



SECCIONAL SOCORRO

“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE RÍOS DE COLOMBIA USANDO
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS”

ESTUDIANTE:

LUIS EDUARDO GUALDRÓN DURÁN

DIRECTOR:

Ing. FABIÁN LEONARDO YORY SANABRIA

Candidato a Doctor en Tecnologías de Información y Análisis de Decisiones

Programa de Especialización en GESTIÓN AMBIENTAL

Socorro, Diciembre de 2016

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	6
1.INTRODUCCIÓN	8
2.MARCO REFERENCIAL.....	9
2.1 EL RECURSO HÍDRICO.....	9
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA	10
2.3 IMPORTANCIA DEL RECURSO HÍDRICO	11
2.4 RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA	11
2.5 NATURALEZA DEL PROBLEMA	12
2.6 NORMATIVA COLOMBIANA REFERENTE A LA CALIDAD DE AGUA	14
2.7 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	15
2.8 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	17
2.9 BIOLOGÍA Y ECOLOGÍA DE LOS MACRO-INVERTEBRADOS ACUÁTICOS	17
2.10 RELACIÓN ENTRE FACTORES FISICOQUÍMICOS Y MACROFAUNA ACUÁTICA.....	18
2.11 ENFOQUE BIÓTICO.....	19
2.12 MÉTODO BMWP PARA COLOMBIA (BMWP/COL)	20
2.13 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA.....	20

2.14 MAPAS DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	21
3. METODOLOGÍA	21
3.1 RECOLECCIÓN DE DATOS	21
3.2 VARIABLES SELECCIONADAS	21
3.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	21
3.4 ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	23
4.1 TURBIEDAD.....	23
4.2 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	23
4.3 TEMPERATURA	24
4.4 CONDUCTIVIDAD	24
4.5 pH.....	24
4.6 NITRATO	25
4.7 FOSFATO	25
4.8 OXÍGENO DISUELTO	25
4.9 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	26
4.10 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	26
4.11 COLIFORMES TOTALES.....	26
4.12 COLIFORMES FECALES	26
4.13 BMPW/Col.....	27
4.14 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (IQA).....	27
5. CONCLUSIONES	28
6. BIBLIOGRAFÍA.....	31

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de los recursos hídricos superficiales por países.....	37
Tabla 2. Problemas de contaminación, sus efectos y variables asociadas con la calidad del agua.	37
Tabla 3. Estándares y criterios de calidad según la normativa Colombiana y otras fuentes....	38
Tabla 4. Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMPW/Col. de acuerdo a los valores originales de BMPW y ajustados por Roldán (2003) para Colombia. ..	39
Tabla 5. Clasificación de las aguas, significado ecológico de acuerdo al índice BMPW/Col con colores para representaciones cartográficas.	41
Tabla 6. Índice de calidad del agua adoptado por Sierra, (2014).....	42
Tabla 7. Factores de normalización propuestos por Sierra, (2011).....	43
Tabla 8. Normalización de las variables utilizadas en el cálculo de índice de calidad de agua (IQA).....	44

Tabla 9. Resultados estadísticos de las variables fisicoquímicas y microbiológicas analizadas.

..... 44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parámetros físicos relacionados con la calidad de agua. 45

Figura 2. Parámetros químicos relacionados con la calidad de agua. 45

Figura 3. Parámetros químicos relacionados con la calidad de agua. 46

Figura 4. Parámetros microbiológicos relacionados con la calidad de agua..... 46

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE RÍOS DE COLOMBIA USANDO
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS.**

**WATER QUALITY ASSESSMENT OF RIVERS FROM COLOMBIA USING
PHYSICOCHEMICAL AND BIOLOGICS PARAMETERS.**

Luis Eduardo Gualdrón Durán^{1,2}.

¹ Biólogo – Universidad Industrial de Santander. ² Especialista en Gestión Ambiental en formación – Universidad Libre Seccional Socorro. Correo: luis13eduardo@hotmail.com; Teléfono: 3178912897.

RESUMEN

Se analizaron las características físicas, químicas y microbiológicas (coliformes totales, coliformes fecales y macroinvertebrados acuáticos) de diversos ríos de Colombia y se determinó el índice de calidad de agua (IQA) de los ríos estudiados. Se encontraron altos niveles de turbiedad y sólidos disueltos totales (SDT) sugiriendo que el agua de los ríos de Colombia no posee condiciones óptimas para el crecimiento y la reproducción de diversos organismos acuáticos. Además, se encontraron altos niveles de coliformes fecales, asociado con la existencia de vertimientos de aguas residuales, indicando que gran parte del agua de los ríos de Colombia, no es apta para consumo humano. Además el índice de BMWP/Col. correspondió a aguas ligeramente contaminadas y el Índice de calidad de agua (IQA) sugirió un recurso hídrico altamente contaminado, existiendo congruencia entre los dos índices anteriormente mencionados y algunas variables fisicoquímicas y biológicas, que presentaron valores superiores a los permisibles establecidos por la normatividad Colombiana.

Palabras clave: ríos de Colombia, coliformes fecales, vertimientos residuales, consumo humano, índice BMWP/Col., calidad de agua, normatividad Colombiana.

ABSTRACT

The physical, chemical and microbiological characteristics (total coliforms, fecal coliforms and aquatic macroinvertebrates) of several rivers of Colombia were analyzed and determined the water quality index (WQI) of the studied rivers. High levels of turbidity and total dissolved solids (TDS) were found, suggesting that the water of the rivers from Colombia does not have optimum conditions for the growth and reproduction of diverse aquatic organisms. In addition, high levels of fecal coliforms were found, associated with the existence of wastewater discharges, indicating that most of the Colombian's rivers is not suitable for human consumption. Furthermore, the BMWP/Col index indicated slightly contaminated waters and the Water Quality Index (WQI) suggested a highly polluted water resource, existing relation between the two indexes mentioned above and some physicochemical and biological variables, which presented higher values than the permissible values established by Colombian regulations.

Keywords: rivers of Colombia, fecal coliforms, wastewater discharges, human consumption, BMWP/Col., water quality, Colombian regulations.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital representando el 70% de los seres vivos, actuando como elemento fundamental en procesos físicos, químicos y biológicos que permiten la vida en el planeta. Desde la revolución industrial, el recurso hídrico ha sufrido importantes alteraciones, debido a múltiples factores contribuyendo a la contaminación física, química y biológica del agua. Esto ha generado la alteración del paisaje, incremento de sedimentos en los sistemas hídricos, pérdida de resiliencia de cuencas hidrográficas y deforestación de bosques asociados a cuerpos de agua, viéndose alteradas las propiedades naturales del agua (Rondón, 2015).

Los ríos son sistemas naturales multifuncionales que poseen múltiples redes de drenaje con un elevado grado de heterogeneidad ambiental (Guevara, 2014). Esta alta complejidad, se debe a diversos agentes interactuantes como el clima, geomorfología, precipitación y sistemas de aguas superficiales y subterráneas (Meyer et al., 2007). Estos sistemas son elementos reguladores de tipo ecológico, paisajístico y territorial, siendo claves en la dinámica ambiental. A pesar de que Colombia posee un potencial hídrico tres veces mayor al promedio de los países suramericanos y seis veces mayor que la oferta hídrica específica promedio mundial (IDEAM, 2007), presenta serios problemas en la disponibilidad de agua de calidad en muchas regiones; en especial, aquellas zonas más pobladas. Esto se debe principalmente, a la contaminación, deforestación, erosión, pérdida de capacidad de retención y regulación del recurso hídrico, alterando drásticamente la biodiversidad y los ecosistemas que regulan directa e indirectamente la oferta hídrica (Samboni et al., 2007)

Esta difícil situación de la calidad de los ríos ha aumentado el interés general, a fin de determinar, los componentes que influyen en la estructura, composición y dinámica actual de las cuencas hidrográficas (Ocampo et al., 2013). Debido a la gran diversidad de factores que

influyen en esta dinámica, es necesario emplear múltiples metodologías que permitan diagnosticar el estado actual de las cuencas hidrográficas. La mayoría de los estudios, involucran parámetros fisicoquímicos; especialmente, las variables DBO₅, coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno. Estas dos primeras variables, reflejan diversas fuentes de contaminación orgánica, mientras que la última, expresa la respuesta ambiental frente a distintos tipos de polución (Castro et al., 2014). Sin embargo, se ha señalado la importancia de utilizar ciertos organismos como bioindicadores de la calidad de agua, debido a que estos organismos ocupan un hábitat que debe cumplir ciertas exigencias ambientales (Arroyo & Encalada, 2009). Por esta razón, la implementación de estudios que adoptan parámetros fisicoquímicos y biológicos permite generar conclusiones soportadas sobre la calidad de los cuerpos de agua (Hahn Vonhessberg et al., 2009; Gil , 2014).

Finalmente, el objetivo del presente documento es generar un consenso referente a los principales agentes causantes del deterioro de los cuerpos de agua mediante el análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos que aportan información relevante en la generación de índices de calidad (ICA), útil en la formulación de futuras políticas para la gestión del recurso hídrico.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 EL RECURSO HÍDRICO

La escasez de agua de calidad es un desafío crítico mundial que surge de la interacción sistémica entre el humano y el ambiente, donde factores condicionantes como: actividades productivas y/o extractivas, densidad poblacional, asentamientos humanos aledaños a cuerpos de agua; en conjunto, generan efectos graves en la disponibilidad espacio – temporal de la oferta hídrica, deteriorando las condiciones fisicoquímicas y biológicas del agua (Hahn Vonhessberg

et al., 2009). A pesar de la alta oferta hídrica Colombiana existen serios problemas de disponibilidad de agua de calidad en muchas regiones; en especial, aquellas zonas más pobladas. Algunos aspectos como: contaminación, deforestación, erosión, pérdida de la capacidad de retención y regulación hídrica, han alterado directa o indirectamente la oferta hídrica (Samboni et al., 2007). Diversos estudios señalan que aquellas zonas del territorio nacional sometidas a mayores presiones antrópicas, presentan cambios importantes en la cobertura vegetal y en el uso y manejo del suelo (Vásquez & Reinoso, 2012), viéndose alterado elementos particulares del perfil de los ríos (longitud desde el nacimiento hasta desembocadura), ocasionando drásticas alteraciones en la parte media y baja de las cuencas hidrográficas, en relación a las cabeceras de las mismas (Murtinho et al., 2013).

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA

Los cuerpos de agua presentan una estrecha interconexión, desde la atmósfera hasta los océanos mediante el ciclo hidrológico. Múltiples autores clasifican los cuerpos de agua en tres grupos:

Ríos: Son cuerpos de agua denominados corrientes que se caracterizan por presentar flujo unidireccional con velocidades que oscilan entre 0,1 y 1 m/s. Este flujo es altamente variable y está relacionado con las condiciones climáticas. Por esta razón, los ríos se consideran permanentemente mezclados y comúnmente, la calidad de agua se asocia al sentido del flujo (Sierra, 2011).

Lagos: Estos sistemas acuáticos presentan velocidades relativamente bajas que oscilan entre 0.01 y 0.001 m/s. Debido a esto, el agua permanece durante varios años en el sistema y la calidad del agua está determinada por el estado trófico y los períodos de estratificación (de Costa Rica, 2007).

Aguas subterráneas: En este sistema el régimen de flujo es relativamente estable con respecto a la velocidad y dirección. El flujo presenta velocidades entre 10^{-10} y 10^{-3} m/s, estando regido por la porosidad y la permeabilidad del estrato (Dukatz & Ferrati, 2007) .

Se hace mención de los tres sistemas acuáticos. Sin embargo, el presente trabajo aborda exclusivamente la calidad de agua de los ríos de Colombia.

2.3 IMPORTANCIA DEL RECURSO HÍDRICO

El agua es fundamental para la existencia y el mantenimiento de la vida, existiendo una relación directa entre el desarrollo social y la demanda del recurso. A lo largo de la historia, las comunidades han buscado asentarse cerca de las fuentes de agua y esto ha contribuido a la contaminación gradual, generando múltiples epidemias que han diezmado ciudades enteras en la antigüedad (Elosegi, 2009). A medida que la humanidad continuó su desarrollo, las descargas de aguas domésticas residuales e industriales comenzaron a contaminar los cuerpos de agua, deteriorando los ecosistemas acuáticos y los suelos cercanos (Sierra Ramírez, 2011).

2.4 RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA

Colombia se encuentra entre los países más ricos del mundo en recursos hídricos ubicándose en la séptima posición, después de China con una disponibilidad de $2.132 \text{ km}^3/\text{año}$ (Tabla 1). En el país existen cuatro vertientes principales: Caribe, Pacífico, Orinoco y Amazonas. Cerca del 70% de la población está asentada en las vertientes del Caribe, siendo los ríos Cauca y Magdalena, los más representativos. Esta situación ha conllevado a que estos ríos sean las dos arterias fluviales más importantes del país, y por ende, estén recibiendo de forma directa e indirecta las aguas residuales, prácticamente sin tratar de casi 15 millones de personas (Meyer et al., 2007). Además, la erosión intensa de esta vertiente arrastra gran cantidad de sedimentos,

afectando los usos tradicionales de ambos ríos, cuyas cuencas (Cauca y Magdalena) tienen un área aproximada de 273.300 km² y en éstas se ubican cerca de 637 municipios (Sierra, 2011).

En las vertientes del Orinoco y el Amazonas se encuentran los ríos más caudalosos del país, pero afortunadamente, estos se encuentran prácticamente en su estado natural. Por esta razón, varios autores señalan la importancia de hacer un uso responsable del recurso hídrico, garantizando suministros adecuados de cantidad y calidad del agua a las próximas generaciones (Sierra, 2011; Klinger, 2013; Murtinho et al., 2013).

2.5 NATURALEZA DEL PROBLEMA

El problema actual de la calidad de agua se deriva principalmente por las descargas de residuos resultantes de actividades humanas que interfiere con el uso deseable del agua. Uno de los agentes más contaminantes del agua destinada para consumo es el arsénico (As). Este mineral está asociado no sólo a actividades extractivas, sino también a condiciones geológicas e hidrogeológicas (INGEOMINAS, 2004). La contaminación de cuerpos de agua en Colombia se debe a factores naturales y antropogénicos, que afectan principalmente a los departamentos de Tolima y Caldas, localizados en la Cordillera Central; así como, al departamento de Nariño ubicado en la Cordillera Occidental, correspondientes a áreas de volcanismo Neo – Terciarias (Nicolli, 2008). Desde el año 2001 y 20003, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, siglas en inglés) y la Organización Mundial de la Salud (WHO, siglas en inglés) recomendaron un nivel máximo permisible de arsénico de 10 µg/L en agua potable (US-EPA, 2001; WHO, 2003, respectivamente). En Colombia, en el año 2007 (Ministerio de Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007) se estableció los niveles máximos de arsénico en agua de irrigación (0.1 mg/L) y en agua potable para ganado (0.2 mg/L). En muchas áreas del país, el recurso hídrico destino para consumo se

encuentra altamente contaminado por arsénico, debido a deficiencias en los sistemas de acueducto y/o carencia de agua superficial (Callejas, 2007). En Vetas – California (Departamento de Santander) los minerales sulfurados presentes en estas áreas, así como los suelos y sedimentos contienen elevadas concentraciones de arsénico que afecta drásticamente el recurso hídrico de la zona destinado para el consumo humano (Ángel, 2012). De forma similar, estudios realizados en el noroccidente del Departamento de Caldas (Bundschuh et al., 2012) reportaron altos niveles de arsénico en los sedimentos de los ríos cuya variación fue estacional (época seca, 10 – 850 mg/kg; época húmeda, 440 – 1400 mg/kg). Sin embargo, la información referente a la contaminación por arsénico en los cuerpos de agua es escasa, siendo difícil valorar realmente la magnitud de este agente contaminante (Alonso et al., 2014).

Otro factor que ha disminuido la calidad de los cuerpos de agua es la minería de oro artesanal. Estudios han demostrado que la explotación aerífera, es el principal contribuyente de polución de agua por mercurio (Heim et al., 2007). Colombia posee la tasa de polución per capita por mercurio más alta del mundo, viéndose afectadas grandes zonas; principalmente, el Sur de Bolívar y el Noreste de Antioquía (Cordy et al., 2011). En estas zonas se han reportado múltiples afectaciones de los peces de la zona, así como de especies terrestre que beben de estos afluentes (Marrugo et al., 2008).

Los vertimientos de lixiviados y subproductos derivados de procesos industriales, han afectado seriamente a diversos ríos de Colombia (Ramos et al., 2008; Coutinho et al., 2009; García et al., 2010). En estos casos, la acción correctiva ha sido el montaje de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), siendo medidas bastante ineficientes (Triana, 2007). Además, en Colombia el uso de agroquímicos utilizados en la agricultura, generalmente compuestos con elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo han contribuido a la

eutrofización ecosistémica ocasionando una disminución de oxígeno disuelto y generando ciertas especies resistentes a estas sustancias (Forero et al., 2013). Lo anterior se evidenció en el río Sinú (Departamento de Córdoba) donde el uso intensivo de fertilizantes fosfatados y a base de calcio ha generado altas concentraciones de metales pesados (Cu, Ni, Cr y Zn) en los sedimentos; especialmente, en las llanuras aluviales con respecto a otras áreas de la cuenca. De forma similar, se reportaron altas concentraciones de hierro (Fe), plomo (Pb) y cromo (Cr) asociado a cuerpos de agua de la cuenca del río Bogotá (Rodríguez et al., 2009).

Finalmente, estudios basados en hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs, siglas en inglés) demostraron altas concentraciones en agua y sedimentos del río Cauca, siendo de gran interés debido a que son compuestos cancerígenos y agentes teratológicos (Sarria et al., 2016). De manera complementaria, se presenta resumidamente los problemas de contaminación reportados en la literatura (Tabla 2).

2.6 NORMATIVA COLOMBIANA REFERENTE A LA CALIDAD DE AGUA

Inicialmente, el Decreto 2811 de 1974 referente al código de Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio ambiente en el artículo 3 hace referencia a la terminología asociada con la preservación, manejo y cuidado del medio ambiente. Esta normativa en el título II del libro XII enfatiza en el manejo de áreas especiales, entre estas: cuencas hidrográficas, áreas donde se desarrollen actividades que involucren el uso y conservación del suelo y áreas destinadas a la recreación. Actualmente, las normas vigentes en Colombia para la calidad del agua para consumo están reguladas por la resolución 2115 de 2007 emitida por el Ministerio de la Protección Social. La tabla 3 presenta los datos de los límites permisibles de las variables fisicoquímicas y microbiológicas para la calidad de agua potable en Colombia.

2.7 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Entre las variables fisicoquímicas, se identifican la temperatura, el color, la turbiedad, la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), presencia de nitratos, sulfatos y fosfatos, metales pesados, oxígeno disuelto, el pH y la conductividad. Sin embargo, sólo se hará referencia de las variables fisicoquímicas evaluadas en el presente trabajo. Estas variables son de gran importancia para los ecosistemas acuáticos debido a que son indicativos de la composición y dinámica de los agentes contaminantes y contribuyen en la evaluación de la calidad de agua de los cuerpos loticos (Pérez & Restrepo, 2008).

La **temperatura** es una de las variables más significativas en los cuerpos de agua, sirviendo de indicativo de la estabilidad ecológica del sistema. Además, las variaciones de este parámetro generan un cambio en el ambiente de desarrollo de la fauna y flora presentes en los cuerpos de agua; elevando el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua (Pérez & Restrepo, 2008).

La **turbiedad** es el grado de opacidad en el agua debido a la presencia de material particulado en suspensión. La concentración de sustancias determina la transparencia del agua debido a que limita el paso de luz. Algunas actividades como: construcciones de carreteras, canteras, minería; dejan el suelo expuesto a la erosión, permitiendo que por escorrentía se altere este parámetro en ríos (Pérez & Restrepo, 2008).

El **pH** es un indicativo del grado de acidez, basicidad y alcalinidad del agua. Además, este parámetro origina variación en la composición de la fauna y flora de los cuerpos de agua e influye en el grado de toxicidad de ciertos compuestos, como el amoníaco, metales pesados, hidrógeno sulfurado, entre otros (Pérez & Restrepo, 2008).

La **conductividad** indica la presencia de sales ionizadas, como cloruros o iones de sodio, carbonatos, etc. Además, este parámetro permite relacionar e interpretar resultados con los sólidos disueltos en las descargas o cuerpos de agua (Sierra, 2011)

Los **sólidos totales disueltos** indica la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico e inorgánico. Con los sólidos se puede establecer relaciones con otros parámetros como la DQO y la DBO, generando resultados más acertados (Sierra, 2011).

El **nitrito** es un parámetro que indica la descomposición de materia orgánica animal y/o vegetal, generando metahemoglobina (color azul de la piel) en los infantes alimentados con leche preparada, debido a que los nitratos se reducen a nitritos dentro del sistema digestivo de los niños (Pérez & Restrepo, 2008).

El **fosfato** es un indicador de la cantidad de detergentes sintéticos vertidos a una corriente, debido a que estos poseen entre 12 y 13% de fósforo en sus formulaciones. Además, este parámetro es fundamental al contribuir en procesos de eutroficación en los cuerpos de agua (Sierra, 2011).

El **oxígeno disuelto** indica la cantidad de oxígeno disuelto disponible en los cuerpos de agua. Este parámetro da un indicativo de la contaminación del agua y del soporte que está puede dar para el crecimiento y reproducción animal y vegetal. Generalmente, altos niveles de agua indican una alta tasa fotosintética, principalmente de las plantas acuáticas. Factores como: alta intensidad lumínica, así como mayor turbulencia del cuerpo de agua pueden aumentar los niveles de oxígeno disuelto (Valencia, 2011).

La **demanda bioquímica de oxígeno en cinco días** (DBO₅) es un indicativo de la carga polucional que pueden generar los desechos domésticos e industriales de carácter orgánico al ser descargado en corrientes de agua en las que existen condiciones aeróbicas. Generalmente, se

determina la demanda a los cinco (5) días y mediante ecuaciones de cinética bacteriana se extrapolan los resultados a los 20 días, para obtenerlos más rápidamente (Sierra, 2011)

La **demanda química de oxígeno (DQO)** determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de un agente oxidante, temperatura y tiempo (Sierra, 2011).

2.8 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

Las aguas crudas pueden tener una gran variedad de microorganismos, algunos de estos son patógenos y otros no patógenos. Por patógenos se entienden aquellos organismos con la capacidad de causar enfermedades a los seres vivos mientras que los no patógenos no generan efectos en la salud humana o animal. Los microorganismos más importantes que se encuentran en el agua y que tienen potencial patógeno son las bacterias, virus, algas, hongos y algunos protozoos.

Los **coliformes totales** se utilizan para identificar posibles cambios en la localidad biológica del agua, indicando que el cuerpo de agua ha sido contaminado con materia orgánica de origen fecal, tanto animal como humana, viéndose acelerada la productividad primaria de los cuerpos loticos (Letterman, 2002; Sierra, 2011) .

Los **coliformes fecales** son un grupo de bacterias representado por las familias de las enterobacterias que han sido utilizadas como indicador idóneo para el agua potable. Dentro de este grupo, se destacan bacterias aeróbicas y anaeróbicas facultativas; aunque el mayor representante es la bacteria *Escherichia coli*, distinguiéndose por su facilidad de crecer a elevadas temperaturas y por la capacidad de producir la enzima glucoronidasa (Valencia, 2011).

2.9 BIOLOGÍA Y ECOLOGÍA DE LOS MACRO-INVERTEBRADOS ACUÁTICOS

Los macroinvertebrados son organismos generalmente bentónicos (organismos de aguas profundas), los cuales se subdividen en tres tipos: 1) el neuston, incluyen aquellos organismos que viven sobre las superficies de agua, 2) el neuston, compuestos por todos aquellos individuos que nada libremente en el agua y 3) el bentos, se refiere a aquellos organismos que viven en el fondo de ríos y lagos, adheridos a rocas, troncos, restos materia vegetal y sustratos similares (Roldán, 2003).

Muchos organismos de las familias Trichoptera, Plecóptera, Cristacea y algunos dípteros y coleópteros, consumen materia orgánica particulada gruesa no leñosa. Algunos de estos son filtradores, consumiendo principalmente materia orgánica fina, microbiota y perifiton. Además, algunos de estos son depredadores, pueden consumir macrofitas por perforación de tallo y hojas o presas animales como el caso de algunos plecópteros, tricópteros y coleópteros (Gil, 2014).

Algunos factores como la disponibilidad de oxígeno son determinantes para el desarrollo de los macroinvertebrados. Así, el aumento de materia orgánica en el agua produce una proliferación de microorganismos encargados de su descomposición, generando una reducción de la concentración de oxígeno disuelto en el agua y un aumento de la concentración de nutrientes inorgánicos, como el amonio y el fosfato (Gil, 2014). La mayoría de estos invertebrados son sensibles a la reducción de oxígeno disuelto, viéndose afectada su abundancia. Por el contrario, otros grupos toleran bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Estos grupos presentan una serie de modificaciones morfológicas que les permite vivir en condiciones de anoxia, siendo capaces de fijar oxígeno a muy baja concentración o incluso obtener energía mediante fermentación anaerobia (Hoback & Stanley, 2001, Tabla 4).

2.10 RELACIÓN ENTRE FACTORES FISICOQUÍMICOS Y MACROFAUNA ACUÁTICA

La composición química del agua está relacionada con la capacidad que tiene esta de mantener elementos y sustancias en solución, importantes para el desarrollo de la microbiota (Gil, 2014). Los parámetros fisicoquímicos del agua determinados por factores ambientales influyen de manera directa en la diversidad de las comunidades de los macroinvertebrados. Algunos factores como la profundidad, pH, alcalinidad, dureza, iones de calcio, materia orgánica, contaminantes de tipo industrial y doméstico, determinando la abundancia relativa de las comunidades (Paukert & Willis, 2003; Dügel & Kazanci, 2004). La turbiedad, el color y los sólidos suspendidos afectan a los organismos que requieren directamente de las plantas para su alimentación debido a que estos reducen la entrada de los rayos solares suprimiendo la producción primaria.

Por otro lado, existen otros factores que influyen directamente en las comunidades de macroinvertebrados acuáticos como la heterogeneidad de los hábitats, el tamaño del espejo de agua, el tipo de sustrato y el fitoplancton (Paukert & Willis, 2003).

2.11 ENFOQUE BIÓTICO

Algunos organismos indicadores suelen ser específicos para algún tipo de contaminación, permitiendo la valoración del estado ecológico de los ecosistemas acuáticos. De manera, que se asigna un valor numérico a los grupos de invertebrados de una muestra, en función del grado de tolerancia ante un tipo de contaminante. Aquellos individuos altamente tolerantes reciben un valor numérico menor y aquellos más sensibles un valor numérico mayor, la sumatoria de estos valores indica la calidad del ecosistema (Baddi et al., 2005). Para lograr implementar los índices bióticos, es fundamental realizar un inventario de las especies presentes en las muestras analizadas. Este análisis no sólo otorga claras ideas sobre el grado de contaminación de un

cuerpo de agua, sino también permite actualizar la información taxonómica de la fauna acuática, describiendo especies antes no conocidas (Gil, 2014).

2.12 MÉTODO BMWP PARA COLOMBIA (BMWP/COL)

Este análisis fue establecido en Inglaterra en 1970 y actualmente, se reconoce como un método sencillo y rápido para evaluar la calidad del agua usando los macroinvertebrados como indicadores (Tabla 5). La implementación del método solamente requiere la caracterización biológica de los organismos a nivel de familia mediante aspectos cualitativos (presencia o ausencia) y se asigna un puntaje que va de 1 a 10 de acuerdo al nivel de tolerancia de los diferentes grupos a la contaminación orgánica (Roldán, 2003).

Múltiples publicaciones recientes destacan el libro “Bioindicación de la calidad del agua en Colombia” que incluye una lista con los valores de indicación propuestos para las familias de macroinvertebrados reportados en ríos de Colombia (Roldán, 2003). Sin embargo, un estudio posterior realizó la adaptación al índice BMWP, evaluando la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia (Zamora, 2005). El presente trabajo, adopta los valores de indicación propuestos por Roldán, (2003) para Colombia (Tabla 5).

2.13 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA

El índice de calidad del agua (ICA) es un concepto relativo que depende del uso del sistema hídrico, calculado mediante la agrupación de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Sierra, 2011). Este índice consiste básicamente en una expresión matemática que agrupa múltiples variables, permitiendo tener una mejor interpretación del resultado. Este índice puede ser representado numéricamente, por un rango, una descripción, un símbolo o incluso un color, siendo una herramienta comunicativa útil para transmitir información (Universidad de Pamplona, 2006).

2.14 MAPAS DE LA CALIDAD DEL AGUA

Se distinguen cinco clases de calidad de aguas resultantes al sumar la puntuación obtenida para las familias encontradas en un ecosistema determinado. El total de los puntos se designan como valores BMWP/Col. Con base en el puntaje obtenido para cada situación se clasifican las aguas, asignándoles a cada una de ella un color determinado que indica la calidad de agua (Tabla 6).

3. METODOLOGÍA

3.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

Se realizó una amplia revisión bibliográfica sobre información reciente, referente a la calidad de agua de los ríos de Colombia. Fueron incluidos libros, tesis de grado, artículos científicos publicados en revistas nacionales e internacionales indexadas. Como criterio de selección bibliográfica se tuvo en cuenta: el año de publicación (superior al año 2006) y que la investigación aportará una considerable información referente a las variables utilizadas.

3.2 VARIABLES SELECCIONADAS

Después de seleccionados los artículos y libros que abordan la temática “Calidad de agua de ríos de Colombia”, se eligieron las variables fisicoquímicas y microbiológicas más representativas. Fueron seleccionadas cuatro variables físicas: turbiedad, sólidos disueltos totales (SDT), temperatura y conductividad. Además, fueron escogidas seis variables químicas: pH, nitrato, fosfato, oxígeno disuelto (O_2 disuelto), demanda biológica de oxígeno en cinco días (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO). Por último, se seleccionaron dos variables microbiológicas y una biológica: coliformes totales y coliformes fecales (CT y CF) y BMWP/Col., respectivamente.

3.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizó un análisis estadístico descriptivo (media, error estándar de la media, mínimo y máximo valor usando el paquete estadístico SPSS v 22.0 (SPSS, 2012). Considerando los datos obtenidos, a partir de las variables seleccionadas (físicoquímicas y microbiológicas), se realizaron gráficas de cajas y bigotes, denotando si están o no por encima de los límites permisibles según la normatividad Nacional. Además, se determinó la calidad de agua basado en el índice BMWP (Biological Monitoring Working Party) utilizando la asignación de valores para cada familia de macroinvertebrados propuesta para Colombia (Roldán, 2003).

3.4 ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA

Se determinó el índice de calidad de agua utilizando las siguientes variables físicoquímicas y microbiológicas: oxígeno disuelto (OD; mg/L), coliformes fecales (CF; UFC/100 ml), pH, demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO₅; mg/L), nitrato (NO₃; mg/L), fosfato (PO₄; mg/L), temperatura (°C), conductividad (µs/cm) y sólidos disueltos totales (SDT; mg/L).

Los parámetros que componen el índice fueron agrupados de la siguiente forma: término carga orgánica (DBO₅), término efecto recuperador (OD), término contaminación fecal (CT), término aspectos estéticos: (ST * Turbiedad), estas variables se juntan debido a que son dependientes, término nutrientes: NO₃ y PO₄, se analizan de formas separada porque a pesar de que ambos son nutrientes, son variables independientes. Se utilizó la siguiente expresión matemática para el cálculo de IQA:

$$IQA = a*(DBO_5) + b*(OD) + c*(CF) + d*(SDT*Turbiedad) + e*(NO_3) + f*(PO_4) + g*(pH) + h*(T \text{ } ^\circ C).$$
 Donde: $a + b + c + d + e + f + g + h = 10$. En el cálculo, se adopta el pesaje para cada variable utilizado por ICA (Morales, 1984). La ecuación para calcular el IQA con la adopción del pesaje tiene la siguiente forma:

$IQA = 1 * (DBO5) + 1,7 * (OD) + 1,5 * (CF) + 1,6 * (SDT * Turbiedad) + 1 * (NO3) + 1 * (PO4) + 1,2 * (pH) + 1 * (T \text{ } ^\circ C)$. Finalmente, cada una de las nueve variables utilizadas en el cálculo se le asignó números entre cero y uno (0 y 1); es decir, se normalizaron o indexaron los parámetros. Para ello, se utilizaron los factores de normalización propuestos por Rivas et al., (1998) y las funciones de calidad reportadas por Viña et al., (1997), respectivamente (Tablas 7 y 8).

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las características fisicoquímicas del agua se encontraron en algunos casos, relacionados con las condiciones geomorfológicas y las condiciones climáticas de las zonas evaluadas. Sin embargo, algunos estudios indicaron que los altos valores para algunas de las variables analizadas, se debe a diversas fuentes de contaminación.

4.1 TURBIEDAD

Los niveles de turbiedad presentaron valores bastante variables con respecto a la media. Estos valores en la mayoría de casos, estuvieron por encima de los 5 UNT (Unidades nefelométricas de turbiedad), valor indicado como máximo permisible por la normatividad Colombiana. El valor medio fue de 49,9 mg/L (Figura 1, Tabla 9), indicando que muchos ríos en Colombia presentan partículas en suspensión que reducen la transparencia del agua, efecto generado por procesos de arrastre como remoción de tierra y en otros casos, por vertimientos de tipo industrial y/o urbano. Algunos estudios señalan que la turbiedad y los sólidos suspendidos afectan directamente a los organismos, puesto que reduce su visibilidad; dificultando la alimentación y reduciendo la producción primaria de los organismos fotosintéticos (Roldán & Ramírez, 1992; Gil, 2014).

4.2 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

Los sólidos disueltos totales (SDT) presentaron un valor promedio de 189,8 mg/L (Figura 1, Tabla 3), estando muy por encima de los límites permisibles establecidos para calidad de agua referente a hábitat para peces, cuyo valor es de 100 mg/L (Sierra, 2011). Estas altas concentraciones afecta de manera directa la disponibilidad de oxígeno presente en los cuerpos de agua (Rebolledo M & Jiménez, 2012).

4.3 TEMPERATURA

La temperatura presentó un valor promedio de 22,5 °C (Figura 1, Tabla 9), indicando que los ríos de Colombia evaluados son cálidos, lo cual es propio de los bosques tropicales húmedos (Klinger, 2013). Además, este valor se encuentra dentro del rango óptimo (< 35 °C) establecido para la biota acuática (Sierra, 2011). Esta variable es de suma importancia debido a que en condiciones de alta temperatura, disminuye el oxígeno disuelto; aumentando la actividad bacteriana y la sensibilidad de la biota acuática a ciertos componentes tóxicos (IDEAM, 2007).

4.4 CONDUCTIVIDAD

La conductividad eléctrica presentó un valor promedio de 54,5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Figura 1, Tabla 9), bastante por debajo de lo establecido para la calidad de agua potable (2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$; Resolución 2115, 2007). Igualmente, el valor de conductividad reportado se encuentra dentro del rango establecido para ríos de montaña, el cual es de 30 – 60 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Pérez & Restrepo, 2008).

4.5 pH

El pH presentó un valor promedio normal de 7,2 (Figura 2, Tabla 9), estando dentro de los límites permisibles establecidos en la calidad de agua potable (6.5 – 9). Este criterio es fundamental debido a que puede originar alteraciones en la composición faunística y florística de los cuerpos de agua; así como un aumento de la influencia de ciertos compuestos tóxicos (Sierra, 2011).

4.6 NITRATO

Esta variable presentó un promedio de 3,13 mg/L (Figura 2, Tabla 9) encontrándose dentro de los límites definidos para la calidad de agua potable (10 mg/L). Esto indica que a pesar del alto uso de agroquímicos y a los vertimientos industriales y domésticos, los compuestos generalmente vertidos y/o filtrados no son ricos en nitrógeno. Sin embargo, algunos de los artículos analizados señalaron valores cercanos a los establecidos por la normativa Colombiana. Este criterio es fundamental debido a que en cuerpos de agua ricos en nitrógeno y/o fósforo, se produce eutrofización (acumulación de residuos orgánicos que genera la proliferación de ciertas algas reductoras de oxígeno).

4.7 FOSFATO

La concentración de fosfato tuvo un promedio de 0.69 mg/L (Figura 2, Tabla 9), siendo levemente superior a lo establecido en la normativa Colombiana (0,5 mg/L). Al parecer, factores como: materia orgánica proveniente de vegetación ribereña, descargas sólidas y líquidas de actividades domésticas y agrícolas (Forero et al., 2013; Gil, 2014) contribuyen a las concentraciones de fosfatos. Estudios anteriores señalan que el fosfato actúa como nutriente favoreciendo el alto crecimiento de algas, causando eutrofización.

4.8 OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno disuelto tuvo un valor promedio de 9,5 mg/L (Figura 3, Tabla 9), lo cual corresponde a un nivel adecuado para la vida acuática (calidad de agua para hábitat de peces establece que debe ser mayor a 4 mg/L). Este valor se asocia con los valores de nitrato (dentro de los límites permisibles) y fosfato (levemente superior a los límites establecidos). Como se indicó anteriormente, existe una alta relación entre las concentraciones de nitrato, fosfato y oxígeno disuelto. Algunos estudios señalan que niveles altos de los compuestos mencionados, generan

eutrofización; es decir, proliferación descontrolada de algas viéndose afectada las concentraciones de oxígeno disuelto en agua (IDEAM, 2007; Valencia, 2011; Klinger B, 2013).

4.9 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

La demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO₅) presentó un valor promedio de 6,7 mg/L (Figura 3, Tabla 9), estando dentro de los límites permisibles para fuentes que por tratamientos convencionales sirven para consumo humano (7 mg/L O₂, Decreto 1594 de 1984, Art. 38). De igual forma, esta variable está dentro del límite permisible para calidad de agua para hábitat de peces (Sierra, 2011). Lo anterior señala, que en general, los ríos analizados no tienen altos niveles de materia orgánica biodegradable.

4.10 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Esta variable presentó un valor promedio de 33,1 mg/L (Figura 3, Tabla 9) encontrándose dentro de los límites permisibles establecidos (75 mg/L) para hábitat de peces (Sierra, 2011). Los bajos niveles de DBO₅ reportados anteriormente, indican que la mayoría de la DQO se debe a materia no biodegradable, en algunos casos, relacionada con la geología de la región, tal como se ha señalado en otro estudio (Montoya et al., 2011).

4.11 COLIFORMES TOTALES

Esta variable presentó un valor promedio de 208,7 UFC (Unidades formadoras de colonia, Figura 4, Tabla 3), siendo inferior a lo sugerido para aguas con potencial para la biota acuática (450 UFC). De igual forma, la calidad de agua referente a coliformes totales cumple con lo dispuesto en la normativa Colombiana según el Decreto 1594 (20000 UFC).

4.12 COLIFORMES FECALES

Esta variable presentó un promedio de 118,6 UFC (Figura 4, Tabla 9), siendo superior a lo reportado por la normativa colombiana para agua potable (0 UFC). De forma similar, el agua con

potencial para hábitat de peces sugiere un valor de 10 UFC, estando bastante por encima del valor sugerido. Esto señala la existencia de vertimientos de aguas residuales, indicando que gran parte de los ríos de nuestro país no es apta para consumo humano.

4.13 BMPW/Col

Esta variable presentó un valor promedio de 76,1 (Figura 4, Tabla 9) correspondiendo a aguas ligeramente contaminadas de calidad aceptable (Clase II, Tabla 5), caracterizado por la presencia de familias como: Elmidae, Leptohiphidae, Naucoridae, Hydropsychidae y Hydroptilidae (Tabla 4). En estos sistemas hídricos las condiciones ecológicas de los sistemas pueden estar limitando el establecimiento de algunos organismos con requerimientos ecológicos más específicos, principalmente pertenecientes a las familias: Chironomidae, Empididae, Simuliidae, Baetidae (Tabla 4).

4.14 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (IQA)

Después de normalizar los valores de las variables incluidas se determinó el índice de calidad del agua:

$$IQA = 1 \cdot (0) + 1,7 \cdot (0,1) + 1,5 \cdot (0) + 1,6 \cdot (1 \cdot 0,3) + 1 \cdot (0,8) + 1 \cdot (0,9) + 1,2 \cdot (0,9) + 1 \cdot (0,9) = 4,33$$

Este valor corresponde a un recurso hídrico altamente contaminado, siendo congruente con lo reportado en las variables fisicoquímicas y biológicas, donde en varias de éstas, se encontraron valores superiores a los límites permisibles establecidos por la normatividad Colombia.

5. CONCLUSIONES

Los altos niveles de turbiedad de los ríos de Colombia no sólo son un indicativo de las condiciones geomorfológicas de nuestro país generados por procesos de arrastre, sino también señala a los vertimientos de tipo industrial y/o urbano como fuente contaminante, alterando la biota acuática.

Los sólidos disueltos totales presentaron valores muy superiores a lo permisible, indicando que la calidad de agua de los ríos es crítica y no presentan condiciones óptimas para el crecimiento y la reproducción de muchos organismos acuáticos. Esta problemática afecta algunos sectores económicos, como la pesquería y el turismo.

A pesar de que se ha señalado, un elevado número de vertimientos a los ríos de Colombia. La temperatura presentó un valor promedio normal, señalando una alta capacidad de resiliencia, lo que contribuye a una mayor resistencia de la biota acuática a ciertos componentes tóxicos.

El pH al igual que la temperatura, presentó un valor promedio normal. Esto es fundamental, puesto que contribuye al mantenimiento de la fauna y flora de los cuerpos de agua y reduce el potencial tóxico de ciertas sustancias.

A pesar del alto uso de agroquímicos, el nitrato presentó un valor promedio dentro de los límites permisibles, lo que podría señalar que los compuestos generalmente vertidos y/o filtrados por escorrentía no son ricos en nitrógeno.

El fosfato presentó valores levemente superiores a los permitidos por la normatividad Colombiana. Es posible que factores como: materia orgánica proveniente de vegetación riparia y actividades agrícolas contribuyen al aumento de fosfatos en los cuerpos de agua. Esta variable

está correlacionada con los fenómenos de eutrofización reportados en diversos cuerpos de agua, que a su vez afectan drásticamente el oxígeno disuelto.

El oxígeno disuelto presentó concentraciones normales. Este valor se asocia con los valores de nitrato (dentro de los límites permisibles) y fosfato (levemente superior a los límites establecidos), así como la temperatura que aumenta o reduce el potencial de ciertas sustancias químicas, reduciendo la concentración de oxígeno del agua.

A pesar de que se indicó niveles bastante superiores de los sólidos suspendidos totales, la demanda química de oxígeno en cinco días (DBO_5) presentó un valor promedio dentro del límite permisible. Muy seguramente hay sesgo en esta variable, debido a que algunos estudios que indicaron altos niveles de sólidos totales no incluyeron la DBO_5 en sus análisis.

El nivel de DQO estuvo dentro del rango establecido por la normativa Colombiana. Muy seguramente, la mayoría de la materia presente en los cuerpos de agua es no biodegradable, en ciertos casos, relacionada con la geología de la región.

Los altos niveles de coliformes fecales indican el estado deplorable de algunos ríos de Colombia relacionado con la existencia de vertimientos de aguas residuales. Además, esto indica que gran parte del agua de los ríos de Colombia no es apta para consumo humano.

El índice de BMWP/Col. correspondió a aguas ligeramente contaminadas. Se evidenció que los cuerpos de agua presentan características físicas, químicas y microbiológicas que limitan el establecimiento (crecimiento y reproducción) de algunos organismos con requerimientos ecológicos más específicos.

El índice de calidad de agua (IQA) correspondió a un recurso hídrico altamente contaminado, siendo congruente con lo reportado en algunas variables fisicoquímicas y biológicas, donde se reportaron valores superiores a los límites permisibles establecidos por la normatividad

Colombiana. Es fundamental, generar mapas de calidad de agua; a fin de generar sistemas eficientes para la gestión del recurso hídrico.

6. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, D. L., Latorre, S., Castillo, E., & Brandão, P. F. B. (2014). Environmental occurrence of arsenic in Colombia: A review. *Environmental Pollution*, 186, 272–281.

Ángel A, F. (2012). Análisis y modelamiento del comportamiento de fluidos líquidos de pilas de escombros en minería de oro.

Arroyo, C., & Encalada, A. C. (2009). Evaluación de la calidad de agua a través de macroinvertebrados bentónicos e índices biológicos en ríos tropicales en bosque de neblina montano. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1(1).

Baddi, Z., Garza, C., & Landero, F. (2005). Los indicadores biológicos en evaluación de la contaminación por agroquímicos en ecosistemas acuáticos asociados. *Cultura Científica y Tecnológica*, 2(6), 4–20.

Bundschuh, J., Litter, M., Parvez, F., Román Ross, G., Nicolli, H., Jean, J. S., & Cuevas, A. G. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429, 2–35.

Callejas, D. (2007). *Detección de arsénico de origen natural del agua subterránea en Colombia*. Universidad de los Andes, Bogotá D.C.

Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Diaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería solidaria*, 10(17), 111–124.

Cordy, P., Veiga, M. M., Salih, I., Al-Saadi, S., Console, S., Garcia, O., ... Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of The Total Environment*, 410–411, 154–160.

Coutinho, H. L., Noellemeyer, E., Jobbagy, E., Jonathan, M., & Paruelo, J. (2009). Impacts of land use change on ecosystems and society in the Rio de La Plata Basin. *Applying Ecological Knowledge to Landuse Decisions*, 56, 65.

de Costa Rica, G. (2007). Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. *La Gaceta*, 178(7).

Dügel, M., & Kazanci, N. (2004). Assessment of water quality of the Büyük Menderes River (Turkey) by using ordination and classification of macroinvertebrates and environmental variables. *Journal of Freshwater Ecology*, 19(4), 605–612.

Dukatz, F., & Ferrati, R. (2007). Sistematización del análisis y clasificación de cuerpos de agua según permanencia mediante sensores remotos. *Environment and Natural Resources*, 1102–1007.

Elosegi, A. (2009). Conceptos y técnicas en ecología fluvial. *Fundación BBVA*.

Forero-Céspedes, A. M., Reinoso-Flórez, G., & Gutiérrez, C. (2013). Evaluación de la calidad del agua del río Opía (Tolima-Colombia) mediante macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos. *Caldasia*, 35(2), 371.

García Alzate, C. A., Román Valencia, C., González, M. I., & Barrero, A. M. (2010). Composición y variación temporal de la comunidad de insectos acuáticos (Insecta) en la quebrada Sardineros, afluente Rio Verde, Alto Cauca, Colombia. *Revista de Investigaciones de la Universidad de Quindío*, 21, 21–28.

Gil G, J. A. (2014). *Determinación de la calidad del agua mediante variables físico químicas, y la comunidad de macroinvertebrados como bioindicadores de calidad del agua en la cuenca del río Garagoa*. Universidad de Manizales, Manizales.

Guevara, G. (2014). Evaluación ambiental estratégica para cuencas prioritarias de los Andes Colombianos: Dilemas, Desafíos y Necesidades. *Acta Biológica Colombiana*, 19(1), 11–24.

Hahn Vonhessberg, C., Toro, D., Grajales Quintero, A., Duque Quintero, G., & Serma Uribe, L. (2009). *Determinación de la calidad del agua mediante indicadores biológicos y fisicoquímicos, en la estación piscícola*. Universidad de Caldas, Municipio de Palestina, Colombia.

Heim, W. A., Coale, K. H., Stephenson, M., Choe, K.-Y., Gill, G. A., & Foe, C. (2007). Spatial and Habitat-Based Variations in Total and Methyl Mercury Concentrations in Surficial Sediments in the San Francisco Bay-Delta. *Environmental Science & Technology*, 41(10), 3501–3507.

Hoback, W. W., & Stanley, D. W. (2001). Insects in hypoxia. *Journal of Insect Physiology*, 47(6), 533–542.

IDEAM. (2007). Calidad de agua del río Magdalena. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Bogotá, D.C.

INGEOMINAS. (2004). Programa de Exploración de Aguas Subterráneas.

Klinger B, W. (2013). Análisis fisicoquímico y ecológico de las fuentes abastecedoras de agua para comunidades indígenas de Osbezac en las cuencas de los ríos Timbiqui y Bubuey, Timbiqui-Cauca.

Letterman, R. D. (2002). *Calidad y tratamiento del agua: manual de suministros de agua comunitaria* (Quinta edición). Madrid, España: Mc Graw Hill.

Marrugo-Negrete, J., Benitez, L. N., & Olivero-Verbel, J. (2008). Distribution of Mercury in Several Environmental Compartments in an Aquatic Ecosystem Impacted by Gold Mining in Northern Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 55(2), 305–316.

- Meyer, J. L., Strayer, D. L., Wallace, J. B., Eggert, S. L., Helfman, G. S., & Leonard, N. E. (2007). The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks.
- Montoya M, Y., Acosta, Y., & Zuluaga, E. (2011). Evolución de la calidad del agua en el río Negro y sus principales tributarios empleando como indicadores los índices ICA, el BMWP/COL y el ASPT. *Caldasia*, 33(1), 193–210.
- Murtinho, F., Tague, C., Bievre, B. de, Eakin, H., & Lopez-Carr, D. (2013). Water Scarcity in the Andes: A Comparison of Local Perceptions and Observed Climate, Land Use and Socioeconomic Changes. *Human Ecology*, 41(5), 667–681.
- Nicolli, H., Blanco, C., Paoloni, J., & Fiorentino, C. (2008). Ambientes afectados por el arsénico, 49–76.
- Ocampo-Duque, W., Osorio, C., Piamba, C., Schuhmacher, M., & Domingo, J. L. (2013). Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: Application to the Cauca River, Colombia. *Environment International*, 52, 17–28.
- Paukert, C. P., & Willis, D. W. (2003). Aquatic invertebrate assemblages in shallow prairie lakes: fish and environmental influences. *Journal of Freshwater Ecology*, 18(4), 523–536.
- Pérez, G. R., & Restrepo, J. J. R. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Universidad de Antioquia.
- Ramos O, L. M., Vidal, L. A., Vilardy Q, S., & Saavedra D, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la bahía de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 85–96.
- Rebolledo M, E. R., & Jiménez, P. (2012). Afectaciones a la calidad del agua en el norte de la provincia de esmeraldas producto de la minería aurífera ilegal en el año 2011.

Resolución 2115. (2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Rodríguez F, A., González M, J. F., & Suárez M, R. (2009). Accumulation of Lead, Chromium, and Cadmium in Muscle of capitán (Eremophilus mutisii), a Catfish from the Bogota River Basin. *Arch Environ Contam Toxicol*, 57, 359–365.

Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Propuesta para el uso del método BMWP/Col*. Universidad de Antioquia.

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

Rondón R, R. (2015). *Proyecto de educación ambiental “Agua esperanza de vida”: una propuesta curricular*. Universidad Nacional, Abierta y a Distancia, La Dorada, Colombia.

Samboni R, N. E., Carvajal E, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172–181.

Sarria-Villa, R., Ocampo-Duque, W., Páez, M., & Schuhmacher, M. (2016). Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment. *Science of The Total Environment*, 540, 455–465.

Segura Triana, L. E. (2007). *Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica en Colombia*. Escuela Superior de Administración Pública ESAP, Bogotá D.C.

Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*.

SPSS. (2012). SPSS Statistics 22.0 Command Syntax Reference. *SPSS Inc*.

US-EPA. (2001). Arsenic and Clarifications to Compliance and New Source Contaminants Monitoring.

Valencia E, D. M. (2011). *Macroinvertebrados acuáticos epicontinentales y la calidad biológica del agua del río Jordán, Jamundí (Valle del Cauca)*. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.

Vasquez Ramos, J., & Reinoso Florez, G. (2012). Estructura de la fauna béntica en corrientes de los Andes colombianos. *Revista Colombiana de Entomología*, 38(2), 351–358.

WHO. (2003). Document for Preparation of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.

Zamora, H. (2005). El índice BMWP y la evaluación biológica de la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos epicontinentales naturales de Colombia.

Tabla 1. Distribución de los recursos hídricos superficiales por países.

Los países más ricos	Cantidad Km ³ /año	Los más pobres	Cantidad Km ³ /año/Km ²
Brasil	8.233	Bahrein	Casi nada
Rusia	4.507	Kuwait	0.02
USA	3.051	Bahamas	0.02
Canadá	2.856	Maldivas	0.03
Indonesia	2.838	Qatar	0.1
China	2.830	Malta	0.1
Colombia	2.132	Barbados	0.1
Perú	1.913	Antigua y Bermudas	0.1
India	1.897	Emiratos Árabes Unidos	0.2

Nota: Todas las cifras citadas anteriormente, provienen de <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hídricos/figtableboxes/3.htm>.

Tabla 2. Problemas de contaminación, sus efectos y variables asociadas con la calidad del agua.

<i>Aparición del problema</i>	<i>Interferencia</i>	<i>Problemas</i>	<i>Variables</i>
1. - Mortalidad de peces - Olores molestos - H ₂ S - Organismos desagradables - Cambio drástico del ecosistema	Pesca Recreación Salud ecológica	Oxígeno disuelto (OD) bajo	DBO NH ₃ , N _{org} Sólidos orgánicos Fitoplancton Oxígeno disuelto (OD)
2. - Transmisión de enfermedades	Abastecimiento de	Niveles altos de bacterias	Coliformes totales Coliformes fecales

- Trastornos gastro-intestinales, irritación de ojos	agua de calidad Recreación		Estreptococos Virus
3. - Sabor y olor - Problemas estéticos debido a la alta proliferación de algas - Alteración del ecosistema	- Abastecimiento de agua de calidad - Recreación - Salud ecológica	- Crecimiento excesivo de plantas (eutrofización)	Nitrógeno Fósforo Fitoplancton
4. - Carcinógenos en el agua potable - Pesca cerrada debido a altos niveles de toxicidad - Ecosistemas alterados: Alta mortalidad, baja reproducción	- Abastecimiento de agua de calidad - Pesca - Salud ecosistémica	- Niveles altos de toxicidad	- Metales pesados - Sustancias radioactivas - Plaguicidas - Herbicidas - Carcinógenos - Hidrocarburos

Fuente: Adaptado del libro “Calidad del agua – Evaluación y diagnóstico” de Carlos Alberto Sierra Ramírez.

Tabla 3. Estándares y criterios de calidad según la normativa Colombiana y otras fuentes.

Parámetro	Decreto 1575	Valor propuesto por Sierra, (2011)	Valor propuesto por Roldán, (2003)
Conductividad	1000 µs/cm	-	X
pH	6,5 - 9	-	X
Nitrato	10 mg/L	-	X
Fosfato	0,5 mg/L	-	X
Coliformes fecales (CF)	0 UFC	10 UFC	X

Coliformes totales (CT)	0 UFC	450 UFC	X
Temperatura	-	< 35 °C	X
DQO	-	75 mg/L	X
DBO ₅	-	5 mg/L	X
O ₂ disuelto	-	> 4.0 mg/L	X
Sólidos disueltos totales (SDT)	-	< 100 mg/L	X
BMWP/Col			101 - 120 *

- : La referencia no menciona el parámetro.

X : No se considera un parámetro relevante en esta referencia.

* : Este rango corresponde a aguas muy limpias (referente usado).

Tabla 4. Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMPW/Col. de acuerdo a los valores originales de BMPW y ajustados por Roldán (2003) para Colombia.

Familia	Puntaje
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodiadae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae. Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae.	10
Ampullariidae, Dystiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.	9
	8

Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Vellidae.	
Baetidae, Cenidae, Calopterygidae, enagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.	7
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Sphaeridae	4
Lymnaeidae, Hydrometridae, Noteridae, Dolichopudidae, Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae, Syrphidae	2
Tubificidae	1

Fuente: Valores ajustados por Roldán (2003) para Colombia.

Tabla 5. Clasificación de las aguas, significado ecológico de acuerdo al índice BMPW/Col con colores para representaciones cartográficas.

Clase	Calidad	BMPW/Col	Significado	Color
I	Buena	> 150. 101 - 120	Aguas muy limpias	Azul
II	Aceptable	61 - 100	Aguas ligeramente contaminadas	Verde
III	Dudosa	36 - 60	Aguas moderadamente contaminadas	Amarillo
IV	Crítica	16 - 35	Aguas muy contaminadas	Naranja
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

Fuente: Tomado del libro “Calidad del agua – Evaluación y diagnóstico” de Carlos Alberto Sierra Ramírez.

Tabla 6. Índice de calidad del agua adoptado por Sierra, (2014).

Valor IQA	Convención	Significado
9 - 100	AZUL	Recurso hídrico en estado natural. Agua de muy buena calidad
7 - 9	VERDE	Recurso hídrico levemente contaminado. Agua buena calidad
5 - 7	AMARILLO	Recurso hídrico regularmente contaminado. Agua regularmente contaminada
2,5 - 5	NARANJA	Recurso hídrico contaminado. Agua altamente contaminada
0 - 2,5	ROJO	Recurso hídrico muerto. Se ha sobrepasado la capacidad de autodepuración del recurso

Fuente: Adaptado del libro “Calidad del agua – Evaluación y diagnóstico” de Carlos Alberto Sierra Ramírez.

Tabla 7. Factores de normalización propuestos por Sierra, (2011).

Parámetro	Factor de Normalización										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Valores Analíticos										
DBO ₅	DBO= $-0,05 + 0,7 * \log(\text{DBO}, \text{mg/L})^2$, si DBO ₅ >30 => 0; SI DBO ₅ < 2 =>1										
OD	OD = $1 - 0,01 * (\text{OD}, \%)^2$										
Nitratos	< 0,5	< 2	< 4	< 6	< 8	< 10	< 15	< 20	< 50	<= 100	> 100
PO ₄	< 0,16	< 1,6	3,20	< 6,4	< 9,6	< 16	< 32	< 64	< 96	<= 160	> 160
ST	< 250	< 750	< 1.000	<1.500	2.000	3.000	5.000	8.000	12.000	<=20.000	> 20.000
pH	7	7 - 8	7 - 8,5	7 - 9	6,5	9,5	10	11	3-12	2 -13	1-14
T °C	21/16	22/15	24/14	26/12	28/10	30/5	32/0	36/-	2	40/-4	45/-6
CT	< 0,5	<2	<3	<4	<5	<6	<8	<10	<12	<=15	>15
Turbidez	<5	<10	<15	<20	<25	<30	<40	<60	<80	<=100	>100

Tabla 8. Normalización de las variables utilizadas en el cálculo de índice de calidad de agua (IQA).

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN	VALOR DE LA VARIABLE NORMALIZADA
DBO ₅	6,76	0
OD	9,57	0,1
NO ₃	3,13	0,8
PO ₄	0,69	0,9
SDT	189,8	1
pH	7,2	0,9
T °C	22,5	0,9
CT	208,7	0
TURBIEDAD	49,9	0,3

Tabla 9. Resultados estadísticos de las variables fisicoquímicas y microbiológicas analizadas.

	Turbiedad	SDT	Temperatura	Conductividad	pH	Nitrato	Fosfato	O ₂ disuelto	DBO ₅	DQO	CT	CF	BMPW
Promedio	49,9	190	22,5	54,5	7,2	3,13	0,69	9,57	6,76	33,2	209	119	76,7
Mínimo	4	9	15	0,27	5,6	0,05	0,03	1,5	0,45	3	5	1,03	39
Máximo	126	332	39,7	161	9,2	8	1,38	34,6	21,1	75,9	380	221	160
Error estándar	8,22	28,6	1,08	12,1	0,23	0,84	0,14	2,12	1,55	12,9	18,8	24,8	13,7

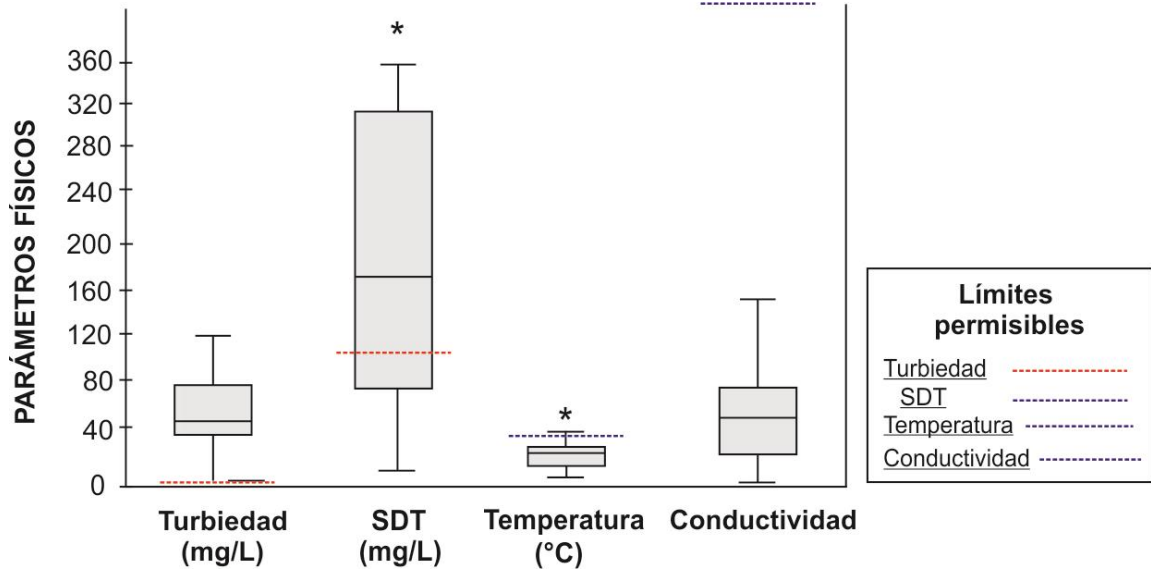


Figura 1. Parámetros físicos relacionados con la calidad de agua.

*: Límites permisibles establecidos por Sierra, (2011) para calidad de agua para hábitat de peces (aplica en todos los casos)

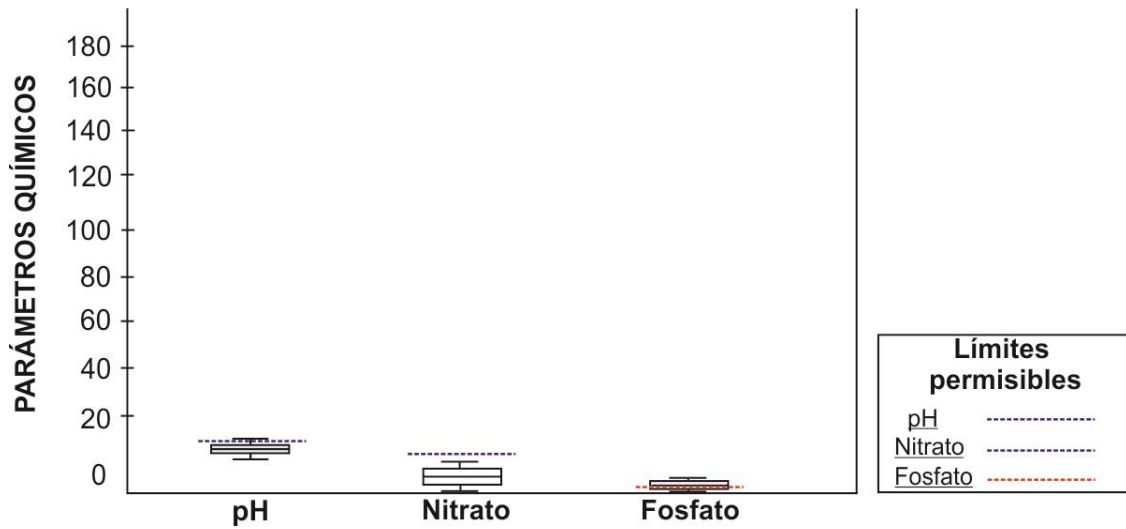


Figura 2. Parámetros químicos relacionados con la calidad de agua.

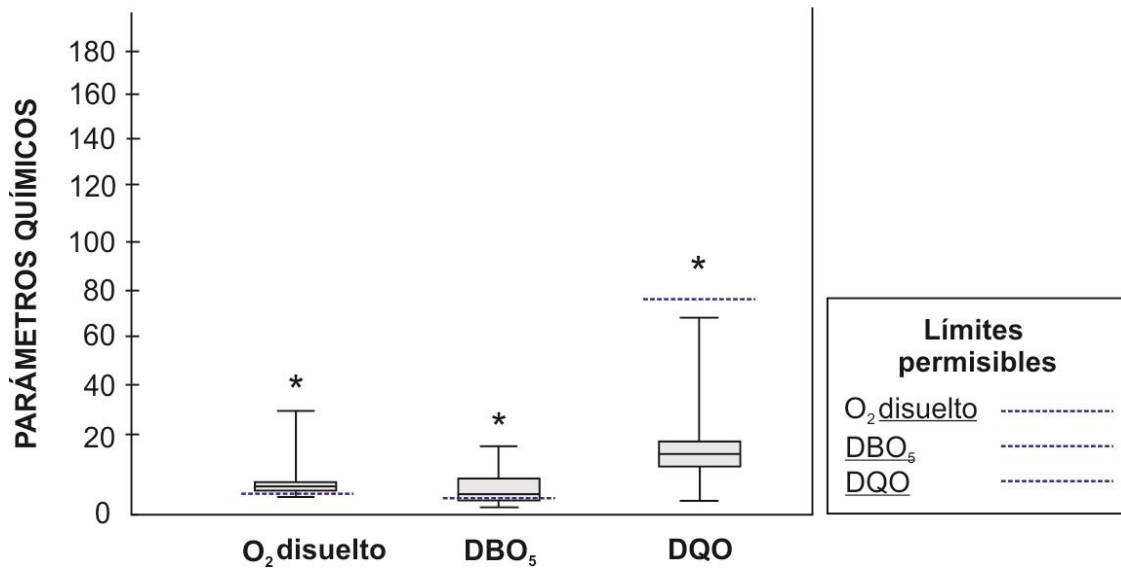


Figura 3. Parámetros químicos relacionados con la calidad de agua.

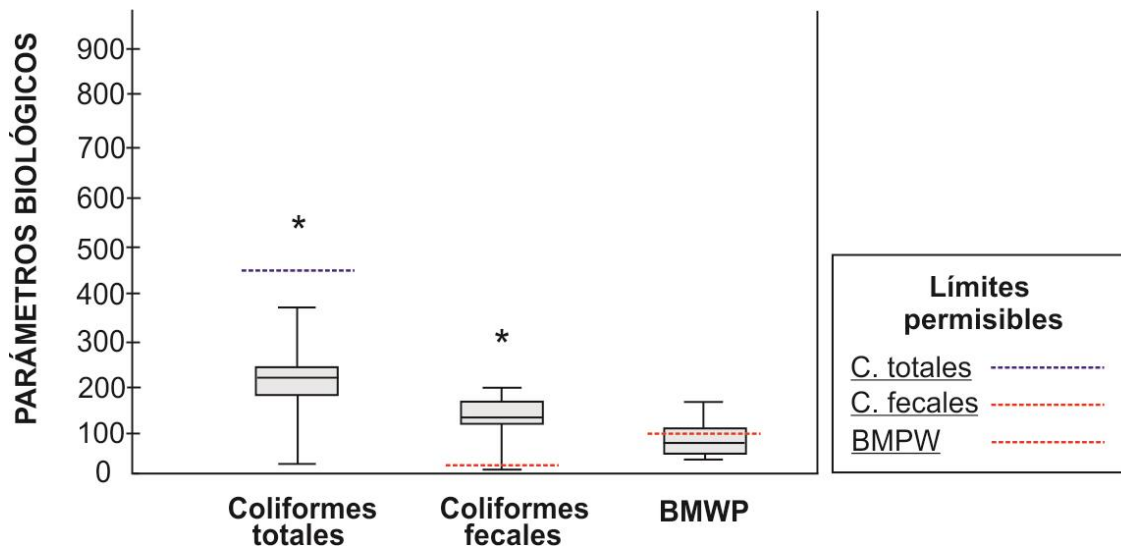


Figura 4. Parámetros microbiológicos relacionados con la calidad de agua.