

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA A TRAVÉS DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS E ÍNDICES BIOLÓGICOS EN RÍOS TROPICALES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO BLANCO, ECUADOR

WATER QUALITY ASSESSMENT THROUGH BENTHIC MACROINVERTEBRATES AND BIOLOGICAL INDICES IN TROPICAL RIVERS OF THE RÍO BLANCO SUB-BASIN, ECUADOR

Ricardo David Caiza Hernández¹, Juan Manuel Guerrero Calero²

{caiza-ricardo1602@unesum.edu.ec¹, juan.guerrero@unesum.edu.ec²}

Fecha de recepción: 18/10/2024 / Fecha de aceptación: 20/11/2024 / Fecha de publicación: 06/01/2025

RESUMEN: La evaluación de la calidad del agua en ríos tropicales es fundamental para la comprensión de los factores que inciden en la biodiversidad acuática y el funcionamiento de los ecosistemas. Este estudio tuvo como objetivo realizar una evaluación integral de la calidad del agua en tres ríos de la subcuenca del Río Blanco (Mindó, Cinto y Nambillo), utilizando Índices de Diversidad y Calidad de Agua, complementados con características ambientales del agua. Se muestrearon macroinvertebrados acuáticos y se midieron parámetros fisicoquímicos como pH, oxígeno disuelto, temperatura, conductividad y sólidos disueltos totales. Las diferencias entre los ríos se analizaron mediante ANOVA y la prueba de Kruskal-Wallis. Además, se aplicó un Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC) para identificar las variables ambientales que influyen en la presencia-abundancia de los taxones. El Río Nambillo mostró las mejores condiciones ambientales. Los órdenes más abundantes fueron Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, lo que refleja la calidad del agua y las características del hábitat. El ACC explicó el 89.02 % de la variabilidad en los dos primeros ejes, demostrando que los géneros de macroinvertebrados se asocian a sitios que ofrecen condiciones ambientales favorables. A pesar de que se observaron discrepancias en los índices empleados, estos fueron efectivos para destacar diferencias significativas entre los ríos. Los resultados resaltan la influencia de los factores ambientales en la distribución de los macroinvertebrados, destacando la urgencia de preservar dichos ecosistemas ante posibles variaciones ambientales.

Palabras clave: Biodiversidad, bioindicadores, conservación ambiental, Mindó

ABSTRACT: Water quality assessment in tropical rivers is essential for understanding the factors that affect aquatic biodiversity and ecosystem functioning. This study aimed to conduct

¹Instituto de Posgrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador, <https://orcid.org/0009-0006-8419-4691>; +593958727592.

²Instituto de Posgrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-1356-0475>; +593990438723.

a comprehensive assessment of water quality in three rivers of the Río Blanco sub-basin (Mindó, Cinto, and Nambillo), using Diversity and Water Quality Indices, complemented by environmental water characteristics. Aquatic macroinvertebrates were sampled, and physicochemical parameters such as pH, dissolved oxygen, temperature, conductivity, and total dissolved solids were measured. Differences between rivers were analyzed using ANOVA and the Kruskal-Wallis test. Additionally, a Canonical Correspondence Analysis (CCA) was applied to identify the environmental variables influencing the presence-abundance of taxa. The Nambillo River showed the best environmental conditions. The most abundant orders were Ephemeroptera, Trichoptera, and Plecoptera, reflecting the water quality and habitat characteristics. The CCA explained 89.02% of the variability in the first two axes, demonstrating that the macroinvertebrate genera are associated with sites that offer favorable environmental conditions. Although discrepancies were observed among the indices used, they were effective in highlighting significant differences between the rivers. The results emphasize the influence of environmental factors on the distribution of macroinvertebrates, underscoring the urgency of preserving these ecosystems in the face of potential environmental changes.

Keywords: *Biodiversity, bioindicators, environmental conservation, Mindó*

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua en los ríos tropicales es una preocupación global creciente, especialmente frente a la presión significativa que las actividades humanas ejercen sobre estos ecosistemas. Esta situación amenaza tanto la biodiversidad como la integridad de los ecosistemas acuáticos, comprometiendo no solo la flora y fauna locales, sino también la seguridad hídrica y la salud pública. Los problemas se agravan por la mala gestión de los efluentes y los efectos del cambio climático (1), (2). En este contexto, es imperativo realizar una evaluación y seguimiento de la calidad del agua en dichos sistemas, teniendo en cuenta las interacciones complejas entre factores naturales y de origen humano.

Los ríos tropicales son especialmente vulnerables a las alteraciones ambientales debido a su alta biodiversidad y fragilidad ecológica. Los ecosistemas fluviales de la subcuenca del Río Blanco, en Ecuador, son un ejemplo claro de los desafíos que enfrentan los ríos tropicales. Estas áreas no solo son fundamentales para la preservación de la vida silvestre, sino que también son esenciales para las comunidades locales, las cuales se apoyan en sus fuentes de agua para el abastecimiento, la irrigación y actividades como el turismo (3), (4). No obstante, el aumento de la urbanización y la expansión de la agricultura intensiva han empeorado los problemas de contaminación, lo que dificulta la implementación sostenible de estos recursos.

En este contexto, la utilización de macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos ha adquirido importancia como una herramienta fundamental para la evaluación de la calidad del agua. Estos organismos, entre los que se incluyen insectos, crustáceos y gusanos, son susceptibles a las variaciones en las condiciones del agua y responden de manera rápida a los cambios en su entorno. Su diversidad y abundancia reflejan la integridad del ecosistema acuático, lo que los

convierte en bioindicadores eficaces para medir la contaminación y la calidad de los ríos (5). Los índices biológicos, basados en la composición y abundancia de las comunidades de macroinvertebrados, ofrecen una perspectiva integral de la calidad del agua, complementando los análisis de los parámetros físico-químicos.

Este estudio tiene como objetivo analizar la calidad del agua de los ríos Mindo, Nambillo y Cinto, que son los principales afluentes de la subcuenca del Río Blanco, mediante el uso de macroinvertebrados bentónicos como indicadores biológicos. Debido a que estos seres vivos reaccionan de forma sensible a los cambios en el entorno, el estudio de los mismos posibilita una evaluación precisa de la salud ecológica de dichos ecosistemas. Además, la unión de indicadores biológicos que se basan en las comunidades de macroinvertebrados con la evaluación de las condiciones fisicoquímicas del agua proporciona una herramienta completa para evaluar la condición de los ríos y guiar las medidas de conservación (6), (7). La pregunta central de este estudio es: ¿en qué medida el análisis integrado de macroinvertebrados, índices biológicos y parámetros físico-químicos permite una evaluación precisa y cuantificable de la calidad del agua en los principales afluentes de la subcuenca del Río Blanco?

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La parroquia de Mindo, ubicada en el noroccidente de la provincia de Pichincha en Ecuador, forma parte del cantón San Miguel de los Bancos, a 70 km de la ciudad de Quito. Su altitud varía entre 1180 y 4780 metros sobre el nivel del mar (8). Esta parroquia dispone del Bosque Protector Mindo-Nambillo, un área de notable diversidad biológica que forma parte del ecosistema del Chocó Andino, la cual fue declarada como zona protegida en el año 1988. Esta área enfrenta amenazas como la expansión agrícola, tala y urbanización, afectando la calidad del agua de los ríos Mindo, Nambillo y Cinto (9). La temperatura promedio anual es de 22.3 °C, mientras que la precipitación media anual alcanza los 2203 mm (8). El estudio se llevó a cabo en julio de 2024 durante la temporada de lluvias, cubriendo un intervalo altitudinal que varió entre 1122 y 1317 msnm.

Tabla 1. Descripción general de sitios de muestreo.

Río	Descripción
Cinto	CR1, CR2, CR4 y CR5 presentan cauces modificados y baja conectividad ribereña. CR3 tiene buena cobertura arbórea y CR6 leve modificación con propiedades privadas cercanas.
Mindo	MR1 tiene buena calidad ribereña. MR2 mantiene vegetación a pesar de desbroce parcial. MR3 y MR4 tienen menor cobertura con turismo en MR4. MR5 y MR6 con infraestructura turística limitando conectividad ribereña.

◆ EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA A TRAVÉS DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS E ÍNDICES BIOLÓGICOS EN RÍOS TROPICALES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO BLANCO, ECUADOR.

Río	Descripción
Nambillo	NR1, NR2 y NR3 con cauces modificados y baja conexión ribereña. NR4 tiene cobertura arbórea. NR5 y NR6 están conservados dentro de la reserva “Los Tucanes” con propiedades cercanas.

Selección de sitios de muestreo

Se seleccionaron 18 sitios de muestreo distribuidos en tres ríos (Mindo, Nambillo y Cinto), con una distancia entre 150 y 1180 m. Los sitios fueron seleccionados de manera no aleatoria, abarcando zonas con acceso permitido por propietarios de terrenos o de libre acceso para turistas. Se procuró incluir diferentes tramos de cada río, reflejando su heterogeneidad ambiental, así como la influencia de áreas residenciales y turísticas.

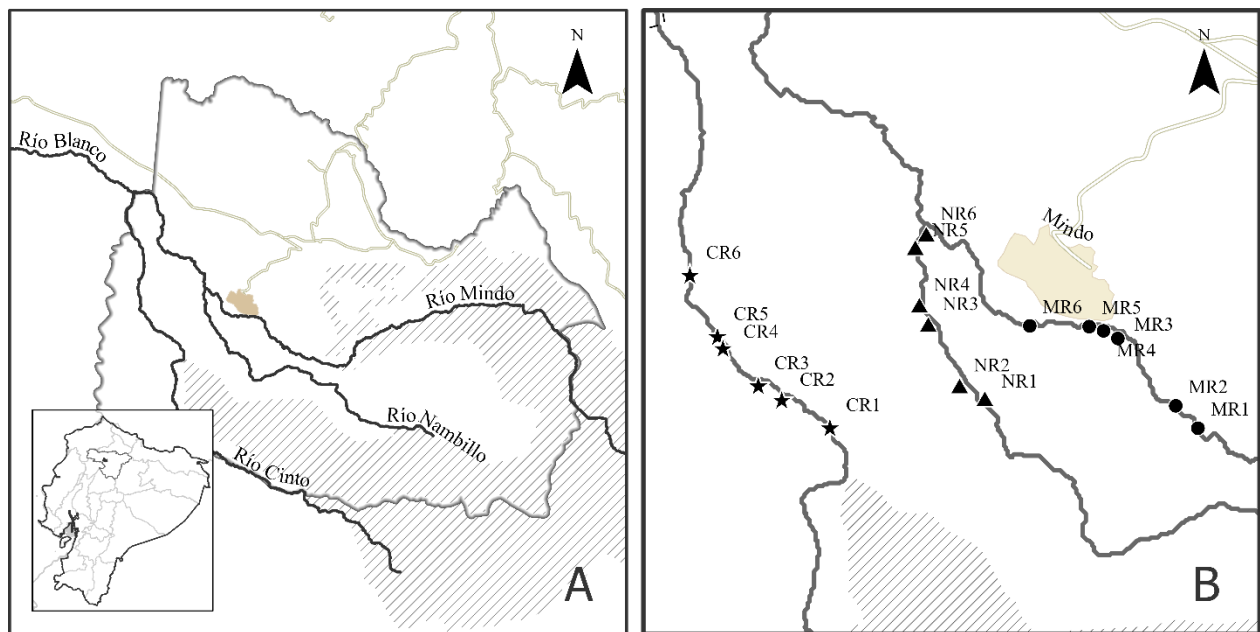


Figura 1. A. Limite parroquial de Mindo, Provincia de Pichincha-Ecuador; B. Sitios de muestreo ubicados en los ríos Cinto (CR), Mindo (MR) y Nambillo (NR). Bosque Protector Mindo-Nambillo representado con rayas.

Medición de parámetros físico-químicos del agua

Se realizaron mediciones de oxígeno disuelto (OD), temperatura superficial (°C), pH, sólidos disueltos totales (SDT) y conductividad eléctrica (CE) usando un medidor multiparamétrico YINMIK YK-100. En cada estación se realizaron tres réplicas con intervalos de 10 minutos, capturando variaciones temporales y garantizando una mayor precisión de los datos. Las coordenadas geográficas y altitud fueron registradas con la aplicación OruxMaps (v.7.4.26).

Muestreo de macroinvertebrados y procesamiento

La recolección de macroinvertebrados se realizó con una red D-net de 500 μm , con un esfuerzo de muestreo de 20 minutos por sitio. El recorrido fue río arriba a lo largo de un transecto, minimizando perturbaciones en el sustrato. Se priorizaron áreas con rocas de tamaño mediano, vegetación flotante y caudales moderados a rápidos (10). Las muestras fueron conservadas en etanol al 70% para su procesamiento en el laboratorio. Posteriormente, los organismos fueron separados y clasificados utilizando claves taxonómicas propuestas por (11), González et al. (12), Gutiérrez y Dias (13), Minanõ et al. (14), Roldán (15). La información recopilada fue estructurada en tablas de Excel con el fin de ser analizada en una etapa posterior.

Cálculo de índices de diversidad y calidad de agua

Los macroinvertebrados fueron identificados a nivel de género, a excepción de la familia Chironomidae. Se calcularon índices biológicos, incluyendo el BMWP/Col, ASPT (16), Índice Biótico de Familias (17), Índice de Sensibilidad y EPT (10), con el fin de evaluar la calidad del agua. Para medir la diversidad y riqueza, se emplearon los índices de Shannon (H'), Simpson (1-D) y Margalef.

Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis estadístico utilizando el software SPSS (v.27.0.1.0) con el fin de investigar las disparidades físico-químicas y biológicas entre los ríos Mindo, Nambillo y Cinto. Se comprobó la normalidad de los datos utilizando el test de Shapiro-Wilk, y la homogeneidad de varianzas con el test de Levene. Se procedió a evaluar los índices de diversidad y calidad del agua a través del análisis de varianza (ANOVA), ya que cumplían con los requisitos de normalidad y homogeneidad. No obstante, las variables físico-químicas fueron evaluadas mediante el test de Kruskal-Wallis, ya que no presentaban una distribución normal. Se utilizó el análisis de comparaciones múltiples de Tukey para evaluar las diferencias entre los ríos.

Se llevó a cabo un Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC) utilizando el software PAST (v.4.03) después de aplicar un filtro del 12 % de presencia-abundancia en R (18). Esto posibilitó la explicación del 34.64 % de la varianza total y la evaluación de las relaciones entre los factores ambientales y las comunidades de macroinvertebrados.

Consideraciones éticas

Se contó con el permiso respectivo de investigación, con código MAATE-ARSFC-2024-0363, emitido por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), garantizando el manejo ético de las muestras recolectadas y la divulgación responsable de los resultados.

RESULTADOS

Parámetros físico-químicos

En la Tabla 2 se presentan los promedios y desviaciones estándar de los parámetros físico-químicos medidos en los ríos Cinto, Mindo y Nambillo. Se observaron diferencias significativas entre los ríos ($p < 0.05$), lo que indica que la distribución de estos parámetros varía entre los cuerpos de agua estudiados.

Tabla 2. Promedios de parámetros físico-químicos medidos en los ríos.

Parámetros FQ	Cinto	Mindo	Nambillo
Temperatura (°C)	19.48 ± 0.77	18.54 ± 0.42	19.01 ± 0.37
pH	7.72 ± 0.14	7.92 ± 0.04	7.55 ± 0.14
Oxígeno Disuelto (%)	94.46 ± 1.93	86.45 ± 2.31	90.74 ± 2.48
Conductividad (µS/cm)	190.06 ± 3.83	127.56 ± 2.38	62.06 ± 0.64
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	94.56 ± 2.18	63.39 ± 1.33	31.33 ± 0.97

Nota. Promedio ± desviación estándar son mostradas.

El Río Cinto presentó la temperatura media más alta (19.48 ± 0.77 °C), seguido del Nambillo (19.01 ± 0.37 °C) y el Mindo (18.54 ± 0.42 °C). En cuanto al oxígeno disuelto, el Cinto también mostró los valores más altos (94.46 ± 1.93 %), seguido del Nambillo (90.74 ± 2.48 %) y el Mindo (86.45 ± 2.31 %). Además, el Cinto registró las mayores conductividades (190.06 ± 3.83 µS/cm) y sólidos disueltos totales (94.56 ± 2.18 mg/L), mientras que el Nambillo presentó los valores más bajos. Por otro lado, el pH más elevado se registró en el Mindo (7.92 ± 0.04), significativamente mayor que en el Nambillo y el Cinto.

Abundancia de macroinvertebrados

En los tres ríos evaluados, se registraron un conjunto de 27 géneros de macroinvertebrados, los cuales se distribuyeron en 17 familias y 8 órdenes. Los órdenes más representativos fueron Efemeróptera, Tricóptera y Plecóptera, con géneros como *Baetodes*, *Camelobaetidius*, *Thraulodes*, *Smicridea* y *Anacroneuria*, que se destacaron por su alta abundancia. Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con la capacidad de adaptación de estos géneros a entornos con niveles adecuados de oxígeno disuelto y corrientes veloces, características comunes en los ríos tropicales.

◆ EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA A TRAVÉS DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS E ÍNDICES BIOLÓGICOS EN RÍOS TROPICALES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO BLANCO, ECUADOR.

Tabla 3. Taxones identificados en los ríos Cinto (CR), Mindo (MR) y Nambillo (NR).

Orden	Familia	Género	CR	MR	NR	Total		
Acari	Hydrachnidae	<i>Hydrachna</i>		2	2	4		
Amphipoda	Hyaellidae	<i>Hyaella</i>		1		1		
Coleoptera	Elmidae	<i>Austrelmis</i>			1	1		
		<i>Austrolimnius</i>			2	2		
		<i>Disersus</i>			2	2		
		<i>Heterelmis</i>	6	5	8	19		
		<i>Hexacylloepus</i>			2	2		
		<i>Hexanchorus</i>		2		2		
		<i>Huleechius</i>	12	53	28	93		
		<i>Macrelmis</i>	2	2	7	11		
		<i>Phanocerus</i>			2	2		
		Diptera	Psephenidae	<i>Psephenops</i>		1	2	3
			Athericidae	<i>Atherix</i>			1	1
			Blephariceridae	<i>Limonicola</i>	11	1	6	18
			Ceratopogonidae	<i>Stilobezzia</i>			1	1
			Chironomidae	Indeterminado	2	17	5	24
Empididae	<i>Hemerodromia</i>				1	1		
Limoniidae	<i>Hexatoma</i>		1		2	3		
	<i>Limonia</i>			2		2		
	<i>Molophilus</i>			1	1	2		
	<i>Limnophora</i>				1	1		
Ephemeroptera	Muscidae	<i>Simulium</i>	7	62	14	83		
	Baetidae	<i>Americabaetis</i>	239	97	496	832		
		<i>Baetodes</i>	941	933	915	2789		
		<i>Camelobaetidius</i>	280	285	641	1206		
		<i>Mayobaetis</i>	1	3		4		
		<i>Haplohyphes</i>		1		1		
	Leptohyphidae	<i>Leptohyphes</i>	142	191	402	735		
		Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	410	176	582	1168	
	Oligoneuriidae	<i>Lachlania</i>	4	4	3	11		
	Hemiptera	Naucoridae	<i>Cryphocricos</i>	5	4	13	22	
<i>Limnocoris</i>			1	3	12	16		
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	28	20	58	106		
Odonata	Gomphidae	<i>Progomphus</i>	1	1	3	5		
	Libellulidae	<i>Brechmorhoga</i>			1	1		
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	57	49	106	212		
Trichoptera	Glossosomatidae	<i>Mortoniella</i>	34	6	29	69		
	Hydrobiosidae	<i>Atopsyche</i>	11	3	5	19		
	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	6	5	13	24		
		<i>Smicridea</i>	66	23	126	215		
	Hydroptilidae	<i>Metrichia</i>	1			1		
	Leptoceridae	<i>Atanatolica</i>	1	5	1	7		
<i>Nectopsyche</i>				2	2			
<i>Oecetis</i>				5	5			
Total general			2269	1960	3499	7728		

El género *Baetodes* fue el más abundante, con un total de 2789 individuos distribuidos de manera equitativa entre los tres ríos. La uniformidad observada en *Baetodes* indica que esta especie presenta una notable tolerancia a diversas condiciones ambientales y características del hábitat. Por otro lado, *Camelobaetidius* mostró una mayor abundancia en el Río Nambillo, con 641 individuos en este río frente a 285 y 280 en los ríos Mindo y Cinto, respectivamente. Este patrón podría estar relacionado con características específicas del Río Nambillo, como su mayor caudal y mayor cantidad de sustrato rocoso, que favorecen la presencia de estos organismos.

De manera similar, los géneros *Thraulodes* (1168 individuos), *Smicridea* (215 individuos) y *Anacroneuria* (212 individuos) también mostraron mayor abundancia en NR. Esto indica que la presencia de un buen caudal y niveles más altos de oxígeno en las aguas de dicho río crean un entorno propicio para estos organismos, los cuales tienen preferencia por hábitats con corrientes rápidas y niveles óptimos de oxigenación. Además, la presencia significativa de taxones sensibles a la contaminación en Nambillo refuerza la idea de que este río ofrece condiciones ecológicas más favorables.

Índices de diversidad e índices de calidad de agua

Los resultados muestran diferencias significativas en los índices de diversidad y calidad de agua entre los tres ríos estudiados (ver Tabla 4). En cuanto a la riqueza de especies (S), el Río Nambillo (NR) destacó con el valor más alto (20.33 ± 2.66), seguido por el Río Mindo (MR) y el Río Cinto (CR), con 17.33 ± 1.21 y 14.83 ± 3.37 , respectivamente. En NR, se observó una mayor abundancia (583 ± 141), lo cual sugiere la presencia de una comunidad más diversa y densa en comparación con otros sitios. Las disparidades mencionadas indican que NR presenta condiciones más propicias para albergar una mayor variedad de macroinvertebrados acuáticos.

Tabla 4. Promedios de índices de diversidad y calidad de agua.

Índices	CR	MR	NR
Riqueza_S	14.83 ± 3.37 (a)	17.33 ± 1.21 (a, b)	20.33 ± 2.66 (b)
Abundancia	378 ± 194 (a, b)	327 ± 136 (a)	583 ± 141 (b)
Shannon_H	1.73 ± 0.21 (a)	1.75 ± 0.10 (a)	1.99 ± 0.11 (b)
Simpson_1-D	0.74 ± 0.06 (a)	0.72 ± 0.03 (a)	0.82 ± 0.02 (b)
Margalef	2.37 ± 0.54 (a)	2.87 ± 0.25 (a, b)	3.06 ± 0.47 (b)
BMWP/Col	86.33 ± 20.64 (a)	91.17 ± 4.92 (a)	101.00 ± 11.44 (a)
ASPT	7.62 ± 0.29 (a)	7.29 ± 0.16 (a)	7.24 ± 0.33 (a)
IBF	3.16 ± 0.32 (a, b)	3.35 ± 0.20 (b)	2.97 ± 0.21 (a)
EPT	96.48 ± 3.48 (b)	90.98 ± 3.50 (a)	94.93 ± 1.32 (a, b)
Sensibilidad	77.67 ± 15.20 (a)	90.00 ± 10.41 (a, b)	97.50 ± 8.17 (b)

Nota. Las letras (a) y (b) indican los subconjuntos del análisis post-hoc de Tukey; letras diferentes en la misma fila señalan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los ríos.

En términos de los índices de diversidad, NR presentó los valores más altos en Shannon (1.99 ± 0.11), Simpson (0.82 ± 0.02) y Margalef (3.06 ± 0.47), lo que confirma su mayor diversidad y equidad en la distribución de especies. CR, por otro lado, mostró los valores más bajos, mientras que MR se situó en una posición intermedia. Las variaciones observadas pueden ser atribuidas a las diferencias en las propiedades físico-químicas y ambientales de los distintos ríos, las cuales inciden en la composición y organización de las comunidades biológicas presentes.

Los índices de calidad de agua, como el BMWP/Col, ASPT e IBF, no mostraron diferencias significativas entre los ríos ($p > 0.05$). Sin embargo, NR fue calificado con una calidad excelente, mientras que los ríos CR y MR fueron clasificados como de calidad aceptable. Según el índice IBF, que evalúa la tolerancia de las familias a la contaminación, se observó que todos los ríos se clasificaron en la categoría de calidad excelente. MR registró el índice más elevado, lo cual sugiere una mayor presencia de contaminantes en dicho cuerpo de agua.

Por otro lado, el índice EPT reveló que CR tuvo el valor más alto (96.48 ± 3.48), seguido de cerca por NR y MR. Este índice, se fundamenta en la presencia de órdenes bioindicadores como Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, lo cual indica que los tres ríos presentan condiciones de agua favorables, siendo CR el que sobresale ligeramente en este aspecto. En última instancia, el índice de Sensibilidad reveló que el río NR exhibió los valores más elevados (97.50 ± 8.17), lo cual corrobora que este cuerpo de agua alberga una mayor cantidad de organismos susceptibles a la contaminación, fortaleciendo su posición como el de mayor calidad entre los tres cuerpos de agua analizados.

Correspondencias entre parámetros físico-químicos y biológicos

El Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC) reveló que el 89.02% de la variabilidad de los datos se explica en los dos primeros ejes, lo cual indica una clara relación entre las comunidades de macroinvertebrados y los parámetros físico-químicos evaluados. El pH estuvo principalmente relacionado con el primer componente (56.7 %), mientras que el oxígeno disuelto y la temperatura influyeron más en el segundo componente (33 %) (ver Figura 2). Adicionalmente, tanto la conductividad como los sólidos disueltos totales mostraron una fuerte correlación entre sí y contribuyeron de manera similar en ambos ejes, sugiriendo su influencia conjunta sobre las comunidades.

Los géneros *Atanatica*, *Huleechius*, *Simulium* y los quironómidos presentan puntuaciones altas y positivas en ambos ejes, lo que sugiere su preferencia por condiciones de pH elevado, buena oxigenación y temperaturas moderadas. Ambos representantes del orden Díptera destacan por su fuerte asociación con el eje 2, lo que indica que estos géneros prosperan en condiciones de alta oxigenación, a pesar de las temperaturas variables, lo cual es relevante en ríos tropicales, donde estos factores pueden fluctuar, pero aún mantienen características de aguas de buena calidad.

Por otro lado, géneros como *Americabaetis*, *Leptohyphes*, y *Camelobaetidius* muestran puntuaciones moderadamente negativas en el eje 1, lo que sugiere una preferencia por aguas

con un pH más bajo. Sin embargo, en el eje 2, tienen puntuaciones positivas, lo que indica que también prefieren aguas bien oxigenadas, aunque su tolerancia a la temperatura es algo mayor en comparación con los géneros previamente mencionados. Este patrón evidencia una notable capacidad de adaptación a diferentes condiciones de temperatura, pero con una necesidad constante de buena oxigenación.

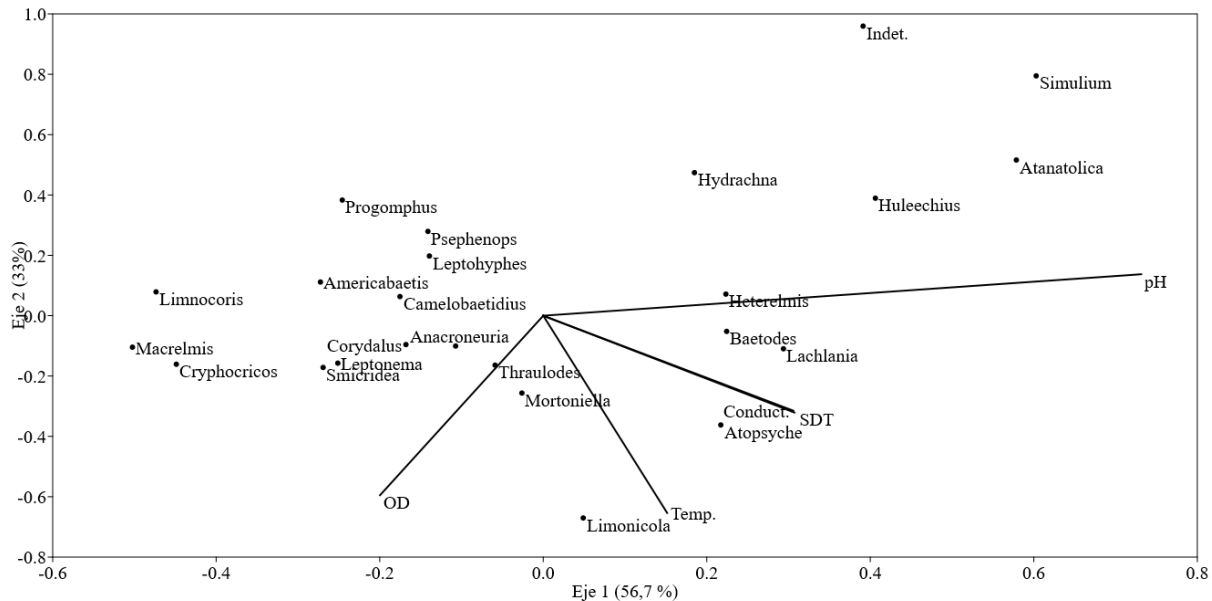


Figura 2. Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC) entre las variables físico-químicas medidas y la presencia-abundancia de macroinvertebrados acuáticos.

Géneros como *Limnocois*, *Macrelmis* y *Cryphocricos* se agrupan por sus puntuaciones más negativas en ambos ejes. Esto indica una inclinación hacia ambientes con pH bajo, menor oxigenación y temperaturas ligeramente más altas. Este conjunto de géneros parece estar más adecuado para condiciones ambientales adversas o con niveles bajos de oxígeno, lo cual podría conferir una ventaja en ríos sujetos a cambios en su caudal o con niveles reducidos de aireación.

Por último, *Lachlania* y *Atopsyche* presentan patrones característicos, con calificaciones positivas en el primer eje, lo que indica una preferencia por un pH más alto. No obstante, muestran calificaciones desfavorables en el segundo eje, lo que sugiere una inclinación hacia aguas de temperaturas más bajas y con niveles más bajos de oxígeno disuelto. Estos géneros podrían estar más restringidos a ambientes más frescos o con mayores niveles de oxígeno, posiblemente debido a su menor tolerancia a la variabilidad térmica.

En términos generales, el pH, la concentración de oxígeno disuelto y la temperatura son factores clave que afectan la distribución de los diferentes géneros de macroinvertebrados en los ríos tropicales analizados. Un nivel elevado de pH y una adecuada oxigenación promueven la presencia de géneros característicos de aguas de excelente calidad. Por otro lado, la temperatura, al afectar negativamente el nivel de oxígeno disuelto, juega un papel crucial en los ecosistemas tropicales. Pequeñas variaciones en la temperatura, pueden tener un impacto importante en la

biodiversidad acuática, especialmente en estos organismos que están adaptados a condiciones estables.

DISCUSIÓN

Diversidad de macroinvertebrados

En los ríos Mindo, Cinto y Nambillo, la comunidad de macroinvertebrados estuvo mayormente conformada por los órdenes Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, los cuales son frecuentes en entornos acuáticos con niveles adecuados de oxígeno disuelto y corrientes rápidas. Esta observación concuerda con estudios previos que destacan la adaptación de estos organismos a dichas condiciones (6). La presencia abundante de *Baetodes* en los tres ríos indica una capacidad de tolerancia a variadas condiciones ambientales, respaldando las conclusiones de Luca et al. (19) acerca de la predominancia de especies euritérmicas en entornos con fluctuaciones.

La notable presencia de *Camelobaetidius* en Nambillo, en contraste con Mindo y Cinto, está vinculada a las condiciones de mayor flujo de agua y presencia de sustrato rocoso, que benefician a géneros como *Thraulodes*, *Smicridea* y *Anacroneuria*, los cuales están asociados a entornos con abundante oxígeno y corrientes rápidas (20), (21). Estos elementos son esenciales para la supervivencia de los organismos que dependen de aguas limpias y con niveles adecuados de oxígeno. La presencia de diversos grupos taxonómicos sensibles a la contaminación en el área de Nambillo, como los órdenes Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, sugiere que la calidad ambiental en esa zona es elevada. Esto concuerda con investigaciones que indican que especies especializadas tienden a sobrevivir en entornos estables (22, 21), donde la calidad del agua, la oxigenación y el caudal tienen impacto en la composición de las comunidades de macroinvertebrados en ríos tropicales.

Índices de diversidad y calidad de agua

Los índices de diversidad en Nambillo mostraron una mayor equidad en relación con Mindo y Cinto. Esto indica una comunidad más equilibrada y menos dominada por especies tolerantes. Según Giacometti y Bersosa (6), se ha observado que, en ríos con condiciones ambientales óptimas, como una alta oxigenación y una baja presencia de contaminantes, hay una mayor presencia de Baetodes. La menor diversidad en Cinto indica una comunidad en la que predominan organismos con mayor tolerancia a la degradación ambiental, lo cual coincide con las observaciones de Rincón-Bello et al. (23) en ecosistemas sometidos a una mayor presión antropogénica. Las divergencias entre los ríos pueden estar vinculadas con parámetros físico-químicos, tales como la conductividad y los sólidos disueltos totales, los cuales ejercen influencia en la configuración de las comunidades de macroinvertebrados.

El índice BMWP/Col determinó que la calidad del agua en Nambillo es excelente, lo cual concuerda con investigaciones que resaltan la correlación entre niveles elevados de oxigenación y la alta calidad ambiental en ríos tropicales (6), (21). Asimismo, la presencia de organismos

sensibles como Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en los tres ríos se refleja en los altos valores del índice EPT, lo cual indica la existencia de condiciones ambientales saludables y con adecuada oxigenación. El índice IBF, que calificó la calidad del agua como excelente en los tres ríos, siendo Nambillo el más destacado, refuerza la predominancia de organismos sensibles a la contaminación, coincidiendo con las observaciones de Urdanigo et al. (21).

Según el estudio realizado por Mosquera-Restrepo y Peña-Salamanca (24), la mayor diversidad de especies en Nambillo se debe a la alta calidad del agua en la zona, lo cual favorece la presencia de una variedad de hábitats y una comunidad más compleja, especialmente en ríos con niveles adecuados de oxígeno disuelto. El caudal y la vegetación ribereña en el río Nambillo posiblemente proporcionaron condiciones favorables para organismos delicados, un fenómeno similar al observado por Arana et al. (20) en el río Mojarrero, donde la capacidad de autodepuración contribuyó significativamente a la mejora de la calidad del agua. Las disparidades entre los ríos, evidenciadas en los niveles de diversidad y calidad del agua, resaltan la importancia de los factores ambientales específicos, como el flujo del agua y la flora en las riberas, los cuales inciden directamente en la composición de las comunidades biológicas, tal como indican Urdanigo et al. (21) y Giacometti y Bersosa (6).

Asociación de variables ambientales y macroinvertebrados

Según el Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC), se determinó que el pH y el nivel de oxígeno disuelto son variables clave en la distribución de los macroinvertebrados, lo cual coincide con investigaciones previas realizadas por Gutiérrez-Garaviz et al. (22) y Mosquera-Restrepo y Peña-Salamanca (24). En el presente estudio, se observó que los géneros *Atanotolica* y *Huleechius* están relacionados con niveles elevados de oxigenación y pH, lo cual promueve su desarrollo en entornos con una baja concentración de sólidos disueltos. Este patrón concuerda con lo mencionado por Urdanigo et al. (21), quienes resaltaron que la disminución en la concentración de sólidos disueltos favorece a los organismos susceptibles a la contaminación.

Contrario a lo esperado, no se observó la relación inversa prevista entre la temperatura y el oxígeno disuelto en el agua, posiblemente debido a la elevada oxigenación producida por la turbulencia y los caudales rápidos presentes en los ríos analizados (25). Esta condición beneficia a géneros como *Simulium* y *Americabaetis*, los cuales tienen un desarrollo favorable en entornos con altos niveles de oxígeno, incluso ante cambios en la temperatura. Según Quesada-Alvarado et al. (26), la adaptabilidad de las especies a factores estresantes, como las fluctuaciones térmicas, es un aspecto crucial para su supervivencia en entornos tropicales de montaña (27). Esto concuerda con lo mencionado por dichos autores. Aunque no existe una correlación directa entre la temperatura y el oxígeno disuelto, los macroinvertebrados sensibles, como los plecópteros y tricópteros, no experimentaron impactos significativos. Por otro lado, géneros más tolerantes, como *Limnocois* y *Macrelmis*, mostraron un aumento en su población en ambientes con niveles reducidos de oxígeno. Este hallazgo indica que dichas especies cuentan con adaptaciones que les posibilitan su supervivencia en entornos degradados, un fenómeno que también fue identificado por Rincón-Bello y colaboradores (23).

La temperatura tiene un impacto crítico en la sensibilidad de los macroinvertebrados tropicales, ya que aumentos mínimos en la temperatura pueden disminuir la diversidad de especies especializadas (19). Estudios recientes sugieren que, a pesar de la preferencia de los géneros *Lachlania* y *Atopsyche* por aguas frescas y bien oxigenadas, las fluctuaciones térmicas podrían restringir su distribución en el futuro (28).

CONCLUSIONES

Los tres ríos considerados en el presente estudio presentan una calidad que varía de buena a excelente. Esta afirmación se sustenta en la presencia de una diversidad y abundancia de macroinvertebrados bentónicos, los cuales son indicadores de un ecosistema acuático en buen estado de salud. El Río Nambillo se distingue por su óptima calidad, en contraste, Cinto y Mindo presentan una calidad aceptable. La importancia de aplicar estrategias de gestión adaptativa y conservación individualizadas para cada río se destaca, con el objetivo de reducir los efectos locales y fomentar la restauración de la biodiversidad.

La influencia de factores físico-químicos como la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto en la composición de las comunidades bentónicas se confirma a través de la relación significativa observada entre la diversidad de macroinvertebrados y dichos parámetros. La variabilidad de estos índices entre los ríos demuestra la importancia de tener en cuenta las diferencias ambientales locales en cualquier intervención de manejo. Es fundamental garantizar que dichas intervenciones se centren en la preservación de las características que son fundamentales para mantener la salud de cada ecosistema.

La importancia de implementar un programa de monitoreo a largo plazo se destaca debido a la influencia de actividades humanas como la agricultura y el turismo, así como el contexto de cambio climático. Para asegurar la resiliencia de los ecosistemas y la sostenibilidad de los esfuerzos de conservación, es necesario realizar un monitoreo que incluya análisis físico-químicos y biológicos, con la participación activa de las comunidades locales.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE) por otorgar el permiso de investigación correspondiente. Al Programa de Maestría en Gestión Ambiental de la Universidad Estatal del Sur de Manabí por su colaboración en los trámites necesarios para esta investigación. A Max Bonilla por facilitar el uso del Laboratorio de Muestras de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Central del Ecuador, y a Sheyla León por su valioso apoyo en el procesamiento de muestras de macroinvertebrados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Encalada, A. C., Flecker, A. S., Poff, N. L., Suárez, E., Herrera-R, G. A., Ríos-Touma, B., Jumani, S., Larson, E. I., y Anderson, E. P. (2019). A global perspective on tropical montane rivers. *Science*, 365(6458), 1124–1129. <https://doi.org/10.1126/science.aax1682>
2. Terneus-Jácome, E., y Yáñez, P. (2018). Principios Fundamentales en torno a la Calidad del Agua, el uso de Bioindicadores Acuáticos y la Restauración Ecológica Fluvial en Ecuador. *La Granja. Revista de Ciencias de La Vida*, 27(1), 22.
3. Ríos-Touma, B., Villamarín, C., Jijón, G., Checa, J., Granda-Albuja, G., Bonifaz, E., y Guerrero-Latorre, L. (2022). Aquatic biodiversity loss in Andean urban streams. *Urban Ecosystems*, 25(6), 1619–1629. <https://doi.org/10.1007/S11252-022-01248-1/METRICS>
4. Torremorell, A., Hegoburu, C., Brandimarte, A. L., Rodrigues, E. H. C., Pompêo, M., da Silva, S. C., Moschini-Carlos, V., Caputo, L., Fierro, P., Mojica, J. I., Matta, Á. L. P., Donato, J. C., Jiménez-Pardo, P., Molinero, J., Ríos-Touma, B., Goyenola, G., Iglesias, C., López-Rodríguez, A., Meerhoff, M., ... Navarro, E. (2021). Current and future threats for ecological quality management of South American freshwater ecosystems. *Inland Waters*, 11(2), 125–140. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1608115>
5. Machado, V., Granda, R., Endara, A., Machado, V., Granda, R., y Endara, A. (2018). Análisis de macroinvertebrados bentónicos e índices biológicos para evaluar la calidad del agua del Río Sardinas, Chocó Andino Ecuatoriano. *Enfoque UTE*, 9(4), 154–167. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V9N4.369>
6. Giacometti, J., y Bersosa, F. (2006). Macroinvertebrados acuáticos y su importancia como bioindicadores de calidad del agua en el río Alambi. *Boletín Técnico, Serie Zoológica*, 6(2), 17–32. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-serie-zoologica/article/view/1394>
7. Yépez, Á., Yépez, Á. B., Urdánigo, J., Morales, D. C., Guerrero, N. M., y TayHing, C. C. (2017). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad hídrica en áreas de descargas residuales al río Quevedo, Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 10(1), 27–34. <https://doi.org/10.18779/cyt.v10i1.124>
8. Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial De Mindo. (2012). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la Parroquia Mindo 2012-2025*. www.pichincha.gob.ec
9. Coral, C., Bokelmann, W., Carcamo, R., y Sieber, S. (2020). Agency and structure: a grounded theory approach to explain land-use change in the Mindo and western foothills of Pichincha, Ecuador. *Journal of Land Use Science*, 15(4), 547–569. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2020.1811791>
10. Carrera, C., y Fierro, K. (2001). *Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. EcoCiencia.
11. González-Córdoba, M., Zúñiga, M. del C., Manzo, V., González-Córdoba, M., Zúñiga, M. del C., y Manzo, V. (2020). La familia Elmidae (Insecta: Coleoptera: Byrrhoidea) en Colombia: riqueza taxonómica y distribución. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 522–553. <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.1062>
12. González, H., Crespo, E., Acosta, R., y Hampel, H. (2018). *Guía rápida para la identificación de macroinvertebrados de los ríos altoandinos del cantón Cuenca*. ETAPA EP.

13. Gutiérrez, Y., y Dias, L. (2015). Ephemeroptera (Insecta) de Caldas – Colombia, claves taxonómicas para los géneros y notas sobre su distribución. *Pepéis Avulsos de Zoología*, 55(2), 13–46. <https://www.scielo.br/j/paz/a/DhG8zdv9MT9nCHrf5ZHsm5t/?format=pdfylang=es>
14. Minanõ, P., Olaya, M., y Huamantínco, A. A. (2019). Clave taxonómica de ninfas de Ephemeroptera (Insecta) del sudeste de Perú. *Revista Peruana de Biología*, 26(4), 411–428. <https://doi.org/10.15381/RPB.V26I4.17213>.
15. Roldán, G. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Universidad de Antioquia. <https://ianas.org/wp-content/uploads/2020/07/wbp13.pdf>
16. Roldán, G. (2012). *Los Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. <https://ianas.org/wp-content/uploads/2020/07/wbp12.pdf>
17. Carter, J., Resh, V., Hannaford, M., y Myers, M. (2007). Macroinvertebrates as Biotic Indicators of Environmental Quality. In R. Hauer y G. Lamberti (Eds.), *Methods in Stream Ecology* (2nd ed., pp. 805–831). Academic Press, Elsevier. <https://sdp2013.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/12/bahan-bacaan-dr-bu-maya-methods-in-stream-ecology.pdf>
18. Mosquera-Restrepo, D., y Peña-Salamanca, E. (2019). “Ensamblaje” de macroinvertebrados acuáticos y su relación con variables fisicoquímicas en un río de montaña en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(6), 1235–1246. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i6.30842>
19. Luca, B., Fasano, F., Mezzanotte, V., y Fornaroli, R. (2023). Effects of water temperature on freshwater macroinvertebrates: a systematic review. *Biol Rev Camb Philos Soc*, 98(1), 191–221. <http://dx.doi.org/10.1111/brv.12903>
20. Arana, I., Balarezzo, V., Eraso, H., Pacheco, F., Ramos, C., Muzo, R., y Calva, C. (2016). Calidad del agua de un río andino ecuatoriano a través del uso de macroinvertebrados. *Cuadernos de Investigación UNED*, 8(1), 68–75. <https://doi.org/10.22458/urj.v8i1.1225>
21. Urdanigo, J. P., Díaz Ponce, M., Tay-Hing Cajas, C., Sánchez Fonseca, C., Yong Benitez, R., Armijo Albán, K., Guerrero Chúez, N., Mancera-Rodríguez, N. J., Urdanigo, J. P., Díaz Ponce, M., Tay-Hing Cajas, C., Sánchez Fonseca, C., Yong Benitez, R., Armijo Albán, K., Guerrero Chúez, N., y Mancera-Rodríguez, N. J. (2019). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en quebradas con diferente cobertura ribereña en el bosque Protector Murocomba, Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 67(4), 861–878. <https://doi.org/10.15517/RBT.V67I4.35190>
22. Gutiérrez-Garaviz, J., Zamora-González, H., y Agredo, N. (2023). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la zona de autodepuración en un sistema lótico andino colombiano. *Revista Novedades Colombianas*, 18(2). <https://doi.org/10.47374/novcol.2023.v18.2360>
23. Rincón-Bello, M., Soler-Romero, F., Calderón-Rivera, D., Sierra-Parada, R., y Jaramillo-Londoño, Á. (2021). Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad de agua en el río Chicú, Cundinamarca, Colombia. *Hidrobiología*, 31(1), 17–29. <http://dx.doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/Rincon>

24. Mosquera-Restrepo, D., y Peña-Salamanca, E. (2019). “Ensamblaje” de macroinvertebrados acuáticos y su relación con variables fisicoquímicas en un río de montaña en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(6), 1235–1246. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i6.30842>
25. Escalona-Domenech, R., Infante-mata, D., García-Alfaro, J., Ramírez-Marcial, N., Ortiz-Arrona, C., y Barba, E. (2022). Evaluación de la Calidad del agua y de la ribera en la cuenca del río Margaritas, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38(1), 37–56. <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.54092>
26. Quesada-Alvarado, F., Villalobos, G., Springer, M., y Barboza, J. (2020). Variación estacional y características fisicoquímicas e hidrológicas que influyen en los macroinvertebrados acuáticos, en un río tropical. *Biología Tropical*, 68(2), 54–67. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68is2.44332>
27. Stoks, R., Geerts, A., y Meester, L. (2014). Evolutionary and plastic responses of freshwater invertebrates to climate change: realized patterns and future potential. *Evolutionary Applications*, 7(1), 42–55. <http://dx.doi.org/10.1111/eva.12108>
28. Somero, G. (2010). The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers.’ *Experimental Biology*, 213(6), 912–920. <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.037473>