

Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia)*

Eutrophication risk assessment of the El Quimbo water reservoir, Huila (Colombia)*

Avaliação do risco de eutroficação da embalagem El Quimbo, Huila (Colômbia)*

Alfredo Ramos Moreno**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Colombia

Fecha de Recibido: Julio 12 de 2017
Fecha de Aceptación: Marzo 13 de 2018
Fecha de Publicación: Abril 01 de 2018
DOI: <http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v10i2.461>

* Artículo resultado de investigación del Análisis de riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, departamento del Huila (Colombia).

** Doctoral Degree in Hydrology Environmental Engineering, Master Scientae in Hydrology and Hydraulic Environmental Engineering, Magister Ecología y Gestión de Ecosistemas Estratégicos. Docente Investigador. Ingeniero Agrícola - Enfoque en Suelos Aguas. Director Grupo de Investigación GIGABE. Filiación; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. UPTC - Tunja. aramoshas@hotmail.com, alfredo.ramos@uptc.edu.co Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-2707-4726>

Resumen

La evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo que está localizado al sur del

departamento del Huila entre las cordilleras Central y Oriental, sobre la cuenca alta del río Magdalena, al sur del embalse de Betania, en jurisdicción de los municipios de Tesalia, Paicol, Garzón, Gigante, El Agrado y Altamira, se hizo mediante el desarrollo del modelo matemático simplificado para la evaluación de estados tróficos y el manejo de macronutrientes en lagos/embalses cálidos tropicales (LACAT), desarrollado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 2001).

Las fuentes de fósforo que llegan al embalse El Quimbo fueron consideradas y cuantificadas a partir de las aguas residuales generadas en los municipios establecidos en la zona de influencia, los residuos o desechos sólidos de origen municipal y los provenientes de la población dispersa, el

estiércol de los animales, la escorrentía superficial y la biomasa en el área de inundación. Los resultados obtenidos muestran que para la fase de llenado del embalse es conveniente remover el material en el vaso del embalse y deforestar, al menos, el 22,4 % de la biomasa en el área de inundación. Durante la fase de operación se demuestra un cambio en la condición trófica del embalse a partir del año 20 del horizonte del proyecto, de mesotrófico a eutrófico, debido a la acumulación de fósforo en el embalse.

La cuantificación de la magnitud del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo se considera como significativa (-2) hasta el año 10, y luego como leve (-1). Entre las conclusiones se destaca la necesidad de evitar la acumulación de fósforo en el embalse, mediante la implementación de sistemas de depuración de aguas residuales que contemplen remoción de fósforo y de sistemas integrados para el manejo de los residuos sólidos y los efluentes líquidos en las actividades agropecuarias de los municipios cercanos en la zona de influencia del embalse. Este presenta unos valores de clorofila entre 64 a 138 ug/l que evidencia su estado eutrófico.

Palabras clave: Embalse, Riesgo de eutrofización, Estado trófico, Aguas residuales, Magnitud del riesgo.

Abstract

The assessment of the eutrophication risk of El Quimbo water reservoir located in south of the department of Huila between the Central and Eastern Ranges on the upper basin of the Magdalena River, south of the Betania water reservoir, in the jurisdiction of the municipalities of Tesalia, Paicol, Garzón, Gigante, El Agrado and Altamira, is presented through the implementation of the simplified mathematical model for the evaluation of trophic status and management of macronutrients in tropical warm lakes / reservoirs (LACAT), developed by the Pan American Center for Sanitary Engineering and Environment Sciences (CEPIS, 2001).

As sources of phosphorus that reach the El Quimbo reservoir were considered and quantified from the wastewater generated in the municipalities

established in area of influence, solid waste or municipal waste and those from the dispersed population, animals manure, surface runoff and biomass in the flood area.

The results show that for the filling phase of the reservoir it is advisable to remove the material in the reservoir vessel and deforest at least 22,4 % of the biomass in the flood area. During the operation phase a change in the trophic condition of the reservoir is shown from year 20 of the project horizon, from mesotrophic to eutrophic, due to the accumulation of phosphorus in the reservoir.

The quantification of the magnitude of El Quimbo water reservoir eutrophication risk is considered as significant (-2) until year 10, and then as slight (-1). The conclusions highlight the need to avoid the accumulation of phosphorus in the reservoir, through the implementation of wastewater treatment systems that include removal of phosphorus and integrated systems for the management of solid waste and liquid effluents in activities agricultural areas of the nearby municipalities in the buffer zone of the reservoir. This presents values of chlorophyll between 64 and 138 ug / l, which shows its eutrophic state.

Keywords: Water reservoir, Eutrophication risk, Trophic status, Waste water, Magnitude of risk.

Resumo

A avaliação de risco de eutrofização do reservatório El Quimbo, que está localizado ao sul do departamento de Huila entre Central e Cordilheira Oriental, na bacia superior do rio Magdalena, sul do reservatório de Betânia, na jurisdição dos municípios de Tessália, paicol Garzon, Gigante, agradabilidade e Altamira, através do desenvolvimento do procedimento simplificado para a avaliação do estado trófico ea gestão de macronutrientes em lagos / quentes reservatórios tropicais (Lacat) modelo matemático, desenvolvido pelo Centro Pan-americano de Engenharia Sanitária e Ciência Meio Ambiente (CEPIS, 2001).

Fontes de fósforo que alcançam o reservatório El Quimbo foram considerados e quantificados a partir de águas residuais produzidas nos municípios

establecidos en la zona de influencia, residuos o residuos sólidos a partir de fuentes municipales y de la población dispersa, estruero animal, escurrimiento superficial y biomasa en la zona de inundación. Los resultados obtenidos muestran que, para la fase de llenado del reservorio, es conveniente eliminar el material en el reservorio y desflorestar al menos 22,4 % de la biomasa en la zona inundada. Durante el cambio de fase de operación en el estado trófico del reservorio a partir del horizonte del proyecto, mesotrófico para eutrófico 20 años, debido al acumulo de fósforo en el reservorio es demostrado.

La cuantificación de la magnitud del riesgo de eutrofización del reservorio de El Quimbo es considerada significativa (-2) hasta el año 10 e, en seguida, como ligera (-1). Entre las conclusiones la necesidad de evitar el acumulo de fósforo en el reservorio, por sistemas de tratamiento de aguas residuales que incluyen la remoción de fósforo y sistemas integrados para la gestión de residuos sólidos y efluentes líquidos en las actividades destacadas implementación actividades agrícolas de los municipios vecinos en la zona de influencia del reservorio. Esto presenta valores de clorofila entre 64 a 138 $\mu\text{g} / \text{l}$ que evidencian su estado eutrófico.

Palabras-clave: Reservorio, Riesgo de eutrofización, Estado trófico, Aguas residuales, Magnitud del riesgo.

Introducción

El término eutrofia procede del adjetivo alemán "eutrophe" y se refiere a "rico en nutrientes". La eutrofización se define como el enriquecimiento de las aguas con nutrientes a un ritmo tal que no puede ser compensado por eliminación o mineralización total (CEPIS-OPS, 1989). Una de sus principales manifestaciones es la proliferación de algas y macrófitos en función de la carga de nutrientes. Naumann (citado por Wetzel, 2001) introdujo los conceptos de oligotropía y eutrofia y los distinguió en base a las poblaciones fitoplanctónicas. Luego de un gran número de estudios limnológicos se han ocupado de definir las características de los distintos tipos y subtipos de lagos.

A nivel de limnología, los cuerpos de agua se pueden clasificar de forma simplificada en tres tipos:

- Oligotróficos: sistemas acuáticos de bajo contenido de nutrientes y producción vegetal mínima.
- Eutróficos: sistemas acuáticos de alto contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva.
- Mesotróficos: sistemas acuáticos con características intermedias de oligotrófico y eutrófico.

En el caso de eutrofización o fertilización excesiva se dice de una regresión hacia el estado de equilibrio. El avance de este proceso es alto y se han encontrado relaciones estrechas, entre el aumento de la población humana y los índices de eutrofización (Margalef, 1986).

La eutrofización consiste en un desarrollo excesivo de algas en una masa de agua superficial estancada que origina una alteración de sus características fisicoquímicas iniciales. Los responsables de este fenómeno son principalmente los nutrientes para los organismos vegetales, que ven incrementada continuamente su concentración en las aguas continentales como consecuencia de los vertidos de aguas residuales provenientes de actividades antrópicas (Villaseñor, 2001). Este proceso resulta del aumento de nutrientes limitantes, principalmente nitratos y fosfatos que proporcionan un desarrollo exagerado de fitoplancton y plantas acuáticas (Roldán & Ramírez, 2008).

El concepto de nutriente limitante se fundamenta en el supuesto de que para una determinada estequiometría celular de las plantas acuáticas, el nutriente que controlará la máxima cantidad de biomasa vegetal es aquel que primero se consume o que alcanza un mínimo antes que los demás nutrientes involucrados en la estequiometría. CEPIS (2001) y Salas & Martino (1991) consideran que relaciones de nitrógeno (N) a fósforo (P) en embalses y lagos tropicales superiores a 9:1 son potencialmente limitados por P.

El explosivo crecimiento demográfico en América Latina y el Caribe durante los últimos años, con el consecuente aumento en la demanda de recursos de agua ha acelerado la construcción de embalses artificiales para múltiples usos en abastecimientos de agua potable e industrial, para irrigación y para energía hidroeléctrica (CEPIS, 2001).

Los embalses construidos sobre las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca y la altiplanicie de Cundinamarca-Boyacá tienen como fin la generación de energía eléctrica. Estos presentan grandes volúmenes de agua que contienen sistemas ecológicos con tensores asociados a la eutrofización, pero el conocimiento de estos procesos es limitado. Los problemas de eutrofización a menudo inhabilitan el embalse para la recreación y la pesca, incluso para la preservación de flora y fauna al presentar aguas acidificadas, con metano y hierro soluble, las cuales se vuelven tóxicas, llegando a afectar la biota en los cauces de ríos y quebradas receptoras de sus vertimientos (Ramos, 2015).

Los estudios fisicoquímicos muestran altas variaciones en los parámetros de condiciones asociadas a eutrofización; estudios de perfiles de oxígeno en diferentes embalses muestran desde curvas ortógradas hasta fuertemente clinógradas, indicando agotamiento de oxígeno a los 10 m de profundidad (Roldan, 1992).

Los sistemas hídricos loticos (ríos, quebradas, manantiales) como los lenticos (lagos, estanques, embalses) y las zonas de estuarios, sufren procesos de eutrofización cuando sus aguas se enriquecen en nutrientes. El problema radica en que si hay exceso de nutrientes, crecen en abundancia las plantas y otros organismos. Posteriormente cuando estos mueren, se descomponen y se degradan conllevando a la explosión poblacional de bacterias. Esta situación aumenta la demanda del oxígeno disuelto, modificando negativamente la calidad del agua. Como consecuencia de ello, las aguas dejan de ser aptas para el normal desarrollo y distribución

de la mayor parte de la biota acuática, y como eventual resultado final, el ecosistema acuático modifica sus funciones y procesos ecológicos normales (Abbot et al., 1986).

En el Plan Nacional de Desarrollo (PND - 2010-2014) establece que las estrategias de conservación tienen como finalidad la protección de la diversidad biológica y la provisión de los servicios ecosistémicos que sustentan y contribuyen al bienestar humano y por consiguiente a sus procesos de desarrollo y crecimiento económico.¹

Los páramos, bosques, humedales y sabanas naturales son altamente vulnerables a las demandas generadas por macroproyectos agrícolas, viales y minero-energéticos, entre otros, ocasionando la transformación y fragmentación de ecosistemas, exacerbando la deforestación², aumentando el número de especies en condiciones de amenaza, alterando el recurso hídrico y degradando el suelo. Asimismo, la legislación prohíbe para algunos casos adelantar actividades mineras³ y cultivos forestales o sistemas agroforestales con fines comerciales⁴ en áreas de importancia ecológica y áreas protegidas.

La vida útil del embalse está proyectada en 50 años para que opere la central hidroeléctrica El Quimbo, (con una altura máxima de 75 metros, para generar 200 Mw/h, disponer de agua por gravedad para más de 60.000 hectáreas para múltiples propósitos. Los alcantarillados de los municipios afectados por la inundación generada por el embalse (Gigante, Garzón, La Jagua e inspecciones) se verían inutilizables porque el punto de descarga de las aguas residuales o domésticas que actualmente se hace sobre el Río Magdalena, cambiaría una vez llenado el futuro embalse (INGETEC, 2008).

Desde que inició el llenado del embalse El Quimbo el 30 de junio de 2015, la Corporación Autónoma del Alto Magdalena (CAM) advirtió que había fallas en el retiro del material vegetal. La Corte Constitucional ratificó esta información señalando que EMGESA debía retirar 210.449 metros cúbicos

¹ DNP (2010). Bases del plan nacional de desarrollo 2010-2014, capítulo 7 pág. 426

² La deforestación promedio anual estimada para el período 2.000 - 2.007 es de 336.581 ha/año (IDEAM, 2010a:113).

³ El artículo 7 de Ley 1377 de 2010, excluye estas actividades en bosques naturales, páramos, manglares, humedales, áreas forestales protectoras, áreas de manejo especial o cualquier otra

categoría de manejo, conservación o protección que excluya dicha actividad.

⁴ El artículo 34 de la Ley 1382 de 2010, establece como zonas de exclusión minera a las áreas que integran el sistema de parques nacionales naturales, parques naturales de carácter regional, zonas de reserva forestal protectora y demás zonas de reserva forestal, páramos y humedales.

de madera. Sin embargo, según la CAM solo se retiraron 165.975 metros cúbicos.⁵

Con este artículo se propone una metodología a nivel de planificación para la evaluación de los impactos ambientales potenciales derivados del llenado y la operación de un embalse sobre el recurso hídrico, esta investigación ha considerado para la predicción del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, la aplicación del Modelo LACAT de CEPIS, a partir de experiencias en estudios e investigaciones desarrolladas en los últimos 10 años a nivel nacional. Además de criterios y procedimientos que permiten cuantificar los aportes de fósforo total de la vegetación del vaso⁶ del embalse, así como los aportes de fósforo total anual por asentamientos humanos, vertederos de basuras y actividades agropecuarias localizados en la zona de influencia del embalse.

Materiales y Métodos

El embalse El Quimbo se encuentra localizado al sur del departamento del Huila entre las cordilleras Central y Oriental, sobre la cuenca alta del río Magdalena, al sur del embalse de Betania, en jurisdicción de los municipios de Tesalia, Paicol, Garzón, Gigante, El Agrado y Altamira (Figura 1). El llenado del embalse se inició el 30 de junio de 2015 y entró en operación el 10 de enero de 2016.⁷

El embalse presenta una longitud de 55 km al nivel máximo normal de operación (cota 720 msnm), un ancho máximo de 4 km y un ancho promedio de 1,4 km. El área de inundación es de 8.250 hectáreas, el volumen total de embalse de 3.205 hm³ y el volumen útil de almacenamiento útil de 1.824 hm³. El sitio de ubicación de la presa del proyecto hidroeléctrico El Quimbo se encuentra dentro del cañón que formó el río Magdalena al filo rocoso de la Formación Gualanday Superior, 1300 m aguas arriba de la confluencia de los ríos Magdalena y Páez. El acceso se hace por la carretera que de Neiva

conduce a Gigante y Garzón, 15 km al sur del municipio de Hobo se desprende la vía a la Plata, la cual atraviesa el río Magdalena en el Puente El Colegio, aproximadamente 35 km aguas arriba del sitio de presa de Betania.⁸

Para el análisis del riesgo de eutrofización del embalse El quimbo se definió dos áreas de influencia:

Área de Influencia Directa (AID)⁹: comprende el vaso del embalse y las zonas de obras de la hidroeléctrica, se incluye dentro del área de influencia directa el río Magdalena aguas abajo del sitio de presa y el embalse de Betania, desde el punto de vista de calidad de aguas, aspecto que es analizado como impacto potencial del proyecto, durante el llenado y operación (Figura 1).

Área de Influencia Indirecta (AI)¹⁰: comprende la cuenca tributaria directa del embalse, que incluye las microcuencas de las quebradas, por la margen izquierda: Los Cocos, Las Guaduas, El Cedro, El Hueco, Zanjón el Alto, El Pedroso, Zanjón Algarrobo, Zanjón La Cascajosa, El Granadillo, La Turbia, Zanjón de la Mosca, Quebrada El Limón hasta la cota 900 msnm, Quebrada Yaguilga hasta la cota 800 msnm, Zanjón El Altillo, Quebrada La Seca hasta la cota 800 msnm, Zanjón El Palmar, El Río Magdalena hasta la confluencia con la Quebrada Lagunillas hasta la cota 800 msnm y el Río Páez hasta la confluencia con la Quebrada El Espinal; por la margen derecha: El Río Suaza hasta la cota 800 msnm, la Quebrada Aguacaliente hasta la cota 1000 msnm, Quebrada Las Damas, La Quebrada de Garzón, La Quebrada de Majo, Quebrada Jaquillo, Quebrada Voltezuela, Ríoloro hasta la cota 1000 msnm, La Quebrada Alonso Sánchez hasta la cota 1000 msnm, El Zanjón de la Barrialosa, La Quebrada La Honda hasta la cota 1000 msnm, la Quebrada Guandinosa hasta la cota 1000 msnm y una franja de 500 metros a lado y lado

⁵ <http://www.elcolombiano.com/colombia/los-lios-ambientales-que-tiene-el-quimbo-DH3382216>

⁶ Vaso: concavidad por debajo del máximo nivel de las aguas a contener por un embalse y determina la capacidad de almacenamiento de este.

⁷

http://www.emgesa.com.co/ES/PRENSA/COMUNICADOS/Paginas/Emgesainici%C3%B3llenadodel_embalsedeelQuimbo.aspx

<http://www.emgesa.com.co/ES/PRENSA/COMUNICADOS/Paginas/Hidroel%C3%A9ctricaElQuimbooperaconnormalidaddurantesurrimeras24horasdereinicio.aspx>

⁸ INGETEC S.A. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Rev. 2 – Octubre, 2008.

C/QUIMBO/EIAQ-08.doc.gc,

⁹ Ibidem.

¹⁰ Ibidem.

del Río Magdalena, desde el sitio de presa hasta la Quebrada Puerto Seco (Figura 1).

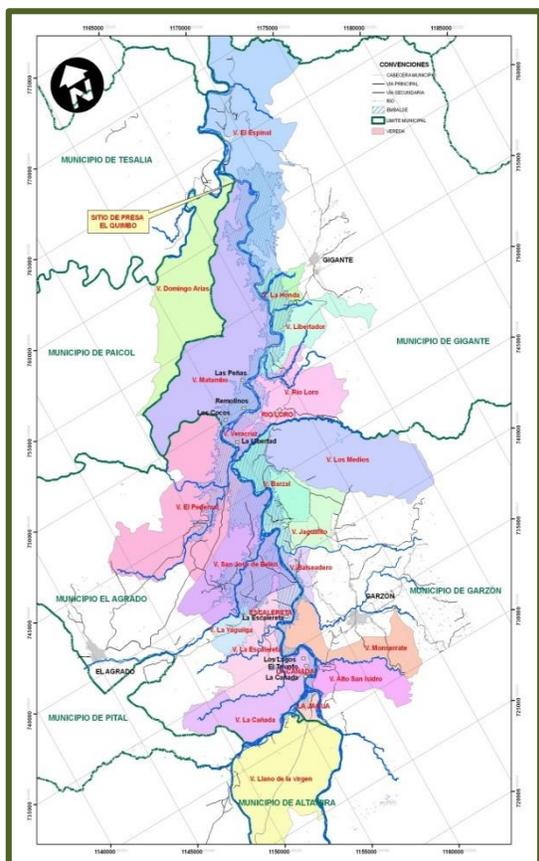


Figura 1. Ubicación geográfica de los municipios y afluentes tributarios en la zona de influencia del embalse El Quimbo. Fuente: INGETEC S.A. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Rev. 3 - Marzo, 2008. C/QUIMBO/EIAQ-07.doc.gc. Figura 3.4.-2 Unidades territoriales asociadas al proyecto.

El estado trófico de un embalse o lago debe tener un dato comparativo con otros sistemas que utilizan índices del estado trófico calculados en base a diferentes parámetros. Un tipo de evaluación del estado trófico se basa en comparar los datos obtenidos experimentalmente con unos valores fijos propuestos para cada rango (tabla 1).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982) adelantó investigaciones sobre las relaciones cuantitativas de nutrientes y la

eutrofización ocasionada por estas cargas en lagos y embalses; una de las clasificaciones (Janus y Vollenweider, 1981; OCDE, 1982) que propusieron para determinar los diferentes estados tróficos se basa en variables de fácil medición (Beltran y Rangel, 2012-2013). Otro método para evaluar el estado trófico es el índice de Carlson (1996), que utiliza como variables los valores medios anuales de la profundidad de visión del disco de Secchi y de las concentraciones superficiales de TP y de clorofila 'a'.

Tabla 1. Valores límites de la OCDE de clasificación trófica

Categoría Trófica	Fósforo Total (TP) (mg/m ³)	Chl Media	Chl Máxima	Media Secchi	Mínimo Secchi
Ultraoligotrófico	< 4.0	< 1.0	< 2.5	> 12.0	> 6.0
Oligotrófico	< 10.0	< 2.5	< 8.0	> 6.0	> 3.0
Mesotrófico	10.0 - 35.0	2.8 - 8.0	8.0 - 25.0	6.0 - 3.0	3.0 - 1.5
Eutrófico	35.0 - 100.0	8.0 - 25.0	25.0 - 75.0	3.0 - 1.5	1.5 - 0.7
Hipereutrófico	> 100.0	> 25.0	> 75.0	< 1.5	< 0.7

Nota:
 TP: media anual de la concentración de fósforo total en el lago o embalse (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).

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 (Janus, 198) (Tabla 2).

Generalmente los embalses ubicados a una mayor altitud (altiplanicie de Cundinamarca – Boyacá) presentan propiedades de sistemas oligotróficos y los que están hacia el nivel del mar (Cuenca alta y baja de los ríos Magdalena y Cauca, Llanos Orientales, Sinú y San Jorge) se favorecen las condiciones eutróficas (Ramos 2010, 2013, 2015).

Tabla 2. Características del estado trófico (embalse o lago)

Factor	Sistema Oligotrófico
Nutrientes	Bajas concentraciones; dinámica lenta.
Oxígeno disuelto	Poca fluctuación día - noche; alta disponibilidad tanto en la superficie como en el fondo.
Comunidades	Poca biomasa; alta diversidad
Transparencia	Alta; zona eufótica profunda.
Morfometría	Poca intervención en cuerpos de agua de alta montaña.
Apariencia	Aguas claras y limpias, no se observan grandes masas de microalgas o vegetación acuática.

Fuente: Janus L, Vollenweider R. The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Canadian Contribution, summary report. Natural Water Research Institute Scientific. Serie 131, 1981.

Para establecer el estado trófico de un embalse o lago y poder realizar comparaciones con el estado de otros ecosistemas acuáticos se utilizan índices calculados con base en diferentes variables y parámetros. Una herramienta es el Índice de Estado Trófico (TSI) de Carlson, que utiliza tres variables que representan de manera indirecta la biomasa de algas: clorofilas, profundidad de Secchi y el fósforo total, que se calculan con las siguientes ecuaciones:

Disco 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 entre 0 que es el extremo de baja productividad (estado oligotrófico) y 100 que es el de mayor productividad (estado trófico), con un valor ajustado medio de 50 (mesotrofia).

Modelo matemático LACAT

El modelo LACAT desarrollado por CEPIS (2001), se basa en el fósforo (P) como nutriente limitante, para la evaluación de estados tróficos y el manejo de macronutrientes en lagos/embalses tropicales. La Tabla 1 presenta una clasificación de la categoría trófica de los lagos o embalses basada en la relación entre la concentración de P que ingresa y el tiempo de residencia del agua.

El LACAT predice la respuesta trófica de lagos / embalses tropicales a cambios en la concentración de fósforo total, basado en dos tipos de relaciones:

a. La ecuación de balance de masa:

$$P\lambda = L (P) / Z [(1/Tw) + Ks] \quad (1)$$

donde:

$P\lambda$: concentración de fósforo total (mg/l)
 $L(P)$: carga superficial de fósforo por año ($g\ m^2 / año$)
 Z : profundidad media del embalse (m)
 Tw : tiempo de retención en años (a)
 Ks : tasa de pérdida global de fósforo total por año (1/año)

b. Ecuaciones totalmente empíricas desarrolladas aplicando análisis de regresión lineal múltiple:

$$P\lambda = f [L (P) Tw Z] \quad (2)$$

$$P\lambda = CONS L (P)^A Tw^B Z^C \quad (3)$$

donde: CONS, A, B y C son constantes.

La ecuación de regresión múltiple para fósforo total producto de una regresión "Stepwise", con todas las variables independientes disponibles es:

$$P\lambda = 0.29 * L * p^{0.891} * Tw^{0.676} * Z^{-0.934} \quad (4)$$

Con $r^2=0.902$ (Coeficiente de correlación);

SE=0.044 (Error Estimado); N=39 (datos)

El sistema CEPIS de clasificación trófica para el fósforo total se aplicó a los lagos africanos y se comparó con las clasificaciones de estado trófico reportadas por los investigadores africanos. La concordancia general de las categorías reportadas con aquellas estimadas se confirmó la capacidad predictiva del modelo LACAT y del sistema CEPIS, y por lo tanto su utilidad como una herramienta de predicción para determinar el estado trófico del embalse El Quimbo ubicado en la zona de bosque seco tropical (bs-T).

El cálculo del factor carga del fósforo (P) que llega al vaso del embalse (incluyendo la biomasa existente en el fondo del embalse) del total que se producen a nivel de las cuencas aportantes al Embalse El Quimbo donde se procedió a identificar las fuentes contaminantes y a cuantificar su factor de carga. Las fuentes generadoras de fósforo (P) seleccionadas fueron:

- Aguas residuales de los municipios que disponen de redes de alcantarillado provenientes de la población dispersa.

Se consideraron los seis (6) municipios (Tesalia, Paicol, Garzón, Gigante, El Agrado y Altamira) aportantes de aguas residuales para el cálculo del factor de carga, tomando los registros de fósforo total (PT) en el mes de julio (período de sequía) y noviembre de 2016 (período de lluvias) en los afluentes tributarios que llegan al Embalse El Quimbo.

En la Tabla 3 se describen los 11 puntos de muestreos para el fósforo total (PT) (realizados en los meses de julio y noviembre de 2016, durante los períodos de sequía y de lluvias), los cuales fueron definidos en el Estudio de Impacto Ambiental realizado por INGETEC (2008), que son los puntos de vertimientos y toma de parámetros de calidad de agua.

Según Veenstra & Polprasert (1997) y de acuerdo a experiencias desarrolladas bajo la norma RAS-2000 se ha estimado que la carga de carga de fósforo (P) para estas fuentes hídricas un valor promedio de 0.845 mg/l para los seis (6) municipios, teniendo en

cuenta los parámetros que fija el Decreto 1594 de 1984 – Ministerio Salud y del IDEAM.

Tabla 3. Puntos de muestreos de PT en la zona de influencia del embalse

Puntos de muestreo de fósforo total (PT)		Coordenadas	
		N	E
1	La Jagua	820566.78	731741.6
2	Puente Balseadero	825350.01	738508.93
Río Magdalena	3 Bengala	830817.39	752268.79
	4 Antes de río Páez (Zona de Presa)	834192.4	763446.49
5	Puerto Seco (Abajo de Presa)	837034.33	767791.08
6	Río Suaza	822836.1	732089.5
7	Quebrada Garzón	825477.89	736683.58
Tributarios del río Magdalena	8 Quebrada Yaguilga	823476.67	741276.4
	9 Río Loro	829081.81	747962.76
10	Quebrada Guandinoso	835305.66	755557.8
11	Río Páez	830674.68	762872.79

Fuente: Autor

Además, Ramírez et al. (1997, 1998) define que el Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO) se fundamenta en la concentración de fósforo total (PT) que está definido en cuatro (4) categorías:

- (O) Oligotrófico <0,01 mg/l
- (M) Mesotrófico 0,01 – 0,02 mg/l
- (E) Eutrófico 0,02 – 1 mg/l
- (H) Hipereutrófico >1 mg/l.

Para la estimación del número de habitantes de los seis (6) municipios se procedió a recopilar la información referente a la población presente en las cuencas aportantes según el último censo (del 2005 y se proyectó al 2016 y 2046 por el método geométrico con una vida útil de 30 años para sistemas de aguas residuales - alcantarillados, como lo indica el RAS 2000) y se establecieron las tasas de crecimiento anual (DANE, 2015), las cuales promediadas se utilizaron para calcular las proyecciones de población (urbana y rural) en los centros poblados considerados, con intervalos de cinco (5) años (Tablas 4 y 5).

Tabla 4.

Datos de población en la zona de influencia del embalse

Municipios	Urbana	Rural
Altamira	2416	1175
El Agrado	4586	3903
Garzón	33455	36368
Gigante	14230	13922
Paicol	2025	3183
Tesalia	4855	4019
TOTAL	61567	62570

Nota: Datos de población del censo oficial del DANE de 2005.

Tabla 5.

Datos de población total proyectada de los seis (6) municipios en la zona de influencia del embalse

Año	Urbana	Rural
2016	77380	78641
2046	144395	146697

- Residuos sólidos de origen municipal, dispuestos en botaderos de basura y provenientes de la población dispersa.

Se consideró el reporte nacional de los residuos generados a nivel municipal y departamental (SSPD,

2015) de los seis (6) municipios (Tabla 6) y un 34.29 % (población rural o población dispersa), donde los municipios de Altamira, El Agrado y Garzón hacen la disposición de residuos sólidos urbanos generados en una planta integral ubicada en el municipio de Garzón.

Para los municipios de Gigante, Paicol y Tesalia disponen de sus residuos en el relleno sanitario Los Ángeles en la ciudad de Neiva.

Se utilizaron los datos de población urbana y rural o población dispersa, y una tasa de producción de residuos sólidos de 8.266 kg / hab.día (definida para el Huila por parte de la SSPD), para establecer los aportes de nutrientes producidos en los seis (6) municipios de la zona de influencia del embalse El Quimbo.

La ecuación contemplada para la determinación de la carga total de nutrientes es:

$$CTN = P_i * TG * CS * FC * 365 \tag{5}$$

donde:

CTNi: carga total de nutrientes para el año i, en kg/año

Pi: población para el año i

TG: tasa de generación (8.266 kg / hab. día)

CS: cobertura del servicio = 0.75 para una cobertura de 75%

FC: factor de carga = 0.006 kg P/ kg de residuos sólidos En la Tabla 6 se calcula que la carga total de nutrientes es de 194,81 kg/año generada en los seis (6) municipios.

La carga total de residuos de producción pecuaria se ha estimado en un 12.4.8% que llega al embalse. El ICA (2016) reporta 66974 cabezas de ganado vacuno y 7750 cabezas de equinos dentro y fuera del área del embalse El Quimbo (Tabla 7).

Tabla 6.

Carga total de nutrientes de los municipios de la zona de influencia (SSPD, 2015)

Municipios	Tasa (Tn/día)	Pob. Urbana	TG (kg/hab. día)	CTN (kg/año)
Altamira	1.67	2416	0.6912	7.52
El Agrado	2.24	4586	0.4884	10.08
Garzón	25.35	33455	0.7577	114.08
Gigante	8.57	14230	1.7563	38.57
Paicol	1.54	2025	2.2178	6.93
Tesalia	3.92	4855	2.3547	17.64
TOTAL		61567	8.2662	194.81

Fuente: Autor

- Residuos de producción pecuaria

Para la proyección de los ganados (vacunos y equinos), en el horizonte del proyecto considerado, se establecen tasas de crecimiento del 2% y 1%.

Luego se determina la carga total de fitonutrientes se calcula con la ecuación:

$$CTNi = Ni * CE * FC * 365$$

donde:

CTNi: carga total de nutrientes para el año i, en kg/año

Ni: número de cabezas de ganado para el año i

CE: carga de estiércol (kg estiércol día/cabeza)

FC: factor de carga (kg P /Mg estiércol)

Tabla 7.

Censo regional de Ganado vacuno y equino en la zona de influencia del embalse (ICA, 2016)

Municipios	Cabezas de ganado	Equinos
Altamira	8633	1000
El Agrado	7080	1200
Garzón	11992	3500
Gigante	13836	1100
Paicol	11130	300
Tesalia	14303	650
TOTAL	66974	7750

Fuente: Autor

- Escorrentía superficial

El factor de carga del fósforo queda establecido de acuerdo al tipo de cobertura vegetal existente (Tabla 8) en el área de influencia del embalse (con base en el mapa de uso actual de la tierras (IGAC, 1994; CIDIAT, 2012; INGETEC, 2008):

- Bosques multiestrata y riparios: (0.03 – 0.9) kg P/ha. año

- Rastrojo alto (matorrales): (0.03 – 0.9) kg P/ha. año

- Pastizales densos o arbolados: (0.02 – 0.08) kg P/ha. año

- Bosque secundario intervenido y/o Cultivos: (0.06 – 3.0) kg P/ha. año

El aporte total del fitonutriente se obtiene multiplicando la superficie (ha) por el factor de carga (kg/ha. año) para el tipo de cobertura considerado. Donde se estableció que el 100% de la carga de fósforo (P) que llega al embalse El Quimbo es de 184.09 Kg P/año (Tabla 8).

Tabla 8.

Carga del fósforo por escorrentía superficial
Fuente: Autor

Tipo de cobertura	Área Total (has)	Factor carga kg P/ha. año	Carga Kg P/año
Bosque Multiestrata	818	0.03	24.54
Bosque Ripario	842.1	0.08	67.378
Rastrojo Alto	1 161.10	0.06	69.66
Pastos arbolados	204	0.03	6.12
Bosque Secundario intervenido	8.2	2.00	16.40
Total	3 033.40		184.09

- Biomasa del área de inundación

Las reservas de nutrientes producidas en el área de inundación del embalse el Quimbo están asociadas con la vegetación y están representadas por la biomasa superficial, madera, raíces y suelos. Al igual que para la escorrentía superficial, a partir del mapa de uso actual de la tierra generado por el IGAC (1994) e INGETEC (2008), se determinan las superficies con sus respectivos porcentajes, del tipo de cobertura vegetal existente en el área de inundación (Tabla 9).

Para la estimación de biomasa y nutrientes se establece un valor del fósforo en biomasa superficial de 0.65 kg /Mg. El aporte total de fósforo (P) en el área de inundación se determina en función de la biomasa superficial multiplicando el área de cada tipo de cobertura por los factores de carga. Se considera que el 25% de éste aporte total está disponible en el primer año de operación y durante el llenado del vaso; el restante 75% contribuirá durante los siguientes 15 años.

Tabla 9.

Cantidad de biomasa y madera a intervenir en el embalse El Quimbo

Tipo de cobertura	Área Total (has)	Volumen madera total a intervenir (m ³)	Biomasa total a extraer en el embalse (m ³)	Peso total de madera a intervenir (ton)
Bosque Multiestrata	818.0	678 875.9	681 256.27	548 523.39
Bosque Ripario	842.1	185 009.4	185 758.84	133 241.22
Rastrojo Alto	1 161.1	18 473.1	19 007.21	14 088.19
Pastos arbolados	204.0	6 616.7	6 641.53	5 496.84
Bosque Secundario intervenido	8.2	2 313.1	2 318.14	1 894.0
Total	3 033.4	891 288.2	894 321.55	703 243.65

Fuente: Autor

El embalse El Quimbo tiene una longitud aproximada de 55 km medidos a la cota de nivel de 720 msnm, el ancho máximo es de 4 km y el ancho promedio de 1.4 km (Tabla 10). Para el cálculo de caudales medios en el sitio del proyecto se partió de la información de caudales medios del IDEAM, que reporta un caudal medio multianual para el sitio de presa, el cual es de 235.39 m³/s para el período 1972 – 2006, antes del llenado del embalse. El volumen útil normal es de 1824 hm³ (entre las cotas 720.0 a 690.0 msnm).

Para el análisis del riesgo de eutrofización durante el llenado del embalse se consideraron cinco (5) escenarios: 100%, 75%, 50%, 25% y 0% de deforestación en el área de inundación. Se calculó la carga de fósforo (P) aplicada (expresada en g/m² año) a partir de un espejo de agua del 50% del área máxima inundada por el vaso (8250 ha).

Tabla 10.

Niveles, con sus correspondientes áreas y volúmenes

Niveles Principales	Cota (msnm)	Volumen (hm ³)	Área (km ²)
Máximo normal (Volumen total)	720.0	3 205	82.5
Medio de operación	710.0	2 461	66.6
Mínimo normal de operación (Volumen muerto)	690.0	1 381	42.2
Mínimo extremo de operación	665.0	604	23.0
Fondo de río en el eje de la presa	582.0	-	-

Fuente: Autor

Además, se consideró una profundidad media para los 82.5 km² de espejo de agua, el cual se verificó en la curva de Elevación - Área - Capacidad del vaso del embalse El Quimbo, con un nivel de cota media 710 msnm y de cota máxima normal de 720 msnm (Figura 2).

En el análisis del riesgo de eutrofización correspondiente a la fase de llenado se asume que:

El 50% del aporte total de fósforo (P) estimado para cada año está disponible en cada período simulado de un (1) año, partiendo desde el año 2016 (año en que entro en operación, estando lleno el embalse).



Figura 2. Curva de capacidad del embalse

El otro 50% restante se acumula o sale del vaso, y generando una carga adicional de fósforo (P) disponible, en alícuotas iguales en los siguientes 30 años (hasta el año 2066, que corresponde el año final de la vida útil del Proyecto hidroeléctrico de El

Quimbo). De esta forma, se trata de considerar el efecto acumulativo de fósforo (P) en el embalse durante su etapa de operación.

El área del vaso del embalse se considera como la correspondiente al nivel de aguas normales, unas 8250 ha, y la profundidad media del vaso de un

nivel de cota de 720 msnm en la fase de operación normal.

El cálculo de la magnitud de impacto ambiental está representada por el riesgo de eutrofización, tanto para el llenado como para la operación del embalse, se procedió a la considerar la escala propuesta por Pastakia & Jensen (1998) en la cuantificación de este criterio de Estudios de Impacto Ambiental (EIA), que se describe en la Tabla 11 que define cuál es la magnitud del riesgo de eutrofización del embalse y estima la futura intensidad del detrimento en la calidad del agua del embalse.

Tabla 11

Relación de riesgo de Eutrofización versus Magnitud del impacto ambiental

Grado del Embalse*	Eutrófico	Magnitud del cambio o efecto**	Significativo
		Escala de valores	
Ultraoligotrófico /Oligotrófico		0	Sin cambios o sin importancia
Mesotrófico		-1	Cambio negativo del status quo
Eutrófico		-2	Desmejora o cambio significativo
Hipereutrófico		-3	Desmejora o cambio mayor

Nota: * Conforme a la clasificación propuesta por Vollenweider (1983)

** Considerando la escala de valores de Pastakia & Jensen (1998)

Resultados y discusión

Con los registros de fósforo total (PT) tomados en los afluentes tributarios de los seis (6) municipios ubicados en la zona de influencia del embalse El Quimbo se define que la condición predominante para el período de sequía donde el Índice de Contaminación Trófico es EUTROFICO (E) que se ubica en la cota máxima (720 msnm – Aportes de los municipios de Paicol, Tesalia y El Agrado) y cota

normal (710 msnm – Aportes de los municipios de Gigante, Garzón y Altamira), lo que nos indica que es un embalse rico en nutrientes para organismos productores, la parte superior presenta altos niveles de oxígeno, aportado por algas, pero su parte inferior es bastante deficiente en oxígeno (Tabla 12).

La posibilidad de presencia del estado hipereutrófico (H) y mesotrófico (M) es baja. En períodos de lluvia (época húmeda), se presenta una tendencia del sistema a permanecer en la condición MESOTROFICA (M), con una moderada cantidad de nutrientes y moderadamente productivo en términos de la vida acuática de plantas y animales. Con los reportes realizados en los meses de julio y noviembre de 2016 a los aportes de aguas residuales de los seis (6) municipios se puede estimar que hay un incremento de la concentración de fósforo total aportante por los afluentes tributarios que alimentan el embalse El Quimbo (Figura 1).

Tabla 12.

Reporte de fósforo total y el índice de contaminación trófico a nivel municipal

Municipios	Período	PT* (mg/l)	Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO)			
			O	M	E	H
Paicol	Lluvias	0.049	8.02	11.72	65.68	0.05
	Sequía	0.114	0.05	14.02	75.08	8.11
Tesalia	Lluvias	0.046	8.04	11.76	65.72	0.05
	Sequía	0.093	0.05	14.06	75.12	8.15
El Agrado	Lluvias	0.052	8.06	11.85	65.74	0.04
	Sequía	0.098	0.06	14.08	75.14	8.16
Garzón	Lluvias	0.064	8.14	12.04	66.28	0.04
	Sequía	0.118	0.06	14.17	75.48	8.28
Gigante	Lluvias	0.068	8.52	12.28	67.38	0.02
	Sequía	0.125	0.08	14.28	76.49	8.49
Altamira	Lluvias	0.048	10.46	15.26	72.48	0.01
	Sequía	0.095	0.05	13.69	79.64	9.75

Nota: *Parámetros de PT, según IDEAM. Estudio Nacional del Agua EAN-2010.

Tabla 13.

Aportes totales de fósforo al Embalse El Quimbo en el horizonte de 50 años (2016-2066)

Año	Orden	Municipios Alcantarillados	Población dispersa (Rural)	Residuos Botadero de basura	Residuos pecuarios	Escorrentia superficial	Biomasa del área inundada	Aportes totales (kg/año)	Carga total P (g.m ² /año)
2016	0	2 400.71	823.21	194.81	676.40	2380.25	1971.45	8 446.83	8.45
2017	1	2 451.13	840.49	198.90	690.61	2380.25	1971.45	8 532.83	8.53
2018	2	2 502.60	858.14	203.08	705.11	2380.25	1971.45	8 620.63	8.62
2019	3	2 555.16	876.16	207.34	719.92	2380.25	1971.45	8 710.28	8.71
2020	4	2 608.82	894.56	211.70	735.03	2380.25	1971.45	8 801.81	8.80
2021	5	2 663.60	913.35	216.14	750.47	2380.25	1971.45	8 895.26	8.90
2022	6	2 719.54	932.53	220.68	766.23	2380.25	1971.45	8 990.68	8.99
2023	7	2 776.65	952.11	225.32	782.32	2380.25	1971.45	9 088.10	9.09
2024	8	2 834.96	972.11	230.05	798.75	2380.25	1971.45	9 187.56	9.19
2025	9	2 894.49	992.52	234.88	815.52	2380.25	1971.45	9 289.11	9.29
2026	10	2 955.28	1 013.36	239.81	832.65	2380.25	1971.45	9 392.80	9.39
2027	11	3 017.34	1 034.64	244.85	850.13	2380.25	-	9 498.66	9.50
2028	12	3 080.70	1 056.37	249.99	867.99	2380.25	-	9 606.75	9.61
2029	13	3 145.39	1 078.56	255.24	886.22	2380.25	-	9 717.10	9.72
2030	14	3 211.45	1 101.21	260.60	904.83	2380.25	-	9 829.78	9.83
2031	15	3 278.89	1 124.33	266.07	923.83	2380.25	-	9 944.82	9.94
2032	16	3 347.75	1 147.94	271.66	943.23	2380.25	-	8 090.82	8.09
2033	17	3 418.05	1 172.05	277.36	963.04	2380.25	-	8 210.75	8.21
2034	18	3 489.83	1 196.66	283.19	983.26	2380.25	-	8 333.19	8.33
2035	19	3 563.11	1 221.79	289.13	1 003.91	2380.25	-	8 458.20	8.46
2036	20	3 637.94	1 247.45	295.21	1 024.99	2380.25	-	8 585.83	8.59
2037	21	3 714.34	1 273.65	301.41	1 046.51	2380.25	-	8 716.15	8.72
2038	22	3 792.34	1 300.39	307.74	1 068.49	2380.25	-	8 849.21	8.85
2039	23	3 871.98	1 327.70	314.20	1 090.93	2380.25	-	8 985.05	8.99
2040	24	3 953.29	1 355.58	320.80	1 113.84	2380.25	-	9 123.75	9.12
2041	25	4 036.31	1 384.05	327.53	1 137.23	2380.25	-	9 265.37	9.27
2042	26	4 121.07	1 413.11	334.41	1 161.11	2380.25	-	9 409.96	9.41
2043	27	4 207.61	1 442.79	341.43	1 185.49	2380.25	-	9 557.58	9.56
2044	28	4 295.97	1 473.09	348.60	1 210.39	2380.25	-	9 708.30	9.71
2045	29	4 386.19	1 504.02	355.92	1 235.81	2380.25	-	9 862.19	9.86
2046	30	4 478.30	1 535.61	363.40	1 261.76	2380.25	-	10 019.31	10.02
2047	31	4 572.34	1 567.86	371.03	1 288.26	2380.25	-	10 179.73	10.18
2048	32	4 668.36	1 600.78	378.82	1 315.31	2380.25	-	10 343.52	10.34
2049	33	4 766.39	1 634.40	386.78	1 342.93	2380.25	-	10 510.75	10.51
2050	34	4 866.49	1 668.72	394.90	1 371.13	2380.25	-	10 681.49	10.68
2051	35	4 968.69	1 703.76	403.19	1 399.93	2380.25	-	10 855.82	10.86
2052	36	5 073.03	1 739.54	411.66	1 429.33	2380.25	-	11 033.80	11.03
2053	37	5 179.56	1 776.07	420.30	1 459.34	2380.25	-	11 215.53	11.22
2054	38	5 288.33	1 813.37	429.13	1 489.99	2380.25	-	11 401.07	11.40
2055	39	5 399.39	1 851.45	438.14	1 521.28	2380.25	-	11 590.51	11.59
2056	40	5 512.77	1 890.33	447.34	1 553.22	2380.25	-	11 783.92	11.78
2057	41	5 628.54	1 930.03	456.74	1 585.84	2380.25	-	11 981.40	11.98
2058	42	5 746.74	1 970.56	466.33	1 619.15	2380.25	-	12 183.02	12.18
2059	43	5 867.42	2 011.94	476.12	1 653.15	2380.25	-	12 388.88	12.39
2060	44	5 990.64	2 054.19	486.12	1 687.86	2380.25	-	12 599.06	12.60
2061	45	6 116.44	2 097.33	496.33	1 723.31	2380.25	-	12 813.66	12.81
2062	46	6 244.89	2 141.37	506.75	1 759.50	2380.25	-	13 032.76	13.03
2063	47	6 376.03	2 186.34	517.39	1 796.45	2380.25	-	13 256.46	13.26
2064	48	6 509.93	2 232.25	528.26	1 834.17	2380.25	-	13 484.86	13.48
2065	49	6 646.64	2 279.13	539.35	1 872.69	2380.25	-	13 718.06	13.72
2066	50	6 786.22	2 326.99	550.68	1 912.02	2380.25	-	13 956.15	13.96

El factor de carga de cada una de las fuentes aportantes de fósforo al embalse El Quimbo, se obtiene que, para el horizonte de tiempo de 50 años (vida útil del proyecto hidroeléctrico), contados a partir del 2016 (fase de llenado del embalse) hasta el 2066 (vida útil del embalse), el principal aporte proviene de las aguas de escorrentía superficial, seguido de las aguas residuales de los municipios (alcantarillados del área urbana y rural), luego la biomasa del área de inundación que no se retiró del vaso del embalse, como se describe en la Tabla 13. Basado en lo anterior, se consideraron cinco (5) escenarios de deforestación del área de inundación (Tabla 14) donde el riesgo de eutrofización se incrementó a medida que aumenta el porcentaje de deforestación, como la descomposición de la biomasa no retirada del área del embalse, pasa de estado eutrófico (E) para 0% de deforestación a estado mesotrófico (M) para 100% de deforestación, es decir, de un nivel de alta productividad con bajas concentraciones de oxígeno y altas concentraciones de nutrientes a un nivel de media productividad.

Tabla 14. Resultados de los escenarios de deforestación en el vaso durante el llenado del embalse

Escenario de deforestación (%)	Aportes de la cuenca (*) (kg/año)	Aportes del área de inundación (kg/año)	Carga total de fósforo (g/m ² · año)	Riesgo de eutrofización del embalse en porcentaje (%)			
				O	M	E	HE
0	6786.22	1971.45	13.96		47.14	54.28	1.34
25	6786.22	1478.59	13.12	1.08	50.28	52.34	1.02
50	6786.22	985.73	12.28	1.62	52.18	49.89	
75	6786.22	492.86	11.45	2.14	58.75	41.42	
100	6786.22	0.00	10.89	2.86	62.86	37.42	

Fuente: Autor

Notas: (*) Aportes generados en la cuenca hidrográfica al embalse (tributarios del río Magdalena) durante los primeros 6 meses (tiempo de llenado del Embalse)

O = Oligotrófico M = Mesotrófico E = Eutrófico

HE = Hipereutrófico

donde se esperaría una desmejora significativa sobre la situación de línea base, mientras que en el al remover al menos 25-35% de la masa forestal existente en la zona de influencia del embalse, el cambio se consideraría ligero de la situación de línea base. Durante los primeros 10 años, en la etapa de operación, el embalse tuvo un comportamiento Eutrófico (E) y a partir de allí pasó Mesotrófico (M), por efectos de la acumulación del fósforo en el vaso del embalse (Tabla 15). Esta condición debe evitarse, ya que incide negativamente en el ecosistema del embalse y calidad del agua.

Tabla 15. Predicción del riesgo de eutrofización en el embalse

Año	Carga P (g P/m ² /día)	Riesgo del estado trófico del embalse(%)			Concentración (g P/m ³)
		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	
2016	5.56	1.58	69.94	42.89	0.068
2017	5.64	1.54	68.71	43.14	0.068
2018	5.72	1.46	66.49	44.92	0.071
2019	5.84	1.42	64.27	45.54	0.072
2020	5.93	1.37	62.18	46.38	0.074
2021	5.98	1.32	60.03	47.39	0.076
2022	6.02	1.28	58.47	48.36	0.078
2023	6.14	1.24	56.84	49.13	0.079
2024	6.22	1.19	54.27	49.28	0.081
2025	6.36	1.15	52.38	49.72	0.082
2026	6.41	1.12	51.46	50.14	0.084
2027	6.58	1.08	50.16	51.64	0.086
2028	6.64	1.14	49.38	52.48	0.087
2029	6.86	1.16	48.25	53.68	0.089
2030	6.94	1.22	46.86	54.38	0.090
2031	7.08	1.28	44.35	55.27	0.091
2032	7.15	1.32	42.31	56.38	0.092
2033	7.27	1.45	40.88	58.14	0.094
2034	7.38	1.56	39.28	59.72	0.096
2035	7.51	1.67	38.17	60.08	0.097
2036	7.65	1.74	36.46	62.12	0.099
2037	7.78	1.88	35.38	64.39	0.102
2038	7.92	1.98	34.47	65.68	0.104
2039	8.03	2.04	32.82	67.26	0.106
2040	8.16	2.16	31.45	69.18	0.108
2041	8.24	2.31	30.28	70.15	0.109
2042	8.43	2.59	29.16	72.23	0.111
2043	8.61	2.81	27.22	73.18	0.112
2044	8.72	2.94	25.48	75.82	0.114
2045	8.95	3.04	23.15	76.31	0.116
2046	9.04	3.17	21.59	77.50	0.118

Fuente: Autor

Al evaluar la magnitud del riesgo de eutrofización, se cuantifica como significativa (-2) hasta el año 10,

y luego como leve (-1). La determinación de un posible cambio significativo o mayor (-2) sobre la calidad del agua del embalse durante su operación, representa el riesgo de ocurrencia de otros impactos ambientales derivados de los procesos eutróficos.

La predicción del riesgo está proyectada a 30 años, según la metodología del RAS 2000 (vida útil de los sistemas de aguas residuales de los municipios), donde se ha considerado los primeros 10 años de la etapa de operación que presenta una condición eutrófica (Tabla 15).

Luego CEPIS (2001), nos indica que la principal consecuencia de la eutrofización es el desequilibrio ecológico del embalse El Quimbo (Figura 3), la cual se supone una ocurrencia de otros impactos ambientales tanto dentro del vaso del embalse como sobre los usuarios del recurso hídrico, aguas abajo de la presa. Los impactos más relevantes son:

a. Impactos en la calidad del embalse

- Incremento en la cantidad de materia orgánica (fitoplancton, zooplancton, bacterias y detrito).
- Sustitución de especies de algas diatomeas y crisofíceas (inocuas) por especies de los grupos clorofíceas y cianofíceas (algas verdes y azul verdosas indeseables que excretan sustancias tóxicas al medio).
- Incremento de compuestos orgánicos disueltos, los cuales: producen olores y sabores desagradables, cambio del color del agua, producción potencial de compuestos halogenados que constituyen el sustrato (crecimiento bacteriano en las PTAR y alcantarillados), falta de oxígeno en el área de contacto agua-sedimento (mineralización incompleta de las sustancias orgánicas) y pérdida de los valores estéticos.

b. Impactos en los usuarios del recurso

- Riesgo a la salud por exposición a algas y bacterias tóxicas. De acuerdo con Kay *et al.* 1980 (citado por CEPIS, 2001), investigaciones epidemiológicas han establecido una elevada correlación entre epidemias gastrointestinales y la presencia de grandes concentraciones de algas

verdes-azules en los Embalses de abastecimiento público.

- Riesgo a la salud por exposición a compuestos orgánicos potencialmente tóxicos o cancerígenos. Hoehn *et al.* 1980 (citado por CEPIS, 2001) demuestran experimentalmente que el fitoplancton es una fuente importante de precursores de trihalometanos.

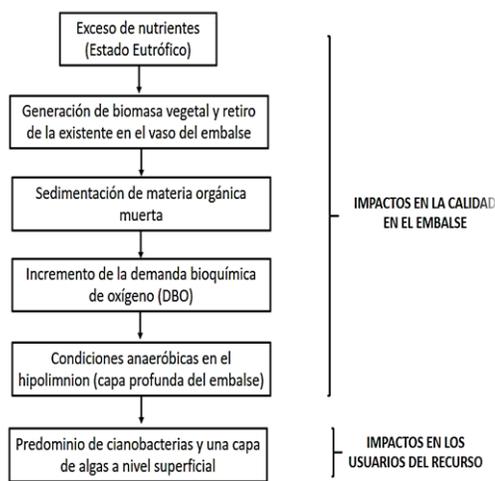


Figura 3: Consecuencia de la eutrofización y desequilibrio ecológico y ambiental del embalse El Quimbo. Fuente: Autor

Modelo preliminar de clorofila "a"

La clorofila "a" es un estimador útil y simple de la densidad del fitoplancton y ha sido ampliamente utilizado en los modelos como el parámetro más pertinente para predecir la densidad de algas en lagos. La evidencia de una estrecha relación entre la clorofila "a" y la concentración de fósforo total en la mayoría de los lagos templados y cálidos ha sido reportada por Dillon y Rigler, 1974; Chapra y Tarapchak, 1976; Smith y Shapiro, 1981; OECD, 1982; entre otros.

Sin embargo, los modelos de clorofila "a" versus fósforo pueden no ser buenos indicadores de la relación entre los niveles de algas y nutrientes en los lagos limitados por nitrógeno con relaciones de NI/PI menores a 10 (Dillon y Rigler, 1974; Canfield, 1983).

Los embalses construidos en Colombia (últimos 30 años) han reportado valores de clorofila que

evidencian su estado eutrófico. Dichos valores son: Porce I - II (entre 11 – 220 ug/l que es un rango amplio); La miel, La Fé y Rio Grande (0.02 a 0.03 ug/l); San Lorenzo y Punchina (0.5 a 12.2 ug/l que es un rango variable; Betania (34 a 52 ug/l); San Carlos (28 a 48 ug/l), Urra I – II (38 a 67 ug/l) (Roldan & Ramirez, 2003. Ramos, 2010, 2015).

Para el embalse El Quimbo se aplica la clasificación del estado trófico, tomando como referencia CEPIS y Water Research Commission y National Institute for Water Research, dando una condición eutrófica (E) con un rango variable de clorofila, metodología similar al que se aplicó por Ramos (2010) al embalse de Betania (Tabla 16).

Tabla 16.

Clasificación CEPIS - Water Research Commission - National Institute for Water Research del estado trófico de los embalses El Quimbo y Betania

Lago o embalse	Símbolo	Clasificación reportada	Clorofila (ug/l) *	Clasificación CEPIS (Porcentaje de probabilidad)				
				UO	O	M	E	HE
Quimbo	Qu	E	64 - 138	0	4.28	13.27	71.64	4.27
Betania**	Be	E	34 - 52	0	1.82	8.52	54.26	3.12

Nota:

HE = Hipereutrófico

E = Eutrófico

M/E = Mesotrófico/Eutrófico

M = Mesotrófico

O/M = Oligotrófico/Mesotrófico

O = Oligotrófico

* Clasificación dada por Margalet, 1986.

** Reporte realizado por Ramos M. A. 2010. Análisis limnológico del embalse de Betania. Curso de Limnología y recursos hidrobiológicos. Informe técnico. Maestría en Ecología y Gestión de Ecosistemas Estratégicos. Facultad de Ingeniería. Universidad Surcolombiana. Primera Cohorte. Neiva.

Discusión

Los embalses ubicados en la zona tropical (cálidas), como es el caso del El Quimbo tienen la misma problemática que los lagos, relacionada a la calidad del agua, con la diferencia de que se puede planificar su gestión hidráulica como medida correctora. Esta problemática surge porque, bajo

determinadas características morfo métricas y climáticas, los lagos y embalses eutróficos desarrollan en forma estacionaria una zona anóxica en el hipolimnion (debido a la disposición de biomasa en el fondo del embalse, el cual no se ha retirado), considerando como anóxicas las condiciones de oxígeno inferiores a 1 mgO₂/l a 1 metro del fondo (Nürnberg, 1987 a, 1987 b; Ramos, 2010). Luego El Quimbo presenta unos valores variables de clorofila entre 64 a 138 ug/l que evidencia un estado eutrófico (E).

El estado trófico de un embalse puede mejorar con el tiempo o continuar su deterioro si el aporte externo de nutrientes no disminuye. Aún en el caso de reducirse los aportes externos de fósforo, los efectos de recuperación no son inmediatos, ya que los sedimentos pueden haber almacenado una carga importante que van liberando paulatinamente y el sistema continúa mostrando síntomas de eutrofización (Nürnberg, 1984; Ramos, 2010). Para El Quimbo se deben diseñar, optimizar, construir y operar sistemas de tratamiento de aguas residuales de los seis (6) municipios (zona urbana y rural) que se ubican aguas arriba del área del embalse, los cuales deben incluir tratamiento terciario (remoción de nitrógeno y fósforo). A la vez el retiro inmediato de la totalidad de la biomasa existente en el vaso del embalse.

Los resultados de la magnitud del riesgo de eutrofización, se cuantifica como significativa (-2) hasta el año 10, y luego como leve (-1). La determinación de un posible cambio significativo o mayor (-2) sobre la calidad del agua del embalse durante su operación, representa el riesgo de ocurrencia de otros impactos ambientales derivados de los procesos eutróficos. La predicción del riesgo se ha proyectado a 30 años según el RAS 2000, por la vida útil de los sistemas de aguas residuales existentes en los municipios, donde se ha considerado los primeros 10 años de la etapa de operación que presenta una condición eutrófica (Tabla 15).

Por el fenómeno de eutrofización del embalse El Quimbo se presentarían riesgos por exposición de algas y bacterias tóxicas (Kay et al. 1980) y por exposición a compuestos orgánicos potencialmente tóxicos y cancerígenos (Hoehn et al. 1980).

Se consideraron cinco (5) escenarios de deforestación del área de inundación (Tabla 14) donde el riesgo de eutrofización se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de deforestación, como la descomposición de la biomasa que no se ha retirado del área del embalse, pasando de estado Eutrófico (E) para 0% de deforestación a estado Mesotrófico (M) para 100% de deforestación, es decir, de un nivel de alta productividad con bajas concentraciones de oxígeno y altas concentraciones de nutrientes a un nivel de media productividad.

La relevancia del fenómeno de eutrofización en el embalse El Quimbo nos da unos efectos negativos como el deterioro de la calidad del agua y la proliferación de algas y material vegetativo flotante (Figura 4) que se está dando en la actualidad. Esto se corrobora con un estudio adelantado por la Universidad Nacional - Sede Amazonia donde concluyeron que las condiciones de aportes de nutrientes de la cuenca del Magdalena y la descomposición del área a inundada pronostica niveles de eutrofización en las aguas del embalse de El Quimbo en el Huila.¹¹



Figura 4. Material vegetativo flotante en el sector Laguna Cementerio – abajo del embalse El Quimbo
Fotografía: Alfredo Ramos.

Santiago Duque, experto en recursos hídricos de la Universidad Nacional señala que es alarmante la

incertidumbre que hay sobre los indicadores de calidad del agua de El Quimbo: “Hay un nuevo escenario y se deben conocer los datos técnicos para tomar la decisión de reactivar la hidroeléctrica”. “Por la alta eutrofización de las aguas, es decir, el enriquecimiento con nutrientes como nitrato y fósforo de este embalse, se pueden afectar las condiciones mínimas para que sobrevivan las cerca de 19.000 toneladas de peces que se alojan en el embalse multipropósito de Betania, donde llegan las aguas de El Quimbo”.¹²

Un estudio del CIDIAT (2012) concluye que un riesgo de eutrofización en un embalse hay modificación de la ictiofauna y la calidad de agua, que son los dos impactos de importancia para el proyecto y que esto ocurrirán en la fase de construcción y operación del embalse.

El editorial catorce dice afirma que: “Es crítico que el país haya aceptado una metodología revaluada hace tanto tiempo, como es la de inundar grandes volúmenes de biomasa. Los costos de retirarla son sin duda altos, pero con seguridad fueron incorporados en la estructuración financiera del proyecto porque la obligación está en la licencia ambiental”.¹³

Conclusión

Con esta investigación se estableció una metodología y se dan pautas para actualizar y evaluar la gestión del riesgo de eutrofización de los embalses construidos y proyectados a construir en Colombia.

Agradecimientos

Corporación Autónoma del Alto Magdalena. CAM.

Comunidad urbana y rural de los municipios El Agrado, Tesalia, Paicol, Garzón, Gigante, Altamira. Departamento del Huila.

Instituto Nacional de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM. Bogotá.

¹¹ AMAZONIA, 01 de junio de 2015 — *Agencia de Noticias Universidad Nacional*.

¹² <http://omal.info/spip.php?article7456>

<http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/apertura-de-hidroelectrica-el-quimbo/16776420>

¹³ <https://www.catorce6.com/opinion/editorial/10369-un-circo-llamado-quimbo>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. IGAC. Bogotá.

Instituto de Geología y Minería. INGEOMINAS. Bogotá.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. SSPD. Bogotá.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. UPTC – Tunja

Universidad Surcolombiana. Neiva.

Referencias Bibliográficas

Abbott M, Bathurst J, Cunge J, O'Connell P, Rasmussen, J. (1986-1987). An introduction to the European Hydrological System -*Système Hydrologique Européen "SHE"*. *J. Hydrol* 1986. 87. 45-59.

Beltrán V., J.E., Rangel CH., J.O. (2013). Modelación del estado trófico del humedal de Jaboque, Bogotá D. C., Colombia. Modeling the Trophic State of Wetland Jaboque, Bogotá D. C., Colombia. *Acta biol. Colomb.*, 18(1),. 149-164,

Canfield, D.E.; Langelano, K.A.; Maleina, M.J.; Haller, W.T.; Shireman, J.V. y Jones, J.R. (1983). Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*. Vol. 40, No. 10:1713-1718 p.

Carlson, R. & Simpson, J. (1996). A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. *North American Lake Management Society*, 96.

CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. OPS. Organización Panamericana de la Salud. (1989). *Curso básico sobre eutrofización*. Lima: Programa Regional CEPIS/HPE/OPS.

CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. OPS. Organización Panamericana de la Salud. (2001). *Metodología simplificada para la evaluación de la eutrofización*

en lagos cálidos tropicales. Lima: Programa Regional CEPIS/HPE/OPS.

Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de Los Andes CIDIAT. (2012). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse monacito-piedra azul, estado Trujillo, Venezuela. Carlos Espinosa, Kretheis Márquez, Jorge Rodríguez. *Rev. Fac. Ing. UCV*. 27 (4).

Chapra, S.C. y Tarapchak. (1976). A chlorophyll "a" model and its relationship to phosphorus loading plots for lakes. *Water Resources Research*, 12(6).1260-1264.

DANE. Departamento Nacional de Estadística. (2010). *Estudios poscensales 7. Proyecciones nacional y departamental de población 2005 – 2020*. Bogotá: DANE

Dillon, P.J. y Rigler, F.H. (1974). The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* 19(4) 767-773.

DNP. Departamento Nacional de Planeación. (2010). *Bases del plan nacional de desarrollo 2010-2014*. Bogotá: DNP

DNP. Departamento Nacional de Planeación. Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. (2010). *Tomos I – II. Bogotá D.C.* 2015.

Fraile, H., Orive, E. & Pozo, J. (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaiso (río Tera, Zamora). *Limnetica*, 11 (2), 29-37.

Hoehm, R.C. Barnes, D.B. Thompson, B.C. Randall, C.W. Grizzard, T.J. and Shaffer, T.B. (1980). Algae as sources of trihalomethane precursor. *Journal American Works Associatio, Research and Technology*. 72. 344-350.

ICA. Instituto Colombiano Agropecuario. Censo Nacional Pecuario. (2016). Recuperado de: <http://www.ica.gov.co/getdoc/8232c0e5-be97-42bd-b07b-9cdbfb07fcac/Censos-2008.aspx>

IDEAM. Instituto Nacional de hidrología, meteorología y estudios ambientales. Estudio Nacional del Agua. ENA. 2010. Bogotá.

IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1994). Estudio general de suelos del Departamento del Huila. Bogotá.

IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1977). Zonas de Vida o Formaciones Vegetales de Colombia. Memoria Explicativa del Mapa Ecológico. Plancha No. 15. Bogotá.

INGETEC S.A. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico *El Quimbo*. 2.

Janus L, Vollenwider R. (1981). The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Canadian Contribution, summary report. *Natural Water Research Institute Scientific*. 131.

Kay, G.P. Sykora, J.L. and Burgess, R.A. (1980). Algal concentration as a quality parameter of finished drinking waters in and around Pittsburgh, Pa. *Journal American Water Works Association, Research and Technology*. 72. 170-176.

Margalef, R. (1986). *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega S.A..

Ministerio de Salud. Decreto 1594 de 198. **Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.** Usos del agua y residuos líquidos.

Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Nurnberg, G.K. (1987 a). A comparison of internal phosphorus loads in lakes with anoxic hypolimnia: Laboratory incubation versus in situ hypolimnetic phosphorus accumulation. *Limnol. Oceanogr.*, 32(5): 1 160- 1 164.

Nurnberg, G.K. (1987 b). Hypolimnetic withdrawal as lake restoration technique. *Journal of Envirorzmertal Erzgineerirzg*, 1 13(5): 1006- 1017.

OECD. (1992). *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control*. 154 Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development 1982. (Publié en français sous le titre »Eutrophication des Eaux. Méthodes de Surveillance, d'Evaluation et de Lutte«).

OPS. Organización Panamericana de la Salud. Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud – OMS. (2001). Tropicales. Relatório CEPIS, 2001. *Metodologías simplificadas para evaluación de eutrofication en lagos cálidos*. Lima: OPS/CEPIS. 60 p.

Pastakia, C. & Jensen, A. (1998). *The rapid impact assessment matrix (RIAM) for environmental impact assessment*. Denmark: Environmental Impact Assessment Review.

Ramírez A., Restrepo R., y Viña G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. formulaciones y aplicación. Ecotest Ltda. BP Exploración. Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo. CT&F - *Ciencia, Tecnología y Futuro*.1 (3). 59

Ramírez, A. (1988). *Lineamientos y estadísticas para estudios biológicos de impacto ambiental*, Contrato 64/87 Colombia: Inderena, 455.

Ramos M. A. (2010). Análisis limnológico del embalse de Betania. Curso de Limnología y recursos hidrobiológicos. Informe técnico. Maestría en Ecología y Gestión de Ecosistemas Estratégicos. Facultad de Ingeniería. Neiva:Universidad Surcolombiana

Ramos M. A. (2013). *Modelación hidrológica de la cuenca hidrográfica del Alto Chicamocha. Informe técnico*. Tunja: CORPOBOYACA. Grupo GIGAGE.

Ramos M. A. (2015). *Análisis hidrológico e hidráulico embalse La Copa, municipio de Toca, departamento de Boyacá. Informe técnico*. INCODER – Tunja: Gobernación de Boyacá.

RAS 2000. Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título D. Sistemas de Alcantarillado. Título E. Sistema de PTAR. Resolución 1096 de 2000 del Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución 2320 de 2009 del MAVDT.

Roldán G. (1992). *Fundamentos de limnología tropical*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.

Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Antioquia: Universidad de Antioquia. 20.

Roldán, G. & Ramírez J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Antioquia: Editorial Universidad de Antioquia.

Salas, H. & Martino P. (1991). A simplified phosphorous trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Resources Journal*. 25(3), 341 – 350.

Smith, V.H. y Shapiro, J. (1981). Chlorophyll-phosphorus relations in individual lakes. Their importance to lake restoration strategies. *Environ. Sci. Technol.* 15. 44-451.

SSPD. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Disposición Final de Residuos Sólidos. 7. Informe Nacional. Bogotá D.C. Diciembre de 2015. 30-40.

Villaseñor, J. (2001). Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas. *Colección Tesis Doctorales*. 122(20).

Vollenwieder, R.A. (1983). *Eutrophication. Notes distributed during the II Meeting of the Regional*. Lima: Project on the Eutrophication of Tropical Lakes.

Wetzel, RG. (2001). *Limnology. Lake and river ecosystems*. 3rd ed. San Diego: Academic Press. 1006.