

EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE SEIS EMBALSES DE LA ZONA ANDINA COLOMBIANA Y SU RELACIÓN CON ALGUNAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS.

Henry Alonso Quintero Duque.

Carlos Augusto Benjumea Hoyos Director de trabajo de grado, docente Asociado a la Universidad Católica de Oriente; Estudiante aspirante al título de Ingeniero Ambiental, Universidad Católica de Oriente, 2020, Henry9103@hotmail.com

RESUMEN

La eutrofización en embalses es un tema que viene afectando la calidad del agua de ecosistemas lenticos en la zona andina Colombia, debido a condiciones antropogénicas que ocurren en la cuenca que los abastece. En el presente estudio se analizarán los embalses Peñol-Guatapé, San Lorenzo, Punchiná, Porce II y III y Amaní, en los cuales esta condición puede influir de gran manera en el enriquecimiento por nutrientes y que los sistemas vayan adquiriendo características físico-químicas diferentes a las naturales, generando otras dinámicas en el ecosistema y deteriorando la calidad del agua. Este trabajo se realizó con el fin de evaluar el estado trófico de seis embalses de la zona andina colombiana y ver su relación con algunas variables físico química. Se determinó el estado trófico de los embalses por medio del modelo de Salas y Martino (2001), además se utilizaron análisis estadísticos en los cuales se encontraron diferencias significativas entre embalses. Adicionalmente se hallaron algunas similitudes de variables entre embalses y finalmente, se determinaron las variables que más influyeron en el estado trófico de estos embalses siendo estas el fósforo total (P), los Ortofosfatos (PO_4), el nitrógeno amoniacal (NH_3), Nitrógeno Total kjeldahl (NTK) y la conductividad. Finalmente, se evidencio que los embalses Porce II y Peñol-Guatapé presentan una tendencia a ser Eutróficos, Porce III Mesotrófico y Punchiná, San Lorenzo y Amaní Oligotróficos.

Palabras clave: Eutrofización, embalse, nutrientes, estado trófico y físico químicos.

Abstract

Eutrophication in reservoirs is an issue that has been affecting the water quality of the lentic ecosystems in the Andean region of Colombia, due to the anthropogenic conditions that occur in the basin that supplies it. In the present study the Peñol-Guatapé, San Lorenzo, Punchiná, Porce II and III and Amaní reservoirs will be analyzed, in which this condition can greatly influence nutrient enrichment and that the systems acquire physical characteristics-different from the natural ones, generating other dynamics in the ecosystem and deteriorating the quality of the water. This work was carried out in order to evaluate the trophic status of six reservoirs in the Colombian Andean zone and to see their relationship with some chemical-physical variables. The trophic status of the reservoirs was determined by means of the Salas and Martino (2001) model, and it will also be used in the statistical analysis in which different differences between reservoirs are found. In addition, there are some similarities of variables between reservoirs and finally, the variables that most influenced the trophic state of these reservoirs were determined, these being total phosphorus (P), Orthophosphates (PO_4), ammoniacal nitrogen (NH_3), Total Nitrogen kjeldahl (NTK) and conductivity. Furthermore, it is evident that the Porce II and Peñol-Guatapé reservoirs have a tendency to be Eutrophic, Porce III Mesotrophic and Punchiná, San Lorenzo and Amaní Oligotróficos

Keywords: Eutrophication, reservoir, nutrients, trophic state and chemical physicists.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la calidad del agua en ríos, quebradas y embalses surgió aproximadamente en los años 60's cuando se empezó a dar usos comunes a las palabras contaminación del aire y del agua debido al aumento de la población y la industria. Lo que dio apertura a la idea de que se está contaminando el medio ambiente con el fin de conseguir un progreso (Ramalho, 1990). Debido esto, desde la mitad del siglo XX, surgió un nuevo problema en las aguas superficiales que fue la eutrofización, la cual está relacionada con un rápido crecimiento de algas y plantas acuáticas por la presencia de fertilizantes (nitrógeno y fósforo) provenientes de los vertimientos agrícolas e industriales (Henze, Van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2017). Los vertimientos en los ecosistemas lenticos en la actualidad se ha vuelto un problema, ya que con el aumento de población

y la falta de tratamiento de las aguas residuales doméstica y no doméstica que contienen alta carga orgánica están generando cambios en la dinámica de los ecosistemas. Los vertimientos llegan a quebradas y ríos, donde en algunos casos son embalsados, dando lugar a la acumulación de nutrientes generando alteraciones en la composición físico-química del agua que cambia el estado de eutrofia, perturba las comunidades de flora y fauna y afecta la finalidad del uso, dando al agua embalsada. Este aumento de nutrientes, hace que las algas crezcan tan rápido (floreamiento) que los ecosistemas pierden su equilibrio natural, haciéndolos incapaces de asimilar tal cantidad de algas, lo que genera un deterioro en la calidad del agua y los hábitats, reduciendo el oxígeno que necesitan los peces y otras especies acuáticas para vivir (Villaseñor, 2001). La eutrofización en los embalses está asociada principalmente al aumento en la concentración de nitratos y fosfatos que son los nutrientes limitantes para el crecimiento acelerado de plantas acuáticas y el fitoplancton (Roldan & Ramírez, 2008; Moreno, Quintero & López, 2010). Algunos florecimientos de algas son nocivos para los humanos ya que producen toxinas y crecimientos bacterianos, tanto así que una persona podría enfermarse si está en contacto con el agua contaminada, la bebe o consume algún pez (EPA, 2016).

Los problemas generados por la eutrofización en los ecosistemas lenticos, han puesto de manifiesto la necesidad de entenderlos y evaluarlos de forma adecuada. Por lo cual, se han definido diferentes metodologías para evaluar la eutrofización, y algunos de estos índices fueron: el índice de estado trófico de Carlson (1977), el Modelo de Vollenweider (1981) y la clasificación, según la Organización Para la Conservación y el Desarrollo Económico OCDE en los años 70's. Además del modelo de Salas y Martino (2001), en el cual, se recolectaron datos de aproximadamente 50 embalses y lagos tropicales y se generó un modelo basado en la concentración de fósforo para estos ecosistemas. Siendo estos algunos de los modelos que se usan para diagnosticar y cuantificar el estado trófico de los ecosistemas lenticos (Moreno, Quintero, & Lopez, 2010). Dentro de la clasificación que la OCDE y Salas y Martino, les dan a los embalses por su estado de eutrofización se encuentran: Ultra-oligotrófico, oligotrófico, Mesotrófico, eutrófico e Hiperutrófico del más pobre en nutrientes hasta el más abundante, respectivamente.

En varios lugares del mundo se han realizado trabajos que tratan de generar programas de monitoreo y gestión del recurso hídrico determinando el estado de eutrofización de lagos y embalses, por ejemplo Armengol, (2000) en la conferencia: análisis y valoración de los embalses

como ecosistema, se mencionan los estudios de 103 embalses de España, donde se da una clasificación a los embalses a partir de la composición química del agua y las comunidades planctónicas, además, quedo en evidencia que el 50% de los embalses estudiados estaban eutrofizados y que este porcentaje seguía aumentando con un 60% para el año 1991. También en Sardinata, Italia, se realizó un estudio llamado consecuencias de la eutrofización en la gestión de los recursos hídricos en los embalses mediterráneos: caso de estudio el lago Cedrino (Bachisio et al., 2017). En Serbia, se evaluó el desarrollo de fitoplancton y eutrofización en los embalses Garaši y Bukulja que sirven de abastecimiento de agua (Karadzic, Subakov-Simic, Krizmanic, & Natic, 2010). En Norteamérica, más exactamente en Canadá se realizó un estudio sobre la calidad del agua de algunos lagos de esta zona, llamado programa de contribución de OCDE a la eutrofización. Aporte Canadiense. (Lorraine & Vollenweider, 1981). En Suramérica se han desarrollados varios estudios en lagos y embalses sobre el estado trófico, en lugares como Argentina, con la determinación de la calidad del agua y estado trófico en el embalse río Tercero, donde se midieron parámetros físico-químicos en los años 2003-2006 y con esto se realizaron análisis estadísticos para determinar cuales tenían correlación positiva con el grado de eutrofización (Ledesma, Bonansea, Rodriguez, & Sanchez, 2013). Esto mismo se realizó en Brasil, donde se recolectaron muestras para hacer mediciones de concentración de fósforo total, clorofila a, y se midió la profundidad de disco Secchi, en 18 embalses durante los años 1996 a 2009, dando esto como resultado la creación de un nuevo índice de estado trófico para embalses tropicales y subtropicales con base en las concentraciones totales de fósforo, clorofila a y la profundidad del disco Secchi (Gasparini, Calijuri, & Lamparelli, 2013). En Colombia, se han realizado varios estudios en el embalse Peñol-Guatapé (Antioquia, Colombia), donde se han estudiado las características limnológicas del embalse (Aguirre, Palacio & Ramírez, 2007). Y tambien en este, se han aplicado algunos modelos de calidad de agua en dos sitios diferentes del embalse (Aguirre, Palacio & Ramírez, 2002). Asimismo, Lopez y Madroñero (2015) estudiaron el estado trófico de un lago de alta montaña, la laguna de la Cocha, en Nariño, Colombia. Y finalmente, estudios en el departamento del Huila donde se hizo una evaluación de riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo (Ramos, 2018)

El objetivo del presente trabajo es determinar el estado trófico de seis embalses andinos colombianos (Peñol-Guatapé, Porce II y III, San Lorenzo, Punchiná y Amaní) asimismo identificar cuáles variables físico-químicas son las que más influyen con dicho estado, utilizando algunos

análisis estadísticos para determinarlo, con el fin de generar bases que pueden servir para una adecuada gestión de los embales por parte de las empresas que lo administran en cuanto al recurso hídrico.

METODOLOGÍA

El área de estudio: los embalses analizados y a los cuales se les determinó la relación del estado trófico con algunas variables físico-químicas fueron: Peñol-Guatapé ubicado en municipio del mismo nombre (6° 13' 57" N, 75° 9' 31" O), el embalse de Punchiná (6°12'39"N 74°50'26"O) en el municipio de San Carlos, embalse San Lorenzo(6°25'07"N 75°02'05" O) entre los municipios de San Roque y Alejandría, Porce II (6°52'53"N 75°10'45"O) entre Amalfi, Anorí, Yolombó y Gómez Plata, Porce III (6°56'21"N 75°08'19"O) entre Amalfi, Guadalupe, Gómez Plata y Anorí, ubicados en el departamento de Antioquia y el embalse Amaní (5°34'00"N 74°53'00"O) en el municipio de Norcasia en el departamento de Caldas. Todos estos, ubicados en la cordillera central, siendo afluentes del río Magdalena y los embalses Porce II y III afluentes del río Nechí.

Tabla 1. Principales características de los embalses.

Embalse	Año	Río Principal	D Max (m)	Área (ha)	Perímetro (Km)	Cota Max (Niv.Max)	Capacidad instalada (MW)	Vol. Útil (Mm ³)	Caudal (m ³)	Residencia (días)	Propósito
Peñol-Guatapé (Antioquia)	1973	Nare	60	6365	419	1887	560	N.D	88	153,7	Energía
Amaní (Caldas)	2002	La Miel	188	2050	N.D	445	400	N.D	N.D	N.D	Energía
Porce II (Antioquia)	2001	Porce	118	890	*N.D	922	392	N.D	201	4.7	Energía
Punchiná (Antioquia)	1984	Guatapé	65	340	17	775	1240	50	142	4,1	Energía
San Lorenzo (Antioquia)	1987	Nare	57	1070	42	1250	170	180	40	52,1	Energía
Porce III (Antioquia)	2010	Porce	151	461	N.D	680	660	127	235	N.D	Energía

(Roldan & Ramirez, 2008)

*N.D: no definido.

Tratamiento de datos: la información analizada en este estudio de los parámetros físico-químicos de los seis embalses es información suministrada por dueños patrimoniales que son las empresas Isagen y Empresas públicas de Medellín que permiten el acceso a la información mediante convenio interinstitucional. Con esto, se generó una matriz con la información de los años 2010 a 2015. Las variables definidas para el análisis fueron: Temperatura del agua, Oxígeno disuelto, Saturación de oxígeno, Conductividad eléctrica y pH, que fueron medidas en campo de una muestra de agua puntual. Y las variables Nitrógeno Total kjeldahl, Nitrógeno amoniacal, Nitritos, Nitratos, Ortofosfatos y Fósforo total. El estado trófico y periodo climático; cabe resalta que todos los embalses se ubican en la zona andina colombiana y presenta un régimen pluvial bimodal. Estos periodos climáticos se consultaron en la página del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). También es de gran importancia mencionar que los datos recolectados son de la zona fótica en la región limnética cercana a la presa de cada embalse. Todos los embales son destinados para la generación hidroeléctrica de país.

Diseño experimental: La información a analizar corresponden a datos obtenidos de muestreos realizados entre los años 2010 y 2015 en la zona fótica de la región limnética de cada embalse y en el sitio de monitoreo más cercano a la presa. Para determinar el estado trófico de los embalses se utilizó el modelo de estado trófico para lagos tropicales de Salas y Martino. Este modelo utiliza la concentración de fósforo total y mediante el cual se determinó la probabilidad que los embalses pertenezcan a una de las categorías de estado trófico: Ultra-oligotrófico, oligotrófico, Mesotrófico, eutrófico e Hiperutrófico (Salas & Martino, 2001).

La significancia de las diferencias de los parámetros físico-químicos y los embalses se evaluó mediante análisis de varianza ANOVA de una vía (Guisande, Vaamonde, & Barreiro, 2011). No se cumplieron los supuestos de normalidad de residuos y homogeneidad de varianzas, por lo cual, se siguió explorando con pruebas para datos no paramétricos. Con la prueba de Kruskal-Wallis (Guisande, Vaamonde, & Barreiro, 2011) se determinó, que hay diferencias significativas entre los embalses. Al hallar diferencias significativas, se aplicó la prueba de DUNN en la que se estableció, que algunas variables son similares entre embalses. Y finalmente se ejecutó un análisis discriminante, donde se definieron las variables ambientales asociadas con el estado trófico que ejercen mayor influencia. Todos los análisis se realizaron en el programa R Wizard V 1.1.

RESULTADOS

Se determinó el estado trófico de los seis embalses, donde se observó la condición de eutrofización durante el periodo estudiado. En esta figura 1 se muestra la variación en los estados tróficos de los embalses a lo largo del periodo de estudio. El embalse con más cambios en su estado trófico fue Porce III, que varió entre cuatro estados; por su parte Porce II, Punchiná y San Lorenzo variaron entre dos estados (Figura 1).

El embalse Porce II, esta condición varió entre Eutrófico e Hipertrófico, con una media tendiente a lo Eutrófico. Seguido del Peñol- Guatapé, que durante este periodo se mantuvo estable en condiciones Eutróficas. Finalmente, Porce III, varió su condición de Oligo-Mesotrófico a Eutrófico, mostrando una media tendiente a lo Meso-eutrófico. Siendo estos los embalses que presentan un mayor grado de eutrofización. Los embalses San Lorenzo, Amaní y Punchiná, presentan estados de eutrofización más bajos, tendientes a lo Oligotrófico. En la tabla 2, se resume el estado trófico de cada embalse, siguiendo un orden, desde el de mayor grado eutrofización Porce II y Peñol-Guatapé; Porce III en un grado medio y Punchiná, Amaní y San Lorenzo con un grado de eutrofización bajo.

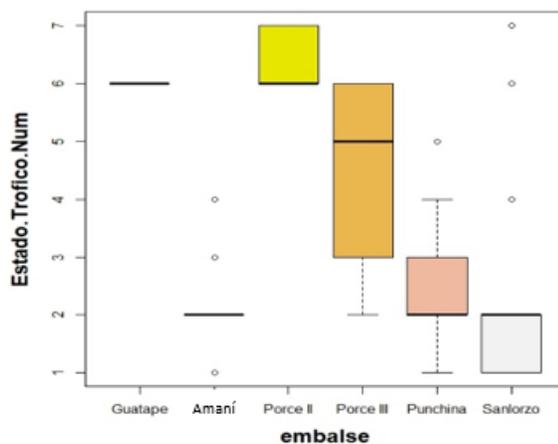


Figura 1. Estado trófico Vs Embalse.

Estado trófico: (1) Ultra oligotrófico, (2) Oligotrófico, (3) Oligo Mesotrófico, (4) Mesotrófico, (5) Mesoeutrófico, (6) Eutrófico, (7) Hipertrófico.

Tabla 2. Estado trófico de los embalses y probabilidad de estado trófico.

Embalse	Estado de eutrofización	Probabilidad de estado trófico según modelo de Salas y Martino. (%)
Porce II	Eutrófico	72
Peñol-Guatapé	Eutrófico	72
Porce III	Mesotrófico	67
Punchiná	Oligotrófico	72
Amaní	Oligotrófico	72
San Lorenzo	Oligotrófico	71

En los análisis estadísticos; el Análisis de Varianza Anova de una vía, arrojo que los supuestos no se cumplían para todas las variables, lo cual, se expresó con valores de $P < 0.05$ explicando, que las variables no tienen una distribución normal; además de esto, tampoco se encuentra homogeneidad de las varianzas, también se hallan diferencias estadísticamente significativas de estas variables entre cada embalse, concluyendo que la base de datos con la cual se iba a trabajar tiene un comportamiento no paramétrico.

En el análisis de Kruskal y Wallis, las concentraciones de las variables entre embalses arrojan como resultado que los valores de P de todas son menores a 0.05, interpretándose esto, que existen diferencias significativas de las variables entre cada embalse, confirmando lo hallado en el análisis de Varianza Anova

Al hallar diferencias significativas entre los embalses, se realizó el test de DUNN, en este se muestran los resultados generales de la similitud de algunas variables físico-químicas entre embalses (Tabla 3). Es importante resaltar que, aunque entre los embalses se encontraron diferencias significativas, se pueden hallar también que entre los embalses se presentaron algunas similitudes en las concentraciones de variables que tiene relación con su estado trófico (Tabla 3). También se evidencia que entre los embalses Peñol- Guatapé y Porce III, se halla una similitud entre las variables pH, Fósforo total y el índice de Estado trófico. Además, se observa una igualdad

en los embalses Amaní y San Lorenzo en el índice de estado trófico, fósforo total, orto fosfatos (PO₄) y nitrógeno amoniacal (NH₃).

Tabla 3. Resumen test de DUNN y valores de P.

Variabes físico-químicas	Embalses similares	Valor de P.
pH	Peñol- Guatapé y Porce III	0,4343
Oxígeno disuelto	Peñol-Guatapé y San Lorenzo	0,093
	Amaní y Porce III	0,947
	Punchiná y Amaní	0,109
	Punchiná y Porce III	0,307
Amoniacal (NH ₃)	Amaní y San Lorenzo	0,058
Nitratos (NO ₃)	Porce III y San Lorenzo	0,12
Orto fosfatos (PO ₄)	Amaní y San Lorenzo	0,36
Fósforo Total	Peñol-Guatapé y Porce III	0,067
	Amaní y San Lorenzo	0,096
Estado trófico	Peñol-Guatapé y Porce III	0,067
	Amaní y San Lorenzo	0,096

Estos resultados evidencian que los seis embales estudiados, San Lorenzo, Amaní, Porce III, Punchiná y Peñol- Guatapé tienen variables con comportamientos similares, caso contrario con el embalse Porce II que solo muestra similitud con Punchiná en la profundidad de la zona fótica.

En la figura 2 del análisis discriminante se encontró que el modelo explica con un 91.7 % la variabilidad de los datos. También, nos muestra gráficamente que la afinidad o la relación que tiene el estado trófico con las variables fósforo total, nitrógeno amoniacal, orto fosfatos, conductividad y NTK, es alta y que estas, tienen gran influencia en la eutrofización de los embalses. Adicionalmente, las variables pH, nitritos y nitratos, también influyen en la eutrofización, pero de una manera no tan directa como las variables anteriormente mencionadas (Roldan & Ramirez, 2008).

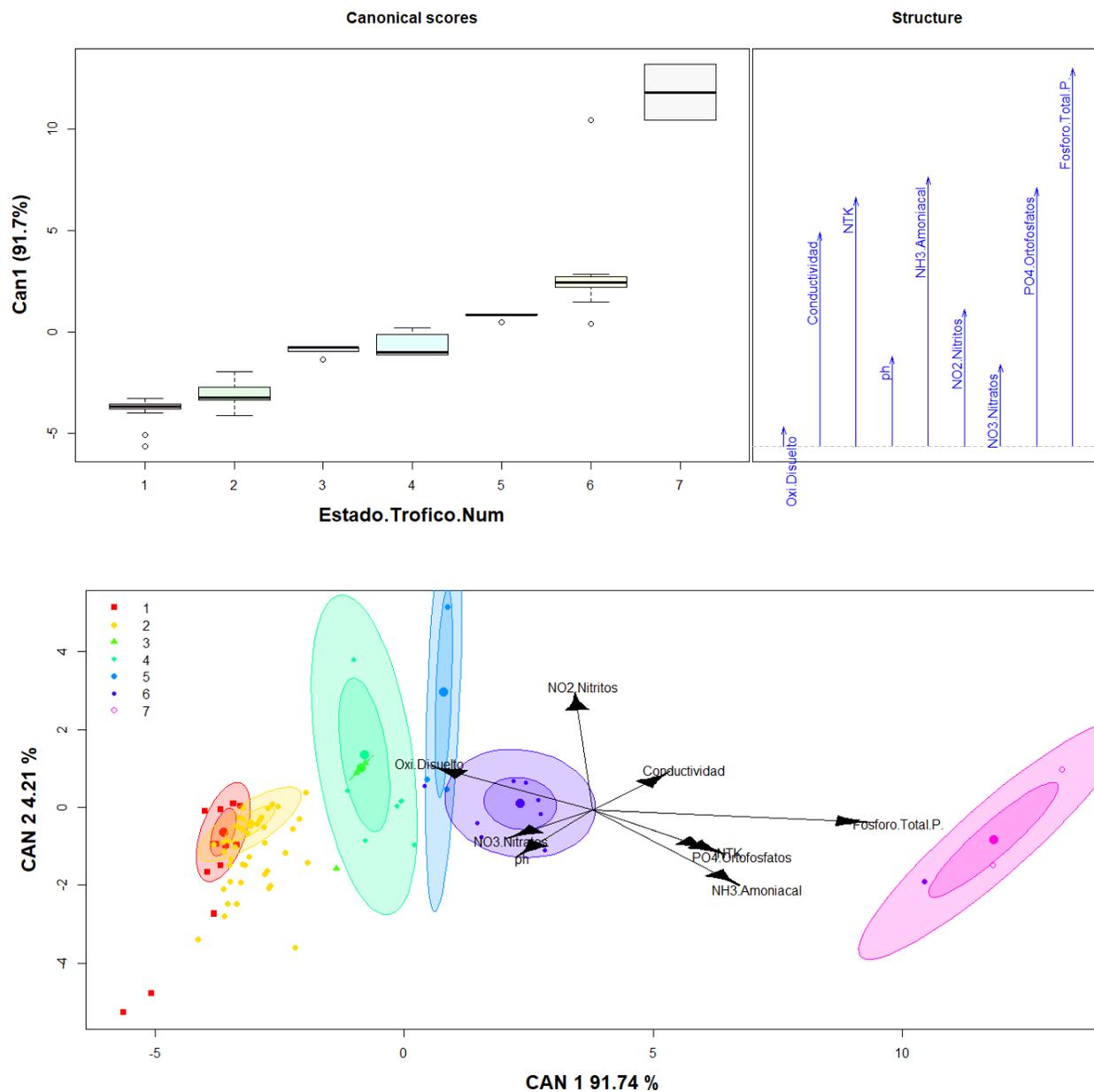


Figura 2. Resultado del Análisis Discriminante

DISCUSIÓN

El embalse Porce II es uno de los cuerpos de agua que presenta el mayor grado de eutrofización en el estudio, y por ende un mayor deterioro en la calidad del agua, esto debido a que el río Porce en su recorrido hasta el embalse recibe las descargas de las aguas residuales de aproximadamente

3,3 millones de personas que viven en el Valle de Aburra y de la industria ubicada en los alrededores, generando que sus aguas se enriquezcan con nutrientes y sólidos (Flórez et al., 2018). Prueba de ello es el estudio del río Medellín, zona alta de la cuenca del Porce, donde se evaluó la variación espacial y temporal del nitrógeno, el cual mostró que en el río se encuentran concentraciones de nitratos y nitritos menores a 0,6 mg/l y que la forma de nitrógeno que presenta mayor concentración es la amoniacal con 8 mg/l (Giraldo, Agudelo, & Palacio, 2010), todo esto asociado con la carga de nutrientes que lleva el río Porce, y que al ingresar al embalse Porce II, género que este presente un grado de eutrofización alto (Sánchez, Florez, & Parra, 2014), ocasionando una alta productividad en el sistema y bajos niveles de oxígeno (EPM, 2019) En cuanto a lo hallado en el presente trabajo, el embalse Porce II, se encontraron valores de nitritos inferiores y nitratos superiores con un máximo de 1,66 mg/l y valores de nitrógeno amoniacal por debajo de lo hallado por, Giraldo, Agudelo, & Palacio, (2010), pudiendo estas diferencias estar relacionadas con el aprovechamiento de estos nutrientes por el fitoplancton y macrofitas y acumulación de nutrientes en el embalse. Para el embalse Porce II se evidenciaron valores mínimos de oxígeno disuelto de 1,8 mg/l hasta valores máximos de 12,9 mg/l para la profundidad estudiada; evidenciando variaciones significativas en la concentración de oxígeno. Los resultados hallados son coherentes con lo encontrado por Cuellar (2009) y Sierra (2011), donde se presentaron comportamientos similares. Caso análogo sucede con el embalse Peñol- Guatapé, que también presentó tendencias a la eutrofización; este embalse es alimentado por el río Nare que recibe las descargas de quebradas que atraviesan varios municipios del altiplano antioqueño. En esta cuenca hay gran influencia de actividad antrópica, como lo es la industria, agricultura y ganadería, que generan un aporte significativo de carga orgánica, además de aumentar las concentraciones de nutrientes en las fuentes superficiales, siendo transportadas hasta el embalse (Benjumea, Suárez, & Villabona, 2018). Debido a esto, la tendencia de este tipo de embalses es de unas altas concentraciones y utilización rápida de los nutrientes. También en la parte de comunidades bióticas, presenta una alta biomasa y una baja diversidad. Además de que la transparencia es baja y la zona fótica es de pocos metros o incluso de algunos centímetros de profundidad y finalmente la apariencia del agua es de color verdoso o amarillento por la presencia de algas y vegetación acuática flotante o sumergida corroborado por Roldan & Ramírez (2008) y Cuellar (2009).

En cuanto al oxígeno disuelto en estos dos embalses anteriormente mencionados, tenemos que para el Peñol – Guatapé, la concentración más baja obtenida es de 5,6 mg/l y la máxima es de 6,6

mg/l y en Porce II se registró un valor mínimos de 1,8 mg/l y un máximo de 12,9 mg/l, evidenciando que el embalse Peñol- Guatapé, la concentración de oxígeno es más estable, que la concentración de oxígeno de Porce II que tuvo un rango de variación más amplio, pudiendo esto, estar asociado a la producción de oxígeno por fotosíntesis y al consumo de oxígeno por parte de los microorganismos que descomponen la materia orgánica.

La ubicación geográfica de los embalses estudiados, la cuenca que los abastece, dinámicas socio-culturales y factores antrópicos que se pueden presentar e influenciar en la calidad del agua que llega al embalse, tenemos que, los embalses con más dinámica económica y de población, son los que presentan estados de eutrofización mayores, siendo Porce II, Porce III y Peñol-Guatapé, además, que son los primeros en recibir las aguas de las cuencas Porce y río Nare respectivamente. Estos sistemas leníticos se pueden asociar a grandes concentradores o biodigestores para los nutrientes, generando que el volumen de agua efluente salga del embalse con condiciones de nutrientes y sólidos en bajas concentraciones.

Los embalses Porce III, Punchiná y San Lorenzo son embalses que están ubicados aguas abajo de los embalses Porce II, Playas y Peñol-Guatapé respectivamente. Y según los resultados obtenidos mediante el modelo de Salas y Martino, (2001) tienen una distribución de probabilidad en un menor grado de eutrofización, lo que se traduce en una mejor calidad de agua en comparación con los embalses Porce II y Peñol-Guatapé. El estado trófico de estos embalses está influenciado al represamiento en un sistema anterior y, por ende, hace que las aguas del río principal que surten los embalses reduzca la concentración natural de nutrientes y sedimentos (Loizeau, Dominik, Luzzi, & Vernet, 1997).

El embalse Amaní, tiene como principal abastecedor al río La Miel. Sus principales afluentes son los ríos Moro y Tenerife que nacen al interior del Parque Nacional Selva de Florencia y un trasvase del río Guarinó (CorpoCaldas, 2001). En consecuencia, a esto, las condiciones con que las que llega el agua al embalse no presenta altas cargas de nutrientes que afecte el estado trófico, en la parte de la cola del embalse, este grado tiende a lo oligotrófico con episodios de mesotrófia (Benjumea, Bedoya, & Álvarez, 2014) relacionándose esto con el grado de eutrofización hallado en el presente estudio, que nos indica que el embalse en la zona de presa tiende a oligotrófico. La dinámica social y económica de los asentamientos poblacionales por donde fluye el río La Miel hasta llegar al embalses, se asume, que no son de grandes asentamientos urbanos y de gran

desarrollo industrial, como los embales con más grado de eutrofización, entendiendo esto como una cuenca con poca intervención antrópica, además de tener el nacimiento de sus principales afluentes en un parque nacional, lo cual influye a que se conserve una dinámica natural asociada a la incorporación de nutrientes (Roldan & Ramirez, 2008). En cuanto a las concentraciones de nutrientes que trae el río, según lo planteado por Benjumea, Bedoya, & Álvarez, (2014) se hallaron valores de máximos de fósforo de 0,19 mg/l, nitritos de 0,15 mg/l y nitrógeno amoniacal de 0,89 mg/l. A pesar de las concentraciones de nutrientes que transporta el río, en el presente estudio, estas variables presentaron un comportamiento diferente tendiente a la reducción; el fósforo por ejemplo, tuvo un valor de 0,072 mg/l y los nitratos con un valor de 0,12 mg/l, caso contrario con nitrógeno amoniacal que aumentó su concentración a 1,17 mg/l. Esta variación en la concentración de nutrientes puede estar relacionado con el cambio que se presenta de un sistema lótico a uno léntico y la transformación que se puede presentar de los nutrientes, por el consumo, la sedimentación, entre otros, en su recorrido desde el río hasta la zona de presa del embalse.

En la aplicación del test de Dunn para identificar si entre embales se presenta similitudes en el comportamiento de algunas variables (tabla 4), tenemos que los embales Peñol-Guatapé y Porce III presentan valores de pH entre 6,83 y 8,75, valores apropiados para que se pueda desarrollar vida, tendiendo a lo ácido y a lo básico, sin llegar a extremos. El pH es influyente en el estado trófico de un cuerpo de agua, ya que es un factor para el crecimiento de biota e influye en la especiación de los nutrientes, además de tener influencia en la disponibilidad y absorción de los nutrientes (Umamaheswari & Shanthakumar, 2016). En algunos casos la alcalinidad ha sido utilizada como indicador de la productividad de lagos, en los cuales niveles altos indican alta productividad y viceversa, que se evidenció para los embalses Porce II y III con sus elevados valores de pH. En aguas de embalses con mucha productividad, los procesos de fotosíntesis pueden agotar el CO₂ libre, al punto que el pH de estas aguas pueda alcanzar valores de alcalinidad entre 9 y 10 unidades (Andrade & Costa, 2007; Lampert & Sommer, 2007). En este estudio en los embalses Porce II y III encontramos valores de pH de 8,93 y 8,75 respectivamente, que son característicos de embalses con alta productividad y muchas veces, está relacionada con altos grados de eutrofización. Para el embalse Amaní se registraron valores de pH de 10 unidades, y evidenciando el estado trófico que presenta, a este se le asocia una baja productividad, es posible que el embalse este ubicado en una región en la cual su lecho rocoso este compuesto de roca caliza la cual aumenta su alcalinidad a diferencia de otro tipo de lecho como por ejemplo el de roca ígnea (Wetzel, 1975)

Como se había mencionado anteriormente, cada embalse tiene su propia dinámica y esta, está muy relacionada con el afluente que lo abastece y otras características propias de la zona donde se ubica el embalse. Debido a esto, podemos asociar que el pH en el agua puede ser modificado por la actividad biológica o por intercambio de CO₂ con el aire. Además, que el pH también depende de la temperatura, ya que se espera que el pH disminuya aproximadamente 0.01 unidades por 1°C de aumento (Fuentes & Massol-Deya, 2002; Roldan & Ramírez, 2008; Park, Craggs & Shilton, 2010). La similitud entre los valores de pH se puede asociar a que ambos tienen un grado de estado trófico alto, pudiendo esto influir. También se puede asociar con dinámicas análogas en la descomposición de materia orgánica, la estratificación térmica, entre otras. Que expliquen la similitud de esta variable entre estos embales.

La variable oxígeno disuelto entre los embalses Peñol-Guatapé y San Lorenzo presentó valores entre 4,95 y 7,20 mg/l, además, estos embales están ubicados sobre los 1200 m.s.n.m y presentan temperaturas entre los 24 y 27 °C y los embalses de Punchiná, Porce III y Amaní presentaron valores entre 3,78 y 10,54 mg/l de Oxígeno disuelto, también presentan temperaturas entre los 24 y 29 °C y se encuentran ubicados por debajo de los 800 m.s.n.m. Hay que tener presente que la variación en la concentración de oxígeno es inversa con la temperatura y se tiene que para agua dulces esta concentración oscila entre 15 mg/l a 0°C y 8 mg/l a 25 °C. Además de la relación directa que existe entre la influencia de la altura sobre del nivel del mar y la presión atmosférica en la solubilidad de los gases y que esto puede afectar la concentración de oxígeno (Chapman, 1996), teniendo que a mayor altura la concentración de oxígeno es más baja sin tener en cuenta otras variables que pueden influir en el proceso, como la turbulencia y condiciones meteorológicas (Wetzel, 1975).

Adicionalmente, en el embalse Porce III se halló una concentración de OD de 10,54 mg/l, esta se puede relacionar principalmente a la acción fotosintética de las algas. En embalses como, Amaní, Punchiná y San Lorenzo, que son embalses que presentan un grado de eutrofización bajo (oligotrófico y oligo-mesotrófico), estos, no presentar cambios significativos en la concentración de oxígeno y tienden a tener concentraciones muy estables de oxígeno, a no ser que haya alguna alteración externa que lo pueda afectar. (Roldan & Ramirez, 2008).

En cuanto a los nutrientes en los embalses, se tiene que para los embales Amaní y San Lorenzo presentaron similitud en las variables: Nitrógeno amoniacal, Ortofosfatos y fósforo total, teniendo

esta relación, ya que ambos muestran el mismo grado de eutrofización y, asociado a estas concentraciones de los nutrientes, además de que estos son los que regulan la biomasa y mantienen el equilibrio acuático. La cantidad de nutrientes dentro del sistema influenciara en el estado trófico y por ende en la calidad del agua (Tundisi & Marsumura, 2008). El fósforo en los cuerpos de agua está asociado con la formación de biomasa, lo cual requiere un aumento en la demanda de oxígeno para su oxidación. Este, en forma de ortofosfatos, es el nutriente de los organismos fotosintetizadores, lo cual lo hace el nutriente limitante para estas comunidades (Castañeda & Florez, 2013). En estos embalses este elemento se evidencio en concentraciones de 0,002 a 0,072 mg/l y 0,007 a 0,08 mg/l en Amaní y San Lorenzo respectivamente, también para el embalse Punchiná se hallaron valores de fósforo total entre 0,008 y 0,085 mg/l, que para el modelo probabilístico de Salas y Martino, estas son concentraciones bajas que se asocian a aguas de buena calidad y que tiene estados tróficos bajos entre ultra oligotrófico y Oligotrófico. Con una dinámica natural y con poca intervención antrópica que genere el ingreso de nutrientes alóctonos al sistema; ya en concentraciones mayores de fósforo total como 0,09 a 0,1 mg/l, 0,029 a 0,143 mg/l y 0,168 y 0,32 mg/l que se presentan en los embalses Peñol-Guatapé, Porce III y Porce II respectivamente, son concentraciones del nutriente que presentan estados tróficos altos, entre mesotrófico hasta eutrófico (OECD, 1982; Carlson, 1977; Gasparini, Calijuri, & Lamparelli, 2013), presentando alteraciones en el ecosistema asociadas a alta productividad, presencia de algas y plantas acuáticas. Como se menciona anteriormente estos embalses son alimentados por ríos los cuales tienen una gran dinámica social, industrial, agrícola, que genera que aumenten la concentración de los nutrientes.

Y finalmente en el análisis discriminante, figura 3, se observan las variables que más se relacionan con el estado trófico de estos embalses. El fósforo, es la variable que más relación tiene con el estado trófico de estos embalses, ya que es de gran importancia para el metabolismo biológico, es el menos abundante y es el limitante en la producción primaria. También el ortofosfato, ya que este es una forma de fácil asimilación por los microorganismos y se utiliza como parámetro de control en procesos de calidad del agua y biológicos (Sanchez & Zea, 2000). Es por esto que alguno de los métodos para determinar el estado trófico de los embales están basados en la concentración de fósforo total (Salas y Martino, 2001; Gasparini, Calijuri, & Lamparelli, 2013; Esteves, 2011).

La conductividad eléctrica, es una expresión numérica de la capacidad del agua en conducir una corriente eléctrica. Esta es determinada por la presencia sustancias disueltas (iones y cationes) que pueden conducir la corriente (Esteves, 2011). Es por esto que algunos autores como, Olía (2005), mencionan que compuestos como el fosfato, nitratos y sulfatos, son de gran aporte para aumentar la conductividad, y asociado a esto, en el presente estudio pudimos evidenciar que los embalses con el mayor estado trófico fueron los que presentaron la mayor conductividad eléctrica con valores entre los 128 y 251 $\mu\text{s}/\text{cm}$ para los embalses Peñol-Guatapé, Porce II y Porce III, además, que el incremento de la conductividad en los embalses puede estar asociada al material producto de la escorrentía, pero principalmente la contaminación antrópica (Armengol, et al., 1999). Estas concentraciones mayores a 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ se asocian a lagos y cienagas que reciben las descargas de varios ríos, y por ende a la acumulación de nutrientes que los hace propensos a la eutrofización (Roldan & Ramirez, 2008). Por otro lado, tenemos los embalses con grados de eutrofización menores, que presenta conductividad entre 25 y 47 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pertenecientes a Amaní, Punchiná y San Lorenzo donde según Roldan & Ramirez, (2008); y Sierra, (2011) son valores que se encuentran relacionados con lagos y embalses de alta montaña que tienen un máximo de 50 $\mu\text{s}/\text{cm}$, y que además de estos presentan bajas concentraciones de iones y cationes disueltos en el agua.

En este sentido, los compuestos de nitrógeno, los más relacionados con el estado trófico en estos sistemas lenticos fueron: el nitrógeno amoniacal (NH_3), el cual, dentro del sistema es de gran importancia para los productores, ya que es utilizado para la síntesis de proteínas. El NH_3 dentro del sistema en concentraciones superiores a 0,25 mg/l afectan el crecimiento de peces y mayores a 0,5 mg/l se considera letales (Roldan & Ramirez, 2008). Dentro del estudio se hallaron embalses con concentraciones superiores a estas, en los embalses Peñol-Guatapé, Porce II y Porce III con valores de 0,5, 2,38 y 0,7 mg/l NH_3 ; concentraciones que pueden llegar a limitar la vida acuática dentro del ecosistema. Una concentración similar fue hallada en el trabajo de García, Benjumea & Quijano, 2018, en el humedal Quirama, con un valor de 0,48 mg/l NH_3 , presentado este humedal una probabilidad de estado trófico hipertrófico, según el modelo de Salas y Martino, (2001) utilizado en ese estudio.

El Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) exhibió una relación con el grado de eutrofización de los embalses, ya que este, según Rivas et al., (2009) sistemas acuáticos con concentraciones elevadas

de NTK se asocian con ambientes de una alta intervención. Este parámetro está asociado con el nitrógeno orgánico y el ion amonio. Dentro del estudio los embalses que mayor concentración presentaron fueron, Peñol- Guatapé, Porce III y Porce II con valores de 1 mg/l, 0,3 a 2,5 mg/l y 2,1 a 4,9 mg/l respectivamente. Para los embales San Lorenzo, Amaní y Punchiná se presentaron valores entre 0,12 y 0,6 mg/l, 0,25 y 0,96 mg/l y 0,14 y 0,71 respectivamente, estos son los embalses que presentan menor grado de eutrofización asociado un menor grado de intervención antrópica.

Y finalmente los nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) que se relacionan con la eutrofización, pero de una manera no tan directa como los parámetros anteriormente mencionados. Para los embalses Peñol-Guatapé, Porce II y Porce III se evidencian valores de NO_2 entre 0,01 mg/l, 0,079 y 0,336 mg/l y 0,009 y 0,25mg/l respectivamente; y para los embalses Amaní, Punchiná y San Lorenzo se presentaron valores de 0,0 a 0,12 mg/l, 0,001 a 0,023 mg/l y 0,001 a 0,03 mg/l, donde evidentemente se observa que en estos últimos tres embalses las concentraciones encontradas son menores y posiblemente esto es debido a la diferencia del grado de eutrofización. Con respecto a esta variable, en el embalse Cienfuegos (Cuba) se encontraron concentraciones en un rango entre 0.001 y 0,039 mg/l (Betancur, Suarez, Roberto, & Toledo, 2009), presentando así un nivel de eutrofización eutrófico, siendo similar al del Peñol-Guatapé y Porce II. De igual manera pasa con los nitratos (NO_3) que, para los tres embalses que presentaron mayor grado de eutrofización las concentraciones variaron entre 0,5 y 1,99 mg/l. Mientras que para el embalse Amaní con menor grado eutrofización se presentaron valores entre 0,002 y 0,87 mg/l, pero para los embalses Punchiná y San Lorenzo se presentaron concentraciones entre 0,19 y 1,8 mg/l y 0,113 y 1,99 mg/l respectivamente, estos son valores similares a los que presentaron los embales más eutróficos, estos valores pueden ser atípicos que se pudieron presentado por algún tipo de evento dentro de la cuenca o que en realidad como muestra el análisis discriminante, esta variable tiene poca relación con el estado de eutrofización en los embalses. Según Belakang (2004), los rangos óptimos de nitritos y nitratos en aguas naturales varían entre 0,1 y 0,2 mg/l, en la cual se desarrolla una vida acuática en buenas condiciones. En el embalse San Roque en Córdoba, Argentina se hallaron concentraciones de nitratos entre 0,02 y 0,75 mg/l, que para este embalse son críticas, pues este presenta un índice de eutrofización eutrófico, que debido a esto, presenta problemas ya que el agua del embales es utilizada para abastecer de agua potable la ciudad de Córdoba (Rodríguez, et al., 2006).

CONCLUSIÓN

Se encontró una relación estrecha entre el embalse y su fuente hídrica abastecedora ya que, debido a la dinámica social, cultural, industrial y agrícola de la cuenca, depende la calidad del agua del embalse, además, se encontró que los embalses con un desarrollo significativo sobre la cuenca, son los que presentan un mayor deterioro en la calidad de agua, asociado a descargas de aguas residuales domésticas y no domésticas, con altas cargas de materia orgánica e inorgánica, que contiene grandes cantidades de nutrientes y que finalmente llegan al embalse, donde se acumulan, promoviendo procesos de eutrofización. También se halló que, si bien los embalses están ubicados sobre la zona andina colombiana, no son iguales, aunque, entre algunos se presentaron parámetros físicos químicos similares posiblemente asociados con el grado de eutrofización, cuenca abastecedora, tipo de suelo y dinámicas propias de los embalses. Y finalmente, se encontraron que las variables físico químicas que más influyen en el estado trófico de estos seis embalses tropicales son: el fósforo (P), el nitrógeno amoniacal (NH_3), Ortofosfatos (PO_4) y Nitrógeno Total kjeldahl (NTK), además de la Conductividad eléctrica, que es un parámetro que nos puede indicar de una manera indirecta el grado de eutrofización, basándose en la cantidad de iones presentes en el agua. Es importante resaltar, que este tipo de estudios en los embalses es de gran importancia, ya que con estos se pueden identificar los parámetros que están afectando la calidad del agua, y de esta manera generar una correcta gestión del recurso hídrico superficial, sobre estos cuerpos de agua dulce.

Referencias

- Aguirre, N., Palacio, J., & Ramirez, J. (2002). Aplicaciones de algunos modelos de calidad de agua en dos sitios del embalse El Peñol-Guatapé. *Revista Facultad de ingeniería N 26*, 18-29.
- Aguirre, N., Palacio, B., & John, R. (2007). Características limnológicas del embalse el Peñol-Guatapé, Colombia. *Revista de ingenierías Universidad de Medellín*, 53-66.
- Andrade, M., & Costa, J. (2007). Mixotrophic cultivation of microalga *Spirulina platensis* using molasses organic substrate. *Aquaculture 264*, 130-134.

- Armengol, J. (2000). *Análisis y Valoración de los embalses como ecosistemas*. Barcelona: Univerodad de Barcelona.
- Armengol, J., Comerma, M., Garcia, J., Romero, M., Rodrigues, J., Valero, F., & Vidal, A. (1999). Contribucion al coneixment del ecologia acuatica del embassament de Sau. En *Evolucio del embassament at 1999* (pág. 120). Barcelona, España: Univeridad de Barcelona, Departament de ecologia.
- Bachisio, M., Sechi, N., Giuseppina, L., Mariani, M., Pulina, S., Sarria, M., . . . Luglie, A. (2017). Consequences of eutrophication in the management of water resources in Mediterranean reservoirs:A Case study of lake Cedrino (Sardinata,Italy) . *Global Ecology and conservation* , 21-35.
- Benjumea, C., Bedoya, C., & Alvarez, A. (2014). Evolución en la carga de nutrientes de ríos de montaña que fluyen a un mebalse, cuenca media del río Magdalena. *Escuela de ingeniería de Antioquia*, 71-85.
- Benjumea, C., Suárez, M., & Villabona, S. (2018). Variación espacial y temporal de nutrientes y total de sólidos en suspensión en la cuenca de un río de alta montaña tropical . *Revista de la academia Colombian de ciencias exactas, física y naturales* , 353-363.
- Betancur, C., Suarez, Roberto, & Toledo, L. (2009). Ciclo anual de nitrógeno y el fósforo en el embalse Paso Bonito,Cienfuegos,Cuba. *Limnetica*, 79-90.
- Bollman, H., Carneiro, C., & Pergorini, E. (2005). Qualidade da agua e dinamica de nutrientes. En C. Andreoli, & C. Carneiro, *Gestao integral de manancias de abastecimiento eutrofizacion* (págs. 213-270). Curitiba: Grafica capital.
- Carlson, R. (1977). A trophic state index for lakes . *Limnology and oceanography* 22, 361-369.
- Castañeda, A., & Florez, H. (2013). Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante planats macrofitas tipicas en los altos de Jalisco, Mexico. *Tecnología y sociedad*.
- Chapman, D. (1996). A Guide to use of biota,sediments and water in enviromental monitoring. *Water Quality Assessments.Second edition*, 651.
- CorpoCaldas. (2001). *Plan de Gestión Ambiental regional para Caldas* . Manizales.

- Cuellar, W. (2009). Calidad del agua en embalse de EPM. Retos y oportunidades. caso de estudio: embalses de Riogrande II y Porce II, Antioquia, Colombia. *IV Congreso Iberoamericano sobre desarrollo y ambiente (CISDA IV)*, (pág. 12).
- Cuellar, W. (2009). Calidad del agua en embalses de EPM, retos y oportunidades. Caso de estudio: Embalse Riogrande y Porce II, Antioquia-Colombia. *Ponencia, IV Congreso iberoamericano sobre desarrollo y ambiente*.
- EPA, A. d. (2 de 12 de 2016). *español.epa.gov*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes>
- EPM. (2019). *Levantamiento de línea de base para el desarrollo de una prueba piloto para el control químico de malezas acuáticas en el embalse Porce II*. Rionegro: Universidad Católica de Oriente. Informe final. Contrato N°29990433817.
- Esteves, F. (2011). *Fundamentos de limnología*. Rio de Janeiro: Interciencias.
- Esteves, F. (2011). *Fundamentos de limnología*. 2 ed. Rio de Janeiro : Interciencia.
- Flórez, M., Parra, L., Bolaños, S., Gallo, L., Poveda, A., & Agudelo, D. (2018). Tasas de sedimentación y caracterización de sedimentos de fondo en tes embales de Antioquia, Colombia. *Ingeniería del Agua*, 177-194.
- Fuentes, F., & Massol-Deya, A. (2002). Manual de laboratorio . *Ecología de microorganismos*, 202-217.
- Fuentes, F., & Massol-Deya, S. (s.f.).
- Gasparini, D., Calijuri, M., & Lamparelli, M. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs. *Ecological Engineering*, 126-134.
- Giraldo, L., Agudelo, R., & Palacio, C. (2010). Variación espacial y temporal del nitrógeno en el río Medellín. *Dyna*, 124-131.
- Guisande, C., Vaamonde, A., & Barreiro, A. (2011). *Tratamiento de datos con R, STATISTICA Y SPSS*. España: Diaz De Santos.
- Henze, M., Van Loosdrecht, M., Ekama, G., & Brdjanovic. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. London: IWA publishing.

- Karadzic, V., Subakov-Simic, G., Krizmanic, J., & Natic, D. (2010). Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garasi and Bukulja. *Desalination*, 91-96.
- Lampert, W., & Sommer, U. (2007). *limnoecology: Special features of aquatic habitats*. New York: Oxford University press inc. Second edition.
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodriguez, C. M., & Sanchez, A. (2013). Determiacion de indicadores de eutrofizacion en el embalse Rio Tercero, Cordoba (Argentina). *Revista de ciencia agronomica V 44.*, 419-425.
- Loizeau, J., Dominik, J., Luzzi, T., & Vernet, J. (1997). Sediment core correlation and mapping of sediment accumulation rates in lakes Geneva(Switzerland,France) Using volume magnetic susceptibility. *Journal of great lakes research*, 391-402.
- Lopez, M., & Madroñero, S. (2015). Estado trofico de un lado tropical de alta montaña: Caso laguan de la cocha. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 21-42.
- Lorraine, J., & Vollenweider, R. (1981). *The OECD cooperative programm on Eutrophication.Canadian Contribution*. Burlington,Ontario,Canada.: National water research institute inland waters directore Canada centre for inland waters.
- Moreno, D., Quintero, J., & Lopez, A. (2010). Metodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Contactos*, V.78 P 25-33.
- Mundo. (6 de Abril de 2017). *El mundo.com*. Obtenido de <https://www.elmundo.com/noticia/Agua-verde-en-Guatape-es-causada-por-cianobacterias/349852>
- OECD. (1982). . *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Cooperative Programmers on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control)*.. OECD Paris: Environment directorate.
- Oriente, M. (7 de Abril de 2017). *Mi Oriente.com*. Obtenido de <https://mioriente.com/embalses/guatape/17816.html>

- Park, J., Craggs, R., & Shilton, A. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology* 102, 35-42.
- Petrere, M. J. (1996). Fisheries in large tropical reservoirs in South America. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*.
- Quijano, M., Villabona, S., Garcia, J., & Gomez, C. (2018). *Los humedales del oriente antioqueño y su conceptualización*. Rionegro: Universidad Católica de Oriente.
- Ramalho, R. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec, Canada: Editorial reverté S.A.
- Ramos, A. (2018). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalses El Quimbo, Huila. *Universidad pedagógica y tecnologica de Colombia*.
- Rivas, Z., Sanchez, J., Troncone, F., Marquez, R., Ledo, H., Colina, M., & Gutiérrez, E. (2009). Nitrógeno y Fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, Vol 34, 308-314.
- Rodriguez, M., Ruiz, M., Vilchez, G., Crema, N., Ruibal, A., & Bustamante, M. (2006). Monitoreo de un cuerpo de agua eutrófico embalse San Roque (Córdoba, Argentina). *I congreso internacional sobre gestion y tratamiento del agua*. Cordoba, Argentina: instituto nacional del agua -centro de la region semiarida.
- Roldan, G., & Ramirez, j. (2008). *Fundamentos de limnologia neotropical*. Medellin: Universidad de Antioquia.
- Salas, H., & Martino, P. (1991). A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS)*., 341-350.
- Salas, H., & Martino, P. (15 de 04 de 2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofia en lagos cálidos tropicales*. Obtenido de Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaca/e/fulltext/eutrof/eutrof.pdf>
- Sánchez, L., Florez, T., & Parra, L. (2014). Reconstrucción de las concentraciones de materia orgánica y nutrientes mediante espectrometría y análisis de diatomeas en tres embalses de Antioquia. *Ciencias de la tierra*., 409-417.

- Sanchez, R., & Zea, S. (2000). Metabolismo de nitrógeno y fósforo inorganico disuelti en la columna de agua en un alaguna costera tropical. *Caribbean Journal of Science*, Vol. 36., 127-140.
- Sierra, R. (2011). *Eutrofización de embalses: prevención y manejo*. Bucaramanga.
- Sriwongsitanon, N., Surakit, K., & Thianpopirug, S. (2011). Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application. *Journal of hydrology*, v.401,p.203-220.
- Tundisi, J. (1986). Latitudinal distribucion of calanoide copepods in freshwater aquatic systems of Brazil. *Bras, Biologia*, 527-553.
- Tundisi, J., & Tundisi-Marsumura, T. (2008). *Limnologia* . Sao Paulo: Oficina de textos.
- Umamaheswari, J., & Shanthakumar, S. (2016). Efficacy of microalgae for industrial wastewater treatment: a review on operating conditions, treatment efficiency and biomass productivity. *Reviews in environmental science and bio/technology* 15, 265-284.
- Villaseñor, J. (2001). *Eliminacion biologica de fosforo en aguas residuale urbanas*. Castilla- La Mancha.: Univeridad de castilla-La Mancha.
- Wetzel, R. (1975). *Limnology*. United states of american : W.B.Saunders company.