



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

1803

FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
EUTROFIZACIÓN EN EMBALSES TROPICALES Y SELECCIÓN DEL ÍNDICE
DE ESTADO TRÓFICO MÁS ADECUADO PARA EL EMBALSE PEÑOL -
GUATAPÉ, COLOMBIA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental

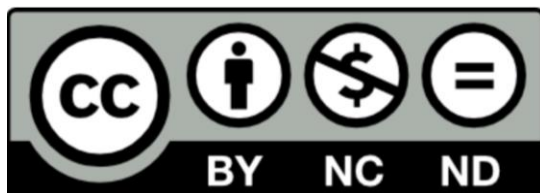
Estudiante

Lorena Toro Gallego

Asesor

Jaime Alberto Palacio Baena

Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental – GAIA



08 de febrero de 2019

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional.

A mi asesor Jaime Palacio por su cordial disposición para brindarme su conocimiento.

A mis profesores que me motivaron por orientarme en esta línea del conocimiento.

Al equipo de trabajo del grupo de investigación en Gestión y Modelación Ambiental–GAIA por su amable disposición y compañerismo.

APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN EN EMBALSES TROPICALES Y SELECCIÓN DEL ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO MÁS ADECUADO PARA EL EMBALSE EL PEÑOL-GUATAPÉ, COLOMBIA

INTRODUCCIÓN

La eutrofización es definida como la respuesta de los lagos y embalses al enriquecimiento de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno. Este enriquecimiento puede presentarse en forma natural y cultural (Janus y Vollenmeider, 1982). La eutrofización natural, es un proceso que se desarrolla a lo largo de un periodo de tiempo extenso (millones de años) debido a los aportes de la cuenca de drenaje (Resendiz Cruz, 2012). La eutrofización cultural, es un fenómeno más rápido como resultado de las actividades antrópicas y se considera una de las principales formas de deterioro del agua en diferentes zonas del mundo (Janus y Vollenmeider, 1982; García et al., 2018).

Los embalses son “ecosistemas intermedios entre río y lago”, con una “tendencia general a la eutrofización y a la contaminación” debido a la influencia de las actividades antrópicas (Ramírez, 1986). Estos sistemas se emplean para la generación de energía, el almacenamiento de agua para la potabilización, el consumo de animales, el abastecimiento de sistemas de riego, el control de eventos hídricos extremos como crecientes y la provisión de hábitat para diferentes especies, entre otras (Ledesma et al., 2013).

Las consecuencias del cambio en las características tróficas y las repercusiones sobre los posibles usos de los reservorios de agua se han evidenciado desde la década de 1960 (Janus y Vollenmeider, 1982). Algunas afectaciones a los usos de los embalses son los problemas en la generación de energía hidroeléctrica, el aumento en los costos del tratamiento de potabilización del agua y la disminución de la vida útil de los embalses (Roldán y Ramírez, 2008) como consecuencia de procesos de aporte de sedimentos influenciados por “el estado de conservación de los suelos y el grado de erosión de la cuenca” (Ramírez, 1986).

Como parte de los instrumentos de monitoreo y seguimiento de la calidad del agua y de la evolución de las condiciones tróficas de los reservorios de agua dulce, se usan los índices de estado trófico, con el fin de caracterizar los procesos naturales y evaluar los cambios del ecosistema (Martino, 1989). En el presente trabajo se hace una revisión de las metodologías utilizadas para estimar el estado trófico en ambientes lenticos y semilenticos y especialmente en embalses tropicales y se evaluó el estado trófico en ocho estaciones del embalse Peñol-Guatapé, ubicado en el oriente del departamento de Antioquia, Colombia.

MARCO TEÓRICO

Nutrientes en el proceso de eutrofización

Los nutrientes, principalmente el nitrógeno y el fósforo, tienen un papel importante en el cambio de la condición trófica de lagos y embalses, debido a que son los principales responsables del proceso de eutrofización de los ecosistemas acuáticos, considerado uno de los más importantes problemas ambientales del mundo (Arocena et al., 2008). Algunos factores como el tiempo de retención del agua y el estado de conservación de la cuenca hidrográfica condicionan la entrada de nutrientes a este tipo de ecosistemas (Roldán y Ramírez , 2008).

El fósforo está asociado a la “disolución de las rocas fosfatadas y a la mineralización que reintegra al entorno el fósforo inorgánico mediante procesos de descomposición microbiana” y de resuspensión de los sedimentos acuáticos. La atmósfera es considerado la principal fuente de nitrógeno y el retorno de este nutriente al ambiente se da también a través de la descomposición de la materia orgánica (Roldán y Ramírez , 2008). Las fuentes antrópicas más importantes de estos nutrientes son la contaminación orgánica, industrial y agrícola (Roldán y Ramírez , 2008).

El nitrógeno es un componente fundamental de las proteínas constituyentes de la base estructural de los seres vivos. Este nutriente puede presentar diferentes formas en los ecosistemas acuáticos como Nitratos (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-), Amoníaco (NH_3), Amonio (NH_4^+), Óxido Nitroso (N_2O), Nitrógeno molecular (N_2) y Nitrógeno orgánico disuelto (Roldán y Ramírez , 2008). Mientras el fósforo es el elemento biogénico más importante en el metabolismo biológico, presenta una menor disponibilidad que el nitrógeno y en consecuencia, constituye frecuentemente el factor limitante para la producción primaria. Las principales formas de fósforo en aguas naturales son los ortofosfatos y el fosfato condensado (polifosfatos) (Martino, 1989). Los ortofosfatos o fósforo soluble reactivo (FSR) son considerados la forma de mayor importancia limnológica debido a que es soluble y asimilable. Los ortofosfatos son asimilados rápidamente por los productores primarios en los ecosistemas acuáticos tropicales, debido al aumento en el metabolismo de las plantas y el fitoplancton como consecuencia de las altas temperaturas en estos ambientes (Roldán y Ramírez , 2008).

Clorofila a

Al igual que el nitrógeno y el fósforo, la clorofila a es una variable ampliamente usada como indicador de estado trófico en lagos y embalses (Bonansea et al., 2012; Dimberg et al., 2013). La concentración de este pigmento permite

diagnosticar en forma temprana el estado trófico de un ecosistema acuático y es un estimador de la biomasa de fitoplancton (Moreira y Sabando, 2016).

Causas y manifestaciones de la eutrofización

La eutrofización puede ser causada tanto por actividades naturales como por antropogénicas. Dentro de las actividades naturales que pueden contribuir a la eutrofización de los ecosistemas acuáticos se encuentran los aportes atmosféricos de nutrientes, la precipitación húmeda y seca de nutrientes, la liberación de nutrientes desde los sedimentos, la degradación de la materia orgánica, las excreciones de los seres vivos, la fijación por parte de los microorganismos, entre otras (Diaz y Sotomayor, 2013). Por su parte, entre las actividades antropogénicas se encuentran la descarga de aguas residuales, el uso excesivo de fertilizantes, la deforestación, la erosión del suelo, la presencia de gases como los óxidos de nitrógeno y de azufre (NO_x y SO_x), las actividades pecuarias e industriales, la urbanización, entre otras (Bravo et al., 2012; Moreno et al., 1996). Entre las manifestaciones de la eutrofización en los ecosistemas acuáticos se encuentran (Martino, 1989; Roldán y Ramírez, 2008; Moreno et al., 2010; Oroná, 2012):

- Proliferación de fitoplancton.
- Crecimiento másico de macrófitas acuáticas.
- Incremento de la turbiedad del agua.
- Disminución de la penetración de la radiación solar en la columna de agua.
- Reducción del espesor de la zona trofogénica.
- Aumento de la posibilidad de estratificación térmica.
- Ampliación de los rangos de fluctuación de algunas variables en el ciclo diario (Oxígeno, CO₂ y pH).
- Agotamiento del oxígeno en el ciclo diario, especialmente en el hipolimnio.
- Producción de olores desagradables.
- Producción de toxinas.
- Mal sabor del agua.
- Mortandad de peces.
- Pérdida de la biodiversidad en el ecosistema.
- Aumento de la sedimentación.
- Reducción de la vida útil de los embalses.
- Problemas estéticos del ecosistema acuático.
- Proliferación de organismos patógenos y vectores
- Aumento del riesgo a la salud de los usuarios.

OBJETIVO GENERAL

A partir de información secundaria y de los resultados del monitoreo del embalse Peñol-Guatapé realizado durante el año 2018, aplicar diferentes índices de estado trófico y establecer el más adecuado para las condiciones de este embalse.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información secundaria disponible sobre metodologías para establecer el estado trófico de embalses tropicales.
- A partir de los resultados de los procedimientos más utilizados para establecer el estado trófico de los ambientes acuáticos de zonas templadas y tropicales proponer una metodología para determinar el estado trófico en el embalse Peñol-Guatapé.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El embalse El Peñol-Guatapé, también conocido como el embalse de El Peñol, operado por las Empresas Públicas de Medellín, está localizado en una zona batolítica en el oriente del departamento de Antioquia en la latitud 6°13'20"N y la longitud 75°10'16"W, a 50 km de Medellín y a una altura de 1887,5 msnm (Uribe y Roldán, 1975; Roldán et al., 1984; Ramírez, 1986; Aguirre et al., 2007) El principal tributario del embalse es el río Rionegro, con un caudal promedio de 50 m³/s; otros de los afluentes del embalse son: por su margen derecha las quebradas San Miguel, La Magdalena, San Lorenzo y Cucurucho; por su margen izquierda, las quebradas La Culebra, Santa Marina, San Pedro y La Candelaria; y por su extremo sur la quebrada Peñolcito (Roldán et al., 1984; Ramírez, 1986) El volumen del embalse en su cota máxima es de 1240 millones de metros cúbicos, tiene una longitud y un ancho máximo de 7,25 km y 5 km respectivamente; Cubre un área total de 6240 hectáreas, la profundidad máxima del embalse es de 43 m, la profundidad promedio es de 27,5 m, tiene un tiempo de retención hidráulica de 285 días y el área de la cuenca en el sitio de la presa es de 1210 km². Respecto al clima de la región, corresponde al tipo de clima de las montañas tropicales, donde hay baja variación de la temperatura a lo largo del año debido a la baja latitud pero variaciones relativamente altas de esta durante un período de 24 horas. (Roldán et al., 1984; Ramírez, 1986; Aguirre et al., 2002; Aguirre et al., 2007)

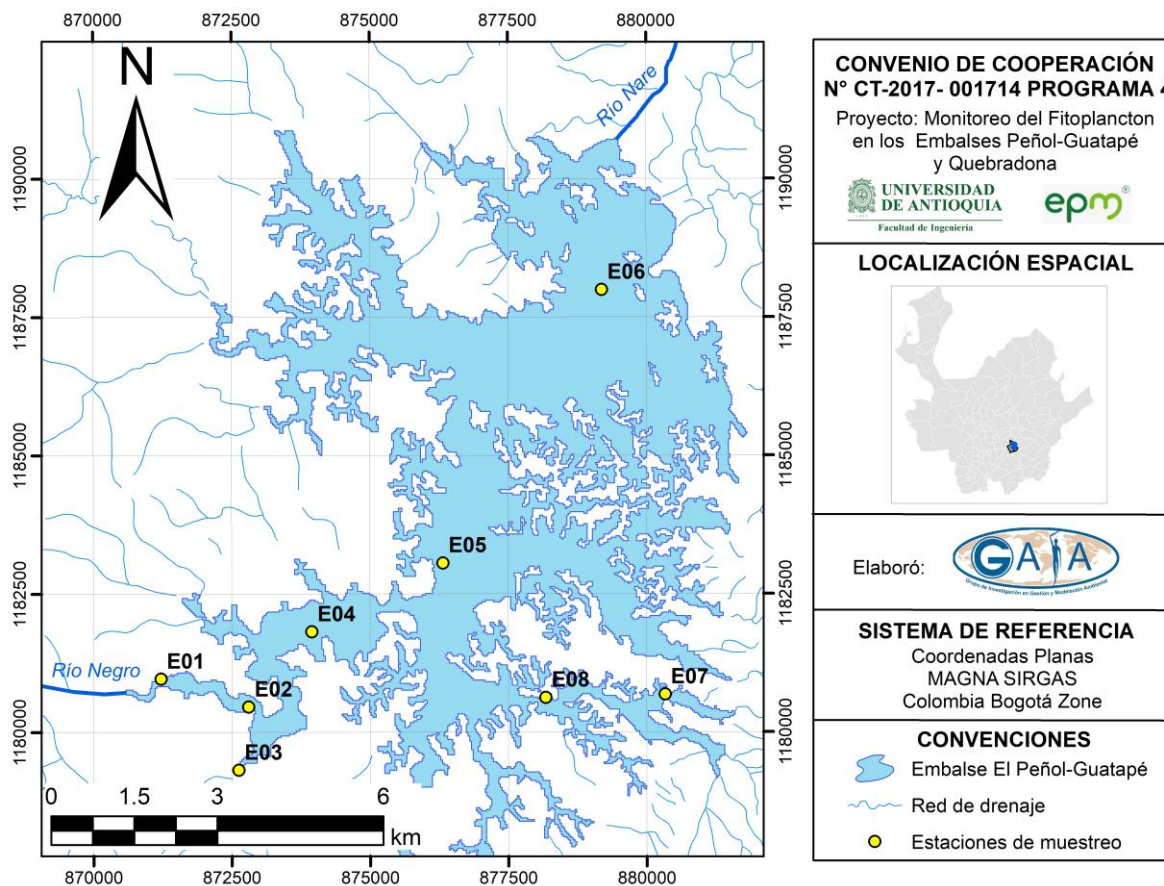


Figura 1. Ubicación del embalse Peñol-Guatapé.

Recopilación de información secundaria

Con el fin de realizar la búsqueda, sistematización y análisis de información secundaria sobre metodologías utilizadas para estimar el estado trófico en ambientes acuáticos de zonas tropicales y ecosistemas acuáticos lénticos, se utilizaron bases de datos bibliográficas como Bio One, Nature, SciFinder, Scielo, Science Direct, Scopus, entre otras, usando como palabras clave para la búsqueda de información eutrophication, nutrients, reservoir, tropical/subtropical aquatic systems, trophic state, etc.

Muestreo

Las muestras fueron tomadas con una periodicidad mensual desde enero a diciembre de 2018 (Tabla 1) en 8 estaciones ubicadas dentro del embalse en las coordenadas presentadas en la Tabla 2. En cada estación se midió *in situ* la profundidad Secchi y se calculó el límite de la zona fótica mediante el producto de la profundidad Secchi y 2,7. Además, se midieron la temperatura, oxígeno

disuelto, pH y conductividad eléctrica por medio de un equipo multiparamétrico y la clorofila “a” con un fluorómetro. Para la estimación de los nutrientes en el laboratorio se tomaron muestras integradas de agua en la zona fótica con una botella muestreadora tipo Van Dorn. Las muestras fueron almacenadas en refrigeración y transportadas al laboratorio inmediatamente después de concluido el muestreo, con el fin de cumplir el tiempo máximo de almacenamiento recomendado para cada variable.

Tabla 1. Fechas de los monitoreos realizados en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Fecha |
|-----------------|-----------------------|
| 1 | 29 y 30 de enero |
| 2 | 26 y 27 de febrero |
| 3 | 20 y 21 de marzo |
| 4 | 23 y 24 de abril |
| 5 | 28 y 29 de mayo |
| 6 | 18 y 19 de junio |
| 7 | 23 y 24 de julio |
| 8 | 21 y 22 de agosto |
| 9 | 23 y 24 de septiembre |
| 10 | 22 y 23 de octubre |
| 11 | 19 y 20 de noviembre |
| 12 | 3 y 4 de diciembre |

Tabla 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo embalse Peñol-Guatapé.

| Estación | Descripción | Latitud | Longitud |
|-----------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1 | Brazo Rio Nare | 6°13'52.8" N | 75°14'28.0" W |
| 2 | Puente Alemania | 6° 13'36.4" N | 75°13'36.4" W |
| 3 | Puente Hondita | 6° 12'59.3" N | 75°13'42.2" W |
| 4 | Uvital | 6°14'20.7" N | 75°12'59.4" W |
| 5 | Isla del patrullero | 6°15'01.3" N | 75°11'42.3 W |
| 6 | Aireadores | 6°17'42.3" N | 75°10'09.1" W |
| 7 | PTAR Guatapé | 6°13'44.3" N | 75°09'31.6" W |
| 8 | Parque acuático | 6°13'42.3" N | 75°10'41.7" W |

La concentración de los nutrientes se cuantificó en el Laboratorio de Control de Calidad de Aguas de EPM, exceptuando fósforo total y ortofosfatos que fueron determinados en el laboratorio de fisicoquímica del grupo GAIA de la Universidad de Antioquia. En la Tabla 3 se ilustran las variables fisicoquímicas medidas, el método de análisis y el tratamiento de las muestras.

Tabla 3. Tratamiento y métodos de análisis de las muestras.

| Variable | Equipo | Tratamiento de la muestra | Método | Laboratorio |
|------------------------|----------------------------------|---|---------------------------------|---------------------|
| Nitratos (mg/L) | Cromatografía iónica | Recipiente plástico ámbar. | SW-846 US EPA 6500 (1998) | Control calidad EPM |
| Nitritos (mg/L) | Colorimétrico | Recipiente plástico ámbar | SM-4500 NO ₂ -B | |
| Nitrógeno total (mg/L) | Macro Kjeldahl | Fijación con H ₂ SO ₄ hasta pH<2. | 4500-Norg-B | |
| Ortofosfatos (mg/L) | Colorimétrico Ácido ascórbico | Recipiente de vidrio ámbar y lavado con HCl 10%. | SM-4500-P-E | GAIA |
| Fósforo total (mg/L) | Colorimétrico Ácido ascórbico | Recipiente de vidrio ámbar, lavado con HCl 10%. Fijación con H ₂ SO ₄ hasta pH<2. | SM-4500-P-E | |

ANÁLISIS DE DATOS

Los resultados de cada variable medida en las estaciones de monitoreo fueron utilizadas para calcular los índices de estado trófico de acuerdo a los requerimientos de información de cada uno. Los índices evaluados fueron:

- Índice de Estado trófico (TSI) de Carlson (1977)
- Índice propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OECD (1982).
- Índice de Carlson modificado por Toledo (1983)
- Índice de Estado Trófico basado en el coeficiente de atenuación (K)
- Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Lamparelli (2004)
- Índice de Estado Trófico de Cunha et al. (2013)

RESULTADOS

Revisión bibliográfica

Existen diferentes metodologías para evaluar el estado trófico de los ecosistemas acuáticos como el análisis de las macrófitas y del fitoplancton, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el uso de índices de estado trófico, entre otros (Moreno et al., 1996). Los índices de estado trófico son considerados indicadores matemáticos que permiten calcular el estado trófico de un cuerpo de agua (López y Madroño, 2015), algunos de los índices propuestos se presentan a continuación.

Índice de Estado trófico (TSI) de Carlson (1977).

Este índice fue propuesto para lagos y embalses de regiones templadas, se fundamenta en el fósforo total, la clorofila *a* y la transparencia del agua (Mercante y Tucci-Moura, 1999). Para la definición de este índice, el autor tomó como concepto clave la biomasa de fitoplancton, dado el interés público por la problemática del florecimiento de algas (Carlson, 1977). Con el fin de formular las ecuaciones para cuantificar este índice, Carlson (1977) estableció como criterio de división de las categorías de estado trófico la duplicación de la biomasa del fitoplancton, puesto que una duplicación de la biomasa de fitoplancton podría traer como consecuencia la reducción de la transparencia. La biomasa de fitoplancton y la transparencia del agua medida con el disco Secchi se relacionan por medio de la ecuación de extinción vertical de la luz en el agua, que corresponde a:

$$I_z = I_0 e^{-(k_w + k_b)z} \quad [1]$$

Dónde:

I_z = Intensidad de la luz en la profundidad a la cual el disco Secchi desaparece.

I_0 = Intensidad de la luz que llega a la superficie del agua.

k_w = Coeficiente de atenuación de la luz por el agua y las sustancias disueltas.

k_b = Coeficiente de atenuación de la luz por material particulado.

z = Profundidad a la cual el disco Secchi desaparece.

$$k_b = \alpha C \quad [2]$$

Donde α tiene unidades de $m^2 mg^{-1}$ y C es la concentración de material particulado en $mg m^{-3}$.

Reemplazando la ecuación [2] en [1] y reordenando los términos de la ecuación [1], se obtuvo la siguiente ecuación lineal:

$$\left(\frac{1}{z}\right) \left(\ln \left(\frac{I_0}{I_z}\right)\right) = k_w + \alpha C \quad [3]$$

De acuerdo a la ecuación 3 la transparencia Secchi es inversamente proporcional a la suma de la absorbancia de la luz por el agua y por las sustancias disueltas (K_w) y la concentración del material particulado en el agua (C).

Teniendo en cuenta que la duplicación en la biomasa de fitoplancton implica una reducción a la mitad de transparencia del sistema, los valores de la transparencia del disco Secchi son transformados al logaritmo en base dos (\log_2), considerando que cada duplicación de la biomasa corresponde a un entero en los valores de la transparencia así: 1, 2, 4, 8 m, etc. (Carlson, 1977). Para definir el cero en la escala de las categorías del índice, se tuvo en cuenta el máximo valor de transparencia Secchi reportado, el cual corresponde a la profundidad del Lago Masyuko, Japón de 41,6 m (Hutchinson, 1957). A partir de esta cifra se buscó el \log_2 del valor superior entero de transparencia más próximo, el cual corresponde al \log_2 de 64 m. El resultado de esta operación fue restado del valor indexado de 6 para obtener un rango del índice de estado trófico (TSI) entre 0 y 64 m. Finalmente, el resultado de la sustracción anterior es multiplicado por 10 para obtener valores en el rango de 0 a 100 y la ecuación (Carlson, 1977):

$$TSI = 10(6 - \log_2 SD) \quad [4]$$

Adicionalmente, se aplicaron regresiones lineales transparencia Secchi-clorofila "a" y transparencia Secchi-fosforo total a partir de la información disponible. A los resultados de clorofila se les aplicó una transformación log-log para lograr un ajuste lineal. El fosforo total se podría correlacionar mejor con la transparencia cuando este sea el factor limitante. Finalmente, el \log_2 fue transformado en \ln para obtener las siguientes ecuaciones:

$$TSI (SD) = 10 \left(6 - \frac{\ln SD}{\ln 2} \right) \quad [5]$$

$$TSI (Chl) = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,68 \ln Chl}{\ln 2} \right) \quad [6]$$

$$TSI (TP) = 10 \left(6 - \frac{\ln \frac{48}{TP}}{\ln 2} \right) \quad [7]$$

En la Tabla 4 se ilustran las categorías del TSI de Carlson (1977).

Tabla 4. Índice de estado trófico y sus parámetros asociados.

| TSI | Disco Secchi (m) | Fosforo superficial (mg/m³) | Clorofila superficial (mg/m³) |
|------------|-------------------------|---|---|
| 0 | 64 | 0,75 | 0,04 |
| 10 | 32 | 1,5 | 0,12 |
| 20 | 16 | 3 | 0,34 |
| 30 | 8 | 6 | 0,94 |
| 40 | 4 | 12 | 2,6 |
| 50 | 2 | 24 | 6,4 |
| 60 | 1 | 48 | 20 |
| 70 | 0,5 | 96 | 56 |
| 80 | 0,25 | 192 | 154 |
| 90 | 0,12 | 384 | 427 |
| 100 | 0,062 | 768 | 1183 |

Debido a que Carlson (1977) no definió una escala de estados tróficos, Kratzer y Brezonick (1981) propusieron la escala presentada en la Tabla 5 (Mercante y Tucci-Moura, 1999):

Tabla 5. Categorías del estado trófico del TSI.

| | |
|--------------------|---------|
| Ultra-oligotrófico | <20 |
| Oligotrófico | 21 – 40 |
| Mesotrófico | 41 – 50 |
| Eutrófico | 51 – 60 |
| Hipereutrófico | >60 |

Índice de Estado trófico de Carlson modificado por Kratzer y Brezonik (1981).

Después de evaluar el índice de estado trófico propuesto por Carlson (1977) y haciendo uso de los datos proporcionados por la Encuesta Nacional de Eutrofización (NES, 1978) de los lagos de Florida, Estados Unidos, Kratzer y Brezonik (1981) encontraron que los resultados del TSI (TP) fueron significativamente diferentes a los obtenidos con el TSI (SD) y TSI (CHA) para estos datos. Esta situación se asoció con las concentraciones extremadamente

altas de fósforo en los lagos y con la limitación por nitrógeno en un gran número de ellos (Kratzer y Brezonik, 1981). A partir de esta situación Kratzer y Brezonik (1981) propusieron una modificación del índice de Carlson para los lagos de Florida limitados por nitrógeno (Studer, 2007; Moreno y Ramírez, 2010) con base en una concentración crítica de clorofila “a” de 10 µg/L para “delimitar las condiciones eutróficas en los lagos” (Zabala, 2013) y para plantear la ecuación por medio de una regresión entre clorofila “a” y nitrógeno total.

La ecuación de TSI (TN), hace uso de un enfoque matemático similar al empleado por Carlson (1977), dicha ecuación estaba centrada alrededor de un valor de TSI de 60, donde un aumento en 10 unidades en la TSI representa una duplicación de la concentración de nitrógeno total [mg N/L], la ecuación final del índice de Kratzer y Brezonik (1981) es:

$$TSI (TN) = 10 \left(6 - \frac{\ln \left(\frac{1,47}{TN} \right)}{\ln 2} \right) \quad [8]$$

Dónde,

TN = Concentración de nitrógeno total [mg N/L]

Para el cálculo del TSI promedio (TSI (AVG)) y el sistema de clasificación de estado trófico, los autores plantean algunas consideraciones y los rangos de clasificación que se muestran en la Tabla 6.

$$\text{Si } TSI (TP) \geq TSI (TN), \quad TSI (AVG) = \frac{[TSI (SD)+TSI (CHA)+TSI (TN)]}{3} \quad [9]$$

$$\text{Si } TSI (TP) < TSI (TN), \quad TSI (AVG) = \frac{[TSI (SD)+TSI (CHA)+TSI (TP)]}{3} \quad [10]$$

Tabla 6. Valores de TSI, de estado trófico y de indicadores.

| TSI | Estado Trófico | Transparencia del agua (Disco Secchi, m) | Clorofila a (µg/L) | Fósforo Total (µg P/L) | Nitrógeno Total (mg P/L) |
|------------|-----------------------|---|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 0 | Ultraoligotrófico | 64 | 0,04 | 0,75 | 0,02 |
| 10 | | 32 | 0,12 | 1,5 | 0,05 |
| 20 | | 16 | 0,34 | 3 | 0,09 |
| 30 | Oligotrófico | 8 | 0,94 | 6 | 0,18 |
| 40 | | 4 | 2,6 | 12 | 0,37 |

| | | | | | |
|-----|----------------|------|------|-----|------|
| 45 | Mesotrófico | 2,8 | 5 | 17 | 0,52 |
| 50 | | 2 | 7,3 | 24 | 0,74 |
| 53 | Eutrófico | 1,6 | 10 | 30 | 0,92 |
| 60 | | 1 | 20 | 48 | 1,47 |
| 70 | Hipereutrófico | 0,5 | 56 | 96 | 2,94 |
| 80 | | 0,25 | 154 | 192 | 5,89 |
| 90 | | 0,12 | 427 | 384 | 11,7 |
| 100 | | 0,06 | 1183 | 768 | 23,6 |

Los valores de *TSI (SD)*, *TSI (CHA)* y *TSI (TP)* corresponden a los resultados obtenidos mediante las ecuaciones propuestas por Carlson (1977) para transparencia, clorofila a y fósforo total respectivamente. En la tabla 7 se ilustran los intervalos de estado trófico planteados por Kratzer y Brezonik (1981).

Tabla 7. Categorías de estado trófico propuestos por Kratzer y Brezonik (1981).

| | |
|--------------------|---------|
| Ultra-oligotrófico | <20 |
| Oligotrófico | 21 – 40 |
| Mesotrófico | 41 – 50 |
| Eutrófico | 51 – 60 |
| Hipereutrófico | >61 |

Índice de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OECD (1982).

Esta Organización propuso una clasificación del estado trófico de lagos y embalses a partir de información de 200 ambientes acuáticos de 22 países de Europa occidental, Estados Unidos, Japón y Australia. El estudio fue realizado bajo la dirección de Vollenweider, se extendió durante cinco años y permitió crear “una clasificación del grado de eutrofia” (López y Madroño, 2015). Además tuvo como propósito crear un lenguaje común acerca de los parámetros de interés, tanto por su simplicidad como por su significado biológico, que permitieran un “análisis estadísticos reproducibles” (Janus y Vollenmeider, 1982), citados por (López y Madroño, 2015).

El esquema cuantitativo probabilístico proporcionado por esta clasificación permite categorizar el estado trófico del sistema por medio de la concentración de clorofila “a”, que corresponde a la capacidad de generar biomasa la concentración de fósforo, que representa el análisis de los nutrientes y la transparencia de la columna, que representa el espectro fotosintético disponible en la vertical de la columna de agua (López y Madroñero, 2015). La OECD (1982) utiliza el promedio anual de fósforo total, la cantidad de clorofila presente en la zona eufótica, la clorofila “a” máxima y media anual y el valor promedio y mínimo anual de la transparencia. Por otra parte, el índice proporciona una clasificación entre 0 y 100 y considera 5 categorías tróficas.

Tabla 8. Categorías de estado trófico de la OECD, 1982.

| Categoría trófica | Promedio fósforo total (µg/L) | Clorofila a media (µg/L) | Clorofila a máxima (µg/L) | Profundidad media disco Secchi (m) | Profundidad mínima disco Secchi (m) |
|-------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Ultraoligotrófico | < 4 | < 1 | < 2,5 | > 12 | > 6 |
| Oligotrófico | 4 – 10 | 1 - 2,5 | 2,5 – 8 | 12 – 6 | 6 – 3 |
| Mesotrófico | 10 – 35 | 2,5 – 8 | 8 – 25 | 6 – 3 | 3 - 1,5 |
| Eutrófico | 35 – 100 | 8 – 25 | 25 – 75 | 3 - 1,5 | 1,5 - 0,7 |
| Hipereutrófico | > 100 | > 25 | > 75 | < 1,5 | < 0,7 |

Índice de Carlson modificado por Toledo (1983).

El índice de estado trófico propuesto por Toledo et al., (1983) se basa en el índice planteado por Carlson (1977) y en el trabajo desarrollado por Vollenweider (1976), las variables utilizadas en este índice son la transparencia Secchi, el fósforo total, el fósforo soluble reactivo y la clorofila “a” (Moreno y Ramírez, 2010). Toledo et al., (1983) empleó datos del embalse Barra Bonita, ubicado en el estado de Sao Paulo, para plantear un nuevo coeficiente de sedimentación (K_s) que se ajustara a climas subtropicales y tropicales y evaluar la inclusión de los ortofosfatos (Studer, 2007).

$$(P) = \frac{L(P)}{Z \left(\frac{1}{T_w} + K_s \right)} \quad [11]$$

Donde,

$L(P)$ = Carga de fósforo por unidad de área del embalse ($ML^{-2}T^{-1}$)

T_w = Tiempo de residencia hidráulica (T)

Z = Profundidad media (L)

K_s = Coeficiente de sedimentación del fósforo (T^{-1})

La ecuación 11, planteada por Vollenweider, presentaba inconvenientes debido a la dificultad en el cálculo del coeficiente de sedimentación (K_s), que representa las pérdidas de fósforo a través de procesos de sedimentación, transporte de efluentes de embalses, asimilación biológica y mecanismos de transformación química (Florencio y Santos, 2000). En consecuencia, Toledo et al., (1983) estimaron un nuevo K_s que implicó un aumento en 1.7 veces la velocidad de sedimentación del fósforo considerada en la expresión original, provocando que el tiempo de retención hidráulica necesaria para que el embalse alcanzara el estado estacionario fuera 19 veces menor que el estimado inicialmente (Mercante y Tucci-Moura, 1999). Basados en el nuevo K_s y en los promedios mensuales de clorofila “a” calculados para el embalses entre 1978 a 1980, los autores redefinieron las cargas críticas para clorofila, fósforo y fósforo soluble reactivo (PO_4). Además redefinieron las cargas críticas para una profundidad Secchi “tomando como base los nuevos valores de cargas permisibles y excesivas de fósforo total e inorgánico disuelto” y “plantearon una nueva clasificación limnológica del estado trófico para Barra Bonita” (Mercante y Tucci-Moura, 1999). Finalmente, se modificaron las ecuaciones para el cálculo el índice de estado trófico de Carlson (1977) de la siguiente forma:

$$IET(DS) = 10 \left(6 - \frac{0,64 + \ln DS}{\ln 2} \right) \quad [12]$$

$$IET(CHL) = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln CHL}{\ln 2} \right) \quad [13]$$

$$IET(PSR) = 10 \left(6 - \frac{\ln \left(\frac{21,67}{PSR} \right)}{\ln 2} \right) \quad [14]$$

$$IET(PT) = 10 \left(6 - \frac{\ln \left(\frac{80,32}{PT} \right)}{\ln 2} \right) \quad [15]$$

Donde,

- $IET(DS)$ = Índice de Estado Trófico para el disco Secchi [m]
- $IET(CHL)$ = Índice de Estado Trófico para la clorofila “a” [$\mu g / L$]
- $IET(PT)$ = Índice de Estado Trófico para el fósforo total [$\mu g / L$]
- $IET(PSR)$ = Índice de Estado Trófico para el fosforo soluble reactivo [$\mu g / L$]

De acuerdo con Toledo et al., (1983) la ecuación para la profundidad Secchi no representaba de manera adecuada el valor límite del estado oligotrófico y

consideraron esta variable poco representativa del estado trófico como resultado de la alta turbidez mineral en el embalse. En consecuencia, para el cálculo de la media ponderada le asignaron un menor peso al índice de la profundidad Secchi (Mercante y Tucci-Moura, 1999; Zabala, 2013). La ecuación propuesta fue:

$$\overline{IET} = \frac{IET(DS)+2 [IET(PT)+IET(PSR)+IET(CHL)]}{7} \quad [16]$$

Las categorías de estado trófico se ilustran en la Tabla 9.

Tabla 9. Categorías de estado trófico propuestas por Toledo et al., (1983).

| | |
|--------------|----------|
| Oligotrófico | IET < 44 |
| Mesotrófico | 44 - 54 |
| Eutrófico | IET > 54 |

Índice de Estado trófico de Salas y Martino (CEPIS), (1988).

Debido a la falta de metodologías para evaluar la eutrofización en lagos y embalses tropicales, desde 1981 se realizó un proyecto regional para el desarrollo de metodologías simplificadas para la evaluación de la eutrofización en lagos cálidos tropicales, coordinado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS) (Salas y Martino, 1988, 1991) En el proyecto participaron 15 países con información sobre 40 lagos cálidos tropicales, incluyendo dos embalses que se ajustaban al concepto extremo de lago cálido tropical, definido como “temperatura mínima de 10°C durante condiciones normales y un promedio anual mínimo de 15°C” (Salas y Martino, 1988).

Los muestreos se realizaron en los lagos, embalses y en sus principales tributarios durante un año con una periodicidad mensual (Salas y Martino, 2001), incluyeron información física (área superficial, volumen, profundidad, temperatura del aire y del agua, caudal, etc.), química (pH, fósforo total, ortofosfatos, nitrógeno total), y biológica (productividad primaria, clorofila “a”), entre otras. Además, se evaluó la limitación de nitrógeno (N_{λ}) y fósforo (P_{λ}) en los lagos usando la relación $N_{\lambda}:P_{\lambda} = 9:1$ propuesta por Vollenweider (1983) y se encontró que la mayoría de los lagos presenta limitación por fósforo (Salas y Martino, 1988).

Algunos de los datos de los embalses y lagos fueron descartados por no cumplir con las características requeridas por el proyecto, debido a esto para el desarrollo del modelo de fósforo total se utilizaron 39 datos correspondientes a 27 lagos y embalses, estos datos fueron transformados a logaritmo natural previo a los análisis estadísticos. Mediante la aplicación de dos tipos de relaciones, tipo

balance de masa para fósforo total y relaciones totalmente empíricas, se desarrollaron los modelos simplificados a partir de los cuales se realizaron regresiones lineales múltiples para fósforo total. Por medio de “un análisis de la varianza de los errores de las estimaciones, se comprobó que las ecuaciones de balance de masa y empírica, se pueden usar indistintamente a un nivel de confianza de 95%” (Salas y Martino, 1988), de acuerdo a esto se reorganizó la ecuación empírica y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$P_{\lambda} = \frac{L(P)}{\bar{Z}} \frac{T_w^{3/4}}{3} \quad [17]$$

Donde,

- P_{λ} = Fósforo total (mg/L)
- $L(P)$ = Aporte de fósforo total (mg/m²año)
- \bar{Z} = Profundidad promedio (m)
- T_w = Tiempo de retención hidráulica (años)
- K_s = Tasa de sedimentación (L/años)

Para la clasificación de estado trófico, se utilizó un sistema de distribución probabilístico condicional, resultante de la aplicación de la fórmula de Bayes a cada una de las distribuciones normales de las categorías tróficas (Salas y Martino, 2001), así:

$$P (CT_i/X) = \frac{P(CT_i) \cdot P (X/CT_i)}{\sum P (CT_i) \cdot P (X/CT_i)} \quad [18]$$

Donde,

$$\frac{P (X/CT_i)}{\sum P (X/CT_i)} = \frac{Y (CT_i)}{\sum Y (CT_i)} \quad [19]$$

- CT_i = Categorías del estado trófico
- X = Logaritmo de (P_{λ})
- $P (X/CT_i) = Y (CT_i)$ = Distribución normal de probabilidad [Y(HE) Hipereutrófico, Y(E) Eutrófico, Y(M) Mesotrófico, Y(O) Oligotrófico y Y(UO) Ultraoligotrófico]
- $\sum Y (CT_i)$ = Suma de todas las distribuciones.

A partir de la concentración de fosforo y mediante la figura 2 se determinó la probabilidad de que el lago o embalse pertenezca a una de las categorías.

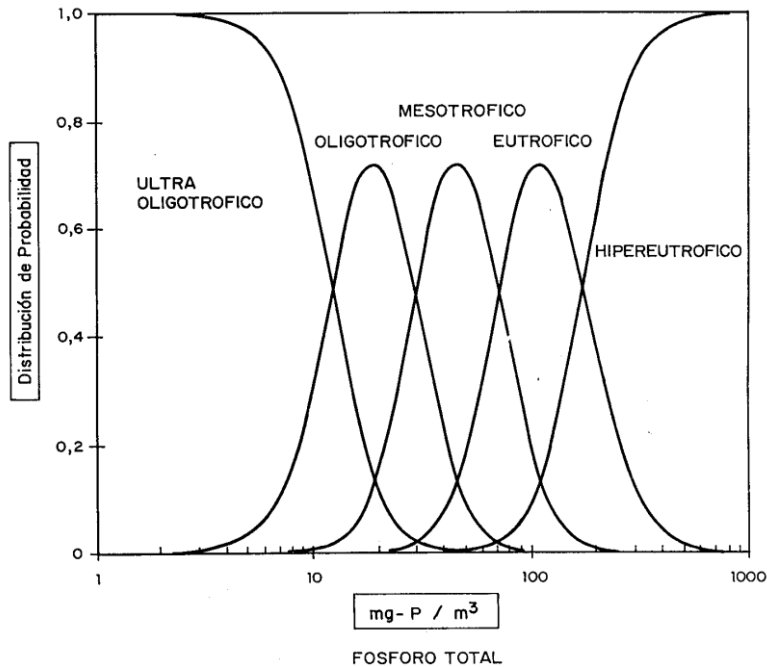


Figura 2. Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basados en fosforo total (Salas y Martino, 1988).

Estado Trófico basado en el coeficiente de atenuación (K)

La atenuación de la luz en el agua es la pérdida de su intensidad con la profundidad, la distancia que logra penetrar la luz en el agua está condicionada por la presencia de diversos materiales como sustancias húmicas, sólidos en suspensión, fitoplancton, tripton, etc. En los ambientes acuáticos, la radiación solar afecta la estructura térmica debido a las diferencias en la densidad y el establecimiento del límite vertical de la producción primaria, es decir, el límite de la zona fótica (Ramírez et al., 2015) . El disco Secchi, es el instrumento óptico más usado por su sencillez y rapidez para medir “la transparencia, la profundidad de la zona fótica y los coeficientes de atenuación y de extinción verticales de irradiación descendente” (Ramírez et al., 2015). Poole y Atkins (1929), propusieron una de las primeras relaciones empíricas entre la profundidad Secchi y el coeficiente de atenuación (K) (Ramírez et al., 2015), la cual permite cuantificar el estado trófico del sistema. Con este fin se utilizan los límites propuestos por Esteves (1998) como se ilustra en la Tabla 10 mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{1,7}{Dsd} \quad [20]$$

Donde,

Dsd =Profundidad de disco Secchi (m)

Tabla 10. Límites de estado trófico propuestos por Esteves, (1998), tomado de (Moreno y Ramírez, 2010).

| Tipo de Lagos | K (m ⁻¹) | Limites |
|-----------------------------------|----------------------|--------------|
| Lagos oligotróficos | 0,19 | 0,10 – 0,28 |
| Lagos mesotróficos | 0,53 | 0,28 – 0,90 |
| Lagos eutróficos | 1,86 | 0,97 – 3,20 |
| Lagos ricos en sustancias húmicas | 2,51 | 0,81 – 4,51 |
| Lagos túrbidos | 6,70 | 0,34 – 35,30 |

Índice de estado trófico de Carlson (1977) modificado por Lamparelli (2004).

El índice de estado trófico de Lamparelli es una modificación del índice de estado trófico de Carlson para regiones tropicales, propuesto a partir de la información del Banco de datos de la Red de Monitoreo de Calidad del agua del Estado de São Paulo y elaborado por el CETESB. Se consideraron 69 puntos con una frecuencia de muestreo bimestral entre los años 1996 a 2000. De estos 69 puntos, 35 estaban ubicados en ambientes lóticos y 34 en ambientes lentos (Lamparelli, 2004). Se consideraron únicamente la Clorofila “a” y el fósforo total, debido a la alta turbiedad del agua en estos ambientes (da Costa Lobato et al., 2015). En (Mussi et al., 2010 y Gomes et al., 2016) se presentan las ecuaciones y los criterios de la clasificación trófica para este índice.

$$TSI(SD) = 10 \left[6 - \left(\frac{\ln(SD)}{\ln 2} \right) \right] \quad [21]$$

$$TSI(Cla) = 10 \left[6 - \left(\frac{0,92 - 0,34 \ln(Chl)}{\ln 2} \right) \right] \quad [22]$$

$$TSI(TP) = 10 \left[6 - \left(\frac{1,77 - 0,42 \ln(TP)}{\ln 2} \right) \right] \quad [23]$$

$$TSI = \frac{TSI(TP) + TSI(Chl)}{2} \quad [24]$$

Donde,

SD = Disco Secchi (m)

Chl = Clorofila a ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

TP = Fósforo total ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

Tabla 11. Clasificación de estado trófico propuesto por Lamparelli (2004). Tomado de (Mussi et al., 2010 y Gomes et al., 2016).

| Estado Trófico | Fosforo total ($\mu\text{g/L}$) | Clorofila a ($\mu\text{g/L}$) | Criterio (TSI) |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Ultraoligotrófico | $PT \leq 8$ | $Chl \leq 1,17$ | ≤ 47 |
| Oligotrófico | $8 < PT \leq 19$ | $1,17 < Chl \leq 3,24$ | $47 < TSI \leq 52$ |
| Mesotrófico | $19 < PT \leq 52$ | $3,24 < Chl \leq 11,03$ | $52 < TSI \leq 59$ |
| Eutrófico | $52 < PT \leq 120$ | $11,03 < Chl \leq 30,55$ | $59 < TSI \leq 63$ |
| Supereutrófico | $120 < PT \leq 233$ | $30,55 < Chl \leq 69,05$ | $63 < TSI \leq 67$ |
| Hipereutrófico | $PT > 233$ | $Chl > 69,05$ | > 67 |

Índice de estado trófico de Cunha et al. (2013)

Para este índice los autores utilizaron información de 18 embalses tropicales y subtropicales (931 datos de fosforo total, 848 de Clorofila “a” y 204 de transparencia Secchi) en el estado de Sao Paulo y desde 1996 hasta 2009. Las muestras para fosforo total (TP) y clorofila “a” (Chl) fueron tomadas en la superficie del agua, además se midió la transparencia Secchi. Para la estimación de los resultados se utilizaron las medias geométricas anuales de las variables en cada embalse mediante la siguiente ecuación:

$$Gmean = \sqrt[n]{x_1 x_2 x_3 \dots x_n} \quad [25]$$

Las medias aritméticas de Chl “a” y de TP se organizaron en orden ascendente y se agruparon en 5 subconjuntos de datos, estos subconjuntos fueron ultraoligotrófico (percentiles 0-20), oligotrófico (percentiles (20-40), mesotrófico (percentiles 40-60), eutrófico (percentiles 60-80) y supereutrófico (percentiles 80-100). Para definir la categoría “hipereutrófico” se utilizaron las medias anuales de TP y Chl de los embalses Billings y Barra Bonita por ser los más degradados, estos valores se establecieron como el límite inferior para esta categoría del estado trófico. Se calculó la probabilidad de ocurrencia de episodios individuales de Chl, que excedieran 10 $\mu\text{g/L}$, 30 $\mu\text{g/L}$ y 50 $\mu\text{g/L}$, y de concentraciones de TP que superaran 30 $\mu\text{g/L}$ y 50 $\mu\text{g/L}$, en cada una de las categorías. Por otra parte, se

realizaron regresiones lineales entre TP-Chl “a” y Chl “a”-DS con un nivel de confianza de 99% y los resultados fueron sustituidos en las ecuaciones del índice de Carlson (1977) para obtener las siguientes ecuaciones:

$$TSI (TP)_{tsr} = 10 \left[6 - \left(\frac{-0.27637 \ln TP + 1,329766}{\ln 2} \right) \right] \quad [26]$$

$$TSI (Chla)_{tsr} = 10 \left[6 - \left(\frac{-0.2512 \ln Chla + 0,842257}{\ln 2} \right) \right] \quad [27]$$

Por otra parte, se establece un promedio entre los resultados del índice para TP y Chla de acuerdo a la siguiente ecuación (Cunha et al., 2013):

$$TSI_{tsr} = \frac{TSI(TP)_{tsr} + TSI(Chla)_{tsr}}{2} \quad [28]$$

Las categorías de los estados tróficos planteados por el índice se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Categorías de estado trófico de Cunha et al., 2013.

| Categoría de estado trófico | Media geométrica anual de clorofila a (µg/L) | Media geométrica anual del fósforo total (µg/L) | TSI_{tsr} |
|------------------------------------|---|--|--------------------------|
| Ultraoligotrófico | ≤2,0 | ≤15,9 | ≤51,1 |
| Oligotrófico | 2,1 - 3,9 | 16,0 – 23,8 | 51,2 – 53,1 |
| Mesotrófico | 4,0 – 10,0 | 23,9 – 36,7 | 53,2 – 55,7 |
| Eutrófico | 10,1 – 20,2 | 36,8 – 63,7 | 55,8 – 58,1 |
| Supereutrófico | 20,3 – 27,1 | 63,8 – 77,6 | 58,2 – 59,0 |
| Hipereutrófico | ≥27,2 | ≥77,7 | ≥59,1 |

Estimación del estado trófico

Las variables físicas, químicas y biológicas medidas *in situ* y en el laboratorio empleadas para estimar los índices de estado trófico se presentan en las Tablas 13 a 20. En la estación 1 (Tabla 13) el menor valor de transparencia Secchi se presentó en febrero (0,6 m) y el mayor en septiembre (3,3 m). Por su parte, la clorofila a varió entre 1,15 µg/L en enero y 26,45 µg/L en febrero. Mientras el fósforo total fluctuó entre 17 µg/L en septiembre y 160 µg/L en febrero, los ortofosfatos se mantuvieron por debajo del límite de cuantificación del método (<10 µg/L) en varios muestreos (febrero, abril, julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre) y alcanzaron la mayor concentración en marzo (37 µg/L).

En la estación 2 la transparencia Secchi vario entre 1,7 m en junio y 3,8 m en noviembre (Tabla 14) y la clorofila a se movió entre 3,59 µg/L en enero y 30,90 µg/L en junio. La concentración de fosforo total se mantuvo en el rango entre 14 µg/L en enero y 44 µg/L en octubre. En la mayoría de los muestreos los ortofosfatos permanecieron por debajo de los límites de cuantificación del método, excepto en enero con una concentración de 14 µg/L.

Tabla 13. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 1 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a (µg/L) | Fosforo total (µg/L) | Ortofosfatos (µg/L) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Enero | 1,4 | 1,15 | 63 | 13 |
| Febrero | 0,6 | 26,45 | 160 | <10 |
| Marzo | 0,8 | 13,50 | 149 | 37 |
| Abril | 1,8 | 21,38 | 34 | <10 |
| Mayo | 0,7 | 5,57 | 54 | 14 |
| Junio | 1,5 | 8,26 | 48 | 12 |
| Julio | 1,7 | 7,57 | 25 | <10 |
| Agosto | 1,8 | 9,36 | 30 | <10 |
| Septiembre | 3,3 | 3,65 | 17 | <10 |
| Octubre | 2,3 | 3,13 | 41 | 10 |
| Noviembre | 2,6 | 6,83 | 18 | <10 |
| Diciembre | 3,1 | 11,53 | 22 | 10 |
| Promedio | 1,8 | 9,87 | 55 | - |
| Máximo | 3,3 | 26,45 | 160 | 37 |
| Mínimo | 0,6 | 1,15 | 17 | 10 |
| Desvest | 0,9 | 7,50 | 49 | - |

Tabla 14. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 2 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a (µg/L) | Fosforo total (µg/L) | Ortofosfatos (µg/L) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Enero | 3,0 | 3,59 | 35 | 14 |
| Febrero | 2,3 | 13,03 | 26 | <10 |
| Marzo | 2,2 | 12,17 | 43 | <10 |
| Abril | 2,1 | 27,08 | 36 | <10 |
| Mayo | 3,5 | 5,89 | 33 | <10 |

| | | | | |
|------------|-----|-------|----|-----|
| Junio | 1,7 | 30,90 | 43 | <10 |
| Julio | 2,7 | 8,72 | 27 | <10 |
| Agosto | 2,5 | 7,50 | 18 | <10 |
| Septiembre | 2,6 | 11,54 | 14 | <10 |
| Octubre | 3,4 | 4,88 | 44 | <10 |
| Noviembre | 3,8 | 7,64 | 23 | <10 |
| Diciembre | 3,2 | 13,63 | 21 | <10 |
| Promedio | 2,7 | 12,21 | 30 | - |
| Máximo | 3,8 | 30,90 | 44 | 14 |
| Mínimo | 1,7 | 3,59 | 14 | 14 |
| Desvest | 0,6 | 8,51 | 10 | - |

Los resultados de la estación 3 muestran valores de transparencia desde 1,2 m en marzo y abril hasta 2,3 m en octubre. Mientras los menores valores de clorofila a (8,66 µg/L) y de fosforo total (17 µg/L) se presentaron en septiembre y el mayor en marzo (48,66 µg/L) y febrero (99 µg/L), respectivamente. Únicamente en abril la concentración de ortofosfatos supero el límite de cuantificación del método (13 µg/L) en esta estación.

Tabla 15. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 3 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a (µg/L) | Fosforo total (µg/L) | Ortofosfatos (µg/L) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Enero | 2,0 | 16,16 | 37 | <10 |
| Febrero | 1,3 | 35,68 | 99 | <10 |
| Marzo | 1,2 | 48,66 | 66 | <10 |
| Abril | 1,2 | 27,9 | 88 | 13 |
| Mayo | 1,6 | 28,93 | 41 | <10 |
| Junio | 2,1 | 11,20 | 32 | <10 |
| Julio | 2,2 | 15,12 | 30 | <10 |
| Agosto | 2,2 | 14,40 | 30 | <10 |
| Septiembre | 2,2 | 8,66 | 17 | <10 |
| Octubre | 2,3 | 24,18 | 32 | <10 |
| Noviembre | 2,1 | 17,98 | 25 | <10 |
| Diciembre | 2,1 | 25,66 | 29 | <10 |
| Promedio | 1,9 | 22,88 | 44 | - |
| Máximo | 2,3 | 48,66 | 99 | 13 |

| | | | | |
|---------|-----|-------|----|----|
| Mínimo | 1,2 | 8,66 | 17 | 13 |
| Desvest | 0,4 | 11,44 | 26 | - |

Los resultados de la estación 4 (Tabla 16) indicaron un menor valor de transparencia Secchi en agosto (2,4 m) y un mayor valor en octubre (4,5 m). En contraste, en este último mes se registró la mínima concentración de clorofila a (2,77 µg/L) y en junio la máxima (7,26 µg/L), en marzo no se tuvo información para esta variable. Los valores de fósforo total se movieron entre 12 (abril y noviembre) y 26 µg/L (agosto) y en septiembre se presentó un valor por debajo del límite de cuantificación del método. Por otra parte, únicamente en enero se registró un valor de ortofosfatos superior al límite de cuantificación (20 µg/L)

Tabla 16. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 4 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a (µg/L) | Fósforo total (µg/L) | Ortofosfatos (µg/L) |
|------------|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| Enero | 4,4 | 3,82 | 14 | 20 |
| Febrero | 4,2 | 3,37 | 25 | <10 |
| Marzo | 3,6 | S.I | 14 | <10 |
| Abril | 3,0 | 4,86 | 12 | <10 |
| Mayo | 3,1 | 5,95 | 13 | <10 |
| Junio | 3,0 | 7,26 | 13 | <10 |
| Julio | 2,8 | 7,18 | 13 | <10 |
| Agosto | 2,4 | 4,93 | 26 | <10 |
| Septiembre | 3,5 | 4,93 | <10 | <10 |
| Octubre | 4,5 | 2,77 | 17 | <10 |
| Noviembre | 4,1 | 3,87 | 12 | <10 |
| Diciembre | 2,9 | 4,10 | 13 | <10 |
| Promedio | 3,5 | 4,82 | 16 | - |
| Máximo | 4,5 | 7,26 | 26 | 20 |
| Mínimo | 2,4 | 2,77 | 12 | 20 |
| Desvest | 0,7 | 1,47 | 5 | - |

En la estación 5 (Tabla 17) la transparencia fluctuó entre 3,0 (mayo) y 4,9 m (abril), la clorofila a entre 0,98 (enero) y 5,40 µg/L (julio) y de fósforo total entre 10 µg/L (enero, marzo y agosto) y 17 µg/L (diciembre). Esta última variable se encontró en varios muestreos (mayo, julio, septiembre, octubre y noviembre) por debajo del límite de cuantificación y la concentración de ortofosfatos solo fue mayor al límite de cuantificación en enero, con un valor de 25 µg/L.

Tabla 17. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 5 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a (µg/L) | Fosforo total (µg/L) | Ortofosfatos (µg/L) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Enero | 4,3 | 0,98 | 10 | 25 |
| Febrero | 3,8 | 4,44 | 15 | <10 |
| Marzo | 4,5 | 3,17 | 10 | <10 |
| Abril | 4,9 | 3,26 | 11 | <10 |
| Mayo | 3,0 | 4,17 | <10 | <10 |
| Junio | 3,6 | 4,24 | 15 | <10 |
| Julio | 3,4 | 5,40 | <10 | <10 |
| Agosto | 3,9 | 4,05 | 10 | <10 |
| Septiembre | 4,5 | 1,92 | <10 | <10 |
| Octubre | 3,2 | 2,61 | <10 | <10 |
| Noviembre | 4,6 | 2,48 | <10 | <10 |
| Diciembre | 3,7 | 2,71 | 17 | <10 |
| Promedio | 3,9 | 3,28 | 13 | - |
| Máximo | 4,9 | 5,40 | 17 | 25 |
| Mínimo | 3,0 | 0,98 | 10 | 25 |
| Desvest | 0,6 | 1,23 | 3 | - |

Como se evidencia en la Tabla 18 en la estación 6 los valores de transparencia oscilaron entre 3,4 (abril) y 6,2 m (julio). Por su parte, la concentración de clorofila vario entre 0,47 µg/L enero y 4,08 µg/L en octubre. Durante siete muestreos (marzo, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre) el fosforo total mostró valores por debajo del límite de cuantificación y alcanzo la máxima concentración en febrero (43 µg/L). Únicamente en enero los ortofosfatos con 11 µg/L se encontraron por encima del límite de cuantificación del método.

Los resultados de la estación 7 (Tabla 19) indican que mientras el menor valor de transparencia Secchi se registró en abril (2,8 m) y el mayor se encontró en julio (4,5 m). Las concentraciones de clorofila a fluctuaron entre 4,07 µg/L en noviembre y 19,28 µg/L en marzo. Por su parte, el fosforo total vario entre 14 en julio y 64 µg/L en diciembre y la concentración de ortofosfatos solo supero el límite de cuantificación en enero (10 µg/L) y marzo (12 µg/L).

Tabla 18. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 6 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a (µg/L) | Fosforo total (µg/L) | Ortofosfatos (µg/L) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Enero | 5,0 | 0,47 | 24 | 11 |
| Febrero | 4,3 | 3,88 | 43 | <10 |
| Marzo | 3,5 | 2,30 | <10 | <10 |
| Abril | 3,4 | 2,60 | 12 | <10 |
| Mayo | 4,6 | 1,97 | <10 | <10 |
| Junio | 5,5 | 2,96 | <10 | <10 |
| Julio | 6,2 | 2,73 | 15 | <10 |
| Agosto | 3,8 | 3,88 | <10 | <10 |
| Septiembre | 4,5 | 2,65 | <10 | <10 |
| Octubre | 4,4 | 4,08 | <10 | <10 |
| Noviembre | 5,4 | 1,89 | <10 | <10 |
| Diciembre | 5,0 | 1,90 | 10 | <10 |
| Promedio | 4,6 | 2,61 | 21 | - |
| Máximo | 6,2 | 4,08 | 43 | 11 |
| Mínimo | 3,4 | 0,47 | 10 | 11 |
| Desvest | 0,8 | 1,03 | 14 | - |

Tabla 19. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 7 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a (µg/L) | Fosforo total (µg/L) | Ortofosfatos (µg/L) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Enero | 3,3 | 4,29 | 29 | 10 |
| Febrero | 2,9 | 5,98 | 45 | <10 |
| Marzo | 3,1 | 19,28 | 56 | 12 |
| Abril | 2,8 | 13,41 | 40 | <10 |
| Mayo | 3,7 | 6,70 | 22 | <10 |
| Junio | 3,0 | 8,52 | 21 | <10 |
| Julio | 4,5 | 6,25 | 14 | <10 |
| Agosto | 3,5 | 7,18 | 30 | <10 |
| Septiembre | 3,3 | 5,50 | 38 | <10 |
| Octubre | 3,5 | 6,69 | 18 | <10 |
| Noviembre | 3,3 | 4,07 | 38 | <10 |

| | | | | |
|-----------|-----|-------|----|-----|
| Diciembre | 3,7 | 5,35 | 64 | <10 |
| Promedio | 3,4 | 7,77 | 35 | - |
| Máximo | 4,5 | 19,28 | 64 | 12 |
| Mínimo | 2,8 | 4,07 | 14 | 10 |
| Desvest | 0,5 | 4,37 | 15 | - |

Como se observa en la Tabla 20, en la estación 8 la transparencia Secchi oscilo entre 2,8 (abril) y 4,8 $\mu\text{g/L}$ (junio), la clorofila a entre 0,86 (enero) y 7,86 $\mu\text{g/L}$ (mayo). En mayo, julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre la concentración de fosforo total se mantuvo por debajo del límite de cuantificación y alcanzo un valor máximo de 17 $\mu\text{g/L}$ en enero. En la mayoría de los meses del año, exceptuando enero (11 $\mu\text{g/L}$) y marzo (21 $\mu\text{g/L}$), los ortofosfatos presentaron valores por debajo del límite detectable.

Tabla 20. Comportamiento de los indicadores empleados para la estimación del índice de estado trófico en la estación 8 durante el año 2018.

| Muestreo | Transparencia Secchi (m) | Clorofila a ($\mu\text{g/L}$) | Fosforo total ($\mu\text{g/L}$) | Ortofosfatos ($\mu\text{g/L}$) |
|-----------------|---------------------------------|---|---|--|
| Enero | 3,5 | 0,86 | 17 | 11 |
| Febrero | 2,9 | 4,88 | 15 | <10 |
| Marzo | 3,0 | 4,28 | 16 | 21 |
| Abril | 2,8 | 4,06 | 11 | <10 |
| Mayo | 3,6 | 7,86 | <10 | <10 |
| Junio | 4,8 | 4,10 | 12 | <10 |
| Julio | 4,4 | 4,03 | <10 | <10 |
| Agosto | 3,5 | 4,10 | <10 | <10 |
| Septiembre | 3,9 | 4,01 | <10 | <10 |
| Octubre | 3,9 | 4,78 | 12 | <10 |
| Noviembre | 3,2 | 2,73 | <10 | <10 |
| Diciembre | 4,0 | 3,15 | <10 | <10 |
| Promedio | 3,6 | 4,07 | 14 | - |
| Máximo | 4,8 | 7,86 | 17 | 21 |
| Mínimo | 2,8 | 0,86 | 11 | 11 |
| Desvest | 0,6 | 1,61 | 2 | - |

Los resultados detallados del cálculo de cada índice se presentan en el Anexo 1 y los valores medios de los índices por muestreo y por estación se muestran en las

Tablas 21 a la 28. Mientras los resultados del índice de Carlson (1977) en la estación 1 indico condiciones desde mesotróficas (Meso) hasta hipertróficas (Hiper), con el índice de Toledo et al., (1983) variaron desde oligotróficas (Oligo) hasta eutróficas (Eu). Por su parte el índice de Lamparelli (2004) mostro cambios entre oligotrófico y supereutrófico (Super) y en forma similar el índice de Cunha et al., (2013) evidencio condiciones de oligotróficas a hipertróficas. Al aplicar el coeficiente de atenuación propuesto por Esteves (1998) en la estación uno el embalse fue clasificado desde mesotrófico a turbio (Turb).

Según los criterios de la OECD (1982) el fosforo total promedio, la clorofila a promedio, la clorofila a máxima y la profundidad Secchi promedio indican condiciones eutróficas. Por su parte, la profundidad Secchi mínima muestra condiciones eutróficas en la estación uno.

Tabla 21. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 1 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|------------|---|-------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----------------------|-------|---|------|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 50 | Meso | 47 | Meso | 53 | Meso | 52,8 | Oligo | 1,24 | Eu |
| Febrero | 69 | Hiper | 60 | Eu | 64 | Super | 60,4 | Hiper | 2,88 | Turb |
| Marzo | 65 | Hiper | 63 | Eu | 62 | Eu | 59,0 | Super | 2,02 | S.H |
| Abril | 56 | Eu | 51 | Meso | 59 | Meso | 56,9 | Eu | 0,97 | Eu |
| Mayo | 58 | Eu | 52 | Meso | 57 | Meso | 55,4 | Meso | 2,36 | S.H |
| Junio | 55 | Eu | 51 | Meso | 58 | Meso | 55,9 | Eu | 1,13 | Eu |
| Julio | 51 | Eu | 47 | Meso | 55 | Meso | 54,4 | Meso | 1,02 | Eu |
| Agosto | 52 | Eu | 48 | Meso | 56 | Meso | 55,2 | Meso | 0,96 | Eu |
| Septiembre | 44 | Meso | 42 | Oligo | 52 | Oligo | 52,3 | Oligo | 0,52 | Meso |
| Octubre | 49 | Meso | 46 | Meso | 55 | Meso | 53,8 | Meso | 0,76 | Eu |
| Noviembre | 47 | Meso | 44 | Meso | 54 | Meso | 53,6 | Meso | 0,65 | Eu |
| Diciembre | 49 | Meso | 46 | Meso | 56 | Meso | 54,9 | Meso | 0,56 | Eu |

Como se evidencia en la Tabla 22, mientras los resultados de los índices de estado trófico en el 2018 en la estación 2 mostraron condiciones entre mesotróficas y eutróficas según los índices de Carlson (1977), Lamparelli (2004), Cunha et al., (2013) y Esteves (1998), el índice de Toledo et al., (1983) clasificó el embalse durante todo el año como mesotrófico. De acuerdo con la OECD (1982) en la estación 2 se registraron condiciones mesotróficas según los promedios del fosforo total y la transparencia Secchi mínima y eutróficas según la clorofila a promedio y máxima, así como la transparencia media.

Tabla 22. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 2 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|------------|---|------|-----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|---|------|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 48 | Meso | 46 | Meso | 54 | Meso | 53,7 | Meso | 0,57 | Eu |
| Febrero | 52 | Eu | 48 | Meso | 57 | Meso | 55,5 | Meso | 0,73 | Eu |
| Marzo | 54 | Eu | 50 | Meso | 58 | Meso | 56,4 | Eu | 0,77 | Eu |
| Abril | 56 | Eu | 52 | Meso | 60 | Eu | 57,5 | Eu | 0,80 | Eu |
| Mayo | 48 | Meso | 46 | Meso | 56 | Meso | 54,5 | Meso | 0,49 | Meso |
| Junio | 58 | Eu | 53 | Meso | 60 | Eu | 58,0 | Eu | 1,00 | Eu |
| Julio | 50 | Meso | 47 | Meso | 56 | Meso | 54,8 | Meso | 0,64 | Eu |
| Agosto | 48 | Meso | 45 | Meso | 54 | Meso | 53,7 | Meso | 0,69 | Eu |
| Septiembre | 48 | Meso | 45 | Meso | 55 | Meso | 54,0 | Meso | 0,65 | Eu |
| Octubre | 49 | Meso | 47 | Meso | 56 | Meso | 54,7 | Meso | 0,51 | Meso |
| Noviembre | 47 | Meso | 45 | Meso | 55 | Meso | 54,3 | Meso | 0,45 | Meso |
| Diciembre | 49 | Meso | 47 | Meso | 56 | Meso | 55,1 | Meso | 0,53 | Meso |

La estación 3 se clasifica durante el año 2018 según Carlson (1977) y Cunha et al., (2013) entre las categorías meso e hipertrófica, por Toledo et al., (1983) y Lamparelli (2004) entre meso a eutrófica y por Esteves (1998) durante todo el año en la categoría eutrófica. Según todos los indicadores de la OECD (1982) la estación 3 se mantuvo en una condición eutrófica durante todo el 2018.

Tabla 23. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 3 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|------------|---|-------|-----------------------|------|-------------------|------|----------------------|-------|---|----|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 55 | Eu | 50 | Meso | 58 | Meso | 56,6 | Eu | 0,85 | Eu |
| Febrero | 64 | Hiper | 58 | Eu | 63 | Eu | 60,0 | Hiper | 1,34 | Eu |
| Marzo | 64 | Hiper | 57 | Eu | 63 | Eu | 59,7 | Hiper | 1,45 | Eu |
| Abril | 63 | Hiper | 58 | Eu | 62 | Eu | 59,3 | Hiper | 1,38 | Eu |
| Mayo | 58 | Eu | 53 | Meso | 60 | Eu | 57,8 | Eu | 1,08 | Eu |
| Junio | 53 | Eu | 49 | Meso | 57 | Meso | 55,6 | Meso | 0,80 | Eu |
| Julio | 53 | Eu | 49 | Meso | 58 | Meso | 56,0 | Eu | 0,78 | Eu |
| Agosto | 53 | Eu | 49 | Meso | 57 | Meso | 55,9 | Eu | 0,76 | Eu |
| Septiembre | 49 | Meso | 45 | Meso | 54 | Meso | 53,9 | Meso | 0,78 | Eu |
| Octubre | 55 | Eu | 51 | Meso | 59 | Meso | 57,0 | Eu | 0,73 | Eu |
| Noviembre | 53 | Eu | 49 | Meso | 57 | Meso | 56,0 | Eu | 0,81 | Eu |
| Diciembre | 55 | Eu | 51 | Meso | 59 | Meso | 56,9 | Eu | 0,83 | Eu |

La estación 4 se mantuvo a través del año según el índice de Toledo et al., (1983), Lamparelli (2004) y Cunha et al., (2013) entre oligotrófica y mesotrófica, Esteves (1998) entre meso y eutrófica y según Carlson (1977) se comportó como mesotrófica durante todo el año. Los resultados de la OECD (1982) clasifican esta estación durante el 2018 como oligotrófica la variable clorofila a máxima y como mesotrófico para fósforo total promedio, clorofila a promedio y transparencia Secchi promedio y mínima.

Tabla 24. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 4 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|------------|---|------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----------------------|-------|---|------|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 42 | Meso | 44 | Meso | 52 | Oligo | 52,0 | Oligo | 0,39 | Meso |
| Febrero | 44 | Meso | 43 | Oligo | 53 | Meso | 53,0 | Oligo | 0,40 | Meso |
| Marzo | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | S.I. | 0,48 | Meso |
| Abril | 43 | Meso | 42 | Oligo | 52 | Oligo | 52,2 | Oligo | 0,57 | Eu |
| Mayo | 44 | Meso | 42 | Oligo | 53 | Meso | 52,7 | Oligo | 0,54 | Eu |
| Junio | 45 | Meso | 43 | Oligo | 53 | Meso | 53,0 | Oligo | 0,57 | Eu |
| Julio | 45 | Meso | 43 | Oligo | 53 | Meso | 53,0 | Oligo | 0,61 | Eu |
| Agosto | 48 | Meso | 45 | Meso | 54 | Meso | 53,7 | Meso | 0,71 | Eu |
| Septiembre | 42 | Meso | 40 | Oligo | 51 | Oligo | 51,8 | Oligo | 0,48 | Meso |
| Octubre | 41 | Meso | 41 | Oligo | 52 | Oligo | 51,8 | Oligo | 0,38 | Meso |
| Noviembre | 41 | Meso | 40 | Oligo | 51 | Oligo | 51,7 | Oligo | 0,41 | Meso |
| Diciembre | 43 | Meso | 41 | Oligo | 52 | Oligo | 52,0 | Oligo | 0,59 | Eu |

La estación 5 es clasificada durante el año 2018 entre las categorías oligotrófica a mesotrófica por Carlson (1977); ultra a oligotrófica por Cunha et al., (2013); meso a eutrófica por Esteves (1998) y como oligotrófica por Toledo et al., (1983) y Lamparelli (2004) durante todo el año.

La OECD (1982) clasifico la estación 5 durante el año 2018 como oligotrófica para clorofila a máxima, y como mesotrófica para las demás variables consideradas.

Tabla 25. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 5 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|----------|---|-------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----------------------|------------|---|------|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 36 | Oligo | 39 | Oligo | 48 | Oligo | 48,9 | Ultraoligo | 0,40 | Meso |
| Febrero | 43 | Meso | 42 | Oligo | 52 | Oligo | 52,4 | Oligo | 0,45 | Meso |

| | | | | | | | | | | |
|------------|----|-------|----|-------|----|-------|------|------------|------|------|
| Marzo | 39 | Oligo | 39 | Oligo | 50 | Oligo | 51,0 | Ultraoligo | 0,38 | Meso |
| Abril | 39 | Oligo | 39 | Oligo | 51 | Oligo | 51,3 | Oligo | 0,35 | Meso |
| Mayo | 42 | Meso | 40 | Oligo | 51 | Oligo | 51,5 | Oligo | 0,57 | Eu |
| Junio | 43 | Meso | 42 | Oligo | 52 | Oligo | 52,3 | Oligo | 0,47 | Meso |
| Julio | 42 | Meso | 41 | Oligo | 52 | Oligo | 52,0 | Oligo | 0,50 | Meso |
| Agosto | 41 | Meso | 40 | Oligo | 51 | Oligo | 51,5 | Oligo | 0,44 | Meso |
| Septiembre | 38 | Oligo | 37 | Oligo | 49 | Oligo | 50,1 | Ultraoligo | 0,38 | Meso |
| Octubre | 40 | Oligo | 39 | Oligo | 50 | Oligo | 50,7 | Ultraoligo | 0,54 | Eu |
| Noviembre | 38 | Oligo | 38 | Oligo | 50 | Oligo | 50,6 | Ultraoligo | 0,37 | Meso |
| Diciembre | 42 | Meso | 41 | Oligo | 52 | Oligo | 51,8 | Oligo | 0,46 | Meso |

El embalse en la estación 6 durante el año 2018 se clasificó entre las categorías oligotrófica a mesotrófica por Carlson (1977), Toledo et al., (1983) y Lamparelli (2004); entre las categorías ultraoligotrófica a mesotrófica por Cunha et al., (2013) y en la categoría mesotrófica por Esteves (1998). Los resultados de la OECD (1982) clasifican el embalse en esta estación durante el 2018 como oligotrófico para clorofila a máxima y transparencia Secchi mínima y como mesotrófico para las demás variables.

Tabla 26. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 6 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|------------|---|-------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----------------------|------------|---|------|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 37 | Oligo | 37 | Oligo | 48 | Oligo | 49,3 | Ultraoligo | 0,34 | Meso |
| Febrero | 47 | Meso | 45 | Meso | 55 | Meso | 54,3 | Meso | 0,39 | Meso |
| Marzo | 39 | Oligo | 38 | Oligo | 50 | Oligo | 50,4 | Ultraoligo | 0,48 | Meso |
| Abril | 41 | Meso | 39 | Oligo | 50 | Oligo | 51,0 | Ultraoligo | 0,50 | Meso |
| Mayo | 38 | Oligo | 37 | Oligo | 49 | Oligo | 50,2 | Ultraoligo | 0,37 | Meso |
| Junio | 38 | Oligo | 38 | Oligo | 50 | Oligo | 50,9 | Ultraoligo | 0,31 | Meso |
| Julio | 39 | Oligo | 39 | Oligo | 51 | Oligo | 51,6 | Oligo | 0,28 | Meso |
| Agosto | 41 | Meso | 40 | Oligo | 51 | Oligo | 51,4 | Oligo | 0,45 | Meso |
| Septiembre | 39 | Oligo | 38 | Oligo | 50 | Oligo | 50,7 | Ultraoligo | 0,38 | Meso |
| Octubre | 40 | Oligo | 39 | Oligo | 51 | Oligo | 51,5 | Oligo | 0,39 | Meso |
| Noviembre | 37 | Oligo | 37 | Oligo | 49 | Oligo | 50,1 | Ultraoligo | 0,31 | Meso |
| Diciembre | 37 | Oligo | 37 | Oligo | 49 | Oligo | 50,1 | Ultraoligo | 0,34 | Meso |

Mientras Carlson (1977), Lamparelli (2004) y Esteves (1998) clasifican la estación 7 durante el año 2018 entre mesotrófica y eutrófica, según Toledo et al., (1983) se encuentra entre oligotrófica y a mesotrófica y Cunha et al., (2013) entre oligotrófica

a eutrófica. La OCDE (1982) clasifico el embalse en esta estación durante el año 2018 como mesotrófica en todas las variables que considera.

Tabla 27. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 7 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|------------|---|------|-----------------------|-------|-------------------|------|----------------------|-------|---|------|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 47 | Meso | 45 | Meso | 54 | Meso | 53,7 | Meso | 0,52 | Meso |
| Febrero | 51 | Eu | 48 | Meso | 57 | Meso | 55,2 | Meso | 0,59 | Eu |
| Marzo | 55 | Eu | 53 | Meso | 60 | Eu | 57,7 | Eu | 0,56 | Eu |
| Abril | 53 | Eu | 50 | Meso | 58 | Meso | 56,4 | Eu | 0,61 | Eu |
| Mayo | 46 | Meso | 44 | Meso | 55 | Meso | 53,9 | Meso | 0,46 | Meso |
| Junio | 48 | Meso | 45 | Meso | 55 | Meso | 54,3 | Meso | 0,57 | Eu |
| Julio | 43 | Meso | 42 | Oligo | 53 | Meso | 52,9 | Oligo | 0,38 | Meso |
| Agosto | 48 | Meso | 46 | Meso | 56 | Meso | 54,7 | Meso | 0,49 | Meso |
| Septiembre | 49 | Meso | 46 | Meso | 56 | Meso | 54,7 | Meso | 0,51 | Meso |
| Octubre | 46 | Meso | 44 | Meso | 54 | Meso | 53,5 | Meso | 0,49 | Meso |
| Noviembre | 48 | Meso | 46 | Meso | 55 | Meso | 54,1 | Meso | 0,51 | Meso |
| Diciembre | 51 | Eu | 48 | Meso | 57 | Meso | 55,7 | Meso | 0,46 | Meso |

La estación 8 fue clasificada por Carlson (1977), Toledo et al., (1983) y Lamparelli (2004) entre las categorías oligotrófica a mesotrófica. Por su parte, Cunha et al., (2013) la clasifican entre ultraoligo a oligotrófica y Esteves (1998) entre mesotrófica y eutrófica. De acuerdo a la OECD (1982) esta estación se clasifico como oligotrófica con la clorofila a máxima y como mesotrófica con las demás variables.

Tabla 28. Resultados de índices de estado trófico y categoría trófica en la estación 8 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Muestreo | Valor medio índices de estado trófico y categoría trófica | | | | | | | | Coeficiente de atenuación (Esteves, 1998) | |
|----------|---|-------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----------------------|------------|---|------|
| | Carlson (1977) | | Toledo et al., (1983) | | Lamparelli (2004) | | Cunha et al., (2013) | | | |
| Enero | 39 | Oligo | 38 | Oligo | 49 | Oligo | 49,7 | Ultraoligo | 0,48 | Meso |
| Febrero | 45 | Meso | 43 | Oligo | 53 | Meso | 52,6 | Oligo | 0,59 | Eu |
| Marzo | 44 | Meso | 45 | Meso | 53 | Meso | 52,5 | Oligo | 0,58 | Eu |
| Abril | 43 | Meso | 41 | Oligo | 51 | Oligo | 51,7 | Oligo | 0,62 | Eu |
| Mayo | 43 | Meso | 42 | Oligo | 53 | Meso | 52,7 | Oligo | 0,47 | Meso |
| Junio | 41 | Meso | 40 | Oligo | 52 | Oligo | 51,8 | Oligo | 0,35 | Meso |
| Julio | 40 | Oligo | 39 | Oligo | 51 | Oligo | 51,4 | Oligo | 0,39 | Meso |
| Agosto | 41 | Meso | 40 | Oligo | 51 | Oligo | 51,5 | Oligo | 0,49 | Meso |

| | | | | | | | | | | |
|------------|----|-------|----|-------|----|-------|------|------------|------|------|
| Septiembre | 41 | Meso | 40 | Oligo | 51 | Oligo | 51,4 | Oligo | 0,44 | Meso |
| Octubre | 42 | Meso | 41 | Oligo | 52 | Oligo | 52,1 | Oligo | 0,44 | Meso |
| Noviembre | 40 | Oligo | 39 | Oligo | 50 | Oligo | 50,7 | Ultraoligo | 0,54 | Eu |
| Diciembre | 40 | Oligo | 39 | Oligo | 50 | Oligo | 51,0 | Ultraoligo | 0,43 | Meso |

Tabla 29. Resultados del índice de estado trófico y categoría trófica propuesto por la OECD (1982) en la estación 8 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Estación | Fosforo total promedio (µg/L) | | Clorofila a promedio (µg/L) | | Clorofila a máxima (µg/L) | | Profundidad Secchi promedio (µg/L) | | Profundidad Secchi mínima (µg/L) | |
|----------|-------------------------------|------|-----------------------------|------|---------------------------|-------|------------------------------------|------|----------------------------------|-------|
| | 1 | 55 | Eu | 9,9 | Eu | 26,5 | Eu | 1,8 | Eu | 0,6 |
| 2 | 30 | Meso | 12,2 | Eu | 30,9 | Eu | 2,7 | Eu | 1,7 | Meso |
| 3 | 44 | Eu | 22,9 | Eu | 48,7 | Eu | 1,9 | Eu | 1,2 | Eu |
| 4 | 15 | Meso | 4,8 | Meso | 7,3 | Oligo | 3,5 | Meso | 2,4 | Meso |
| 5 | 12 | Meso | 3,3 | Meso | 5,4 | Oligo | 3,9 | Meso | 3,0 | Meso |
| 6 | 15 | Meso | 2,6 | Meso | 4,1 | Oligo | 4,6 | Meso | 3,4 | Oligo |
| 7 | 35 | Meso | 7,8 | Meso | 19,3 | Meso | 3,4 | Meso | 2,8 | Meso |
| 8 | 12 | Meso | 4,1 | Meso | 7,9 | Oligo | 3,6 | Meso | 2,8 | Meso |

En la Tabla 30 se presenta una síntesis de la clasificación trófica según los índices de estado trófico en cada estación durante el año 2018. La estación uno es clasificada por la mitad de los índices (Toledo et al., (1983); Lamparelli (2004); Cunha et al., (2013)) principalmente como mesotrófica y como eutrófica por los restantes. La estación dos se clasifica predominantemente como mesotrófica por Carlson (1977), Toledo et al., (1983); Lamparelli (2004) y Cunha et al., (2013) y como eutrófica por la OECD (1982) y Esteves (1998). Por su parte, la estación tres es considerada por cuatro de los seis índices (Carlson (1977), OECD (1982), Esteves (1998), Cunha et al., (2013)) en la mayoría de los meses como eutrófica y por los demás índices como mesotrófica. La estación cuatro es clasificada por Toledo et al., (1983); Lamparelli (2004) y Cunha et al., (2013) como oligotrófica en la mayoría de los meses, por Carlson (1977) y OECD (1982) como mesotrófica y por Esteves (1998) como mesotrófica y eutrófica.

Toledo et al., (1983); Lamparelli (2004) y Cunha et al., (2013) clasifican la estación cinco como oligotrófica durante todo el año, la OECD (1982) y Esteves (1998) la clasifican principalmente como mesotrófica y Carlson (1977) como oligotrófica y mesotrófica. La estación seis es clasificada principalmente como oligotrófica por los índices (Carlson (1977), Toledo et al., (1983); Lamparelli (2004) y Cunha et al., (2013)) y como mesotrófica por la OECD (1982) y Esteves (1998). La estación siete se clasificada por todos los índices primordialmente como mesotrófica y la estación ocho se clasifica por Toledo et al., (1983); Lamparelli (2004) y Cunha et

al., (2013) en la mayoría de los meses del año como oligotrófica y por los demás índices como mesotrófica.

Tabla 30. Síntesis de las categorías tróficas según los índices evaluados en las estaciones 1 a 8 en el embalse Peñol-Guatapé durante el año 2018.

| Estación | | Índice de estado trófico | | | | | |
|----------|-------|--------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------|---------------|
| | | Carlson (1977) | Toledo et al., (1983) | Lamparelli (2004) | Cunha et al., (2013) | Esteves (1998) | **OECD (1982) |
| 1 | Oligo | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| | Meso | 5 | 9 | 9 | 6 | 1 | 0 |
| | Eu | 7 | 2 | 2 | 4 | 11 | 5 |
| 2 | Oligo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Meso | 8 | 12 | 10 | 9 | 4 | 2 |
| | Eu | 4 | 0 | 2 | 3 | 8 | 3 |
| 3 | Oligo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Meso | 1 | 9 | 8 | 2 | 0 | 0 |
| | Eu | 11 | 3 | 4 | 10 | 12 | 5 |
| *4 | Oligo | 0 | 9 | 6 | 10 | 0 | 1 |
| | Meso | 11 | 2 | 5 | 1 | 6 | 4 |
| | Eu | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 5 | Oligo | 6 | 12 | 12 | 12 | 0 | 1 |
| | Meso | 6 | 0 | 0 | 0 | 10 | 4 |
| | Eu | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 6 | Oligo | 9 | 11 | 11 | 11 | 0 | 2 |
| | Meso | 3 | 1 | 1 | 1 | 12 | 3 |
| | Eu | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Oligo | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | Meso | 8 | 11 | 11 | 9 | 8 | 5 |
| | Eu | 4 | 0 | 1 | 2 | 4 | 0 |
| 8 | Oligo | 4 | 11 | 9 | 12 | 0 | 1 |
| | Meso | 8 | 1 | 3 | 0 | 8 | 4 |
| | Eu | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |

* Los resultados de la estación 4 para los índices de estado trófico de Carlson (1977), Toledo et al., (1983), Lamparelli (2004) y Cunha et al., (2013) se presentan para 11 meses debido a que en el mes de marzo no se tiene registro de clorofila a.** Los resultados presentados por la OECD son promedios anuales de 5 variables, por lo tanto, no se presenta información por mes.

Conclusiones

- De acuerdo con los resultados de los índices de estado trófico, en el embalse Peñol-Guatapé se puede identificar claramente dos sectores con grados de trófia diferentes. Mientras en las estaciones 4, 5 y 6 predominan condiciones oligotróficas y en la estación 8 desde oligotróficas a mesotróficas, en las estaciones 1, 2, 3 y 7 los índices muestran condiciones de meso a eutróficas.
- Aunque se evidencia diferencias espaciales en los resultados de los índices de estado trófico, en las estaciones localizadas en la cola del embalse y en la estación 7 se observa un efecto de la estacionalidad climática. Mientras en el periodo seco predominan condiciones eutróficas, en el periodo de aguas altas la tendencia se mueve hacia una condición mesotrófica.
- Los resultados del estudio indican que, aunque el estado trófico puede ser evaluado mediante un solo indicador como en el caso del índice de Esteves (1998), el empleo de varios indicadores conduce a resultados más consistentes.
- De acuerdo con los resultados se podría afirmar que para las condiciones del embalse Peñol-Guatapé los índices de Toledo et al., (1983), Lamparelli (2004) y Cunha et al., (2013) mostraron una mayor similitud en los resultados y por tanto, se podría en principio sugerir como los más adecuados para la estimación del estado trófico del embalse.

ANEXO 1.

Tabla 31. TSI Carlson (1977)

| Estación | Mes | TSI (SD) | TSI (Chl) | TSI (TP) |
|----------|-----|----------|-----------|----------|
| 1 | 1 | 55 | 32 | 64 |
| | 2 | 68 | 63 | 77 |
| | 3 | 63 | 56 | 76 |
| | 4 | 52 | 61 | 55 |
| | 5 | 65 | 47 | 62 |
| | 6 | 54 | 51 | 60 |
| | 7 | 53 | 50 | 51 |
| | 8 | 52 | 53 | 53 |
| | 9 | 43 | 43 | 45 |
| | 10 | 48 | 42 | 58 |
| | 11 | 46 | 49 | 46 |
| | 12 | 44 | 55 | 49 |
| 2 | 1 | 44 | 43 | 55 |
| | 2 | 48 | 56 | 51 |
| | 3 | 49 | 55 | 58 |
| | 4 | 49 | 63 | 56 |
| | 5 | 42 | 48 | 55 |
| | 6 | 52 | 64 | 58 |
| | 7 | 46 | 52 | 52 |
| | 8 | 47 | 50 | 46 |
| | 9 | 46 | 55 | 42 |
| | 10 | 43 | 46 | 59 |
| | 11 | 41 | 51 | 49 |
| | 12 | 43 | 56 | 48 |
| 3 | 1 | 50 | 58 | 56 |
| | 2 | 57 | 66 | 70 |
| | 3 | 58 | 69 | 65 |
| | 4 | 57 | 63 | 69 |
| | 5 | 53 | 64 | 58 |
| | 6 | 49 | 54 | 54 |
| | 7 | 49 | 57 | 53 |
| | 8 | 48 | 57 | 53 |
| | 9 | 49 | 52 | 45 |
| | 10 | 48 | 62 | 54 |
| | 11 | 49 | 59 | 51 |
| | 12 | 50 | 62 | 53 |
| 4 | 1 | 39 | 44 | 42 |
| | 2 | 39 | 42 | 51 |
| | 3 | 42 | S.I. | 42 |
| | 4 | 44 | 46 | 40 |

| | | | | |
|---|----|----|----|----|
| | 5 | 44 | 48 | 41 |
| | 6 | 44 | 50 | 41 |
| | 7 | 45 | 50 | 41 |
| | 8 | 47 | 46 | 51 |
| | 9 | 42 | 46 | 37 |
| | 10 | 38 | 41 | 45 |
| | 11 | 40 | 44 | 40 |
| | 12 | 45 | 44 | 41 |
| 5 | 1 | 39 | 30 | 37 |
| | 2 | 41 | 45 | 43 |
| | 3 | 38 | 42 | 37 |
| | 4 | 37 | 42 | 39 |
| | 5 | 44 | 45 | 37 |
| | 6 | 41 | 45 | 43 |
| | 7 | 42 | 47 | 37 |
| | 8 | 40 | 44 | 37 |
| | 9 | 38 | 37 | 37 |
| | 10 | 43 | 40 | 37 |
| | 11 | 38 | 39 | 37 |
| | 12 | 41 | 40 | 45 |
| 6 | 1 | 37 | 23 | 50 |
| | 2 | 39 | 44 | 58 |
| | 3 | 42 | 39 | 37 |
| | 4 | 42 | 40 | 40 |
| | 5 | 38 | 37 | 37 |
| | 6 | 36 | 41 | 37 |
| | 7 | 34 | 40 | 43 |
| | 8 | 41 | 44 | 37 |
| | 9 | 38 | 40 | 37 |
| | 10 | 39 | 44 | 37 |
| | 11 | 36 | 37 | 37 |
| | 12 | 37 | 37 | 37 |
| 7 | 1 | 43 | 45 | 53 |
| | 2 | 45 | 48 | 59 |
| | 3 | 44 | 60 | 62 |
| | 4 | 45 | 56 | 57 |
| | 5 | 41 | 49 | 49 |
| | 6 | 44 | 52 | 48 |
| | 7 | 38 | 49 | 42 |
| | 8 | 42 | 50 | 53 |
| | 9 | 43 | 47 | 57 |
| | 10 | 42 | 49 | 46 |
| | 11 | 43 | 44 | 57 |
| | 12 | 41 | 47 | 64 |
| 8 | 1 | 42 | 29 | 45 |

| | | | | |
|--|----|----|----|----|
| | 2 | 45 | 46 | 43 |
| | 3 | 44 | 45 | 44 |
| | 4 | 45 | 44 | 39 |
| | 5 | 41 | 51 | 37 |
| | 6 | 37 | 44 | 40 |
| | 7 | 39 | 44 | 37 |
| | 8 | 42 | 44 | 37 |
| | 9 | 41 | 44 | 37 |
| | 10 | 40 | 46 | 40 |
| | 11 | 43 | 40 | 37 |
| | 12 | 40 | 42 | 37 |

Tabla 32. IET Toledo et al., (1983)

| Estación | Mes | IET (SD) | IET (Chl) | IET (TP) | IET (PSR) |
|----------|-----|----------|-----------|----------|-----------|
| 1 | 1 | 46 | 32 | 56 | 53 |
| | 2 | 58 | 63 | 70 | 49 |
| | 3 | 53 | 57 | 69 | 68 |
| | 4 | 43 | 61 | 48 | 49 |
| | 5 | 56 | 48 | 54 | 54 |
| | 6 | 45 | 52 | 53 | 51 |
| | 7 | 43 | 51 | 43 | 49 |
| | 8 | 43 | 53 | 46 | 49 |
| | 9 | 34 | 44 | 38 | 49 |
| | 10 | 39 | 42 | 50 | 49 |
| | 11 | 37 | 50 | 38 | 49 |
| | 12 | 35 | 55 | 41 | 49 |
| 2 | 1 | 35 | 43 | 48 | 54 |
| | 2 | 39 | 56 | 44 | 49 |
| | 3 | 39 | 56 | 51 | 49 |
| | 4 | 40 | 64 | 48 | 49 |
| | 5 | 33 | 48 | 47 | 49 |
| | 6 | 43 | 65 | 51 | 49 |
| | 7 | 37 | 52 | 44 | 49 |
| | 8 | 38 | 51 | 38 | 49 |
| | 9 | 37 | 55 | 35 | 49 |
| | 10 | 33 | 46 | 51 | 49 |
| | 11 | 32 | 51 | 42 | 49 |
| | 12 | 34 | 57 | 41 | 49 |
| 3 | 1 | 41 | 58 | 49 | 49 |
| | 2 | 47 | 66 | 63 | 49 |
| | 3 | 49 | 70 | 57 | 49 |
| | 4 | 48 | 64 | 61 | 53 |
| | 5 | 44 | 64 | 50 | 49 |

| | | | | | |
|---|----|----|------|----|----|
| | 6 | 40 | 55 | 47 | 49 |
| | 7 | 39 | 58 | 46 | 49 |
| | 8 | 39 | 57 | 46 | 49 |
| | 9 | 40 | 52 | 38 | 49 |
| | 10 | 39 | 63 | 47 | 49 |
| | 11 | 40 | 60 | 43 | 49 |
| | 12 | 40 | 63 | 45 | 49 |
| 4 | 1 | 30 | 44 | 35 | 59 |
| | 2 | 30 | 43 | 43 | 49 |
| | 3 | 32 | S.I. | 35 | 49 |
| | 4 | 35 | 46 | 33 | 49 |
| | 5 | 34 | 48 | 34 | 49 |
| | 6 | 35 | 50 | 34 | 49 |
| | 7 | 36 | 50 | 34 | 49 |
| | 8 | 38 | 47 | 44 | 49 |
| | 9 | 33 | 47 | 30 | 49 |
| | 10 | 29 | 41 | 38 | 49 |
| | 11 | 30 | 44 | 33 | 49 |
| | 12 | 35 | 45 | 34 | 49 |
| 5 | 1 | 30 | 30 | 30 | 62 |
| | 2 | 32 | 46 | 36 | 49 |
| | 3 | 29 | 42 | 30 | 49 |
| | 4 | 28 | 42 | 31 | 49 |
| | 5 | 35 | 45 | 30 | 49 |
| | 6 | 32 | 45 | 36 | 49 |
| | 7 | 33 | 47 | 30 | 49 |
| | 8 | 31 | 45 | 30 | 49 |
| | 9 | 29 | 37 | 30 | 49 |
| | 10 | 34 | 40 | 30 | 49 |
| | 11 | 29 | 40 | 30 | 49 |
| | 12 | 32 | 41 | 38 | 49 |
| 6 | 1 | 28 | 23 | 43 | 50 |
| | 2 | 30 | 44 | 51 | 49 |
| | 3 | 33 | 39 | 30 | 49 |
| | 4 | 33 | 40 | 33 | 49 |
| | 5 | 29 | 37 | 30 | 49 |
| | 6 | 26 | 41 | 30 | 49 |
| | 7 | 24 | 41 | 36 | 49 |
| | 8 | 31 | 44 | 30 | 49 |
| | 9 | 29 | 40 | 30 | 49 |
| | 10 | 29 | 45 | 30 | 49 |
| | 11 | 26 | 37 | 30 | 49 |
| | 12 | 28 | 37 | 30 | 49 |
| 7 | 1 | 34 | 45 | 45 | 49 |
| | 2 | 36 | 49 | 52 | 49 |

| | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|
| | 3 | 35 | 60 | 55 | 51 | |
| | 4 | 36 | 57 | 50 | 49 | |
| | 5 | 32 | 50 | 41 | 49 | |
| | 6 | 35 | 52 | 41 | 49 | |
| | 7 | 29 | 49 | 35 | 49 | |
| | 8 | 33 | 50 | 46 | 49 | |
| | 9 | 33 | 48 | 49 | 49 | |
| | 10 | 33 | 50 | 38 | 49 | |
| | 11 | 33 | 45 | 49 | 49 | |
| | 12 | 32 | 47 | 57 | 49 | |
| | 8 | 1 | 33 | 29 | 38 | 50 |
| | | 2 | 35 | 46 | 36 | 49 |
| 3 | | 35 | 45 | 37 | 60 | |
| 4 | | 36 | 45 | 31 | 49 | |
| 5 | | 32 | 51 | 30 | 49 | |
| 6 | | 28 | 45 | 33 | 49 | |
| 7 | | 30 | 45 | 30 | 49 | |
| 8 | | 33 | 45 | 30 | 49 | |
| 9 | | 31 | 45 | 30 | 49 | |
| 10 | | 31 | 46 | 33 | 49 | |
| 11 | | 34 | 41 | 30 | 49 | |
| 12 | | 31 | 42 | 30 | 49 | |

Tabla 33. TSI Lamparelli (2004)

| Estación | Mes | TSI (Chla) | TSI (TP) |
|----------|-----|------------|----------|
| 1 | 1 | 47 | 60 |
| | 2 | 63 | 65 |
| | 3 | 59 | 65 |
| | 4 | 62 | 56 |
| | 5 | 55 | 59 |
| | 6 | 57 | 58 |
| | 7 | 57 | 54 |
| | 8 | 58 | 55 |
| | 9 | 53 | 52 |
| | 10 | 52 | 57 |
| | 11 | 56 | 52 |
| | 12 | 59 | 53 |
| 2 | 1 | 53 | 56 |
| | 2 | 59 | 54 |
| | 3 | 59 | 57 |
| | 4 | 63 | 56 |
| | 5 | 55 | 56 |
| | 6 | 64 | 57 |

| | | | |
|---|----|------|----|
| | 7 | 57 | 54 |
| | 8 | 57 | 52 |
| | 9 | 59 | 50 |
| | 10 | 55 | 57 |
| | 11 | 57 | 53 |
| | 12 | 60 | 53 |
| 3 | 1 | 60 | 56 |
| | 2 | 64 | 62 |
| | 3 | 66 | 60 |
| | 4 | 63 | 62 |
| | 5 | 63 | 57 |
| | 6 | 59 | 55 |
| | 7 | 60 | 55 |
| | 8 | 60 | 55 |
| | 9 | 57 | 52 |
| | 10 | 62 | 55 |
| | 11 | 61 | 54 |
| | 12 | 63 | 55 |
| 4 | 1 | 53 | 50 |
| | 2 | 53 | 54 |
| | 3 | S.I. | 50 |
| | 4 | 54 | 50 |
| | 5 | 55 | 50 |
| | 6 | 56 | 50 |
| | 7 | 56 | 50 |
| | 8 | 55 | 54 |
| | 9 | 55 | 48 |
| | 10 | 52 | 52 |
| | 11 | 53 | 50 |
| | 12 | 54 | 50 |
| 5 | 1 | 47 | 48 |
| | 2 | 54 | 51 |
| | 3 | 52 | 48 |
| | 4 | 53 | 49 |
| | 5 | 54 | 48 |
| | 6 | 54 | 51 |
| | 7 | 55 | 48 |
| | 8 | 54 | 48 |
| | 9 | 50 | 48 |
| | 10 | 51 | 48 |
| | 11 | 51 | 48 |
| | 12 | 52 | 52 |
| 6 | 1 | 43 | 54 |
| | 2 | 53 | 57 |
| | 3 | 51 | 48 |

| | | | | |
|----|----|----|----|----|
| | 4 | 51 | 50 | |
| | 5 | 50 | 48 | |
| | 6 | 52 | 48 | |
| | 7 | 52 | 51 | |
| | 8 | 53 | 48 | |
| | 9 | 52 | 48 | |
| | 10 | 54 | 48 | |
| | 11 | 50 | 48 | |
| | 12 | 50 | 48 | |
| | 7 | 1 | 54 | 55 |
| | | 2 | 55 | 58 |
| | | 3 | 61 | 59 |
| 4 | | 59 | 57 | |
| 5 | | 56 | 53 | |
| 6 | | 57 | 53 | |
| 7 | | 56 | 50 | |
| 8 | | 56 | 55 | |
| 9 | | 55 | 57 | |
| 10 | | 56 | 52 | |
| 11 | | 54 | 57 | |
| 12 | | 55 | 60 | |
| 8 | 1 | 46 | 52 | |
| | 2 | 55 | 51 | |
| | 3 | 54 | 51 | |
| | 4 | 54 | 49 | |
| | 5 | 57 | 48 | |
| | 6 | 54 | 50 | |
| | 7 | 54 | 48 | |
| | 8 | 54 | 48 | |
| | 9 | 54 | 48 | |
| | 10 | 54 | 50 | |
| | 11 | 52 | 48 | |
| | 12 | 52 | 48 | |

Tabla 34. TSI Cunha et al., (2013).

| Estación | Mes | TSI (Chla) | TSI (TP) |
|----------|-----|------------|----------|
| 1 | 1 | 48,36 | 57,33 |
| | 2 | 59,72 | 61,05 |
| | 3 | 57,28 | 60,77 |
| | 4 | 58,95 | 54,88 |
| | 5 | 54,07 | 56,72 |
| | 6 | 55,50 | 56,25 |
| | 7 | 55,18 | 53,65 |

| | | | |
|---|----|-------|-------|
| | 8 | 55,95 | 54,38 |
| | 9 | 52,54 | 52,11 |
| | 10 | 51,98 | 55,62 |
| | 11 | 54,81 | 52,34 |
| | 12 | 56,71 | 53,14 |
| 2 | 1 | 52,48 | 54,99 |
| | 2 | 57,15 | 53,81 |
| | 3 | 56,91 | 55,81 |
| | 4 | 59,80 | 55,10 |
| | 5 | 54,28 | 54,76 |
| | 6 | 60,28 | 55,81 |
| | 7 | 55,70 | 53,96 |
| | 8 | 55,15 | 52,34 |
| | 9 | 56,71 | 51,34 |
| | 10 | 53,60 | 55,90 |
| | 11 | 55,22 | 53,32 |
| | 12 | 57,32 | 52,95 |
| 3 | 1 | 57,93 | 55,21 |
| | 2 | 60,80 | 59,14 |
| | 3 | 61,93 | 57,52 |
| | 4 | 59,91 | 58,67 |
| | 5 | 60,04 | 55,62 |
| | 6 | 56,60 | 54,63 |
| | 7 | 57,69 | 54,38 |
| | 8 | 57,51 | 54,38 |
| | 9 | 55,67 | 52,11 |
| | 10 | 59,39 | 54,63 |
| | 11 | 58,32 | 53,65 |
| | 12 | 59,61 | 54,24 |
| 4 | 1 | 52,71 | 51,34 |
| | 2 | 52,25 | 53,65 |
| | 3 | S.l. | 51,34 |
| | 4 | 53,58 | 50,72 |
| | 5 | 54,31 | 51,04 |
| | 6 | 55,03 | 51,04 |
| | 7 | 54,99 | 51,04 |
| | 8 | 53,63 | 53,81 |
| | 9 | 53,63 | 50,00 |
| | 10 | 51,54 | 52,11 |
| | 11 | 52,75 | 50,72 |
| | 12 | 52,96 | 51,04 |
| 5 | 1 | 47,77 | 50,00 |
| | 2 | 53,25 | 51,61 |
| | 3 | 52,03 | 50,00 |
| | 4 | 52,13 | 50,38 |

| | | | |
|---|----|-------|-------|
| | 5 | 53,02 | 50,00 |
| | 6 | 53,08 | 51,61 |
| | 7 | 53,96 | 50,00 |
| | 8 | 52,92 | 50,00 |
| | 9 | 50,21 | 50,00 |
| | 10 | 51,32 | 50,00 |
| | 11 | 51,14 | 50,00 |
| | 12 | 51,46 | 52,11 |
| 6 | 1 | 45,14 | 53,49 |
| | 2 | 52,76 | 55,81 |
| | 3 | 50,87 | 50,00 |
| | 4 | 51,31 | 50,72 |
| | 5 | 50,31 | 50,00 |
| | 6 | 51,78 | 50,00 |
| | 7 | 51,49 | 51,61 |
| | 8 | 52,76 | 50,00 |
| | 9 | 51,38 | 50,00 |
| | 10 | 52,95 | 50,00 |
| | 11 | 50,15 | 50,00 |
| | 12 | 50,17 | 50,00 |
| 7 | 1 | 53,13 | 54,24 |
| | 2 | 54,33 | 55,99 |
| | 3 | 58,57 | 56,87 |
| | 4 | 57,26 | 55,52 |
| | 5 | 54,74 | 53,14 |
| | 6 | 55,61 | 52,95 |
| | 7 | 54,49 | 51,34 |
| | 8 | 54,99 | 54,38 |
| | 9 | 54,03 | 55,32 |
| | 10 | 54,73 | 52,34 |
| | 11 | 52,93 | 55,32 |
| | 12 | 53,93 | 57,40 |
| 8 | 1 | 47,30 | 52,11 |
| | 2 | 53,59 | 51,61 |
| | 3 | 53,12 | 51,87 |
| | 4 | 52,93 | 50,38 |
| | 5 | 55,32 | 50,00 |
| | 6 | 52,96 | 50,72 |
| | 7 | 52,90 | 50,00 |
| | 8 | 52,96 | 50,00 |
| | 9 | 52,88 | 50,00 |
| | 10 | 53,52 | 50,72 |
| | 11 | 51,49 | 50,00 |
| | 12 | 52,00 | 50,00 |

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Ramírez, N. J., Palacio Baena, J. A., & Ramírez Restrepo, J. J. (2002). Aplicación de algunos modelos de calidad de agua en dos sitios del embalse El Peñol-Guatapé (Antioquia, Colombia). *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 26, 18-29. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10495/6182>
- Aguirre Ramírez, N. J., Palacio Baena, J., & Ramírez Restrepo, J. J. (2007). Características limnológicas del embalse El Peñol-Guatapé, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(10), 53-66. Recuperado de <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/223>
- Arocena, R., Chalar, G., Fabián, D., De León, L., Brugnoli, E., Silva, M., ... Gabito, L. (2008). Evaluación del estado trófico de los embalses Canelón Grande y Paso Severino. *Limnología, Facultad de Ciencias*, 11-27. Recuperado de <http://limno.fcien.edu.uy/pejecutados/3-Convenio-DINAMA-EstadoTrophicodeEmbalsesPSeverinoyCanelonGrande.pdf>
- Bonanseña, M., Ledesma, C., Rodríguez, C., & Sánchez Delgado, A. R. (2012). Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 7(3), 61-71. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.847>
- Bravo Inclán, L., Tomasini Ortiz, A. C., Sánchez Chávez, J. J., & Moeller Chávez, G. (2012). Estudio de eutrofización del lago de Pátzcuaro, Mich., y su relación con los florecimientos de cianobacterias. *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, (November), 2-7.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Cunha, D. G. F., Calijuri, M. do C., & Lamparelli, M. C. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). *Ecological Engineering*, 60, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>
- da Costa Lobato, T., Hauser-Davis, R. A., de Oliveira, T. F., Maciel, M. C., Tavares, M. R. M., da Silveira, A. M., & Saraiva, A. C. F. (2015). Categorization of the trophic status of a hydroelectric power plant reservoir in the Brazilian Amazon by statistical analyses and fuzzy approaches. *Science of the Total Environment*, 506-507, 613-620. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.032>
- Díaz Medina, A. C., & Sotomayor Maguiña, L. F. (2013). *Evaluación de la eutrofización de la laguna Conocochoa-ANCASH a agosto de 2012*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Recuperado de https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis_Diaz_y_Sotomayor_2013.pdf

- Dimberg, P. H., Bryhn, A. C., & Hytteborn, J. K. (2013). Probabilities of monthly median chlorophyll-a concentrations in subarctic, temperate and subtropical lakes. *Environmental Modelling & Software*, 41, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.12.002>
- Florencio, L., & Santos, K. P. (2000). Aplicação De Modelo Simplificado Para Avaliação Do Estado Trófico No Reservatório De Duas Unas, Pernambuco-Brasil. *21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, (1), 1-9.
- García Miranda, F. G., Miranda Rosales, V., & De la Rosa Gómez, I. (2018). Evaluación del estado trófico de los lagos del nevado de toluca mediante sistemas de información geográfica. En U. N. A. de M. y A. M. de C. para el D. Regional (Ed.). México. Recuperado de <http://ru.iiec.unam.mx/3783/>
- Gomes Viana, L., Silva Cruz, P., Aguiar Oliveira, D., Santos, R. D., & Barbosa, J. E. de L. (2016). Comparação De Índices De Avaliação De Estado Trófico Em Reservatório Utilizado Para Abastecimento Público Durante Período De Seca, Semiárido Brasileiro. *Iv Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, (1), 1-5. <https://doi.org/10.1109/3.371943>
- Janus, L. L., & Vollenmeider, R. A. (1982). The OECD Cooperative Programm on Eutrophication. *Environment Canada*. Recuperado de <http://udspace.udel.edu/handle/19716/1373#files-area>
- Kratzer, C. R., & Brezonik, P. L. (1981). A Carlson-Type trophic state index for nitrogen in Florida Lakes. *WATER RESOURCES BULLETIN*, 17(4), 713-715.
- Lamparelli, M. C. (2004). *Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.41.2004.tde-20032006-075813>
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodriguez, C. M., & Sánchez Delgado, A. R. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciência Agronômica*, 44(3), 419-425. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300002>
- López Martínez, M. L., & Madroñero Palacios, S. M. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: Caso Laguna de la Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 21. <https://doi.org/10.18359/rcin.1430>
- Martino, P. (1989). Curso Basico De Eutrofizacion. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - CEPIS.
- Mercante, C. T. J., & Tucci-Moura, A. (1999). Comparação entre os índices de Carlson e de Carlson modificado aplicados a dois ambientes aquáticos subtropicais, São Paulo, SP. *Acta Limnológica Brasiliensia*, 11, 1-14. Recuperado de [http://ablimno.org.br/acta/pdf/acta_limnologica_contents1101E_files/Artigo_1_11\(1\).pdf](http://ablimno.org.br/acta/pdf/acta_limnologica_contents1101E_files/Artigo_1_11(1).pdf)

- Moreira, J., & Sabando, B. (2016). *Determinacion del nivel de eutrofizacion del embalse Sixto Duran Ballen mediante indices de estado trofico*. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Recuperado de <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/285/1/TMA86.pdf>
- Moreno Arbeláez, D. P., & Ramírez Restrepo, J. J. (2010). Variación temporal de la condición trófica del lago del Parque Norte, Medellín (Antioquia), Colombia. *Actual Biol* 32(92), 32(92), 75-87. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-35842010000100007&lng=en&nrm=iso
- Moreno Franco, D. P., Quintero Manzano, J., & López Cuevas, A. (1996). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Hydrological Processes*, 10(2), 295-313. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199602\)10:2<295::AID-HYP360>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199602)10:2<295::AID-HYP360>3.0.CO;2-F)
- Moreno Franco, D. P., Quintero Manzano, J., & López Cuevas, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Contactos*, 78, 25-33. Recuperado de <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n78ne/eutrofia2.pdf>
- Mussi Molisani, M., Barroso, H. de S., Becker, H., Odete Parente Moreira, M., Alberto Grossi Hijo, C., Monte, T. M. do, & Harrison Vasconcellos, G. (2010). Trophic state, phytoplankton assemblages and limnological diagnosis of the Castanhão Reservoir, CE, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 22(01), 1-12. <https://doi.org/10.4322/actalb.02201001>
- Oroná, C. E. (2012). *Caracterización limnológica de un sistema agua salada de una cuenca endorreica*. Universidad de Coruña.
- Ramírez, J. J. (1986). Fitoplancton de red en el embalse de el Peñol, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 15(56), 2-13. Recuperado de <https://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/actbio/article/view/330122>
- Ramírez R, J. J., Arcila L., M. C., & Sepúlveda A., S. C. (2015). Cuantificación de los componentes que afectan el coeficiente vertical de atenuación vertical de la irradiancia descendente en el embalse Riógrande II (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(151), 228-238. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.150>
- Resendiz Cruz, J. A. (2012). *Evaluación de la calidad del agua en lagos y embalses*. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/406>
- Roldán, G., Correa, M., Machado, T., Ramírez, J. J., Velásquez, L. F., & Zuluaga, F. (1984). Estudio Limnológico de la represa de El Peñol. *Actualidades Biológicas*, 13(50), 94-105. Recuperado de

<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/actbio/article/view/330250>

- Fundamentos de limnología neotropical. Gabriel Alfonso Roldán Pérez; John Jairo Ramírez Restrepo. 2. edición. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2008. 440 páginas; ilustraciones, color Ciencia y Tecnología. ISBN 9789587141443 (574.9298/R744f e6) - (Btca Carlos G)
- Salas, H.J. 1983. Memoria del Segundo Encuentro del Proyecto Regional “Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutrofización en Lagos Cálidos (antes Lagos Tropicales)”. Brasólia, Brasil, 23 – 27 de mayo de 1983.
- Salas, H. J., & Martino, P. (1988). Memoria del 4to. Encuentro del Proyecto Regional. Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutrofización en Lagos Cálidos Tropicales. San Juan de Puerto Rico.
- Salas, H. J., & Martino, P. (1991). A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research*, 25(3), 341-350. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90015-I](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90015-I)
- Salas, H. J., & Martino, P. (2001). Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaca/e/fulltext/eutrof/eutrof.pdf>
- Studer, E. M. J. (2007). Evaluación de Parámetros físicos , químicos y biológicos Indicadores del Estado Trófico del Lago de Yojoa, Honduras. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Toledo Junior, AP., Talarico, M., Chinez, SJ. y Agudo, EG. 1983. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In *Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1983. Camburiú. p. 34.
- Uribe, A., & Roldán, G. (1975). Estudio comparativo de algunas características fisicoquímicas y biológicas del Embalse del Peñol (Nare). *Actualidades Biológicas*, 4(11), 2-12. Recuperado de <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/actbio/article/view/330682>
- Vollenweider, R. (1976) Advances in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrophication. *Memorie dell’Istituto Italiano di Idrobiologia*, 33, 53-83
- Zabala Agudelo, A. M. (Universidad de A. (2013). Evaluación del estado trófico del embalse Riogrande II, Antioquia – Colombia a través del comportamiento espacial y temporal de los nutrientes. Universidad de Antioquia.