s.n.m. en el departamento de Antioquia y se construyó en 1973 para almacenamiento y generación de energía. Comprende un área de superficie de 149,0 ha, un volumen de 14,6 Mm<sup>3</sup> y una profundidad de 14,50m en verano y 27,0 m en invierno.

Así mismo se le ha dado un uso de pesca con las especies *Micropterus salmoides*, *Tilapia* sp y *Oncorhynchus mykiss* (36). En el trabajo de Hernani & Ramírez (37) se caracteriza el estado trófico de este embalse como oligomesotrófico con base en un coeficiente de atenuación de 0,39m en este mismo estudio se resalta la

dominancia de la macrófita *Egeria densa*, la cual se encuentra rodeando el embalse y aunque se le ha intentado remover, dichos esfuerzos han sido infructuosos debido a su alta capacidad de adaptación (especialmente a largos periodos de sequia) y amplitud ecológica. Cabe resaltar que los autores ponen en duda los beneficios que puede traer el retiro de esta macrófita ya que las macrófitas presentes también constituyen una barrera para el material alóctono particulado, que disminuye la colmatación y favorece la vida útil del embalse.

Así mismo la productividad de las macrófitas de este tipo en sistemas como la represa La Fé que presentan alta penetración de luz es considerable, supliendo sus necesidades nutricionales a partir del sedimento. En general se predice que este embalse presenta una estabilidad térmica, con penetración de luz y alotrofia considerables, una baja productividad, con una zona de mezcla de poco espesor en los primeros metros de la columna de agua y con una zona litoral muy desarrollada (37).

### **2.2.2. Embalse El Peñol**

El embalse El Peñol se encuentra ubicado a 1,776 m.s.n.m. en el departamento de Antioquia y se construyó en 1965 con el fin de generar energía eléctrica. Comprende un área de superficie de 6,400 ha, un volumen de 1,235 Mm<sup>3</sup> y una profundidad de 14,5m en verano y 30,5m en invierno. Así mismo se le ha dado un uso de pesca con las especies *Micropterus salmoides* y *Bricon henni* (36).

Aguirre et al. (38) estudiaron las características limnológicas de este embalse encontrando que a través de toda la columna de agua se presenta una disponibilidad de oxígeno sin registrar anoxia en sus profundidades pero aún así el porcentaje saturación de oxígeno, la temperatura, pH, dióxido de carbono, nitritos, hierro total, sólidos suspendidos y la conductividad eléctrica presentan una marcada estratificación. Durante todo el estudio la producción primaria registró

valores bajos relacionados con la baja disponibilidad de nutrientes y una comunidad fitoplanctónica dominada por algas verdes y cianofíceas (38).

### **2.2.3. Embalses de Porce II y Riogrande II.**

Empresas públicas de Medellín E.S.P. tiene a cargo nueve embalses para la generación de energía y dentro de estos se destacan el embalse Porce II que presenta condiciones hipereutróficas y el Riogrande II que evidencia una dinámica hacia un estado eutrófico. De las causas principales para el deterioro del agua embalsada y sus cuencas se encuentra el alto crecimiento urbano y las actividades agrícolas e industriales desarrolladas en las áreas de las cuencas de drenaje (39).

El embalse de Porce II tiene una capacidad total de almacenamiento de 231.16 hm<sup>3</sup> y un área de superficie de 980 ha, así mismo el río Porce que es su principal afluente recoge una gran cantidad de aguas residuales (domesticas e industriales) con altas concentraciones de materia orgánica e inorgánica proveniente de los diez municipios del Valle de Aburrá. Esto se refleja en las exageradas cargas de los nutrientes más influyentes en la eutrofización, el nitrógeno y el fósforo, los cuales han tenido picos de alrededor de 40 toneladas / día de nitrógeno y 10 toneladas / día de fósforo, cuando en realidad lo esperado en condiciones normales por el área de la cuenca serían unas 30,2 toneladas de fósforo por año. Producto de este enriquecimiento desproporcionado de nutrientes, se ha generado un abundante crecimiento de algas (principalmente cianofíceas) y plantas acuáticas, entre las cuales la especie *Eichhornia crassipes* (Buchón de agua) ha invadido cerca de la cuarta parte del área total embalsada (39).

Por otro lado el embalse Río grande II cuenta con un volumen total de 240.5 hm<sup>3</sup> y un área de superficie de 1214 ha con la regulación de los ríos Chico y Grande. Los

principales factores que han afectado la calidad del agua de la cuenca son la alteración del régimen hídrico con el desvío de los cauces, desecación de humedales, sobrepastoreo y deforestación por las actividades agroindustriales, uso de agroquímicos y el manejo inadecuado de los residuos sólidos y aguas residuales domésticas e industriales (39).

### **3. PREVENCIÓN Y MANEJO DE LA EUTROFIZACIÓN EN EMBALSES.**

Las medidas preventivas contra la eutrofización pueden evitar mayores daños y costos a comparación de la aplicación de medidas correctivas cuando ya se han generado alteraciones drásticas del estado trófico del agua, por lo que el diseño de políticas y programas de manejo adquieren una gran relevancia en la planificación de la utilización de los recursos hídricos (40).

Los métodos para enfrentar el proceso de eutrofización se pueden clasificar en dos grupos:

1. Preventivos: son los métodos que buscan limitar la productividad del agua a través de la reducción de la carga de nutrientes que provienen del exterior del sistema (como es el caso de las aguas residuales) o también estos métodos implican la diversificación de los efluentes hacia otros ecosistemas que reduzcan dicha carga (41).
2. Correctivos: son los métodos que intervienen directamente en el embalse a través del control de organismos que están favoreciendo el aumento desproporcionado de la productividad. Dicho control puede ser con tratamiento químico, aireación, dragado, etc. (41).

Las características particulares de cada embalse y sus cuencas determinan el tipo de métodos a aplicar, para lo cual se deben tener en cuenta una serie de preguntas que determinan la mejor opción (41):

- a. ¿Cuál es el estado trófico del cuerpo de agua: grado de eutrofización?
- b. De acuerdo con el uso requerido del agua, ¿Cuáles son los niveles límites de eutrofización?

- c. ¿Cuáles son las concentraciones de nutrientes para cada nivel de eutrofización tolerable?
- d. ¿Cuál es el porcentaje de aporte de materia orgánica e inorgánica de las fuentes puntuales y de las fuentes dispersas?
- e. ¿Cuál es la factibilidad de reducir la carga de nutrientes hasta los niveles que se han establecido para el uso óptimo del agua?
- f. ¿Cuáles son los costos y beneficios?

A las actividades para controlar el proceso de eutrofización se les debe dar la relevancia que implica cualquier otro de los aspectos de la construcción y funcionamiento de un embalse, donde en un primer momento se debe identificar el estado trófico que puede tener dicho embalse con base en las características tanto del ambiente donde se va a construir como de la presa y su funcionamiento. Esta predicción puede tener un margen de error debido a las variaciones propias de los ecosistemas pero debe servir para la planificación de las medidas de atenuación de la eutrofia (Tabla 6). Posteriormente con los estudios de impacto ambiental se definen las posibles medidas de atenuación que serán ejecutadas en la obra e infraestructuras especializadas con el objetivo de evitar la eutrofización del agua embalsada. Cuando ya entra en funcionamiento el embalse y con el transcurrir del tiempo se genera un grado de eutrofia considerable, se deben adoptar las medidas que buscan corregir esta condición en forma de tratamientos y/o gestión del volumen de agua embalsada como se menciona en la Tabla 7 (27).

**Tabla No. 5.** Niveles y aspectos a considerar para el control de la eutrofización.

<b>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>ASPECTOS A CONSIDERAR</b>
<b>Obras, equipos e infraestructuras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento de aguas residuales que afecten la cuenca aguas arriba del embalse.</li> <li>• Reforestación y restauración</li> </ul>

	<p>hidrológica de la cuenca.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio de las características de las tomas de agua, especialmente la profundidad.</li> <li>• Evaluación del volumen y forma del vaso del embalse.</li> <li>• Diseño de presas para los residuos sólidos.</li> </ul>
<b>Tratamiento previo del futuro vaso de embalse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de toda la materia orgánica posible que consumirá oxígeno por el proceso oxidativo.</li> <li>• Aprovechamiento de recursos inundables tales como el suelo y la vegetación.</li> </ul>
<b>Usos del embalse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso del embalse (producción de energía, suministro de agua, turismo, acuicultura).</li> <li>• Determinación del tiempo de residencia del agua.</li> </ul>
<b>Planificación del primer llenado del embalse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Época del año.</li> <li>• Velocidad de llenado del embalse.</li> <li>• Plan de extracción selectiva de agua a diferentes profundidades dependiendo de la época del año.</li> </ul>
<b>Gestión del tramo aguas abajo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaciados del embalse (totales o parciales).</li> <li>• Reforestación de la ribera.</li> </ul>

- Régimen de caudales de mantenimiento.
- Capacidad de aireación del cauce.

### **3.1. MEDIDAS PREVIAS A LA CONSTRUCCIÓN DEL EMBALSE.**

Dentro de los aspectos a tener en cuenta antes de la construcción de un embalse, Roldan (1) propone:

- Tamaño y forma del embalse.
- Evapotranspiración de la región.
- Clima.
- Suelo y vegetación de la zona de inundación y de toda la cuenca hidrológica.
- Influencia antrópica.
- Impacto económico y social del embalse.

En esta fase las predicciones tienen el objetivo de vislumbrar la respuesta que tendrá todo el nuevo ecosistema a las nuevas condiciones que implica la construcción del embalse. Con este estudio se requiere estimar algunas características importantes del agua como el origen y la carga de nutrientes que llegará al embalse, la dureza del agua, los niveles de oxígeno disuelto así mismo el tiempo de residencia del agua embalsada, tipo de ciclo térmico y estabilidad térmica para así poder definir la disponibilidad y dinámica de los nutrientes. Esto corresponde para el agua embalsada pero igualmente los estudios previos deben

ir enfocados en identificar los posibles efectos del estado trófico del embalse aguas abajo (27) ya que en muchos casos existen asentamientos humanos que se pueden ver seriamente afectados en sus actividades económicas como en general todo el ecosistema que comprende el sistema lótico que continua después del embalse.

### 3.2. CORRECCIÓN DE LA EUTROFIA.

El mantenimiento de niveles de oxígeno en el fondo de los embalse contribuye a retener en el fondo las acumulaciones de nutrientes (especialmente el fósforo), además de evitar la solubilización de hierro y manganeso que entre otros problemas, alteran el color en las aguas potables. También, las medidas de control de la anoxia aumentan el volumen de agua que favorece el desarrollo de vida como los peces y de manera indirecta se disminuye la eutrofización secundaria que aumentaría con la muerte de estos. Así mismo si se aumenta la tasa de renovación del agua se genera una mayor presión de explotación para el fitoplancton, favoreciendo la disminución de la abundancia de esta comunidad y por consiguiente una disminución en el grado de eutrofia (42).

**Tabla No. 6** Medidas para la corrección de la eutrofia.

<b>Tipo de actuación</b>	<b>Nivel de aplicación</b>	<b>Objetivo y actividad</b>
<b>Gestión</b>	Cuenca tributaria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento de aguas residuales.</li> <li>• Desviación de algunos tributarios.</li> <li>• Control de la contaminación de actividades agrícolas y ganaderas.</li> <li>• Reforestación y restauración de la calidad del agua.</li> </ul>

<b>Gestión</b>	Agua embalsada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación entre el nivel del de embalse y el tiempo de residencia del agua.</li> <li>• Programación de vaciados periódicos.</li> <li>• Aireación artificial del hipolimnion.</li> <li>• Medidas para favorecer la mezcla de la columna de agua.</li> </ul>
	Comunidades acuáticas del embalse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomanipulación y modificación de la estructura trófica.</li> <li>• Manejo de residuos y filtros para las comunidades productoras.</li> </ul>
	Agua y comunidades río abajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aireación en las salidas de agua.</li> <li>• Aumento de la capacidad de aireación del cauce.</li> <li>• Régimen de caudales de mantenimiento.</li> </ul>
<b>Tratamiento</b>	Agua embalsada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Floculantes y precipitantes.</li> <li>• Oxidantes.</li> </ul>
	Sedimentos del embalse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secado y aireación mecánica.</li> <li>• Extracción.</li> <li>• Oxidación.</li> </ul>
	Comunidades acuáticas del embalse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extracción mecánica.</li> <li>• Alguicidas y desinfectantes.</li> <li>• Productos químicos –biológicos.</li> </ul>

Al descender la abundancia de las comunidades productoras presentes en un embalse con indicios de eutrofización, se disminuye la sedimentación de una gran cantidad de la materia orgánica y la demanda de oxígeno en el fondo también disminuye. Este proceso de disminuir constantemente las comunidades productoras se puede realizar con la construcción de torres de toma de agua que

se encuentren a diferentes profundidades y de esta forma se seleccionan en diferentes momentos la capa de agua más interesante (42).

Según Braga et al (29) algunas medidas para controlar los problemas de exceso de productividad en los embalses implican:

1) Control en los tiempos de retención.

El control del flujo del agua es una herramienta con la cual los cambios en los tiempos de retención generan grandes cambios en la composición de fitoplancton. Esta medida, por ejemplo, puede ser muy efectiva contra los afloramiento de algas verde azules, las cuales se reproducen en periodos de alta temperatura, alta disponibilidad de nutrientes y estabilidad en la columna de agua. Estos afloramientos al final generan una gran liberación de toxinas al agua que podría ser evitado al manejar diferentes tiempos de retención para retirar estas masas de cianofíceas o en general de cualquier afloramiento de microalgas.

2) Control del nivel de entrada de agua.

Este control hace relación al nivel en el cual el agua es tomada por las turbinas y su importancia radica en la influencia sobre las comunidades y la calidad del agua. Cuando el agua de la superficie es tomada, la comunidad fitoplanctonica es removida y por otro lado si se toma de las profundidades se retira agua rica en nutrientes (especialmente fósforo y nitrógeno) y con una gran cantidad de materia orgánica en suspensión.

Uno de los problemas de los embalses es que generalmente tienen una toma de agua con un nivel fijo, por lo cual para el control de la eutrofización deben ser construidas las tomas en al menos dos niveles, uno cerca de la superficie y otro cerca del fondo.

### 3) Biomanipulación.

Debido a que en los embalses como cualquier ecosistema acuático se da una cadena trófica de organismos productores y consumidores, se pueden aprovechar o favorecer estas interrelaciones para controlar una determinada comunidad. Por ejemplo, la manipulación de la comunidad íctica de un embalse puede generar cierto control sobre la biomasa fitoplanctónica y por lo tanto cambios en la calidad del agua. Así mismo esto puede ser aplicado para otros organismos consumidores que reduzcan la abundancia de los productores primarios y por lo tanto se reduzca el proceso de eutrofización.

Otras medidas según Ostojic et al. (4) implican:

- Reducción de afluentes urbanos, industriales y agrícolas.
- Tratamiento de aguas residuales.
- Control sobre el uso de las tierras que se encuentran cercanas al embalse.
- Protección de la vegetación alrededor del embalse, principalmente de actividades como ganadería, construcciones y contaminación generada por actividades turísticas.
- Restricción en el uso de fertilizantes y pesticidas aunado a la difusión de alternativas ecológicas.
- Educación ecológica acerca del daño que causan algunas prácticas humanas relacionadas con los embalses.

#### 4. CONCLUSIONES

- ❖ En cuanto al proceso biológico que se genera con la eutrofización de un embalse, éste presenta las características generales de la eutrofización en los sistemas lénticos con una reducción de la biodiversidad y un aumento del número de organismos de las especies productoras más eficaces para las nuevas condiciones.
- ❖ La desoxigenación es una de las consecuencias más drásticas y a la vez realimentadoras del proceso de eutrofización ya que causa la muerte de una gran cantidad de organismos consumidores especialmente peces y además reduce cada vez más la capacidad para la degradación de la materia orgánica que aumenta exponencialmente.
- ❖ El objetivo principal de los planes de manejo ambiental para los embalses debe hacer énfasis en la ejecución de medidas preventivas que aunque impliquen costos inmediatos, sus beneficios se reflejan a largo plazo al ampliar la vida útil de los embalses y evitar la aplicación de medidas correctivas que son más costosas, tienen mayor probabilidad de fracaso y pueden generar mayores alteraciones en el ecosistema como ocurre con la biomanipulación.
- ❖ Al ser la construcción de embalses una opción para la generación de energía sin combustibles fósiles, esta alternativa ecológica en dicho sentido no debe convertirse en una fuente de alteración y degradación de los ecosistemas acuáticos y terrestres relacionados con estas construcciones.

## 5. RECOMENDACIONES

- ❖ Una gran cantidad de información acerca de las características particulares de cada embalse se encuentran a manera de informes en los archivos de las empresas que tiene adjudicados el manejo de los embalses por lo cual dichos datos de monitoreos pueden ser una herramienta fundamental para avizorar la tendencia trófica de los embalses en Colombia.
- ❖ La construcción de los embalses de Hidrosogamoso y Tona son una gran oportunidad para la profundización en el conocimiento del proceso inicial que se da en los embalses para la degradación de la gran cantidad de materia orgánica que queda en la zona inundada. Las medidas tomadas inicialmente para su construcción pueden ser relacionadas con la dinámica que estos embalses presenten al entrar en funcionamiento enriqueciendo los datos para casos particulares de nuestra región.
- ❖ Solo la socialización y apropiación de la información científica relacionada con la eutrofización de los embalses, sus consecuencias, planes de manejo y corrección por parte de la comunidad en general, permitirá que se realice una verdadera veeduría ciudadana que permita alertar posibles daños sociales y ambientales que puede acarrear la eutrofización del agua embalsada y en los ecosistemas de la zona de aguas abajo.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) ROLDAN, G. & RAMIREZ, J., 1992. *Fundamentos de limnología neotropical*, Universidad de Antioquia, 2ª Ed., 111 – 140.
- (2) ROLDÁN, G., 2003. *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*, Universidad de Antioquia, 20.
- (3) SANCHEZ, O., HERZIG, M., RECAGNO, E., MARQUEZ-HUITZIL, R. & ZAMBRANO, L., 2007. *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*, Instituto Nacional de Ecología, 29 – 32.
- (4) OSTOJIC, A., CURCIC, S., COMIC, L. & TOPUZOVIC, M., 2007. *Effects of anthropogenic influences on the trophic status of two water supply reservoirs in Serbia*, Lakes & Reservoirs, 12, 175 – 185.
- (5) RAMIREZ, J. & ALCARAZ, H., 2002. *Dinámica de la producción primaria fitoplanctonica en un sistema eutrófico tropical: laguna del parque norte, Medellín, Colombia*, Caldasia, 24, 411 - 423.
- (6) FRAILE, H., ORIVE, E. & POZO, J., 1995. *Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (río Tera, Zamora)*, Limnética, 11, 29 – 37.
- (7) CARLSON, R. & Simpson, J., 1996. *A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods*, North American Lake Management Society, 96.
- (8) WETZEL, R., 1981. *Limnología*. Omega, Barcelona, 679 pp.

- (9) JUNK, W.& WANTZEN, K., 2004. *The Flood Pulse Concept: new aspects, approaches, and applications – an update*, Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries, Food and Agriculture Organization & Mekong River Commission, 117–149.
- (10) PAERL, H., DYBLE, J., MOISANDER, P., NOBLE, R., PIEHLER, M., PINCKNEY, J., STEPPE, T., TWOMEY, L. & VALDES, L., 2003. *Microbial indicators of aquatic ecosystem change: current applications to eutrophication studies*. FEMS Microbiology Ecology, 46, 233 – 246.
- (11) Pinilla, A., 2000. *Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia*, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 11 – 13p, 68 p.
- (12) SIGEE, D., 2005. *Freshwater Microbiology*, John Wiley & Sons, 287 – 291.
- (13) WEHR, J. & SHEATH, R., 2003. *Freshwater Algae of North America*. Academic Press, 1 – 9.
- (14) CANOSA, A & PINILLA, G., 2006. *Relaciones entre las abundancias del bacterioplancton y del fitoplancton en tres ecosistemas lénticos de los Andes Colombianos*, Biol. Trop. 55, 135-146.
- 15) BELLINGER, B., COCQUYT, C. & O'REILLY, C., 2006. *Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams*, Hydrobiologia, 573, 75 – 87.
- (16) LAMPERT, W. & SOMMER, U., 2007. *Limnoecology: The ecology of Lakes and Streams*, 2ª Ed. Oxford University Press, 222 – 223.

- (17) TIMM, H., MOLS, T. & TIMM, T., 2006. *Effects of long-term non-point eutrophication on the abundance and biomass of macrozoobenthos in small lakes of Estonia*, Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol, 55, 3, 187 – 198.
- (18) MARGALEF, R., 1983. *Limnología*, Omega, 831 – 871.
- (19) WETZEL, R., 1981. *Limnología*. Omega, Barcelona, 679 pp.
- (20) WELCH, E & LINDELL, T., 1992. *Ecological effects of wastewater. Applied limnology and pollutant effects*, Cambridge University Press, 188 - 199.
- (21) EGERTSON, C., KOPASKA, J. & DOWNING, J., 2004. *A century of change in macrophyte abundance and composition in response to agricultural eutrophication*, Hydrobiologia, 524, 145 – 156.
- (22) PERALTA, P. & LEÓN, J., 2006. *Estudios de caracterización limnológica de los embalses de la provincia de Mendoza*, Departamento General de irrigación, 9 – 14.
- (23) MOSCHINI-C, V., 1999. *Importância, estrutura e dinâmica da comunidade periférica nos ecossistemas aquáticos continentais*, Perspectivas na Limnología do Brasil. Sao Luis, Ed. Unaiao. 91-103
- (24) BARBOUR, M., Gerritsen, J., Snyder, B., & Stribling, J., 1999. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Wadeable Streams and Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish*, United States Environmental Protection Agency, Washington, 2ª Ed, 6.1 – 6.22.
- (25) JUNK, W., 1997. *The Central Amazon Floodplain*, Springer, 147–186.

- (26) THORNTON, W., 1990. *Reservoir limnology: ecological perspectives*, Wiley, 9, 239.
- (27) PALAU, A., 2003. *Medidas de gestión y adecuación ambiental de embalses frente a la eutrofia*, *Limnética*, 22, 1-13.
- (28) NIXON, S., 2009. *Eutrophication and the macroscope*, *Hydrobiologia*, 629, 5 – 19.
- (29) BRAGA, B., ROCHA, O. & TUNDISI, J., 1998. *Dams and the Environment: the Brazilian Experience*, *Water resources development*, 14, 127 – 140.
- (30) FONTÚRBEL, F., 2005. *Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del lago Titikaka (Bolivia)*, *Ecología aplicada*, 4, 135-141.
- (31) AGRAWAL, S., 1999. *Limnology*, APH, 5.
- (32) PINTO-COELHO, R., 1998. *Effects of eutrophication on seasonal patterns of mesozooplankton in a tropical reservoir: a 4-year study in Pampulha Lake, Brazil*, *Freshwater Biology*, 40, 159 – 173.
- (33) SMOLDERS, A., LAMERS, L., LUCASSEN, E., VAN DER VELDE, G. & ROELOFS, J., 2006. *Internal eutrophication: How it works and what to do about it – a review*, *Chemistry and ecology*, 22, 93 – 111
- (34) LOZANO, E., DOMÍNGEZ, M., VILCHEZ, C., MIGUEL, R. & COSTA, C., 2008. *Cianoalerta: estrategia para predecir el desarrollo de cianobacterias tóxicas en embalses*, *Ecosistemas*, 17, 37 – 45.

- (35) CAMARGO, J., ALONSO, A. & DE LA PUENTE, M., 2005. *Eutrophication downstream from small reservoirs in mountain rivers of Central Spain*. *Water research*, 39, 3376 – 3384.
- (36) JUÁREZ, P. & FARSI, E. 1993. *Avances en el manejo y aprovechamiento acuícola de Embalses en América Latina y el Caribe. Apoyo a las Actividades Regionales de Acuicultura para América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, <http://www.fao.org>.
- (37) HERNANI, A. & RAMÍREZ, J., 2002. *Aspectos morfométricos y teóricos de un embalse tropical de alta montaña: represa La Fé, El Retiro, Colombia*, *Rev. Acad. Colom. Cienc.*, 26: 511 – 518.
- (38) AGUIRRE, N., PALACIO, J. & RAMIREZ, J., 2007. *Características limnológicas del embalse El Peñol-Guatapé, Colombia*, *Revista Ingenierías, Universidad de Medellín*, 6, 53-66.
- (39) CUELLAR, W., 2009. *Calidad del agua en embalses de EPM, retos y oportunidades. Caso de estudio: Embalses de Río grande II y Porce II, Antioquia – Colombia*. Ponencia, IV Congreso Iberoamericano sobre desarrollo y ambiente.
- (40) PARRA, O., 1989. *La eutrofización de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio*, *Amb. Y Des.*, 1, 11 – 136.
- (41) MARTINO, P., 1989. *Curso básico sobre eutrofización*. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencia del ambiente, 5 – 16.
- (42) TOJA, J., 1982. *Control de la eutrofia en embalses por la utilización selectiva de agua a distintas profundidades*, *Revista de obras públicas*, 223 – 231