

<https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.52093>

Características del hábitat que regulan la estructura de las comunidades de macroinvertebrados en ríos tropicales de montaña (Antioquía, Colombia)

Anlli Tatiana López-Giraldo¹;  <https://orcid.org/0000-0002-0301-7233>

María Isabel Ríos-Pulgarín²;  <https://orcid.org/0000-0002-4543-6989>

Isabel Cristina Gil-Guarín^{2*};  <https://orcid.org/0000-0003-3445-1988>

1. Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia; anlli.lopez4596@uco.net.co
2. Grupo de Investigación en Limnología y Recursos Hídricos, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia; mariaisabel.rios536@gmail.com, isabelcristinagil84@gmail.com (*Correspondencia)

Recibido 02-IX-2022. Corregido 27-I-2023. Aceptado 11-V-2023.

ABSTRACT

Habitat characteristics that regulate the structure of macroinvertebrate communities in tropical mountain rivers (Antioquia, Colombia)

Introduction: Macroinvertebrate communities are affected by water quality and physical characteristics of the aquatic habitat, simultaneously, complicating their use as bioindicators.

Objective: To determine which habitat variables regulate the macroinvertebrate community in mountain streams in Eastern of Antioquia (Colombia).

Methods: Sampling was carried out in February 2021 (dry-rain transition period), to evaluate physical and chemical variables in three types of mesohabitat: ripples, pools, and rapids in streams with contrasting vegetation covers. The macroinvertebrates were collected from ten sampling sites with a net, screen and manual type net preserved with 70 % ethanol.

Results: 4 484 macroinvertebrates were collected (16 orders, 46 families and 75 genera). The ripples mesohabitat presented higher values of diversity and abundance, while the pools presented the lowest. There were differences for oxygen concentration, depth, speed, and macroinvertebrate abundance between mesohabitats. Pools differed from the other mesohabitats in depth, speed, as well as in composition, abundance, and richness in macroinvertebrates, and was the least preferred mesohabitat.

Conclusion: Speed, depth, dissolved oxygen concentration played a very important role in the establishment of macroinvertebrates community in different mesohabitats. For the same type of mesohabitat, the quality of the plant cover determined both diversity and abundance of this community.

Key words: bioindicators; mesohabitat; stream; tropical Andes; vegetation indices.

RESUMEN

Introducción: Las comunidades de macroinvertebrados son afectadas simultáneamente por la calidad del agua y las características físicas del hábitat acuático, complicando su uso en la bioindicación.

Objetivo: Determinar cuáles variables del hábitat condicionan la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en algunas corrientes (quebradas) de montaña del Oriente antioqueño (Colombia).



Métodos: El muestreo se realizó en febrero 2021 (periodo de transición seco-lluvia), para evaluar variables físicas y químicas en tres tipos de mesohábitats: rápidos, rizos y pozas en corrientes con coberturas vegetales contrastantes. Los macroinvertebrados fueron recolectados en diez sitios de muestreo con red tipo net, pantalla y manual, y preservados en etanol al 70 %.

Resultados: Se recolectaron 4 484 macroinvertebrados (16 órdenes, 46 familias y 75 géneros). El mesohábitat rizo presentó mayores valores de diversidad y abundancia, mientras las pozas presentaron los menores. Hubo diferencias en la concentración de oxígeno, profundidad, velocidad y abundancia de macroinvertebrados entre mesohábitats. Las pozas defirieron de los otros mesohábitats en profundidad, velocidad, así como en la composición, abundancia y riqueza de macroinvertebrados, y fue el hábitat de menor preferencia.

Conclusión: La velocidad, profundidad y concentración de oxígeno disuelto, desempeñan un papel muy importante en el establecimiento de las comunidades de macroinvertebrados en los diferentes mesohábitats. En el mismo tipo de mesohábitat, la calidad de la cobertura vegetal determinó la diversidad y abundancia de esta comunidad.

Palabras clave: bioindicadores; mesohábitat; quebradas; Andes tropicales; índices de vegetación.

INTRODUCCIÓN

Los ríos de montaña son ecosistemas con alta diversidad de especies y, por ende, estratégicos desde el punto de vista ambiental (Meneses-Campo et al., 2019). En las últimas décadas, los ríos andinos se han visto sometidos a fuertes presiones antrópicas (Meza-Salazar et al., 2020), asociadas con la contaminación del agua, sobreexplotación de los recursos y expansión de la frontera agropecuaria que causan degradación del hábitat y provocan efectos negativos sobre la biota (Milán-Valoyes et al., 2011).

El establecimiento y distribución de las comunidades acuáticas en los ríos está determinada principalmente por las condiciones físicas y químicas del hábitat, así como por la oferta de recursos (Townsend et al., 2003). La flexibilidad en los requerimientos de dichas condiciones determinará la sensibilidad de cada organismo frente a la alteración del hábitat y, por ende, la estructura de la comunidad. En el caso de los ríos, las unidades geomorfológicas del cauce (rápidos, rizos y pozas) son la escala más recomendable para evaluar dichas alteraciones, ya que difieren en su morfología, profundidad, velocidad y tipos de sustrato y, además, presentan interacciones entre el caudal, la rugosidad del lecho y la pendiente (Ríos-Pulgarín et al., 2022). Parasiewicz et al. (2009) señalan, por ejemplo, que los rápidos

son mesohábitats que se caracterizan por una velocidad alta, sustratos más gruesos y turbulencia en la superficie, mientras que los rizos son tramos poco profundos, con velocidad moderada y algo de turbulencia. Por el contrario, las pozas se caracterizan como tramos de agua relativamente profundos, debido a procesos hidráulicos de socavamiento o embalsada por la obstrucción parcial del canal, con menor velocidad de flujo y disminución de la concentración de oxígeno.

Entre los organismos que habitan los mesohábitats descritos anteriormente se encuentran los macroinvertebrados, los cuales forman una de las comunidades más ampliamente estudiadas en corrientes de montaña, debido a su alto grado de sensibilidad frente a las variaciones de las condiciones ambientales que ocurren continuamente en los ecosistemas. Esta comunidad agrupa numerosas especies de diferentes grupos taxonómicos, en su mayoría artrópodos, y constituye el segundo eslabón en las redes tróficas de los ríos de montaña y frecuentemente es empleada como indicadora de la calidad del agua (Roldán-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2022; Suter & Cormier, 2015). También, se ha encontrado que estos organismos presentan una estrecha dependencia con la disponibilidad de hábitat y los recursos alimenticios, lo que los hace muy importantes desde el punto de vista funcional en el sistema fluvial (Elosegi & Sabater, 2009).

Dada su movilidad restringida y su pequeño tamaño, que oscila entre 0.5 mm hasta unos pocos centímetros, el concepto de hábitat para esta comunidad debe considerarse en la escala de mesohábitat (Roldán-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2022). Entendido este como una unidad geomorfológicamente homogénea en términos de profundidad, velocidad y tipo de sustrato (Parasiewicz, 2007). Los macroinvertebrados no solo responden a las condiciones de calidad de agua, también son afectados por los cambios en el régimen de flujo, que, a su vez, modifica la estabilidad del lecho de forma diferente en cada mesohábitat y en las diferentes épocas hidrológicas, más aún cuando se trata de ecosistemas sometidos a escenarios de regulación. De manera que, los cambios de profundidad, velocidad y arrastre de sedimentos afectan la variedad y estabilidad de mesohábitat favorables para el establecimiento de estos organismos (Motta-Díaz & Vimos-Lojano, 2020; Walteros-Rodríguez & Castaño-Rojas, 2020).

En términos metodológicos, el muestreo de macroinvertebrados por mesohábitat ofrece ventajas adicionales, ya que evita subestimar la riqueza local, tal como lo ratificaron Vimos-Lojano et al. (2020) en su estudio sobre la preferencia de microhábitat de macroinvertebrados altoandinos. Aún más, si dicho muestreo se sincroniza con periodos hidrológicos de aguas bajas, o en descenso, en los cuales se favorece la colonización. De manera que el esfuerzo de muestreo diferenciado por hábitat y el periodo hidrológico en el que se lleva a cabo la recolección son determinantes para la adecuada caracterización de esta comunidad.

Los macroinvertebrados han desarrollado diferentes adaptaciones específicas que les permite sobrevivir en un medio tan fluctuante como es el ecosistema fluvial, tales como estrategias alimenticias, muchas de ellas oportunistas, de acuerdo con el lugar donde se desarrollan (Elo-segi & Sabater, 2009; Walteros-Rodríguez & Castaño-Rojas, 2020). Otro aspecto importante para el establecimiento de las comunidades de macroinvertebrados es el aporte de hojarasca que llega a la corriente de la vegetación de ribera, ya que, además de constituir una de las

principales fuentes de materia y energía dentro del sistema acuático, también sirve como refugio y alimento para los macroinvertebrados, favoreciendo su establecimiento en diversos mesohábitats del ecosistema en función de la oferta de estos recursos (Salazar-Castellanos et al., 2020).

La subregión del Oriente antioqueño en los andes colombianos es un escenario adecuado para evaluar la relación entre los macroinvertebrados y los diferentes elementos del hábitat mencionados, debido a que presenta una topografía quebrada y gran riqueza hídrica (Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare, 2011). En ese contexto, el presente estudio tiene el objetivo de determinar cuáles son las variables del hábitat que más influyen en el establecimiento de las comunidades de macroinvertebrados en algunas corrientes de montaña del Oriente antioqueño. Se plantea como hipótesis de investigación que las variables físicas (velocidad y profundidad) y la cobertura vegetal (vegetación de ribera) tienen igual o mayor importancia que las variables químicas del agua (pH, temperatura, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno y conductividad eléctrica), en la distribución de estos organismos en las corrientes del Oriente antioqueño. Los resultados de este estudio aportarán información respecto al efecto de las diferentes características del hábitat sobre los diferentes taxones, lo cual es fundamental en los procesos de conservación de la diversidad y la funcionalidad fluvial, así como en la restauración de los ríos andinos degradados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: El Oriente antioqueño se ubica en el sureste del departamento de Antioquia, y se destaca por ser una región con amplia variedad de climas, gran diversidad natural, además de una gran riqueza hídrica, características que la convierten en una región estratégica para la construcción de proyectos de energía, agricultura, industrialización y urbanización, que amenazan los ecosistemas (Echeverri-Restrepo et al., 2017). El presente

estudio se llevó a cabo en las corrientes del Oriente antioqueño en jurisdicción de los municipios San Luis, Cocorná, El Carmen de Viboral y Granada (Fig. 1). Esta región abarca zonas de vida (Biomás) que van desde bosque muy húmedo tropical (bmh-T), hasta bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) (Holdridge, 1978). Su temperatura oscila entre 16 y 29 °C, con altitudes de 170 a 2500 m.s.n.m., y precipitación entre 1000 y 5000 mm/año (Corporación Autónoma Regional de las Cuencas

de los Ríos Negro y Nare, 2012). El régimen hidrológico es bimodal, con dos periodos secos (febrero y agosto) y dos periodos lluviosos en abril y octubre (Ríos-Pulgarín et al., 2016). Los sitios evaluados en el estudio se encontraron entre 800 y 1600 m.s.n.m., en el piso térmico tropical, lo que las hace equivalentes para realizar el análisis.

Diseño de muestreo: Se establecieron 10 sitios de muestreo, distribuidos en las

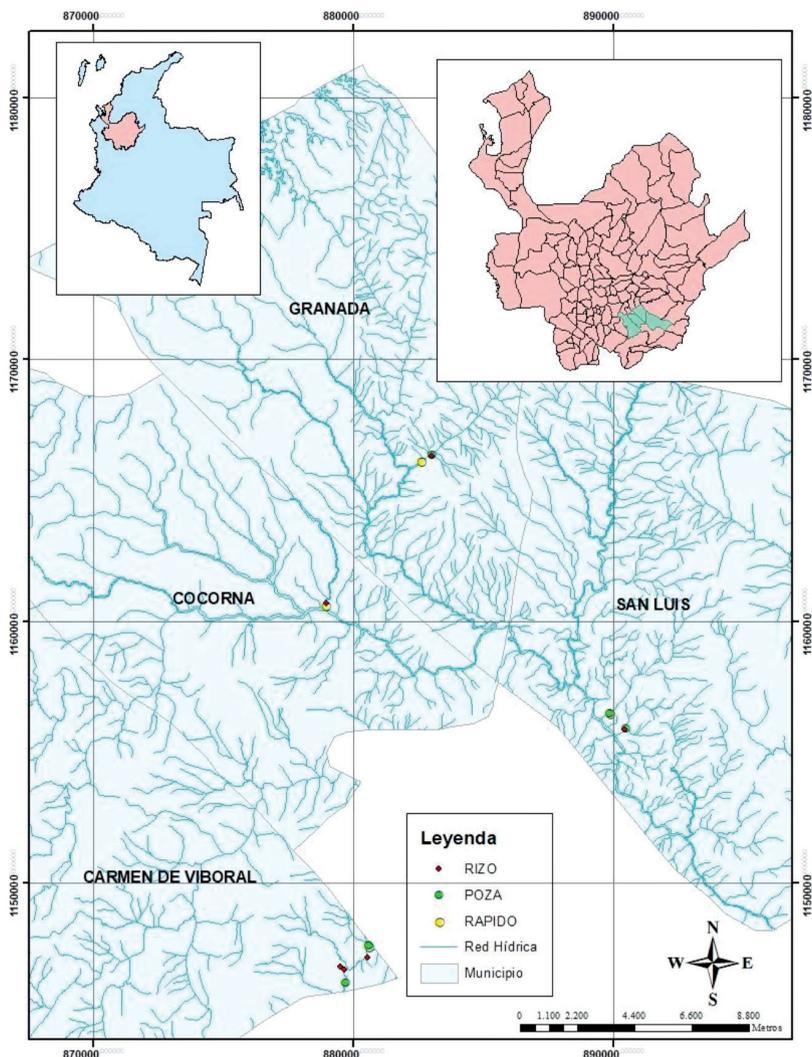


Fig. 1. Área de estudio y ubicación geográfica de los 10 sitios de muestreo en siete corrientes de montaña en los municipios de Granada, Cocorná, El Carmen de Viboral y San Luis. / **Fig. 1.** Area of study and geographic location of the 10 sampling sites in seven mountain streams in the municipalities of Granada, Cocorná, El Carmen de Viboral and San Luis.

diferentes corrientes seleccionadas: quebrada Carbonera (S1), quebrada San Antonio (S2), quebrada La Calera (S3), quebrada La Isla (S5-S6), quebrada La Trinidad (S8), río Melcocho (S4-S7) y río Tafetanes (S9-S10). En cada corriente se seleccionó un tramo de aproximadamente 100 m, donde se identificaron todos los microhábitats presentes: rápido, rizo y poza (Parasiewicz, 2007). El mesohábitat rápido fue definido como aquellas zonas caracterizadas por profundidades menores con alta-velocidad y flujo-turbulento en la superficie, debido a la composición del sustrato que es más grueso que quiebra la superficie del agua. La turbulencia y el flujo de la corriente dan como resultado una concentración de oxígeno disuelto mayor. Los rizos fueron definidos por una menor profundidad, velocidad moderada y algo de turbulencia. La disposición de los sustratos hace que en la superficie del agua se formen ondulaciones. Las pozas se caracterizaron de acuerdo con la mayor profundidad, con una velocidad de flujo nula o baja, la composición del sustrato fino y la menor concentración de oxígeno. El muestreo fue realizado en época de transición (seco-lluvia) en febrero de 2021.

Recolección de muestras biológicas: En cada mesohábitat se midió un área de 20 m². Se utilizó una red triangular (ojo de malla entre 0.5 y 1 mm), para la recolección de macroinvertebrados (N = 16), mediante varias técnicas de captura de acuerdo con el tamaño y el tipo de sustrato: a) en área de rocas, gravas y arenas ubicación de la red sobre el fondo en contracorriente y remoción manual del sustrato; b) en áreas con vegetación mediante barrido a lo largo del tramo; c) en áreas de pozas con depósito de hojarasca mediante resuspensión y recolección del material con la red, cada una de estas muestras se consideró una submuestra y se empleó para conformar una muestra integrada por mesohábitat. El esfuerzo de muestreo empleado en cada uno de los mesohábitats fue de 20 min.

El material de cada mesohábitat recolectado en la red triangular se almacenó en bolsas plásticas con cierre hermético y se cubrió con

alcohol al 70 %. Simultáneamente, se realizó la recolección manual de macroinvertebrados levantando rocas y troncos al azar. Con una pinza se tomaron los organismos que se encontraron adheridos en estos sustratos y se depositaron en frascos PET de 30 mL con etanol al 70 %.

Métodos de laboratorio: Una vez separados los macroinvertebrados de la hojarasca se almacenaron en frascos PET de 30 mL debidamente rotulados. Para la observación e identificación de los macroinvertebrados se utilizó un estereomicroscopio WD NICON JAPAN modelo SMZ 1500 y claves especializadas de Álvarez-Arango y Daza-Ospina (2005), Aristizábal-García (2002), Domínguez y Fernández (2009), Manzo (2005), Posada-García y Roldán-Pérez (2003), con el fin de llegar al menor nivel taxonómico posible. Se depositaron 62 individuos de estas muestras en la colección de referencia de la Universidad Católica de Oriente (UCO), la cual está registrada ante el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, con los códigos de colección de CMA UCO 3718 hasta CMA UCO 3738; actualmente publicados en línea a través del sistema de información sobre biodiversidad-SIB Colombia.

Parámetros fisicoquímicos: En cada sitio se hicieron mediciones de pH, temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L), saturación de oxígeno (%) y conductividad eléctrica (μS/cm) con un equipo multiparamétrico HACH HQ40D. Los valores de turbidez se obtuvieron en el laboratorio de Monitoreo Ambiental de la UCO a partir de muestras tomadas en campo, con el turbidímetro de marca HACH 2100Q. Los métodos de campo y de laboratorio se estandarizaron de acuerdo con los protocolos definidos por Baird y Bridgewater (2017).

Parámetros de hábitat: Las características físicas del hábitat se tomaron de Montoya-Cardona (2022) y Rincón-Echeverri (2022), quienes realizaron estudios simultáneos en los mismos sitios de muestreo. Los parámetros



estimados en estos estudios fueron: velocidad, profundidad, tipo de sustrato y cobertura vegetal. La velocidad (m/s) en cada uno de los mesohábitats se determinó con un correntómetro OTT C-31, la profundidad media (m) se estimó como promedio de tres medidas utilizando una mira topográfica. Para determinar el tipo de sustrato (granulometría), se midieron 100 rocas del lecho en cada mesohábitat, de acuerdo con el método de Wolman (1954). En los mesohábitats que no fue posible realizar medidas de sustrato se recolectó muestra para realizar una curva granulométrica del material del lecho a partir de la metodología propuesta por Arévalo-Mendoza et al. (2017).

La información de cobertura vegetal se obtuvo a partir de la aplicación del *Índice* de calidad de la vegetación de ribera Andina (QBR-And) (Acosta et al., 2008), que corresponde a una adaptación del índice QBR desarrollado para ríos mediterráneos por Munné et al. (2003). Dentro de este se incluyen cuatro métricas: a) grado de cubierta de la ribera, b) estructura de la cubierta, c) calidad de la cubierta y d) grado de naturalidad del canal fluvial. Además, este índice toma en cuenta las principales formaciones vegetales andinas y presenta intervalos de calidad y conservación de las riberas.

Tratamiento de datos: Se determinó la composición taxonómica por mesohábitat, así como la estructura de la comunidad de macroinvertebrados mediante el cálculo de la abundancia y de los números de Hill (q_0 : Riqueza total; q_1 -Equitatividad: número de especies comunes y q_2 -Dominancia: número de especies dominantes) (Hill, 1973), los cuales fueron calculados en el programa PAST versión 3.0 (Hammer et al., 2001).

Se realizó un análisis de varianza ANOVA, previa verificación de los supuestos del modelo, para establecer el efecto del factor mesohábitat sobre las variables ambientales, la abundancia y la diversidad de los macroinvertebrados. Para determinar las diferencias en la composición taxonómica por mesohábitat se empleó un análisis discriminante basado en

la abundancia de los órdenes. Los puntajes de los vectores canónicos fueron utilizados para graficar en términos de varianza explicada, las funciones canónicas más relevantes, evidenciando el espacio canónico de diferenciación entre la abundancia de macroinvertebrados y sus hábitats de preferencia (Friendly, 2007). Complementariamente se realizó un análisis PCA para identificar aquellas familias que tenían la mayor contribución a la varianza entre mesohábitats. Con las familias seleccionadas, se realizó un análisis clúster (conglomerado), empleando el método de distancia euclidiana y se graficó un mapa de calor para visualizar patrones en la composición entre los mesohábitats, usando colores para representar la intensidad de la relación (Guisande et al., 2010).

La preferencia de los órdenes de macroinvertebrados por los diferentes mesohábitats en función de las variables ambientales, se verificó a partir de un análisis de escalamiento multidimensional. Este análisis permitió, de acuerdo con la posición de los diferentes órdenes, establecer el grado de proximidad respecto a cada mesohábitat y sus características físicas o químicas (Borg et al., 2018). Además, se realizó un análisis discriminante canónico generalizado entre mesohábitats basado en las diferencias de abundancia y riqueza total, en relación con las variables físicas y químicas. Los valores de riqueza, abundancia y del índice QBR en cada mesohábitat fueron sometidos a análisis de componentes principales para establecer el efecto de las coberturas vegetales sobre los patrones de riqueza y abundancia de macroinvertebrados en los diferentes microhábitats. Los anteriores análisis fueron ejecutados en el software RWizard versión 4.1 (Guisande et al., 2014).

RESULTADOS

Se presentaron diferencias significativas para la profundidad ($F = 17$, g.l. = 2, $P = 0.0002$) y la velocidad ($F = 29.3$, g.l. = 2, $P = 0.00001$). La profundidad presentó valores entre 0.13 y 0.31 m en los rizos, 0.28 y 0.54 m en los rápidos y 0.65 y 0.9 m en las pozas.

La velocidad presentó valores entre 0.8 y 1.25 m/s en los rizos, 0.8 y 1.7 m/s en los rápidos y 0.1 y 0.4 m/s en las pozas. Entre las variables químicas del agua, solo el oxígeno disuelto mostró diferencias significativas entre hábitat ($F = 27.4$, g.l. = 2, $P = 0.0004$). Esta variable osciló entre 8.17 y 8.71 mg/l en los rizos, 7.91 y 8.56 mg/l en los rápidos y 8.19 y 8.7 mg/l en las pozas.

Se recolectaron 4 484 macroinvertebrados, agrupados en 16 órdenes, 46 familias y 75 géneros, siendo más representativos en abundancia los géneros *Leptohyphes*, *Smicridea*, *Thraulodes*, *Simulium*, *Macrelmis*, *Anacronetria*, *Camelobaetidius* y *Nectopsyche*, respectivamente. En los rizos se encontró una riqueza (q0) promedio de 33 taxones y la mayor abundancia (2 338 individuos) con un valor medio de 390 individuos. Destacándose tricópteros del género *Smicridea* (15 %, 357 individuos), efemerópteros de los géneros *Leptohyphes* (10 %, 243 individuos), *Thraulodes* (8.6 %, 202 individuos) y *Camelobaetidius* (8.4 %, 197 individuos), coleópteros como *Macrelmis* (7.6 %, 178 individuos) y plecópteros como *Anacronetria* (7.2 %, 169 individuos). Los rizos también presentaron los mayores valores de diversidad q1 (13 especies en promedio) y q2 (8 especies en promedio). Los rápidos presentaron

una abundancia y riqueza (q0) promedio de 336 individuos y 27 taxones respectivamente, en este mesohábitat predominaron dípteros del género *Simulium* (17 %, 291 individuos), seguidos nuevamente por efemerópteros como *Leptohyphes* (16 %, 272 individuos) y *Thraulodes* (9.5 %, 160 individuos), tricópteros del género *Smicridea* (7.7 %, 129 individuos) y coleópteros del género *Macrelmis* (7.3 %, 122 individuos). Por último, en el mesohábitat poza se encontró una abundancia y riqueza (q0) media de 83 individuos y 17 géneros, los más abundantes fueron hemípteros del género *Rhagovelia* (17 %, 71 individuos), tricópteros de los géneros *Nectopsyche* (14.6 %, 61 individuos), *Grumichella* (5.3 %, 22 individuos) y *Helicopsyche* (4.5 %, 19 individuos), así como efemerópteros del género *Farrodes* (8.6 %, 36 individuos).

De acuerdo con el análisis de varianza, se encontraron diferencias significativas en la abundancia entre hábitat ($F = 4.257$, g.l. = 2, $P = 0.037$), evidenciando los mayores valores en los rizos, seguido de los rápidos y finalmente las pozas con un promedio de 390, 336 y 83, respectivamente (Tabla 1).

El análisis discriminante generalizado mostró un 50 % de casos correctamente identificados por validación cruzada. El primer

Tabla 1

Valores de las variables físicas, químicas y biológicas de cada mesohábitat. / **Table 1.** Values of physical, chemical and biological variables in each mesohabitat.

Variable	Mesohábitat					
	Rizo		Rápido		Poza	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
Temperatura (°C)	18.7-25	21.5	21.2-22.8	21.72	18-25.9	22
OD (mg/l)	8.16-8.19	8.4	7.9-8.6	8.29	8.19-8.7	8.43
Saturación de oxígeno (%)	105.2-112.6	107.13	103.5-107.7	105.78	104.1-112	106.7
pH	6.95-7.43	7.39	7.1-7.7	7.48	6.9-7.8	7.37
Conductividad (µS/cm)	28.6-104	50.46	29.1-104.4	55.68	31.3-61.9	47.72
Turbiedad (NTU)	0.54-2.77	1.27	0.69-3.31	1.8	0.59-3.31	1.39
Profundidad (m)	0.13-0.31	0.25	0.28-0.54	0.35	0.65-0.90	0.64
Velocidad (m/s)	0.80-1.25	1	0.80-1.70	1.32	0.10-0.40	0.26
Abundancia	122-663	389.7	133-570	335.6	36-175	83.4
Riqueza (q0)	17-51	33	4-26	17	11-15	13
Equidad (q1)	7.4-24.8	13.2	1-18.4	12.08	4.3-12.5	8.87
Dominancia (q2)	3.9-17.3	8.05	1-12.7	7.91	2.5-9.2	6

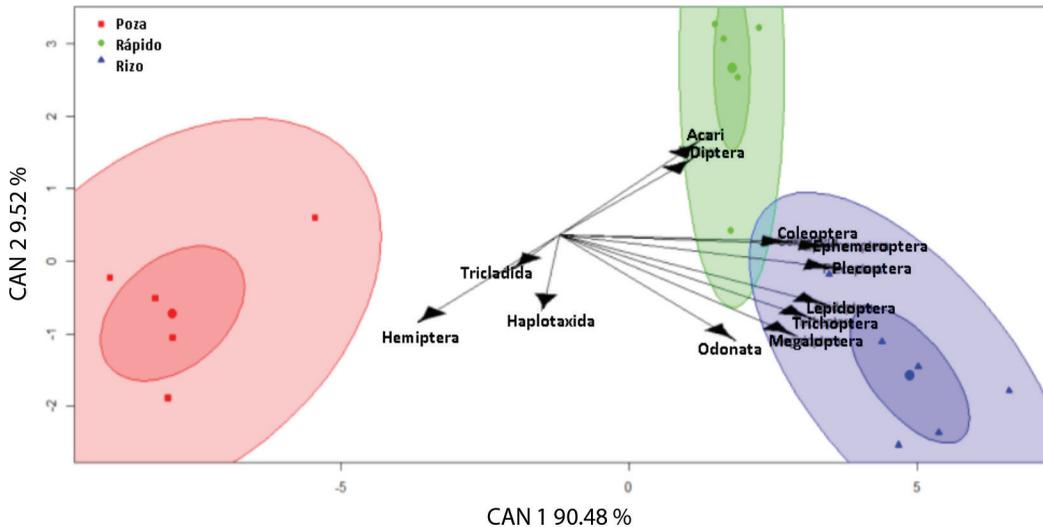


Fig. 2. Biplot del análisis discriminante de los mesohábitat con base en la composición de los órdenes de macroinvertebrados. / **Fig. 2.** Biplot of the discriminating analysis of the mesohabitat based on the composition of the macroinvertebrate orders.

eje explicó el 90.48 % de la varianza y determinó que el rizo es el mesohábitat de mayor preferencia por los macroinvertebrados de los órdenes Coleoptera, Ephemeroptera, Plecoptera, Lepidoptera, Trichoptera, Megaloptera y Odonata, mientras que los órdenes Acari y Díptera están más relacionados con los rápidos. Finalmente, los órdenes Hemiptera, Tricladida y Haplontaxida presentan una tendencia de preferencias hacia las pozas (Fig. 2).

El mapa de calor identificó 12 familias que presentaron el menor valor de varianza en el análisis PCA y no fueron incluidas en el cluster. Particularmente bajos fueron las familias Ampullaridae, Planorbidae, Thiaridae, Noteridae y Notonectidae que no presentan variaciones reconocibles entre mesohábitat. También presentan baja diferenciación entre mesohábitat las familias Dugesiidae, Calopterygidae, Lepoceridae, Chironomidae, Polycentropodidae y Empididae, que presentan la misma tonalidad de color igual o semejante en todo el gradiente. El grupo conformado por las familias Elmidae, Hydrobiosidae, Ptilodactylidae, Leptohyphidae, Plythoridae, Philopotamidae, Glossomatidae, Perlidae, Crambidae y Baetidae mostró mayor preferencia por los mesohábitats rizo y rápido, presentándose como un grupo

diferenciado en la parte superior del dendrograma, separados de Corydalidae que prefiere los rizos. Asimismo, Acari, Psephenidae y Simuliidae muestran afinidad con el mesohábitat rápido y contribuyen en su diferenciación. Mientras que las familias Euthyplociidae, Veliidae, Calopterygidae, Odontoceridae y Haplontaxidae muestran preferencia por el mesohábitat poza, al igual que la familia Dugesiidae que, aunque tiene amplia distribución, presentó en este hábitat la máxima abundancia. Las familias Naucoridae, Coenagrionidae, Helicopsychidae y Blepharoceridae estuvieron presentes tanto en rizos como en pozas (Fig. 3).

El análisis de escalamiento multidimensional métrico de la abundancia de distintos órdenes de macroinvertebrados mostró un buen ajuste al modelo (stress 0.027) y evidenció la diferencia de la abundancia de los órdenes Acari, Coleoptera, Plecoptera, Trichoptera, Odonata, Ephemeroptera, Lepidoptera, Díptera y Megaloptera en los rizos y los rápidos, así como la diferencia de la abundancia de los órdenes Tricladida, Hemiptera, Haplontaxida y Neotaenioglossa en las pozas. Asimismo, los rizos y los rápidos se diferenciaron por variables ambientales como la velocidad, la conductividad, la temperatura, el oxígeno disuelto, la

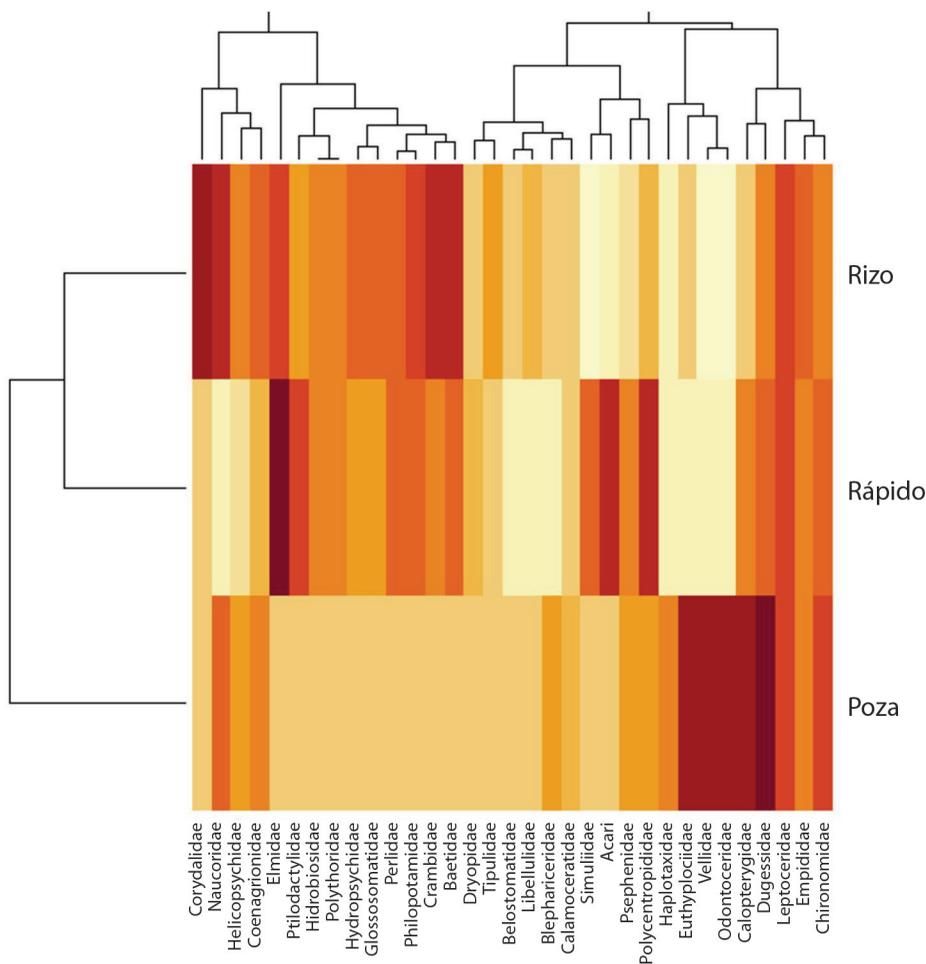


Fig. 3. Mapa de calor de familias de macroinvertebrados a partir de su distribución en diferentes mesohábitats. Las variables que tienen la misma tonalidad son las que menos influyen en la clasificación, las máximas relaciones están representadas por colores más oscuros y la mínima relación por los colores más claros. / **Fig. 3.** Heat map of macroinvertebrates families from distribution in different mesohabitats. The variables that have the same hue are the ones that least influence the classification, the maximum relationships are represented by the darkest colors and the minimum relationship by the clearest colors.

turbiedad y el tipo de sustrato, en tanto que las pozas presentan mayor cercanía con la profundidad (Fig. 4).

El análisis discriminante mostró un 72 % de casos correctamente identificados por validación cruzada. El primer eje explicó un 96.3 % de la varianza y determinó que los mesohábitat rizo y rápido, que presentan mayor velocidad, fueron discriminados por mayores valores de abundancia y riqueza de macroinvertebrados (promedio = 365 individuos y 30 taxones). El mesohábitat poza, fue discriminado por una

mayor profundidad y menores valores de abundancia y riqueza de macroinvertebrados, con un promedio 83 individuos y 17 taxones (Fig. 5).

De acuerdo con los resultados del índice de la calidad de la vegetación de ribera Andina (QBR-And), las quebradas La Carbonera (S1), La Isla (S5 y S6) y el Río Melcocho (La Isla, S7), presentan una vegetación de ribera sin alteraciones y se encuentra en estado natural (QBR-And > 95); el río Melcocho (Puente Amarillo [PA] S4) presenta una vegetación ligeramente perturbada (QBR- And entre 75

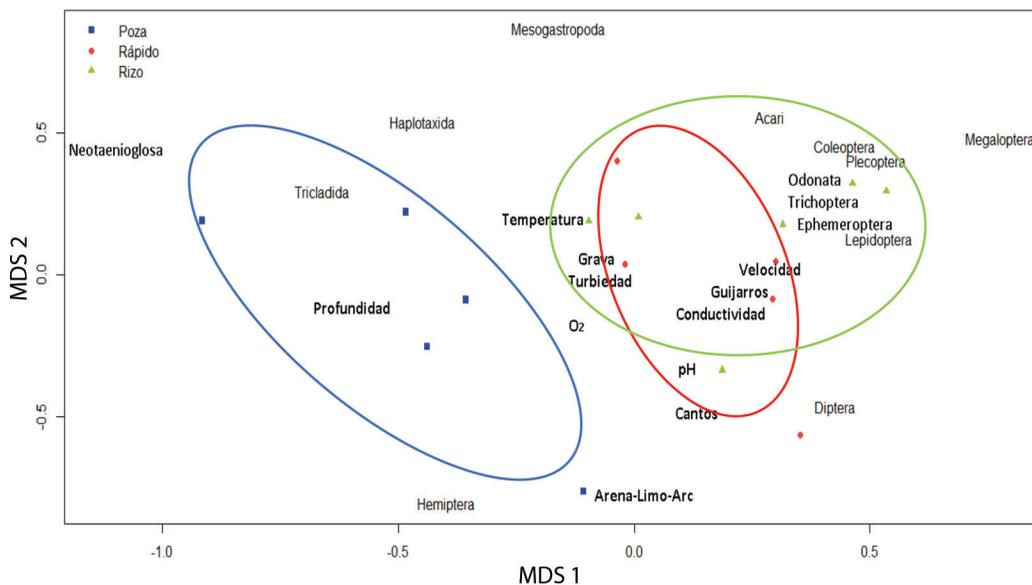


Fig. 4. Análisis de escalamiento multidimensional entre órdenes de macroinvertebrados con variables ambientales en relación con su preferencia entre hábitat. / **Fig. 4.** Multidimensional scaling analysis between macroinvertebrate orders with environmental variables in relation to its habitat preference.

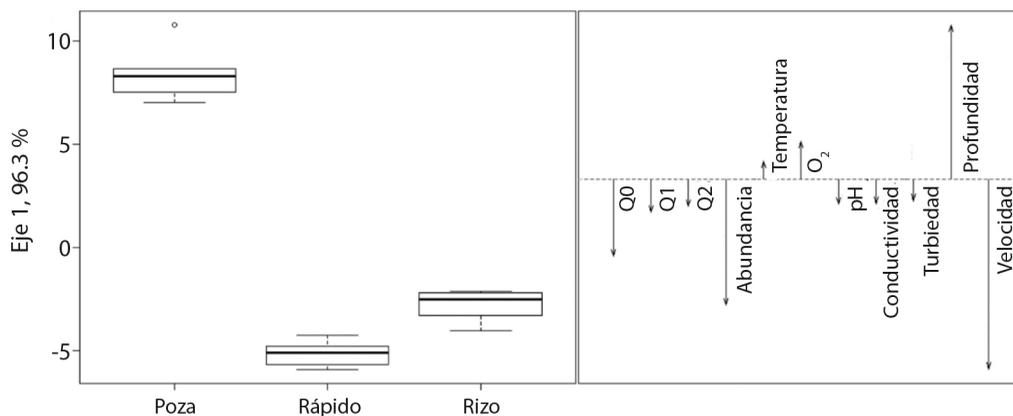


Fig. 5. Análisis discriminante canónico para la abundancia de macroinvertebrados y variables ambientales. O₂-Oxígeno disuelto (mg/l), temperatura (°C), pH, conductividad (µS/cm), Turbiedad (NTU), profundidad (m), velocidad (m/s), riqueza (q0), equidad (q1), especies dominantes (q2). / **Fig. 5.** Canonical discriminating analysis for the abundance of macroinvertebrates and environmental variables. O₂-Dissolved oxygen (mg/l), temperature (°C), pH, conductivity (µs/cm), turbidity (NTU), depth (m), speed (m/s), wealth (q0), equitativity (q1), dominant species (q2).

y 95), no obstante, de buena calidad, caracterizado por un bosque de ribera con buena estructura, poco intervenido, árboles de buen porte (Montoya-Cardona, 2022). La Calera (S3) presentó inicio de alteración importante,

con calidad intermedia (QBR-And entre 51 y 75) y las quebradas San Antonio (S2), La Trinidad (S8) y Río Tafetanes (S9 y S10) degradación extrema, calidad pésima en su vegetación de ribera (QBR-And < 25) (Fig. 6).

QRB-And		
La Carbonera (S1)	100	■
San Antonio (S2)	25	■
La Calera (S3)	60	■
Río Melcocho (PA) (S4)	95	■
La Isla (S5 - S6)	100	■
Río Melcocho (La Isla) (S7)	100	■
La Trinidad (S8)	15	■
Río Tafetanes (S9)	15	■
Río Tafetanes (S10)	10	■

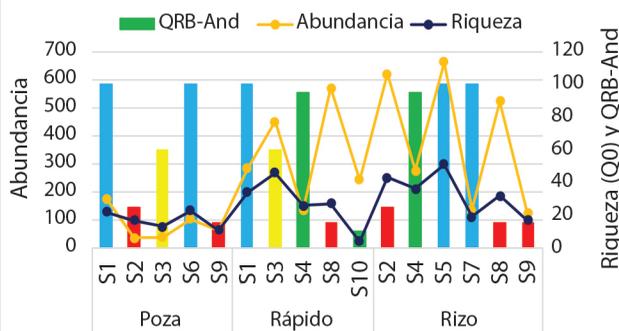


Fig. 6. Índice QRB-And comparando la riqueza y abundancia de macroinvertebrados en los diferentes sitios de muestreo. Azul (> 96): Vegetación de ribera sin alteraciones, calidad muy buena, estado natural. Verde (75-95): Vegetación ligeramente perturbada, calidad buena. Amarillo (51-75): Inicio de alteración importante, calidad intermedia. Naranja (26-50): Alteración fuerte, mala calidad. Rojo (< 25): Degradación extrema, calidad pésima. / **Fig. 6.** QRB-And index comparing the richness and abundance of macroinvertebrates in the different sampling sites. Blue (> 96): Riparian vegetation without alterations, very good quality, natural state. Green (75-95): Slightly disturbed vegetation, good quality. Yellow (51-75): Start of important alteration, intermediate quality. Orange (26-50): Strong alteration, poor quality. Red (< 25): Extreme degradation, lousy quality.

El análisis de componentes principales realizado para establecer la varianza de la diversidad y la abundancia entre muestras, obtuvo una varianza acumulada de 99.92 % en los dos primeros ejes y mostró la separación de sitios con valores de riqueza contrastantes en función del índice QBR. El primer eje diferenció las muestras con mayores valores de QBR-And en los que la riqueza fue mayor, asimismo (en su eje negativo) los mesohábitats con una alteración fuerte y mala calidad del bosque de ribera, en los que la riqueza de macroinvertebrados presentó los menores valores. La abundancia no mostró relación con el índice QBR-And.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que no hay diferencias significativas en las variables químicas entre los mesohábitats excepto para la concentración de oxígeno disuelto. De acuerdo con Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo (2022), el oxígeno es fundamental para varios procesos vitales como la respiración, oxidación de la materia orgánica y nitrificación. Tal como lo describen Dias da Silva et al. (2015), su concentración en los mesohábitats ocurre en

función de las condiciones hidráulicas creadas por la combinación de la velocidad, características de los sustratos y la profundidad. Es así como el ingreso de oxígeno por subsidio atmosférico, que sería mayor en un mesohábitat como los rápidos, afectaría procesos funcionales clave en este tipo de ecosistemas. Las diferencias en las variables físicas como la profundidad y la velocidad son notables entre mesohábitat, evidenciando características propias de cada uno de ellos. Los rizados y rápidos se caracterizaron por valores mayores de velocidad y menor profundidad propiciando una adecuada oxigenación, mientras que las pozas se distinguieron por ser más profundas y presentan un flujo más lento similar a lo reportado por Parasiewicz et al. (2009).

Este estudio evidencia una alta diversidad de macroinvertebrados que se encuentran presentes en los diferentes mesohábitats de las corrientes de montaña del Oriente antioqueño, tanto en términos de riqueza total (q0), como de especies comunes (q1) y dominantes (q2). Además, los valores de riqueza se consideran representativos de la región en relación con los reportados por Barros-Núñez (2020). Congruente con otros estudios



(Burgazzi et al., 2021; Principe et al., 2007; Vimos-Lojano, 2017), los mesohábitat con mayor diversidad y abundancia fueron los ríos y rápidos debido a la influencia en la disponibilidad de recursos alimenticios, tipo de sustrato y perturbaciones físicas que permiten explicar una mayor abundancia de organismos ETP en este tipo de mesohábitat. En especial, porque muchos de ellos cuentan con diversas adaptaciones morfológicas que les permiten sobrevivir a condiciones de mayor velocidad, tales como ganchos, ventosas, cuerpos delgados y aplanados (Elosegi & Sabater, 2009; Molina et al., 2008; Roldán-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2022). En las pozas la entrada continua y la acumulación de materia orgánica bentónica gruesa y fina permite explicar las mayores abundancias de invertebrados trituradores como *Nectopsyche* reconocido por su preferencia por hábitats con bajas velocidades donde se acumula material de piedras y hojas que es utilizado para la construcción de casas o como recurso alimenticio (Holzenthal & Ríos-Touma, 2018). Nuestros resultados destacan una comunidad de macroinvertebrados espacialmente estructurada, siendo la composición y la diversidad variables con mayor dependencia del tipo de mesohábitat, tal como fue registrado por Burgazzi et al. (2021). Mientras que la abundancia solo presenta disminución en las pozas, pero no diferencia rápidos y ríos.

Buenas condiciones físicas y químicas como variedad de sustratos, disponibilidad de recursos, aguas con buena oxigenación y poco profundas son factores comunes en corrientes de montaña y preferidas por la mayoría de los macroinvertebrados (Barros-Núñez, 2020). Tal es el caso de los géneros *Leptohyphes*, *Smicridea*, *Thraulodes*, *Simulium*, *Macrelmis*, *Anacroneuria*, *Camelobaetidius* y *Nectopsyche*, que fueron predominantes en los mesohábitats río y rápido. Mientras que, en las pozas las condiciones de baja velocidad, la acumulación de materiales como hojas y piedras es aprovechado por algunos macroinvertebrados como *Grumichella*, *Helicopsyche* y nuevamente *Nectopsyche*, para la elaboración de casas a partir de restos vegetales, piedras pequeñas

y granos de arena. Este resultado concuerda con lo reportado por Díaz-Rojas et al. (2020) y Motta-Díaz et al. (2016) en donde se muestra una preferencia notable de determinados organismos como *Simulium* y *Nectopsyche* por hábitats con características contrastantes en respuesta a sus rasgos morfológicos y funcionales (Domínguez & Fernández, 2009; Rolls et al., 2012). En las pozas predominaron también *Rhagovelia* y *Farrodes*, que al igual *Grumichella*, *Helicopsyche*, poseen adaptaciones como tubos o sifones respiratorios, escamas o pelos microscópicos, branquias más grandes y cuerpos pequeños para vivir en este mesohábitat (Merritt et al., 2017). De acuerdo con Rolls et al. (2012), el caudal regula la variedad, la disponibilidad y el área de los mesohábitat. Su efecto depende, en gran medida, de la interacción a escala local entre la hidrología y la geomorfología, regulada a su vez por cambios en las condiciones hidráulicas. De manera que, los caudales bajos disminuyen el volumen, el área y la profundidad y cambian la velocidad de las corrientes, provocando aumento temporal en la abundancia y riqueza de la biota, especialmente los invertebrados (Rolls et al., 2012). En este sentido, tanto Blanckaert et al. (2013) como Motta-Díaz y Vimos-Lojano (2020) destacan la influencia de los parámetros hidráulicos como velocidad, profundidad y rugosidad del lecho en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados.

En concordancia con los resultados de este estudio, Galeano-Rendón y Mancera-Rodríguez (2018) encontraron que durante el período de transición de seco-lluvia destacan órdenes como Trichoptera, Ephemeroptera y Diptera con mayores valores de abundancia. Vázquez et al. (2020) en su estudio sobre idoneidad de hábitat para macroinvertebrados también encontraron que en ríos andinos tropicales algunos géneros de estos órdenes se asocian a flujos más rápidos y turbulentos, como resultado de sus adaptaciones específicas a este entorno. Asimismo, González-Tuta y Gil-Padilla (2020) y Principe et al. (2007) encontraron que familias como Coenagrionidae, Hydrobiosidae, Leptohyphidae, Glossosomatidae, Perlidae,

Baetidae, Elmidae, Psephenidae y Simuliidae tienen mayor preferencia por mesohábitats con sustratos conformados por cantos rodados y en general, superficies rocosas donde la velocidad es mayor. Quesada-Alvarado et al. (2021) ratifican la preferencia de estas familias por velocidades de agua moderadas a rápidas (0.2-1 m/s), como se encontró en este estudio. La presencia de diversos sustratos como grava, guijarros, rocas grandes y cantos combinados con elementos como la hojarasca y restos de madera propician las condiciones necesarias para el establecimiento de dichas comunidades, favoreciendo así una mayor diversidad (Duar-te-Ramos & Reinoso-Flórez, 2020; Váqui-ro-Capera et al., 2020). Además, mientras los rizos están formados por cantos rodados, los rápidos están formados de rocas grandes ancladas en la tierra, las cuales, como consecuencia de las variaciones en la velocidad del agua, son influenciadas continuamente por procesos de deriva favoreciendo la colonización debido a la retención de vegetación y de macroinvertebrados. De acuerdo con Ríos-Touma et al. (2011) su persistencia depende de la disponibilidad de áreas que sean menos susceptibles a los impactos de la perturbación como refugios, cuyas características físicas aumentan la probabilidad de subsistir a condiciones severas y, por lo tanto, permiten explicar la presencia de comunidades de macroinvertebrados con mayor riqueza y diversidad en los mesohábitat de rizos y rápidos. Estos resultados resaltan tanto la importancia de adaptaciones específicas de los organismos para ocupar un mesohábitat determinado, así como la dependencia de los atributos de la comunidad de la estructura física del sistema (Burgazzi et al., 2021).

De acuerdo con Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo (2022) y Quesada-Alvarado et al. (2021), las familias Veliidae, Calopterygidae y Dugesidae, que mostraron afinidad con el mesohábitat poza, se caracterizan por vivir en aguas con poca corriente o baja velocidad, con sedimentos ricos en detritos orgánicos y hojarasca y baja concentración de oxígeno. Euthyplociidae, por su parte ha sido reportada para aguas rápidas con sustratos arenosos, lo que no

corresponde con lo encontrado en este estudio. No obstante, el bajo número de individuos recolectados no permite un resultado concluyente sobre sus preferencias de hábitat. Debido a sus hábitos minadores que les permite cavar túneles en el sustrato del cuerpo de agua y dificultan su captura (Gutiérrez & Reinoso-Flórez, 2010). Familias como Naucoridae, Helicopsychidae, Coenagrionidae y Polycentropodidae aprovecharon tanto pozas como rizos, pero fueron restringidas por velocidades muy altas en los rápidos. Polycentropodidae, por ejemplo, se caracteriza por construir refugios fijos y redes amplias de hilo en aguas poco profundas (para depredación y recolección), en rangos de velocidad de lentos a moderados (Van den Brink et al., 2013), de ahí que se encuentre tanto en pozas como en rizos. Naucoridae presenta géneros adaptados a velocidades moderadas a rápidas como *Cryphocricos* y lentos como *Limnocoris* y Coenagrionidae estuvo representado por el *Argia*, adaptado a velocidades moderadas, pero sobre gran variedad de sustratos como rocas, hojarasca, troncos o macrófitas (Mosquera-Murillo & Mosquera-Mosquera, 2021; Quesada-Alvarado et al., 2021). Esta variabilidad en las preferencias genéricas por el hábitat, también se observa en otros grupos. De acuerdo con Oliveros-Villanueva et al. (2020), los Tricópteros son organismos adaptados para sobrevivir en corrientes de agua fuertes, que contribuyen a la retención de oxígeno y acumulación del material orgánico a lo largo del cauce. Este patrón se cumple para la mayoría de los géneros recolectados en este estudio. No obstante, también se ratifica la variabilidad en las preferencias genéricas por el hábitat, en el caso particular de *Nectopsyche*, que fue encontrado tanto en pozas como en rizos y rápidos, lo cual se relaciona con el amplio rango de velocidades en que puede establecerse (Quesada-Alvarado et al., 2021). En cuanto a los coleópteros, González-Córdoba et al. (2020) describen igualmente un amplio rango de preferencia por el tipo de sustrato y velocidad. Pese a la versatilidad de muchos grupos, debido a que en las pozas son más susceptibles a la depredación y no disponen de sustratos



heterogéneos para su establecimiento (Brand et al., 2012), este mesohábitat presentó menor abundancia y diversidad de macroinvertebrados que los rápidos y rizados.

Acompañando las variables hidráulicas, la cobertura vegetal aparece como un elemento importante en el establecimiento de los macroinvertebrados en las corrientes estudiadas. La diversidad y abundancia de macroinvertebrados es mayor en los sitios que presentan más variabilidad en el sustrato y mejores condiciones de cobertura vegetal, afectando especialmente su composición funcional, tal como se ha documentado en Colombia (Barros-Núñez, 2020; Galeano-Rendón & Mancera-Rodríguez, 2018; Meza-Salazar et al., 2012; Vera-Sánchez & Pinilla-Agudelo, 2020; Walteros-Rodríguez & Castaño-Rojas, 2020) y en otros países (Fierro et al., 2017; Oester et al., 2022; Ono et al., 2020). Esta dependencia entre las características de la ribera y la estructura de la comunidad de macroinvertebrados obedece a que la entrada de material alóctono como hojarasca, semillas, ramas y troncos representa una fuente fundamental de energía y nutrientes para los macroinvertebrados, especialmente los trituradores (Vimos-Lojano, 2017). Esto se refleja en la abundancia de géneros ETP con este hábito en los ríos que presentaron mayores coberturas de vegetación. Además, la hojarasca y restos vegetales que son aportados desde la ribera también se convierten en sustrato para la colonización del perifiton, un biofilm que proporcionan alimento para invertebrados raspadores, incluyendo a muchos tricópteros y efemerópteros (Flowers & De la Rosa, 2010; Wiggins, 2004). Asimismo, provee refugio frente a las variaciones del caudal y la presencia de depredadores (Ríos-Touma et al., 2011).

Por último, si bien los macroinvertebrados continúan siendo organismos fundamentales para el establecimiento de las condiciones de calidad de agua en una corriente, es recomendable ser cauteloso con la manera en que son usados en la bioindicación, ya que, como se observa en este estudio, los patrones de composición y abundancia de macroinvertebrados

pueden estar reflejando también, en gran medida, las condiciones físicas del hábitat. Es por ello, que cuando se evalúan las condiciones de calidad del agua, simultáneamente se debe caracterizar el hábitat físico y considerar sus efectos sobre la dinámica de esta comunidad. A fin de garantizar que no se subestime la riqueza ni se omita información determinante para el establecimiento o no de las especies. Los resultados de este estudio evidencian que las variables del hábitat como la velocidad, la profundidad y el sustrato, tienen mayor importancia que las variables químicas del agua en la distribución de macroinvertebrados en las corrientes del Oriente antioqueño y contribuyen a diferenciar la composición de los mesohábitats rizo, poza y rápido. Siendo la concentración de oxígeno, la única variable química relevante en la distribución de estos organismos, confirmando así la hipótesis planteada. De igual forma se encontró que las corrientes que no presentan alteración en su cobertura vegetal ofrecen mejores condiciones para el establecimiento de los macroinvertebrados, independientemente del mesohábitat, lo cual se refleja en mayores valores de riqueza y diversidad, mientras que en corrientes deforestadas se observaron abundancias relativamente altas pero muy baja diversidad, lo que significa que dichas afectaciones repercuten en la composición de la comunidad de macroinvertebrados. En este contexto, garantizar tanto la cobertura vegetal como las condiciones hidráulicas de las corrientes es fundamental para conservar la diversidad de los macroinvertebrados.

Declaración de ética: Los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho aportes que justifican su autoría, que no hay conflicto de interés de ningún tipo y que han cumplido con todos los requisitos y procedimientos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiamiento se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

AGRADECIMIENTOS

El estudio formó parte de un proyecto de investigación financiado por la Universidad Católica de Oriente (UCO) a través del Sistema de Investigación, Desarrollo e Innovación (SIDi). Agradecemos a esta institución y a su Unidad de Gestión Ambiental por la identificación taxonómica de los macroinvertebrados acuáticos, a Patricia Pelayo y Silvia Villabona por su ayuda con el modelo FCA, también a los demás estudiantes participantes del proyecto.

REFERENCIAS

- Acosta, R., Ríos, B., Rieradevall, M., & Prat, N. (2008). Propuesta de un protocolo de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos (CERA) y su aplicación a dos cuencas en Ecuador y Perú. *Limmética*, 28(1), 35–64. <https://doi.org/10.23818/limn.28.04>
- Álvarez-Arango, L. F., & Daza-Ospina, E. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Instituto de Investigación y Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Arévalo-Mendoza, G., Ramos-Cañón, A., & Prada-Sarmiento, L. (2017). Análisis numérico de la influencia de la granulometría para la generación de flujos secos de detritos mediante DEM. *Tecnológicas*, 20(38), 97–108. <http://doi.org/10.22430/22565337.576>
- Aristizábal-García, H. (2002). *Los hemípteros de la película superficial del agua en Colombia. Parte I. Familia Gerridae*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Baird, R., & Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.
- Barros-Núñez, E. P. (2020). *Hábitats de preferencia y variaciones del ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos ante alteraciones de caudal, en tramos de los ríos Cocorná, San Lorenzo y la quebrada Guarínó, El Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia* (Tesis de Pregrado). Universidad de Antioquia, Colombia. <https://hdl.handle.net/10495/16196>
- Blancaert, K., García, X. F., Ricardo, A., Qiuwen, C., & Pusch, M. (2013). The role of turbulence in the hydraulic environment of benthic invertebrates. *Ecohydrology*, 6(4), 700–712. <http://doi.org/10.1002/ecc.1301>
- Borg, I., Groenen, P., & Mair, P. (2018). *Applied multidimensional scaling and unfolding*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73471-2>
- Brand, C., Miserendino, M. L., & Epele, B. L. (2012). Spatial and temporal pattern of caddisfly distribution at a mesohabitat scale in two patagonian mountain streams subjected to pastoral use. *International Review of Hydrobiology*, 97(2), 83–99. <https://doi.org/10.1002/iroh.201111368>
- Burgazzi, G., Vezza, P., Negro, G., Astegiano, L., Pellicano, R., Pinna, B., Viaroli, P., & Laini, A. (2021). Effect of microhabitats, mesohabitats and spatial position on macroinvertebrate communities of a braided river. *Journal of Ecohydraulics*, 6(2), 95–104. <https://doi.org/10.1080/24705357.2021.1938254>
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare. (2011). *Determinantes y asuntos ambientales para el ordenamiento territorial municipal*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia. <https://www.cornare.gov.co/Ordenamiento/Documentos/Determinantes-OTA.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare. (2012). *Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de Rionegro*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia. <https://www.cornare.gov.co/GestionRiesgo/RIONEGRO/Informe-Rionegro.pdf>
- Dias da Silva, M. V. D., Rosa, B. F. J. V., & Alves, R. G. (2015). Effect of mesohabitats on responses of invertebrate community structure in streams under different land uses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 714. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4926-3>
- Díaz-Rojas, C. A., Motta-Díaz, A. J., & Aranguren-Riaño, N. (2020). Estudio de la diversidad taxonómica y funcional de los macroinvertebrados en un río de montaña Andino. *Revista de Biología Tropical*, 68(S2), 132–149. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68is2.44345>
- Domínguez, E., & Fernández, H. R. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología*. Fundación Miguel Lillo.
- Duarte-Ramos, E. J., & Reinoso-Flórez, G. (2020). Composición y estructura del ensamblaje de larvas del orden Trichoptera (Arthropoda: Insecta) en la quebrada Las Perlas, Ibagué, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias, Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 471–481. <https://doi.org/10.18257/raccfyn.964>
- Echeverri-Restrepo, A., Arango-Arango, A. M., Bustamante-Fernández, J. S., Basombrio, I., Delgado-Vélez, C. A., Zapata-Córdoba, D., Cadena-Gaitán, C., & Gómez-Aristizábal, J. (2017). *Corredores estratégicos de movilidad sostenible, ordenamiento territorial y recuperación ambiental para el Oriente antioqueño*. Centro de Estudios Urbanos y Ambientales - Urbam.



- Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Rubes Editorial.
- Friendly, M. (2007). HE plots for multivariate general linear models. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 16(2), 421–444. <https://doi.org/10.1198/106186007X208407>
- Fierro, P., Bertrán, C., Tapia, J., Hauenstein, E., Peña-Cortés, F., Vergara, C., Cerna, C., & Vargas-Chacoff, L. (2017). Effects of local land-use on riparian vegetation, water quality, and the functional organization of macroinvertebrate assemblages. *Science of the Total Environment*, 609, 724–734. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.197>
- Flowers, R. W., & De La Rosa, C. (2010). Ephemeroptera. *Revista de Biología Tropical*, 58(S4), 63–93. <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i4.20083>
- Galeano-Rendón, E., & Mancera-Rodríguez, N. (2018). Efectos de la deforestación sobre la diversidad y la estructura del ensamblaje de macroinvertebrados en cuatro quebradas andinas en Colombia. *Revista Biología Tropical*, 66(4), 1721–1740. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.31397>
- González-Córdoba, M., Zúñiga, M. D., & 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>
- González-Tuta, A., & Gil-Padilla, L. N. (2020). Composición de macroinvertebrados en las provincias de Márquez y Lengupá y posible efecto de la orogénesis en su distribución. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 44(171), 572–580. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1037>
- Guisande, C., Manjarrés-Hernández, A., Pelayo-Villamil, P., Granado-Lorencio, C., Riveiro, I., Acuña, A., Prieto-Piraquive, E., Janeiro, E., Matías, J. M., Patti, C., Patti, B., Mazzola, S., Jiménez, S., Duque, V., & Salmerón, F. (2010). Ipez: An expert system for the taxonomic identification of fishes based on machine learning techniques. *Fisheries Research*, 102(3), 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.12.003>
- Guisande, C., Heine J., González-Da Costa, J., & García-Roselló, E. (2014). *RWizard Software*. <http://www.ipez.es/RWizard>
- Gutiérrez, C., & Reinoso-Flórez, G. (2010). Géneros de ninfas del orden Ephemeroptera (Insecta) del departamento del Tolima, Colombia: listado preliminar. *Biota Colombiana*, 11(1-2), 23–32.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1–9.
- Hill, M. (1973). Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54(2), 427–432.
- Holdridge, L. R. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/7936>
- Holzenthal, R. W., & Ríos-Touma, B. (2018). *Nectopsyche* of Ecuador: a new species from the high Andean páramo and redescription of *Nectopsyche spiloma* (Ross) (Trichoptera: Leptoceridae). *PeerJ*, 6, e4981. <https://doi.org/10.7717/peerj.4981>
- Manzo, V. (2005). Key to the South America genera of *Elmidae* (Insecta: Coleoptera) with distributional data. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 40(3), 201–208.
- Meneses-Campo, Y., Castro-Rebolledo, M. I., & Jaramillo-Londoño, A. M. (2019). Comparación de la calidad del agua de dos ríos altoandinos mediante el uso de los índices BMWP/COL y ABI. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 299–310. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.70716>
- Merritt, R., Cummins, K., & Berg, M. (2017). Trophic relationships of macroinvertebrates. En F. R. Hauer & G. A. Lamberti (Eds.), *Methods in Stream Ecology* (pp. 453–474). Academic Press.
- Meza-Salazar, A. M., Guevara, G., Gomes-Dias, L., & Cultid-Medina, C. A. (2020). Density and diversity of macroinvertebrates in Colombian Andean streams impacted by mining, agriculture and cattle production. *PeerJ*, 8, e9619. <http://doi.org/10.7717/peerj.9619>
- Meza-Salazar, A. M., Rubio, J., Dias, L., & Walteros, J. (2012). Calidad de agua y composición de macroinvertebrados en la subcuenca alta del río Chinchiná. *Caldasia*, 34(2), 443–456.
- Milán-Valoyes, W. Y., Caicedo-Quintero, O., & Aguirre-Ramírez, N. J. (2011). Quebrada La Popala: un análisis de calidad del agua desde algunas variables fisicoquímicas, microbiológicas y los macroinvertebrados acuáticos. *Gestión y Ambiente*, 14(1), 85–94.
- Molina, C., Marie-Gibon, F., Pinto, J., & Rosales, C. (2008). Estructura de macroinvertebrados acuáticos en un río altoandino de la cordillera real, Bolivia: variación anual y longitudinal en relación a factores ambientales. *Ecología Aplicada*, 7(1–2), 105–116.
- Montoya-Cardona, D. (2022). *Relación entre protocolos de evaluación de hábitat fluvial e índices biológicos en la valoración de la calidad de un ecosistema fluvial de alta montaña* (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Oriente, Colombia. <https://repositorio.uco.edu.co/jspui/bitstream/20.500.13064/1410/5/Traabajo%20de%20grado.pdf>
- Mosquera-Murillo, Z., & Mosquera-Mosquera, M. M. (2021). Riqueza genérica y distribución de los

- odonatos (Insecta: Odonata) del departamento del Chocó, Colombia. *Boletín Científico del Centro de Museos de la Universidad de Caldas*, 25(1), 191–205. <https://doi.org/10.17151/bccm.2021.25.1.12>
- Motta-Díaz, A., Ortega Corredor, L., Niño-Fernández, Y., & Aranguren-Riño, N. (2016). Grupos funcionales alimenticios de macroinvertebrados acuáticos en un arroyo tropical (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 425–433. <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n2.2016.97>
- Motta-Díaz, A. J., & Vimos-Lojano, D. (2020). Influencia de la variación temporal de los parámetros hidráulicos en la estructura y la función de la comunidad de macroinvertebrados en un río andino. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 44(171), 606–621. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1023>
- Munné, A., Prat, N., Solá, C., Bonada, N., & Rieradevall, M. (2003). A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. *Aquatic Conservation*, 13(2), 147–163. <https://doi.org/10.1002/aqc.529>
- Oester, R., dos Reis Oliveira, P. C., Moretti, M. S., Altermatt, F., & Bruder, A. (2022). Leaf-associated macroinvertebrate assemblage and leaf litter breakdown in headwater streams depend on local riparian vegetation. *Hydrobiologia*, 10(18), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05049-7>
- Oliveros-Villanueva, J. D., Tamaris-Turizo, C. E., & Serna-Macias, D. J. (2020). Larvas de Trichoptera en un gradiente altitudinal en un río neotropical. *Revista Colombiana de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 44(171), 493–506. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1148>
- Ono, E. R., Manoel, P. S., Melo, A. L., & Uieda, V. S. (2020). Effects of riparian vegetation removal on the functional feeding group structure of benthic macroinvertebrate assemblages. *Community Ecology*, 21, 145–157. <https://doi.org/10.1007/s42974-020-00014-7>
- Parasiewicz, P. (2007). Using MesoHABSIM to develop reference habitat template and ecological management scenarios. *River Research and Applications*, 23(8), 924–932. <https://doi.org/10.1002/rra.1044>
- Parasiewicz, P., Rubial, J. G., Sánchez, M. M., & De Jalón Lastra, D. G. (2009). MesoHABSIM: Una herramienta eficaz para la gestión de ríos y cuencas fluviales. *Tecnología del Agua*, 29, 20–26.
- Posada-García, J., & Roldán-Pérez, G. (2003). Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el nor-occidente de Colombia. *Caldasia*, 25(1), 169–192.
- Principe, R., Raffaini, G., Gualdoni, C., Oberto, A., & Corigliano, M. (2007). Do hydraulic units define macroinvertebrate assemblages in mountain streams of central Argentina? *Limnologica*, 37(4), 323–336. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2007.06.001>
- Quesada-Alvarado, F., Umaña-Villalobos, G., Springer, M., & Picado-Barboza, J. (2021). Classification of aquatic macroinvertebrates in flow categories for the adjustment of the LIFE Index to Costa Rican rivers. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(2), 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.08.005>
- Rincón-Echeverri, L. V. (2022). *Análisis de la influencia de la potencia hidráulica específica y la vegetación riparia sobre la distribución de sedimentos en corrientes de montaña en el Oriente Antioqueño* (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Oriente, Colombia. <https://repositorio.uco.edu.co/jspui/bitstream/20.500.13064/1382/5/Trabajo%20de%20Grado.pdf>
- Ríos-Pulgarín, M. I., Barletta, M., & Mancera-Rodríguez, N. J. (2016). The role of the hydrological cycle on the distribution patterns of fish assemblages in an Andean stream. *Journal of Fish Biology*, 89(1), 102–130. <https://doi.org/10.1111/jfb.12757>
- Ríos-Pulgarín, M. I., Mesa, L. M., Longo, M., & Roldán-Pérez, G. (2022). Los ríos. En G. Roldán-Pérez & J. J. Ramírez-Restrepo (Eds.), *Fundamentos de Limnología Neotropical* (pp. 129–167). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Ríos-Touma, B., Encalada, A. C., & Fornells, N. P. (2011). Macroinvertebrate assemblages of an Andean high-altitude tropical stream: The importance of season and flow. *International Review of Hydrobiology*, 96(6), 667–685. <https://doi.org/10.1002/iroh.201111342>
- Roldán-Pérez, G., & Ramírez-Restrepo, J. J. (2022). *Fundamentos de limnología neotropical*. Editorial Universidad de Antioquia.
- Rolls, R., Leigh, C., & Sheldon, F. (2012). Mechanistic effects of low-flow hydrology on riverine ecosystems: ecological principles and consequences of alteration. *Freshwater Science*, 31(4), 1163–1186. <https://doi.org/10.1899/12-002.1>
- Salazar-Castellanos, D., Meza-Salazar, A. M., & Guevara, G. (2020). Macroinvertebrados y pérdida de masa de hojas de *Eucalyptus* sp. y *Tibouchina lepidota* en una quebrada altoandina con influencia minera (Manizales, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 44(171), 593–605. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1059>
- Suter, G. W., & Cormier, S. (2015). Why care about aquatic insects: uses, benefits, and services. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(2), 188–194. <https://doi.org/10.1002/ieam.1600>
- Townsend, C., Dolédec, S., Norris, R., Peacock, K., & Arbuckle, C. (2003). The influence of scale and geography on relationships between stream community



- composition and landscape variables: description and prediction. *Freshwater Biology*, 48(5), 768–785. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01043.x>
- Van den Brink, F., Van der Velde, G., & Wijnhovend, S. (2013). Diversity, occurrence and feeding traits of caddisfly larvae as indicators for ecological integrity of river-floodplain habitats along a connectivity gradient. *Ecological Indicators*, 25, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.010>
- Váquiro-Capera, C., Reinoso-Flórez, G., & Guevara, G. (2020). Estadios ninfales de *Anacronuria* spp. (Plecoptera: Perlidae) y su relación con variables físico-químicas en tres microcuencas del río Combeima, Ibagué, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 44(171), 458–470. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.951>
- Vázquez, R. F., Vimos-Lojano, D., & Hampel, H. (2020). Habitat suitability curves for freshwater macroinvertebrates of tropical Andean rivers. *Water*, 12(10), 2703. <https://doi.org/10.3390/w12102703>
- Vera-Sánchez, D. A., & Pinilla-Agudelo, G. (2020). Aproximación preliminar a un índice multimétrico de macroinvertebrados (IMARBO) para evaluar el estado ecológico de ríos de las cuencas alta y media del río Chicamocha en Boyacá, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 23(1), 1–36. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n1.83792>
- Vimos-Lojano, D. (2017). *Influencia de las condiciones hidráulicas e hidrológicas en la variación espacial y temporal de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos altoandinos de cabecera al sur de Ecuador* (Tesis de Doctorado). Universitat Politècnica de València, España. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/86217>
- Vimos-Lojano, D., Hampel, H., Vázquez, R. F., & Martínez-Capel, F. (2020). Community structure and functional feeding groups of macroinvertebrates in pristine Andean streams under different vegetation cover. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(3), 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.04.004>
- Walteros-Rodríguez, J. M., & Castaño-Rojas, J. M. (2020). Composición y aspectos funcionales de los macroinvertebrados acuáticos presentes en una microcuenca de cabecera en los Andes de Risaralda, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 581–592. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1085>
- Wiggins, G. B. (2004). *Caddisflies. The underwater architects*. University of Toronto Press.
- Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse riverbed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951–956. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>