

**COMUNIDADES BIOLÓGICAS COMO INDICADORAS PARA LA
CONSERVACIÓN DE AGUAS EPICONTINENTALES**

Proyecto interno PCI-2015-8774 GRIB

**COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA, PERIFÍTICA Y PARÁMETROS
FISICOQUÍMICOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA
RESERVA EL SANTUARIO TAUSA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.**

Laura Daniela Ortiz Rodríguez

Universidad El Bosque

Facultad de Ciencias

Programa de Biología

Bogotá, D.C

**COMUNIDADES BIOLÓGICAS COMO INDICADORAS PARA LA
CONSERVACIÓN DE AGUAS EPICONTINENTALES**

Proyecto interno PCI-2015-8774 GRIB

**COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA, PERIFÍTICA Y PARÁMETROS
FISICOQUÍMICOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA
RESERVA EL SANTUARIO TAUSA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.**

Laura Daniela Ortiz Rodríguez

Directora: M.Sc Mónica Castillo Aguilar

TRABAJO DE GRADO

Presentado como requisito para optar al título de

BIÓLOGO

Universidad El Bosque

Facultad de Ciencias

Programa de Biología

Bogotá, D.C

**COMUNIDADES BIOLÓGICAS COMO INDICADORAS PARA LA
CONSERVACIÓN DE AGUAS EPICONTINENTALES**

Proyecto interno PCI-2015-8774 GRIB

**COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA, PERIFÉRICA Y PARÁMETROS
FISICOQUÍMICOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA
RESERVA EL SANTUARIO TAUSA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.**

Laura Daniela Ortiz Rodríguez

APROBADO

Mónica Castillo Aguilar
Directora del Trabajo de Grado

JURADO:

Fabio Diaz

JURADO:

Federico Maldonado

JURADO:

Sandra Liliana Mayorga

Nota de Salvedad

"La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, sólo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia".

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres porque con su apoyo incondicional, por cada uno de los esfuerzos que realizaron para estar conmigo y hacer posible esta etapa de mi vida. Gracias por la paciencia, y por siempre creer en mí y demostrarme que todos los sueños son posibles. Jamás me va a alcanzar la vida para demostrarles lo mucho que los amo.

A mis tíos, Marcos Cardozo e Ilce Rodríguez por siempre acompañarme en cualquier momento y hacerme sentir como una hija más. A ti Julián Cardozo, primo de mi corazón, gracias por tu compañía constante, por alegrar mis días, y ser mi mejor amigo.

A mi directora, por su guianza, colaboración, acompañamiento y su tiempo dedicado en cada fase para la realización de este trabajo.

Quiero agradecer a Julieth Gallego, mi compañera de tesis, pero ante todo mi mejor amiga, por su apoyo, colaboración, guianza, paciencia y emprendimiento durante todo este proceso que realizamos juntas de inicio a fin.

Y por último a ti Nicolás Pineda, mi persona favorita y especial. Gracias por llegar a mi vida cuando más lo necesitaba y hacer de mis días más felices, completos y con los momentos más increíbles, “Rock and Love”.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 13 |
| 2. Marco de referencia | 16 |
| 2.1 Antecedentes | 16 |
| 2.2 Contaminación de aguas superficiales..... | 18 |
| 2.3 Plancton | 19 |
| 2.3.1. Zooplancton: | 19 |
| 2.3.2. Fitoplancton | 20 |
| 2.3.2.1 Fitoplancton como indicador | 22 |
| 2.4 Perifiton..... | 23 |
| 2.5 Métodos biológicos como indicadores de diversidad | 25 |
| 2.5.1 Diversidad Biológica | 25 |
| 2.5.1.1. Diversidad en especies | 26 |
| 2.5.1.1.1 Tipos de diversidad para especies | 26 |
| 2.5.1.1.1.1. Diversidad alfa (α) | 27 |
| 2.5.1.1.1.2 Diversidad beta (β)..... | 28 |
| 2.5.1.1.1.3 Diversidad gama | 30 |
| 2.6 Índices de contaminación | 30 |
| 2.6.1. Índice de Contaminación por Materia Orgánica ICOMO | 30 |
| 2.6.2. Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos ICOSUS | 31 |
| 2.6.3. Índice de Contaminación por Trofía ICOTRO | 32 |
| 2.6.4. Índice de Contaminación por pH ICOpH | 32 |
| 2.7 Marco legal | 32 |
| 2.7.1 Decreto 1729 de 2002 | 33 |
| 2.7.2 Decreto 1681 de 1978 | 34 |
| 2.7.3 Decreto 2857 de 1981 | 34 |
| 2.7.4 Resolución 0839 de 2003 | 34 |
| 2.7.5 Código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente..... | 35 |
| 3. Justificación | 37 |

| | |
|---|----|
| 4. Pregunta de investigación | 39 |
| 5. Objetivos | 40 |
| 5.1. General | 40 |
| 5.2 Específicos | 40 |
| 6. Métodos | 41 |
| 6.1 Área de estudio | 46 |
| 6.2 Comunidades biológicas | 46 |
| 6.2.1 Fase Campo | 46 |
| 6.2.1.1 Fitoplancton..... | 46 |
| 6.2.1.2. Perifiton | 47 |
| 6.2.2. Fase de laboratorio | 48 |
| 6.2.2.1. Plancton y Perifiton | 48 |
| 6.3. Variables fisicoquímicas | 48 |
| 6.3.1. Fase Campo | 48 |
| 6.3.1.1 Variables químicas | 48 |
| 6.3.1.2 Variables microbiológicas | 50 |
| 6.3.2. Fase Laboratorio | 50 |
| 6.3.2.1. Variables químicas | 50 |
| 6.3.2.2 Variables microbiológicas | 51 |
| 6.3.2.3. Índices de Contaminación (ICO's)..... | 51 |
| 6.4 Análisis de datos | 51 |
| 6.4.1 Análisis ecológico | 51 |
| 6.4.2. Análisis estadístico | 51 |
| 7. Resultados y análisis | 53 |
| 7.1 Comunidades biológicas | 53 |
| 7.1.1. Fitoplancton..... | 53 |
| 7.1.1.1 Índices de Diversidad | 59 |
| 7.1.1.2 PCA (Principal Components Analysis) y CCA (Constrained Correspondece Analysis) | 61 |
| 7.1.2. Perifiton | 65 |
| 7.1.2.1. Índices de Diversidad | 68 |

| | |
|---|----|
| 7.1.2.2. Análisis de Componentes Principales y Análisis de Correspondencia Constricta | 69 |
| 7.2 Resultados fisicoquímicos | 72 |
| 7.2.1. Variables ambientales | 72 |
| 7.2.2 Variables químicas y microbiológicas | 76 |
| 7.2.3 Índices de Contaminación (ICO's) | 79 |
| 7.2.3.1 Relación DBO/DQO | 81 |
| 8. Conclusiones | 84 |
| 9. Referencias Bibliográficas..... | 85 |
| 10. Anexos..... | 95 |

Índice de Tablas

Tabla 1. Rangos para la identificación del nivel de contaminación de cuerpos de agua por Fósforo.

Tabla. 2. Volumen de muestra y método de preservación para el análisis de variables químicas en aguas superficiales

Tabla.3. Método de determinación de variables químicas establecidas por ANASCOL SAS

Tabla 4. Número total de individuos por punto de muestreo

Tabla 5. Índices de diversidad para comunidad fitoplanctónica.

Tabla 6. Índices de Diversidad por punto para la comunidad perifítica.

Tabla 7. Resultado de las variables ambientales pH, Oxígeno Disuelto, Conductividad (Cond), Total Solidos Disueltos (TDS) y Temperatura en los meses de Marzo, Abril, Mayo, Junio y Agosto. 2017

Tabla 8. Variables químicas y microbiológicas para cada uno de los puntos muestreados

Tabla 9. Índice de Contaminación para la quebrada El Santuario

Índice de Figuras

Figura 1. Descripción general de método de muestreo, análisis e indicadores.

Figura 2. Ubicación del área de estudio. Ubicado al norte del departamento de Cundinamarca, limitado por los municipios de Pacho y San Cayetano.

Figura 3. Puntos de muestreo en el área de estudio. Se distribuyen a lo largo de la quebrada teniendo, siendo cinco puntos de muestreo para fitoplancton y tres para perifiton.

Figura 4. Descripción de los puntos de muestreo para fitoplancton

Figura 5. Vegetación adyacente a la quebrada en estudio. Área de estudio de la reserva el Santuario.

Figura 6. Mina el santuario. Actividad actualmente inactiva presente en el área de estudio.

Figura 7. Toma de muestra con red de arrastre para fitoplancton en uno de los puntos de muestreo

Figura 8. Método de muestreo para comunidades perifíticas en uno de los puntos de muestreo

Figura 9. Número total de géneros presentes por cada punto y mes de muestreo. Las letras a y b muestran diferencias o relación entre puntos o meses.

Figura 10. Gráficas de abundancia total por género presente en cada uno de los puntos muestreados A. Punto 1 B. Punto 2 C. Punto 3 D. Punto 4 E. Punto 5.

Figura 11. Análisis de Componentes principales teniendo en cuenta variables ambientales y abundancias por género de organismos fitoplanctónicos

Figura 12. Análisis de correspondencia constricta para las variables de abundancia por género, variables ambientales y sitios de muestreo.

Figura 13. Abundancia por género presente en cada uno de los puntos muestreados. a. Punto 1 b. Punto 2 c. Punto 3

Figura 14. Análisis de componentes principales para la abundancia de géneros de la comunidad perifítica y su relación con las variables ambientales.

Figura 15. Análisis de correspondencia constricta entre temperatura y oxígeno disuelto frente a las abundancias de los géneros de comunidades perifíticas en los sitios de muestreo.

Figura 16. Valores promedio de Oxígeno Disuelto y Temperatura por mes muestreado.

Figura 17. Gráficas de correlación entre variables ambientales según la prueba no paramétrica de Pearson. Tendencia de comportamiento es directamente proporcional para todas las variables que presentan relación entre sí.

Figura 18. Relación DBO₅/DQO

Resumen

La reserva El Santuario se encuentra ubicada dentro del complejo de páramos Guerrero en Tausa, Cundinamarca. Durante 40 años la reserva se encontró sometida a actividades de extracción minera, en su sistema hídrico: La quebrada el Santuario, evidenciando un impacto de degradación al ecosistema. Se estudió la calidad de agua de la quebrada el santuario por medio de parámetros fisicoquímicos e indicadores biológicos: Fitoplancton y perifiton. Se determinaron variables químicas, microbiológicas e índices de contaminación: ICOMO, ICOTRO, ICOpH. Se establecieron índices de diversidad, abundancias de comunidades fitoplanctónicas como perifíticas y sus respectivas variables ambientales en ocho puntos de muestreo, cinco correspondientes a fitoplancton y tres a perifiton. Los muestreos se realizaron en los meses de marzo, abril, mayo, junio y agosto.

Los resultados obtenidos frente a los índices de contaminación determinaron que el sistema acuático presenta baja contaminación y procesos de eutrofización. En cuanto a la relación de la DBO y DQO se estableció predominio de contaminantes orgánicos biodegradables. Los resultados de comunidades biológicas mostraron altas abundancias de géneros pertenecientes a la Clase Bacillariophyta: *Navicula* y *Gomphonema*. Los índices de Diversidad evidenciaron especies dominantes, además de no ser un sistema que presente alta diversidad ni ser característico de ecosistemas equitativos. En general, la quebrada presenta bajos índices de contaminación y evidencia indicios de autodepuración por procesos naturales teniendo en cuenta la presencia de géneros indicadores de aguas oligotróficas como el género *Staurastrum* y los resultados obtenidos de variables microbiológicas, químicas, ambientales e Índices de contaminación.

Palabras Clave: Fitoplancton, Perifiton, Bioindicadores, Calidad de agua

Abstract

The reserve El Santuario is located within the Guerrero páramos complex in Tausa, Cundinamarca. During 40 years the reserve was subjected to mining extraction activities, in its water system: The Quebrada El Santuario, evidencing an impact of degradation to the ecosystem. The water quality of the Quebrada El Santuario was studied by means of physicochemical parameters and biological indicators: phytoplankton and periphyton. Chemical, microbiological and contamination indexes were determined: ICOMO, ICOTRO, ICOPH. Diversity indices, abundances of phytoplanktonic and periphytic communities and their respective environmental variables were established in eight sampling points, five corresponding to phytoplankton and three to periphyton. Samples were taken in the months of March, April, May, June and August.

The results obtained against the pollution indexes determined that the aquatic system presents low pollution and eutrophication processes. In relation to the DBO and DQO ratio, a predominance of biodegradable organic pollutants was established. The results of biological communities showed high abundances of genera belonging to the Bacillariophyta Class: *Navicula* and *Gomphonema*. The Diversity indexes showed dominant species, besides not being a system that presents high diversity nor is characteristic of equitable ecosystems. In general, the stream has low levels of contamination and evidence of autodepuration by natural processes, taking into account the presence of genotypes of oligotrophic waters such as the genus *Staurastrum* and the results obtained from microbiological, chemical, environmental variables and pollution indices.

Keywords: Phytoplankton, periphyton, Bioindicators, water quality

1. Introducción

Los servicios ambientales asociados a los ecosistemas naturales están seriamente amenazados tanto por acciones adelantadas por actores locales, como por el calentamiento global, los cuales son procesos que los transforman y degradan. Los servicios ambientales que prestan los ecosistemas naturales como los páramos, inciden en la disponibilidad de agua en términos de flujos y calidad, con un importante efecto sobre el valor económico de suministrar agua potable a las ciudades. Los costos de tratamiento para realizar el proceso de potabilización del agua dependen claramente del estado de conservación de las cuencas aportantes (Ruiz, 2007).

El municipio de Tausa desarrolla diferentes actividades correspondientes principalmente al sector primario de la economía. En primer renglón esta la agricultura, siendo el tercer municipio productor de papa con 9.100 hectáreas sembradas año 2008. En segunda instancia se encuentra la minería, la cual es realizada ya sea para explotación de carbón, extracción de arcillas, fabricación de ladrillos, entre otros. Además, cuenta con una gran reserva salinera y de material férreo, en donde dentro de la explotación a cielo abierto se encuentra la arcilla, arena y recebo en menores proporciones (Plan de desarrollo Municipal de Tausa 2008 a 2011).

Teniendo en cuenta estas intervenciones antrópicas, la consecuencias de los procesos de las mismas se reflejan en modificaciones físicas, químicas y biológicas del medio como cursos de agua los cuales repercuten en las respuestas individuales, poblacionales, comunitarias y ecosistémicas de los organismos (Pinilla, 1998 en Vélez, et al. 2016), entre los que destacan las microalgas, cianobacterias e insectos (empleados para monitorear la calidad del agua en ecosistemas lóticos; Iannacone *et al.*, 2000 en Vélez, *et al.*, 2016). Por

estas razones, se han convertido en un referente del estado ecológico de cualquier ecosistema acuático (Peña et al., 2005; Wan Maznah, 2010; Kshirsagar, 2013 en Vélez, et al. 2016).

En las últimas décadas el interés por la ecología del fitoplancton presente en lagos y embalses se ha incrementado significativamente. Esto se debe a que los problemas asociados a su desarrollo excesivo, particularmente de determinadas especies de algas, pueden limitar el uso recreativo de un cuerpo de agua, afectar su calidad estética y en caso de ser fuente de abastecimiento, también puede provocar inconvenientes en el proceso de potabilización (Rodríguez, *et al.* 2008).

Los problemas relacionados con los procesos de eutrofización están definidos por la excesiva cantidad de nutrientes presente en el sistema en particular de nitrógeno y fósforo. El desarrollo de floraciones algales particularmente de cianobacterias y la escasa transparencia del cuerpo de agua son algunos de los principales efectos (Rodríguez, *et al.* 2008).

Sin embargo, las microalgas y cianobacterias como indicadoras son importantes en ambientes continentales acuáticos (Lobo *et al.*, 1995; Licursi y Gómez, 2003; Lobo *et al.*, 2004; Medina *et al.*, 2012 en Vélez *et al.*, 2016) por su tolerancia y sensibilidad a los cambios ambientales, y por sus ciclos biológicos reducidos (Meybeck *et al.*, 1992; Roset *et al.*, 2001 en Vélez, *et al.* 2016), que favorecen los estudios de contaminación en cuerpos de agua.

Este trabajo pretende determinar las comunidades planctónicas, perifíticas y parámetros fisicoquímicos como indicadores de la calidad del agua de la cuenca hidrográfica del páramo Guagua presente en la Reserva el Santuario Tausa, Cundinamarca, Colombia esto con el fin, de establecer el estado de conservación de este ecosistema, teniendo en cuenta las

intervenciones anteriormente mencionadas en el área, y las actividades actuales en las zonas aledañas de la misma.

2. Marco de referencia

2.1 Antecedentes

Un estudio limnológico de la Laguna Negra, zona de amortiguación del Parque de los Nevados, realizó un análisis fisicoquímico y determinó la diversidad planctónica de la Laguna en dos épocas del año, seca y lluviosa. Para las comunidades biológicas en el primer muestreo (periodo lluvioso), se encontraron 26 morfotipos, 25 pertenecientes a fitoplancton y 1 al zooplancton. Para el segundo muestreo (periodo seco), se encontraron 28 morfotipos, 25 pertenecientes a fitoplancton y 3 al zooplancton.

En el periodo de lluvias el morfotipo *Dinobryon* perteneciente a Chrysophyceae fue el más abundante. En el segundo muestreo, los grupos de fitoplancton más abundantes fueron las Cyanophytas. Los índices de contaminación ICA, ICOSUS e ICOMO presentaron una calidad entre aceptable y ligeramente contaminada en el cuerpo de agua.

En otro estudio realizado para El Parque Nacional Natural Chingaza en 1991, evaluaron los aspectos químicos, físicos y comunidades fitoplanctónicas de la Laguna. Desde el punto de vista de las características físicas y químicas. La Laguna de Chingaza presenta condiciones oligotróficas, con bajas concentraciones iónicas. Respecto a los indicadores biológicos esta laguna presenta un ritmo mono modal en la abundancia de fitoplancton, coincide el máximo número de organismos con el periodo de lluvias y el mínimo con el periodo seco. Esta Laguna presenta tres grupos de algas dominantes: Diatomeas, Clorofíceas, y Desmidiás. Finalmente, la composición y diversidad del fitoplancton reflejan los cambios climáticos y la interacción que existe entre la baja temperatura y la limitación de nutrientes.

Por otra parte, un estudio realizado en el embalse La Regadera en el 2011, determinó el estado limnológico del embalse teniendo en cuenta dos temporadas del año: Enero y Junio. Se

muestrearon cinco estaciones en total, correspondientes al Río Chisacá, Río Curubital, Río Tunjuelo, la zona de descarga y por último la Zona de Confluencia del Embalse.

Los indicadores ecológicos determinaron que los ríos Curubital y Tunjuelo presentaron una buena calidad del agua, mientras que el río Chisacá presentó una baja calidad del agua en la primera temporada de año. Asimismo, el análisis de la Temperatura y el Oxígeno, así como los bajos valores de alcalinidad no demostraron problemas en la calidad del agua.

En el mes de junio se evidenció un incremento de materia orgánica en las columnas de agua. Los organismos fitoplanctónicos y macroinvertebrados presentes no evidencian problemas de calidad de agua en estas fuentes. Frente a los aspectos fisicoquímicos ambientales se presentó estratificación térmica y de oxígeno en la Columna de agua. Tanto la transparencia como la turbidez y los Sólidos Suspendidos totales mostraron cambios como consecuencia de las lluvias, sin embargo, los valores de pH en la columna de agua demostraron una leve acidez lo que determinó el no deterioro en la calidad del agua

Por último, un estudio de monitoreo realizado por Saavedra frente a la calidad del agua de la Reserva El Santuario en el año 2015 en donde se encontraba activa la extracción de carbón en la mina situada en esta área, reportó una base de datos acerca de las comunidades biológicas, parámetros fisicoquímicos e indicadores de calidad presentes en el sistema hídrico. En este estudio se determinó la diversidad de comunidades biológicas: Plancton, Macroinvertebrados bentónicos, Perifiton, Ictiofauna, Macrófitas acuáticas y comunidades microbiológicas; el índice de calidad BMWP y los índices de contaminación ICO teniendo en cuenta 10 puntos de muestreo con un monitoreo mensual desde noviembre del 2014 hasta

marzo del 2015. En general se determinaron resultados que clasificaron el cuerpo de agua de limpio a muy limpio.

2.2 Contaminación de aguas superficiales

Los problemas ambientales proceden en su mayoría de los efectos directos e indirectos del ciclo hidrológico, y se pueden clasificar en tres categorías principales (Hynes, 1972 citado en Roldán y Ramírez, 2008):

- a) Modificación de la superficie terrestre. - Se debe principalmente cuando los bosques se talan o cuando los suelos sufren erosión, puesto que el agua de lluvia correría de inmediato, causando inundaciones, y erosión fluvial (desprendimiento de sedimentos).
- b) Contaminación. - Debido a cualquier introducción de desechos al ciclo hidrológico, por ejemplo: el humo y vapores tóxicos descargados en el aire volverán como lluvia contaminada (lluvia ácida).
- c) Extracción. - Desde el punto de vista del desperdicio del agua principalmente en los deficientes sistemas de riego agrícola.

Como concepto general, se define a la contaminación del agua como “la adición de sustancias alóctonas o microorganismos que deterioran su calidad. Este último concepto se refiere a la aptitud del agua para los usos beneficiosos del hombre, esto es para su bebida y la de los animales, como soporte de una vida sana, para el riego de cultivos y para la recreación” (Roldán y Ramírez, 2008). Es por este motivo que el estudio de diferentes sistemas acuáticos es de vital importancia, el aumento significativo de la contaminación por

cada uno de los factores anteriormente mencionados, han disminuido la disponibilidad de agua potable, y así mismo afectar factores sociales, económicos y biológicos.

2.3 Plancton

Es una comunidad de organismos acuáticos de minúsculo tamaño (< 3 cm), con restricciones de locomoción, es decir, se dejan llevar por la corriente. Dentro de sus peculiaridades se puede mencionar que se encuentran situados de una columna de agua, siendo más abundantes en la zona trofogénica. (Hensen, 1887 en Rodríguez, 2015)

El plancton ha sido utilizado como indicativo de calidad debido a que responde rápidamente a cambios en el medio ambiente, la existencia de las comunidades planctónicas se ve condicionada directamente con las propiedades que presenta su entorno, siendo diferentes en cada situación. El plancton está integrado por partes, inicialmente se encuentra el virioplancton en este caso conformada por las bacterias (bacterioplancton), luego esta su parte vegetal que es una de las más estudiadas (fitoplancton) y finalmente por su parte planctónica animal o denominado zooplancton, el cual se encuentra integrado por organismos de mayor tamaño y depredadores del plancton vegetal (Rodríguez, 2015).

2.3.1. Zooplancton

Compuesto de animales, con excepciones son microscópicos o escasamente visibles a simple vista. Los de agua continentales está integrado principalmente por protozoos (animales unicelulares) y rotíferos, que miden entre diez milésimas de milímetros y 0,5 mm de largo, junto con gran variedad de pequeños crustáceos, cuya longitud oscila entre los 0,50 y 0,25 mm (Cano, 2003).

2.3.2. *Fitoplancton*

El fitoplancton es una comunidad de microorganismos representado por organismos autótrofos de la zona fótica en los cuerpos de agua, en su mayoría fotosintéticos (microalgas, cianobacterias, flagelados y otros grupos sin clorofila), estos microorganismos viven suspendidos en la columna de agua. El fitoplancton en su mayoría está formado por algas, estas se describen como plantas primitivas, microscópicas, unicelulares y en determinados casos forman colonias, no tienen raíces, tallos, ni hojas. (Rodríguez, 2015)

Las algas son denominadas autótrofas, debido a que poseen la capacidad de alimentarse por sí mismas, sintetizando el anhídrido carbónico y el agua y así formando almidón; las células verdes son capaces de convertir la energía radiante (luz solar) en energía química gracias a un pigmento que se encuentra en su parte interna llamado clorofila, el cual es el responsable del proceso de fotosíntesis (Rodríguez, 2015).

Las principales variables fisicoquímicas que influyen en la composición del fitoplancton son: (Lima, 2000 citado en Cano, 2003).

- ▬ Luz y temperatura: son organismos fotosintéticos y la temperatura es un factor influyente para llevar a cabo procesos de reproducción.
- ▬ Salinidad: al igual que otras variables físicas, pueden afectar la composición y abundancia de comunidades en el caso del plancton marino.
- ▬ pH: los valores óptimos de crecimiento dependen de la especie, y suele estar comprendido entre 7 y 8.

La abundancia de fitoplancton es diferente para cada lugar y para las distintas estaciones del año. En ciertas épocas, usualmente durante la temporada seca, se producen altas

cantidades de fitoplancton, y durante la lluviosa, suele ser es muy escaso. La producción de nuevas células está determinada principalmente por la luz, la transparencia, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes, mientras que su eliminación depende, entre otros factores de la abundancia del zooplancton herbívoro y de la sedimentación (González, 1988; Hutchinson, 1988 y Wetzel, 1975 citado en Cano, 2003). Algunos factores que determinan la presencia de diferentes organismos fitoplanctónicos son:

a) Luz y Temperatura

Las algas siendo organismos predominantemente fotosintéticos, requieren de la energía de la luz. Las diferentes especies tienen distintas combinaciones de pigmentos, y cada uno tiene un rango de absorción máximo. La relativa intensidad de la luz es también importante para la producción de algas. Los cambios en la calidad del agua de oligotrófica a eutrófica invariablemente conllevan la disminución de la penetración de la luz debido al incremento del material disuelto y suspendido. Al mismo tiempo la eutrofización lleva al aumento de la producción autótrofa y por tanto al incremento de la producción del fitoplancton, lo cual puede dar lugar a una menor penetración de la luz. La temperatura juega un papel importante, junto con la luz en la determinación de la periodicidad de las poblaciones de algas. Sin embargo, los aumentos en la temperatura, no parecen ser variables tan importantes para la calidad del agua en lagos en comparación con los ríos (James *et al.*, 1979 citado en Cano, 2003).

b) Transparencia

Es la medida que indica que tan turbia se encuentra el agua. El plancton y la erosión son las fuentes más comunes de disminución de la transparencia. Al aumentar la producción de

fitoplancton debido a la eutrofización, como se mencionó anteriormente, se disminuye la transparencia del agua y por tanto la penetración de la luz solar; las plantas acuáticas necesitan de la luz solar para la fotosíntesis, la cual produce el oxígeno. La reducción de la fotosíntesis resulta en bajas concentraciones de oxígeno y altas concentraciones de dióxido de carbono (James *et al.*, 1979 citado en Cano, 2003).

c) Nutrientes

La concentración de nutrientes limita, satura o inhibe el crecimiento de las algas. Por lo tanto, el aumento en las concentraciones de N y P son consideradas el mayor factor que promueva la eutrofización. El fósforo, escasea en el medio acuático, por lo que se considera con frecuencia limitante de la producción. Existen diferencias interespecíficas en la limitación de las tasas de crecimiento, de modo que dicho nutriente puede influir sobre la composición y dinámica poblacional del fitoplancton (González, 1988 citado en Cano, 2003).

El nitrógeno es necesario para la síntesis de aminoácidos y proteínas algales. En los lagos, las algas son capaces de utilizar varias formas de nitrógeno que incluyen nitratos, nitritos y amonio, así como algunos compuestos orgánicos nitrogenados solubles. (González, 1988; James *et al.*, 1979 citado en Cano, 2003).

2.3.2.1 Fitoplancton como indicador

Dadas sus necesidades nutricionales, su posición en la base de las redes alimentarias acuáticas y su capacidad de responder de forma rápida y previsible a un amplio espectro de agentes contaminantes, el fitoplancton es el más promisorio de todos los indicadores de alerta temprana de cambios en las características de los cuerpos de agua, en el caso específico de este estudio de los humedales, causados por productos químicos.

Además, su sensibilidad a las variaciones de los niveles de nutrientes hace que represente un indicador ideal para evaluar la eutrofización (RAMSAR, 1999 citado en Cano, 2003). Se considera que cuanto mayor es la diversidad de especies presentes en el medio, las aguas son de mejor calidad. Aunque se deben tener en cuenta siempre el nivel de nutrientes y minerales, el estudio de la biología de las algas, principalmente de sus formas, puede indicar la presencia de factores adversos a su crecimiento y desarrollo, tal como lo son los metales pesados, los que provocan malformaciones celulares en casi todas las especies o la desaparición de muchas de ellas (Kononen, 2001 y Lujan, 2000 citado en Cano, 2003). La representación de ciertas especies del plancton es indicativa de un cierto estado trófico, según los estudios realizados, de manera que la presencia o ausencia de diferentes especies, así como su abundancia se encuentra determinadas por condiciones fisicoquímicas de su entorno.

2.4 Perifiton

El perifiton es una comunidad compleja de microbiota (algas, bacterias, hongos, animales, detritos orgánicos e inorgánicos) adherida a un sustrato en el que puede ser orgánico o inorgánico, vivo o muerto (Wetzel, 1983_a). A nivel ecológico, se considera un microcosmos en donde se promueven procesos internos e intercambios con el medio externo que ocurren simultáneamente (Wetzel, 1983_b citado en Moreno y Aguirre, 2013).

El perifiton es un componente fundamental de las comunidades bióticas acuáticas donde juega un papel importante en los procesos de transferencia de energía, materia e información a través de las cadenas tróficas. Estas comunidades debido a su composición y estructura sirven como indicadores de la calidad del agua en donde procesos como la contaminación o degradación del área puedan estar afectando algún sistema hídrico y por tanto al ecosistema (Moreno y Aguirre, 2013).

El perifiton está conformado por un ensamble de especies que se ubica en la interfase agua-sustrato, lo que permite que pueda aprovechar recursos de este ecotono. La distribución y porcentaje de cobertura del ensamblaje varía en cada sistema acuático, pero en el ecosistema presenta una importancia variada como sugiere Moreno y Aguirre en el 2013:

- Participa en el proceso de purificación del agua al atrapar los nutrientes y otros compuestos orgánicos (Stevenson, 1996 citado en Moreno y Aguirre, 2013), y presenta tasas altas de reciclaje de nutrientes (Moreira, 1988 citado en Moreno y Aguirre, 2013). De acuerdo con Branco (1986) citado en Silva-Oliveira (2007) las algas representan el grupo más importante desde el punto de vista hidrobiológico, ya que oxigenan el agua y contribuyen a la respiración de los organismos acuáticos, además de mejorar la calidad del agua a través de la oxidación de la materia orgánica (Moreno y Aguirre, 2013).
- Se pueden emplear como bioindicadores de la calidad biológica del agua y de su estado trófico (Sládecková, 1962; Watanabe, 1990 citado en Moreno y Aguirre, 2013). Debido a su ciclo de vida corto y a su dinámica funcional alta, las algas responden rápidamente a las alteraciones ambientales y funcionan como sensores sensibles y confiables (Rodríguez *et al.*, 2008 citado en Moreno y Aguirre, 2013). Ha aumentado la importancia del empleo del perifiton en estudios de conservación, evaluación de impactos ambientales, propuestas de recuperación y manejo (McCormick y Stevenson, 1998; Hill *et al.*, 2000; Pan *et al.*, 2000 citado en Moreno y Aguirre, 2013), ya que las formas de crecimiento sésil sobre el sustrato no les permiten evitar los contaminantes, y por tanto toleran el ambiente o fallecen (Hering *et al.*, 2006 citado en Moreno y Aguirre, 2013).

- En estudios ecológicos, están relacionadas directamente con gran parte de la materia orgánica producida, y promueven el intercambio de los componentes físicos, químicos y biológicos. Pueden originar formas planctónicas por el desprendimiento del sustrato (Oliveira Martins, 2006 citado en Moreno y Aguirre, 2013). El perifiton ha sido utilizado para verificar aspectos relacionados con la colonización, sucesión, diversidad y estabilidad de las comunidades, por lo que se puede emplear como un sistema modelo de estudio (Stevenson, 1996 citado en Moreno y Aguirre, 2013). Otro tipo de investigación está relacionada con la evaluación de los efectos de los contaminantes sobre la morfología y la fisiología de los organismos (Whitton y Kelly, 1995 citado en Moreno y Aguirre, 2013). El perifiton brinda la posibilidad de proporcionar abrigo y alimento a varios tipos de organismos, principalmente peces (Moreira, 1988 citado en Moreno y Aguirre, 2013).
- Juega un papel importante en los balances de materia, en los ciclos biogeoquímicos y energéticos, ya que la biomasa producida por el perifiton puede ser trasladada a varios niveles, tales como en la acumulación algal, la descomposición (cadena de detritus), la herbivoría (cadena de consumidores) o en la exportación de materia orgánica (Moreira, 1988; Rodrigues *et al.*, 2003a; Rodrigues *et al.*, 2003b citado en Moreno y Aguirre, 2013).

2.5 Métodos biológicos como indicadores de diversidad

2.5.1 Diversidad Biológica

Biodiversidad es la variedad de todas las formas de vida, a todo nivel de integración de los organismos, desde moléculas de ADN hasta ecosistemas (Goodfellow y Slater 1992; Kikkawa 1990 citado en Campo & Duval, 2014).

Por otro lado, el concepto de biodiversidad se encuentra más estrechamente vinculado con el inventario y conservación de las especies biológicas (Vallejo & Arandas). Este se debe en primer lugar a la riqueza en plantas y animales, la cual tiene un valor incalculable: es el patrimonio natural, resultado de la evolución, es decir, de un proceso histórico que ha ocurrido en el tiempo y es irrepetible (Moreno, 2001 citado en Campo y Duval, 2014).

2.5.1.1. Diversidad en especies

Es la más utilizada en los estudios sobre medición de biodiversidad y se han centrado en la búsqueda de parámetros para caracterizarla como una propiedad emergente de las comunidades ecológicas. Sin embargo, las comunidades no están aisladas en un entorno neutro. En cada unidad geográfica y paisaje, se encuentra un número variable de comunidades. Por ello para comprender los cambios de la biodiversidad con relación a la estructura del paisaje, la separación de los componentes alfa, beta y gamma (Whittaker, 1972 citado en Campo y Duval, 2014) puede ser de gran utilidad, principalmente para medir y monitorear los efectos de las actividades humanas (Halffter, 1998 citado en Campo & Duval, 2014).

Esta forma de analizar la biodiversidad resulta muy conveniente en el contexto actual ante la acelerada transformación de los ecosistemas naturales, ya que un simple listado de especies para una región dada no es suficiente (Moreno, 2001 citado en Campo y Duval, 2014).

2.5.1.1.1 Tipos de diversidad para especies

En este sentido Whittaker (1972), identificó distintos componentes de la diversidad biológica que corresponden a diferentes niveles de escala espacial y los designó como

diversidades alfa, beta y gamma, esto con el fin de comprender los cambios de la biodiversidad con relación a la estructura del paisaje (Moreno, 2001 citado en Campo y Duval, 2014).

2.5.1.1.1.1. Diversidad alfa (α)

Para Whittaker (1972), la diversidad alfa es la riqueza de especies de una muestra territorial y según Sugg (1996) la diversidad alfa es el número de especies que viven y están adaptadas a un hábitat homogéneo, cuyo tamaño determina el número de especies por la relación área-especie, en la cual a mayor área mayor cantidad de especies (Campo y Duval, 2014).

La principal diferencia infiere de acuerdo con lo que se quiere medir: la riqueza de especies de una muestra territorial o la riqueza de especies de la muestra de una comunidad, así considerado el concepto necesita de precisión (Halffer *et al.*, 2005 citado en Campo y Duval, 2014).

La diversidad alfa también se asocia con factores ambientales locales y con las interacciones poblacionales (en particular con la competencia interespecífica) (Llorente & Morrone, 2001 citado en Campo y Duval, 2014), la cual da como resultado los eventos de colonización-recolonización y las extinciones locales de la riqueza (Moreno, 2001 citado en Campo y Duval, 2014), en si la diversidad alfa de una localidad es un balance entre las acciones de la biota local y los elementos abióticos (entre lo antiguo, competición y depredación) y la inmigración de otras localidades.

2.5.1.1.1.2 Diversidad beta (β)

Para Marn (2002) la diversidad beta es una medida del recambio de especies entre diferentes tipos de comunidades o hábitats, como tal corresponde a la contigüidad espacial de diferentes comunidades o hábitats. (Campo y Duval, 2014).

La diversidad beta mide las diferencias (el recambio) entre las especies de dos puntos, dos tipos de comunidades o dos paisajes. Estas diferencias podrán ocurrir en el espacio, cuando las mediciones se hacen en sitios distintos en un mismo tiempo, o en el tiempo, cuando las mediciones se realizan en el mismo lugar, pero en distintos tiempos (Halffter et al. 2005 citado en Campo y Duval, 2014).

- Índice de Diversidad Margalef:

El índice de Margalef (D_{Mg}) es una forma sencilla de medir la biodiversidad ya que proporciona datos de riqueza de especies. Mide el número de especies por número de individuos especificados (Margalef, 1969). Su fórmula es:

$$D_{MG} = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Dónde:

S= número de especies.

N=número total de individuos.

- El índice de dominancia de Simpson (DS_i)

Considera la probabilidad que dos individuos de la población seleccionados al azar sean de la misma especie. Indica la relación existente entre riqueza o número de especies y la abundancia o número de individuos por especie. Su expresión es:

$$D_{Si} = \sum_{i=1}^s p_i^2$$

Dónde:

P_i : igual a la proporción entre n_i y N

n_i : número de individuos de la especie i .

- El índice de Shannon- Wiener (H')

Tiene en cuenta la riqueza de especies y su abundancia. Este índice relaciona el número de especies con la proporción de individuos pertenecientes a cada una de ellas presente en la muestra. Además, mide la uniformidad de la distribución de los individuos entre las especies.

Su fórmula es:

$$H' = - \sum p_i \cdot \ln p_i$$

El índice de valor de importancia define cuáles de las especies presentes contribuyen en el carácter y estructura de un ecosistema (Cottam y Curtis, 1956 citado en Campo y Duval, 2014). Este valor se obtiene mediante la sumatoria de la frecuencia relativa, la densidad relativa y la dominancia relativa.

$$\text{Frecuencia relativa} = \frac{\text{Frecuencia de la sp}}{\text{Frecuencia de todas las spp}} * 100$$

$$\text{Densidad Relativa} = \frac{\text{Número de individuos de la sp}}{\text{Número total de individuos}} * 100$$

$$\text{Frecuencia relativa} = \frac{\text{Dominancia de la sp}}{\text{Dominancia de todas las spp}} * 100$$

2.5.1.1.1.3 Diversidad gama(δ)

La diversidad gamma es el número de especies del conjunto de sitios o comunidades que integran un paisaje (Forman y Godron, 1986 citado en Campo y Duval, 2014).

Asimismo, para Whittaker (1972), es la riqueza de especies de un conjunto de comunidades que integran un paisaje, resultante tanto de las diversidades alfa como de las diversidades beta. (Campo y Duval, 2014).

2.6 Índices de Contaminación

Los índices de contaminación tienen como objeto la estimación de un número generalmente entre 0 y 1, ó 0 y 100, que define el grado de calidad de un determinado cuerpo lotico continental (Ramírez *et al.*, 1997). Con ello se pretenden reconocer problemas de contaminación, teniendo en cuenta las variables de Sólidos suspendidos totales, Demanda Biológica de Oxígeno, Fosforo, pH para así obtener los índices de contaminación por materia orgánica, Sólidos suspendidos, pH y trofismo.

2.6.1. Índice de Contaminación por Materia Orgánica ICOMO

Se obtiene a través de la demanda bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno (Fernández & Solano, 2005; Torres, 2009; George *et al.*, 1991; Manahan, 1991)

Se define entre un rango de 0 a 1 donde el aumento desde el valor más bajo se relaciona con el aumento de contaminación en el cuerpo del agua (Ramírez, 1988)

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO} I_{Coliformes} I_{Oxigeno\%})$$

Donde

$$I_{DBO} = -0.005 + 0.70 \text{Log}_{10} DBO \text{ (Mg/L)}$$

$$DBO > 30 \text{ mg/L} = 1$$

$$DBO < 2 \text{ mg/L} = 0$$

$$I_{Coliformes\ Totales} = -1.44 + 0.56 \text{Log}_{10} Coliformes\ Totales \text{ (NMP/100ml)}$$

$$Coliformes\ Totales > 20.000 \text{ NMP/100ml} = 1$$

$$Coliformes\ Totales < 500 \text{ NMP/100ml} = 0$$

$$I_{Oxigeno\%} = 1 - 0.01 \text{ Oxigeno\%}$$

Oxígenos (%) mayores a 100% tienen un índice de oxígeno de 0 (Ramírez, 1988).

2.6.2. Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos ICOSUS

Este índice trabaja con la concentración de sólidos suspendidos que se definen como partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución (BP. Exploration-Ecotest, 1996; Matthews et al., 1991; Kendall, 1975).

$$ICOSUS = -0.02 + 0.0003 \text{ Sólidos Suspendidos (mg/L)}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos} > 340 \text{ mg/L tiene un ICOSUS} = 1$$

$$\text{Sólidos Suspendidos} < 10 \text{ mg/L tiene un ICOSUS} = 0$$

2.6.3. Índice de Contaminación por Trofia ICOTRO

Se calcula sobre la base de la concentración de Fosforo Total en mg/L. El fósforo, como el nitrógeno, son nutrientes esenciales para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización (Hena, 1987). El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico (Tabla 1.).

Tabla 1. Rangos para la identificación del nivel de contaminación de cuerpos de agua por Fósforo.

| | |
|---------------|-----------|
| Oligotrofia | <0,01 |
| Mesotrofia | 0,01-0,02 |
| Eutrofia | 0,02-1,00 |
| Hipereutrofia | >1 |

Fuente: Adaptado de Ramírez, et al., 1997

2.6.4. Índice de Contaminación por pH ICOpH

Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO₂ disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales y por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo (Hena, 1987; El-Shaarawi *et al.*, 1986).

$$ICOpH = \frac{e^{-3.108+3.45 pH}}{1 + e^{-31.08+3.45pH}}$$

2.7 Marco legal

Este proyecto se enmarca dentro de las políticas establecidas para el medio ambiente, sus recursos, teniendo en cuenta el uso sostenible, protección y estudio ambiental tanto en la constitución política de Colombia como en el Código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente. Aquí, se resaltan algunos decretos, leyes y

resoluciones propiciadas por el ministerio del medio ambiente los cuales hacen parte de la justificación respecto a la realización de esta investigación a nivel político-social. Así mismo los deberes por parte del estado o propietarios para la protección de los recursos naturales encontrados en sus propiedades.

2.7.1 Decreto 1729 de 2002

Capitulo II: De la ordenación

Artículo 4°. Finalidades, principios y directrices de la ordenación. La ordenación de una cuenca tiene por objeto principal el planeamiento del uso y manejo sostenible de sus recursos naturales renovables, de manera que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente de sus recursos hídricos.

La ordenación así concebida constituye el marco para planificar el uso sostenible de la cuenca y la ejecución de programas y proyectos específicos dirigidos a conservar, preservar, proteger o prevenir el deterioro y/o restaurar la cuenca hidrográfica.

La ordenación de cuencas se hará teniendo en cuenta, entre otros, los siguientes principios y directrices:

1. El carácter de especial protección de las zonas de páramos, subpáramos, nacimientos de aguas y zonas de recarga de acuíferos, por ser considerados áreas de especial importancia ecológica para la conservación, preservación y recuperación de los recursos naturales renovables.

2. Las áreas a que se refiere el literal anterior, son de utilidad pública e interés social y por lo tanto deben ser objeto de programas y proyectos de conservación, preservación y/o restauración de las mismas.

2.7.2 Decreto 1681 de 1978

Artículo 1o. Con el fin de lograr los objetivos establecidos por el artículo 2o del Decreto - Ley 2811 de 1974 y especialmente para asegurar la conservación, el fomento y el aprovechamiento de los recursos hidrobiológicos y del medio acuático, su disponibilidad permanente y su manejo racional, según técnicas ecológicas, económicas y sociales, este decreto reglamenta los siguientes aspectos:

b. La protección y fomento de los recursos hidrobiológicos y de su medio ambiente.

2.7.3 Decreto 2857 de 1981

Artículo 6º.- Medidas y protección. Aprobado un plan de ordenación, la Entidad Administradora de los Recursos Naturales Renovables deberá adoptar en la cuenca las medidas de conservación y protección de los recursos naturales de la zona, prevista en dicho plan, en desarrollo de lo cual podrá restringir o modificar las prácticas de su aprovechamiento y establecer controles o límites a las actividades de desarrollo rural, urbano, industrial o minero.

2.7.4 Resolución 0839 de 2003

Artículo 4º. Objetivos del Estudio sobre el Estado Actual de Páramos. El Estudio sobre el Estado Actual de Páramos (EEAP), tiene como objetivos los siguientes:

- Realizar un diagnóstico y evaluación integral de los elementos identificados en la línea base que permita determinar el estado actual de los ecosistemas de páramo y determinar las medidas de manejo para su conservación, restauración y la orientación de usos sostenibles.

2.7.5 Código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente

Artículo 134.o- Corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano, y en general, para las demás actividades en que su uso es necesario. Para dichos fines deberá:

- a.- Realizar la clasificación de las aguas y fijar su destinación y posibilidades de aprovechamiento mediante análisis periódicos sobre sus características físicas, químicas y biológicas. A esta clasificación se someterá toda utilización de aguas;
- e.- Determinar, previo análisis físico, químico y biológico, los casos en que debe prohibirse, condicionarse o permitirse el vertimiento de residuos, basuras, desechos y desperdicios en una fuente receptora;
- f.- Controlar la calidad del agua, mediante análisis periódicos, para que se mantenga apta para los fines a que está destinada, de acuerdo con su clasificación;
- i.- Promover y fomentar la investigación y el análisis permanente de las aguas interiores y de las marinas, para asegurar la preservación de los ciclos biológicos y el normal desarrollo de las especies, y para mantener la capacidad oxigenante y reguladora del clima continental.

Artículo 10. Fase de diagnóstico. Está dirigida fundamentalmente a identificar la situación ambiental de la cuenca, con el fin de establecer las potencialidades, conflictos y restricciones de los recursos naturales renovables.

Artículo 11. Elementos del diagnóstico. El diagnóstico deberá contener, entre otros, los siguientes aspectos:

3. Caracterización físico-biótica, que comprende, entre otros, los siguientes aspectos: geográficos, hidroclimáticos y biológicos.

6. Inventario específico del recurso hídrico que contenga estimación cuantitativa y cualitativa, distribución temporal del recurso en el ámbito territorial, lo cual comprende, entre otros aspectos: la dinámica del régimen natural de las aguas superficiales y subterráneas y la calidad del agua.

3. Justificación

En la actualidad las intervenciones antrópicas en diferentes áreas del país realizan un alto impacto sobre el ambiente, componentes bióticos como el agua, aire y suelo se han visto exponencialmente contaminados en los últimos años. Dentro de las consecuencias de las actividades económicas realizadas es la producción de residuos, los cuales generan un gran impacto en la calidad de aguas en cuencas hidrográficas afectando considerablemente la población.

Actualmente, muchos ecosistemas han sido degradados, a la fecha se han perdido más del 70% de los bosques andinos e incluso el 90% de bosques secos colombianos los cuales se han visto altamente transformados en donde aproximadamente el 65% de los mismos está bajo un proceso de desertificación (Jaramillo, 2015). Ecosistemas como los páramos en nuestro país se han visto directamente afectados por diferentes intervenciones como cultivos, minería e incluso ganadería. Según los reportes en el 2017 aproximadamente de 36 páramos del país, 30 tienen actividades agropecuarias que cubren 330.780 hectáreas. En los 19 complejos de páramo delimitados, al menos en 14 se sigue presentando esa explotación de tipo minera, lo mismo que en 16 páramos sin delimitar. Sin embargo, después del 9 de febrero de 2010 (fecha en la cual se prohibió el otorgamiento de títulos mineros en páramos) se han otorgado cerca de 60 títulos, los cuales equivalente a 15.799 hectáreas (El TIEMPO, 2017).

La importancia de los páramos se remonta a diferentes funciones, una de sus principales es su alta capacidad para la retención de agua, y por tanto su funcionamiento de todo un sistema biológico en la regulación hídrica. De allí radica el interés en su conservación, además de otras funciones ecológicas. Así mismo, el conocimiento del actual estado de la calidad del agua en estos ecosistemas es importante, debido a que la mayor parte

de los municipios y ciudades del país se abastecen de este recurso proveniente de los páramos, como en el caso de Bogotá, en donde el 80% del agua que se consume proviene de Chingaza, o la Represa la Regadera la cual suministra agua para 550 mil personas (El Espectador, 2010). El complejo del páramo Guerrero en donde se encuentra situada la quebrada de área de estudio abastece agua a la represa del Neusa y a los acueductos de Zipaquirá, Cogua y Tausa y parte de Bogotá. El páramo conforma una extensa zona de recarga de acuíferos, que alimentan el subsuelo del Valle de Ubaté y el norte de la sabana de Bogotá. Es por esto que la protección y conservación de páramos es de vital importancia para la continuación de uso de este servicio ecosistémico.

4. Pregunta de investigación

¿Cuál es la calidad del agua de la Quebrada El Santuario relacionando la diversidad de fitoplancton y perifiton como indicadores biológicos y los parámetros fisicoquímicos?

5. Objetivos

5.1. General

- Determinar parámetros fisicoquímicos e índices de diversidad de las comunidades de fitoplancton y perifíticas como indicadores de la calidad del agua de la Reserva el Santuario Tausa, Cundinamarca, Colombia.

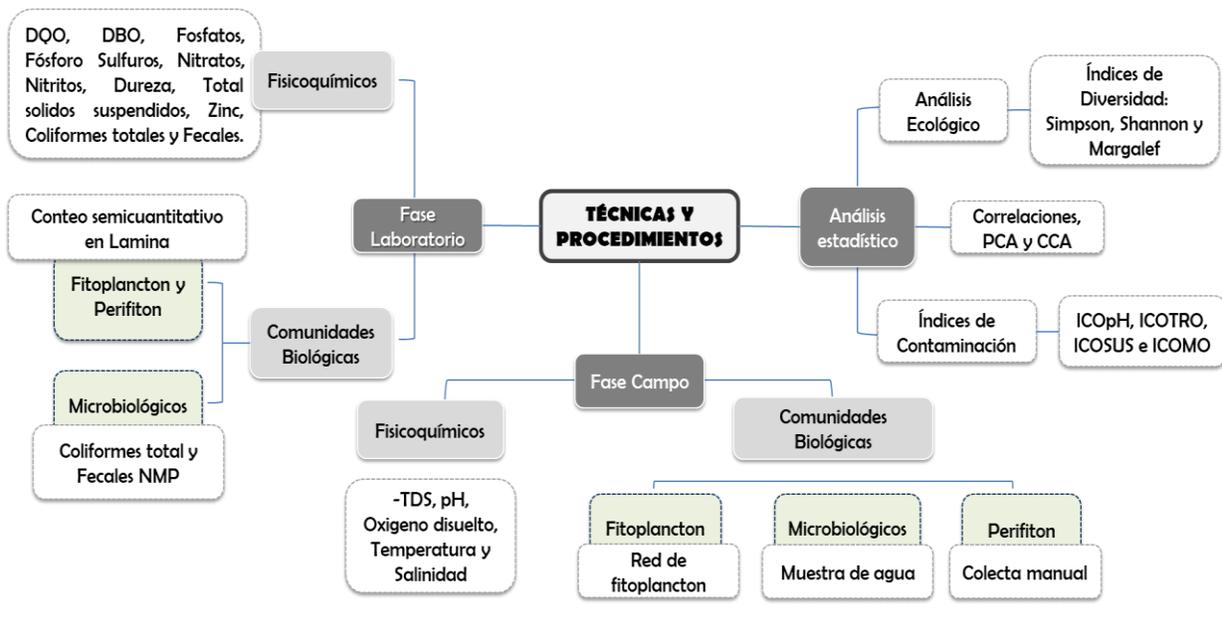
5.2 Específicos

- Establecer la abundancia relativa de las comunidades planctónicas y perifíticas y su relación con los parámetros fisicoquímicos.
- Hallar los índices de diversidad presentes en los cuerpos de agua adyacentes que hacen parte del canal principal de la quebrada.
- Determinar los índices de contaminación ICOSUS, ICOpH, ICOTRO, ICOMO.

6. Métodos

Para la toma de muestras y obtención de resultados se realizaron en dos fases: campo y laboratorio, en donde se obtuvieron resultados de composición y abundancia de fitoplancton y perifiton, parámetros fisicoquímicos *insitu* y *exsitu* y pruebas microbiológicas. Para los análisis de datos, se utilizaron índices de contaminación, pruebas estadísticas e índices de diversidad con el fin de establecer el estado del sistema hídrico (Figura 1).

Figura 1. Descripción general de método de muestreo, análisis e indicadores.



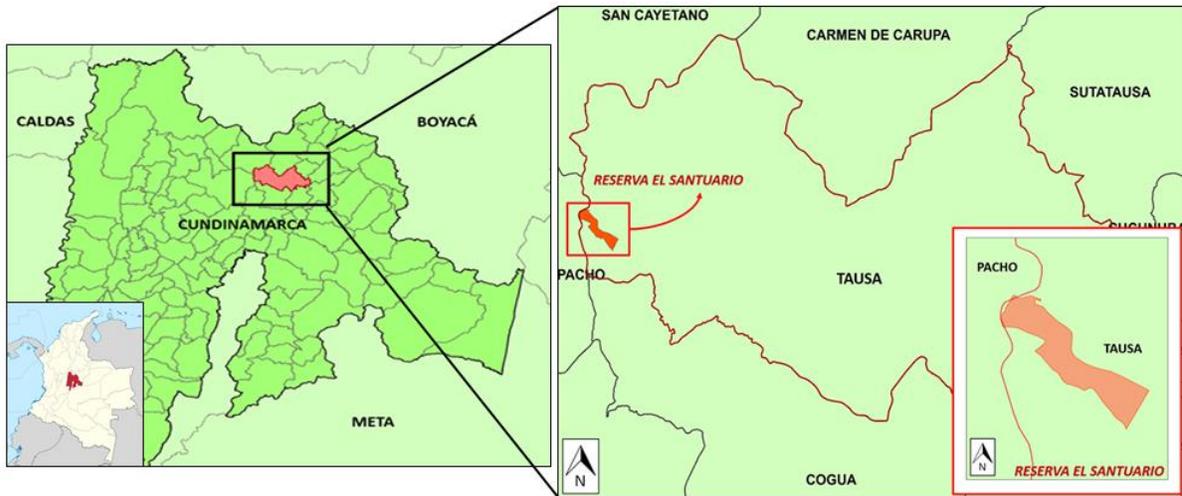
Fuente: El autor

6.1 Área de estudio

Este trabajo se realizó en los predios de la Mina El Santuario, Vereda San Antonio, municipio de Tausa Cundinamarca, en las coordenadas 05° 11' 763" N – 74° 02' 802 W" (Figura 2.). La quebrada "El Santuario" nace y atraviesa la propiedad "Minas El Santuario",

la cual consta de un área de 49 hectáreas de terreno montañoso, con suelos de tipo andosoles con un color negro general del horizonte superior debido a la alta tasa de materia orgánica (Saavedra, 2015).

Figura 2. Ubicación del área de estudio. Ubicado al norte del departamento de Cundinamarca, limitado por los municipios de Pacho y San Cayetano.

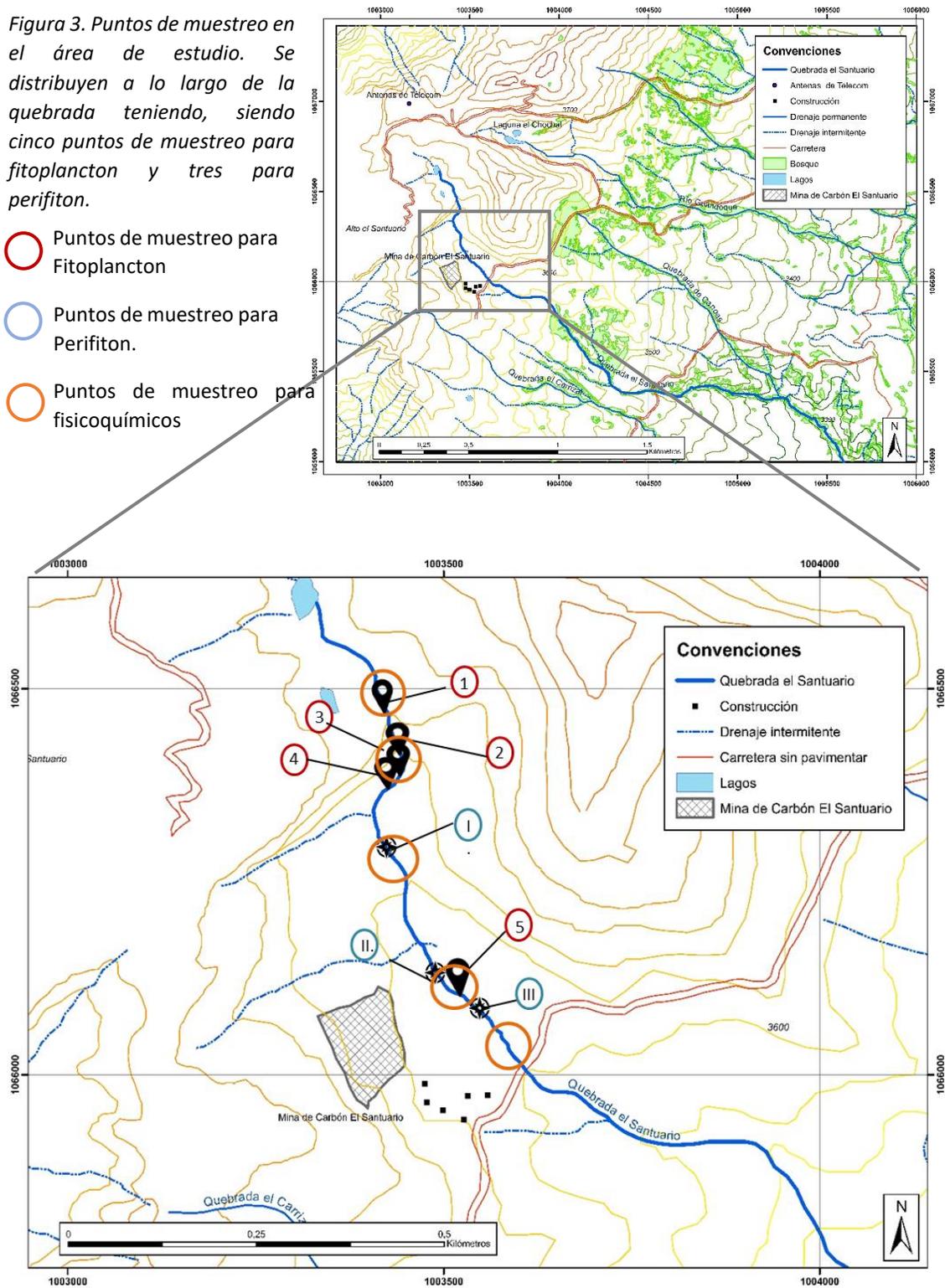


Fuente: Gallego, 2017

Minas El Santuario se ubica dentro del páramo de Guargua a una altitud aproximada de 3637 msnm. Este páramo hace parte del complejo de paramos Guerrero ubicado al norte de Cundinamarca, este complejo agrupa 39240 ha de ecosistemas de paramo medio entre los 3.200 y los 3.780 msnm de los municipios de Carmen de Carupa, Tausa, Zipaquirá, Subachoque, Cogua, Pacho, San Cayetano y Susa (Morales *et al.*, 2007).

Figura 3. Puntos de muestreo en el área de estudio. Se distribuyen a lo largo de la quebrada teniendo, siendo cinco puntos de muestreo para fitoplancton y tres para perifiton.

- Puntos de muestreo para Fitoplancton
- Puntos de muestreo para Perifiton.
- Puntos de muestreo para fisicoquímicos



Adaptado de: Gallego, 2017

Figura 4. Descripción de los puntos de muestreo para fitoplancton

| Punto | Descripción | Fotografía |
|-------|---|--|
| 1 | Alta densidad de vegetación Arborea y arbustiva, baja penetración lumínica, sustrato lodoso. |  |
| 2 | Alta penetración lumínica, rodeado especialmente de vegetación arbustiva, sustrato lodoso. |  |
| 3 | Alta penetración lumínica, rodeado especialmente de vegetación arbustiva, sustrato lodoso. |  |
| 4 | Alta penetración lumínica, rodeado especialmente de vegetación arbustiva, sustrato lodoso. Flujos constantes |  |
| 5 | Alta penetración lumínica, rodeado especialmente de vegetación arbustiva, sustrato rocoso. Flujos de corriente más rápidos. |  |

En el área de muestreo (Figura 5) se presenta variedad las especies vegetales, las más abundantes son *Valeriana pilosa*, *Espeletia argentea*, *Ribes andicola*, *Rubus acanthophyllos*, *Acaena elongata*, *Pernettya próstata* y *Puya sp.* (Moscoso, 2016)

Figura 5. Vegetación adyacente a la quebrada en estudio. Área de estudio de la reserva el Santuario.



Fotografías: El autor

Dentro del área de estudio se observa antecedentes de actividad minera (Figura 6). La mina presento un tiempo de actividad aproximadamente de 40 años en donde usaban algunos puntos de la quebrada como sitios de descarga de aguas residuales de la misma.

Figura 6. Mina el santuario. Actividad actualmente inactiva presente en el área de estudio.



Fotografías: El autor

Además de esto, en el área de estudio y predios alrededores, se evidencia introducción de algunas especies exóticas como *Pinus patula*, *Ulex europaeus* y algunos cultivos de papa.

6.2 Comunidades biológicas

6.2.1 Fase campo

Los muestreos fueron realizados mensualmente desde marzo hasta agosto del 2017. Se establecieron cinco puntos de muestreo para la toma de muestras de fitoplancton (Figura 4), teniendo en cuenta cuerpos de agua lenticos o de poca escorrentía y puntos de comunicación con la quebrada. Se determinaron tres puntos de muestreo para la colecta de perifiton a lo largo de la fuente hídrica (Figura 3). Se tuvieron en cuenta los sitios con alta penetración lumínica y que presentaran únicamente zona fótica.

6.2.1.1 Fitoplancton

En cada punto de muestreo se determinaron valores de parámetros fisicoquímicos (pH, Salinidad, Conductividad, OD, T°) con el multiparámetro HANNA HI98194. Posterior a esto, se tomaron las muestras de fitoplancton con una red de arrastre de 25µm en la zona superficial de los cuerpos de agua (Figura 7.). Se colectaron 500 ml por punto de muestreo, las muestras fueron fijadas con alcohol al 70% *in situ* para su transporte hasta el laboratorio INBIBO de la Universidad el Bosque a una temperatura de 4°C, luego fueron conservadas a una temperatura no mayor de 5°C.

Figura 7. Toma de muestra con red de arrastre para fitoplancton en uno de los puntos de muestreo



Fotografías: Castillo, 2017

6.2.1.2. Perifiton

Para la toma de muestras, se usó una plantilla con un área de muestreo de 4 cm² sobre superficies ligeramente sumergidas y ubicadas en la zona fótica del sistema. En cada punto de muestreo (Anexo 3) se tomaron parámetros fisicoquímicos (pH, Salinidad, Conductividad, OD, T°) con el multiparámetro y las muestras se fijaron con alcohol al 70 % para su posterior transporte al laboratorio y conservación a una temperatura no mayor de 5°C (Figura 8)

Figura 8. Método de muestreo para comunidades perifíticas en uno de los puntos de muestreo



Fotografía: Pineda, 2017

6.2.2. Fase de laboratorio

6.2.2.1. Plancton y Perifiton

Inicialmente se realizó un proceso de decantación por medio de centrifugación con una velocidad de 1000 atm/ 20 min de cada una de las muestras para su concentración, y reducción. Se trabajó un volumen de 15 ml por punto de muestreo para su observación.

Posteriormente se realizó un análisis semicuantitativo, las muestras se observaron al microscopio por medio de conteo en placa, cada alícuota se revisó con un tiempo determinado no mayor a 5 minutos. De esta manera se identificaron cada uno de los morfotipos encontrados en las muestras y se determinaron las frecuencias y abundancias de los mismos.

6.3. Variables fisicoquímicas

6.3.1. Fase campo

6.3.1.1 Variables químicas

Se colectaron muestras de agua en cada punto de muestreo en un recipiente oscuro de 500ml anteriormente auto-clavados. Las muestras se refrigeraron a una temperatura de 5°C para su transporte hasta el laboratorio de investigación de Biología INBIBO de la Universidad El Bosque.

Para la confirmación de parámetros químicos se tomaron dos muestras por variable, una en un recipiente plástico y otra en un recipiente de vidrio totalmente esterilizados. En la Tabla. 2 se muestran el volumen tomado por variable y su método de preservación para su posterior transporte y análisis.

Tabla. 2. Volumen de muestra y método de preservación para el análisis de variables químicas en aguas superficiales

| <i>Variable</i> | <i>Volumen (ml)</i> | <i>Preservación</i> |
|--|---------------------|--|
| DBO ₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno) | 1000 | Refrigerar 5°C |
| Nitratos | 250 | Refrigerar 5°C |
| Nitritos | 250 | Refrigerar 5°C |
| Fosfatos | 250 | Refrigerar 5°C |
| Cloruros | 400 | Refrigerar 5°C |
| Solidos suspendidos totales | 1000 | Refrigerar 5°C |
| Solidos Totales | 200 | Refrigerar 5°C |
| Calcio | 100 | Refrigerar 5°C |
| Sulfuros | 500 | Adicionar 4 gotas de acetato de Zinc 2M/100ml y NaOH hasta pH<2 y Refrigerar 5°C |
| Sulfatos | 400 | Refrigerar 5°C |
| Dureza | 400 | Adicionar HNO ₃ hasta pH≤2 y Refrigerar 5°C |
| Zinc | 200 | Adicionar HNO ₃ hasta pH≤2 y Refrigerar 5°C |

Fuente: ANASCOL SAS, 2017

6.3.1.2 Variables microbiológicas

Se tomo una muestra en los puntos 1, 3 y 5. Los puntos de muestreo se establecieron estratégicamente dado a que los puntos 2, 3 y 4 se encontraban a menos de 10 mts de distancia. La muestra se tomó por medio de un recipiente plástico Whirl-Pak, para esto se usaron guantes totalmente esterilizados. La muestra se tomó en contra corriente para cada uno de los puntos. Este recipiente se encontraba totalmente esterilizado, y adicionalmente contenía tiosulfato de sodio para la preservación de la muestra.

Las muestras se refrigeraron a una temperatura de 4°C para su posterior transporte y análisis en el laboratorio ANASCOL.

6.3.2. Fase laboratorio

6.3.2.1. Variables químicas

A partir de la muestra de agua, se determinaron cantidades de Fosforo, Zinc, Calcio, Dureza, Nitritos, Nitratos, Cloruros, Fosfatos, DBO, DQO mediante los métodos establecidos para lectura en fotómetro Referencia HI83099 (COD and Multiparameter Bench Photomer).

Tabla.3. Método de determinación de variables químicas establecidas por ANASCOL SAS

| Variable | Método | LMC |
|--|---|---------|
| Demanda Bioquímica de Oxígeno-DBO ₅ | Incubación a cinco días y electrodo de lumiscencia.5210B modificado ASTM 888-12 ^{e-1} Método C. | 5 |
| Cloruros | Argentométrico SM 4500 -Cl-B | 5,00 |
| Calcio Disuelto | Volumétrico con EDTA. SM 3500. Ca B | 4,00 |
| Dureza Total | Volumétrico con EDTA. SM 2340 C | 10,0 |
| Nitratos | Reducción con Cadmio. SM 4500 – NO ₃ - E | 0,100 |
| Nitritos | Colorimétrico- SM 4500-NO ₂ -B | 0,00500 |
| Fosfatos | Ácido Ascórbico SM 4500-P-E Equivalente a fosfatos ortofosfatos | 0,0500 |
| Sulfatos | Turbidimétrico SM 4500-SO ₄ -E | 15,0 |
| Sulfuros | Yodométrico SM 4500S2-F | 1,00 |
| Solidos Suspendidos Totales | Gravimétrico Secado a 103-105°C SM 2540 D. | 10 |
| Solidos Totales | Gravimétrico Secado a 103-105°C SM 2540 B. | 60 |
| Zinc Total | Digestión Ácido Nítrico-SM 3030 E-Espectrofotometría de Absorción Atómica llama directa Aire-Acetileno SM 3111B | 0,0500 |

LMC. Límite de cuantificación del Método. Es el valor mínimo cuantificable con el método utilizado para la determinación de las variables

Fuente: ANASCOL S.A, 2017

Para la confirmación de los resultados y determinación de otras variables químicas (Tabla 3) las muestras fueron analizadas por el Laboratorio ANASCOL SAS mostradas en el informe número I 22650-22651-17, en Bogotá mediante los métodos descritos en la Tabla 3.

6.3.2.2 Variables microbiológicas

Los resultados de coliformes totales y fecales fueron analizados por el Laboratorio ANASCOL SAS mostrados en el informe número I 22647-22649-17, en Bogotá mediante los métodos de Sustrato Enzimático SM9223B y Fermentación de tubos múltiples, SM9221-E respectivamente. La variable a medir fue Número más Probable por Litro (NPM/L), esto con el fin de obtener índices de contaminación por materia orgánica.

6.3.2.3 Índices de Contaminación (ICO's)

Se determinaron los Índices ICOMO, ICOTRO, ICOpH, e ICOMI para establecer nivel de contaminación o grado de calidad de agua del sistema. Además de permitir analizar la relación entre la diversidad presente de comunidades fitoplanctónicas y perifíticas.

6.4 Análisis de datos

6.4.1 Análisis ecológico

Se calcularon los índices de diversidad Simpson, Margalef y Shannon para establecer la diversidad, riqueza y dominancia de morfoespecies, y obtener un análisis aproximado del estado de conservación del área e interacción entre especies. Para esto se usó el programa PAST.

6.4.2. Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de correlaciones para establecer relaciones entre variables fisicoquímicas ambientales y un análisis de varianza de una sola vía Kruskal-Wallis para establecer diferencias estadísticamente significativas entre las abundancias totales de géneros presentes por punto de muestreo y por mes.

Luego, se analizó cada una de las variables fisicoquímicas ambientales en el tiempo, esto con el fin de determinar relación con las abundancias y presencia de géneros tanto de comunidades fitoplanctónicas como perifíticas.

Posteriormente se realizó un PCA (Principal Components Analysis) para establecer qué parámetros fisicoquímicos se encontraban relacionados con los géneros encontradas en el sistema acuático y por último se realizó un CCA (Constrained Correspondence Analysis) para determinar relaciones entre variables fisicoquímicas, abundancia de los géneros y puntos de muestreo. Para esto se usaron programas RStudio versión 3.4.2 y IBM Statistics SPSS 19.

7. Resultados y análisis

7.1 Comunidades biológicas

7.1.1. Fitoplancton

En total se encontraron 16,478 individuos (Tabla 4) distribuidos en 28 familias y 33 géneros (Anexo 4) de los cuales los más abundantes fueron, *Navicula* (26,5%), *Gomphonema* (12,93%) y *Stauronella* (11,02%) respectivamente. Los géneros que presentaron menor abundancia fueron *Cymbella* (0,084%) y *Staurastrum* (0,012%).

Tabla 4. Número total de individuos por punto de muestreo

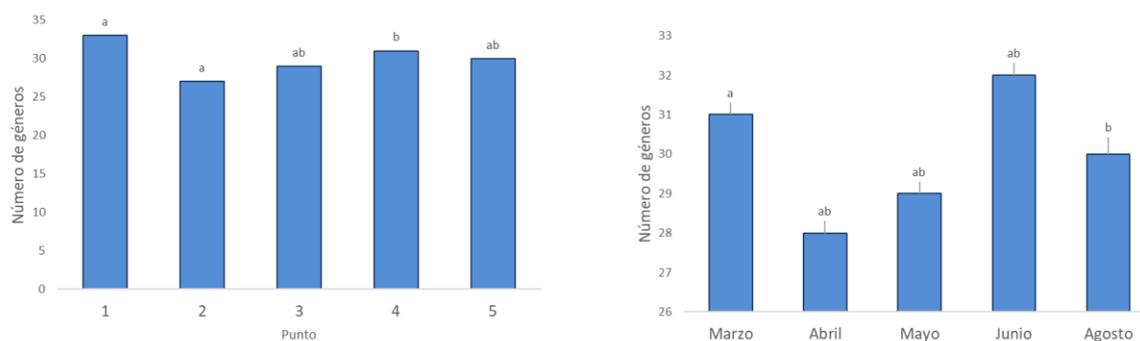
| Punto | Número de Individuos |
|--------------|----------------------|
| 1 | 2908 |
| 2 | 2253 |
| 3 | 2707 |
| 4 | 5125 |
| 5 | 3485 |
| Total | 16478 |

Los análisis evidenciaron diferencias estadísticamente significativas con un $P < 0,05$ del total de géneros presentes entre puntos y meses muestreados (Figura 9). Sin embargo, no existen diferencias estadísticamente significativas del total y abundancia por géneros entre puntos.

El número de géneros encontrados por punto de muestreo fue mayor en los sitios 1, 4 y 5 siendo el punto 1 con mayor presencia de géneros. El fitoplancton puede adquirir mayor resistencia o tolerancia a diversas sustancias, por ejemplo, los fertilizantes los cuales

incrementan su desarrollo y abundancia repercutiendo en la eutrofización de las aguas, donde ciertas especies muestran el estado trófico de arroyos, ríos y lagos (De la Lanza *et al.*, 2000).

Figura 9. Número total de géneros presentes por cada punto y mes de muestreo. Se muestra diferencias estadísticamente significativas entre subconjuntos (a y b), mostrándose así no diferencias entre los resultados que presentan el mismo subconjunto y diferencias entre resultados con subconjuntos diferentes. Cada conjunto de datos muestra una barra de error estándar.



Fuente: El Autor

Los resultados de las variables químicas mostraron que los sitios 4 y 5 presentaron ligeramente mayores concentraciones de fósforo, siendo el punto 5 el más cercano a las zonas de cultivos y estar dentro de las zonas de descargas industriales por parte de la mina cuando se encontraba activa, los cuales probablemente pueden aumentar las concentraciones de fósforo. Los efectos biológicos de contaminación se miden por medio del cambio que experimentan las comunidades a medida que reciben descargas de desechos de diferente orden, así por ejemplo, una fuente de contaminación puede provocar disminución del oxígeno disuelto y aumento de fosforo en el agua (Roldán y Ramírez, 2008), y así este último favorecer la abundancia y el establecimiento de diversas especies de fitoplancton como se menciona en los resultados fisicoquímicos (Tabla 8) en comparación con los puntos 2 y 3, en donde las concentraciones de fósforo fueron bajas, lo que puede relacionarse con su ubicación, ya que estos puntos se encontraban más lejos de los sitios de intervención, y

menores concentración de nitrógeno y fósforo además de situarse relativamente más cerca al punto de nacimiento del sistema en donde se evidencia un cambio de vegetación predominando plantas nativas de este tipo de ecosistema. El punto 1 por su parte, es uno de los sitios más lejanos de los sitios de descargas, es uno de los que presento menor intervención, lo que puede explicar su mayor número de géneros.

Según López & Altamirano (2011), las algas diatomeas constituyen uno de los grupos taxonómicos más abundantes en los sistemas acuáticos, de tal manera que en ríos suponen alrededor del 80-90% de la comunidad de microorganismos fitoplanctónicos (Rivas *et al.*, 2010 en Vélez *et al.*, 2016). Estas algas son un grupo de organismos con un gran número de especies, amplia distribución por todo el mundo (Soler *et al.*, 2012 en Vélez *et al.*, 2016) y muy diversificado, ya que existen muchas especies con distintas sensibilidades frente a la contaminación (Ciutti, 2005 en Vélez *et al.*, 2016). Lo que puede ser una explicación a las altas abundancias de géneros pertenecientes a la clase Bacillariophyta

El Género *Navícula* se reporta generalmente para condiciones de alta conductividad, altas concentraciones de nutrientes y corrientes de flujos rápidos (Martínez de Fabricius, *et al.*, 2003 en Hernández, 2012). Su abundancia puede relacionarse con las concentraciones de fosforo en los cuerpos de agua, las cuales determinaron los sistemas como eutróficos (Tabla 9), probablemente la alta concentración de este componente favorece la disponibilidad de nutrientes para este género, presentándose así en mayor cantidad. Por otra parte, cabe resaltar que los puntos de muestreo hacen parte de la quebrada, lo que también puede explicar sus valores de abundancia.

Algunas especies del género *Gomphonema*, se relacionan a áreas de esorrentía de terrenos agrícolas o con altas concentraciones de nitratos y fosfatos (Rojas, 2015). La gráfica

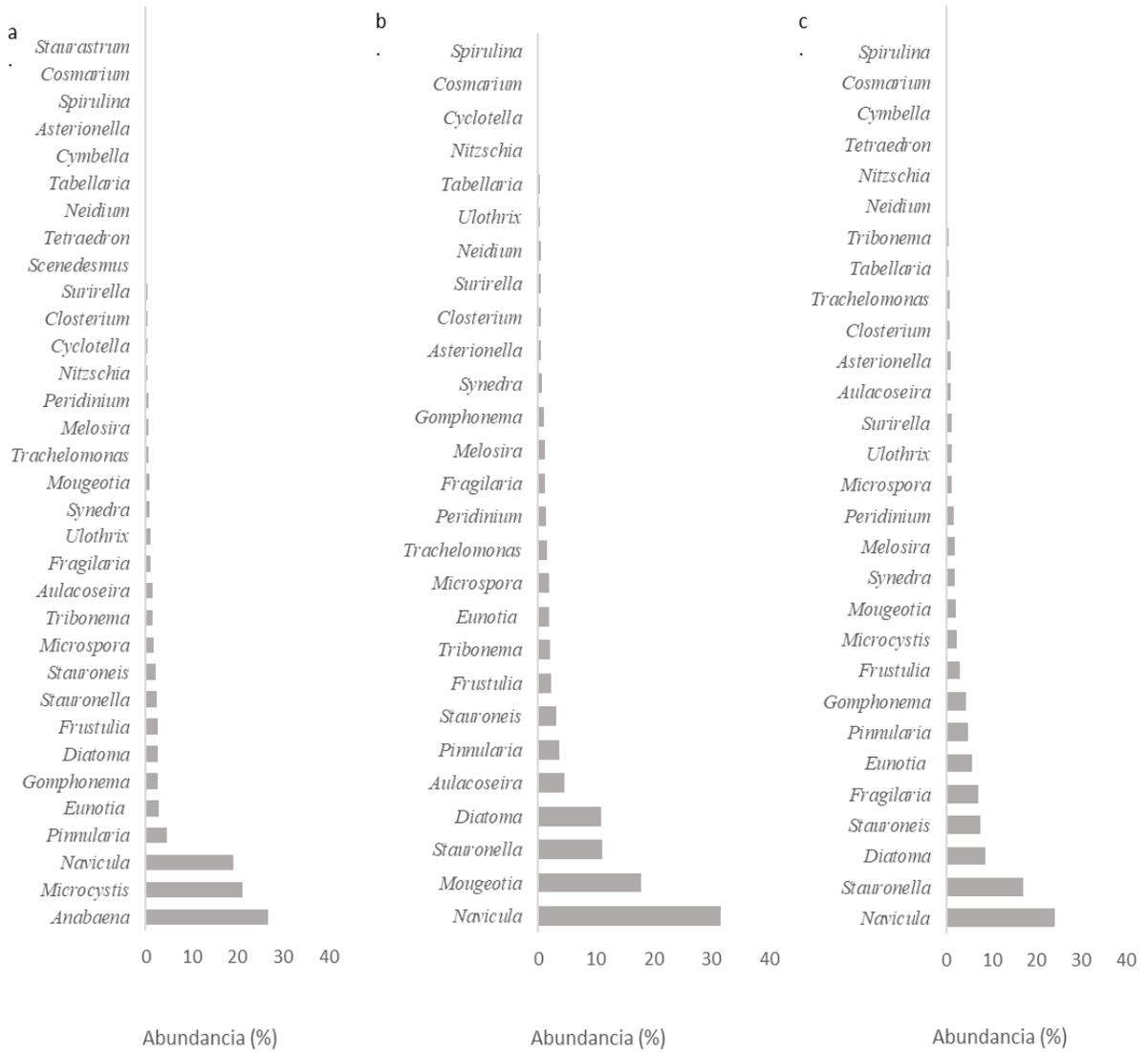
de abundancia (Figura 10) muestra que este género presentó mayor abundancia en el punto 5, en donde también se determinó ligeramente una mayor concentración de fósforo en comparación a los demás puntos de muestreo, teniendo en cuenta que el área de estudio se encuentra rodeado de áreas principalmente intervenidas con actividades agropecuarias como los cultivos de papa y hacia parte de los sitios de descarga de la mina cuando se encontraba activa.

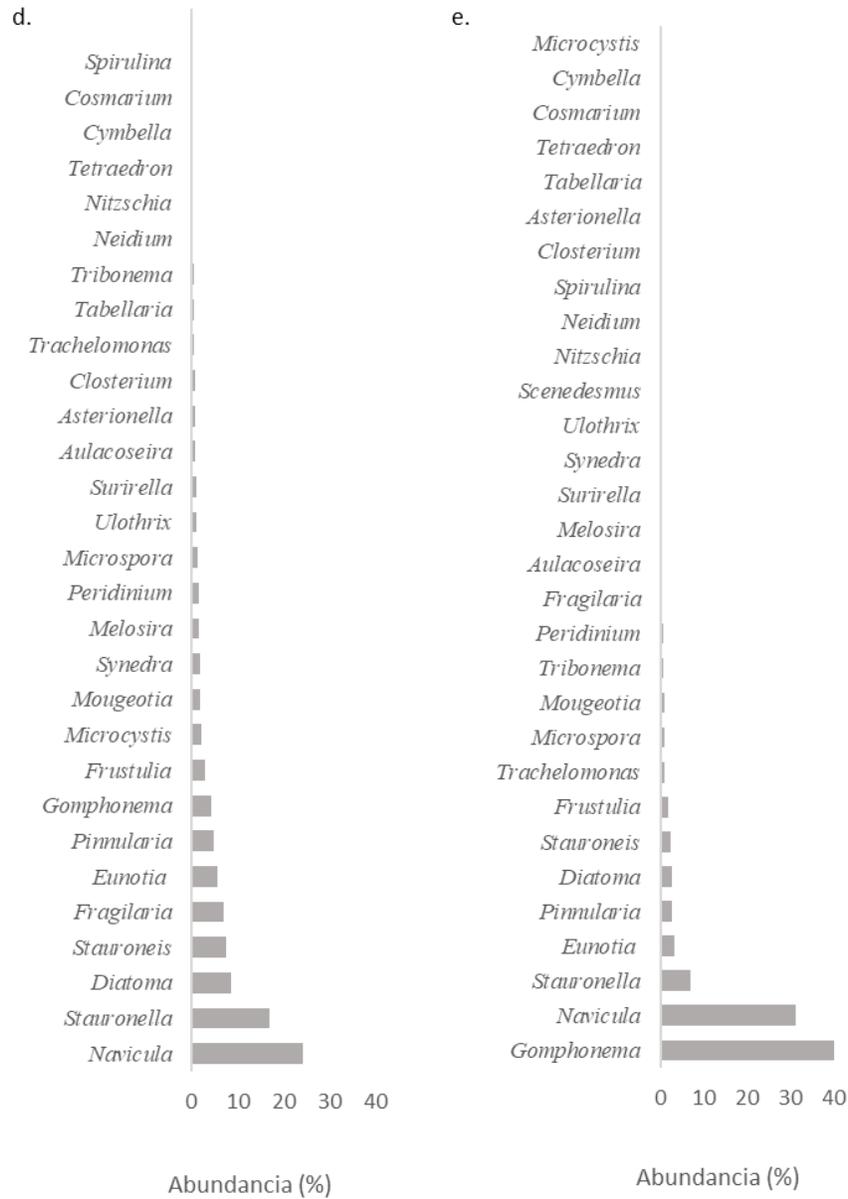
Los géneros como *Fragilaria*, *Melosira* y *Gomphonema* presentes en la mayoría de los puntos de muestreo son indicadores de aguas en proceso de eutrofización (Licursi & Gómez, 2003; Velázquez *et al.*, 2006 en Vélez *et al.*, 2016).

En el punto 4 el género *Diatoma* también tuvo valores altos de abundancia (18%). Se ha reportado que este género es ligeramente alcalófilo y se prolifera mejor en aguas con un pH entre 7.1 y 7.8 (Lowe, 1974). Las pruebas de pH en este sitio mostraron una lectura promedio de 7.1 (Tabla 7), las cuales se encuentran dentro de sus rangos tolerables de pH.

Se ha reportado que la deposición ácida ha tenido efectos significativos en comunidades acuáticas incrementando las especies ácido tolerantes como diatomeas, entre estas especies del género *Cymbella* (Duque, 1992; Donato, 2005 en Morales y Salazar, 2012) lo que puede explicar sus valores mínimos de abundancia, ya que el pH en los sitios de muestreo en general se mantuvieron en rangos de 6.5 y 8. Sin embargo este género ha sido registrado en ambientes con enriquecimiento de actividades agropecuarias (Charles, 2002 en Morales y Salazar, 2012), lo cual podría determinar su presencia debido a los usos del suelo en las áreas que cercanas a la zona de estudio.

Figura 10. Gráficas de abundancia total por género presente en cada uno de los puntos muestreados A. Punto 1 B. Punto 2 C. Punto 3 D. Punto 4 E. Punto 5.





Fuente: El Autor

El Género *Scenedesmus* fue uno de los menos frecuentes en los sitios de muestreo, presentándose en los puntos 1, 2 y 4 con un 0.24%, 0.4% y 0.27% respectivamente. Según Bazán (2010), las especies del género *Scenedesmus* son de crecimiento rápido y alta tasa de renovación, indicativo de un grado de mineralización de la materia orgánica de moderado a

alto. Esto puede explicar su baja abundancia dado a que los puntos de muestreo se clasificaron dentro de los rangos bajos frente a los índices de contaminación ICOMO (por materia orgánica) como se muestran en la Tabla 9.

De acuerdo con los indicadores biológicos de Terrel & Bytnar (1996) existe una marcada predominancia de géneros como *Mougeotia* característicos de aguas estancadas, de sitios contaminados y de aguas superficiales (Fontúrbel, 2005). Hillebrand (1983) afirma la presencia de este género en aguas eutróficas, con un pH que oscilaba entre 7,5 y 9,9. Este género fue uno de los más abundantes en los sitios de muestreo, y su establecimiento puede explicarse por los valores de pH obtenidos en los puntos de muestreo, lo cuales se encuentran dentro de los reportados.

7.1.1.1 Índices de Diversidad

El índice de dominancia de Simpson muestra resultados entre 0 a 1 en el cual los valores cercanos a 0 explican la dominancia de una especie por sobre las demás e indican ecosistemas más homogéneos. Los datos obtenidos del punto 1 (Tabla 5) muestran el valor más cercano a cero, lo que indica una alta dominancia por alguna especie, lo cual se contrasta con las abundancias obtenidas para este punto de muestreo, en la cual el género *Anabaena* presento porcentajes de abundancia muy altos en comparación a las demás estaciones que contienen especies con mayor abundancia. En general los demás sitios de muestreo mostraron que contienen especies dominantes.

Tabla 5. Índices de diversidad para comunidad fitoplanctónica.

| Índice | Punto | | | | |
|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Shannon | 0,843 | 2,316 | 2,559 | 1,551 | 1,427 |
| Margalef | 2,473 | 3,801 | 3,792 | 3,381 | 2,208 |
| Simpson (1-D) | 0,28 | 0,84 | 0,89 | 0,71 | 0,66 |

Fuente: El Autor

Los resultados del índice de Shannon oscilaron entre 0,8 y 2,6 en cada uno de los puntos de muestreo, lo que demuestra que esta comunidad no es equitativa en ninguno de los puntos de muestreo (Tabla 5) dada las dominancias evidenciadas en los mismos.

Por otro lado, en el índice correspondiente a Margalef (Tabla 5) evidencia que los valores obtenidos son menores a cinco, pero superiores a dos, por tanto, puede considerarse que los cinco puntos de muestreo no presentan baja diversidad, pero sus valores no son tan altos para ser considerados como altamente diversos.

Estos índices de diversidad suelen ser muy útiles para predecir las condiciones de calidad de los ecosistemas acuáticos (Meza *et al.*, 2012); considerando que las diferencias en las abundancias de especies, la organización espacial de la comunidad y el grado de contaminación; pues los valores elevados de diversidad, representarían ecosistemas altamente organizados y una mayor complejidad estructural de la taxocenosis y por consecuencia, una mayor estabilidad y menor alteración por contaminación, mientras que, los valores bajos de diversidad se han asociado con un aumento de las condiciones tróficas del sistema en este caso hídrico, o también podría significar que la comunidad se encuentra en una etapa transicional representada por los valores máximos y mínimos de diversidad, lo cual denotaría cierto grado de inestabilidad o alternancia de especies (Alarcón & Peláez, 2012).

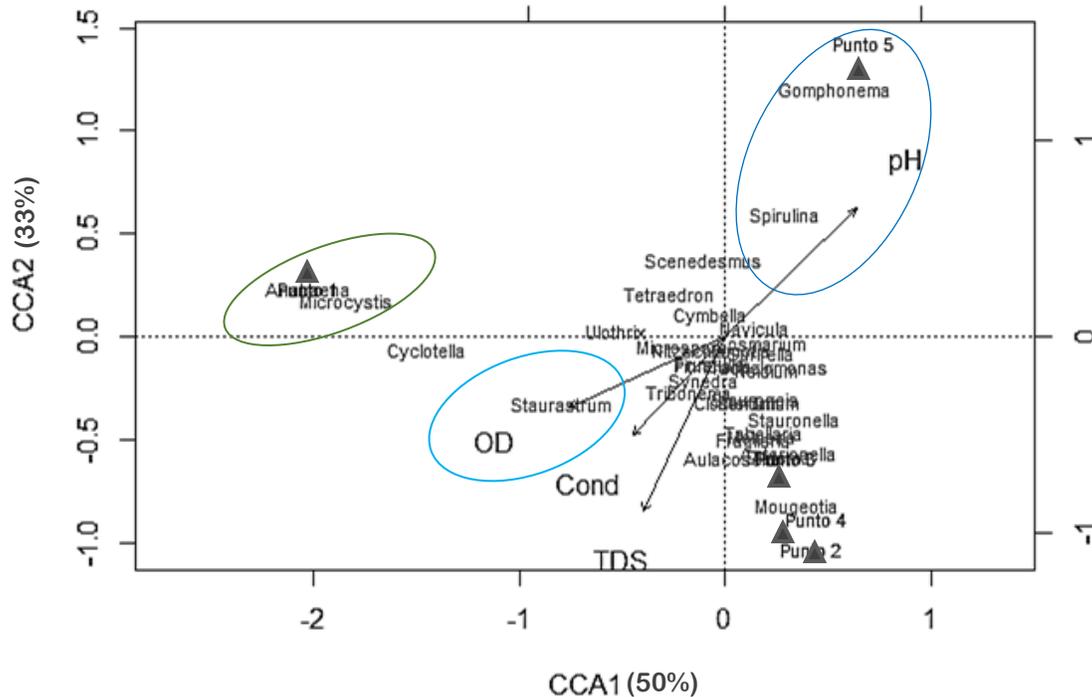
7.1.1.2 PCA (*Principal Components Analysis*) y CCA (*Constrained Correspondence Analysis*)

Dentro de las gráficas de PCA (Figura 11), se evidencia que gran porcentaje de los taxones no presentan afinidad o un patrón ambiental que se relacione con su presencia. Sin embargo, *Ulothrix* y *Microspora* muestran una relación frente a la temperatura y al oxígeno disuelto.

Especies del género *Ulothrix* suelen estar asociadas a medios poco contaminados, con altas concentraciones de oxígeno y escasez de materia orgánica (Villalobos & Albendiz, 2017). Según los índices de contaminación (Tabla 9) los puntos de muestreo en general no presentan evidencias de sufrir altas alteraciones fisicoquímicas en los cuerpos de agua. Sin embargo, las concentraciones de oxígeno disuelto muestran ser bajas (Tabla 7), lo que puede determinar sus valores de abundancias, pero explicar su presencia ya que son aguas con una contaminación baja por materia orgánica.

Microspora por su parte ha sido un género reportado en estudios con valores bajos de oxígeno disuelto, es por esto que en la Figura 11 muestra su relación con este parámetro. Sin embargo, no fue de las especies más abundantes. López & Serna (1999), reportaron que las temperaturas en donde la abundancia fue significativamente mayor oscilaban entre los 18 y 22 °C, contrastando con los resultados obtenidos, este parámetro puede ser un factor limitante dadas las bajas temperaturas en los sistemas.

Figura 12. Análisis de correspondencia constricta para las variables de abundancia por género, variables ambientales y sitios de muestreo.



Fuente: El Autor

En la Figura 12 se muestra la distribución de los géneros frente a los sitios de muestreo y variables ambientales. Se observa que gran porcentaje de los géneros no evidencian preferencia específica por alguna variable ambiental si no por el contrario, presentan una relación con todas en general. Esto puede explicarse a las variaciones mínimas entre puntos de muestreo frente a las variables ambientales, lo que influye de tal modo en las abundancias obtenidas por cada género, además de que alguno de los más representativos como por ejemplo el género *Navicula*, el cual mostraba ser más tolerante a cambios de calidad en el ecosistema.

Por otra parte, los géneros como *Anabaena* y *Microcystis* se relacionaron directamente con el punto 1, pero no se mostraron preferencia directa con un parámetro fisicoquímico ambiental tal como se observó en el PCA (Figura. 11). Si bien un parámetro

limitante para la presencia del Genero *Anabaena* es el nitrógeno, (Guillen, 2010) lo cual explica sus valores de abundancia bajos, sin embargo, el punto 1 fue el sitio que obtuvo las concentraciones más altas de nitritos. La presencia de esta cianobacteria no está determinada por factores como pH y temperatura, dado a que pueden presentarse en ambientes de pH de 6.0 – 8.0 y una temperatura de $28\pm 2^{\circ}\text{C}$, siendo estas condiciones ocasionalmente extremas, además de ser comunes en aguas estancadas. (Prassana, *et al.*, 2006).

Microcystis se desarrolla muy bien en condiciones de poca luz, y las cianobacterias como este género pueden mantener una tasa de crecimiento relativamente mayor que el resto de organismos fitoplanctónicos presentes (Chorus y Bartram, 1999); algunos factores que influyen también en su presencia y abundancia es la contaminación por exceso de nutrientes, especialmente fosfatos y nitrógeno, lo cual lleva a la eutrofización de estos ecosistemas (Briand *et al.*, 2003).

Dentro de los resultados también se observa que el género *Staurastrum* muestra relación con el oxígeno disuelto, pero no a un sitio de muestreo específico. Diferentes especies de *Staurastrum* no son capaces de sobrevivir en aguas cargadas con determinados nutrientes aportados por las actividades humanas y, por ello, al poco tiempo de permanecer en el cuerpo de agua se extingue irremisiblemente (Guillen, 2014). Este fue un género poco abundante en el área de estudio, sin embargo, su porcentaje bajo de frecuencia puede indicar que el ecosistema se encuentra en un estado de recuperación dado a que no se evidencian grados de contaminación potencialmente altos, pero aún se encuentran en procesos de eutrofización, y por tanto afectar las concentraciones de oxígeno disuelto, las cuales suelen mostrar alteraciones en el medio y así mismo la presencia de estos organismos.

Especies del género *Gomphonema* se encuentran asociados a aguas con pH alcalinos (Mora *et al.*, 2015), lo que explica su relación con el pH y el punto 5, ya que este punto presentó los valores más altos de pH con un promedio de 7.4 siendo esta condición más óptima para el establecimiento de este género en comparación con los demás puntos de muestreo.

En un estudio realizado por Rodríguez y Triana en el 2006, se menciona que el género *Spirulina* se prolifera en aguas muy mineralizadas, extremadamente alcalinas y en ocasiones de altas temperaturas. Los cuerpos de agua no presentaron un pH lo suficientemente alto, lo que puede explicar sus bajas abundancias y a su vez su relación con el pH como se muestra en la Figura 12.

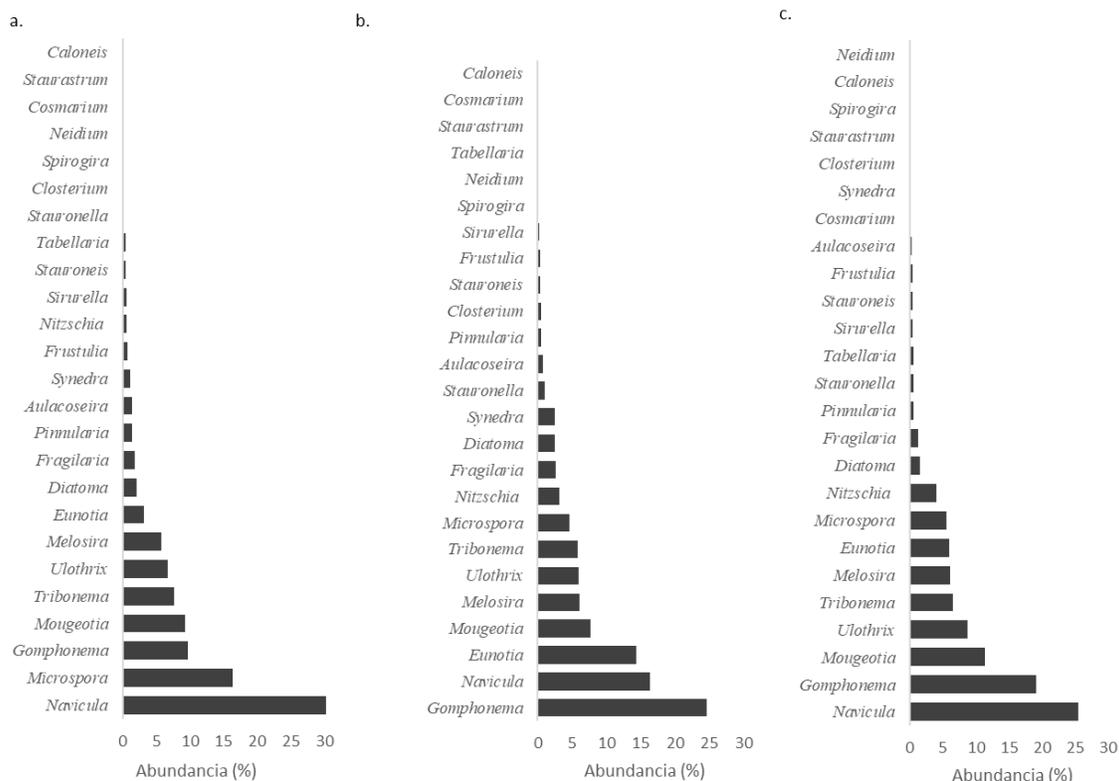
7.1.2. Perifiton

Se encontraron 55,575 individuos distribuidos en 19 familias y en 25 géneros (Anexo 5), en donde los géneros con mayor número de organismos fueron *Navicula* (22,75%), *Gomphonema* (19,45%) y *Mougeotia* (9,42%) respectivamente (Figura 13.). El género menos abundante fue *Caloneis* (0,019%). Los resultados estadísticos mostraron que no existen diferencias estadísticamente significativas con un $p < 0,05$ entre abundancias por punto (Anexo 1) y por mes muestreado (Anexo 2).

Se ha reportado que especies pertenecientes a los géneros *Caloneis* y *Neidium* son consideradas como buenas indicadoras del nivel trófico de las lagunas en las que se desarrollan, debido a su rápido crecimiento y a sus tasas de inmigración (Hall & Smol, 2001 en Linares *et al.*, 2007). Estos géneros mostraron los números más bajos de individuos, lo

que puede ser un índice de buena calidad para los cuerpos de agua frente a la recuperación del sistema.

Figura 13. Abundancia por género presente en cada uno de los puntos muestreados. a. Punto 1 b. Punto 2 c. Punto 3



Fuente: El Autor

Géneros como *Frustulia* y *Fragilaria* se conocen como indicadoras de lagos con un bajo nivel de nutrientes, lo que explica sus bajas abundancias, dado a que según los índices de contaminación ICOTRO los cuerpos de agua presentar eutrofización. Esto se confirma con la presencia de géneros como *Neidium*, *Stauroneis* y *Navicula* los cuales son indicadores de lagos eutróficos, siendo *Navicula* y *Eunotia* de los géneros más abundantes.

Especies del género *Eunotia* suelen mostrar un rango de tolerancia de las concentraciones de nutrientes y contaminantes orgánicos (Patrick y Reimer, 1966).

Por otra parte, describen que especies de géneros como *Nitzschia*, *Cymbella* y *Pinnularia* están asociadas a cargas elevadas de materia orgánica y de nutrientes en el agua. Dichos taxones son muy cosmopolitas (Kelly *et al.*, 2005; Lane y Brown, 2007 en Castro y Pinilla, 2014) y por lo general son altamente tolerantes a la eutrofización y a condiciones de elevada saprobiedad. Es por esto que se encuentran presentes en los sitios de muestreo, pero no con un porcentaje alto de abundancia que puede ser por diversos factores como el contenido de materia orgánica en las aguas.

Otro factor que puede contribuir a la baja abundancia observada para géneros como *Eunotia* es la variable de pH (Agbeti *et al.*, 1997), puesto que la deposición ácida ha tenido efectos significativos en comunidades acuáticas, incrementando las especies ácido-tolerantes (Duque, 1992; Donato, 2005), registradas en ambientes con enriquecimiento de actividades agropecuarias (Charles, 2002). Además, se menciona en general que la familia Eunotiaceae crece en función al pH, si son hábitats como los pantanos ricos en ácidos húmicos, o lagos de aguas cristalinas acidificadas naturalmente, o por fuentes de contaminación antropógenicas, registrándose particularmente algunas especies en hábitats con pH bajos (entre 2-3), además muestran un rango de tolerancia a concentración de nutrientes y contaminación orgánica (Pedrozo *et al.*, 2010). Géneros como *Closterium*, *Scenedesmus* y *Straurastrum* son comunes aguas lenticas eutróficas, particularmente ricos en calcio (Gómez, 2015).

Mougeotia fue uno de los géneros más abundantes para perifiton, son comunes en aguas eutróficas y ricas en bicarbonato (Simons, 1987). Sin embargo, sugieren que especies de *Mougeotia* son capaces de crecer en una amplia gama de ambientes desde eutróficos a

oligotróficos y a través de un rango de niveles de pH, pero rara vez dominan bajo condiciones naturales. (Graham *et al.*, 1996).

7.1.2.1. Índices de Diversidad

El resultado de la aplicación del índice de Shannon-Wiener para cada uno de los puntos estuvo por debajo de 3, por lo tanto, demuestra que esta comunidad no es equitativa (Tabla 6). Para el índice de riqueza Margalef, se evidencia que los valores obtenidos son menores a cinco, lo cual no se establece puntos con alta diversidad. El punto 3, muestra tener una baja diversidad ya que sus valores son inferiores a dos. El índice Simpson muestra en general baja dominancias.

Tabla 6. Índices de diversidad por punto para la comunidad perifítica.

| Índice | Punto | | |
|---------------|--------|--------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Shannon | 2,101 | 2,547 | 1,991 |
| Margalef | 2,262 | 3,595 | 0,797 |
| Simpson (1-D) | 0,8491 | 0,8789 | 0,8508 |

Fuente: El Autor

Como se muestra en la Tabla 6, estos índices siguen el mismo patrón a los resultados obtenidos para fitoplancton (Tabla 5). El Perifiton está relacionado directamente con gran parte de la materia orgánica producida, y promueven el intercambio de los componentes físicos, químicos y biológicos. Pueden originar formas planctónicas por el desprendimiento del sustrato (Moreno y Aguirre, 2013). Lo que explica la semejanza entre sus índices de diversidad.

Según la clasificación propuesta por Roldan en 1992 del estado trófico de las aguas de acuerdo con su índice de diversidad, las determina como agua medianamente contaminadas.

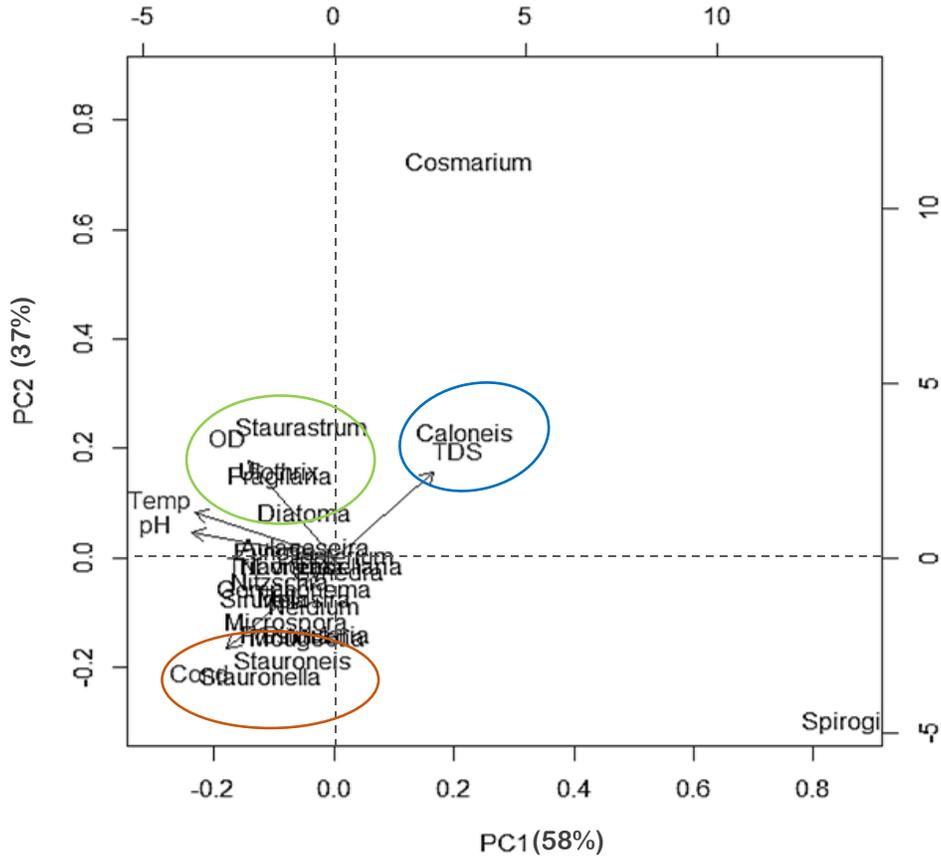
7.1.2.2. *Análisis de Componentes Principales y Análisis de Correspondencia Constricta*

En el análisis de componentes principales se observa las tendencias de los géneros frente a las variables ambientales, se evidencia que la mayoría de estos géneros tienden a tener una relación con la conductividad, siendo los géneros *Stauronella* y *Stauroneis* los más cercanos al vector correspondiente a este parámetro. El género *Caloneis* muestra una relación cercana con los sólidos totales disueltos del área de muestreo. Por otra parte, la presencia de *Staurastrum*, *Diatoma*, *Fragilaria* y *Ulothrix* muestran ser influenciadas por los valores de Oxígeno disuelto (Figura 14).

En análisis de correspondencia constricta (Figura 15) realiza una reducción de las variables ambientales. Los ejes graficados, reflejan los componentes suficientes para mostrar las relaciones de las tres variables descritas, en este caso tres ambientales, las abundancias por cada género y los cinco puntos de muestreo.

El género *Staurastrum* presento una afinidad frente a la variable ambiental de Oxígeno disuelto. En general las especies de este género suelen presentarse en lagos de pH ácidos y con poca o ninguna contaminación (Loaiza, *et al.*, 2011). Este género fue de los menos abundantes en los puntos de muestreo (Figura 13). Los cuerpos de agua presentaron en general contaminación según las concentraciones de oxígeno disuelto, lo que puede explicar su relación con esta variable y sus bajas frecuencias en los valores de abundancia.

Figura 14. Análisis de componentes principales para la abundancia de géneros de la comunidad perifítica y su relación con las variables ambientales.



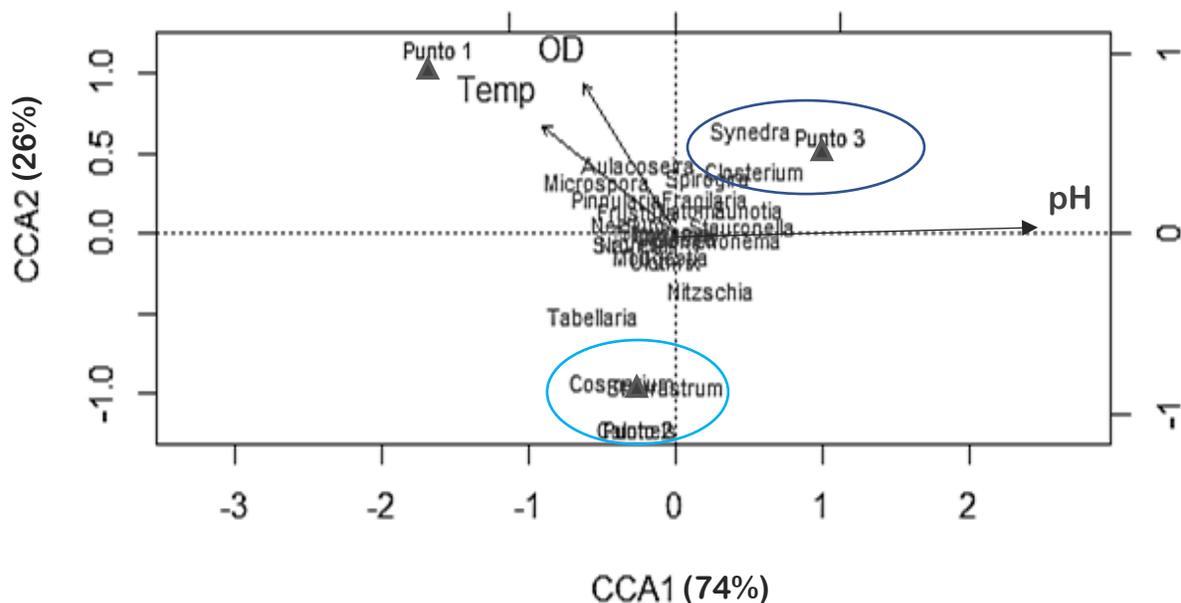
Fuente: El Autor

Cosmarium por su parte, no muestra relación con alguna de las variables ambientales. Este género se encuentra clasificado dentro de la familia Desmidiaceae, dentro de la cual se presentan géneros indicadores de lagos oligotróficos. Las condiciones óptimas para la mayoría de las especies de esta familia son la mesotrofia, un exuberante paisaje de vegetación y un alto grado de diversidad estructural y estabilidad (COESEL, 1975).

En este análisis, se muestra la tendencia de los géneros frente a las variables ambientales y los sitios de muestreo. El común de los géneros evidencia una agrupación central general, lo cual indica que los géneros se relacionan con todas las variables

ambientales representadas en la Figura 15. En casos específicos el género *Caloneis*, *Cosmarium* y *Staurastrum* muestran que sus valores de abundancia se situaron principalmente en punto 2. En el caso de géneros como *Synedra* y *Closterium* se presentaron con mayor abundancia en el punto 3 en comparación al punto 2, pero ninguno de estos géneros evidencia relación específica con alguna de las variables ambientales.

Figura 15. Análisis de correspondencia constricta entre temperatura y oxígeno disuelto frente a las abundancias de los géneros de comunidades perifíticas en los sitios de muestreo



Fuente: El Autor

Especies del género *Closterium* habitan en lagos ácidos y estanques oligotróficos, rara vez en aguas más alcalinas (Anton y Duthie, 1981). Estas variables pueden afectar su abundancia, dado a que los puntos presentan eutrofización (Tabla 9), sin embargo, se pueden encontrar en aguas con pH alcalinos, y como se muestra en la Figura 15 este género muestra más afinidad por el pH.

Los géneros *Synedra* y *Closterium* son indicadores de aguas con cargas orgánicas (Escobar *et al.*, 2013). Los puntos de muestreo 2 y 3 de perifiton se localizan entre el punto

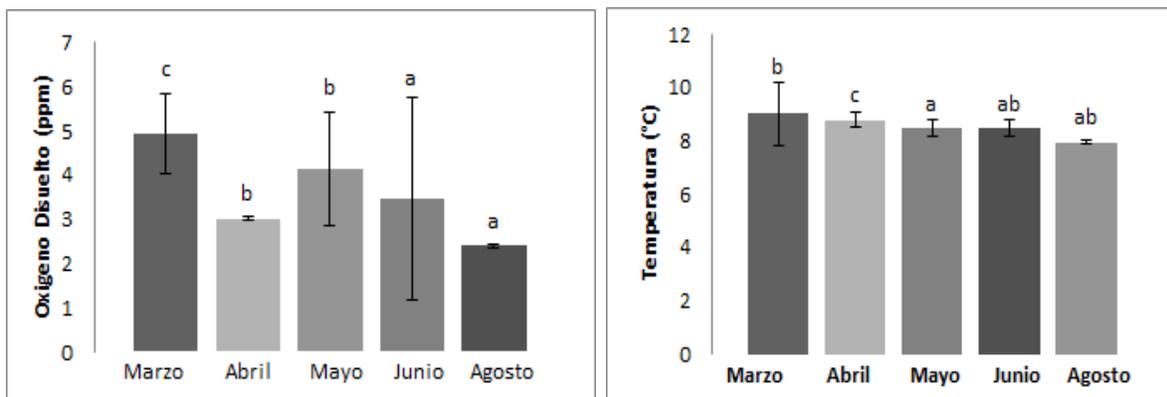
4 y 5 correspondientes a los índices de contaminación, los cuales presentan baja contaminación por materia orgánica (Tabla 9), lo que puede explicar su presencia. Esto también puede explicar la presencia de los géneros *Straurastrum* y *Cosmarium* asociados al punto 2, ya que pertenecen al grupo de las Desmidiás, las cuales también son indicadoras de contaminación por materia orgánica (Wetzel, 1981).

7.2 Resultados fisicoquímicos

7.2.1. Variables ambientales

Los resultados estadísticos determinaron frente a los parámetros ambientales en los meses muestreados que existen diferencias estadísticamente significativas con un $p < 0,05$ en variables de Oxígeno Disuelto y Temperatura (Figura 16).

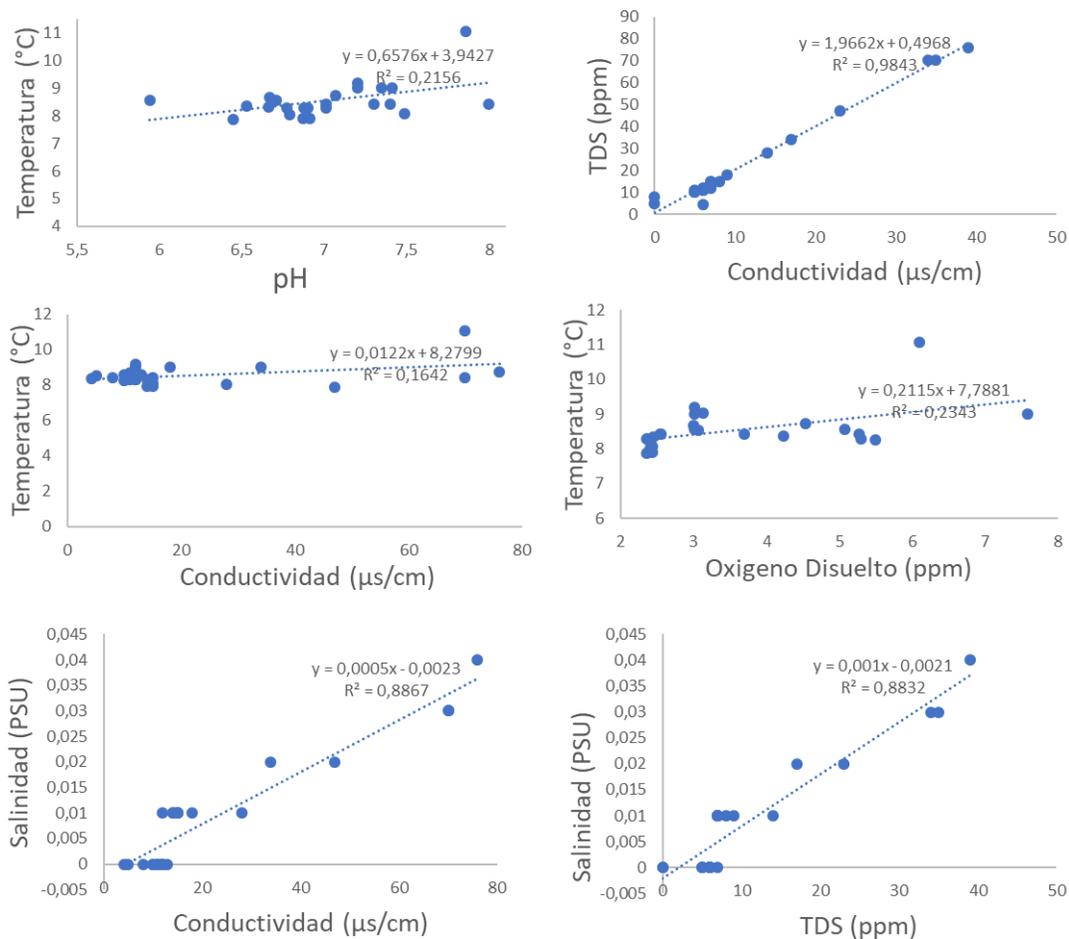
Figura 16. Valores promedio de Oxígeno Disuelto y Temperatura por mes muestreado. Se muestra diferencias estadísticamente significativas entre subconjuntos (a, b, c), mostrándose así diferencias estadísticamente no significativas entre resultados con el mismo subconjunto, y resultados con subconjuntos diferentes muestran diferencias estadísticas entre sí. Cada conjunto de datos muestra una barra de error estándar.



Fuente: Autor

Dentro de las fluctuaciones presentadas en los meses de muestreo, se evidencia que el mes de abril, mayo y junio presentan variaciones marcadas, sin embargo, el mes de marzo presento valores pertenecientes a un único subconjunto, mostrando diferencias respecto a los demás meses. Esto puede atribuirse a condiciones climáticas, dado a que este mes presento bajas precipitaciones en comparación con los demás, incrementando la radiación solar, y así probablemente la activación de rutas fotosintéticas.

Figura 17. Gráficas de correlación entre variables ambientales según la prueba no paramétrica de Pearson. Tendencia de comportamiento es directamente proporcional para todas las variables que presentan relación entre sí.



Fuente: El Autor

Estadísticamente las variables ambientales mostraron correlación entre sí, la mayoría presento altas correlaciones con valores por encima de 0,4 mostrando ser directamente proporcionales. Las variables que más se destacaron por tener una alta correlación entre sí fueron la conductividad y los sólidos totales con un valor de 0,79 (Figura 17).

La Tabla 7. muestra las variaciones de pH, Temperatura, Conductividad, Total de Solidos Disueltos y Salinidad de cada mes muestreado por punto. Se observa que el pH presenta intervalos de variaciones en el tiempo entre 6 y 8. Los rangos de concentración adecuado para la proliferación y desarrollo de la vida acuática es bastante estrecho y crítico, la mayoría de animales acuáticos prefieren un rango de 6.5 - 8.0, fuera de este rango se reduce la diversidad por estrés fisiológico, así como la reproducción (Metcalf y Heddy, 1985 en Cortolima, 2011). Como se muestra en la Tabla 7 el pH no ha variado significativamente en los meses muestreados, lo que en términos generales permite deducir que los cuerpos de agua tienen en promedio valores que indican un pH neutro, lo cual indica una correcta actividad fotosintética en su interior (Metcalf y Heddy, 1985 en Cortolima, 2011).

Los valores típicos de Total Solidos Disueltos (TDS) en aguas continentales suelen estar entre rangos de 50 a 250 mg/L. Lo que indica que valores se encuentran dentro de los estándares normales reportados para este tipo de sistemas.

Los puntos 2, 3 y 4 evidencian una alta conductividad en el primer mes de muestreo frente a los demás puntos. Esta variación puede deberse a que estos puntos de muestreo se encontraban muy cercanos a la quebrada presentando leves corrientes en comparación a los demás puntos, lo cual podría explicarse por la acumulación se sedimentos, aumentando los sólidos totales disueltos en los cuerpos de agua. Sin embargo, los valores disminuyen en los demás meses, esto puede deberse al tipo de ecosistema, el cual suele presentar altas tasas de

precipitaciones por procesos de condensación y humedad al ser un páramo. En los días muestreados se presentaron precipitaciones durante los muestreos lo que pudo provocar la disolución de sales y así mismo el reflejo en la toma de datos frente a la disminución de estos parámetros (Baquero y Márquez, 2015).

Tabla 7. Resultados de las variables ambientales pH, Oxígeno Disuelto, Conductividad (Cond), Total Solidos Disueltos (TDS) y Temperatura en los meses de Marzo, Abril, Mayo, Junio y Agosto. 2017

| Punto de muestreo | Salida | pH | Oxígeno Disuelto (%) | Cond (µs/cm) | TDS (ppm) | Temperatura (°C) |
|--------------------------|---------------|-----------|-----------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|
| 1 | Marzo | 5,94 | 66,9 | 10 | 5 | 8,56 |
| 2 | | 7,86 | 85,5 | 70 | 35 | 11,07 |
| 3 | | 7,07 | 59,9 | 76 | 39 | 8,72 |
| 4 | | 7,01 | 48,9 | 3,7 | 34 | 8,43 |
| 5 | | 7,01 | 68,4 | 12 | 6 | 8,29 |
| 1 | Abril | 6,71 | 39,6 | 13 | 7 | 8,55 |
| 2 | | 6,69 | 40,3 | 5 | 0 | 8,54 |
| 3 | | 6,67 | 39,7 | 11 | 6 | 8,68 |
| 4 | | 7,2 | 40,1 | 12 | 6 | 9,19 |
| 5 | | 7,2 | 40,1 | 12 | 6 | 9 |
| 1 | Mayo | 7,41 | 42,3 | 34 | 17 | 9,03 |
| 2 | | 7,4 | 70,3 | 11 | 6 | 8,42 |
| 3 | | 6,88 | 72,4 | 10 | 5 | 8,27 |
| 4 | | 6,53 | 55,9 | 4,23 | 6 | 8,37 |
| 5 | | 8 | 33,4 | 15 | 7 | 8,43 |
| 1 | Junio | 7,35 | 102,5 | 18 | 9 | 9 |
| 2 | | 6,66 | 32,2 | 11 | 5 | 8,33 |
| 3 | | 6,77 | 30,9 | 12 | 7 | 8,29 |
| 4 | | 6,9 | 31 | 14 | 7 | 8,3 |
| 5 | | 7,3 | 33,3 | 8 | 0 | 8,43 |
| 1 | Agosto | 6,45 | 30,5 | 47 | 23 | 7,87 |
| 2 | | 6,79 | 31,4 | 28 | 14 | 8,05 |
| 3 | | 6,91 | 34,7 | 14 | 7 | 7,9 |
| 4 | | 6,87 | 30,8 | 15 | 7 | 7,9 |
| 5 | | 7,49 | 31,8 | 15 | 8 | 8,08 |

Fuente: El Autor

En la clasificación de la calidad de agua en función al % de saturación de Oxígeno propuesto por Lynch y Poole (1979) se muestra que en general ningún cuerpo de agua presenta calidad buena frente a este parámetro. Sin embargo, el punto 5 mantuvo variaciones con valores por debajo del 50% de saturación de Oxígeno lo que se considera como cuerpo de agua contaminado. En cuerpos de agua no contaminados la concentración de oxígeno disminuye con la altitud (Lynch y Poole 1979), lo que puede ser una variable explicativa frente a los valores bajos en todos los cuerpos de agua ya que el área de muestreo se encuentra por encima de los 3200 msnm.

En general, los valores obtenidos de temperatura no muestran una diferencia en cada uno de los meses, conservando valores bajos. Se puede deducir que no es un parámetro ambiental influyente frente al comportamiento de las demás variables.

7.2.2 Variables químicas y microbiológicas

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las variables medidas en los muestreos realizados, se presentan por cada uno de los puntos establecidos a lo largo de la quebrada. Los parámetros químicos determinados en los puntos de muestreo se establecieron para determinar el estado de la quebrada a nivel fisicoquímico, permitiendo determinar los índices de contaminación (Tabla 9) y concentraciones de otros parámetros que indicaron la calidad del agua frente a su estado de conservación.

Dentro de los parámetros fisicoquímicos, se encuentra la dureza, que dentro de los criterios de clasificación en general los puntos de muestreo se determinan ser aguas medias o semiduras. La dureza del agua está definida por la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en ella, evaluados como carbonato de calcio y magnesio, lo cual se rectifica con

los valores obtenidos de calcio disuelto. Esto indica que los puntos presentan aguas que pueden poseer fauna y flora más variada, pero son menos productivas en términos de biomasa (Roldán, 2003).

Los cloruros por su parte mostraron que en todos los puntos de muestreo presentaron muy bajas concentraciones, lo que permite atribuirle no estar contaminada frente a este factor. Su presencia, aunque es baja, puede deberse a que en aguas naturales suelen proceder de la disolución de suelos y rocas que los contengan y que están en contacto con la misma (Eco fluidos ingenieros, 2012).

Tabla 8. Variables químicas y microbiológicas para cada uno de los puntos muestreados.

| Variable | Unidades | Punto 1 | Punto 2 | Punto 3 | Punto 4 | Punto 5 |
|--|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Coliformes totales | NPM/100ml | <18 | - | <18 | - | <18 |
| Coliformes Fecales | NPM/100ml | <18 | - | <18 | - | <18 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno-DBO ₅ | mg O ₂ /L | 18 | 19 | 19 | 20 | 18 |
| Demanda Química de Oxígeno – DQO* | mg/L | 1 | 6 | 10 | 9 | 3 |
| Cloruros | mg Cl ⁻ /L | <5.00 | <5.00 | <5.00 | <5.00 | <5.00 |
| Calcio Disuelto | mg Ca/L | 4.3 | <4.00 | <4.00 | 39.1 | 24 |
| Dureza Total | mg CaCO ₃ /L | 175 | 93.9 | 84.9 | 105 | 68 |
| Nitritos | mg NO ₃ -N/L | <0.100 | <0.100 | <0.100 | <0.100 | <0.100 |
| Nitratos | mg NO ₂ -N/L | <0.00500 | <0.00500 | <0.00500 | <0.00500 | <0.00500 |
| Fósforo* | mg P/L | 0.06 | 0.03 | 0.02 | 0.06 | 0.08 |
| Fosfatos | mg P-PO ₄ ³⁻ /L | 0.0621 | <0.0500 | <0.0500 | <0.0500 | <0.0500 |
| Sulfatos | mgSO ₄ ⁻¹ /L | <15.0 | <15.00 | <15.0 | <15.0 | <15.0 |
| Sulfuros | mg S ₂ /L | <1.00 | <1.00 | <1.00 | <1.00 | <1.00 |
| Solidos Suspendidos Totales | mg SST/L | 42 | <10 | <10 | <10 | 50 |
| Solidos Totales | mg ST/L | 64 | <50 | 78 | <60 | <60 |
| Zinc | mg Zn/L | <0.0500 | 0.139 | <0.0500 | <0.0500 | <0.0500 |

*Los puntos corresponden a los mismos puntos de fitoplancton

Fuente: Laboratorio ANASCOL, 2017 No I 22647-22649-17

Dado a que en diferentes ocasiones la presencia de estos cloruros se le atribuye a la disolución de depósitos minerales de sal gema, contaminación proveniente de diversos efluentes de la actividad industrial, aguas excedentarias de riegos agrícolas y sobre todo de las minas de sales potásicas. (Cortolima, 2011), se puede afirmar que la quebrada se ha experimentado procesos de autodepuración, ya que se puede suponer que estas concentraciones durante el periodo en donde la mina se encontraba activa probablemente eran mucho más altos, sin embargo no existen reportes.

Generalmente todo el nitrógeno en el ambiente suele encontrarse en forma de Nitrato, el cual es encontrado naturalmente en el suelo y agua, pero usualmente en bajas concentraciones. Los niveles naturales de nitrato varían de cero a cerca de 4 mg/L (Sigler y Bauder, 2012).

En el caso de los fosfatos ya sea complejos o condensados, también se encuentran presentes en aguas naturales bien sea porque son generados por los organismos acuáticos o porque provienen de las descargas de aguas residuales domésticas e industriales que contienen detergentes y productos químicos utilizados para el tratamiento de las aguas. Desde el punto de vista de la eutrofización, los nutrientes más importantes son los nitratos y los fosfatos, que pueden aparecer en el agua a partir de distintas fuentes, entre ellos la abundancia algal como consecuencia de las cantidades de materia orgánica (Sánchez de fuentes, 2001). Con esto se puede inferir que, a partir de las concentraciones de fosfatos, los cuerpos de agua presentan eutrofización por fósforo, tal como lo evidencia el Índice de contaminación por trofia (Tabla 9), por lo que puede ser un factor que indica la presencia de fosfatos, pero ser bajo a causa de los constantes flujos por las frecuentes precipitaciones y altas humedades del suelo.

Por otra parte, según los límites permisibles de Sulfatos recomendados por la OMS son los 250 mg/L valor guía para evitar probable corrosividad del agua. Los resultados mostrados para sulfatos en los puntos de muestreo indican no ser aguas corrosivas, sin embargo, se evidencian concentraciones mínimas. Los sulfatos son un componente natural de las aguas superficiales y por lo general en ellas no se encuentran en concentraciones que puedan afectar su calidad, usualmente se originan de la mineralización de rocas en la cuenca de los lagos. No obstante, la mayoría del sulfato se deriva del agua de lluvia (Cortolima, 2011).

7.2.3 Índices de Contaminación (ICO's)

Los resultados indicaron que todos los puntos de muestreo presentan una baja contaminación en cuanto a materia orgánica. No se presenta contaminación por Sólidos Suspendedos Totales, ni por pH. El índice por trofia evidencio que todos los puntos presentan procesos de eutrofización (Tabla 9).

Tabla 9. Índice de Contaminación para la quebrada El Santuario

| Punto | ICOMO | ICOSUS | ICOpH | ICOTRO |
|-------|------------|--------|-------|----------|
| 1 | 0,15808969 | 0,106 | 0,05 | Eutrofia |
| 2 | 0,17337092 | 0,01 | 0 | Eutrofia |
| 3 | 0,18810425 | 0,01 | 0,07 | Eutrofia |
| 4 | 0,20922403 | 0,01 | 0,001 | Eutrofia |
| 5 | 0,20795636 | 0,13 | 0,06 | Eutrofia |

Fuente: El Autor

El índice de contaminación por materia orgánica muestra que los puntos 4 y 5 presentan baja contaminación, lo que describe puntos con baja incidencia antrópica en comparación a los demás puntos los cuales no presentan contaminación y por ende no tener incidencia antrópica. Este índice usa parámetros fisicoquímicos como la demanda

bioquímica de oxígeno, el cual dentro de los estándares de calidad de para este parámetro, todos los puntos están determinados como aceptables. Esto significa que son aguas con indicio de contaminación y que conservan capacidad de autodepuración (Sermarnat, 2007).

Es importante tener en cuenta, que este índice también usa otros indicadores como los coliformes totales, los cuales mostraron un índice 0. Es por esto, que los puntos en general mostraron un índice de contaminación bajo por materia orgánica a pesar los bajos % de saturación de oxígeno (Tabla 9), el cual puede ser afectado por otras variables como la altura o presión atmosférica como se mencionaba en el capítulo anterior.

Según las escalas de clasificación de la calidad del agua revela que los puntos 1 y 5 presentan valores altos de Solidos Suspendidos Totales en comparación a los demás puntos. Esto indica que estos puntos presentan aguas de buena calidad con bajos contenidos de solidos suspendidos generalmente en condiciones naturales y favorecen la conservación de comunidades acuáticas a diferencia de los demás puntos, los cuales se clasifican de muy buena calidad. Esto se confirma con el índice de contaminación por este parámetro químico (ICOSUS) (Tabla 9). Si bien, estos cuerpos de agua se encuentran en un ecosistema bajo condiciones variables de microclimas, presentando frecuentes precipitaciones, lo cual puede explicar un flujo constante de solidos totales tanto suspendidos como disueltos, y así mismo no reflejar índices de contaminación.

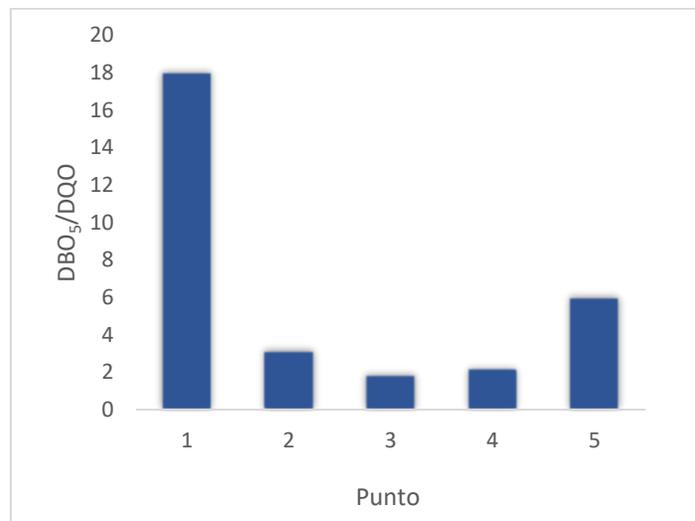
Los niveles de fosforo en los cuerpos de agua a pesar de tener concentraciones bajas, se considera que en los puntos de muestreo se presentan procesos de eutrofización a causa de esta variable. Si bien, la zona de estudio se encuentra en un área intervenida por actividades agropecuarias y de minería. Las zonas adyacentes al área presentan cultivos de papa, lo cual

puede explicar sus índices relativamente altos, debido al uso de fertilizantes con altas concentraciones de fosforo (Camargo & Alonso, 2007).

7.2.3.1 Relación DBO/DQO

La relación de DBO y DQO permite entender la naturaleza de la materia orgánica presente en la quebrada. (Figura 18) El aumento de la DQO contribuye a la disminución de la capacidad de depuración de las fuentes hídricas, disminución del oxígeno disuelto, salinización de los suelos, y pérdida de la biodiversidad acuática y calidad del uso (Cortolima, 2011).

Figura 18. Relación DBO_5/DQO .



Fuente: El Autor

Al dividir la DBO_5 entre la DQO, se observa en los puntos 1 y 5 de muestreo se obtienen valores de relación altos. Una aproximación cuantitativa de la biodegradabilidad de un efluente va a estar dada por la relación de la demanda bioquímica de oxígeno a la demanda química de oxígeno. En general, valores inferiores de 0,2 se consideran bajos, mientras que superiores a 0,4 corresponden con una buena biodegradabilidad. Por lo que entonces se puede

deducir que los efluentes presentan un predominio de contaminantes orgánicos biodegradables.

Finalmente, en un estudio realizado anteriormente para la quebrada El Santuario por Saavedra en el 2015 reporto aproximadamente 6845 individuos para comunidades perifíticas. En donde la clase Bacillariophyceae agrupo la mayor riqueza dentro de esta comunidad. Se evidencia un aumento en el número de individuos que en este caso fueron de 55,575 individuos distribuidos en 19 familias en donde nuevamente la clase Bacillariophyceae presento mayor número de individuos.

Por otro lado, para las comunidades planctónicas en cada uno de los diez puntos muestreados durante los cuatro monitoreos fueron de aproximadamente 7960 individuos aproximadamente. En donde la especie *Macrobiotus sp* fue la única presente para zooplancton. Las demás corresponden al fitoplancton siendo la Clase Bacillariophyceae con los mayores porcentajes de abundancia, seguida de Coscinodiscophyceae con el 19% de los registros. En comparación con este año, se encontraron en total 16,478 individuos distribuidos en 28 familias para comunidad fitoplanctónica, en donde la Clase Bacillariophyta también presento mayor número de individuos. Esto indica que el sistema en general aún se encuentra en Eutrofia, con una alta relación N/P y evidente sucesión Planctónica (Pinilla, 1998).

Respecto a las variables fisicoquímicas e índices de contaminación y calidad, la información obtenida determinó que el agua de la quebrada El Santuario presento una clasificación de limpia a muy limpia, clasificación que se apoya en términos de la diversidad de la comunidad planctónica y perifítica que presentan valores altos ($H' > 0,7$) en la totalidad de la quebrada y cuyas abundancias aumentan con la descarga de agua de la mina.

Actualmente, teniendo en cuenta los resultados obtenidos según los parámetros fisicoquímicos y los índices de contaminación, la quebrada presenta valores que indican baja contaminación, y se evidencia una recuperación del sistema dado el aumento en la diversidad tanto de comunidades planctónicas como perifíticas y presencia de géneros indicadores de buena calidad de agua.

8. Conclusiones

La Quebrada El Santuario refleja una recuperación frente a la diversidad de comunidades biológicas referentes a fitoplancton y perifiton como a la calidad de agua según los parámetros fisicoquímicas determinados.

Actualmente, la quebrada presenta procesos de eutrofización como consecuente de las concentraciones de fosforo. La quebrada en general presenta niveles bajos de contaminación según las variables de pH, materia orgánica, solidos suspendidos y concentración de oxígeno disuelto e índices de diversidad. Por otra parte, las variables como demanda química de oxígeno (DQO) y total de solidos disueltos (TDS) clasifican estas aguas de buena calidad.

El género más abundante en las dos comunidades biológicas fue *Navicula* y *Gomphonema*, indicadores de agua eutrofizadas. Sin embargo, se encontraron géneros indicadores de buena calidad de agua, pero con porcentajes bajos de abundancia como por ejemplo el género *Staurastrum*, lo que evidencia una recuperación del sistema.

Referencias Bibliográficas

- APHA, WPCF, AWWA, 1992. Standard Methods for the examination of waters and wastewaters. 15th Edition, Washington DC, 1134 pp.
- Alarcón, N. Peláez, F. 2012. Calidad del agua del río Sendamal (Celendín, Cajamarca, Perú): determinación mediante uso de Diatomeas. Departamento de Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo. Perú.
- Agbeti, M. Kingston, J. Smol, J. Watters, C. 1997. Comparison of Phytoplankton succession in two lakes of different mixing regimes. Arch. Hidrobiología. 140, 37-69
- Anton, A y H. Duthie. 1981. Use of cluster analysis in the systematics of the algal genus *Cryptomonas*. Can. J. Bot. 59: 992- 1002.
- Baev, P. Penev. 1995. Biodiv: Program for calculating biological diversity parameters, similarity, niche overlap, and cluster analysis. Version 5.1. Pensoft, Sofia-Moscow, 57 pp.
- Barkay, T. y J. Shaefer. 2001. Metal and radionuclide bioremediation: issues, considerations and potentials. Current Opinion in Microbiology 4: 318-323
- Baquero, M. Márquez, A. 2015. Evaluación de la calidad del agua en el humedal la conejera, localidad 11 de suba. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Facultad de medio ambiente y recursos naturales gestión ambiental y servicios públicos. Bogota D.C.
- Bazán G.I. 2010. Estudios ficológicos en el sistema léntico de La Arocena (Departamento Maracó), La Pampa, Argentina (Tesis Doctoral). Universidad Nacional del Río Cuarto (UNRC), Río Cuarto, Argentina.
- Bernal, J. Martínez, M. Sánchez, J. 2004. Modelización de los factores más importantes que caracterizan un sitio en la red. Universidad de Murcia. Jornadas de ASEPUMA.
- BP. Exploration -Ecotest, 1996b. Monitoreo hidrobiológico del área de Influencia del Bloque Piedemonte. Departamento del Casanare, Santafé de Bogotá.
- Briand, J., Jacquet, S., Bernard, C., Humbert, J. (2003) Health hazards for terrestrial vertebrates from toxic cyanobacteria in surface water ecosystems. Vertebrate Research 34:361-377.
- Burton, P. J. 1992. The value of managing for biodiversity. The Forestry Chronicle. 68 (2); 255–236 p.
- Camargo, J., & Alonso, A. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Ecosistemas, 16 (2), 1-13.
- Campo, A. Duval, V. 2014. Diversidad y valor de importancia para la conservación de la vegetación natural. Parque Nacional Lihué Calel (Argentina) 1
- Cano, S. 2003. Fitoplancton y coliformes como indicadores de la calidad del agua en el parque nacional Laguna del Tigre, Petén. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Castro, D. Pinilla, G. 2014. Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. Universidad nacional de Colombia. *Limnetica*, 33 (2): 297-312.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de Brasil., Índice de Calidad de Aguas, consultado en línea el 17 de Octubre de 2010 en <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/Índice.asp>.

Charles, D. (2002). Diatomeas de agua dulce: Indicadores del cambio del ecosistema. Academia de ciencias naturales, Philadelphia. Academia de ciencias. San Francisco de California.

Charles, D. Potapova, M. 2002. Benthic diatoms in USA rivers: distributions along spatial and environmental gradients. *J Biogeogr*;29(1):167-187.

Chorus, I., Bartram, J., 1999. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management. World Health Organization/E&FN Spon/Routledge, London.

Ciutti F. 2005. Il monitoraggio dei corsi d'acqua con indicatori algali (diatomee). *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità*. 41: 393-397.

COESEL, P. F. M., 1975. The relevance of desmids in the biological typology and evaluation of fresh waters. *Hydrobiology. Bull.*, 9 (3):93-101.

Cortolima. 2011. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Mayor del Rio Totare. Calidad de aguas. Corpoica. Universidad del Tolima.

Cottam, G. y Curtis, J.T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37, 451- 460

De la Lanza, E. G., Hernández, P. S. y Carbajal, P. J. L. 2000. Organismos Indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores). Plaza y Valdes. Mexico. 633 p.

Donato, Ch; Duque S.; Monsejo, L. (2005). Estructura y Dinámica del Fitoplancton de la laguna de Fúquene (Cundinamarca, Colombia). *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Volumen_16 (62): 113-144.*

Duque, S. & Donato, J. 1992. Biología y ecología del fitoplancton de las aguas dulces en Colombia. Cuadernos Divulgativos No. 35, Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias. p. 21

Ecofluidos Ingenieros. 2012. Estudio de la calidad de fuentes utilizadas para consumo humano y plan de mitigación por contaminación por uso doméstico y agroquímicos en apurimac y cusco. Fondo para el Logro de los ODM.

El-Shaarawi, A. H., Elliott, J. R., Kwiatkowski, R. E. and Peirson, D. R., 1986. "Association of chlorophyll a with physical and chemical factors in Lake Ontario, 1967-1981", *Statistical Aspects of Water Quality Monitoring*, Amsterdam, Elsevier, 273- 291

Escobar, M. Terneus, E. Yanez, P. 2013. El plancton como bioindicador de la calidad del agua en zonas agrícolas andinas: Análisis de caso. Universidad Iberoamericana del Ecuador.

- Fernández, N., Solano, F. 2005. Índices de Calidad y de Contaminación del Agua., Universidad de Pamplona.
- Forman, R. T. & M. Godron. 1986. Landscape Ecology. John Wiley & Sons (Eds.). New York, 619 p.
- Fonturbel, F. 2005. Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del Lago Titikaka (Bolivia). Ecol. apl. [online]. 2005, vol.4, n.1-2, pp.135-141. ISSN 1726-2216.
- George, J., Viña, G., Ramírez, A. y Mojica, J. I., 1991. Manual de métodos de monitoreo biológico con aplicación en la industria del petróleo. Componente acuático, Ecopetrol, Bogotá
- González, A. 1988. El Plancton de las Aguas Continentales. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo científico y Tecnológico. Caracas, Venezuela.
- Goodfellow, M. & J. Slater. 1992. Biodiversity as a source of innovation in biotechnology. Annual Review Microbiology. Vol. 46. 219–252p.
- Gomez, L. 2015. Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. Laboratorio de Ecotoxicología. Universidad de Oriente.
- Graham, J. Aracibia, P. Graham, L. 1996. Effects of pH and selected metals on growth of the filamentous green alga *Mougeotia* under acidic conditions. Limnol. Oceanogr. 41: 263-270.
- Guillen, A. 2010. Anabaena. Disponible en: <http://www.biodiversidadvirtual.org/micro/Anabaena-img163.html>
- Guillen, A. 2014. Staurastrum. Disponible en: <http://www.biodiversidadvirtual.org/micro/Staurastrum-paradoxum-img1342.html>
- Hall, R. I. & J. P. SMOL. 2001. Diatoms as indicators of lake eutrophication. In: The diatoms: applications for the environmental and earth sciences. F. Stoermer & P. Smol (eds.): 128-157. Cambridge University Press
- Halffter, G. 1998. A strategy for measuring landscape biodiversity. En: Moreno, C. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México. 80 p.
- Halffter, G. Soberon, P. koleff, M. 2005. Sobre Diversidad Biológica: El Significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gama. Guadalajara-Mexico. m3m Monografía 3er Milenio, 4: 1-242 p.
- Hering, D., R. Johnson, S. Kramm, S. Schmutz, K. Szoszkiewicz y P. Verdonshot. 2006. Assessment of European streams with diatoms, macrophytes, macroinvertebrates and fish: a comparative metric-based analysis of organism response to stress. Freshwater Biology 51: 1757-1785.
- Henao, A.M., 1987. "El disco Secchi y el estado trófico". AINSA, 7

- Hernandez, S. 2012. Indicadores biológicos de calidad de las aguas superficiales de la subcuenca del Río Viejo, utilizando Fitobentos (Diatomeas). Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, CIRA/UNAN-Managua.
- Hill, B., A. Herlhy, P. Kaufmann, R. Stevenson, F. McCormick y C. Johnson. 2000. Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. *Journal of North American Benthological Society* 19: 50-67.
- Hillebrand, H. 1983. Development and dynamics of floating clusters of filamentous algae. In *Periphyton of Freshwater Ecosystems* (Wetzel, R. G., editor), 31-39. Dr W. Junk, The Hague.
- Hutchinson, A. 1988. *Treatise on Limnology*. New York: John Wiley & Sons, INC. Vol. 2. 1115 p.
- Hutchinson, A. 1988. *A Treatise on Limnology*. New York. John Wiley & Sons, Inc. Vol. 1, 2.
- Hynes, H. 1972. *The Ecology of Running Waters*. Ontario, Liverpool University Press.
- Iannacone J., Alvaríño L., Moreno R., Reyes M. & Chauca J. 2000. Culícidos (Diptera) del río Chillón y sectores adyacentes de la provincia constitucional del Callao, Perú, durante el Niño 1997-1998. *Acta entomológica chilena*. 24: 51-60.
- James, A. *et al.* 1979. *Biological Indicators of Water Quality*. Great Britain. John Wiley and Sons. 9.1- 9.19 p
- Kendall, M. G. 1975. *Multivariate Analysis*, New York, Hafner Press
- Kelly, M. Bennion, H. Cox, E. Gold-smith, J. Jamieson, D. Juggins, S. Mann, D. Telford, J. 2005. *Common fresh-water diatoms of Britain and Ireland: an interactive key (electronic publication)*. Retrieved from the Environment Agency, Bristol, England, United Kingdom: <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/index.html>.
- Kikkawa, J. 1990. Biological diversity of tropical forest ecosystems. En: IUFRO, IX World Congress. Montreal. Vol. B: 173-184p.
- Kononen, K. 2001. Eutrophication, Harmful Algal Blooms and Species Diversity in phytoplankton Communities: Examples from the Baltic Sea. *A Journal of the Human Environment*. Vol. XXIX, number 4-5.
- Kshirsagar A.D. 2013. Bioremediation of wastewater by using microalgae: an experimental study. *International Journal of Life Science Biotechnology and Pharma Research*. 2(3): 339-346
- Lande, R. 1996. Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *Oikos*, 76: 5-13.
- Lane, C. Brown, M. 2007. Diatoms as indicators of isolated herbaceous wetland condition in Florida, USA. *Ecological Indicators*, 7: 521-540.
- Licursi M. & Gómez N. 2003. Aplicación de índices bióticos en la evaluación de la calidad del agua en sistemas lóticos de la llanura Pampeana Argentina a partir del empleo de diatomeas. *Biología Acuática*. 21: 31-49

Lima, S. et al. 2000. Fitoplancton como indicador de contaminación en el Lago de Amatitlán durante la época lluviosa (mayo-julio). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Linares, E. Olofsson, L. Sánchez, P. 2007. Comunidades de diatomeas epipélicas en las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada (Granada, España). Departamento de Botánica. Universidad de Granada. *Limnética* 26 (1): 99-113.

Llorente, B. J., J. J. Morrone. 2001. Introducción a la Biogeografía en Latinoamérica: Teorías, concepto, métodos y aplicaciones. Facultad de Ciencia. U.N.A.M. México D.F.

Loaiza, A. Ramírez, R. Echenique, O. Vallejo, A & Ortiz, M. 2011. Dinámica espaciotemporal de cuatro especies de *Staurastrum* (Meyen 1829, emend. Ralfs 1848). *Oecologia Australis* 15: 726-746, 2011 15: 726-746. doi:10.4257/oeco.2011.1503.22

Lobo E.A., Callegaro V.L.M., Hermany G., Bes D., Wetzel C.A. & Oliveira M.A. 2004. Use of epilithic diatoms as bioindicators for lotic systems in southern Brazil, with special emphasis on eutrophication. *Acta Limnologica Brasiliensia*. 16: 25-40

Lobo E.A., Katoh K. & Aruga Y. 1995. Response of epilithic diatom assemblages to water pollution in rivers in the Tokyo Metropolitan área, Japan. *Freshwater Biology*. 34: 191-204.

López, E. Serna, J. 1999. Variación estacional del zooplancton del embalse Ignacio Allende, Guanajuato, México y su relación con el fitoplancton y factores ambientales *Revista de Biología Tropical*, 47, pp. 643-657

López Fuerte, F.O., y M.C. Altamirano Cerecedo, 2011. Diatomeas bentónicas de los oasis de Baja California Sur. Informe final snib-conabio, proyecto núm. HJ032, Universidad Autónoma de Baja California Sur

Lowe, R. L. 1974. Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms. EPA-670/4-74-007, 340 pp.

Luján, A. 2000. Las algas, indicadores de la calidad del agua. Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas/ Depto. de Ciencias Naturales.

Lynch, J.M. y N.J. Poole. 1979. *Microbial ecology: a conceptual approach*. Blackwell Scientific Publications.

Magurran, A. E. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, New Jersey, 179 pp.

Manahan, S. E., 1991. *Environmental Chemistry*, 5a. ed. Lewis Pub

Martínez de Bascaran, G, 1976. "El índice de calidad del agua", *Ingeniería Química*: 45 - 49.

Martínez de Fabricius, A. Maidana, N. Gómez, N. Sabater, S. 2003. Distribution patterns of benthic diatoms in a Pampean river exposed to seasonal floods: the Cuarto River (Argentina). *Biodiversity and Conservation* 12: 2443–2454, 2003.

Matthews, R. A., Mattheus, G B. and Ehinger, W.J., 1991. "Classification and ordination of limnological data: a comparison of analitical tools", *Ecol. Model*, 53: 167-187.

McCormick, P. & Stevenson, R., 1998. Periphyton as a tool for ecological assessment and management in the Florida Everglades. *Journal of Phycology* 34: 726-733

McIntire, C., 1975. Periphyton assemblages in laboratory streams. Pp: 403-430. En: Whitton, B. A. *River Ecology*. Oxford: Blackwell Sci. Publ.

Medina J., Piña V., Nieves S., Arzola G. & Guerrero I. 2012. La importancia de las microalgas. *CONABIO. Biodiversitas*. 103: 1-5.

Meza, A. Rubio, J. Días, L. Walteros, J. 2012. Calidad de agua y composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del río Chinchiná. Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.

Ministerio de Ambiente. 2014. Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú / Departamento de Limnología, Departamento de Ictiología – Lima. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural.

Metcalf y Heddy. 1985. *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. 3° ed. México: MC Graw Hill, 1985. v.2, p. 59-102

Meybeck M., Friedrich G., Thomas R. & Chapman D. 1992. Rivers. En D. Chapman (ed.). *Water Quality Assessments: a guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (pp. 239-316). Londres: Chapman & Hall.

Mochini-Carlos, V. 1999. Importância, estrutura e dinâmica da comunidade perifítica nos ecossistemas aquáticos continentais. Em: POMPÊO, M. L. M. (Ed.). *Perspectivas da Limnologia no Brasil*, São Luís: Gráfica e Editora União, 198 pp.

Mora, D. Carmona, J. Cantoral, E. 2015. Diatomeas epilíticas de la cuenca alta del río Laja, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. Volumen 86, Issue 4. Pag 1024-1040

Morales, M. Otero, J. Van der Hammen, T. Torres, A. Cadena, C. Pedraza, C. Rodríguez, N. Franco, J. Betancourth, E. Posada, E. Cárdenas, L. 2007. *Atlas de los páramos de Colombia*. Instituto de investigaciones de recursos biológicos Alexander Von Humboldt, Colombia.

Morales, S. Salazar, M. 2012. Diatomeas perifíticas de lagos con diferente estado trófico en el departamento del Cauca (Colombia).

Moreno, Y. y Aguirre R. 2013. Estado del arte del conocimiento sobre perifiton en Colombia. *Revista Gestión y Ambiente* 16 (3): 91-117

Moreira, J. 1988. *Produtividade primaria do periphyton em viveiros destinados a piscicultura*. Dissertação do Mestrado, Univ. Federal de Bahia, Bahia, Brasil. 250 pp

Moreno, C. E. 2001. *Métodos para medir la biodiversidad*. M&T –Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, UNESCO. GORFI (ed.). Zaragoza.

Moreno, C. E. & G. Halffter. 2001. On the measure of sampling effort used in species accumulation curves. *Zaragoza. J. Appl. Ecol.* 38:487-490 p

Moscoso, W. 2016. Análisis de la composición de la flora vascular en el área de influencia de la mina El Santuario, municipio de Tausa Cundinamarca. Facultad de Ciencias. Biología. Universidad El Bosque. Bogota, Colombia.

Nieder, J., S. Engwald & W. Barthlott. 1999. Patterns of Neotropical Epiphyte Diversity. *Selbyana* 20(1): 66-75 P.

Oleoducto de Colombia -Ecopetrol ICP, 1993. "Estudio de línea base. Componentes biológicos y fisicoquímicos de los ecosistemas acuáticos", *Biología Aplicada, Ecology*, Alberto Ramírez.

Oliveira-Martins, F. 2006. Respostas ecofisiológicas da comunidade perifítica in situ a diferentes condições ambientais no Rio Santa da Vitória, Es. Tesis doctoral. Universidade Federal Do Espírito Santo. 134 pp.

Pan, Y., R. Stevenson, P. Vaithyanathan, J. Slate y C. Richardson. 2000. Changes in algal assemblages along observed and experimental phosphorus gradients in a subtropical wetland, USA. *Freshwater Biology*44: 339-353.

Patrick, R. Reimer, C. 1966. Diatoms of the United States. Vol. I. Monograph 13, Acad. Nat. Sci. Philadelphia.

Pedrozo, F. Díaz, M. Temporetti, P., Baffico, G. & Beamud, S. 2010.- Características limnológicas de un sistema ácido: Río Agrio-Lago Caviahue, Provincia del Neuquén, Argentina. *Ecología Austral*, 20: 173-184.

Peet, R.K. 1974. The measurement of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*,5: 285-307.

Peinador, M. 1999. Las Cianobacterias como indicadores de contaminación orgánica. Costa Rica. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

Peña E.J., Palacios M.L. & Ospina-Álvarez N. 2005. Algas como indicadoras de contaminación. Cali: Universidad del Valle

Pinilla G.A. 1998. Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Compilación bibliográfica. Colombia: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Pouličková, A., P. Hašler, M. Lysáková y B. Spear. 2008. The ecology of freshwater epipellic algae: an update. *Phycologia* 47 (5): 437-450

Prassana, R. Ramesh, K. Sood, A. Prasanna, B. Singh, P. 2006. Morphological, physiochemical and molecular characterization of *Anabaena* strains. Volume 161, Issue 3, 3 July 2006, Pages 187-202.

Ramírez, A. Restrepo, R. Viña, G. 1997. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. formulaciones y aplicación. C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro vol.1 no.3 Bucaramanga Jan./Dec.

Ramírez, A, 1988. "Lincamientos y estadísticas para estudios biológicos de impacto ambiental", Contrato 64/87 Inderena, Colombia, 455 p

Ramírez, G. Viña, V. 1998. Limnología Colombiana. Aportes a su conocimiento y Estadísticas de Análisis. Edición: BP Exploration Company Ltd. p: 45-75

RAMSAR.1999. La convención sobre los Humedales. Marco para evaluar el riesgo en Humedales.

Rivas A. W., Gómez R. E. & Monterrosa A. J. 2010. Consideraciones generales para el estudio y monitoreo de diatomeas en los principales ríos de El Salvador. En Sermeño, J.M. & M. Springer (eds.). Formulación de una guía metodológica estandarizada para determinar la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando insectos acuáticos [Proyecto Universidad de El Salvador (UES) - Organización de los Estados Americanos (OEA)]. San Salvador: Universidad de El Salvador.

Rodríguez, A. Triana, F. 2006. Evaluación del pH en el cultivo de *Spirulina* bajo condiciones de laboratorio. Tesis de Pregrado. Facultad de Ciencias. Universidad Javeriana. Bogotá.

Rodriguez, L. Bicudo, D. Moschini, C. 2003a. O papel do perifiton em áreas alagáveis e nos diagnósticos ambientais.Pp: 211-229. En: Thomaz, S. M. y L. M. Bini. (Eds.). Ecología e Manejo de Macrófitas Aquáticas. Eduem, Maringá.

Rodrigues, L. Leandrini, A. Fonseca-Arnaldo, I. Granja-Russo, D y Algarte, V. 2003b. Algas perifíticas- Componentes bióticos. Maringá-PR. Disponible en http://www.peld.uem.br/Relat2003/pdf/algas_perifiticas.pdf. Fecha de acceso: 17 de julio de 2010.

Rodríguez, M. 2015. Determinación de plancton en la laguna el pino, Barberena, Santa rosa. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Rodríguez, M. Bustamante, M. Ruibal, A. Ruíz, M. & Busso, F. 2008. Estudio del fitoplancton en el marco de monitoreo del Embalse San Roque (Cba). IV Congreso Argentino de Limnología. San Carlos de Bariloche.

Rodrigues, L., J. Zanon, L. Carapurnala y S. Biolo. 2008. Perifiton en A Planície Alagável do Rio Paraná: estrutura e Processo Ambiental. Disponible en <http://www.peld.uem.br/Relat2008/pdf/Capitulo04.pdf>. Fecha de acceso: 17 de julio de 2010

Roldán, G. 2003. La bioindicacion de la calidad del agua en Colombia. Editorial. Universidad de Antioquia, Medellín. 170p

Roldan, G., 1992. Fundamentos de limnología neotropical, Medellín. Ed. Universidad de Antioquia.

Roldán, P. y J. Ramírez. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Segunda Edición. Universidad de Antioquia, Medellín. 440 pp.

Roset J., Aguayo S. & Muñoz M.J. 2001. Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. Revista de Toxicología. 18: 65-71.

Ruiz, J. 2007. Servicios ambientales, agua y economía. Revista de Ingeniería. No. 26. Universidad de los Andes. Colombia.

Saavedra, V. 2015. Características bióticas, fisicoquímicas y calidad de agua del nacimiento de la Quebrada El Santuario, municipio de Tausa, Cundinamarca. Grupo de Investigación en Biología. Universidad El Bosque. Bogotá.

Sánchez de fuentes, J. 2001. V-100 - El fosforo, parámetro crítico de calidad de agua técnicas analíticas y de muestreo. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.

Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, 1a edición, CNA, México, 2007

Sigler, A. Bauder, J. 2012. Nitrato y Nitrito. Universidad Estatal de Montana Programa de Extensión en Calidad del Agua Departamento de Recursos de la Tierra y Ciencias Ambientales.

Sigler, A. Bauder, J. 2015. Alcalinidad, pH y Sólidos disueltos Totales. Universidad Estatal de Montana. Programa de Extensión en calidad del agua. Departamento de recursos de la tierra y ciencias ambientales.

Silva-Oliveira, C. 2007. Caracterização da comunidade de algas perifíticas em estação de tratamento de água pela técnica de substrato artificial: estudo de caso Eta São Sebastião, Cuiabá-MT. Tese do Maestrado. Universidade Federal de Mato Grosso. 68 pp.

Simons, J. 1987. Spirogyra species and accompanying algae from dune waters in the Netherlands. Acta Bot. Neerl. 36: 13-31.

Sládecková, A., 1991. The role of periphyton in water supply. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie 24: 2174-2178.

Sládecková, A., 1962. Limnological investigation methods for the periphyton ("Aufwuchs") community. Bot. Rev. 28 (2): 286-350.

Soler A., Pérez M. I., Aguilar E. & Villarreal I. 2012. Diatomeas del Canal de Panamá: Bioindicadores y otros estudios pioneros. Panamá: Universidad de Panamá

Sonco, R. 2013. Estudio de la diversidad alfa (α) y beta (β) en tres localidades de un bosque montano en la región de Madidi, La Paz-Bolivia. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía. Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.

Stevenson, R. 1996. The stimulation and drag of current. Pp: 321-336. En: Stevenson, J., Bothwell, M. y Lowe, R. (Eds.). Algal ecology: freshwater benthic ecosystem. Academic Press, California, USA.

Sugg, D. 1996. Measuring Biodiversity. State University of New York at Geneseo. Braak, C.J. F. 1987. Ordination. 91-173p. En: R. H. G. Jongman, C. J. F. ter Braak & O. F. R. van Tongeren (eds.). Data Analysis in Community and Landscape Ecology. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Pudoc, Wageningen.

Terrel C. & Bytnar P. 1996. Water quality indicators guide. Kendall/Hunt publishing company, Dubuque.

Torres, P., Cruz, C., Patiño, P. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica., Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, Vol. 8, #15 especial, ISSN 1692 – 3324, Medellín, Colombia pp. 81 –94

Vallejo, A. Arandas/a, G. Concepto de la Diversidad, Niveles de importancia de la Biodiversidad. U.N.A.M. Colegio De Ciencias y Humanidades. México.

Velázquez M.M., Israde I. & Mendoza M. 2006. Uso de diatomeas para la evaluación de la calidad del agua del río Turbio, afluente del río Lerma, México. En Simposio “Ecología y Manejo de Ecosistemas Acuáticos en Michoacán”. Congreso Mexicano de Ecología, Morelia, Michoacán, México

Vélez, A. Lozano, S. Cáceres, K. 2016. Diversidad de fitoplancton como indicador de calidad de agua en la cuenca baja del río Lurín, lima, Perú. Ecología Aplicada, vol. 15 núm. 2. , pp. 69-79. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú

Villalobos, J. y Albéndiz, L. 2017. Control biológico de la contaminación del agua. Disponible en: <http://www.encuentros.uma.es/encuentros32/control.html>

Wan Maznah W.O. 2010. Perspectives on the Use of Algae as Biological Indicators for Monitoring and Protecting Aquatic Environments, with Special Reference to Malaysian Freshwater Ecosystems. Tropical Life Sciences Research. 21(2): 51-67

Watanabe, T. 1990. Perifíton: comparação de metodologias empregadas para caracterizar o nível de poluição das águas. Acta. Limnol. Brasil. 3:593-615.

Wetzel, R. 1981. Limnología. EdicionesOmega S.A. Barcelona

Wetzel, R. 1975. Limnology. New York. Saunders Company. 743 p.

Wetzel, R. 1983a. Opening remarks. Pp: 3-4. En: Wetzel, R., (Ed.). Periphyton of freshwater ecosystems. Proceedings of the First International Workshop on Periphyton of Freshwater Ecosystems held in Vaxjo, Sweden, 14-17 September 1982. Dr. W. Junk Publishers. The Netherlands.

Wetzel, R. 1983b. Attached algal-substrata interactions: fact, myth, and when and how? Pp: 207-215. En: Wetzel, R. (Ed.). Periphyton of freshwater ecosystems. Proceedings of the First International Workshop on Periphyton of Freshwater Ecosystems held in Vaxjo, Sweden, 14-17 September 1982. Dr. W. Junk Publishers. The Netherlands.

Whitton, B. y M. Kelly. 1995. Use of algae and other plants for monitoring rivers. Australian Journal of Ecology 20: 45-56.

Whittaker, R.H. 1972. Evolution and measurement of species diversity. Taxon21:213-251p