

DONEIDAD DE HÁBITAT Y RELACIÓN CON EL AMBIENTE DE LOS PECES DE LA ECORREGIÓN ALTOANDINA DEL ORINOCO

LAURA ZULY VELANDIA-PÉREZ

Grupo de Investigación Manejo Integrado de Ecosistemas y Biodiversidad. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. laura.velandia03@uptc.edu.co

CAMILO ANDRÉS ROA-FUENTES

Grupo de Investigación Manejo Integrado de Ecosistemas y Biodiversidad. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

31

Resumen: El estudio de la relación especies-hábitat es indispensable para la comprensión del funcionamiento y adaptabilidad de los ecosistemas lóticos frente a cambios en las condiciones ambientales e impactos antropogénicos. Este trabajo identifica la relación de la ictiofauna de la parte alta de la cuenca del río Cusiana con las variables fisicoquímicas y evalúa la idoneidad de hábitat de las especies más frecuentes. Para esto se realizó un muestreo de la ictiofauna en 14 localidades y en cada una se midieron 15 variables fisicoquímicas. Se registraron 725 peces pertenecientes a cuatro órdenes y 15 especies. Se destaca la presencia exclusiva de *Oncorhynchus mykiss*, especie exótica invasora, en altitudes superiores a los 2125 msnm, por el contrario, en altitudes inferiores se presentó la mayor riqueza y abundancia de especies de los órdenes Characiformes y Siluriformes. Las especies se relacionaron particularmente con la velocidad del agua, concentración de nitratos y temperatura del agua. El índice de idoneidad de hábitat permitió establecer los rangos de temperatura, velocidad y profundidad idóneos para *Characidium cf. zebra*, *Creagrutus atratus*, *Chaetostoma dorsale*, *Dolichancistrus fuesslii*, *Astroblepus latidens* y *O. mykiss*. El presente estudio adquiere una mayor importancia por desarrollarse en regiones poco investigadas y de alto interés para la minería y la energía, como sucede en la cuenca del río Cusiana, en la Orinoquía colombiana.

Palabra clave: Ensamblaje de peces, Idoneidad de hábitat, Orinoquia Colombiana, Río Cusiana, Variables fisicoquímicas.

HABITAT SUITABILITY AND RELATIONSHIP WITH THE ENVIRONMENT OF FISHES OF THE ORINOCO HIGH ANDEAN ECOREGION

Abstract: The study of the species-habitat relationship is essential for understanding the functioning and adaptability of lotic ecosystems in the face of changes in environmental conditions and anthropogenic impacts. This work identifies the relationship of the fish fauna in the upper part of the Cusiana River basin with physicochemical variables and evaluates the habitat suitability of the most frequent species. For this, an ichthyofauna sampling was conducted in 14 locations, and in each one, 15 physicochemical variables were measured. A total of 725 fish belonging to four orders and 15 species were recorded. The exclusive presence of *Oncorhynchus mykiss*, an invasive exotic species, stands out at altitudes above 2125 meters above sea level; on the contrary, at lower altitudes, the highest richness and abundance of species from the Characiformes and Siluriformes orders were observed. The species were particularly related to water velocity, nitrate concentration, and water temperature. The habitat suitability index allowed the establishment of the ideal ranges of temperature, velocity, and depth for *Characidium cf. zebra*, *Creagrutus atratus*, *Chaetostoma dorsale*, *Dolichancistrus fuesslii*, *Astroblepus latidens*, and *O. mykiss*. The present study gains greater importance for being conducted in poorly researched regions of high interest for mining and energy, as is the case in the Cusiana River basin, in the Colombian Orinoquía.

Key words: Fish assemblage, Habitat suitability, Colombian Orinoquia, Cusiana River, Physicochemical variables.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la idoneidad de hábitat y en general de la relación de las especies con su hábitat, permite comprender el comportamiento y la distribución de las especies en el ambiente, ya que estas buscan las condiciones adecuadas para su alimentación, reproducción y sobrevivencia (Grinnell, 1917; Hutchinson, 1957). Además, identificar la idoneidad de hábitat de las especies que habitan ecosistemas acuáticos permite generar estrategias de manejo y conservación para mitigar el impacto antropogénico sobre los ecosistemas lóticos neotropicales (Teresa & Casatti, 2013; Oyague et al., 2020; Meza Rodríguez et al., 2021).

El método más utilizado para evaluar la idoneidad de hábitat es el modelado de la idoneidad de hábitat (habitat suitability index - HSI) y la construcción de curvas de idoneidad de hábitat (habitat suitability curves - HSC), las cuales representan las preferencias de hábitat de una o varias especies determinadas a priori (Heggenes, 1996). El HSI adaptado para sistemas lóticos combina variables de microhábitat tales como la profundidad, la velocidad del agua, la cobertura vegetal y el sustrato, con las frecuencias de ocurrencia de las especies en diferentes tramos del afluente (Bovee, 1982).

En ambientes acuáticos neotropicales son escasas las investigaciones que utilizan modelos predictivos HSI para cuantificar y discutir los impactos biológicos provocados por cambios en las variables hidráulicas (Teresa & Casatti, 2013). Este vacío de conocimiento es necesario reducirlo, debido a que las principales amenazas sobre la ictiofauna de ecosistemas lóticos del neotrópico son provocadas por los cambios de flujos naturales en los afluentes a causa de la construcción de embalses o desvíos en los cauces de los ríos para fines agrícolas o industriales (Barletta et al., 2010), especialmente en la región Andina donde se ha considerado el recurso hídrico como fuente potencial para la generación de energía hidroeléctrica (Jiménez-Segura et al., 2014).

Los sistemas lóticos andinos se caracterizan por presentar condiciones ambientales particulares, como bajas temperaturas del agua dependiendo de la altitud, la insolación y la pérdida de calor por evaporación; también suelen presentar velocidades de corriente altas y sustratos gruesos (Jacobsen, 2008). Adicionalmente, los sistemas lóticos altoandinos se caracterizan por proporcionar múltiples servicios ecológicos incluyendo retención de sedimentos, ciclaje de nutrientes, disponibilidad de hábitat para la biota y provisión de alimento para la sociedad (Meyer et al., 2003; Jacobsen, 2008).

La cuenca del río Cusiana presenta una amplia variedad de ecosistemas andinos y una prominente biodiversidad, entre la que se puede

resaltar la diversidad ictiológica (Urbano-Bonilla et al., 2009, 2014, 2018; Villa-Navarro et al., 2011), por estas razones se ha declarado como prioritaria para manejo y conservación (Villa-Navarro et al., 2011). En particular, la parte alta de la cuenca del río Cusiana se localiza en la ecorregión altoandina del Orinoco (Abell et al., 2008) donde predominan ecosistemas de páramo, subpáramo y bosque altoandino; además, se desarrollan actividades productivas como agricultura y piscicultura de especies exóticas, por esta razón, el impacto antropogénico es extendido y de alta intensidad (Mendieta et al., 2023). A esto hay que sumarle la intención de desarrollar proyectos hidroeléctricos dado el potencial hidráulico de esta parte de la cuenca (ICEL, 1982; Corporinoquía, 2019). Bajo este contexto, los objetivos del presente estudio fueron: 1) identificar las relaciones de la ictiofauna con las variables ambientales en la parte alta del río Cusiana y 2) evaluar la idoneidad de hábitat para las especies más frecuentes que allí habitan.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El río Cusiana nace en el flanco oriental de la cordillera oriental de los Andes, departamento de Boyacá, Colombia, en la laguna del páramo de Siscunsí a 3800 msnm (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2004). La cuenca tiene un área de 506254 Ha y el canal principal una longitud de 271 km que transcurre sobre un amplio gradiente altitudinal, desde los 3800 hasta los 150 msnm, donde descarga sus aguas al río Meta en jurisdicción del municipio de Maní, departamento de Casanare, Colombia (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2004). La parte alta de la cuenca del río Cusiana se localiza en la ecorregión altoandina del Orinoco (Abell et al., 2008), abarcando un área de 104953 ha en los municipios de Sogamoso, Labranzagrande, Aquitania y Pajarito en Boyacá, y en los municipios de Recetor y Chámeza en Casanare (Corporinoquía & Corpoboyacá, 2015, 2019). La parte alta de la cuenca del río Cusiana ha sido históricamente un área de conflicto armado dada la incidencia de grupos armados ilegales como las Autodefensas Unidas de Colombia (AUC), el Ejército de Liberación Nacional (ELN) y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) (Echandía, 2015; Comisión de la Verdad, 2022a, 2022b). La influencia del conflicto armado también se extiende a los estudios ambientales, ya que la mayoría de las investigaciones sobre la ictiofauna de la cuenca del río Cusiana se han desarrollado en la parte media y baja (Urbano-Bonilla et al., 2009, 2014, 2018).

Se establecieron 14 localidades(L), distribuidos equidistantemente desde el municipio de



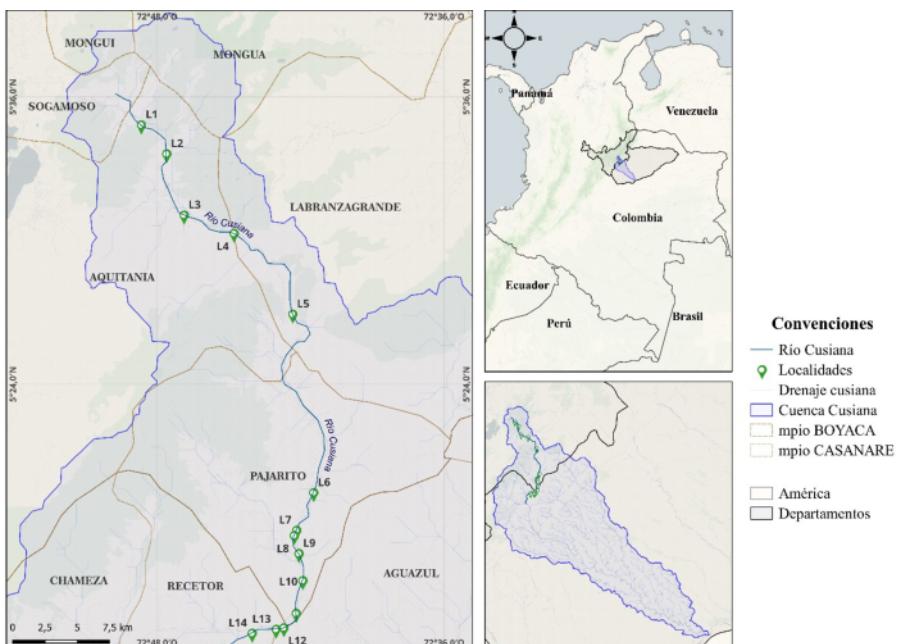


Fig. 1. Área de estudio y distribución de las localidades de muestreo, cuenca alta del río Cusiana, Colombia.

Fig. 1. Study area and distribution of sampling locations, upper basin of the Cusiana River, Colombia.

33

Aquitania hasta el municipio de Recetor, comprendiendo un gradiente altitudinal entre los 3031 y 643 msnm (Fig. 1). Las localidades se seleccionaron con base a la heterogeneidad ambiental y a la accesibilidad a cada uno de ellos.

MUESTREO DE PECES

Los muestreos se realizaron en enero de 2023, que corresponde a uno de los meses de menor precipitación para esta parte de la cuenca (Corporinoquía & Corpoboyacá 2019). Para la recolecta de peces se utilizó un equipo de pesca eléctrica Smith-Poot LR-24. En cada punto de muestreo se estableció un transecto de 100 m de longitud y se realizó un recorrido a contracorriente en una trayectoria de zigzag y explorando los diferentes mesohábitats (rápidos, pozos y corredores). Todas las localidades presentaron los tres tipos de mesohábitat, los cuales se determinaron visualmente in situ a partir de las siguientes características: rápidos, con flujo rápido y hábitat poco profundo; pozos, con flujo lento y hábitat profundo; y corredores, con flujo y profundidades intermedias entre pozo y rápido (Teresa & Casatti, 2012).

Adicionalmente, se realizaron muestreos con red de arrastre (3 x 1.5 m, ojo de malla de 5mm) durante 20 a 30 minutos. Los individuos recolectados en cada punto se anestesiaron con eugenol, se fotografiaron y posteriormente se fijaron en formol al 10%, transcurridas 72 horas se conservaron en una solución de alcohol al 70%. La identificación de los individuos se realizó hasta el nivel taxonómico más bajo posible,

utilizando claves para la cuenca del Cusiana y el Orinoco (Vari & Harold, 2001; Maldonado-Ocampo et al., 2005; Urbano-Bonilla et al., 2018; Van der Sleen & Albert, 2018), así como descripciones originales de las especies. El material biológico se depositó en el Museo de Historia Natural “Luis Gonzalo Andrade” de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (números de catálogo UPTC-Pe-00192 a UPTC-Pe-00209), el listado detallado de especies está disponible en Velandia Pérez et al., (2024).

VARIABLES AMBIENTALES

En cada punto de muestreo se registraron las coordenadas geográficas y altitud mediante GPS. Posteriormente, se tomaron datos de variables fisicoquímicas in situ como pH (pH-Metro WTW), temperatura del agua, conductividad (Conductímetro YSI), oxígeno disuelto y porcentaje de saturación (Oxímetro YSI), los datos fueron tomados por triplicado para cada variable. A su vez, se tomaron datos de la morfología del canal (ancho, profundidad, velocidad del agua y complejidad del sustrato), mediante decámetro, profundímetro, caudalímetro y método de cadena, respectivamente. La complejidad del sustrato se calculó mediante el método de cadena utilizando la proporción entre una longitud lineal conocida (1 m) y la longitud del contorno de los sustratos encontrados en cada microhábitat (Motta Díaz, 2018). Adicionalmente, se tomaron muestras de agua para análisis e identificación de nutrientes: Nitritos (NO_3^-), Ni-

tratos (NO_2^-) y fosfatos (PO_4^{3-}) a través de espektrofotometría, y amonio (NH_4^+) a través del método de destilación (Rice et al., 2012).

DESARROLLO DE CRITERIOS DE IDONEIDAD DEL HÁBITAT

Se calcularon criterios de idoneidad de hábitat considerando las variables de velocidad, profundidad y temperatura del agua para las especies más frecuentes, es decir, aquellas con ocurrencia en al menos el 50% de las localidades. Se estableció este criterio, ya que las especies menos frecuentes pueden ser submuestreadas y aumentar la probabilidad de presentar errores al establecer su preferencia (Teresa & Casatti, 2013). De esta manera, se calculó el índice de idoneidad de hábitat y se construyeron curvas de idoneidad en función de las variables ambientales (Macura et al., 2018) para seis especies (Tab.1). Inicialmente se establecieron clases para cada variable ambiental a partir de la definición de intervalos utilizando la ecuación 1, fórmula de Sturges (1926).

Ecuación 1.

$$C = \frac{R}{1 + 3.322 * (\log N)}$$

Tab.1. Variables fisicoquímicas medidas en cada localidad, código, promedio, desviación estándar y rango de valores.

Tab.1. Physicochemical variables measured at each location, code, average, standard deviation, and range of values.

34

Variables fisicoquímicas	Código	Promedio	Desviación estándar	(Min-Máx)
pH (unidades)	pH	8,1	0,6	7,3-9,8
Temperatura (°C)	T	17,9	3,5	(11,8-23)
Conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Cond	81,6	21,9	(50,7-125,3)
Oxígeno disuelto (mg/L O_2)	DO	6,1	2,0	(3,6-10,6)
Saturación (%)	Satur	62,8	16,2	(35,7-100,1)
Ancho del río (m)	Ancho	21,3	9,0	(9,2-33)
Velocidad (m/s)	Veloc	0,6	0,2	(0,3-0,9)
Profundidad (cm)	Prof	46,3	10,3	(31,1-64,6)
Rugosidad del sustrato	RU	1,1	0,1	(1,1-1,3)
Amonio (mg/L NH_4)	NH ₄	2,3	0,6	(1,4-3,6)
Nitritos (mg/L NO_2)	NO ₃	52,3	24,6	(0-99,8)
Nitratos (mg/L NO_3)	NO ₂	3,9	6,9	(0-26,5)
Fosfatos (mg/L PO_4^{3-})	PO ₄	44,9	31,3	(3,1-125,8)
Alcalinidad ($\mu\text{Eq}/\text{L}$)	Alcal	169,4	80,3	(45,4-380,8)
Altitud (msnm)	Alt	1471,5	1039,7	(643-3031)

$$SI_i = \frac{P_i}{P_{max}}$$

Donde, SI_i es el índice de idoneidad para la clase i , calculado a partir de P_i , el valor obtenido en la ecuación (1) y P_{max} el valor de preferencia más alto obtenido para las clases de cada variable. De esta manera, se obtienen valores normalizados en la escala del índice de idoneidad, es decir, valores que varían entre 0 (no adecuado) y 1 (muy adecuado), proporcionando una aproximación de qué tan adecuado puede ser un hábitat para una especie objetivo (Bovee & Milhous, 1978).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para describir el gradiente ambiental y determinar cuáles son las variables ambientales más representativas del gradiente se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Se identificaron los componentes a interpretar utilizando el modelo de vara quebrada (broken-stick), en el cual se consideraron aquellos componentes principales con valores más altos a los del modelo en mención. Adicionalmente, se utilizaron los puntajes (scores) y el grado de contribución para identificar las variables más representativas. En este último, se tomaron en cuenta las variables con un valor de contribución superior a la contribución promedio esperada.

Para identificar la relación entre las variables ambientales y la estructura del ensamblaje de peces (objetivo 1) se realizó un análisis de redundancia basado en distancia (dbRDA) con distancia de Bray-Curtis, utilizando la abundancia de las especies y las variables ambientales (variables explicativas) previamente estandarizadas (promedio = 0, desviación estándar = 1). Los análisis se realizaron en el software estadístico de acceso libre R versión 4.2.3 (Rstudio Team, 2023) (March, 2023), utilizando los paquetes "BiodiversityR" (Kindt & Core, 2005), "ggplot2" (Wickham, 2016), "tidyverse" (Wickham et al., 2019), "vegan" (Oksanen et al., 2012), "ggcorrplot" (Wei & Simko, 2017), "FactoMineR" (Lê et al., 2008) y "factoextra" (Kassambara & Mundt, 2017). Con el fin de evaluar la idoneidad de hábitat de las especies más frecuentes (objetivo 2) se construyeron curvas de idoneidad de hábitat HSC tipo III en el software Physical Habitat Simulation (PHAB-SIM) (Milhous & Waddle, 2012), utilizando los valores obtenidos de SI_i para cada una de las clases de las variables y las especies objeto de estudio.

RESULTADOS

Se recolectaron 725 individuos correspondientes a cuatro órdenes, ocho familias, 12 géneros y 15 especies (Tab. 2). El orden Characiformes acumuló el 50% del total de las especies, seguido de Siluriformes con 41%, Salmoniformes y Synbranchiformes con 4,5%, cada uno. Las especies con mayor abundancia fueron *Chaetostoma dorsale* (165), *Astroblepus latidens* (143) y *Creagrutus atratus* (120), las de menor abundancia fueron *Knodus deuterodonoides* y *Synbranchus marmoratus*. La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) fue la única especie presente en las primeras cinco localidades, abarcando altitudes desde los 3031 a los 2125 msnm. A partir de los 852 msnm (Pt6 hasta Pt14), las especies con mayor incidencia fueron *C. dorsale* y *A. latidens* ocurriendo en el 64% de las localidades y *D. fuesslii* con ocurrencia en el 57% de las localidades. Las localidades con mayor número de especies se ubicaron debajo de los 767 msnm, entre los municipios de Pajarito y Recotor.

GRADIENTE AMBIENTAL Y RELACIÓN DEL ENSAMBLAJE DE PECES Y LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS

El PCA acumuló el 53% de la variación ambiental en los dos primeros componentes (PC), los cuales presentaron valores superiores al modelo broken-stick y acumularon el 32% y 20,5% de la varianza respectivamente (Fig. 2). En general, la altitud, velocidad, oxígeno disuelto, saturación, temperatura, pH, alcalinidad, fosfatos y nitratos fueron responsables de la mayor parte de la variación en los datos (i.e., su grado de contribución fue superior a la contribución promedio). En particular, el PC1 refleja una segregación ambiental entre las localidades, donde las primeras cinco se caracterizan por ubicarse a mayor altitud y presentar mayores valores de oxígeno disuelto, de porcentaje de saturación y de nitratos. Por el contrario, las localidades 6 a la 14 presentan mayores valores de temperatura, velocidad, pH, conductividad, alcalinidad y fosfatos (Fig. 2). El PC2 refleja una segregación de las localidades a partir de variables químicas como PO₄, NO₃, Alcal y pH, donde, las localidades con mayores valores de PO₄ y NO₃, fueron las localidades 10 a 13, ubicadas después de la cabecera municipal de Pajarito. Por su parte, las localidades 5 y 6 presentaron los mayores valores de alcalinidad y pH (Fig. 2).

Se observó relación entre las variables ambientales y la estructura del ensamblaje íctico (pdbRDA = 0,006; R² adj. = 0,51). Los primeros dos ejes de la dbRDA explicaron el 51,8% y 10,2% de la varianza total, respectivamente. En particular, la abundancia de *O. mykiss* fue mayor en localidades ubicadas a mayor

Tab.2. Listado de especies de peces y ocurrencia por localidad, cuenca alta del río Cusiana, Colombia. (*especies seleccionadas para evaluar criterios de idoneidad de hábitat).

Tab.2. List of fish species and occurrence by locality, upper basin of the Cusiana River, Colombia. (*species selected to evaluate habitat suitability criteria).

Nombre científico	Abreviatura	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16
<i>Characidium chupa</i>	Chachu											+		+			
<i>Characidium cf. zebra*</i>	Chaze							+	+	+	+	+		+		+	
<i>Characidium sp.</i>	Chasp											+	+				
<i>Ceratobranchia aff binghami</i>	Cerbin							+		+		+		+			
<i>Stewardiainae</i>	Stavar											+		+	+		
<i>Crenicichlus atratus*</i>	Creatr							+	+	+	+	+	+	+	+		
<i>Hemibrycon loisae</i>	Hemlooi											+	+				
<i>Hemibrycon metae</i>	Hemmet											+		+	+		
<i>Knodus alpha</i>	Knoalp											+	+	+			
<i>Knodus deuterodonoides</i>	Knoden																+
<i>Trichomycterus sp.1</i>	Trisp1																+
<i>Trichomycterus sp.2</i>	Trisp2												+		+		
<i>Trichomycterus sp.3</i>	Trisp3							+			+	+					
<i>Chaetostoma dorsale*</i>	Chador							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Chaetostoma joropo</i>	Chajor												+	+	+	+	+
<i>Dolichancistrus fuesslii*</i>	Dolfu							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Astroblepus latidens*</i>	Astlat							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Cetopsorhamdia shermani</i>	Cetshe												+	+	+	+	+
<i>Cetopsorhamdia sp.</i>	Cetsp											+	+	+			+
<i>Oncorhynchus mykiss *</i>	Oncmyk		+	+	+	+	+										
<i>Synbranchus marmoratus</i>	Synmar													+			

36

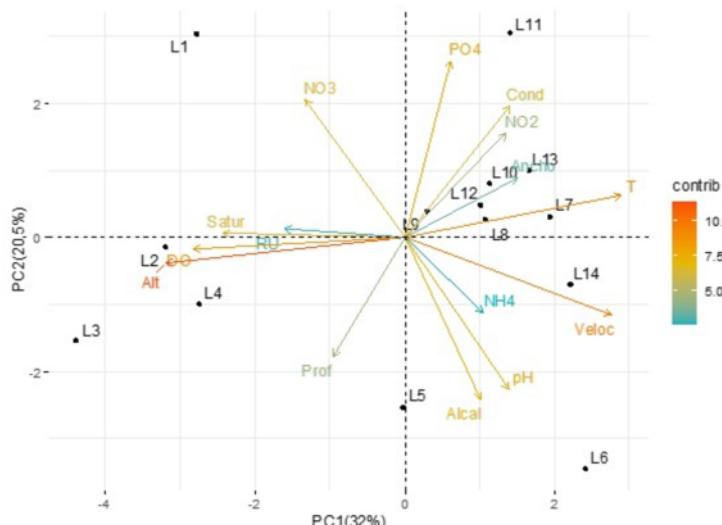


Fig. 2. Biplot del análisis de componentes principales a partir de las variables fisicoquímicas por localidades. Se indica la contribución (contrib) de cada variable ambiental a la explicación de la varianza: color naranja indica una mayor contribución; color azul, menor.

Fig. 2. Biplot of the principal component analysis based on physicochemical variables by sampling points. The contribution (contrib) of each environmental variable to the explanation of variance is indicated: orange color indicates a greater contribution; blue color, lesser.

elevación y con altas concentraciones y saturación de oxígeno y NO₃; mientras que especies como *Chaetostoma dorsale*, *Astroblepus latidens*, *Creagrutus atratus* y *Dolichancistrus fueslli* fueron más abundantes en localidades con temperatura y velocidad elevadas (Fig. 3). Las especies restantes se ubicaron en la mitad de la ordenación, sugiriendo que sus abundancias se relacionan con valores promedio de las variables fisicoquímicas (Fig. 3). Los valores más altos de temperatura y concentración de fosfatos, se asociaron con los órdenes Characiformes y Siluriformes, los cuales presentaron la mayor riqueza y abundancia de especies.

IDONEIDAD DE HÁBITAT

De las 15 especies registradas, *C. zebra*, *C. atratus*, *C. dorsale*, *D. fueslli*, *A. latidens* y *O. mykiss* fueron las de mayor frecuencia, ocurriendo en al menos el 50% de las localidades (Tab. 2); por esta razón, se utilizaron para calcular los índices y curvas de idoneidad de hábitat. Para las variables a considerar, es decir, velocidad, profundidad y temperatura, se definieron 5 clases (Tab.3). Las curvas HSC tipo III demostraron algunos patrones compartidos en-

Tab. 3. Clases y rangos definidos para las variables de las curvas de idoneidad de habitat HSC.

Tab. 3. Classes and ranges defined for the variables of the HSC habitat suitability curves.

Clases	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Temperatura (°C)
Clase 1	0,33-0,45	0,31-0,37	11,8-14
Clase 2	0,46-0,57	0,38-0,44	14,1-16,3
Clase 3	0,58-0,69	0,45-0,51	16,4-18,6
Clase 4	0,70-0,82	0,52-0,57	18,7-20,9
Clase 5	0,83-0,94	0,58-0,64	21-23

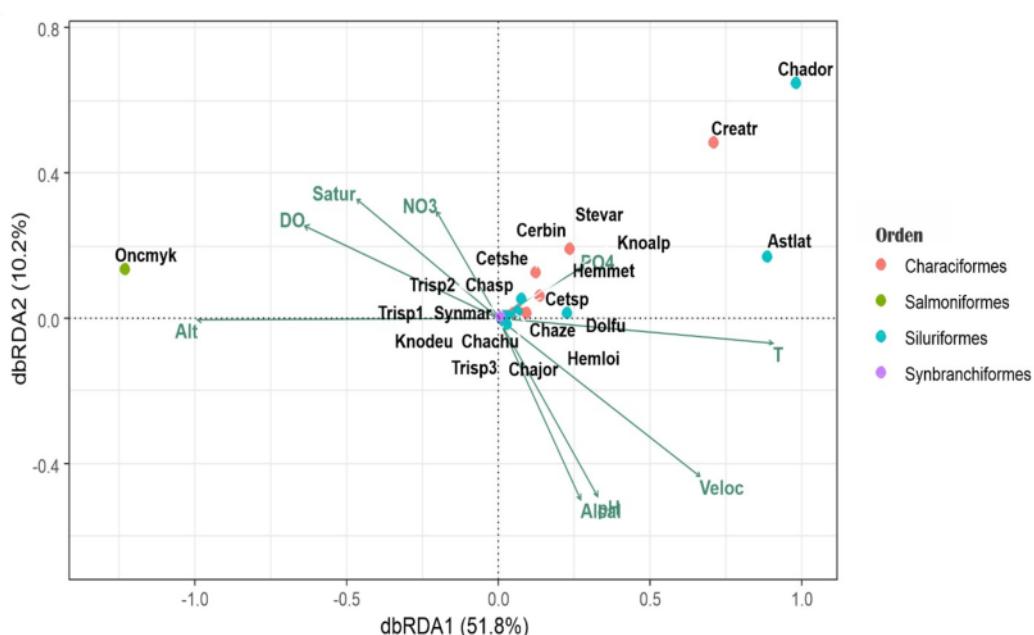
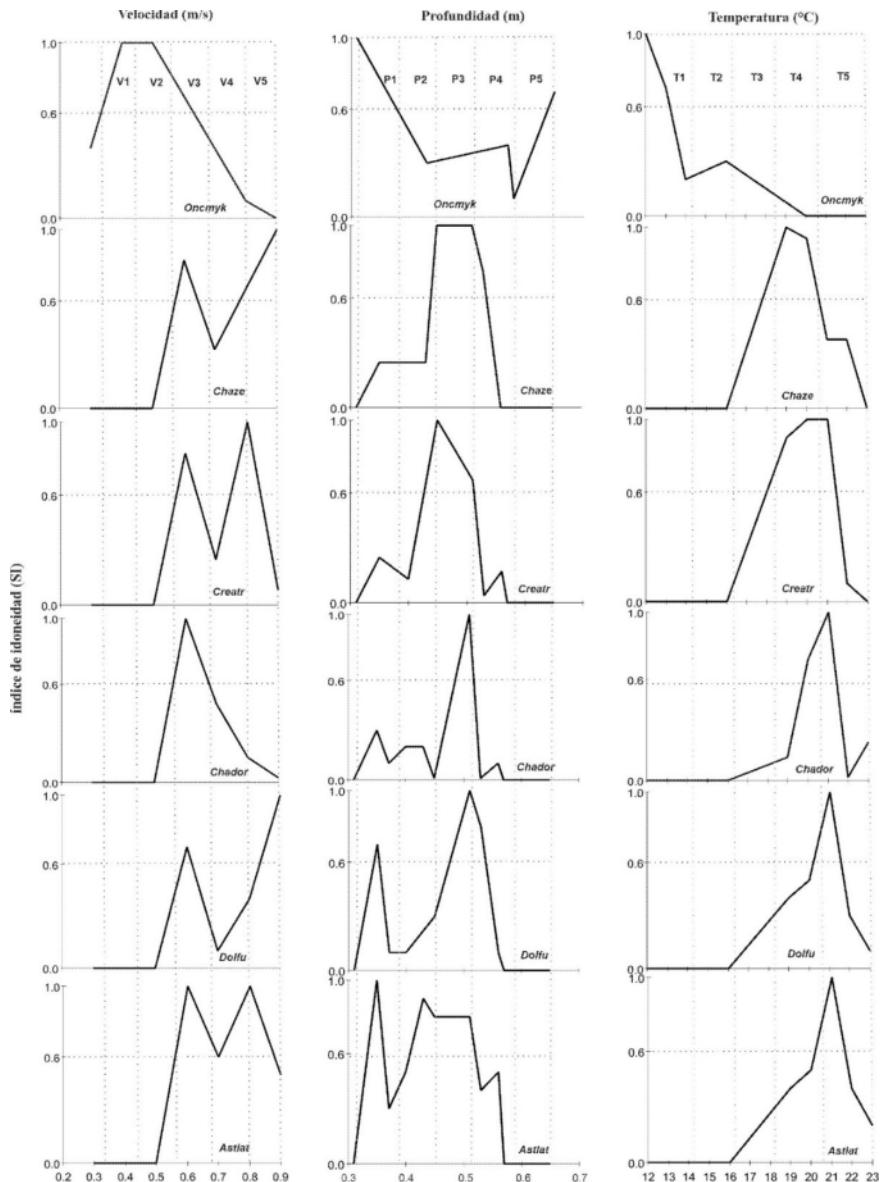


Fig. 3. Análisis de redundancia basado en distancia (dbRDA). Ordenación generada a partir de las variables ambientales y la abundancia de la ictiofauna de la cuenca alta del río Cusiana. Las flechas corresponden a las variables ambientales, los puntos representan las especies y el color corresponde al orden taxonómico.

Fig. 3. Distance-based redundancy analysis (dbRDA). Ordination generated from environmental variables and the abundance of the ichthyofauna of the upper basin of the Cusiana River. The arrows correspond to the environmental variables, the dots represent the species, and the color corresponds to the taxonomic order.



38

Fig. 4. Curvas HSC representando el índice de idoneidad de hábitat (eje Y) para las seis especies más frecuentes en la cuenca alta del río Cusiana, en función de las variables ambientales de velocidad, profundidad y temperatura. Las líneas punteadas en el eje X representan los límites para cada una de las clases definidas para las tres variables. Para el código de las especies ver Tab. 2.

Fig. 4. HSC curves representing the habitat suitability index (Y-axis) for the six most common species in the upper basin of the Cusiana River, based on the environmental variables of velocity, depth, and temperature. The dashed lines on the X-axis represent the limits for each of the classes defined for the three variables. For the species code, see Tab. 2.

tre las especies y para todas las variables ambientales. A excepción de *O. mykiss*, las especies mostraron una preferencia por valores de velocidad superiores a 0,5 m/s y presentaron los valores de SI más altos para las clases V3 (0,58-0,69 m/s) y V5 (0,83-0,94 m/s). En el caso de la profundidad, *O. mykiss* y *A. latidens* mostraron una preferencia por profundidades bajas (clase P1= 0,31-0,37 m), mientras que las demás especies prefirieron profundidades entre 0,45-0,51 m (clase P3). Adicionalmente, en la variable profundidad, *A. latidens* fue la

única especie que presentó valores de SI superiores a 0,6 m, específicamente en las clases P1, P2 y P3. En cuanto a la variable temperatura, *O. mykiss* fue la única con preferencia por temperaturas bajas 11,8-14°C (clase T1), *C. atratus* mostró preferencia por temperaturas entre 18,7 y 23°C (clases T4 y T5), mientras que las especies restantes poseen valores de idoneidad altos entre 18,7 y 20,9°C (clase T4; Fig. 4).

En general, para la velocidad y la profundidad se obtuvieron curvas de idoneidad con

varias modas, donde los valores de idoneidad oscilaron entre las clases definidas para cada variable, es decir, no hay un patrón constante de crecimiento o decrecimiento en las gráficas en función de estas variables. Tal es el caso de *C. dorsale*, *D. fuesslii*, *C. atratus*, *A. latidens* y *O. mykiss* para la variable profundidad y *C. zebra*, *C. atratus*, *D. fuesslii* y *A. latidens* para la variable velocidad, demostrando que las especies pueden ser tolerantes a varias profundidades y flujos. De manera contrastante, las curvas para la variable temperatura mostraron una sola moda por cada especie (Fig. 4).

DISCUSIÓN

En este estudio se identificaron las relaciones entre el ensamblaje de peces de la cuenca alta del río Cusiana con variables fisicoquímicas del agua. Además, a partir de índices de idoneidad de hábitat y la construcción de curvas HSC tipo III, se estableció la preferencia de hábitat de seis especies de peces para las condiciones de velocidad, profundidad y temperatura. Este estudio proporciona información de las relaciones especie-hábitat y de hábitat idóneo para algunas especies ícticas de la ecorregión altoandina del Orinoco.

De las 15 especies encontradas en este estudio, tres se pueden considerar como nuevos registros para la cuenca del río Cusiana (Urbano-Bonilla et al., 2018): *Ceratobranchia aff. binghami*, *A. latidens* y *O. mykiss*, destacándose esta última por ser una especie exótica invasora (Moreira & Silva, 2023) y con reportes para la parte alta de la cuenca, arriba de los 2950 msnm. Es importante resaltar que en las localidades con presencia de la trucha arcoíris (*O. mykiss*) no se encontraron otras especies, probablemente debido a la capacidad invasora de la trucha, la cual coloniza nuevos ambientes desplazando o depredando especies nativas (Alexiades & Encalada, 2017; Erarto & Getahun, 2020; Moreira & Silva, 2023).

La ordenación de las localidades en función de las variables ambientales está directamente relacionada con la altitud y variables que se relacionan con la preferencia de hábitat de las especies, lo que también explicaría la presencia exclusiva de trucha en las altitudes más altas, dada su preferencia por temperaturas bajas y altas concentración de oxígeno disuelto (Raleigh, 1984). En el caso particular de los nitratos, las concentraciones más altas se presentaron en las dos primeras localidades ubicadas en Toquilla (Pt1, Pt2) y en las localidades después de Pajarito, Pt9 y Pt11, característicos por presentar actividades de ganadería y piscicultura y urbanización, respectivamente. Por lo general, las altas concentraciones de nitratos en ecosistemas lóticos están relacionados con procesos de eutrofización donde se desplazan sub-

productos nitrogenados (NO₃-N), provenientes de la mayoría de los fertilizantes utilizados en la agricultura, del estiércol del ganado (Lee et al., 2019) y la piscicultura (Sidoruk et al., 2020). Sin embargo, solo concentraciones muy altas de este compuesto (500 mg/L) pueden afectar significativamente la sobrevivencia y adaptabilidad de las especies ícticas, que, a su vez, depende del grado de tolerancia de cada una de las especies (Gomez, 2020). Contrario a nuestros resultados, ya que las localidades con mayor concentración de nitratos presentaron la mayor abundancia de especies ícticas, donde probablemente la concentración de este compuesto no presenta afectaciones biológicas y, por el contrario, fueron tolerables por los especímenes. Por otra parte, las localidades de altitudes bajas, se relacionaron mayormente con las variables de amonio, nitritos, conductividad, velocidad y pH. En estas localidades se encontró la mayor riqueza de especies, predominando las familias Characidae y Loricariidae, concordante con el efecto que puede provocar la variación, tanto aumento como disminución, de la conductividad eléctrica, sobre las etapas reproductivas en especies de loricáridos, principalmente sobre la inducción de la maduración, ovulación y desove, así como en la cantidad de huevos por postura, beneficiando la permanencia de especies de estas familias (Meza-Sepúlveda & Sepúlveda-Cárdenas, 2012).

IDONEIDAD DE HÁBITAT E ICTIOFAUNA

Las curvas de idoneidad arrojaron patrones esperados de acuerdo a las características morfológicas y adaptativas de las especies evaluadas. La preferencia de *O. mykiss* por velocidades bajas entre 0,35 a 0,45 m/s, es semejante con lo encontrado en otros ríos andinos, donde hubo una preferencia de la especie por velocidades bajas entre los 0,2 - 0,3 m/s, típicas de mesohábitats como pozos y corredores (Oyague et al., 2020). Adicionalmente, la preferencia por flujos de agua bajos también se relaciona con las adaptaciones de la especie, entre ellas las zonas preferidas de alimentación, con corrientes moderadas entre 0,2 - 0,5 m/s (Roussel & Bardonnec, 1999), y zonas de reproducción con corrientes entre 0,3-0,6 m/s (Kammel et al., 2016). Asimismo, la trucha ha demostrado una preferencia por temperaturas bajas del agua, llegando a extremos de menos 20°C (Chen et al., 2015). No obstante, ha sido una especie objeto de investigaciones enfocadas a recrear escenarios de cambio climático, demostrando el alcance adaptativo de *O. mykiss* a altas temperaturas entre los 25-29°C, gracias a su capacidad adaptativa frente a la variabilidad ambiental (Chen et al., 2015).

Paralelamente, las truchas adultas suelen preferir zonas más profundas, especialmente entre los 0,20-0,45 m (Ayllón et al., 2009), si-



milar a lo encontrado en este estudio. Sin embargo, en esta investigación la preferencia de profundidad es hasta aproximadamente los 0,4 m y se vuelve a presentar una tendencia a la preferencia por profundidades mayores a 0,6 m, similar a lo encontrado en truchas del río Yuba, California (Kammel et al., 2016). Por otra parte, en la región neotropical la trucha exhibe una preferencia por profundidades relativamente bajas entre 0,4 a 1,5 m (Olaya-Marín et al., 2022; Oyague et al., 2020), rango compartido parcialmente con los datos de este estudio.

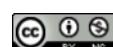
Characidium cf. zebra habita en aguas tropicales y subtropicales, suele preferir mesohábitats poco profundos y de corriente rápida (Teresa & Casatti, 2013). En este estudio se evidencian dos picos idóneos de velocidad a 0,6 y 0,8 m/s, valores mayores a 0,3 m/s, velocidad registrada previamente para esta especie en arroyos tropicales con bajas velocidades (Teresa & Casatti, 2013), por ende, este estudio demuestra la preferencia de *C. zebra* por ambientes contrastantes constituidos por altas velocidades, variable, que a su vez se relaciona con mayor disponibilidad de oxígeno. En relación a la profundidad, *C. zebra* mostró una preferencia por profundidades entre los 0,45-0,52 m, rango más amplio a lo reportado por Teresa & Casatti (2013), quienes evidenciaron para esta especie una preferencia por zonas poco profundas entre los 0,2-0,3 m en sistemas de arroyos en Brasil. A pesar de esto, el rango de profundidades preferido por *C. zebra* para este estudio es similar al reportado por Torretta (2014) para especies del mismo género, recolectados en la cuenca del río Pojuca, Brasil. De esta manera, se evidenció una mayor relación de los valores de idoneidad de hábitat entre los estudios realizados en ríos y una menor relación con el estudio realizado en arroyos, debido a que, en ríos, por su mayor dimensión, se suelen presentar mayores rangos de profundidad (Elosegi & Sabater, 2009) y las características del río se asemejan a nuestra área de estudio. La preferencia de esta especie por las velocidades y profundidades ya mencionadas se relaciona con su morfología y dieta, dado que su cuerpo deprimido y aletas pectorales expandidas facilitan el movimiento en corrientes rápidas, además el recurso alimentario (perifiton e insectos) se encuentra en zonas poco profundas (Casatti et al., 2005; Casatti & Castro, 2006).

De las especies menos investigadas en relación con el índice HSI se encuentra *C. atratus*. A pesar de ello, las preferencias de esta especie por corrientes altas ($>0,6$ m/s) y profundidades medias (0,45 -0,5 m) se relaciona con patrones de índices de idoneidad reportados para otras especies de la misma familia (Characidae) y morfológicamente similares como *Astyanax festae*, la cual demuestra una preferencia por corrientes mayores a 0,2 m/s y

profundidades menores a 1,5 m (Alvarez-Mieles et al., 2019). Así mismo, se ha demostrado que las variables de velocidad y profundidad son buenos predictores de la estructura y abundancia de la familia Characidae en ecosistemas lóticos tropicales (Teresa & Casatti, 2013).

Otras especies con escasa información sobre su hábitat idóneo son *C. dorsale* y *D. fueslli*, ambas pertenecientes a la familia Loricariidae y distribuidas específicamente para la región altoandina (López & Román-Valencia 1996; Maldonado Ocampo et al. 2005; Villa-Navarro et al. 2006; Pineda-Camargo, R. 2008). En el presente estudio, las preferencias generales de ambas especies son velocidades altas, superiores a 0,5 m/s, y profundidades entre 0,4-0,5 m. Para el caso particular de *D. fueslli*, se presentaron dos valores de profundidad promedio con mayor preferencia, 0,3 y 0,5 m. Algunos estudios realizados con otras especies de la familia Loricariidae indican que prefieren velocidades entre 0,1 m/s a 0,2 m/s, rango inferior a lo encontrado en este estudio (Da Costa et al., 2015). Esto puede presentarse, ya que la preferencia por una condición de hábitat es específica de cada una de las especies, a pesar de que pertenezcan a la misma familia (Teresa & Casatti, 2013). Sin embargo, las especies pueden responder de manera similar a condiciones ambientales generales, por ejemplo, los rangos de profundidad encontrados para las especies en cuestión sí comparten patrones con índices de idoneidad registrados previamente para otras especies de loricáridos, como por ejemplo *Anicistrus multispinis* (Da Costa et al., 2015).

Por su parte, se han desarrollado múltiples estudios de idoneidad de hábitat del género *Astroblepus* con fines de construcción de modelos ecohidráulicos, en su mayoría en ecosistemas lóticos de Perú y Ecuador, con el fin de determinar preliminarmente los caudales y las condiciones hidráulicas propias para la conservación de su hábitat en proyecciones de construcción de represas y embalses (Oyague et al., 2020). De esta manera, el patrón de las curvas de idoneidad de hábitat para *A. latidens* de este estudio, coincide con lo reportado para las especies de *A. taczanowskii* y *A. vanceae*, ya que los rangos de velocidad idóneos para *A. latidens* están entre 0,5-0,8 m/s. Sin embargo, para el caso de la profundidad *A. latidens* prefiere zonas menos profundas entre 0,3-0,55 m, en comparación con individuos adultos de otras especies del mismo género que habitan preferencialmente mesohábitats más profundos (>1 m), mientras que los juveniles prefieren rangos entre 0,1 y 0,5 m, valores más cercanos a *A. latidens* de este estudio(Oyague et al., 2020). La preferencia de *Astroblepus* por corrientes rápidas se presenta en respuesta a comportamientos adaptativos y evolutivos de las especies en los diferentes ambientes, inclusive en aquellos



transformados (Alexiades & Encalada, 2017), lo que les ha permitido colonizar diferentes zonas de las cuencas andinas, lo anterior gracias a su morfología, aletas pectorales y dorsales bien desarrolladas que permiten la estabilidad, posición en el sustrato y navegabilidad de la especie (Maldonado-Ocampo et al., 2005; Albert & Reis, 2011; Lujan et al., 2013).

Este trabajo proporciona información sobre la relación especies-hábitat e idoneidad de hábitat de la ictiofauna de la ecorregión altoandina de la cuenca del río Cusiana, Orinoco colombiano. Esta información es especialmente útil para el manejo, ordenamiento y conservación de la ictiofauna de esta cuenca, donde se planea el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en su porción altoandina (Sánchez, 2023), particularmente, se podría utilizar para prever posibles efectos. Por ejemplo, debido al eventual redireccionamiento del caudal del río Cusiana, la construcción de proyectos hidroeléctricos podría afectar negativamente a las especies dependientes de altos flujos de agua como los carácidos (*C. chupa*, *C. zebra*, *C. atratus*, *H. loisae*, *H. metae*, *K. alpha*, *K. deuterodonoides*), ya que provocaría una disminución en el rendimiento del nado y en la adquisición de alimento (Laborde et al., 2016). También afectaría procesos de dispersión de las especies, alteración en las áreas de desove (Moreno-Arias et al., 2021) e incluso puede llevar a la extinción local de especies (Valencia-Rodríguez et al., 2022). No obstante, se requieren estudios que abarquen una escala temporal más amplia y/o mesocosmos que permitan dimensionar con mayor precisión los eventuales efectos por la transformación actual y futura de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

La Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) financió este trabajo mediante la convocatoria VIE-02-2022 (proyecto SGI 3332). Agradecemos a Catalina Sarmiento y Fabián Silva por su apoyo durante la ejecución del proyecto; a Carolina Vargas, Karen Montaña y Wendy Duarte por la asistencia durante la fase de campo y laboratorio; a Angélica Pérez Mayorga por la corroboración en la identificación taxonómica; a los docentes Néstor Adolfo Pachón, José Luis Casas y Yimy Herrera Martínez por su colaboración durante la alianza de investigación; al grupo de investigación WAIRA Ambiente, Comunidad y Desarrollo de la UPTC por la alianza de investigación. A los revisores por sus valiosos comentarios y sugerencias. El proyecto contó con aval del Comité de Ética para la investigación de la UPTC (febrero 28 de 2022) y la colecta de material biológico se realizó bajo el permiso marco de recolecta (Resolución ANLA 724 del 4 de julio de 2014).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abell, R., ML Thieme, C. Revenga, M. Bryer, M. Kottelat, N. Bogutskaya, B. Coad, N. Mandrak, S. Balderas, W. Bussing, ML Stiassny, P. Skelton, GR Allen, P. Unmack, A. Naseka, R. Ng, N. Sindorf, J. Robertson, E. Armijo, J. Higgins, T. Heibel, E. Wikramanayake, D. Olson, H. López, R. Reis, J. Lundberg, M. Pérez & P. Petry.**2008. Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *Rev. BioScience*, 58(5): 403-414.DOI: <https://doi.org/10.1641/B580507>
- Ahmadi-Nedushan, B., A. St-Hilaire, M. Bérbubé, É. Robichaud, N. Thiémonge & B. Bobée.**2006. A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment. *Rev. River Research and Applications*.22(5):503-523.DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.918>
- Albert, JS & R. Reis.**2011. Historical Biogeography of Neotropical Freshwater Fishes. University of California Press. Available in: <https://doi.org/10.1525/california/9780520268685.001.0001>
- Alexiades, AV & AC Encalada.**2017. Distribution and habitat suitability of andean climbing catfish in the Napo River Basin, Ecuador. *Rev. Tropical Conservation Science*. 10:1-7. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082917709598>
- Alvarez-Mieles, G., G. Corzo & A. Mynett.**2019. Spatial and Temporal Variations of Habitat Suitability for Fish: A Case Study in Abras de Mantequilla Wetland, Ecuador. *Rev. Spatiotemporal Analysis of Extreme Hydrological Events*.6:113-141.DOI:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811689-0.00006-9>
- Anderson, EP & JA Maldonado Ocampo.**2011. A regional perspective on the diversity and conservation of tropical Andean fishes. *Conservation Biology*, 25(1):30-39. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01568.x>
- Ayllón, D., A. Almodóvar, GG Nicola & B. Elvira.**2009. Interactive effects of cover and hydraulics on brown trout habitat selection patterns. *River Research and Applications*, 25(8):1051-1065. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.1215>



- Barletta, M., AJ Jaureguizar, C. Baigun, NF Fontoura, AA Agostinho, VMF Almeida-Val, AL Val, RA Torres, LF Jimenes-Segura, T. Giarrizzo, NN Fabré, VS Batisse, C. Lasso, D. C. Taphorn, MF Costa, PT Chaves, JP Vieira & MFM Corrêa.** 2010. Fish and aquatic habitat conservation in South America: A continental overview with emphasis on neotropical systems. *Journal of Fish Biology*, 76(9): 2118-2176. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02684.x>
- Bovee, K.** 1986. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology. Available in: <http://books.google.com>
- Bovee, K.** 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Available in: <http://books.google.com>
- Bovee, K & R. Milhous.** 1978. Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. Available in: <http://books.google.com>
- Casatti, L & RMC Castro.** 2006. Testing the ecomorphological hypothesis in a headwater riffles fish assemblage of the rio São Francisco, southeastern Brazil. *Neotrop Ichthyol*, 4(2):203-214. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1679-62252006000200006>
- Casatti, L., FC Rocha & DC Pereira**. 2005. Habitat use by two species of hypostomus (pisces, loricariidae) in southeastern brazilian streams. *Biota Neotropica*, 5(2). <http://www.biotaneotropica.org.brhttp://www.biotaneotropica.org.br>
- Chen, Z., M. Snow, CS Lawrence, AR Church, SR Narum, RH Devlin & AP Farrell.** 2015. Selection for upper thermal tolerance in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum). *Journal of Experimental Biology*, 218(5): 803-812. Available in: <https://doi.org/10.1242/jeb.113993>
- Comisión de la Verdad**. 2022a. Informe Final Colombia Adentro. Relatos Territoriales Sobre el Conflicto Armado, Región Centro. Disponible en: <https://www.comisiondelaverdad.co/hay-futuro-si-hay-verdad>
- Comisión de la Verdad.** 2022b. Informe Final Colombia Adentro. Relatos Territoriales Sobre el Conflicto Armado, Orinoquía. Disponible en: <https://www.comisiondelaverdad.co/hay-futuro-si-hay-verdad>
- Corporinoquía & Corpoboyacá.** 2004. Cartilla Divulgativa, POMCA del Río Cusiana. Disponible en: <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/936?locale-attribute=en>
- Corporinoquía & Corpoboyacá.** 2015. POMCA Río Cusiana- Componente Socioeconómico. Disponible en: <https://www.corpoboyaca.gov.co/ventanilla/pomca-cusiana/>
- Corporinoquía & Corpoboyacá.** 2019. Actualización del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Cusiana-(3519).
- Corporinoquía.** 2019. Resolución No. 500.36-19-2408. Por la cual se otorga una licencia ambiental y se dictan otras disposiciones. 24 de diciembre de 2019.
- Da Costa, MR, TM Mattos, VH Fernandes, F. Martínez-Capel, R. Muñoz-Mas & FG Araújo.** 2015. Application of the physical habitat simulation for fish species to assess environmental flows in an Atlantic Forest Stream in South-eastern Brazil. *Neotropical Ichthyology*, 13(4):685-698. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20140170>
- Didier, J. & P. Kestemont.** 1996. Relationships between mesohabitats, ichthyological communities and IBI metrics adapted to a European river basin (The Meuse, Belgium). *Hydrobiologia*, 341,133-144. <https://doi.org/10.1007/BF00018117>
- Echandía, C.** 2015. El abc del ELN. Evolución del Frente' de Guerra Oriental (territorialidad, iniciativa armada y relación con la población y las economías ilegales). Bogotá: Fundación Ideas para la Paz. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311698984_El_ABC_del_Ejercito_de_Liberacion_Nacional_ELN_Evolucion_del_Frente_de_Guerra_Oriental_territorialidad_iniciativa_armada_y_relacion_con_la_poblacion_y_las_economias_ilegales#fullTextContent
- Elosegi, A. & S. Sabater.** 2009. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=OfOUGgC20_UC
- Erarto, F. & A. Getahun.** 2020. Impacts of introductions of alien species with emphasis on fishes. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 8(5): 207-216. ISSN: 2347-5129.



- Freeman, MC, ZH Bowen & JH Crane.** 1997. Transferability of Habitat Suitability Criteria for Fishes in Warmwater Streams. North American Journal of Fisheries Management, 17(1):20–31. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1997\)017<0020:tohscf>2.3.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1997)017<0020:tohscf>2.3.co;2)
- Gaye-Siessegger, J., M. Schumann, J. Baer, S. Roch, L. Ittner & A. Brinker.** 2023. Massive Fish Kill After the Discharge of Artificial Fertilizer into a Species Rich River in Southwestern Germany: A Conservation Case Study. Water Air Soil Pollut, 234(623). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06635-8>
- Gomez Isaza, D.** 2020. Anthropogenic disturbances to freshwater taxa: Interactions between nitrate and additional stressors on various physiological traits. PhD thesis, The University of Queensland. DOI: <https://doi.org/10.14264/ea9709d>
- Grinnell, J.** 1917. The Niche-Relationships of the California Thrasher. Journal Storage, 34(4):427–433. DOI: <https://doi.org/10.2307/4072271>
- Heggenes, J.** 1996. Habitat selection by brown trout (*Salmo trutta*) and young atlantic salmon (*S. salar*) in streams: static and dynamic hydraulic modelling. Regulated Rivers: Research & Management, 12(2-3):155–169. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199603\)12:2/3<155::AID-RRR387>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199603)12:2/3<155::AID-RRR387>3.0.CO;2-D)
- Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL).** 1982. Aprovechamiento hidroeléctrico del Río Cusiana: Estudios de prefactibilidad. Disponible en: <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2671>. Acceso el 25 abr.2024.
- Jacobsen, D.** 2008. Tropical high-altitude streams. Tropical Stream Ecology. Edt Academic Press. 219–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012088449-0.50010-8>
- Jiménez-Segura, LF, D. Restrepo-Santamaría, S. López-Casas, J. Delgado, M. Valderrama, J. Álvarez & D. Gómez.** 2014. Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena-Cauca, Colombia. Biota Colombiana, 15(2):3-25. ISSN 0124-5376.
- Kammel, LE, GB Pasternack, DA Massa & PM Bratovich.** 2016. Near-census ecohydraulics bioverification of *Oncorhynchus mykiss* spawning microhabitat preferences. Journal of Ecohydraulics, 1(1-2):62–78. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705357.2016.1237264>
- Kassambara, A. & F. Mundt.** 2017. factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. Paquete de R versión 1.0.5. Available in: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Kishor, KP, BB Khadga, CM Trilok & BB Chitra.** 2018. Correlations between fish assemblage structure and environmental variables of the seti gandaki river basin, nepal. Journal of Freshwater Ecology, 33(1):31–43. DOI: <https://doi.org/10.1080/02705060.2017.1399170>
- Kindt, R. & R. Coe.** 2005. Tree diversity analysis: a manual and software for common statistical methods for ecological and biodiversity studies. World Agroforestry Centre. ISBN: 92 9059 179 X.
- Laborde, A., A. González, C. Sanhueza, P. Arriagada, M. Wilkes, E. Habit & O. Link.** 2016. Hydropower development, riverine connectivity, and non sport fish species: Criteria for hydraulic design of fishways. River Research and Applications, 32(9):1949–1957. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.3040>
- Lê, S., J. Josse & F. Husson.** 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25(1):1-18. DOI: <10.18637/jss.v025.i01>
- Lee, M., E. Shevliakova, CA Stock, S. Malyshov & PCD Milly.** 2019. Prominence of the tropics in the recent rise of global nitrogen pollution. Nature Communications, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09468-4>
- López, J. & C. Román-Valencia.** 1996. Sobre la biología del corroncho *Chaetostoma fischeri* (Steindachner, 1879) (Pisces: Loricariidae) en el río La Vieja, Alto Cauca, Colombia. Boletín Ecotrópica: Ecosistemas Tropicales 30: 37-57.
- Lujan, NK, KA Roach, D. Jacobsen, KO Winemiller, VM Vargas, VR Ching & JA Maestre.** 2013. Aquatic community structure across an Andes-to-Amazon fluvial gradient. Journal of Biogeography, 40(9):1715–1728. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.12131>

Macura, V., ZS Štefunková, M. Majorošová, P. Halaj & A. Škrinár. 2018. Influence of discharge on fish habitat suitability curves in mountain watercourses in IFIM methodology. *Journal of Hydrology and Hydro-mechanics*, 66(1):12–22. DOI: <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0044>

Maldonado-Ocampo, JA, A. Ortega-Lara, OJS Usma, VG Galvis, FA Villa-Navarro, GL Vásquez, S. Prada-Pedreros & RC Ardila. 2005. Peces de los Andes de Colombia: guía de campo. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Disponible en: <https://repository.humboldt.org.co/entities/publication/11e19848-57c5-47ee-a793-20d0e418bdbf>

Mendieta, JF, N. Pérez, LF González & E. Bautista. 2023. La gobernanza del agua, del páramo al piedemonte: Actores y planificación sobre el río Cusiana. *Bitacora Urbano Territorial*, 33(1):269–282. DOI: <https://doi.org/10.15446/bitacora.v33n1.98070>

Meyer, J., L. Kaplan, D. Newbold, D. Strayer, C. Woltemade, J. Zedler, R. Beilfuss, Q. Carpenter, R. Semlitsch, M. Watzin & P. Zedler. 2003. Where rivers are born: The Scientific Imperative for Defending Small Streams and Wetlands. Sierra Club and American Rivers, Washington DC, 26. Available in: <https://www.americansrivers.org/resource/small-streams-wetlands/>

Meza Rodríguez, D., LM Martínez Rivera, N. Mercado-Silva, D. García de Jalón Lasstra, C. Alonso González & Á. Aguirre García. 2021. Target species selection and design of fish habitat suitability curves in the Ayuquila-Armería River, western Mexico. *International Journal of River Basin Management*, 19(2):179–188. DOI: <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1767635>

Meza-Sepúlveda, S. & S. Sepúlveda-Cárdenas. 2012. Efecto de la conductividad eléctrica y nivel del agua sobre la reproducción de la cucha xenocara (*Ancistrus triradiatus*, Eigenmann 1918) bajo condiciones experimentales. *Revista Veterinaria Y Zootecnia*, 6(1):37–46. Disponible en: <https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/vetzootec/article/view/4417>

Milhous, RT & TJ Waddle. 2012. Physical Habitat Simulation (PHABSIM) Software for Windows. Fort Collins, CO: USGS Fort Collins Science Center. Available in: <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/56bcd45ae4b08d617f66aa42>

Mojica, J., J. Usma, R. Álvarez-León & CA Lasso. 2012. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. Instituto von Humboldt. Disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/component/k2/item/1161-libro-rojo-peces-dulceacuicolas-colombia>

Moreira, EA & DP Silva. 2023. A dozen fish: some exotic invasive species found in Brazilian waters and their impacts. *Rev. Cienc Anim Bras*, 24. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-6891v24e-74647e>

Moreno-Arias, C., S. López-Casas, CA Rogeliz-Prada & L. Jiménez-Segura. 2021. Protection of spawning habitat for potamodromous fish, an urgent need for the hydropower planning in the Andes. *Neotropical Ichthyology*, 19(03):1-23. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-0224-2021-0027>.

Motta Díaz, AJ. 2018. Modelación de idoneidad de hábitat de la comunidad y grupos funcionales de macroinvertebrados. Tesis de maestría. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/43325>

Oksanen, J., FG Blanchet, R. Kindt, P. Legendre, PR Minchin, RB O'Hara, GL Simpson, P. Sólymos, MHH Stevens & H. Wagner. 2012. vegan: Community Ecology Package. Software. Available in: <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>

Olaya-Marín, EJ., C. Lemus-Portillo, MC. Echavarría-Pedraza, OA. Chaparro-García, CA. Roa-Fuentes, S. Salazar-Galán & M. Barrios-Peña. 2022. Diferencias en el tamaño corporal y la abundancia de peces altoandinos, arriba y abajo de la represa Neusa, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 70(1):464-481. DOI: <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.2022.49776>

Oyague, E., A. Vera, L. Cabrejos & P. Franco. 2020. Differences in physical habitat simulation system modelling results using benthic or pelagic fish species as indicators in Peruvian Andes-Amazon rivers. *River Research and Applications*, 36(5):828-842. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.3602>



- Pineda-Camargo, RJ & JE Forero Useche.** 2008. Composición de la dieta alimentaria del runcho *Dolichancistrus pediculatus* en el río Jenesano (Jenesano, Boyacá). Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Raleigh, RF.** 1984. Habitat suitability information: rainbow trout. Western Energy and Land Use Team, Division of Biological Services, Research and Development, Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior. Available in:<https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p16021coll3/id/240/>
- Rice, EW, L. Bridgewater & American Public Health Association.** 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, 10. Available in: <https://www.standardmethods.org/doi/book/10.2105/SMWW.2882>
- Roussel, JM & A. Bardouillet.** 1999. Ontogeny of diel pattern of stream-margin habitat use by emerging brown trout, *Salmo trutta*, in experimental channels: influence of food and predator presence. Environmental Biology of Fishes, 56:253–262. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1007504402613>
- Sánchez, M.** 2023. Proyecto hidroeléctrico a filo de agua río Cusiana – Esperanza (CUEZ) / Río Cusiana – Sabana (CUSAB). v1.1. Dataset/Occurrence. Disponible en: https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=1307_cusianasabana_20210222&v=1.1
- Sidoruk, M, I. Cymes & S. Kobus.** 2020. Impact of trout farming on a cascade water flow technology on water quality. Journal of Elementology, 25 (2). DOI: 10.5601/jelem.2019.24.3.1906
- Souza, NF, DF. Baptista & DF. Buss.** 2019. A predictive index based on environmental filters for the bioassessment of river basins without reference areas in Atlantic Forest biome, Brazil. Biota Neotropica, 19(2). DOI: <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2018-0601>
- Sturges, HA.** 1926. The Choice of a Class Interval. Journal of the American Statistical Association, 21(153):65–66. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Teresa, FB & L. Casatti.** 2012. Influence of forest cover and mesohabitat types on functional and taxonomic diversity of fish communities in Neotropical lowland streams. Ecology of Freshwater Fish, 21(3): 433-442. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2012.00562.x>
- Teresa, FB & L. Casatti.** 2013. Development of habitat suitability criteria for Neotropical stream fishes and an assessment of their transferability to streams with different conservation status. Neotropical Ichthyology, 11(2):395–402. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1679-62252013005000009>
- Torretta, V.** 2014. The sustainable use of water resources: A technical support for planning. A case study. Sustainability (Switzerland), 6(11):8128–8148. DOI: <https://doi.org/10.3390/su6118128>
- Urbano-Bonilla, A., GA Ballen, GA Herrera-R, J. Zamudio, EE Herrera-Collazos, C. DoNascimento, S. Prada-Pedreros & JA Maldonado-Ocampo.** 2018. Fishes of the Cusiana River (Meta River basin, Colombia), with an identification key to its species. ZooKeys, 733:65–97. DOI: <https://doi.org/10.3897/zookeys.733.20159>
- Urbano-Bonilla, A., S. Prada-Pedreros, Á. Zapata, JI Barrera-Cataño & AC Moreno-Cárdenas.** 2014. Composición y riqueza íctica en quebradas y ríos del piedemonte de la cuenca del río Cusiana, Orinoquia colombiana. Biota Colombiana, 15:52–69. Disponible en: <https://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/342>
- Urbano-Bonilla, A., J. Zamudio, JA Maldonado-Ocampo, JD Bogotá-Grégoory, GA Cortes-Millán & Y. López.** 2009. Peces del piedemonte del departamento de Casanare, Colombia. Biota Colombiana, 10:149–162. Disponible en: <https://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/225>
- Valencia-Rodríguez, D., J. Herrera-Pérez, D. Restrepo-Santamaría, A. Galeano, RS Winton & L. Jiménez-Segura.** 2022. Fish community turnover in a dammed Andean River over time. Neotropical Ichthyology, 20(1). DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-0224-2021-0091>
- Van der Sleen, P & JS Albert.** 2017. Field guide to the fishes of the Amazon, Orinoco and Guianas, 115. ISBN: 10: 0691170746.



- Vari, RP & AS Harold.** 2001. Phylogenetic Study of the Neotropical Fish Genera *Creatroetus* Gunther and *Piabina* Reinhardt (Teleostei: Ostariophysi: Characiformes), with a Revision of the Cis-Andean Species. DOI: <https://doi.org/10.5479/si.00810282.613>
- Velandia Pérez, LZ, AC Sarmiento Toro, EF Silva Lozano, JC Vargas Valencia, WY Duarte Arevalo, KL Montaña Rodríguez, MA Pérez Mayorga & CA Roa Fuentes.** 2024. Peces de la cuenca alta del río Cusiana, macrocuenca del río Orinoco, departamentos de Boyacá y Casanare, Colombia. v1.2. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Dataset. Disponible en: <https://doi.org/10.15472/pvjorw>
- Villa-Navarro, FA, PT Zúñiga-Upegui, D. Castro-Roa, JE García-Melo, LJ García-Melo & ME Herrada Yara.** 2006. Peces del alto Magdalena, cuenca del río Magdalena, Colombia. Biota Colombiana 7(1):3-22. Disponible en: <https://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/162>
- Villa-Navarro, FA, A. Urbano-Bonilla, A. Ortega-Lara, D. Taphorn, JS Usma-Oviedo, JS Usma & F. Trujillo.** 2011. Peces del Casanare. Biodiversidad Del Departamento Del Casanare, Identificación de Ecosistemas Estratégicos. Gobernación Del Casanare, WWF, Bogotá, 120–137. Disponible en: <https://www.wwf.org.co/?202090/Biodiversidad%2Ddel%2Ddepartamento%2Ddel%2DCasanare>
- Wei, T. & V. Simko.** 2017. R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix. Available in: <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wickham, H.** 2016. *Ggplot2: Elegant graphics for data analysis* (2nd ed.). Springer International Publishing. Available in: https://books.google.com.co/books?id=XgFkDAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=false

Editor Científico / Scientific Editor: David Veliz -Dr. David Veliz, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Recebido / Recibido / Received: 02.09.2024

Revisado / Revised: 22.01.2025

Aceito / Aceptado / Accepted: 27.01.2025

Publicado / Published: 21.09.2025

DOI:10.5216/rbn.v22i2.80385

Dados disponíveis / Datos disponibles / Available data: Repository not informed