

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.37.2.6281>

Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia)

*Aquatic macroinvertebrates as
indicators of water quality of the Teusaca
river (Cundinamarca, Colombia)*

SANTIAGO LÓPEZ MENDOZA *

DAVID HUERTAS PINEDA **

ÁNGELA MARÍA JARAMILLO LONDOÑO ***

DAYAM SORET CALDERÓN RIVERA ****

JOSÉ LUIS DÍAZ ARÉVALO *****

*Estudiante décimo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás,
Facultad de Ingeniería Ambiental. santiagolopezm@usantotomas.edu.co

**Estudiante décimo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás,
Facultad de Ingeniería Ambiental. davidhuertas@usantotomas.edu.co

***Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, docente Universidad Santo Tomás,
Facultad de Ingeniería Ambiental. angelajaramillo@usantotomas.edu.co

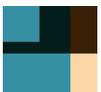
****Ingeniera Ambiental, docente Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería
Ambiental. dayamcalderon@usantotomas.edu.co

*****Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, docente Universidad de la Sabana,
Facultad de Ingeniería Civil. jose.diaz2@unisabana.edu.co

Correspondencia: Ángela María Jaramillo Londoño, Universidad Santo Tomás,
Facultad de Ingeniería Ambiental. Carrera 9 n.º 51-11, Bogotá. Tel: 3204242848.

Origen de subvenciones: Artículo derivado del Proyecto de Investigación “Evaluación de la
metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) para el estudio de caudales
ambientales en tres ríos de alta montaña de la cuenca del río Bogotá, como estrategia de
gestión del recurso hídrico”, financiado por Universidad Santo Tomás.

Código del proyecto 17100545.



Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar la calidad del agua a partir de la diversidad de los macroinvertebrados acuáticos presentes en tres zonas del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia). En cada estación de muestreo se midió oxígeno disuelto, turbidez, temperatura y pH y se estimaron índices de calidad del agua (BMWP/Col, ASTP, IBF, EPT), junto con algunos índices de biodiversidad (Shannon Weaver, dominancia de Simpson, diversidad de Margalef y Menhinick). Se recolectaron 6781 individuos de macroinvertebrados acuáticos pertenecientes a 3 *phylum*, 5 clases, 11 órdenes y 21 familias, en tres muestreos en julio, septiembre y noviembre de 2017. La calidad del agua del río Teusacá es moderadamente contaminada, con tendencia a muy contaminada. Asimismo, el cuerpo hídrico presentó una baja biodiversidad y una alta dominancia en las especies colectadas de macroinvertebrados. Los resultados arrojados por los índices de calidad y de diversidad aplicados son independientes de la temporalidad en que realizaron los respectivos muestreos.

Palabras clave: biodiversidad, calidad del agua, índices de calidad, macroinvertebrados, río Teusacá.

Abstract

The objective of this study was to determine water quality, characterize its physico-chemical state and evaluate the diversity of aquatic macroinvertebrates in three monitoring stations of the Teusacá River located in the department of Cundinamarca, Colombia. At each sampling station, dissolved oxygen, turbidity, temperature and pH were measured, water quality indices were estimated (BMWP / Col, ASTP, IBF, EPT), along with some biodiversity indexes (Shannon Weaver, Simpson Margalef and Menhinick). A total of 6781 aquatic macroinvertebrate were collected in three samplings in the months of July, September and November of 2017, belonging to 3 *phylum*, 5 classes, 11 orders and 21 families. The water quality of the Teusacá river is moderately contaminated, with a tendency to present highly polluted waters. Likewise, the water body presented a low biodiversity and a high dominance in the species collected from macroinvertebrates. The results obtained by the quality and diversity indices applied are independent of the temporality in which they carried out the respective sampling.

Keywords: biodiversity, macroinvertebrates, quality indices, Teusacá river, water quality.

1. INTRODUCCIÓN

El río Teusacá está sometido a presiones relacionadas con los cambios de uso del suelo por asentamientos humanos que generan contaminación por vertido de aguas residuales sin tratar y actividades agroindustriales que causan impactos negativos como la pérdida de biodiversidad y cambios en la cantidad y calidad del recurso hídrico [1], [2], [3].

El aumento en la generación de nuevos contaminantes crea la obligación de aplicar otras metodologías diferentes del análisis de parámetros fisicoquímicos como lo es el uso de indicadores biológicos, dentro de los cuales destaca el monitoreo con macroinvertebrados acuáticos que reflejan perturbaciones existentes sobre los cuerpos de agua [4], [5], [6].

Son muchos los índices utilizados en las investigaciones y estudios realizados con macroinvertebrados acuáticos; uno de los más utilizados es el el BMWP (Biological Monitoring Working Party), propuesto en Inglaterra por Hellawel en 1970, modificado para la península ibérica por Alba-Tercedor y adaptado para Colombia por Roldán Pérez e identificado como BMWP/Col [7], [8]. Otro índice de amplio uso, por ser complementario del anterior, es el ASPT (Average Score Per Taxon), el cual es calculado dividiendo la puntuación total BMWP/Col por el número de los taxones calificados en la muestra [9], [10]. El IBF (Índice Biológico de Familias) es similar al BMWP y fue desarrollado en 1988 por Hilsenhoff [11]; este asigna un puntaje a los grupos taxonómicos de acuerdo con su tolerancia o sensibilidad a la contaminación en una escala que va de 0 a 10 [12] [13]. Finalmente, el índice EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera) se usa para evidenciar la buena calidad del agua [14] y se calcula dividiendo el número de individuos de los órdenes Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera por el número total de individuos colectados y se multiplica por 100; como resultados, los valores más altos significan aguas más oxigenadas y limpias [15], [16], [17].

2. METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio y selección de puntos de muestreo

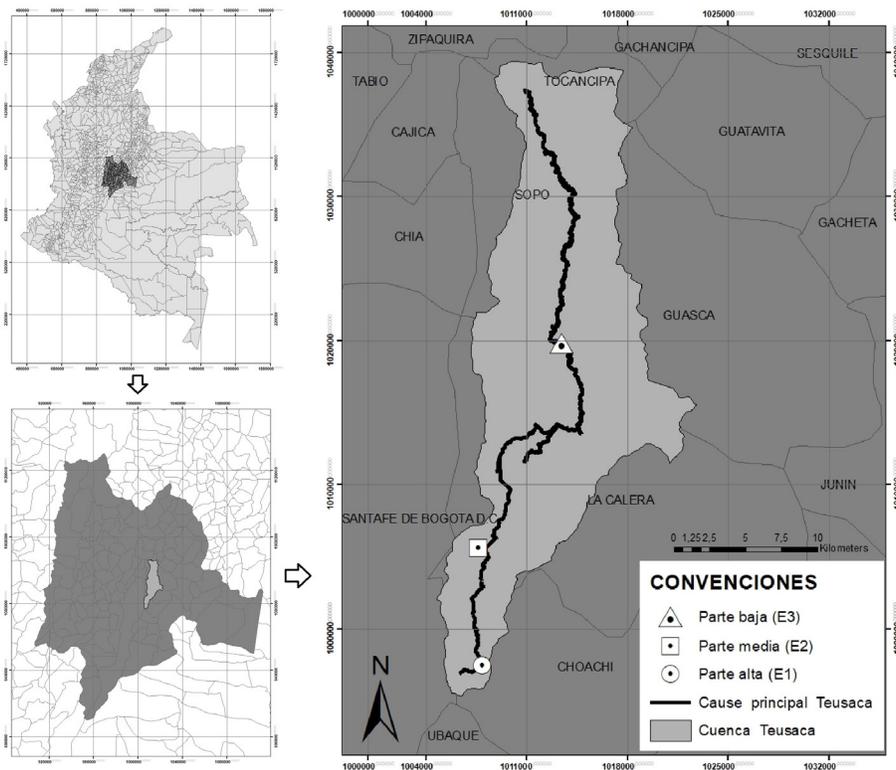
El área de estudio se situó en la subcuenca del río Teusacá, parte alta de la cordillera Oriental y en el sector central de la cuenca del río Bogotá (departamento de Cundinamarca (Colombia). Está ubicado entre los 2550 m.s.n.m hasta los 3650 m.s.n.m. [18]. Su cauce principal tiene una longitud de 69 km y la subcuenca comprende un área total de 35818,42 hectáreas.

En la parte alta de la subcuenca se presentan actividades agropecuarias intensivas, predominando el cultivo de papa; en la parte baja se concentran actividades agroindustriales de ganadería y cultivos de flores [18]. Algunas de las actividades agrope-

cuarias de la zona han venido siendo desplazadas por un proceso de expansión urbana de baja densidad, con ocupación de vivienda suntuaria y presencia de población en búsqueda de servicios ecosistémicos (acceso a la naturaleza, aire limpio y paisaje), además del establecimiento de agroindustria y de empresas de servicios [19].

La selección de los puntos de muestreo se basó en la identificación de zonas estratégicas, con ayuda de cartografía y un recorrido previo por toda el área de la cuenca. Se escogieron tres sitios, tal y como se observa en la figura 1: la estación 1 (E1: $4^{\circ}34'33.80''$ N - $74^{\circ}0'33.60''$ O) en la parte alta en el municipio de Choachí, con una altura aproximada de 3292 m.s.n.m; la estación 2 (E2: $4^{\circ}39'0.40''$ N - $74^{\circ}0'42.60''$ O) en la parte media de la cuenca, en el municipio de La Calera, con una altura aproximada de 2907 m.s.n.m., y la estación 3 (E3: $4^{\circ}46'41.40''$ N - $73^{\circ}57'35.30''$ O) se localizó en la parte baja, en el municipio de La Calera, con una altura aproximada de 2579 m.s.n.m.

Los muestreos se realizaron a lo largo de la segunda mitad de 2017, en julio (temporada seca con una precipitación promedio de 35 mm), septiembre (temporada de transición presentando una precipitación promedio de 50 mm) y noviembre (temporada de lluvias con una precipitación promedio de 140 mm).



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 1. MAPA LOCALIZACIÓN SUBCUENCA RÍO TEUSACÁ Y PUNTOS DE MUESTREO (CUNDINAMARCA, COLOMBIA)

Muestreo e identificación de los macroinvertebrados acuáticos

Este protocolo se ajustó a la metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua desarrollada por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt [20]. En cada estación de muestreo los macroinvertebrados acuáticos fueron colectados realizando un barrido a contracorriente con la red D-net con un esfuerzo de 10 minutos a una longitud de 10 metros a cada orilla del cauce del río previamente delimitado; de igual forma, el barrido también se realizó en troncos y rocas que se encontraban dentro del cauce con el fin de cubrir todos los hábitats posibles. Las muestras obtenidas fueron conservadas en alcohol al 70 % y a una temperatura de 4°C, debidamente rotuladas, para su separación, identificación y conteo.

Los macroinvertebrados colectados fueron identificados en el laboratorio de biología de la Universidad Santo Tomás haciendo uso de estereoscopios (AmScope SM-IB-RL) y claves taxonómicas de Roldán Pérez [21], Álvarez Arango [20], Domínguez y Fernández [22], Oscoz [23], González Valencia [24].

Con el fin de verificar el esfuerzo muestral se calculó la curva de acumulación de familias, basada en el estimador no paramétrico Chao 1 y mediante el software EstimateS.

Parámetros fisicoquímicos

En cada punto de muestreo fueron medidos in situ pH, temperatura, oxígeno disuelto y turbidez con ayuda de un medidor multiparámetro (Hanna HI-9829).

Índices biológicos de calidad

Para poder calcular los índices biológicos fue necesario llegar hasta el nivel taxonómico de familia, y en los casos que fue posible se llegó hasta el nivel de género, para que junto con los parámetros ambientales se tuviera una información más completa de la organización de las comunidades de los macroinvertebrados. Se realizó un conteo de la cantidad de individuos colectados por familia y posteriormente se obtuvo el valor del grado de tolerancia a la contaminación de los diferentes índices.

Se calcularon los siguientes índices: Biological Monitoring Working Party (BMWP-Col), Average Score Per Taxon (ASPT), modificado por Roldán Pérez [25] y adaptado por Álvarez Arango [20]; el Índice Biótico de Familias (IBF) de Hilsenhoff [11]; y finalmente el índice Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (EPT) de Carrera y Fierro [26].

Índices de diversidad

El cálculo de la diversidad se hizo por medio de los índices de equidad de Shannon-Weaver (H), índice de Margalef e índice de Menhinick. Por último, se calculó la dominancia a través del índice de Simpson (1-D).

Análisis estadístico de los datos

Para comprobar las posibles diferencias de los índices calculados, en función de los puntos de muestreo y de las épocas climáticas, se realizó un análisis de varianza o ANOVA de una vía, previa evaluación de los supuestos de Normalidad (test de Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianza (test de Levene). Se consideraron significativos los valores con una significancia $p < 0,05$. De igual manera, se determinó el grado de interdependencia y comportamiento entre las variables fisicoquímicas y los índices, realizando una prueba de Spearman, con ayuda del software IBM SPSS Statistics 25. Finalmente, se realizó un Análisis Canónico de Correspondencias (ACC), para poder determinar la relación entre los parámetros fisicoquímicos y las comunidades de macroinvertebrados con ayuda del software RStudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Macroinvertebrados acuáticos

Se colectaron un total de 6781 individuos de macroinvertebrados acuáticos pertenecientes a 3 *phylum*, 5 clases, 11 órdenes y 21 familias. La familia Hyalellidae mostró la mayor abundancia con 3385 individuos (49,9 %), seguida por Gammaridae con 2377 individuos (35,1%) (tabla 1).

TABLA 1. MACROINVERTEBRADOS COLECTADOS EN EL RÍO TEUSACÁ

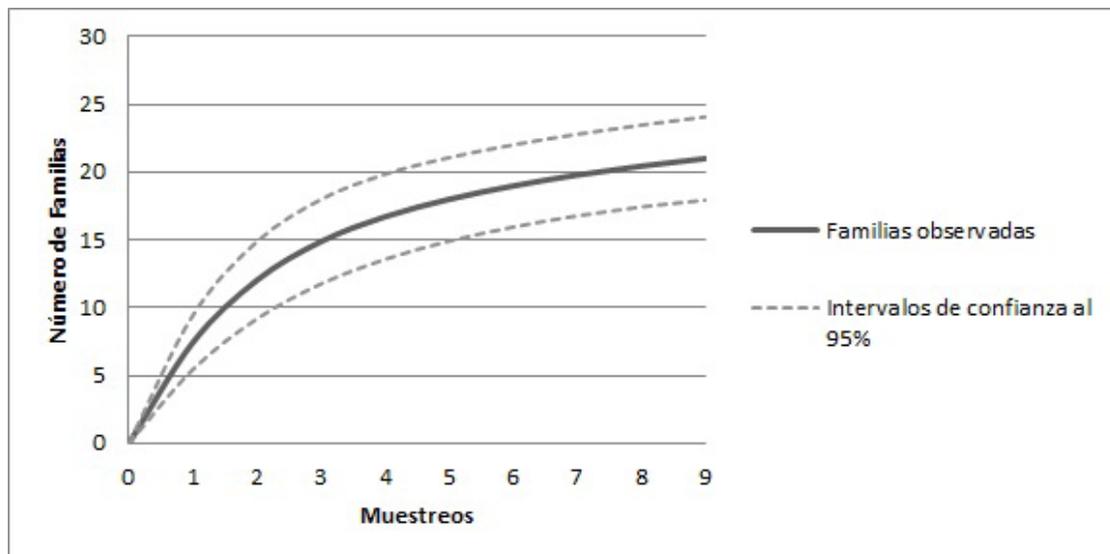
Orden	Familia	Temporada seca			Temporada transición			Temporada de lluvias		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Amphipoda	Gammaridae	-	-	133	-	-	2039	-	4	201
	Hyalellidae	-	15	594	-	-	2499	-	7	270
Isopoda	Asellidae	1	-	7	2	-	1	10	-	-
Hemiptera	Corixidae	-	-	1	-	1	-	1	-	-
	Mesoveliidae	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Ephemeroptera	Baetidae	-	-	7	-	-	2	-	-	-
	Baetidae	-	-	91	-	-	-	-	-	-
	Baetidae	12	-	-	2	-	-	51	-	-

Continúa...

Orden	Familia	Temporada seca			Temporada transición			Temporada de lluvias		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Diptera	Simuliidae	10	-	2	-	17	-	150	72	-
	Tipulidae	1	1	-	-	-	-	-	-	-
	Muscidae	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	Blepharoceridae	3	-	-	-	-	-	3	-	-
Coleoptera	Elmidae	6	-	-	6	-	-	50	-	-
	Elmidae larva	6	-	-	61	-	-	-	-	-
Trichoptera	Odontoceridae	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	Helicopsychidae	-	-	-	1	-	-	-	-	-
	Hydropsychidae	-	-	-	-	3	59	-	16	27
Basommatophora	Physidae	-	-	5	-	3	23	4	-	3
Veneroida	Sphaeriidae	-	8	39	-	3	77	-	14	7
Rhynchobdellida	Glossiphoniidae	-	1	7	1	-	114	-	8	-
Haplotaxida	Tubificidae	-	1	1	-	1	-	5	-	-
	Haplotaxidae	-	-	-	-	-	2	-	-	-
	Naididae	-	-	-	-	4	2	-	-	-
Total		40	28	887	73	32	4818	274	121	508

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la curva de acumulación de familias, el mayor esfuerzo muestral se alcanzó en la muestra 4, y posterior a este no hubo aparición de familias de macroinvertebrados distintas a las que ya se habían identificado. Los estimadores se encontraron dentro del rango del 95 %, por lo que el número de muestreos realizados es considerado suficiente (figura 2).



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. CURVA DE ACUMULACIÓN DE FAMILIAS DE MACROINVERTEBRADOS.

Parámetros fisicoquímicos

El comportamiento del pH para la temporada seca y de lluvias mostró una tendencia a tener valores más bajos en la estación con mayor elevación con respecto a las estaciones con menor elevación, mostrando un rango entre 4,16 y 7,22; para la temporada de transición mostraron valores similares en las distintas estaciones, con valores entre 6,96 y 7,81. Esto puede ser explicado por el hecho de que el río Teusacá nace en zona de páramo, donde los suelos son ácidos, sin embargo, a medida que el río desciende altitudinalmente el pH se va neutralizando (tabla 2).

TABLA 2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS MEDIDOS EN EL RÍO TEUSACÁ

Parámetro	Temporada Seca			Temporada de Transición			Temporada de Lluvias		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
pH	4.16	5.5	6.7	7.81	7.27	6.96	4.16	5.5	7.22
Temperatura(°C)	8.7	11.35	12.65	14	10.97	16.04	8.2	10.91	12.3
Oxígeno disuelto (mg/L)	2.59	3.8	3.39	5.21	2.94	0.37	2.59	2.15	2.03
Turbidez (NFU)	0	135	618	22.2	10.1	86.3	93	75	10.1

Fuente: elaboración propia.

Para el oxígeno disuelto, en la temporada seca y de lluvias, las concentraciones fueron similares, mostrando valores entre 2,03 y 3,8 mg/L; en la temporada de transición se evidenció mayor concentración en la estación con mayor elevación con respecto a las estaciones con menor elevación, mostrando un rango entre 0,37 y 5,21 mg/L. El oxígeno disuelto es un parámetro fundamental en la evaluación del recurso hídrico, ya que su concentración determina las especies, que de acuerdo con su tolerancia y rango de adaptación pueden sobrevivir en un determinado cuerpo de agua y establecen así la estructura y el funcionamiento biótico de estos sistemas [27]. En la mayoría de las situaciones, el incorporar materia orgánica puede resultar en una pérdida de la saturación como resultado de los procesos de oxidación [27], [28]. En este caso el río Teusacá tiene una fuerte presión de numerosos vertimientos con alto contenido de materia orgánica que disminuye la concentración de oxígeno. En aguas naturales se recomienda una concentración mínima de 4,0 mg/l para mantener las buenas condiciones de las poblaciones de organismos. Insuficiente oxígeno disuelto en la columna de agua causará la descomposición anaeróbica de cualquier material orgánico presente. La baja concentración de oxígeno disuelto en el agua es un indicador de alta contaminación, ya que establece la presencia de organismos que respiran y se multiplican a una tasa superior a la difusión del oxígeno desde la atmósfera al cuerpo de agua [28].

La turbidez presentó valores más altos para la temporada de seca y de lluvias; sus valores intermedios se presentaron en la temporada de transición. Si la turbidez del agua es alta, habrá muchas partículas suspendidas en ella; estas partículas sólidas bloquearán la luz solar y evitarán que las plantas acuáticas obtengan la luz solar que necesitan para la fotosíntesis, las plantas producirán menos oxígeno y, con ello, bajarán los niveles de oxígeno disuelto. Las plantas morirán más fácilmente y serán descompuestas por las bacterias en el agua, lo que reducirá los niveles de oxígeno disuelto aun más [29].

Índices biológicos de calidad del agua

El índice BMWP/Col indicó una variación en la calidad del agua del río entre dudosa (aguas moderadamente contaminadas) y crítica (aguas muy contaminadas), como se observa en la tabla 3, con presencia de las familias Glossiphoniidae, Tipulidae y Tubificidae, que son indicadoras de aguas contaminadas [30].

TABLA 3. PUNTAJES Y VALORES DE LOS ÍNDICES BIOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN LAS ESTACIONES DE MUESTREO DEL RÍO TEUSACÁ

Índice	Estación	Temporada seca	Temporada transición	Temporada lluvias
BMWP/Col	E1	44 - Dudosa	24 - Crítica	42 - Dudosa
	E2	25 - Crítica	30 - Crítica	29 - Crítica
	E3	40 - Dudosa	37 - Dudosa	21 - Crítica
ASPT	E1	7,33 - Aceptable	6 - Dudosa	6 - Dudosa
	E2	3,57 - Crítica	5 - Dudosa	5,8 - Dudosa
	E3	5 - Dudosa	6,17 - Dudosa	5,25 - Dudosa
IBF	E1	4,18 - Muy buena	3,99 - Muy buena	5,23 - Regular
	E2	7,8 - Muy pobre	6,52 - Regular - Pobre	6,02 - Regular - Pobre
	E3	6,94 - Pobre	6,21 - Regular - Pobre	6,20 - Pobre
EPT	E1	33% - Regular	4% - Mala	19% - Mala
	E2	0% - Mala	9% - Mala	13% - Mala
	E3	11% - Mala	1% - Mala	5% - Mala

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos con el índice ASPT fueron similares al índice BMWP/Col, variando de igual forma la interpretación de calidad del agua del río entre dudosa y crítica exceptuando la estación localizada aguas arriba, que para la temporada seca tuvo una calidad aceptable (aguas ligeramente contaminadas), representada por la presencia de las familias Odontoceridae, Blepharoceridae y Simuliidae, indicadoras de aguas poco contaminadas [30].

Al igual que con los índices anteriores, el índice IBF varió entre pobre (contaminación muy significativa) y regular-pobre (contaminación significativa) en las estaciones E2 y E3, en cualquier época, mientras que para la E1 durante la temporada seca y la de transición presentó una calidad del agua muy buena (contaminación ligera), debido a la presencia de la familia Simuliidae, siendo indicador de aguas poco contaminadas [30]; para la temporada de lluvias presentó una calidad del agua regular (contaminación regular).

En cuanto al índice EPT, la calidad del agua fue mala, exceptuando la E1 para la temporada seca, que presentó una calidad del agua regular. Esta mejora en la calidad de agua es debido a una mayor concentración de oxígeno, favoreciendo la presencia de familias como la Ephemeroptera y Trichoptera [31]. Este índice presentó resultados más homogéneos, siendo el más estricto en cuanto a la calificación de la calidad del agua.

Al momento de llevar a cabo el cálculo de los índices BMWP/Col, ASPT e IBF se evidenciaron ciertos sesgos, debido a que estos índices omiten algunas familias de macroinvertebrados que fueron representativos en este estudio. Los índices BMWP/Col y ASPT no tienen en cuenta las familias Gammaridae, Asellidae, Haplotaxidae y Naididae; por su parte, el índice IBF no tiene en cuenta las familias Asellidae, Corixidae, Glossiphoniidae, Mesoveliidae, Muscidae y Odontoceridae. Es por esto que para una buena interpretación acerca de la calidad del agua del río se deben analizar los resultados de los índices de calidad de una manera conjunta, ya que son complementarios entre sí.

En el caso del índice EPT, este está diseñado para ser indicador de buena calidad, por lo que el mayor porcentaje de representación de familias se encontró en la parte alta para las temporadas seca y de lluvias, donde es usual hallar representantes de los órdenes Trichoptera y Ephemeroptera [32].

Índices de diversidad

Los resultados de los índices de Margalef y Menhinick fueron muy similares en todas las estaciones a lo largo de las distintas temporadas. El índice de Margalef mostró rangos entre 0,64 y 1,80, mientras que el índice de Menhinick estuvo entre 0,14 y 1,32, interpretándose ambos resultados como baja biodiversidad en la zona.

Para el índice de Shannon-Weaver, los valores se encontraron entre 0,39 y 1,54, el cual representa una baja biodiversidad.

En cuanto al índice de Simpson, los valores se encontraron por debajo de 0,5, exceptuando E1, correspondiente a la temporada de transición, que tuvo un valor de 0,71. Casi la totalidad de los resultados de este índice dieron por debajo de 0,5, lo cual indica la existencia de especies muy dominantes. La mayor dominancia la presentaron las familias Hyalellidae y Gammaridae que habitan aguas ricas en materia orgánica en recirculación.

TABLA 4. PUNTAJES Y VALORES DE LOS ÍNDICES DE DIVERSIDAD Y DOMINANCIA EN LAS ESTACIONES DE MUESTREO DEL RÍO TEUSACÁ

Índice	Estación	Temporada seca	Temporada transición	Temporada de lluvias
Margalef	E1	1,63	0,93	1,25
	E2	1,8	1,73	1,04
	E3	1,47	1,06	0,64
Menhinick	E1	1,11	0,59	0,48
	E2	1,32	1,24	0,55
	E3	0,37	0,14	0,22
Shannon - Weaver	E1	1,54	0,39	1,28
	E2	1,29	1,48	1,28
	E3	1,07	0,95	0,95
Simpson	E1	0,20	0,71	0,37
	E2	0,38	0,33	0,39
	E3	0,48	0,45	0,44

Fuente: elaboración propia.

La subcuenca del río Teusacá mostró una baja biodiversidad y una alta dominancia por parte de los macroinvertebrados acuáticos, siendo las familias Hyalellidae y Gammaridae, pertenecientes al orden Amphipoda, los más representativos; por otro lado, el orden menos representativo fue la Hemiptera.

La baja diversidad de macroinvertebrados acuáticos encontrada a lo largo de la subcuenca se debe principalmente a que no hay hábitats propicios para albergar grandes cantidades de individuos, ya que los parámetros fisicoquímicos encontrados, específicamente de oxígeno disuelto, se encontraban en bajas concentraciones. La concentración de oxígeno es relevante en la calidad de las aguas, siendo su presencia y concentración esencial para sustentar las diferentes formas de vida para estos organismos [33].

Análisis de Varianza (ANOVA)

Luego de aplicar la prueba de Kolmogorov-Smirnov para confirmar que la distribución de los datos fuera normal, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) con el propósito de observar si había variación significativa entre los índices y los sitios de muestreo y entre estos y las distintas temporadas. Los resultados arrojados para los

índices de calidad (BMWP/Col, ASPT, e IBF) y para los índices de diversidad (Margalef, Menhinick, Shannon-Weaver, y Simpson) con respecto a la temporada arrojaron un nivel de significancia mayor a 0,05, por lo que se acepta la hipótesis nula; esto permite precisar que no existe una diferencia significativa entre diferentes épocas climáticas y el valor de los índices. Estos resultados son reflejo de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en cada una de las estaciones de muestreo, que no varían de una manera drástica en las diferentes temporadas; además, las cualidades de los macroinvertebrados acuáticos, como lo son su amplio espectro de respuestas a las perturbaciones (que en este estudio fueron pocas) y su naturaleza sedentaria y de largos ciclos de vida en el medio acuático, en algunos casos de meses o años [20], [34], presentan una alta influencia en los resultados de este análisis estadístico.

Con respecto a las estaciones de muestreo, el índice IBF fue el único que presentó una significancia menor a 0,05; esto permite identificar que existe una diferencia significativa entre los resultados arrojados por este índice a lo largo de las tres estaciones de muestreo.

TABLA 5. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA LAS TEMPORADAS CLIMÁTICAS CON LOS ÍNDICES DE CALIDAD Y DIVERSIDAD

Índice		Suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Medida cuadrática	Estadístico F	Significancia
BMWP/Col	Inter-Grupos	68,22	2	34,11	0,401	0,686
	Intra-Grupos	510	6	48,16		
	Total	578,22	8			
ASPT	Inter-Grupos	0,32	2	0,164	0,118	0,89
	Intra-Grupos	8,3	6	1,38		
	Total	8,63	8			
IBF	Inter-Grupos	0,83	2	0,41	0,21	0,81
	Intra-Grupos	11,49	6	1,91		
	Total	12,33	8			
Margalef	Inter-Grupos	0,65	2	0,32	3,19	0,114
	Intra-Grupos	0,61	6	0,1		
	Total	1,27	8			

Continúa...

Índice		Suma de cuadrados	Grados de libertad (gl)	Medida cuadrática	Estadístico F	Significancia
Menhinick	Inter-Grupos	0,4	2	0,2	1,02	0,413
	Intra-Grupos	1,17	6	0,19		
	Total	1,57	8			
Shannon	Inter-Grupos	0,19	2	0,09	0,76	0,506
	Intra-Grupos	0,77	6	0,12		
	Total	0,97	8			
Simpson	Inter-Grupos	0,13	2	0,007	0,29	0,756
	Intra-Grupos	0,137	6	0,02		
	Total	0,15	8			

Fuente: elaboración propia.

Correlación de Spearman

Para saber el grado de interdependencia que presentan las variables fisicoquímicas con los índices biológicos se realizó la correlación de Spearman, cuyos rangos de estos coeficientes va de -1 a +1.

Las correlaciones que más significancia presentaron fueron: el índice BMWP-Col con el pH, presentando una correlación inversamente proporcional (-65,5 %), como se observa en la tabla 6; las familias Glossiphoniidae, Physidae, Hyalellidae y Sphaeriidae presentan una correlación con este parámetro, por lo que cualquier cambio sobre este representará un cambio de igual forma sobre estas familias; el índice de Menhinick con el oxígeno disuelto (66,1 %), siendo esta directamente proporcional, dado que el cuerpo de agua presenta baja diversidad y baja concentración de oxígeno disuelto (6,5 mg/L); esto se debe principalmente a que no hay hábitats propicios para albergar grandes cantidades de individuos [34]. Finalmente, con la temperatura se relacionan el índice de Shannon-Weaver (-70 %) y el índice de Simpson (83,3 %); esto debido a que la temperatura es otro de los factores que limita la vida acuática y de hecho es una de las constantes que adquiere gran importancia en el desarrollo de los distintos fenómenos, ya que determina la tendencia de sus propiedades físicas y la riqueza y distribución de las familias de macroinvertebrados [35].

TABLA 6. CORRELACIÓN DE SPEARMAN ENTRE LOS ÍNDICES Y PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

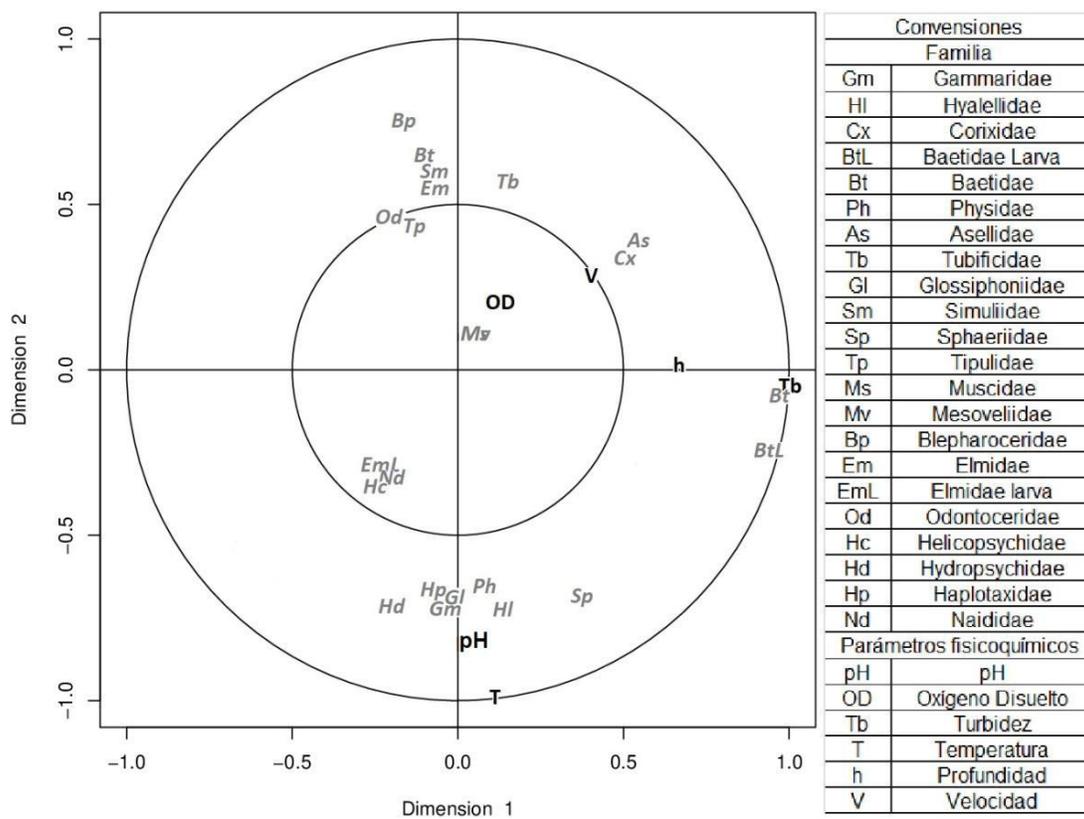
Índice		pH	Temperatura	OD	Turbidez
BMWP/Col	Coef. De correlación	-0,65	-0,45	-0,126	0,1
	Significancia	0,05	0,224	0,748	0,797
ASPT	Coef. De correlación	-0,23	-0,084	-0,42	-0,41
	Significancia	0,546	0,83	0,253	0,263
IBF	Coef. De correlación	0,067	0,25	0,075	0,536
	Significancia	0,864	0,516	0,847	0,137
Margalef	Coef. De correlación	-0,37	-0,333	0,402	0,209
	Significancia	0,327	0,381	0,284	0,589
Menhinick	Coef. De correlación	-0,109	-0,417	0,661	-0,184
	Significancia	0,708	0,265	0,05	0,635
Shannon	Coef. De correlación	-0,563	-0,7	0,067	-0,201
	Significancia	0,114	0,036	0,864	0,604
Simpson	Coef. De correlación	0,563	0,833	0,134	0,402
	Significancia	0,114	0,005	0,731	0,284

Fuente: elaboración propia.

Análisis Canónico de Correspondencias

En la figura 3 se observa que cada una de las familias presenta un grado de afinidad distinto frente a cada parámetro, siendo las más afines aquellas ubicadas en los valores de 0 a 0,5 y de 0 a -0,5, además de las familias más cercanas a las líneas de los parámetros fisicoquímicos.

Teniendo en cuenta eso, el oxígeno disuelto y la velocidad del agua fueron los parámetros fisicoquímicos más influyentes en el desarrollo de distintas familias de macroinvertebrados acuáticos, las cuales fueron: Mesoveliidae, Tipulidae, Odontoceridae, Elmidae larvae, Naididae, y Helicopsychidae. A su vez, la familia Hyalellidae, que fue la más representativa de todo el estudio, presentó mayor afinidad con el pH y la temperatura.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 3. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA ENTRE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y FAMILIAS DE MACROINVERTEBRADOS

El análisis de correspondencia canónica mostró que el pH es uno de los parámetros que tiene relación con mayor cantidad de familias, entre las que se encuentran Gammaridae, Hyalellidae, Glosiiphonidae, Haplotaixidae, Physidae e Hidropsychidae. Este parámetro se comportó de manera neutra en la parte baja y tendiendo a ser ácida en la parte alta de la subcuenca; los suelos de páramos son, por lo general, de origen volcánico y se caracterizan por ser húmedos y ácidos [36], sin embargo, las familias con las que está asociado este parámetro son de presencia de parte baja y media, por lo que su hábitat tiende a ser mejor en niveles neutros de pH.

A lo largo del estudio se encontró un total de 5762 individuos pertenecientes al orden Amphipoda, representando el 85 % del total de individuos, colectados principalmente en la parte baja y en menor medida en la parte media de la subcuenca, la mayoría se colectó para la temporada de transición; estos organismos se caracterizan por habitar en aguas someras [37], y remansos asociados a materia orgánica en descomposición [25] con importantes niveles de contaminación, soportando condiciones de

hipoxia y altos valores de alcalinidad [38], donde las concentraciones de oxígeno son bajas [39]. Se encontraron también organismos de la familia Physidae, que se caracterizan por soportar altos grados de contaminación, vivir en aguas estancadas [40]; además, en la parte baja, para las diferentes temporadas muestreadas, se encontró que cuando el pH llega a disminuir, la presencia de esta familia se verá amenazada, pues cuando el pH es muy ácido, derivará en una disminución de familias de caracoles, bivalvos, almejas, dáfnidos, efemerópteros y dípteros [9], siendo estos indicadores de mala calidad. Por otra parte, se encontró una disminución significativa de los individuos de la familia Baetidae, la cual fue representativa en la parte baja para la temporada seca, de igual modo fue representativa en la parte alta para la temporada de lluvias; este organismo vive generalmente en aguas lóxicas bien oxigenadas, indicadores de aguas limpias o ligeramente contaminadas [31]. También se encontró que la familia Simuliidae fue aumentando su presencia en la parte alta de la subcuenca de la temporada de transición a la temporada de lluvias; esto puede indicar un leve aumento de la calidad del agua para este tramo en el tiempo, ya que esta familia se caracteriza por habitar en aguas limpias [41].

4. CONCLUSIONES

Los índices de calidad del agua del río Teusacá presentaron diferentes resultados, evidenciándose una disminución de la calidad en un gradiente longitudinal. Para la parte baja y media de la subcuenca (E2 y E3) el estado de la calidad del agua fue moderadamente contaminada, presentando una contaminación significativa, con una tendencia a presentar aguas muy contaminadas. Mientras que, por su parte, la parte alta (E1) presentó una mejora en la calidad, sin embargo sigue presentando contaminación.

Los parámetros pH y oxígeno disuelto son los que presentan una mayor sensibilidad en cuanto a la adaptabilidad de un gran número de familias en el cauce; por lo tanto, ligeras variaciones en sus valores pueden llegar a representar un cambio significativo en la presencia y abundancia de dichos organismos.

De manera general, para los tres muestreos realizados y en las tres estaciones de muestreo en la subcuenca se evidenció una baja diversidad y, respectivamente, una alta dominancia por parte de las familias de macroinvertebrados acuáticos, especialmente por parte de las familias Hyalellidae y Gammaridae.

Se determinó que en el caso del río Teusacá no existe una diferencia significativa entre las temporadas climáticas y el resultado de los índices de calidad y diversidad, afirmándose una independencia entre dichas variables, exceptuando el Índice Biótico de Familias.

Los parámetros fisicoquímicos más influyentes sobre el desarrollo de las familias de macroinvertebrados fueron el oxígeno disuelto en Mesoveliidae, Tipulidae, Odon-

toцерidae, Elmidae larvae, Naididae, y Helicopsychidae; y el pH en Gammaridae, Hyalellidae, Glosiiphonidae, Haplotaxidae, Physidae e Hidropsychidae.

REFERENCIAS

- [1] P. O. Johansen et al., “Temporal changes in benthic macrofauna on the west coast of Norway resulting from human activities”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 128, n.º September 2017, pp. 483–495, 2018. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.01.063
- [2] C. Hernández, “Estructura de la comunidad de insectos bentónicos del Río Anisacate, La Bolsa, Córdoba, Argentina”, Universidad Nacional de Córdoba, 2017.
- [3] S. Muñoz y D. Beltrán, “Perfil Ambiental de la subcuenca del río Teusacá de la cuenca alta del río Bogotá,” tesis de pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá, 2010.
- [4] J. Alba-Tercedor, “Macoinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos,” *IV Simp. del Agua en Andalucía*, vol. 2, no. 2, pp. 203–213, 1996.
- [5] M. Duran & M. Suicmez, “Utilization of both benthic macroinvertebrates and physicochemical parameters for evaluating water quality of the stream Cekerek(Tokat, Turkey)”, *J. Environ. Biol.*, vol. 28, n.º 2, pp. 231–236, 2007. doi: <https://dx.doi.org/10.3906/zoo-1310-9>
- [6] R. Figueroa et al., “Macroinvertebrados bentonicos como indicadores de calidad de agua de ríos del sur de Chile”, *Rev. Chil. Hist. Nat.*, vol. 76, n.º 2, pp. 275–285, 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2003000200012>
- [7] D. Rodríguez A., E. M. Andrade R., Á. D. Pérez L., and M. Cifuentes V., “Valoración de la calidad del agua del río La Plata mediante el uso de macroinvertebrados como bioindicadores”, *Rev. Nov.*, vol. 2, n.º 1, p. 90, 2016.
- [8] S. Mustow, “Biological monitoring of rivers in Thailand: use and adaption of the BMWP score”, *Hydrobiologia*, pp. 36–43, 2002. doi: 10.1023/A:1021055926316.
- [9] M. C. Arango et al., “Calidad Del Agua De Las Quebradas La Cristalina Y La Risaralda, San Luis, Antioquia”, *Rev. EIA*, n.º 9, pp. 121–141, 2008.
- [10] J. A. Gil, “Determinación de la calidad del agua mediante variables fisicoquímicas y la comunidad de macroinvertebrados como bioindicadores de calidad del agua en la cuenca del Río Garagoa”. Universidad de Manizales, 2014.
- [11] W. L. Hilsenhoff, “Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index”, vol. 7, n.º 1, pp. 65–68, 1988.
- [12] P. E. Gutiérrez-Fonseca y A. Ramirez, “Evaluación de la calidad ecológica de los ríos en Puerto Rico: principales amenazas y herramientas de evaluación”, *Hidrobiologica*, vol. 26, n.º 3, pp. 433–441, 2016. doi: 10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2016v26n3/Ramirez

- [13] P. A. Cordero, “Calidad del agua para los ríos alto andinos, mediante indicadores biológicos”, p. 104. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2015.
- [14] S. M. Álvarez y L. Pérez, “Evaluación de la calidad de agua mediante la utilización de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca del Yeguaré, Honduras”, p. 69. Universidad de Zamorano, 2007.
- [15] K. Gutierrez y D. Morales, “Caracterización de la calidad del agua de la quebrada los Cáquezas, mediante la utilización de macroinvertebrados acuáticos”, p. 110. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.
- [16] N. Prat et al., “Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas”, en *Macroinvertebrados bentónicos Sudamericanos*. San Miguel de Tucumán: Fundación Miguel Lillo, 2006, p. 645.
- [17] M. P. Silveira et al., “Application of Biological Measures For Stream Integrity Assessment in South-East Brazil,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 101, pp. 117–128, 2005. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-005-9141-1>
- [18] Ecoforest LTDA, “Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Teusacá – 2120-13”, 2006.
- [19] L. Pedraza, “Análisis y evaluación del impacto ambiental de los procesos de urbanización campestre en el sector de la cuenca media-baja del río Teusacá, municipios de La Calera, guasca y Sopó”, Pontificia Universidad Javeriana, p. 111, 2014.
- [20] L. F. Álvarez Arango, *Metodología Para la Utilización de los Macroinvertebrados Acuáticos Como Indicadores de la Calidad del Agua*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, n.º 05. Bogotá, D.C., 2005.
- [21] G. Roldán Pérez, *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Fondo para la Protección del Medio Ambiente “José Celestino Mutis”. Bogotá Editorial Presencia, 1988.
- [22] E. Domínguez y H. Fernández, *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y Biología*. Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo, 2009.
- [23] J. Oscoz, *Macroinvertebrados de la Cuenca del Ebro : descripción de taxones y guía de identificación*. Navarra, España, 2009.
- [24] A. Gonzalez Valencia et al., *Hidrobiológicos jurisdicción de Corantioquia*. Antioquia: Corantioquia, 2016.
- [25] G. A. Roldán Pérez, *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Propuesta para el uso del método BMWP*. Editorial Universidad de Antioquia, 2003.
- [26] C. Carrera Reyes y K. Fierro Peralbo, *Manual de monitoreo: Los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*, EcoCiencia. Quito, Ecuador: EcoCiencia, 2001.

- [27] C.A. Sierra, *Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico*. Universidad de Medellín, 2011.
- [28] C. Orozco et al., *Contaminación ambiental. Una visión desde la química*. Madrid: Thompson, 2003.
- [29] G. A. Patiño, “Evaluación de la calidad del agua por medio de bioindicadores macroinvertebrados acuáticos en la Quebrada la Vieja”, tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.
- [30] M. S. Pastran, “Evaluación de la calidad del agua mediante la utilización de macroinvertebrados bentónicos, como bioindicadores: Estudio de caso en el río Suárez (Chiquinquirá – Boyacá)”, tesis de pregrado, Universidad Libre, 2017.
- [31] Corporación Autónoma Regional de Tolima, “Fichas Efemerópteros”, pp. 1–6, 2012.
- [32] P. M. Castellanos y C. Serrato, “Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en un nacimiento de río en el páramo de Santurbán, norte de Santander”, *Water Manag.*, vol. 32, n.º 122, pp. 79–86, 1936.
- [33] A. Y. Cárdenas, B. Reyes, M. López, A. Woo, E. Ramirez, and M. Ibrahim, “Biodiversidad de macroinvertebrados acuáticos y la calidad del agua en la subcuenca de los ríos Bul Bul y Paiwas, Matiguás, Nicaragua,” *Revistasnicaragua.Net.Ni*, vol. 77, pp. 83–93, 2007.
- [34] I. S. López Erazo, S. Gaspar, y M. Peláez Rodríguez, “Aplicación de índices bióticos para la evaluación de la calidad del agua de un río Andino Amazónico”, n.º 2, pp. 106–112, 2012.
- [35] M. C. Villanueva, F. Cosme, y C. Zapata, “Análisis de la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos del río Cunas mediante indicadores ambientales, Junín-Perú”, vol. 7, n.º 1, pp. 33–44, 2016. doi: 10.17268/sci.agropecu.2016.01.04
- [36] M. A. Díaz-Granados Ortiz, J. D. Navarrete González y T. Suárez López, “Páramos: Hidrosistemas Sensibles,” vol. 49, pp. 0–7, 2007.
- [37] E. Erica y V. Pozo, “Distribución espacio-temporal de larvas de Chironomidae (Diptera) en un arroyo andino (Uspallata, Mendoza, Argentina)”, vol. 67, pp. 45–58, 2008.
- [38] R. W. Pennak, *Fresh-water Invertebrates of the United States*, Third Edit. New York: Wiley-Interscience, 1991.
- [39] C. Noreña, C. Damborenea y F. Brusa, “Phylum Platyhelminthes”, in *Ecology and General Biology: Thorp and Covich’s Freshwater Invertebrates*, J. Thorp & D.C. Rogers (eds.), vol. 1, n.º January, 2015, pp. 1–8. doi: 10.1016/B978-0-12-385026-3.00010-3
- [40] E. A. Parra y L. F. Carvajal, “Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales”, pp. 1–15, 2012.
- [41] G. Roldán Pérez, *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Bogotá, D.C.: Editorial FEN Colombia, 1996.