

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-06-04

Artículos

Calidad de agua de la quebrada Mamarramos. Santuario de Flora y Fauna Iguaque, Colombia

Water quality of Mamarramos stream. The Sanctuary of Fauna and Flora Iguaque, Colombia

Alexandra Cerón-Vivas¹

Yolanda Gamarra²

Maryory Villamizar³

Ricardo Restrepo⁴

Reinaldo Arenas⁵

¹Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, alexandra.ceron@upb.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6234-0639>

²Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, yolanda.gamarra@upb.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4099-8499>

³Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, maryory.villamizar@upb.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-8794-8413>

⁴Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, ricardo.restrepom@upb.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-2059-9845>

⁵Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, reinaldo.arenas@upb.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-9765-3520>

Autor para correspondencia: Alexandra Cerón-Vivas,
alexandra.ceron@upb.edu.co

Resumen

El Santuario de Fauna y Flora de Iguaque (SFFI) es un área protegida por Parques Nacionales Naturales de Colombia (SPNN), perteneciente a la región andina colombiana, que abarca ecosistemas de páramo y bosque andino. El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad del agua de la quebrada Mamarramos, ubicada en el SFFI, y formada por la confluencia de las quebradas Francos y Carrizal, fuente de abastecimiento de las comunidades de la región. Se realizaron tres jornadas de muestreo, en estación seca, en diez puntos de monitoreo. Se calcularon índices biológicos a partir de las especies de macroinvertebrados colectados; índices fisicoquímicos, y el índice de calidad ecológica (ICE) basado en análisis multivariante, relacionando la abundancia de macroinvertebrados y las variables fisicoquímicas. Se colectaron 7 521 individuos, distribuidos en ocho clases, 16 órdenes y 57 familias. *Leptoceridae* (19%), *Calamoceratidae* (11.8%) y *Psephenidae* (10.8%) fueron las familias que presentaron mayor frecuencia. Los resultados confirmaron la buena calidad del agua de las quebradas, la cual no es afectada por los sistemas de tratamiento de aguas residuales *in situ*.

Palabras clave: área protegida, macroinvertebrados, Índice de calidad ecológica, Índices fisicoquímicos.

Abstract

The Sanctuary of Fauna and Flora Iguaque (SFFI) is a protected area by Natural National Parks of Colombia (NNP), belonging to the Colombian Andean Region that includes paramo and Andean forest ecosystems. The aim of this study was to assess the water quality of Mamarramos stream, located in SFFI and formed by the confluence of the Francos and Carrizal streams, source of supply of the region communities. Three days of sampling were carried out in dry season, at ten monitoring points. Biological indexes from the species of macroinvertebrates collected, physicochemical indexes and the ecological quality index (EQI) were calculated. A total of 7 521 individuals distributed in eight classes, 16 orders y 57 families were found. *Leptoceridae* (19%), *Calamoceratidae* (11.8%) and *Psephenidae* (10.8%) were the families with the highest frequency. The results confirmed the good water quality of the streams which is not affected by the *in situ* wastewater treatment systems.

Keywords: Protected area, macroinvertebrates, ecological quality index, physicochemical indexes.

Recibido: 29/11/2017

Aceptado: 20/03/2019

Introducción

Colombia es uno de los países más ricos en diversidad biológica en el mundo. Tal diversidad está representada en 59 áreas naturales protegidas pertenecientes al Sistema de Parques Nacionales Naturales, que representan 142 682 km² de la superficie nacional. El Santuario de Fauna y Flora de Iguaque (SFFI) es un área protegida perteneciente a la región andina colombiana, que abarca ecosistemas de páramo y bosque andino, y es de importancia vital como proveedor de servicios ecosistémicos, como el abastecimiento de agua para el consumo de los municipios de Villa de Leyva, Arcabuco y Chíquiza (Ministerio del Medio Ambiente, 2017a).

El páramo es un ecosistema tropical de montaña, único por los servicios ambientales que presta, dentro de los que se destaca la regulación y conservación del recurso hídrico. Se sitúa entre el límite superior de los bosques alto-andinos y el límite inferior de las zonas nivales, entre los 3 100 y 4 000 msnm. Su temperatura es baja y por lo general muy húmeda debido a las frecuentes lluvias y neblina. En Latinoamérica, sólo Venezuela, Ecuador, Perú y Costa Rica cuentan con páramos tropicales, ubicados, casi todos, salvo los de la Sierra Nevada de Santa Marta y los de Costa Rica, en la cordillera de los Andes (Greenpeace, 2013).

En Colombia, los páramos abarcan 29 061.3 km², equivalentes apenas al 2.5% del territorio continental; sin embargo, representan el 50% de ecosistemas paramunos del mundo (Ministerio del Medio Ambiente, 2017b); además, dan origen a las cuencas hídricas que abastecen gran parte del país, suministrando agua a 70% de la población colombiana

(Vásquez & Buitrago, 2011). Se estima que la producción de agua de alta montaña ($> 2\ 744$ msnm) es de $66.5\text{ km}^3/\text{año}$, cantidad que corresponde a un 3% del volumen total anual de precipitación del país (Avellaneda-Torres, Torres, & León-Sicard, 2014). Además, los páramos son centros de endemismo de flora (8%) y fauna, fundamentales para mitigar los efectos del cambio climático debido a la capacidad de su vegetación y suelos para retener diez veces más la cantidad de carbono que un metro cuadrado de bosque seco tropical (Vásquez & Buitrago, 2011).

Un 50% de los páramos en Colombia está vinculado con zonas protegidas (Gómez, Moreno, Andrade, & Rueda, 2016), sin embargo son objeto de procesos de transformación y degradación debido principalmente a prácticas de agricultura intensiva, conversión a sistemas de ganadería extensiva, explotación minera y establecimiento de infraestructura (Cabrera & Ramírez, 2014), generando pérdida del ecosistema nativo del 15.9% (Gómez *et al.*, 2016) y afectando la calidad del recurso hídrico. El SFFI no ha sido ajeno a esta afectación, pues posee infraestructura para la sede administrativa, zona de *camping*, centro de visitantes y restaurante, para el servicio a visitantes que practican ecoturismo.

En los últimos años, las comunidades aledañas al SFFI y los usuarios que se benefician de la captación de agua proveniente de la quebrada Mamarramos presentaron reclamos por el deterioro de la calidad del agua. Para dar respuesta, los administrativos del SFFI implementaron sistemas de tratamiento de agua residual doméstica *in situ* en la sede administrativa, centro de visitantes y área de *camping*, a fin de disminuir el impacto de las aguas residuales sobre la quebrada y asegurar que las bocatomas localizadas aguas abajo cumplan con los parámetros establecidos por la legislación colombiana para uso de agua con fines de potabilización.

Teniendo en cuenta lo anterior, la calidad del recurso hídrico debe ser monitoreada de manera frecuente para la ejecución de acciones preventivas o correctivas. Con el propósito de valorar la calidad del agua se han empleado varias metodologías, entre las que se incluyen la comparación de las variables con la normatividad vigente; indicadores de calidad y contaminación (ICA e ICOS, respectivamente) para transformar los datos de variables fisicoquímicas y microbiológicas del agua, en un valor que califica y cualifica la fuente (Companhia Ambiental

do Estado de São Paulo, 2014; Ramírez, Restrepo, & Viña, 1997); indicadores hidrobiológicos, a partir de la composición de macroinvertebrados en un cuerpo de agua; índice de calidad ecológica (ICE), que permite integrar la información de abundancia de cada familia de macroinvertebrados y las variables fisicoquímicas en un único valor que expresa un gradiente ambiental de calidad de agua (Haase & Nolte, 2008).

El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua de la quebrada Mamarramos, a partir de índices hidrobiológicos y fisicoquímicos, así como del Índice de Calidad Ecológica, para determinar el efecto de la actividad antrópica en el Santuario de Fauna y Flora de Iguaque.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El estudio se realizó en la quebrada Mamarramos, perteneciente al SFFI, que se forma por la confluencia de las quebradas Francos y Carrizal. Para caracterizar la calidad del agua de la quebrada y el efecto de la actividad antrópica en el SFFI, se identificaron 10 puntos de monitoreo distribuidos en las quebradas Carrizal, Francos y Mamarramos, teniendo en cuenta la ubicación de bocatomas, presencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales y características topográficas (Figura 1).

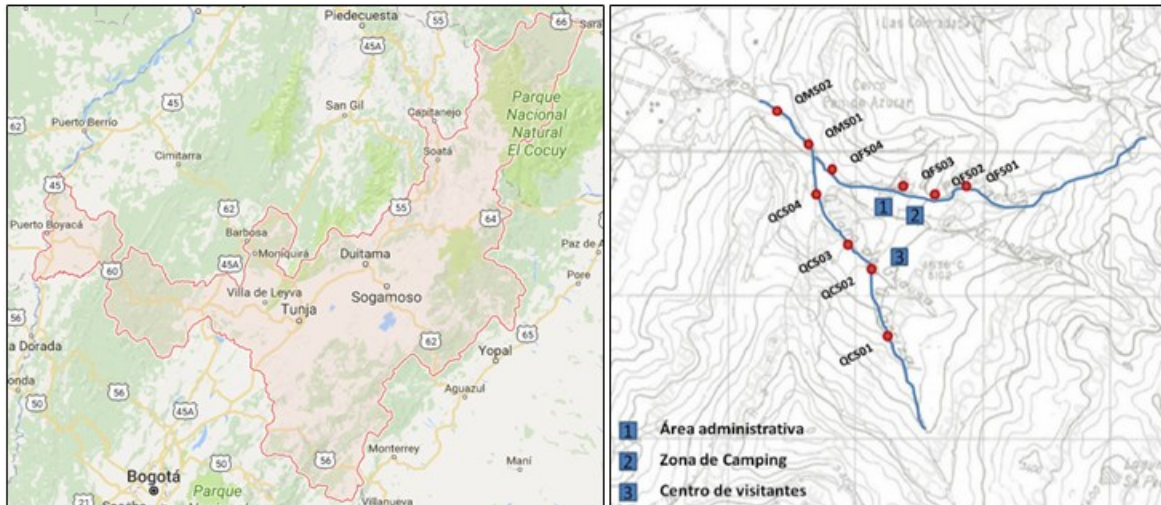


Figura 1. Ubicación de puntos de muestreo.

Se realizaron tres jornadas de muestreo durante la estación seca del año. La descripción de los puntos de muestreo se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los puntos de muestreo. QC: quebrada Carrizal; QF: quebrada Francos; QM: quebrada Mamarramos; S: estación seca; CI: campo de infiltración.

Estación de muestreo	Nombre	Altitud (msnm)	Coordenadas geográficas
QC, antes de bocatoma	QCS01	3037 ±	5° 41' 48.2" N, 73° 27'
QC, después del CI del centro de visitantes	QCS02	2897 ±	5° 42' 11"N, 73° 27'
QC, después del CI del área administrativa	QCS03	2839 ±	5° 42' 26.6 "N, 73° 27'
QC, antes de la confluencia con la QF	QCS04	2827 ±	5° 42' 29.4"N, 73° 27'
QF, antes de bocatoma	QFS01	2860 ±	5° 42' 15.9"N, 73° 27'
QF, antes del CI de la zona de camping	QFS02	2856 ±	5° 42' 33.1"N, 73° 27'
QF, después del CI de la zona de <i>camping</i>	QFS03	2849 ±	5° 42' 25.7"N, 73° 27'
QF, antes de la confluencia con la QC	QFS04	2827 ±	5° 42' 29.4"N, 73° 27'
QM, después de la unión de QF y QC	QMS01	2810 ±	5° 42' 32.6"N, 73° 27'
QM, después de bocatoma	QMS02	2718 ±	5° 42' 42.5", 73° 27'

Macroinvertebrados

La captura de macroinvertebrados se llevó a cabo por recolección manual (Roldán, 2003), en un área de 10 m², mediante la técnica de coriotopos propuesta por Rincón (1996). Cada coriotopo se muestreó en un área aproximada de 1 m² utilizando una red de mano, con ojo de malla de 450 µm y un área de 0.1 m². Los coriotopos seleccionados para cada estación de muestreo fueron los siguientes: musgos y piedras en corriente rápida y lenta, cascada, hojarasca, salpicadura y ribera (Medellin, Ramírez, & Rincón, 2004). Los muestreos se realizaron en horas diurnas, de 9:00 am a 5:00 p.m., teniendo en cuenta el tiempo de mayor actividad de los macroinvertebrados. Los organismos colectados se conservaron en recipientes plásticos sumergidos en solución *transeau* (agua, etanol al 90% y formol al 40%, en proporciones 6:3:1, respectivamente) a un volumen 1:1 de solución y 20 ml de agua destilada (Arcos-Pulido & Gómez, 2006; Corredor & Forero, 2011). Los macroinvertebrados fueron identificados hasta el nivel de familia, utilizando un estereoscopio marca Nikon SMZ 745 T, acompañado de un sistema de iluminación NI-150 Nikon Instrumets Inc. Para la determinación taxonómica de los especímenes se aplicaron claves de diferentes autores y guías de campo (Bouchard, 2004; Clifford, 1991; Domínguez & Fernández, 2009; McCafferty, 1983; Merritt, Cummins, Hunt, Company, & Wallace, 1996; Roldán, 1988, 2003; Springer, Ramírez, & Hanson, 2010).

Se construyó la curva de diversidad acumulada, a partir de los datos acumulados del índice de diversidad de Shannon y la abundancia de organismos capturados, para establecer la representatividad de la muestra (Ramírez, 2006). Para el cálculo de los índices BMWP/Col e ICOBIO, se siguió el procedimiento descrito por Roldán (2003), y Ramírez y Viña (1998), respectivamente.

Parámetros fisicoquímicos

La recolección, preservación, transporte y almacenamiento de muestras se realizó de acuerdo con las recomendaciones de los métodos estándar (APHA, AWWA, & WEF, 2012). Se realizaron análisis *in situ* de turbiedad (TD), con un turbidímetro portátil marca Hach; oxígeno disuelto (OD); conductividad (CD); pH, y temperatura, utilizando un multiparámetro marca Hach. Además se realizaron mediciones de caudal y se colectaron muestras en cada punto para analizar los siguientes parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), nitrógeno total kjendahl (NTK), nitratos (NO_3), fósforo total (PT), fosfatos (PO_4), dureza total (DT), alcalinidad total (AT) y cloruros (Cl^-). Todos los análisis de laboratorio se realizaron con base en los métodos estándar (APHA, AWWA, & WEF, 2012). Teniendo en cuenta temperatura, oxígeno disuelto y altitud, se calculó la concentración de saturación con la ecuación propuesta por Whipple y Whipple, citada por Romero-Rojas (1999), y el porcentaje de saturación de oxígeno en cada punto de monitoreo. El caudal en los puntos QFS01, QFS02, QMS01 y QMS02 se determinó con el método de área-velocidad (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007), usando un micromolinete marca Rickly Hidrológica; en los puntos QCS01, QCS02, QCS04 y QFS03 se aforó con el método volumétrico ((Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007).

Con los resultados de los parámetros fisicoquímicos se calcularon los índices de contaminación por mineralización-ICOMI y materia orgánica-ICOMO a partir de la metodología establecida por Ramírez, Restrepo y Viña (Ramírez et al., 1997). El ICOMI es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables que integra (conductividad, dureza y alcalinidad), las cuales se definen en un rango entre 0 y 1. Índices cercanos a cero (0) reflejan muy baja contaminación por mineralización; por el contrario, índices cercanos al máximo valor posible (1) indican un alto grado de contaminación (Jimenez & Velez, 2006). El ICOMO es el valor promedio de cada una de las tres variables que integra (DBO_5 , CT y porcentaje de saturación de oxígeno) (Ramírez et al., 1997).

Asimismo, se calculó el índice de calidad de agua de la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental de Brasil (ICA-CETESB), que incluye parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2014). La ecuación (1) representa el ICA-CETESB,

el cual es el producto de la multiplicación de nueve parámetros elevados a un valor atribuido en función de la importancia del parámetro. La sumatoria de todos los puntajes obtenidos de las diferentes características se califican de acuerdo con las categorías consignadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Categorización según ICA-CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2014).

Clase	Calidad	Rango
I	Óptima	80-100
II	Buena	52-79
III	Dudosa	37-51
IV	Inadecuada	20-36
V	Pésima	0-19

$$ICA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Donde:

ICA = Índice de Calidad de Agua (número entre 0 y 100).

q_i = calidad del parámetro, número entre 0 y 100, obtenido de la respectiva curva media de variación de calidad, en función de su concentración.

w_i = peso correspondiente, un número entre 0 y 1, atribuido en función de su importancia para la conformación global de la calidad.

i = número de parámetros, variando de 1 a 9 ($n = 9$, o sea, número de parámetros que componen el ICA).

Índice de calidad ecológica

Este índice utiliza diferentes técnicas estadísticas multivariantes (Haase & Nolte, 2008) a partir de la siguiente secuencia:

1. Construcción de las matrices de entrada a partir de los valores medios y visualización de la estructura por análisis de componentes principales (*Biplot*). La sumatoria de las abundancias de macroinvertebrados en los 10 puntos de muestreo se clasificó con base en los criterios de bioindicación propuestos por Roldán (2003) y, en paralelo, se construyó la matriz de resultados de los análisis fisicoquímicos obtenidos.
2. Determinación de un gradiente ambiental desde un Análisis de Correlación Canónica (ACC), técnica desarrollada por Hotelling (1936).
3. Reescalamiento de los *samples scores* obtenidos del ACC (Haase & Nolte, 2008).
4. Obtención de los puntajes óptimos y de tolerancias para cada taxón, a partir de un análisis de promedios ponderados (*Weighted Averaging, WA*), desarrollado por Whittaker (1973), utilizando los puntajes escalados.
5. Construcción del ICE, a partir de la ecuación propuesta por Haase y Nolte (2008)).

Finalmente, se agruparon los puntos de muestreo considerando el valor del ICE, utilizando un *cluster* jerárquico aglomerativo. El ICE se calificó de acuerdo con las categorías consignadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Categorización de acuerdo con el ICE.

Calidad	ICE
Buena	> 6:1
Regular	5 - 6
Critica	≤ 4:9

Resultados y discusión

Macroinvertebrados

Se colectaron 7 521 individuos, distribuidos en ocho clases, 16 órdenes y 57 familias (Tabla 4). De las familias identificadas, las que presentaron mayor frecuencia fueron: *Leptoceridae* (19%), *Calamoceratidae* (11.8%), *Psephenidae* (10.8%), *Helicopsychidae* (9.7%) y *Planariidae* (7.7%). Al analizar el material colectado, las familias que presentaron mayor frecuencia representan el 59% del total de los individuos capturados durante las tres jornadas de muestreo. Todas las familias capturadas son representantes de cuerpos lóticos y tienen valoraciones de bioindicación para agua de buena calidad, posiblemente asociados con su ubicación en una zona de reserva, en donde se destacan algunas características propias de sistemas acuáticos de alta montaña: lechos rocosos y nivel de conservación de los bosques riparios (Morelli & Verdi, 2014).

Tabla 4. Familias y abundancias de macroinvertebrados.

Familia	QFS01	QFS0	QFS0	QFS0	QCS0	QCS0	QCS0	QCS0	QMS0	QMS0	Total
<i>Ampullariidae</i>		1			3		22				26
<i>Anomalopsy-chidae</i>	1	2	1							1	5
<i>Baetidae</i>	51	22	1	7	79	8	2	3	7	48	228
<i>Blataridae</i>	1						2	1			4
<i>Blephariceridae</i>	1				2			1		1	5
<i>Calamoceratida</i>	66	81	66	82	69	76	108	89	101	150	888
<i>Ceratopogonida</i>	2	11	3	1	4	4	2	4	3	3	37
<i>Chironomidae</i>	20	28	14	31	17	32	30	10	39	26	247
<i>Chordodidae</i>							1				1
<i>Chrysomelidae</i>	1				1	6	2	2	1	2	15
<i>Curculionidae</i>					1			1			2
<i>Dixidae</i>		2	2	6		1	10	7	6	18	52
<i>Dolichopodidae</i>										1	1
<i>Dytiscidae</i>					1				2	1	4
<i>Elmidae</i>	3	2	7	3	1	5	2	4	4	10	41
<i>Empididae</i>		1			1	1		1	2	1	7
<i>Entomobrydae (Collembola)</i>		1			3				1		5
<i>Ephydriidae</i>					1						1

<i>Girinidae</i>	2										2
<i>Glossosomatidae</i>	172	42	22	22	40	34	40	19	20	21	432
<i>Helicopsychidae</i>	6	69	79	40	18	58	83	44	244	89	730
<i>Hyaellidae</i>	24	25	7		28	8	8	1	22		123
<i>Hydracnidae</i>				2	1	4	1	2	5	6	21
<i>Hydrobiosidae</i>	15	9	15	12	25	13	20	16	19	6	150
<i>Hydrophilidae</i>	1					2	3	3		1	10
<i>Hydropsychidae</i>	22	10	12	5	5	12	8	22	12	24	132
<i>Hydroptilidae</i>	1									1	2
<i>Isopoda</i>	1	3	1		85	11	28	12	9	1	151
<i>Isotomidae (Collembola)</i>										1	1
<i>Lampiridae</i>							1	2		2	5
<i>Leptoceridae</i>	76	199	275	122	64	86	115	62	157	305	1461
<i>Leptohiphidae</i>	3	2	7	6	1	5	1	7	34	15	81
<i>Leptophlebidae</i>	10	22	7	5	13	9	8	2	9	24	109
<i>Libellulidae</i>										1	1
<i>Muscidae</i>	2										2
<i>Perlidae</i>	6	5	6	7	8	17	7	21	9	75	161
<i>Phylipotamidae</i>				2		2			1	1	6
<i>Pisauridae</i>	4	4	3		15	7	10	1	2	11	57
<i>Planariidae</i>	48	56	38	28	44	66	86	26	141	46	579
<i>Polidesmidie</i>	2				3		1	1			7
<i>Polycentropodidae</i>		1	1	3			6	2	2	1	16
<i>Psephenidae</i>	68	94	95	88	67	90	138	54	11	107	812
<i>Pseudothelphusidae</i>										1	1
<i>Psychodidae</i>	1										1
<i>Ptilodactylidae</i>	6	18	15	11	20	31	33	13	19	11	177
<i>Puduridae</i>									1		1
<i>Pyralidae</i>					3						3
<i>Scirtidae</i>	54	18	17	12	40	29	47	27	46	17	307
<i>Simuliidae</i>	21	74	17	8	11	31	10	49	17	46	284
<i>Sphaeriidae</i>	1	7	4	2	1	2		2	1		20
<i>Staphilinidae</i>	1	3	5	1	4	6	8	4	11	6	49
<i>Synlestidae</i>				1				1	1	1	4
<i>Tabanidae</i>							1		2		3
<i>Tipulidae</i>	7	4		2	12	5	4	3	4	1	42

<i>Torridincolidae</i>			1								1
<i>Tubificidae</i>						2				1	3
<i>Xiphocentronidae</i>		1	3							1	5
Total de individuos	700	817	724	509	691	663	848	519	965	1 085	7 521

El valor obtenido en la curva de acumulación de taxones fue de 83% (Gamarra *et al.*, 2017), demostrando que el número de puntos de monitoreo, las técnicas y actividades relacionadas con la captura, y el esfuerzo de muestreo de los macroinvertebrados fueron suficientes para alcanzar alta representatividad (González-Valdivia *et al.*, 2017). Los valores de diversidad de Shannon, presentados en la Figura 2, fueron de 2.7 ± 0.09 , reflejando las condiciones naturales del ecosistema en el momento del muestreo e indicando alta diversidad, con base en lo reportado por Ramírez (2006) para zonas prístinas de alta montaña.

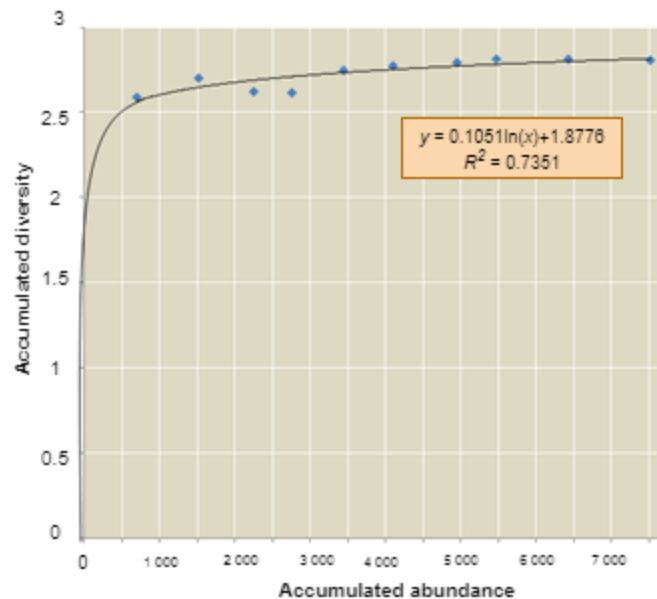


Figura 2. Curva de diversidad acumulada.

En la Tabla 5 se muestra los resultados obtenidos para el BMWP/Col., los cuales fueron superiores a 120 en todos los puntos de muestreo evaluados.

Tabla 5. Índice BMWP/Col.

Muestra	QFS01	QFS02	QFS03	QFS04	QCS01	QCS02	QCS03	QCS04	QMS01	QMS02
1	124	99	119	99	125	153	134	129	158	119
2	151	162	165	135	151	116	145	172	150	168
3	158	149	151	147	135	135	136	152	148	230

De acuerdo con el índice BMWP/Col., la calidad del agua para los puntos QFS02 y QFS04 sobre la quebrada Francos registraron un valor de 99 en el primer muestreo, calificando como aceptable, indicando agua ligeramente contaminada (Roldán, 2003). Este resultado se asocia con la cercanía con el sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en la zona de *camping*. Los ocho puntos restantes fueron clasificados como aguas limpias, con valores superiores a 101 (Roldán, 2003). A pesar de la proximidad en los valores obtenidos, la tabla de calificación para el BMWP establece que hasta 100 las aguas se califican como ligeramente contaminadas; valores superiores a 100 estarán en la categoría de aguas limpias a muy limpias (Roldán, 2003). Tal diferencia se asocia con los rangos establecidos por este índice desde sus inicios (Alba-Tercedor, 1996); sin embargo, valores cercanos a dichos límites (99 o 101) se podrán considerar de la misma calidad, para este caso, aguas limpias.

El índice BMWP/Col. en la segunda y tercera jornada de muestreo calificó el agua en los 10 puntos de muestreo como buena, coincidiendo con lo reportado por Luna (2009) y Medellín *et al.* (2004). Al establecer relación entre los datos de los estudios previos y el presente trabajo, se puede demostrar que las condiciones de la quebrada Mamarramos han sido ligeramente afectadas a través del tiempo.

Parámetros fisicoquímicos

Los valores promedio y desviaciones estándar de las características fisicoquímicas medidas en las quebradas se muestran en la Tabla 6. La temperatura del agua fue similar en los muestreos 1 y 2 para cada punto de monitoreo (con excepción del punto 4 sobre la quebrada los Francos). Para el tercer muestreo se presentó un aumento en la temperatura de un 1.5 °C (con excepción del punto 3 sobre la quebrada los Francos, el cual permanece constante para todas las fechas de muestreo). La concentración de OD varió entre 6.6 y 7.7 mg/l en la primera y tercera jornada de muestreo, y en el segundo muestreo osciló entre 7.2 y 8.6 mg/l. El porcentaje de saturación de oxígeno para la quebrada Carrizal, Francos y Mamarramos fue de $97.9 \pm 1.7\%$, $93.9 \pm 3.1\%$ y $97.7 \pm 1.8\%$. La conductividad en las quebradas Carrizal y Mamarramos fue inferior a la registrada en la quebrada Francos en aproximadamente un 50%. Sin embargo, todos los valores obtenidos en las quebradas (de 26.6 a 73.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$) corresponden a conductividad baja, propia de agua dulce, indicando ser apta para ciertas especies de peces e invertebrados. El pH en las tres quebradas fue ligeramente ácido o cercano a la neutralidad, y los valores de conductividad fueron bajos, siendo propios de ecosistemas acuáticos de alta montaña, favoreciendo la diversidad de especies (Roldán, 2012).

Tabla 6. Características fisicoquímicas de las quebradas Carrizal, Francos y Mamarramos.

Parámetro	Unidad	QCS01	QCS02	QCS03	QCS04	QFS01	QFS02	QFS03	QFS04	QMS01	QMS02
OD	mg/l	7.8 \pm 0.6	7.7 \pm 0.4	7.8 \pm 0.5	7.3 \pm 0.3	7.2 \pm 0.3	7.0 \pm 0.2	7.0 \pm 0.3	6.9 \pm 0.3	7.5 \pm 0.3	7.4 \pm 0.2
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	34.2 \pm 4.2	33.6 \pm 4.3	32.5 \pm 3.7	27.7 \pm 0.9	18.4 \pm 1.8	58.2 \pm 14.5	55.8 \pm 12.2	53.1 \pm 9.6	37.7 \pm 2.1	36.4 \pm 1.9
pH	un.	6.8 \pm 0.2	7.0 \pm 0.5	7.1 \pm 0.4	7.3 \pm 0.4	7.2 \pm 0.5	7.5 \pm 0.3	7.3 \pm 0.5	7.3 \pm 0.5	6.9 \pm 0.1	7.2 \pm 0.4
TC		10.4 \pm 0.8	11.5 \pm 1.2	11.6 \pm 0.6	12.8 \pm 0.7	11.5 \pm 0.8	13.4 \pm 0.7	13.8 \pm 1.4	13.3 \pm 1.3	12.8 \pm 0.5	12.7 \pm 1.2
Turbiedad	UNT	2.0 \pm 2.1	0.6 \pm 0.2	1.0 \pm 0.7	0.6 \pm 0.1	0.7 \pm 0.2	1.0 \pm 0.3	0.8 \pm 0.2	1.4 \pm 0.6	0.9 \pm 0.4	0.7 \pm 0.2
Alcalinidad	mg/l	15.5 \pm 8.3	15.7 \pm 2.0	7.2 \pm 6.9	25.0 \pm 9.0	20.7 \pm 13.7	23.0 \pm 4.4	20.5 \pm 10.0	23.7 \pm 14.8	12.7 \pm 3.4	15.7 \pm 4.8

Dureza	mg/l	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5 ± 6.7	9.7 ± 11.9	14.3 ± 9.4	2.3 ± 4.0	8.8 ± 6.2	4.2 ± 5.2
ST	mg/l	20.0 ± 10.4	5.3 ± 8.1	30.3 ± 20.3	3.7 ± 19.6	2.7 ± 14.4	8.3 ± 2.3	21.7 ± 2.3	27.7 ± 1.2	24.3 ± 20.2	5.7 ± 9.2
SST	mg/l	0.9 ± 1.3	5.5 ± 27.2	1.8 ± 1.0	2.5 ± 0.8	4.1 ± 5.8	2.6 ± 3.9	1.6 ± 0.6	7.9 ± 9.8	1.3 ± 0.3	1.4 ± 0.7
DBO	mg/l	0.7 ± 0.3	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.3	1.3 ± 1.3	0.4 ± 0.3	0.4 ± 0.2	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.2	0.3 ± 0.3	0.5 ± 0.2
NTK	mg/l	1.1 ± 0.5	1.1 ± 0.5	1.8 ± 0.9	1.1 ± 0.5	1.8 ± 0.9	6.8 ± 8.2	1.8 ± 0.9	1.6 ± 1.1	1.6 ± 1.1	1.1 ± 0.5
Nitratos	mg/l	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.3	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.5	1.3 ± 0.7	1.0 ± 0.4	1.0 ± 0.4	0.8 ± 0.7	0.6 ± 0.5	0.6 ± 0.5
Fósforo	mg/l	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2 ± 0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Fosfatos	mg/l	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cloruros	mg/l	0.4 ± 0.6	0.9 ± 0.2	0.8 ± 0.8	0.6 ± 0.5	0.6 ± 0.4	0.5 ± 0.2	0.9 ± 0.7	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.4	0.5 ± 0.2
Caudal	l/s	6.7 ± 2.4	9.4 ± 3.9	*	10.1 ± 3.4	4.2 ± 2.1	4.0 ± 1.3	7.6 ± 2.1	*	13.1 ± 8.0	12.4 ± 10.6

La turbiedad presentó valores inferiores a 2 UNT en todos los puntos de monitoreo, con excepción del punto QCS01 en el segundo muestreo, que arrojó un valor de 4.4 UNT, indicando escasa presencia de sólidos suspendidos en el agua, coincidiendo con los valores obtenidos de este parámetro (< 20 mg/l). La alcalinidad estuvo entre 2 y 40 mg/l de CaCO₃, en todos los puntos de muestreo. En la quebrada Francos, la dureza estuvo entre 0 y 25 mg/l de CaCO₃, registrando los valores más elevados de este parámetro; la quebrada Carrizal no presentó dureza (0 mg/l de CaCO₃), y en la quebrada Mamarramos se obtuvieron valores entre 0 y 16 mg/l de CaCO₃.

La materia orgánica, en términos de DBO (< 1 mg/l), demuestra que la microcuenca tiene buena calidad y se encuentra en un ambiente oligosaprobio (Ramírez *et al.*, 1997). Además, los valores de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en todos los puntos son altos, evidenciando buena calidad del agua (Lynch & Poole., 1979). En cuanto a los nutrientes, el contenido de nitrógeno total kjendahl, nitratos, fósforo total y ortofosfatos fue mínimo, clasificando a la microcuenca como oligotrófica (Ramírez *et al.*, 1997). Los resultados de coliformes totales y fecales mostraron valores inferiores a 1 UFC, indicando escasa contaminación microbiológica en todos los puntos de muestreo. Lo anterior confirma la poca influencia de los sistemas de tratamiento de

aguas residuales sobre los cuerpos de agua, ya que éstas son unas de las principales fuentes de fósforo y nitrógeno y, por tanto, de eutroficación de los ecosistemas acuáticos.

El caudal presentado en el primer, segundo y tercer muestreo para cada una de las quebradas fue el siguiente: Francos, 4.5 ± 1.7 , 7.3 ± 2.5 y 4.0 ± 2.0 l/s; Carrizal, 6.2 ± 1.6 , 12.3 ± 2.7 y 7.7 ± 1.1 l/s; y Mamarramos, 7.8 ± 0.9 , 23.4 ± 1.6 y 7.0 ± 2.8 . El caudal registró valores más altos en el segundo muestreo debido a lluvias aisladas que se presentaron en días anteriores a la toma de muestras.

La Tabla 7 muestra los resultados promedio de los índices obtenidos en cada punto de muestreo durante las tres jornadas.

Tabla 7. Índices de contaminación y de calidad del agua.

Punto de muestreo	ICOMO	ICOMI	ICA-CETESB
QCS01	0.101 ± 0.016	0.021 ± 0.003	93.54 ± 0.88
QCS02	0.100 ± 0.010	0.020 ± 0.003	94.76 ± 0.90
QCS03	0.097 ± 0.012	0.020 ± 0.003	94.32 ± 1.10
QCS04	0.105 ± 0.005	0.016 ± 0.001	94.40 ± 1.55
QFS01	0.114 ± 0.011	0.009 ± 0.001	94.31 ± 0.98
QFS02	0.110 ± 0.006	0.043 ± 0.014	88.74 ± 4.95
QFS03	0.109 ± 0.005	0.040 ± 0.012	94.29 ± 0.65
QFS04	0.117 ± 0.007	0.038 ± 0.009	93.85 ± 1.14
QMS01	0.100 ± 0.007	0.024 ± 0.002	94.51 ± 0.85
QMS02	0.102 ± 0.001	0.023 ± 0.002	95.03 ± 0.06

El ICOMI se calcula a partir de la conductividad, dureza y alcalinidad. Sin embargo, dureza y alcalinidad presentaron valores bajos en todas las quebradas, de modo que el ICOMI sólo fue calculado teniendo en cuenta la conductividad. Este índice presentó valores de 0.02 para todas las fechas de muestreo. En la quebrada Francos (a partir del punto QFS02), el ICOMI estuvo entre 0.2 y 0.4 debido al incremento en la conductividad, alcalinidad y dureza en esta fuente de agua. Los valores obtenidos del ICOMI confirmaron la escasa presencia de sales en el agua, beneficiando la diversidad de especies. El ICOMO se encontró entre 0.08 y 0.11, indicando que el efecto producido por aguas residuales domésticas provenientes de los sistemas de tratamiento del

SFFI es mínimo, por ser quebradas de alta montaña, lo cual favorece la oxigenación de éstas. Tal índice fue influenciado sólo por el oxígeno disuelto, ya que los valores de DBO y coliformes en los puntos de muestreo fueron bajos y, en consecuencia, los I_{DBO} e $I_{coliformes}$ fueron nulos. Este índice obtuvo resultados muy bajos, por lo que el grado de contaminación por materia orgánica es mínimo.

Los resultados del ICA-CETESB presentados mostraron valores superiores a 80 en todos los puntos de muestreo, clasificando a las tres quebradas como cuerpos de agua con calidad óptima para destinación del recurso como fuente de abastecimiento de sistemas de potabilización para consumo humano. El punto QFS02 mostró el valor más bajo del ICA- CETESB (88.7) debido a que parámetros como alcalinidad, conductividad, dureza y fósforo presentaron valores más altos en comparación con los otros puntos, corroborando lo identificado a través del biplot de las características fisicoquímicas frente a los puntos de muestreo.

Los parámetros fisicoquímicos analizados confirman buena calidad de las tres quebradas en todos los puntos de muestreo, con capacidad de reaeración, oligotróficas y poco grado de mineralización de la microcuenca, coincidiendo con los resultados obtenidos en estudios anteriores (Medellin *et al.*, 2004).

Índice de Calidad Ecológica, ICE

Los 2 507 organismos colectados en promedio por muestreo (7 521 macroinvertebrados colectados en los tres muestreos), se categorizaron en 10 grupos (Roldán, 2003). De acuerdo con lo establecido por Prat y Rieradevall (1992), 65% de los individuos indica condiciones naturales en el río (G08 al G10); 28%, estrés ambiental en el río (G06 y G07), y el 7% restante corresponde a problemas de contaminación en el río (G01 a G05). Estos resultados confirman que la microcuenca Mamarramos conserva las condiciones prístinas, correspondientes a una reserva natural de alta montaña (Tabla 8), pero hay evidencia de una

leve afectación de la quebrada por los datos registrados en los grupos G01 a G05.

Tabla 8. Grupo de individuos por muestreo.

Grupo	Familias	Numero promedio de individuos por muestreo
G02	<i>Chironomidae, Muscidae</i>	83
G03	<i>Ceratopogonidae, Ephydriidae, Hydrophilidae, Tipulidae, Tipulidae/Hexatoma</i>	30
G04	<i>Chrysomelidae, Dolichopodidae, Empididae, Sphariidae, Synlestidae</i>	15
G05	<i>Blataridae, Curculionidae, Entomobrydae (Collembola), Isopoda, Isotomidae (Collembola), Puduridae, Sinlestidae, Tabanidae, Torridincolidae</i>	57
G06	<i>Elmidae, Libellulidae, Pisauridae, Polidesmidie, Staphilinidae</i>	52
G07	<i>Vacupernius, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae</i>	646
G08	<i>Helicopsychidae/Helicopsyche, Leptoceridae, Leptoceridae/Atanatolica, Leptoceridae, Pseudothelphusidae, Simuliidae/Simulium</i>	825
G09	<i>Ampullaridae, Dytiscidae, Girinidae, Hydracnidae, Hydrobiosidae, Hydrobiosidae/Atopsyche, Leptophlebiidae/Farrodes, Phylipotamidae, Polycentropodidae/Cyrellus, Polycentropodidae/Polycentropus, Xiphocentronidae</i>	113
G10	<i>Anomalopsychidae, Blephariceridae, Calamoceratidae, Chordodidae, Lampiridae, Perlidae/Anacroneuria, Psephenidae/Psephenops, Ptilodactilidae, Tubificidae</i>	686

La relación entre los puntos de muestreo con los macroinvertebrados y las variables fisicoquímicas se observan en los *biplot*, construidos a partir de las dos primeras componentes, en cada caso, resultado del

análisis de componentes principales (ver Figura 3). El *biplot* para macroinvertebrados muestra relación entre los individuos del G08 con los puntos QMS01, QMS02 y QCS03 debido a que 50% de los individuos asociados con G08 se encontró en estas estaciones; 53% de los individuos del G05 se colectó en el punto QFS01 (ver Figura 3a). El *biplot* para fisicoquímicos muestra la relación entre los valores de dureza con los puntos de muestreo QFS02 y QFS03, confirmando los resultados obtenidos para este parámetro (ver Figura 3b).

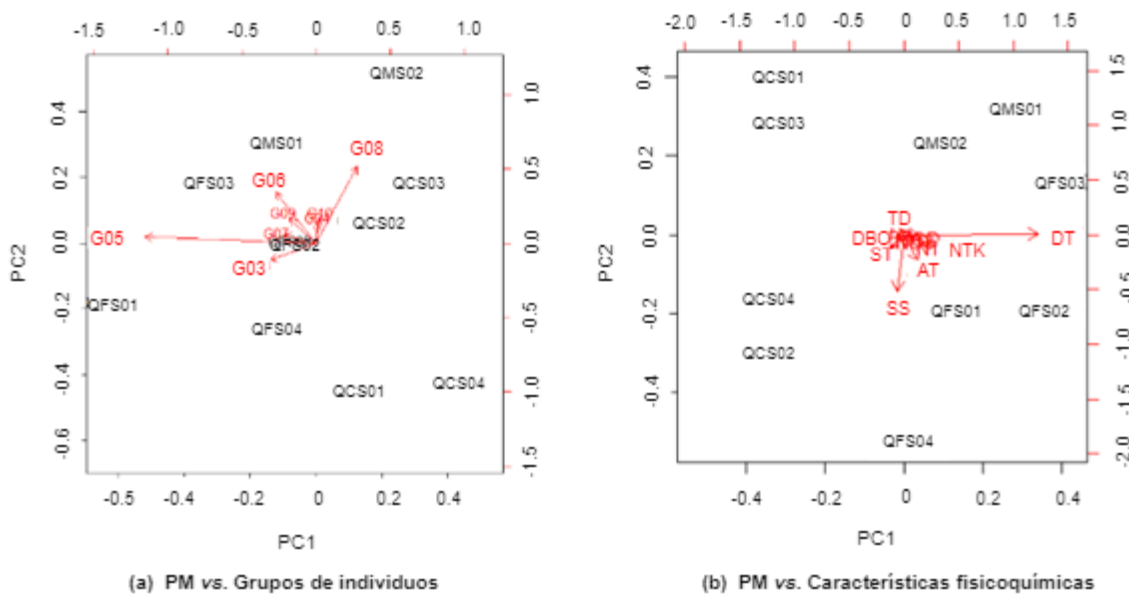


Figura 3. Relación entre puntos de muestreo (PM) vs. parámetros analizados (*Biplot*).

En el análisis de correlación canónica, el primer eje explicó 72.7% de la variación y los cinco restantes entre 1 a 10%. Las variables fisicoquímicas que se relacionaron negativamente con el primer eje debido a los bajos valores en todos los puntos de muestreo fueron AT, DT, SS, NTK y NO_3 . La relación entre las variables fisicoquímicas, los grupos de individuos y puntos de muestreo se observa en la Figura 4. La longitud de la flecha mide la importancia de la variable en la construcción de la componente, destacándose DBO, NO_3 , DT y ST. El punto de muestreo QFS01 está en el extremo contrario a ST, indicando valores bajos en este punto. En contraste, QFS04 está en la misma

dirección de SS, evidenciando valores altos de este parámetro. Los puntos de muestreo QCS01, QFS01, QMS02 y QCS03 se ubican separados de las variables fisicoquímicas, confirmando los menores valores de estas variables (ver Figura 4).

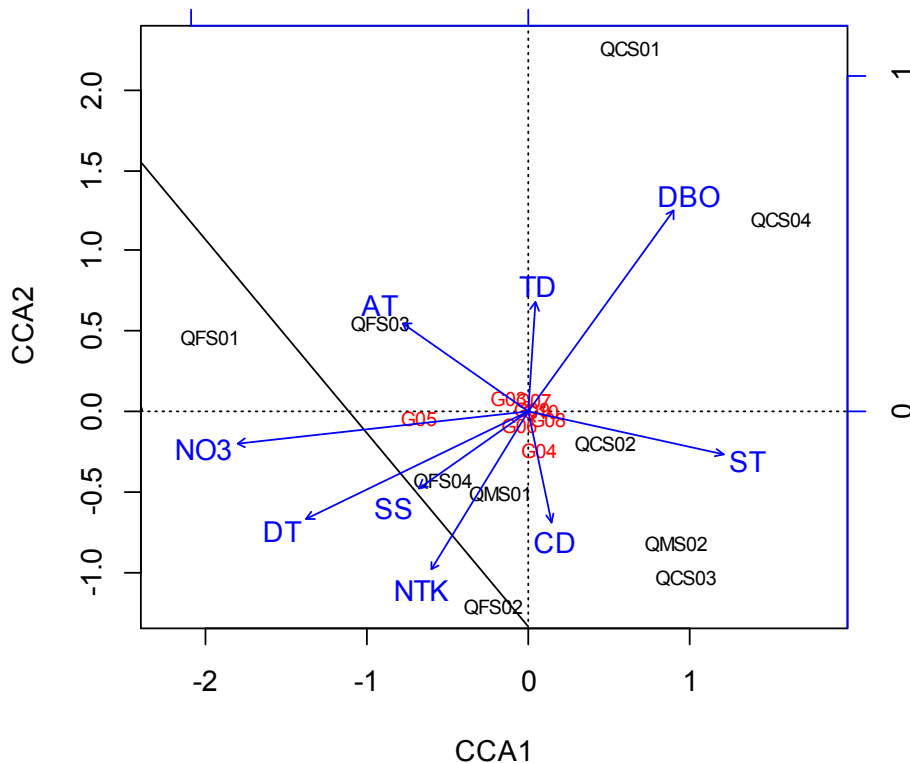


Figura 4. Representación de las variables fisicoquímicas, de especies y los puntos de muestreo.

Los *scores* fueron redimensionados a una escala entre 1 y 10, donde 1 representa agua contaminada y 10 agua limpia. Los puntajes se calcularon a partir de un modelo de promedios ponderados, dando como resultado un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.83$. El *optimum* corresponde al puntaje de cada familia en el gradiente de variación ambiental y *tolerance* describe la amplitud ecológica a lo largo del gradiente ambiental, datos necesarios para el cálculo del ICE (Tabla 9).

Tabla 9. Valor óptimo y tolerancia por familia.

Grupo	Optimum	Tolerance
G03	8.077	2.586
G04	6.250	2.324
G05	5.750	3.696
G06	6.143	4.163
G07	6.122	3.495
G08	6.160	3.304
G09	6.760	3.474
G10	6.595	3.454

El índice de calidad ecológico ICE se obtuvo a partir de la relación entre abundancia, *tolerance* y *optimum* propuesta por Haase y Nolte (2008). Los valores del ICE para cada estación en el presente estudio fluctuaron entre 6.35 y 6.43. Todos los valores superiores a 6.1 están asociados con buena calidad ecológica (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados ICE para la microcuenca Mamarramos.

	Puntos de muestreo	ICE	Calidad
1	QCS01	6.42	Buena
2	QCS02	6.43	Buena
3	QCS03	6.37	Buena
4	QCS04	6.43	Buena
5	QFS01	6.36	Buena
6	QFS02	6.39	Buena
7	QFS03	6.36	Buena
8	QFS04	6.38	Buena
9	QMS01	6.35	Buena
10	QMS02	6.38	Buena

Después se agruparon los puntos de muestreo considerando el valor del ICE, utilizando un *cluster* jerárquico aglomerativo. Los puntos de muestreo QCS01, QCS02 y QCS04, asociados con la quebrada Carrizal, registraron valores altos del ICE. Por otro lado, los puntos QFS01, QFS03 de la quebrada los Francos y QMS01, asociado con la quebrada

Mamarramos, registraron los valores inferiores. Sin embargo, todos los puntos presentaron valores superiores a 6.1 (buena calidad ecológica).

Finalmente, es evidente que los efluentes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales implementados en el SFFI no están generando impacto negativo en la calidad del agua de las quebradas, como se verificó con los resultados obtenidos a través de los índices fisicoquímicos, la presencia de especies de macroinvertebrados sensibles a contaminación y por el índice de calidad ecológica que calificó todos los puntos de muestreo con valores superiores a 6.1.

Conclusiones

El agua de la quebrada Mamarramos, en los puntos de muestreo evaluados, fue valorada como de excelente calidad. El resultado de los parámetros e índices fisicoquímicos está en concordancia con las familias de macroinvertebrados encontrados. El índice BMWP/Col clasificó la zona de estudio como aguas limpias, demostrando que para la estación seca, el cuerpo hídrico tiene las condiciones adecuadas para sostener la biodiversidad. Sin embargo, hay evidencia de una leve afectación de la quebrada por la presencia de macroinvertebrados de los grupos G01 a G05, indicando la necesidad de continuar con el seguimiento a través de los monitoreos en la zona de estudio.

Por último, el índice de calidad ecológica calificó todos los puntos de muestreo con valores altos, confirmando la buena calidad del agua de la quebrada Mamarramos en el periodo evaluado.

Agradecimientos

El trabajo presentado forma parte del proyecto de investigación núm. 055-0615-2400, financiado por la Dirección de Investigación y Transferencia de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) y la Unidad Administrativa Especial Parques Nacionales Naturales de Colombia-Dirección Territorial Andes Nororientales, desarrollado dentro del

Convenio Marco de Cooperación N001. Se agradece al personal de apoyo del laboratorio de estudios ambientales UPB-BGA y a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UPB-BGA.

Referencias

- Alba-Tercedor, J. (1996). Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. *IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA)* (Vol. II, pp. 203-213). Almería, España: Departamento de Biología Animal y Ecología, Universidad de Granada.
- APHA, AWWA & WEF. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22th ed.). Washington, DC, USA: American Water Works Association.
- Arcos-Pulido, M. del P., & Gómez, A. C. P. (2006). Microalgas perifíticas como indicadores del estado de las aguas de un humedal urbano: Jaboque, Bogotá D.C., Colombia. *Nova*, 4(6), 60-79.
- Avellaneda-Torres, L. M., Torres, E., & León-Sicard, T. E. (2014). Agricultura y vida en el páramo: una mirada desde la vereda El Bosque (Parque Nacional Natural de Los Nevados). *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 11(73), 105-128. Recuperado de <https://doi.org/10.11144/Javeriana.CDR11-73.avpm>
- Bouchard, R. W. (2004). *Guide to aquatic invertebrates of the Upper Midwest*. Ferrington, L. C. & Karius, M. L. (eds.). Saint Paul, USA: University of Minnesota, Water Resources Research Center.
- Cabrera, M., & Ramírez, W. (eds.). (2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia*. Bogotá, Colombia: Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2014). *Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo*. São Paulo, Brasil: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.
- Clifford, H. F. (1991). *Aquatic invertebrates of Alberta: An illustrated guide*. Edmonton, Canada: University of Alberta Press.
- Corredor, L. S. V., & Forero, A. M. (2011). Biodeterioro de la fuente de lavapatas, parque arqueológico de San Agustín-Huila. Colombia. *Ge-Conservación*, 2011(2), 65-80.

- Domínguez, E., & Fernández, H. R. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología*. Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo.
- Gamarra, Y., Restrepo, R., Cerón-Vivas, A., Villamizarr, M., Vega, C. I., & Avila, A. (2017). Aplicación del protocolo CERA-S para determinar la calidad ecológica de la microcuenca Mamarramos (cuenca Cane-Iguaque), Santuario de Fauna y Flora Iguaque (Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, 18(2), 11-29.
- Gómez, M. F., Moreno, L. A., Andrade, G. I., & Rueda, C. (eds.). (2016). *Biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Recuperado de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- González-Valdivia, N. A., Pozo, C., Ochoa-Gaona, S., Ferguson, B., Cambranis, E., Lara, O., Pérez-Hernández, I., Ponce-Mendoza, A., & Kampichler, C. (2017). Nymphalidae frugívoras (Lepidoptera: Papilionoidea) asociadas a un ecosistema agropecuario y de bosque tropical lluvioso en un paisaje del sureste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(2016), 451-464. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/303509353_Nymphalidae_frugivoras_Lepidoptera_Papilionoidea_asociadas_a_un_ecosistema_agropecuario_y_de_bosque_tropical_lluvioso_en_un_paisaje_del_sureste_de_Mexico
- Greenpeace. (2013). *Páramos en peligro. El caso de la minería de carbón en Pisba*. Recuperado de <http://greenpeace.co/pdf/paramos/Informe%20P%C3%A1ramos%20en%20peligro.pdf>
- Haase, R., & Nolte, U. (2008). The invertebrate species index (ISI) for streams in southeast. *Ecological Indicators*, 8, 599-613. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.08.005>
- Hotelling, H. (1936). Relations between two sets of variates. *Biometrika*, 28(3-4), 321-377.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

- Jiménez, M. A., & Vélez, M. V. (2006). Análisis comparativo de indicadores de la calidad de agua superficial. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (14), 53-70.
- Luna, H. A. (2009). *Estudio preliminar del uso de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de la calidad del agua en la Quebrada Mamarramos y en un sector del río Cane en el Santuario de Fauna y Flora Iguaque*. Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Lynch, J. M., & Poole, N. J. (1979). *Microbial ecology: A conceptual approach*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- McCafferty, W. P. (1983). *Aquatic entomology: The fishermen's and ecologists' illustrated guide to insects and their relatives*. Boston, USA: McCafferty-Jones, W. P. & Bartlett Publishers.
- Medellin, F., Ramírez, M., & Rincón, M. E. (2004). Trichoptera del Santuario de Iguaque (Boyacá, Colombia) y su relación con la calidad del agua. *Revista Colombiana de Entomología*, 30(2), 197-203.
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., Hunt, K., Company, P., & Wallace, J. B. (1996). *An introduction to the aquatic insects of North America* (3rd ed.). Iowa, USA: Kendall/Hunt Publishing Co.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017a). *Sistema de información ambiental de Colombia*. Recuperado de http://181.225.72.78/Portal-SIAC-web/faces/Dashboard/Biodiversidad2/eco_import_ambiental/eco_import_ambiental.xhtml
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017b). *Sistema de Parques Nacionales Naturales*. Recuperado de <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/sistema-de-parques-nacionales-naturales/>
- Morelli, E., & Verdi, A. (2014). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en cursos de agua dulce con vegetación ribereña nativa de Uruguay. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(4), 1160-1170. Recuperado de <https://doi.org/10.7550/rmb.45419>
- Prat, N., & Rieradevall, M. (1992). La degradació del riu besos. *Lauro*, 4, 8-11.

- Ramírez, A. (2006). *Ecología: métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación. *CT y F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153.
- Ramírez, A., & Viña, G. (1998). *Limnología colombiana: aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*. Bogotá, Colombia: British Petroleum Colombia.
- Rincón, M. E. (1996). Aspectos bioecológicos de los tricópteros de la quebrada Carrizal (Boyacá), Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, 22(1), 53-60.
- Roldán, G. (1988). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia*. Bogotá, Colombia: Fondo para la Protección del Medio Ambiente "José Celestino Mutis".
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: propuesta para el uso del método BMWP Col.* Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Roldán, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40 (155), 254-274.
- Romero-Rojas, J. A. (1999). *Tratamientos de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Springer, M., Ramírez, A., & Hanson, P. (2010). Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. *Revista de Biología Tropical*, 58(supl. 4), 248 pp.
- Vásquez, A., & Buitrago, A. C. (2011). *El gran libro de los páramos I*. Vásquez, A., & Buitrago, A. C. (eds.). Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Whittaker, R. H. (1973). *Ordination and classification of communities*. The Hague, Netherlands. Springer Press.