

Patrones biométricos de *Orestias* (Teleostei: Cyprinodontidae) y su relación con variables ambientales en lagunas y humedales altoandinos del Cusco

Biometric Patterns of *Orestias* (Teleostei: Cyprinodontidae) and Their Relationship with Environmental Variables in High-Andean Lakes and Wetlands of Cusco

 Jack M. Rodríguez^{1*},  Aldemar A. Acevedo² y  Marco A. Méndez³

Resumen

Se caracterizó la biometría del género *Orestias* y su relación con variables fisicoquímicas en nueve lagunas y humedales altoandinos del departamento del Cusco, Perú, mediante el muestreo de 141 individuos entre 2022 y 2023. Los ejemplares fueron capturados manualmente, beneficiados con el uso de narcóticos como tricaina metanosulfonato y preservados para su análisis; se midieron longitud total y peso corporal, y en cada sitio se registraron potencial de hidrógeno, temperatura, conductividad eléctrica, salinidad, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto y altitud. Se ajustó un modelo alométrico a la relación longitud–peso, se aplicó análisis de componentes principales a las variables fisicoquímicas y se construyó una red de similitud que integró distancias geográficas y similitud ambiental. La relación longitud–peso se ajustó a $W = 0.00000889 \cdot L^{3.1030}$, con coeficiente de determinación 0.9219, indicando ligera alometría positiva (exponente 3.103). Los dos primeros componentes explicaron 46.4 por ciento y 20.7 por ciento de la varianza, contrastando sistemas con alta conductividad y sólidos disueltos frente a sistemas de mayor altitud, potencial de hidrógeno y oxígeno disuelto; un segundo eje se asoció a gradientes de salinidad y temperatura. La red identificó un núcleo interconectado (Lucre–Huacarpay, Huaypo, Pomacanchi, Huasao) y sitios periféricos de alta altitud (Sibinacocha, Qoricocha). Los resultados indicaron que la conectividad hidrológica y el filtrado ambiental modularon la biometría de *Orestias*. En función de los hallazgos se propusieron medidas aplicadas para el monitoreo y la conservación de las poblaciones estudiadas.

Palabras clave: orestias, alometría, lagunas altoandinas, Cusco.

Abstract

The biometric traits of the genus *Orestias* and their relationship with physicochemical variables were characterized across nine high-Andean lakes and wetlands in the department of Cusco, Peru, through the sampling of 141 individuals between 2022 and 2023. Specimens were manually captured, euthanized with tricaine methanesulfonate, and preserved for analysis; total length and body weight were measured, while hydrogen potential, temperature, electrical conductivity, salinity, total dissolved solids, dissolved oxygen, and altitude were recorded at each site. An allometric model was fitted to the length–weight relationship, a principal component analysis (PCA) was applied to physicochemical variables, and a similarity network was constructed integrating geographic distances and environmental similarity. The length–weight relationship was adjusted to $W = 0.00000889 \cdot L^{3.1030}$, with a determination coefficient of 0.9219, indicating slight positive allometry (exponent 3.103). The first two components explained 46.4% and 20.7% of the variance, contrasting systems with high conductivity and dissolved solids against higher-altitude systems with greater hydrogen potential and dissolved oxygen; a second axis was associated with salinity and temperature gradients. The network identified an interconnected core (Lucre–Huacarpay, Huaypo, Pomacanchi, Huasao) and peripheral high-altitude sites (Sibinacocha, Qoricocha). Results indicated that hydrological connectivity and environmental filtering modulated *Orestias* biometric variation. Based on these findings, applied measures were proposed for monitoring and conserving the studied populations.

Keywords: orestias, allometry, high-andean lakes, Cusco.

Recibido: 06/06/2025

Aceptado: 12/08/2025

Publicado: 31/12/2025

Sección: Artículo Original

***Autor correspondiente:** 160468@unsaac.edu.pe

Introducción

El género *Orestias* (Valenciennes, 1839) es un grupo de peces de agua dulce endémico de los Andes centrales, perteneciente a la tribu Orestiini dentro del orden Cyprinodontiformes. Conocido por nombres locales como carachi, ispi o chiñichallwa, dependiendo de la región y morfología del pez. Su principal característica morfológica es la ausencia de aletas pélvicas, un patrón reducido e irregular de escamación corporal y una disposición singular de los poros cefálicos (Parenti, 1981; 1984). Este género exhibe una notable radiación adaptativa en los sistemas hídricos

altoandinos de Bolivia, Perú y Chile (De la Barra et al., 2020), con un rango altitudinal que varía desde los

¹Museo de la biodiversidad del Perú – MUBI, Cusco, Perú

²Instituto de Ciencias Naturales (ICN), Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

³Laboratorio de genética y evolución, departamento de ciencias ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile

Como citar: Rodríguez, J., Acevedo, A. A., & Méndez, M. A. (2025). Patrones biométricos de *Orestias* (Teleostei: Cyprinodontidae) y su relación con variables Ambientales en lagunas y humedales altoandinos del Cusco. *Revista de Investigaciones Altoandinas–Journal of High Andean Research*, 27, e27763. <https://doi.org/10.18271/ria.2025.763>



Attribution 4.0 Internacional (CC BY 4.0) Share–Adapt

3,000 hasta más de 4,500 m s.n.m., ocupando ambientes lénticos como lagunas y humedales con condiciones extremas de temperatura, salinidad y oxigenación (Arratia et al., 2017).

La sistemática de *Orestias* ha sido objeto de múltiples estudios debido a la complejidad de su diversificación y distribución discontinua en el Altiplano. Parenti (1984) propuso una clasificación basada en cuatro complejos monofiléticos (*cuvieri*, *mulleri*, *gilsoni* y *agassii*), siendo este último el de mayor distribución geográfica, extendiéndose desde el Lago Junín en Perú hasta el Salar de Ascotán en Chile (Guerrero et al., 2015). No obstante, estudios recientes han evidenciado incertidumbre taxonómica en varias especies, sugiriendo la necesidad de revisiones con herramientas genómicas (Vila et al., 2013).

En el contexto del departamento del Cusco, las poblaciones de *Orestias* han sido registradas en diversas lagunas y cuerpos de agua asociados a la cuenca del Urubamba. Según registros históricos, se han encontrado especies en localidades como Chinchero, Urcos y la laguna Langui-Layo, lo que sugiere que el género ha ocupado estos ecosistemas altoandinos desde tiempos geológicos recientes (Eigenmann, 1920; Ortega & Hidalgo, 2008). Adicionalmente, estudios de sistemática han documentado que la diversidad de *Orestias* en Cusco está subestimada, con varias poblaciones que presentan variaciones morfológicas y genéticas aún no evaluadas en detalle (Parenti, 1984; Lauzanne, 1992).

En el departamento del Cusco, las lagunas y humedales altoandinos constituyen ecosistemas de gran relevancia biológica, albergando poblaciones de *O. mulleri*, *O. jussiei*, *O. agassii* y *O. pentlandii*. Estas especies fueron descritas inicialmente a partir de colectas realizadas en las expediciones patrocinadas por la Universidad de Indiana (Irwin Expedition) entre 1918 y 1919, cuyos resultados fueron publicados en *Fishes of Western South America* (Eigenmann & Allen, 1942). Estudios posteriores ampliaron el conocimiento sobre la diversidad del género en la región, destacando la descripción de *O. munda* como una especie endémica del valle del Cusco (Parenti, 1984). Cabe destacar que los registros históricos de *Orestias* en Cusco han sido limitados en comparación con otras cuencas altoandinas, lo que refuerza la necesidad de estudios recientes para evaluar su estatus taxonómico y su posible diferenciación con otras poblaciones de los Andes centrales (Lauzanne, 1992; Ortega & Hidalgo, 2008). Sin embargo, investigaciones recientes con datos moleculares han evidenciado incertidumbre en la delimitación de especies, lo que sugiere la presencia de

linajes no descritos y posibles eventos de hibridación en distintas cuencas (Araya, 2024).

Además de los desafíos taxonómicos, la relación entre la biometría de *Orestias* y las condiciones ambientales de su hábitat sigue siendo poco explorada. De la Barra et al. (2020) señalaron que, si bien se han realizado importantes estudios taxonómicos, aún persiste una significativa incertidumbre sobre el estado de muchas especies dentro del género. A esto se suma la falta de herramientas de gestión para la conservación de estos peces, a pesar de su importancia ecológica y su rol en los ecosistemas acuáticos altoandinos. Investigaciones previas han evidenciado que la variabilidad morfológica dentro del género está estrechamente relacionada con el tipo de ambiente acuático (bofedal, lagunas y ríos) y con presiones selectivas locales (Guerrero et al., 2015). En particular, la zona de Cusco representa un área de interés especial, ya que la heterogeneidad climática y geológica de sus sistemas acuáticos podría influir en patrones diferenciados de biometría y adaptación en las poblaciones de *Orestias* (Ortega & Hidalgo, 2008). Sin embargo, la escasez de estudios integrales que combinen datos biométricos y parámetros fisicoquímicos limita la comprensión de los patrones de adaptación de estas especies a las condiciones extremas de su entorno.

Bajo este contexto, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar la biometría de *Orestias* y analizar su relación con las variables ambientales en siete lagunas y dos humedales del departamento del Cusco. Para ello, se emplearon análisis morfométricos y técnicas de ordenación multivariada para evaluar patrones de variación en talla y peso en función de gradientes ambientales. Esta investigación no solo contribuirá a la comprensión de los factores que influyen en la ecología de *Orestias*, sino que también proporcionará información clave para su conservación en un contexto de creciente presión antrópica sobre los ecosistemas altoandinos.

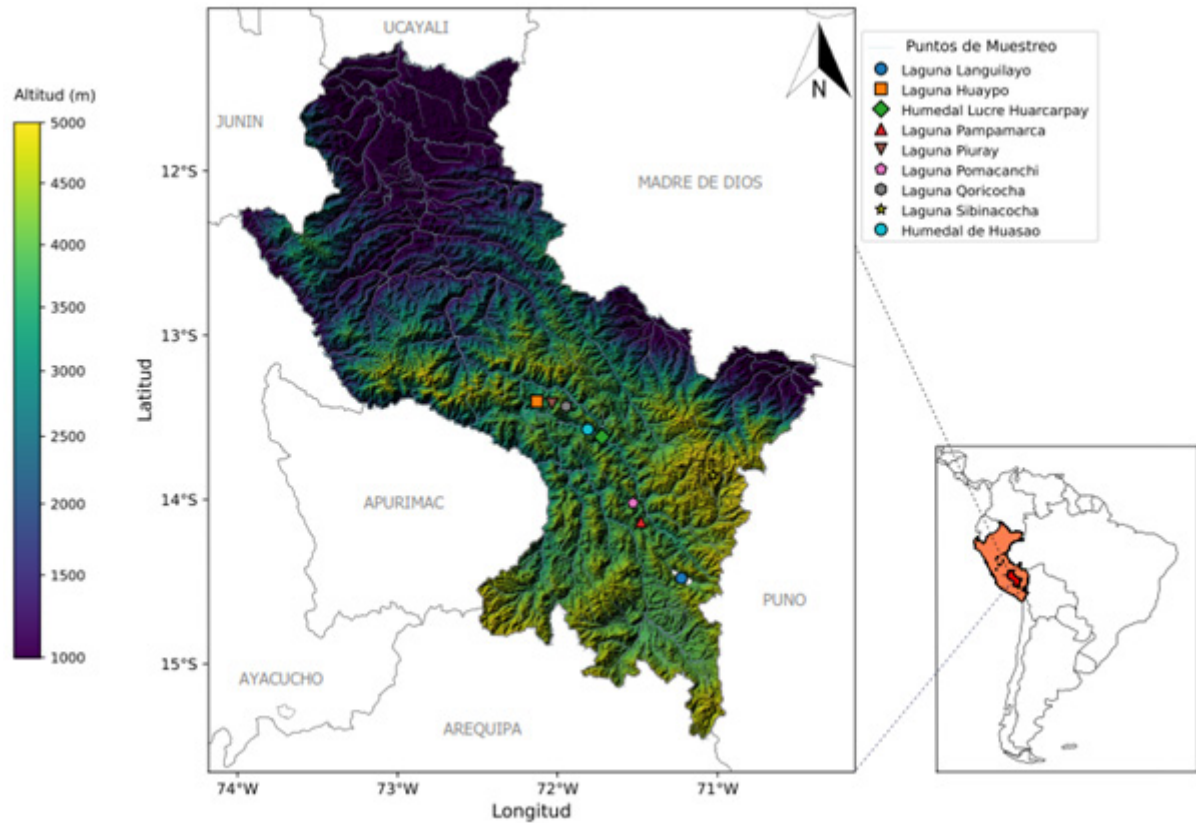
Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en nueve ecosistemas acuáticos altoandinos, conformados por siete lagunas y dos humedales, ubicados en distintas provincias del departamento de Cusco, en el sureste del Perú (Tabla 1). Estos cuerpos de agua se sitúan entre los 3,078 y 4,873 metros de altitud y forman parte de las cuencas altas de los ríos Vilcanota y Urubamba, que drenan hacia el sistema amazónico. Estas lagunas y humedales representan hábitats naturales importantes para especies nativas del género *Orestias* (Fig. 1).

Figura 1

Mapa que señala los sitios de muestreo de las poblaciones de *Orestias* en ocho lagos y humedales altoandinos de la región del Cusco, sureste del Perú. Los símbolos de color representan cada sitio muestreado, incluyendo lagos y humedales, como se indica en la leyenda. El gradiente de color indica la altitud (en metros), que va desde 100 hasta más de 5000 m. El mapa insertado muestra la ubicación del área de estudio en Sudamérica.

**Tabla 1**

Ubicación y altitud de los puntos de muestreo

Localidad	Latitud S	Longitud O	Altitud
Laguna Pomacanchi	14° 1' 15.63"	71° 31' 37.08"	3669
Laguna Piuray	13° 25' 5.74"	72° 1' 53.24"	3693
Laguna Languilayo	14° 29' 39.61"	71° 11' 23.51"	3960
Laguna Qoricocha	13° 25' 54.22"	71° 56' 46.12"	4051
Laguna Sibinacocha	13° 51' 56.73"	71° 1' 12.35"	4873
Laguna Huaypo	13° 24' 15.93"	72° 8' 0.91"	3513
Laguna Pampamarca	14° 8' 16.10"	71° 28' 43.18"	3784
Humedal de Huasao	13° 34' 23.21"	71° 48' 39.68"	3126
Humedal Lucre-Huacarpay	13° 38' 9.65"	71° 43' 35.53"	3078

Captura

Un total de 141 ejemplares del género *Orestias* fueron capturados manualmente mediante el arte de pesca (cortinera – trasmallo), bajo autorización de colecta otorgada mediante la Resolución Directoral N.º 00676-2022-PRODUCE/DGPCHDI. Los individuos provinieron de nueve localidades altoandinas del departamento de Cusco: Laguna Pomacanchi (n = 7), Laguna Piuray (n = 19), Laguna Languilayo (n = 25), Humedal Ramsar Lucre-Huacarpay (n = 17), Laguna

Qoricocha (n = 29), Laguna Sibinacocha (n = 19), Laguna Huaypo (n = 11), Laguna Pampamarca (n = 9) y Humedal de Huasao (n = 10). Las capturas se realizaron entre los años 2022 y 2023, abarcando distintas estaciones del año.

Los ejemplares fueron beneficiados con el uso de narcóticos, utilizando tricaina metanosulfonato (MS-222) a una concentración de 100 mg l⁻¹, preservados en etanol al 95% y depositados en la colección del Museo de la Biodiversidad del Perú (MUBI) hasta su análisis. A cada individuo se le midió la longitud total

(LT) utilizando un vernier con precisión de 0.1 cm, y el peso corporal con una balanza digital de 0.01 g de precisión. Los datos fueron sistematizados en hojas de cálculo Excel.

Las variables fisicoquímicas del agua fueron registradas in situ empleando un multiparámetro calibrado AZ 86031 del IMARPE. Los parámetros

evaluados incluyeron pH, oxígeno disuelto (mg/L), conductividad eléctrica (μS/cm), salinidad (ppt) y sólidos totales disueltos (TDS, ppm). Los valores obtenidos para cada localidad se presentan en la Tabla 2. Adicionalmente, los datos geográficos de los sitios de muestreo fueron obtenidos a partir de imágenes satelitales utilizando el software ArcGIS.

Tabla 2

Parámetros fisicoquímicos registrados in situ en lagunas y humedales altoandinos del departamento de Cusco

Localidad	pH	T° (°C)	Conductividad (μS/cm)	Salinidad (ppt)	TDS (ppm)	OD (mg/L)
Laguna Pomacanchi	8,08	15,8	11,2	0,01	6	8,6
Laguna Piuray	9,43	17,3	448	0,22	225	9,43
Laguna Languilayo	8,44	16,16	625	0,31	312	5,67
Laguna Qoricocha	8,42	13,2	56,1	0,03	27,7	10,8
Laguna Sibinacocha	8,4	11,2	322	0,01	5	7,9
Laguna Huaypo	8,38	18,1	4,04	2,22	2,03	7,9
Laguna Pampamarca	8,01	20,3	1240	0,72	618	9,7
Humedal de Huasao	7,74	21,5	16,4	0,02	8,2	7,7
Humedal Lucre-Huacarpay	7,46	22,2	787	0,46	394	6,5

Análisis

Análisis de regresión alométrica

Se realizó un análisis de regresión alométrica basado en un modelo potencial ajustado mediante el método de mínimos cuadrados para evaluar la relación entre el peso y la longitud de los peces:

$$W = a \cdot L^b$$

En este modelo, W denota el peso corporal (en gramos) y L representa la longitud total (en milímetros) (Da Costa & Araújo, 2003). Cuando el patrón de crecimiento es isométrico, el exponente b es igual a 3. Valores de b significativamente diferentes de 3 indican un crecimiento alométrico (Bagenal & Tesch, 1978). Un coeficiente b mayor a 3 refleja alometría positiva, lo que significa que los individuos más grandes ganan peso a una tasa proporcionalmente mayor que el incremento en longitud. Por el contrario, un valor de b menor a 3 indica alometría negativa, en la cual la longitud aumenta más rápidamente que el peso. El crecimiento se considera típicamente isométrico cuando los valores de b se encuentran en el rango de 2.5 a 3.5 (Carlander, 1969; Froese, 2006).

El análisis fue implementado en Python, utilizando NumPy para las operaciones numéricas (Harris et al., 2020), Pandas para el manejo de datos (McKinney, 2010) y SciPy para la optimización de los parámetros del modelo (Virtanen et al., 2020). Los resultados gráficos se generaron con Matplotlib (Hunter,

2007) y se mejoraron con Seaborn (Waskom et al., 2021) para una mayor claridad visual.

Análisis de componentes principales (PCA)

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para evaluar la relación entre las características fisicoquímicas de las lagunas. El análisis se implementó en Python utilizando la librería scikit-learn (Pedregosa et al., 2011) para la reducción de la dimensionalidad y Matplotlib (Hunter, 2007) para la visualización.

Las variables ambientales incluidas en el análisis fueron: pH, temperatura (°C), conductividad (μS/cm), salinidad, sólidos disueltos totales (TDS, ppm), oxígeno disuelto (DO) y altitud (m). Previo al análisis, todas las variables fueron normalizadas para evitar sesgos debido a diferencias en la escala.

Se seleccionaron los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2) para la visualización, ya que explicaron la mayor proporción de la varianza total.

La distribución de las lagunas en el espacio de los componentes principales permitió identificar patrones de similitud ambiental, mientras que la contribución de cada variable se evaluó en función de la longitud y dirección de los vectores en el biplot.

Análisis de redes de similitud entre lagunas

El análisis de la red de similitud se realizó en Python (van Rossum & Drake, 2009). Para la construcción y visualización de la red se utilizó la librería NetworkX

(Hagberg et al., 2008), mientras que Matplotlib (Hunter, 2007) se empleó para la representación gráfica. Las distancias geográficas entre lagunas se calcularon con GeoPy (Dowling, 2018) y la similitud ambiental se estimó utilizando SciPy (Virtanen et al., 2020).

Las distancias geográficas se determinaron mediante la fórmula de Haversine (Sinnott, 1984), mientras que la similitud ambiental se calculó a partir de la distancia euclidiana (Legendre & Legendre, 2012) entre variables ambientales normalizadas, incluyendo pH, temperatura, conductividad y altitud. Estas dos medidas fueron integradas en un índice de similitud ponderado, combinando componentes geográficos y ambientales para definir los enlaces de la red.

Cada laguna fue representada como un nodo, y las conexiones se establecieron en función de un umbral de similitud, excluyendo las relaciones débiles. La disposición de la red se optimizó con el algoritmo de diseño Spring, que ubica los nodos según la fuerza de sus conexiones. Para mejorar la interpretación ecológica, el tamaño de los nodos fue proporcional a la longitud promedio de los peces (LT en mm).

Resultados

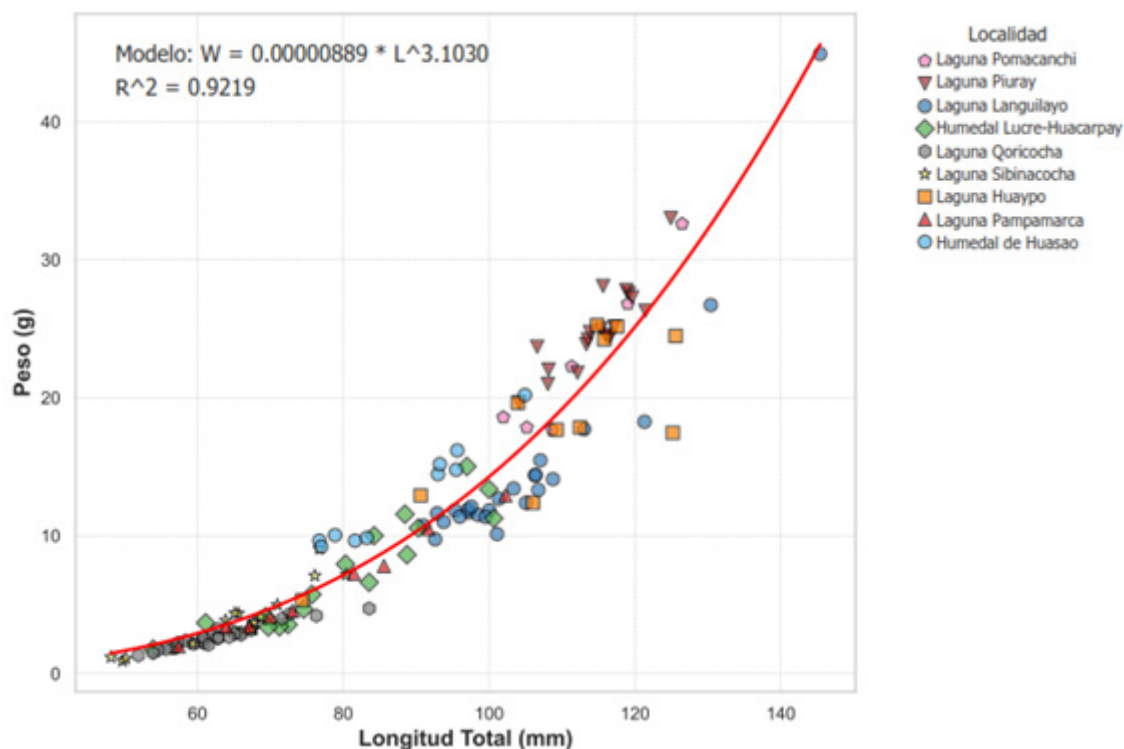
Análisis de regresión alométrica

La relación entre el peso corporal (W) y la longitud total (L) de los individuos se ajustó a una función potencial de la forma $W = 0.00000889 \cdot L^{3.1030}$, con un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9219$) (Fig. 2). Este resultado indica una fuerte relación alométrica entre ambas variables medidas. El exponente $b = 3.1030$ supera el valor teórico isométrico de 3, lo que sugiere un crecimiento alométrico positivo: los individuos más grandes tienden a incrementar su peso de manera proporcionalmente mayor que su longitud.

De acuerdo con el criterio de isometría ($b = 3$), el patrón de crecimiento se encuentra dentro del rango biológico típico para peces ($2.5 < b < 3.5$). Sin embargo, el valor significativamente mayor a 3 indica que el incremento en peso es más acelerado que en longitud, reflejando una condición corporal más robusta en los individuos de *Orestias* de mayor tamaño.

Figura 2

Gráfico de regresión alométrica que muestra la relación entre la longitud total (LT, en milímetros) y el peso corporal (W , en gramos) de los peces muestreados. Cada punto representa un individuo. La línea curva corresponde al modelo de regresión alométrica ajustado mediante el método de mínimos cuadrados, basado en una función potencial.



Análisis de componentes principales

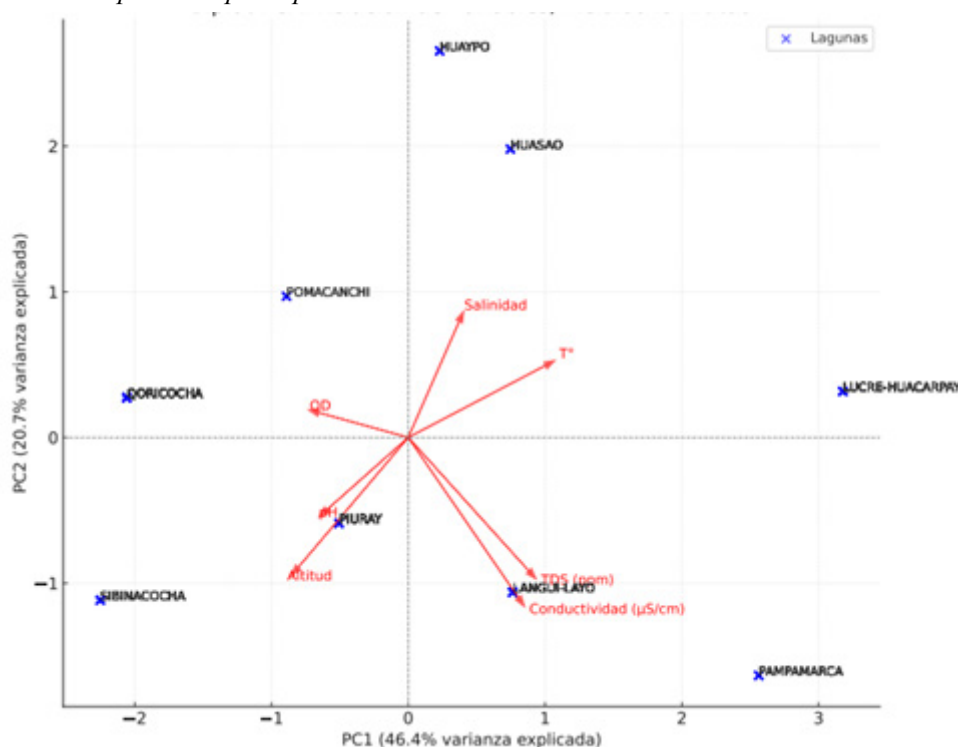
En el presente estudio, el análisis de componentes principales explicó una proporción considerable de la variabilidad total de las variables fisicoquímicas: el primer componente principal (PC1) explicó el 46.4% y el segundo componente (PC2) el 20.7% de la varianza acumulada. En el biplot, PC1 contrastó claramente dos conjuntos de condiciones ambientales: en el extremo positivo de PC1 se agruparon las variables relacionadas con la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (TDS), junto con temperatura y, en menor medida, salinidad; en el extremo negativo de PC1 se situaron variables asociadas a mayor altitud, pH y oxígeno disuelto (OD). Por su parte, PC2 discriminó composiciones con mayor influencia de salinidad, oxígeno disuelto (OD) y temperatura (valores positivos de PC2) frente a lagunas

caracterizadas por condiciones más frías y de mayor altitud (valores negativos de PC2).

En cuanto a la distribución de las lagunas, aquellas situadas hacia la derecha del biplot (Pampamarca y Languilayo) se asocian con mayores valores de conductividad y TDS, lo que sugiere aguas con mayor carga iónica y mayor concentración de sólidos totales disueltos. Las lagunas ubicadas en el cuadrante superior (Lucre-Huacarpay, Huaypo y Huasao) presentan elevadas puntuaciones en PC2, indicando una mayor influencia de salinidad y temperatura relativa. En contraste, lagunas situadas en el lado izquierdo del biplot (Pomacanchi, Sibinacocha, Qoricocha y Piuray) se asocian con mayor altitud, pH y DO, reflejando aguas más frías, bien oxigenadas, menor conductividad y sólidos totales disueltos (TDS).

Figura 3

Biplot de PCA que muestra la relación entre las características fisicoquímicas de las lagunas, incluyendo la altitud. Los ejes representan los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2), que explican la mayor proporción de la variabilidad de los datos. Los vectores indican la contribución y dirección de cada variable en el espacio de los componentes principales.



Análisis de redes de similitud entre lagunas

El análisis de red, construido a partir de un índice ponderado que integró distancias geográficas (Haversine) y similitud ambiental (distancia euclidiana entre variables normalizadas), reveló una estructura claramente no aleatoria de conexiones entre las lagunas muestreadas. La figura muestra un núcleo central

fuertemente conectado formado por Lucre-Huacarpay, Huaypo, Pomacanchi y Huasao, cuyas aristas gruesas indican una elevada similitud ambiental y/o proximidad espacial entre estas estaciones. En contraste, otras lagunas como Qoricocha y Sibinacocha ocupan posiciones más periféricas en la red, manteniendo tanto enlaces fuertes con algunos nodos centrales como conexiones débiles que reflejan singularidades ambientales locales.

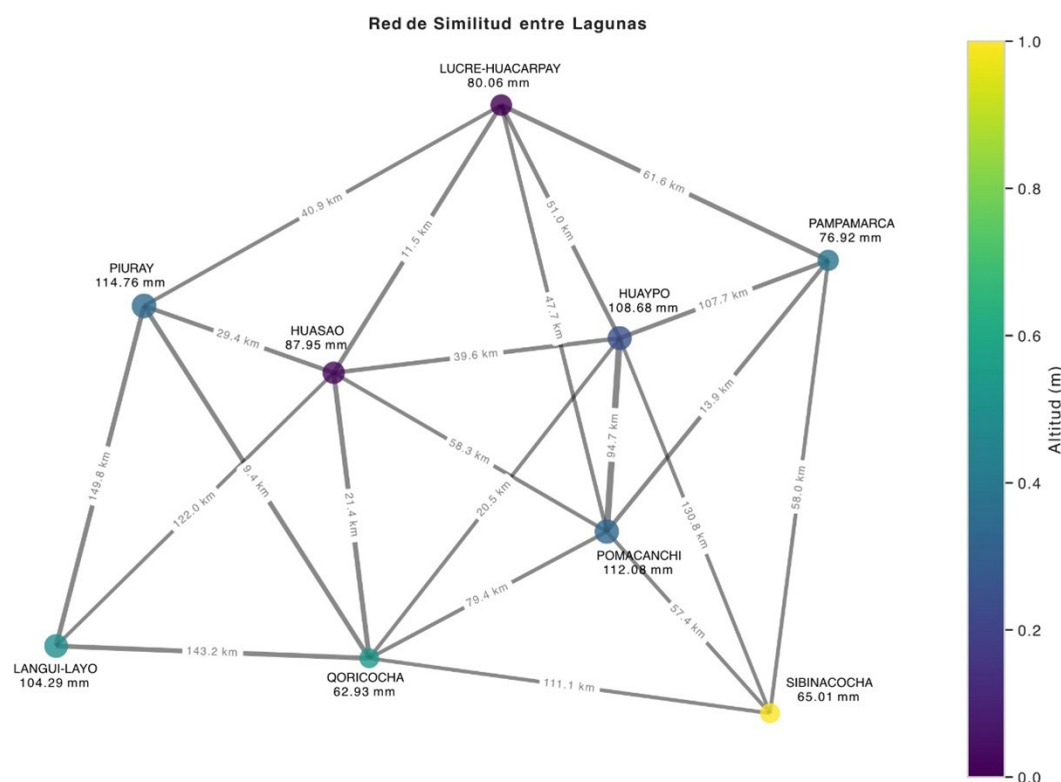
La inclusión de atributos de nodo aportó información ecológica complementaria: el tamaño de los nodos (proporcional a la longitud media de la longitud total de las *Orestias*) mostró que lagunas con poblaciones de *Orestias* superiores a 100 mm (Langui-layo, Piuray, Pomacanchi, Huaypo) tienden a integrarse en subestructuras con condiciones fisicoquímicas semejantes, mientras que lagunas con LT menores aparecieron como nodos de menor magnitud y, en algunos casos, más aislados. Asimismo, el gradiente altitudinal (representado por la escala de color) contribuye a la

configuración topológica de la red: lagunas con altitudes similares presentan, en general, enlaces más fuertes entre sí, lo que sugiere que la altitud actúa como un factor ambiental que modula la semejanza entre cuencas.

Aunque la proximidad espacial explica parte de la fuerza de las conexiones, se observaron enlaces robustos entre lagunas no necesariamente adyacentes, lo que implica que atributos ambientales compartidos, también operan como vectores de similitud independiente de la distancia.

Figura 4

Red de similitud entre lagunas basada en distancias geográficas y ambientales. Cada nodo representa una laguna, con un tamaño proporcional a la longitud promedio de los peces (LT en mm). El color del nodo indica la altitud de la laguna, siguiendo una escala de colores desde las elevaciones más bajas hasta las más altas. El grosor de los enlaces representa el grado de similitud combinada entre las lagunas, donde las conexiones más gruesas indican mayor similitud. Las etiquetas en los enlaces señalan la distancia geográfica entre lagunas en kilómetros.



Discusión

Los resultados de este estudio muestran un patrón de crecimiento cercano a la isometría, pero con un exponente alométrico ligeramente por encima de 3 ($b = 3.103$; $R^2 = 0.92$), lo que indica una tendencia hacia una alometría positiva: los individuos de mayor talla acumulan masa a una tasa proporcionalmente superior a la ganancia lineal en longitud. Este patrón puede interpretarse como un indicador de mejor condición corporal en individuos grandes y/o como respuesta a estrategias energéticas locales en ambientes altoandinos con recursos estacionales y estrés abiótico pronunciado

(Rojas et al., 2021). Estudios en el Altiplano han reportado rangos amplios de valores de b en *Orestias* y especies co-ocurrentes, con variación intersitio que se asocia a diferencias ecológicas y ambientales, lo que valida la interpretación de que la longitud – peso es sensible a condiciones locales (Rojas et al., 2021).

El análisis multivariado (PCA) identificó dos ejes ambientales dominantes: uno que contrasta sistemas con alta conductividad y TDS frente a sistemas fríos, bien oxigenados y de mayor altitud, y otro asociado a gradientes de salinidad y temperatura. Estos ejes funcionales concuerdan con la idea de filtrado ambiental

(environmental filtering) en gradientes altoandinos, donde variables como altitud, temperatura, pH y oxígeno disuelto actúan como barreras selectivas que moldean la condición y el tamaño corporal de las poblaciones (Herrera-Pérez et al., 2019). En nuestro caso, lagunas con mayor conductividad y TDS, se diferencian de lagunas de mayor altitud y mayor OD, lo cual es coherente con respuestas fisiológicas esperadas: aguas con mayor carga iónica y temperatura relativa pueden favorecer mayores tasas de crecimiento energético en determinadas estaciones, mientras que ambientes fríos y mejor oxigenados filtran para fenotipos con mayor tolerancia a bajas temperaturas y disponibilidad variable de alimento (Herrera-Pérez et al., 2019; García-Avila et al., 2023).

La estructura de la red de similitud mostró un núcleo de lagunas interconectadas (Lucre–Huacarpay, Huaypo, Pomacanchi, Huasao) que comparten condiciones fisicoquímicas y proximidad espacial, mientras que sistemas más altos y aislados (Sibinacocha, Qoricocha) figuran como periféricos. Esto sugiere la acción combinada de procesos de dispersión y de convergencia por nicho: la proximidad facilita el intercambio genético y la homogeneidad ambiental favorece la repetición de patrones biométricos entre sitios no necesariamente contiguos (Herrera-Pérez et al., 2019). En términos de metacomunidad, nuestros resultados apuntan a que tanto la dispersal limitation como el environmental filtering contribuyen a la varianza observada en biometría de *Orestias*, y que la altitud actúa como un eje clave que modula la similitud entre cuencas (Herrera-Pérez et al., 2019).

Conclusiones

Los análisis biométricos muestran que la relación longitud–peso se ajusta a un modelo alométrico con exponente $b = 3.103$ ($R^2 = 0.92$), lo que indica una ligera alometría positiva y una condición corporal relativamente elevada en los individuos de mayor talla. Este hallazgo sugiere que la condición fisiológica de las poblaciones varía entre sitios y puede servir como un indicador sensible de cambios ambientales y antrópicos.

El PCA reveló dos ejes ambientales dominantes (PC1: conductividad/TDS vs. altitud/pH/DO; PC2: salinidad/temperatura) que explican la mayor parte de la variabilidad fisicoquímica entre lagunas. Estos ejes funcionan como filtros ambientales que estructuran la ecología y la biometría de *Orestias*, por lo que la monitorización de conductividad y TDS resulta prioritaria para detectar cambios funcionales en los sistemas acuáticos.

La red integrada de similitud (distancia geográfica + similitud ambiental) identificó un núcleo

de lagunas interconectadas (Lucre–Huacarpay, Huaypo, Pomacanchi, Huasao) y sitios periféricos de alta altitud (Sibinacocha, Qoricocha). Este patrón indica que tanto la conectividad hidrológica como el filtrado ambiental influyen en la semejanza biométrica entre poblaciones; por tanto, las estrategias de conservación deben contemplar la matriz de conectividad además de las características locales del hábitat.

Desde una perspectiva aplicada, proponemos tres acciones prioritarias: (1) implementar un programa de monitoreo rutinario que incluya índices de condición (longitud–peso) y medidas fisicoquímicas claves (conductividad, TDS, DO, pH, temperatura); (2) priorizar la conservación in situ de los nodos interconectados que actúan como centros de semejanza poblacional; y (3) adoptar medidas para reducir fuentes locales de perturbación (manejo de nutrientes, control de introducciones, regulación de actividades antrópicas).

Agradecimientos

Agradecemos al Mg. Juan Carlos Chaparro, curador del Museo de Biodiversidad del Perú (MUBI), por su apoyo y por permitirme formar parte de la colección de peces del museo. Estamos igualmente agradecidos a Rolando Chaparrea, Nayely Polanco y Deysi Ccala por su valiosa colaboración en las actividades de campo. Extendemos nuestro reconocimiento a la organización juvenil IctiosCusco por su constante apoyo y compromiso. Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a los doctores Marco Méndez y Aldemar Acevedo por su apoyo académico y, sobre todo, por su amistad, que ha sido fundamental durante el desarrollo de esta investigación. Este trabajo fue financiado por el programa Yachayninchis Wiñarinanpaq de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Referencias

- Araya, V. I. (2024). Desentrañando la historia evolutiva de la especie *Orestias agassii*: un estudio filogeográfico considerando su rango de distribución actual [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias.
- Arratia, G., Peñafiel, N., & Quezada-Romegialli, C. (2017). Phylogenetic relationships and evolutionary history of the genus *Orestias* (Teleostei: Cyprinodontidae). *Journal of Fish Biology*, 91(3), 721–740.
- Bagenal, B., & Tesch, F. (1978). Age and growth. En T. B. Bagenal (Ed.), *Methods for assessment of fish production in freshwaters* (3rd ed., pp. 101–136). Blackwell Scientific Publications.

- Carlander, K. (1969). Handbook of freshwater fishery biology (Vol. I). The Iowa State University Press.
- Da-Costa, M., & Gerson, F. (2003). Length-weight relationship and condition factor of *Micropogonias furnieri* (Desmarest) (Perciformes, Sciaenidae) in the Sepetiba Bay, Rio de Janeiro State, Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, 20(4), 685–690. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752003000400022>
- De la Barra, E., Maldonado, M., Vila, I., Ibáñez, C., Jégu, M., & Carvajal-Vallejos, F. M. (2020). Resumen del conocimiento sobre la biología y taxonomía del género *Orestias* Valenciennes 1839 (Actinopterygii, Cyprinodontiformes). *Neotropical Hydrobiology and Aquatic Conservation*, 1(2), 185–224.
- Eigenmann, C. H. (1920). On the Genera *Orestias* and *Empetrichthys*. *Copeia*, (89), 103–106.
- Eigenmann, C. H., & Allen, W. R. (1942). Fishes of Western South America. University of Indiana Press.
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight-length relationships: History, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241–253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>
- García-Ávila, F., Loja-Suco, P., Sigüenza-Jeton, C., Jiménez-Ordoñez, M., Valdiviezo-González, L., Cabello-Torres, R., & Avilés-Añazco, A. (2023). Evaluation of the water quality of a high Andean lake using different quantitative approaches. *Ecological Indicators*, 154, 110924. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110924>
- Guerrero, J., Vila, I., & Poulin, E. (2015). Morphological variation and taxonomic revision of *Orestias* from Chilean Altiplano lakes. *Zootaxa*, 3931(2), 211–228.
- Hagberg, A., Schult, D., & Swart, P. (2008). Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy)*, 11–15.
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Taylor, S. E., & the NumPy community. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Herrera-Pérez, J., Parra, J. L., Restrepo-Santamaría, D., & Jiménez-Segura, L. F. (2019). The influence of abiotic environment and connectivity on the distribution of diversity in an Andean fish fluvial network. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00009>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Lauzanne, L. (1992). The *Orestias* of Lake Titicaca. En C. Dejoux & A. Iltis (Eds.), *Lake Titicaca* (pp. 405–419). Kluwer Academic Publishers.
- Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (Vol. 24). Elsevier.
- McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 51–56. <https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>
- Ortega, H., & Hidalgo, M. (2008). Freshwater fishes and aquatic habitats in Peru: Current knowledge and conservation. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 11(3), 257–271.
- Parenti, L. R. (1981). A phylogenetic and biogeographic analysis of Cyprinodontiformes. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 168, 335–557.
- Parenti, L. R. (1984). A taxonomic revision of the Andean killifish genus *Orestias* (Cyprinodontiformes, Cyprinodontidae). *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 178(2), 107–214.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Rojas, P., Pardo, R., & Vila, I. (2021). Length-weight relationships native fish of Southern Altiplano: Lauca National Park, Chile. *Journal of Freshwater Ecology*, 36(1), 285–291. <https://doi.org/10.1080/02705060.2021.1971782>
- Sinnott, R. W. (1984). *Virtues of the Haversine*. *Sky and Telescope*, 68, 159.
- Tchernavin, V. V. (1944). A revision of the subfamily Orestiinae. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 114(1–2), 140–233. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1944.tb00218.x>

- van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). Python 3 Reference Manual. CreateSpace.
- Vila, I., Scott, S., & Poulin, E. (2013). Phylogenetic and biogeographic history of Orestias species from the high-altitude lakes of South America. *Journal of Biogeography*, 40(5), 985–995.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>