



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
ESCUELA DE POSGRADOS

Preferencias hidráulicas de acuerdo al tamaño de los estadios
ninfales del género *Baetodes* en ríos alto andinos, al sur de
Ecuador.

Trabajo previo a la obtención del título de:
MAGISTER EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES MENCIÓN
ECOLOGÍA Y BIODIVERSIDAD

Nombre del autor:
Jonathan Mauricio Aguirre Pesantez

Nombre del director:
Diego José Vimos Lojano

Cuenca – Ecuador
2026

Dedicatoria

Dedicado a mi familia por su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, a Caro por su apoyo, paciencia, cariño y amor, y a mi gatito Ramón por las noches de compañía.

Agradecimientos

Agradezco al Laboratorio de Ecología Acuática de la Universidad de Cuenca y a su directora, la Dra. Henrietta Hampel, por permitirme el uso de sus instalaciones, así como por los datos empleados en esta investigación y por su aporte en las revisiones técnicas y científicas a lo largo de todo el manuscrito. Agradezco también al Dr. Raúl Vázquez por su colaboración en la revisión de la redacción y del planteamiento estadístico del manuscrito. Asimismo, extendiendo mi agradecimiento al Dr. Diego Vimos Lojano, quien participó en calidad de tutor, investigador y amigo, aportando su orientación y amplio conocimiento durante el desarrollo de toda la investigación.

Agradezco a la Universidad del Azuay, al Departamento de Posgrados y a su cuerpo docente por brindarme las herramientas intelectuales necesarias para mi formación profesional, así como por el apoyo financiero recibido.

Contenido

Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
1. Introducción.....	1
2. Metodología.....	3
2.1. Área de estudio.....	3
2.2. Métodos.....	5
2.2.1. Recolección de muestras y medición de variables hidráulicas in situ	5
2.2.2. Procesamiento de muestras en el laboratorio.....	5
2.2.2.1. Determinación taxonómica e identificación de los estadios ninfales del género <i>Baetodes</i>	5
2.2.2.2. Análisis morfométrico y estimación de la biomasa.....	6
2.2.3. Preprocesamiento de datos.....	8
2.2.4. Análisis estadístico.....	10
2.2.4.1. Variables hidráulicas determinantes de la abundancia de los estadios ninfales del género <i>Baetodes</i>	10
2.2.4.2. Variables hidráulicas determinantes de la biomasa de los estadios ninfales del género <i>Baetodes</i>	11
2.2.4.3. Relación entre las mediciones morfométricas y la biomasa.....	13
3. Resultados.....	14
3.1. Variables hidráulicas determinantes de la abundancia de los estadios ninfales del género <i>Baetodes</i>	15
3.2. Curvas de preferencia hidráulica por estadio ninfal de la abundancia del género <i>Baetodes</i>	16
3.3. Influencia de las variables hidráulicas sobre la biomasa del género <i>Baetodes</i>	18
3.4. Variación de la longitud de las variables morfométricas en función de la biomasa del género <i>Baetodes</i>	21
4. Discusión.....	23
4.1. Variables que influyen en la distribución de los estadios ninfales a escala de microhábitat.....	23
4.2. Respuesta de los estadios ninfales a las variables hidráulicas.....	25
4.3. Relaciones de variables morfométricas con la biomasa.....	27
4.4. Implicaciones para la gestión del caudal ecológico y el biomonitoreo en ríos altoandinos.....	28
5. Conclusiones.....	29
6. Bibliografía.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ANEXOS

Figura 1. Ubicación de a) las estaciones de monitoreo (T1, Y1) en la zona media de las subcuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay, b) en la cuenca del río Paute, c) al sur de Ecuador. Sistema de coordenadas: WGS84, UTM, Zona 17S. 4

Figura 2. Esquema de las mediciones de las variables morfométricas realizadas a los organismos pertenecientes al género *Baetodes*. HCM = ancho de la cápsula cefálica, FL = longitud total del fémur de la pata delantera derecha, LW = longitud de la almohadilla alar, MW = ancho del mesonoto y TL = longitud total desde la parte anterior de la cabeza hasta la parte posterior del último segmento abdominal. La imagen de *Baetodes* se adaptó a partir de la ilustración de Roldán (1996). 7

Figura 3. Equipos usados para el proceso de la determinación de biomasa de los organismos del género *Baetodes* a) viales de papel de aluminio con una capacidad de 1.5 ml, b) estufa para el secado, y c) desecador y balanza analítica para el pesado. 7

Figura 4. Relación de la variación promedio de la longitud (mm) y de la biomasa (mg) respecto al estadio ninfal de los organismos encontrados en las subcuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay. 14

Figura 5. Distribución de las variables hidráulicas en función del incremento del error cuadrático medio de los estadios ninfales de *B. proietus*, estimada mediante Random Forest. %IncMSE = incremento del error cuadrático medio, SI = índice de sustrato, D₅₀ = diámetro medio estimado, v = velocidad del agua, CaR = cantos rodados, SuD = índice de diversidad de sustrato, Gra = grava, Blo = bloque, Gui = guijarros, h = calado del agua, ArL = arena/limo. Se identifica el umbral de importancia mediante la línea vertical entrecortada. 16

Figura 6. Respuesta de los modelos aditivos generalizados (GAM) entre la variable hidráulica velocidad del agua (m s^{-1}) y la abundancia de los organismos pertenecientes a los estadios ninfales E2-E5 de la especie *B. proietus*. La línea sólida representa la respuesta del modelo en escala de log-odds en el eje Y (respuesta del GAM); valores superiores a cero indican presencia de abundancia. Las áreas sombreadas en gris corresponden a los intervalos de confianza del 95% de la respuesta del modelo. La línea horizontal discontinua marca el umbral de neutralidad (respuesta cero). 18

Figura 7. Distribución de las variables hidráulicas en función del incremento del error cuadrático medio de la biomasa de los estadios ninfales de *B. proietus*, estimada mediante Random Forest. %IncMSE = incremento del error cuadrático medio, v = velocidad del agua, h = calado del agua, D₅₀ = diámetro medio estimado, SuD = índice de diversidad de sustrato, Gra = grava, SI = índice de sustrato, CaR = cantos rodados, Gui = guijarros, Blo = bloque, ArL = arena/limo. Se identifica el umbral de importancia mediante la línea vertical entrecortada. 19

Figura 8. Respuesta de los modelos aditivos generalizados (GAM) con distribución Gamma y enlace log para la biomasa de los estadios ninfales significativos (E3-E5) de *B. proietus*, en función de las variables hidráulicas seleccionadas mediante Random Forest (velocidad del agua (m s^{-1}), calado del agua (m) y diámetro medio (mm)). La línea sólida representa la respuesta a la función de suavizado (spline) en la escala del enlace logarítmico, mientras que las áreas sombreadas en gris corresponden a los intervalos de confianza del 95%..... 20

Figura 9. Variación de la biomasa promedio (mg) respecto a la longitud promedio de cinco mediciones morfométricas (mm) de especímenes de la especie *Baetodes proietus*. TL = Longitud total del cuerpo, FL = Longitud del fémur, LW = Longitud de la almohadilla alar, MW = Ancho del mesonoto, HCW = Ancho de la cápsula cefálica 22

Tabla 1. Características hidráulicas y del hábitat registradas en 241 mediciones realizadas en los ríos Tomebamba y Yanuncay. Valores mínimos (Min), promedios ($\bar{X}$), máximos (Max) y la desviación estándar (SD)..... 15

Tabla 2. Características de los modelos aditivos generalizados (GAM) entre las variables hidráulicas y la abundancia de los estadios ninfales E1-E5 de la especie *B. proietus*. DevExp = porcentaje de devianza explicada, EDF = grados de libertad efectivos, χ^2 = significancia estadística Chi-cuadrado, p = valor de significancia (valores en negrita indican significancia), v_{pref} = valor de la variable en el punto máximo de la curva..... 17

Tabla 3. Características de los modelos aditivos generalizados (GAM) entre las variables hidráulicas y la biomasa de los estadios ninfales E3-E5 de la especie *B. proietus*. DevExp = porcentaje de devianza explicada; EDF = grados de libertad estimados del término suavizado; F = estadístico F; p = valor de significancia (los valores en negrita indican significancia)..... 21

Tabla 4. Resultados de los modelos exponenciales de la variación de la longitud promedio de cinco variables morfométricas (mm) respecto a la biomasa promedio (mg) de individuos de *Baetodes proietus*. TL = Longitud total del cuerpo, FL = Longitud del fémur, LW = Longitud de la almohadilla alar, MW = Ancho del mesonoto, HCW = Ancho de la cápsula cefálica, R^2 = coeficiente de determinación del modelo. 23

Anexo 1. Relaciones de la variación de la biomasa (mg) respecto a la longitud de cinco mediciones morfométricas (mm) de especímenes pertenecientes a la especie *Baetodes proietus* con tres correlaciones (polinómica de segundo grado, exponencial y potencial). TL = Longitud total del cuerpo, FL = Longitud del fémur, LW = Longitud de la almohadilla alar, MW = Ancho del mesonoto, HCW = Ancho de la cápsula cefálica 41

Anexo 2. Resultados de los modelos de correlación polinómica de segundo grado, exponencial y potencial de la variación de la longitud de cinco mediciones morfométricas (mm) respecto a la biomasa (B; mg) de especímenes pertenecientes a *B. proietus*. TL = Longitud total del cuerpo, FL = Longitud del

fémur, LW = Longitud de la almohadilla alar, MW = Ancho del mesonoto, HCW = Ancho de la cápsula cefálica, R^2 = coeficiente de determinación del modelo.	42
Anexo 3. Incremento del error cuadrático medio (%IncMSE) de las variables hidráulicas según el algoritmo Random Forest para cada uno de los estadios ninfales (E1-E5). SI = índice de sustrato, D_{50} = diámetro medio estimado, v = velocidad del agua, CaR = cantos rodados, SuD = índice de diversidad de sustrato, Gra = grava, Blo = bloque, Gui = guijarros y y = calado del agua, ArL = arena/limo.....	43
Anexo 4. Probabilidad de presencia de los estadios ninfales (E1, E2, E3, E4 y E5) de <i>B. proietus</i> en función del Índice de sustrato desarrollado a partir de modelos aditivos generalizados (GAM). La línea sólida representa la respuesta del modelo en escala de log-odds del eje Y (Respuesta del GAM), donde los valores superiores a cero indican una mayor probabilidad de presencia. Las áreas sombreadas en gris corresponden a los intervalos de confianza del 95% del modelo. La línea discontinua horizontal marca el umbral de neutralidad (cero).	44
Anexo 5. Respuesta de los modelos aditivos generalizados (GAM) respecto a la presencia los estadios ninfales (E1, E2, E3, E4 y E5) de la especie <i>B. proietus</i> en función del diámetro medio estimado (mm) y de la velocidad del agua ($m s^{-1}$) para el estadio ninfal E1. La línea sólida representa la respuesta del modelo en escala de log-odds del eje Y (Respuesta del GAM), donde los valores superiores a cero indican una mayor probabilidad de presencia. Las áreas sombreadas en gris corresponden a los intervalos de confianza del 95% del modelo. La línea horizontal discontinua marca el umbral de neutralidad (cero).	45
Anexo 6. Incremento del error cuadrático medio (%IncMSE) de las variables hidráulicas, según el algoritmo Random Forest para la biomasa de cada uno de los estadios ninfales (E3-E5). v = velocidad del agua, y = calado, D_{50} = diámetro medio estimado, SuD = índice de diversidad de sustrato, Gra = grava, SI = índice de sustrato, CaR = cantos rodados, Gui = guijarros, Blo = bloque, ArL = arena/limo.....	46
Anexo 7. Respuesta de los modelos aditivos generalizados (GAM) con distribución Gamma y enlace log para la biomasa de los estadios ninfales (E3, E4) que no presentaron significancia de <i>B. proietus</i> , en función de las variables hidráulicas seleccionadas mediante Random Forest: velocidad del agua ($m s^{-1}$), calado del agua (m) y diámetro medio (mm). La línea sólida representa la respuesta a la función de suavizado (spline) en la escala del enlace logarítmico, mientras que las áreas sombreadas en gris corresponden a los intervalos de confianza del 95%.	47

Resumen

La distribución y estructura de las comunidades bentónicas de acuerdo a las condiciones hidráulicas de los ecosistemas fluviales altoandinos ha sido poco estudiado. Esta investigación tiene por objeto analizar las preferencias hidráulicas de cinco estadios ninfales (E1-E5) del género *Baetodes* en dos subcuencas (Tomebamba y Yanuncay) de la cuenca del río Paute, al sur del Ecuador. Se recolectaron 241 muestras de macroinvertebrados, junto con mediciones de la velocidad del agua (v), el calado del agua (h) y la composición del sustrato. Se registraron 23358 ejemplares de *B. proietus*, con predominio de E1 y E2. Random Forest identificó al índice de sustrato (SI), diámetro medio del sustrato (D_{50}), v como variables explicativas de la abundancia por estadio. Los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) revelaron una respuesta unimodal significativa a la v en los estadios E2-E5, con velocidades preferidas entre 1.1 y 1.2 m s⁻¹. Para la biomasa, la v , h , y D_{50} fueron explicativas en los estadios E4 y E5. Las relaciones longitud-masa mostraron que la longitud total del cuerpo (TL) fue el mejor predictor ($R^2 = 0.96$) para estimar la biomasa. La disminución del caudal afectaría a los estadios maduros de *B. proietus* por preferencias a velocidades superiores a 0.5 m s⁻¹.

Palabras clave: *Baetodes proietus*, preferencia hidráulica, estadios ninfales, GAM, Random Forest, macroinvertebrados acuáticos, ríos altoandinos.

Abstract

The distribution and structure of benthic communities in response to the hydraulic conditions of high-Andean river ecosystems have been little studied. This study aims to analyze the hydraulic preferences of five nymphal stages (E1–E5) of the genus *Baetodes* in two sub-basins (Tomebamba and Yanuncay) of the Paute River basin in southern Ecuador. A total of 241 macroinvertebrate samples were collected, along with measurements of water velocity (v), depth (h), and substrate composition. A total of 23,358 specimens of *B. proietus* were recorded, with a predominance of E1 and E2. Random Forest identified the substrate index (SI), mean substrate diameter (D_{50}), and v as explanatory variables for abundance by stage. Generalized Additive Models (GAM) revealed a significant unimodal response to v in stages E2–E5, with preferred velocities between 1.1 and 1.2 m s⁻¹, and a significant absence in E1. For biomass, v , h , and D_{50} were explanatory in stages E4 and E5. The length-biomass relationships showed that total body length (TL) was the best predictor ($R^2 = 0.96$) to estimate biomass. A decrease in discharge would affect mature *B. proietus* stages due to their preference for velocities >0.5 m s⁻¹, which harbor the greatest biomass of the population.