

**Evaluación de la calidad del agua mediante el uso de
macroinvertebrados acuáticos y pruebas fisicoquímicas en la quebrada Jurado, Pamplona,
Norte de Santander- Colombia.**

Endris Enrique Solano Garcia

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Departamento de Biología
Pamplona, Norte de Santander

2024

Evaluación de la calidad del agua mediante el uso de macroinvertebrados acuáticos y pruebas fisicoquímicas en la quebrada Jurado, Pamplona, Norte de Santander – Colombia

Trabajo de Grado para optar por el título de:

Biólogo

Director:

Erika Guerrero Cárdenas, B.Sc. M. Sc.

Codirector:

Lizeth Bolívar Buitrago, B.Sc. Esp.

Universidad de Pamplona

Facultad de Ciencias Básicas

Departamento de Biología

Pamplona, Norte de Santander

2024

Dedicatoria

Dios.

Por su amor y por guiar mi camino siempre.

A mis padres, Gloria García y Endris Solano, quienes con su ejemplo de paciencia, entrega y amor me han enseñado que los sueños se alcanzan con esfuerzo y determinación. Sus palabras y su apoyo me han dado el valor para seguir adelante y nunca rendirme.

A mi hermana, Andris, por ser mi apoyo incondicional, mi confidente y mi amiga. Gracias por escucharme y estar siempre a mi lado, brindándome ánimo y consuelo cuando más lo necesitaba.

A toda mi familia, que con su amor y confianza ha sido mi pilar en todo momento, especialmente a mi tía Enith y a mi primo Eder, por su confianza y apoyo durante este proceso.

A mis abuelos, Blanca y Oswaldo, por enseñarme ese camino de perseverancia lleno de amor que tanto valoro y que me inspira cada día.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Ecología y Biogeografía de la Universidad de Pamplona, por la formación y conocimientos compartidos a lo largo de este proceso. Cada una de las experiencias y enseñanzas recibidas han sido fundamental para mi desarrollo académico y profesional.

Agradezco al laboratorio de entomología de la Universidad de Pamplona por el apoyo recibido en mi investigación. La colaboración y el ambiente de trabajo en este laboratorio han sido valiosos para la realización de mis estudios.

A mi directora, Erika Guerrero, agradezco sinceramente su confianza y apoyo incondicional. Siendo una guía fundamental en mi crecimiento académico y personal.

A Jimmy Reyes, por su paciencia y ayuda en el análisis estadístico, que fue clave para la culminación de esta investigación.

A los profesores Dilan y Lizeth, gracias por su acompañamiento y guía en este proceso formativo. Su dedicación y compromiso con nuestros aprendizajes han dejado una huella en mi camino académico.

A mi amiga Paola, quien ha sido una parte muy importante de todo este proceso, brindándome apoyo y motivación en cada paso. A Sergio y Giovani, gracias por brindarme apoyo con su conocimiento y por estar siempre dispuestos a ayudarme.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud por la vida misma, por cada oportunidad que se me ha brindado y por las lecciones aprendidas en el camino. Agradezco las experiencias vividas, que me han fortalecido y me han llevado hasta aquí.

Contenido

3. Introducción	1
Planteamiento del problema.....	3
Justificación.	5
4. Marco teórico.	6
4.1. Los ecosistemas acuáticos.....	6
4.2. Calidad del agua.....	7
4.2. Los macroinvertebrados acuáticos	8
4.3. Efímeras (Ephemeroptera)	8
4.4. Plecópteros (Plecoptera)	10
4.5. Odonatos (Odonata)	11
4.6. Pruebas fisicoquímicas.....	13
4.7. Factores que afectan la calidad del agua.	15
4.8. Relación de los factores fisicoquímicos del agua con los factores bióticos.	16
4.9. Análisis estadístico para la evaluación de la calidad del agua.	17
4.9.1. Curva de completitud.	18
4.9.2. Evaluación de la Diversidad de Macroinvertebrados.	19
4.9.3. Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT).	20
4.9.4. El índice BMWP para Colombia (BMWP / COL):	22
4.9.5. Índice Biótico de Familias (IBF).	24
5. Objetivos	26
5.1. Objetivo General.....	26
5.2. Objetivos Específicos.....	26
6. Metodología.	27
6.1. Área de estudio.	27
6.2. Fase de campo.....	29
6.2.1. Selección de Puntos de Muestreo	29
6.3. Recolección de muestras de agua.	32
6.4. Muestreo de macroinvertebrados.	33
6.5. Análisis de muestras de agua.	34
6.7. Separación e identificación de macroinvertebrados.	35
6.8. Fase analítica.....	37
6.8.1. Curva de completitud:.....	37
6.8.2. Análisis de diversidad:.....	37
6.8.3. Índice BMWP-Col.	38
6.8.4. Cálculo índice ASTP.....	39
6.8.5. Cálculo índice IBF.	39
6.8.6. Escalado multidimensional no métrico (NMDS).....	40
7. Resultados	41
7.1 Diversidad de Macroinvertebrados en la Quebrada Jurado.	41
7.1.2. Curva de Completitud (Evaluación de la Representatividad de las Muestras en la Diversidad de Familias).	41
7.1.2 Análisis de Rareza y Abundancia (Distribución y Abundancia de Familias Raras en la Quebrada Jurado).	43

7.1.3. Resultados de la Diversidad Alfa por Índice de Shannon.....	45
7.1.4. Resultados de la Diversidad Beta por Bray-Curtis.	47
7.2. Resultados de parámetros fisicoquímicos.....	49
7.3. Biological Monitoring Working Party para Colombia (BMWP-Col).	50
7.5. Índice Biótico De Familias De Macroinvertebrados (IBF).....	58
7.6. Escalado multidimensional no métrico (NMDS).....	62
8. Discusión.....	64
8.1. Estimación de la diversidad de familias de macroinvertebrados acuáticos presentes en la quebrada Jurado, Pamplona-Colombia.	64
8.2. Inferencia de las Propiedades Fisicoquímicas del Agua en la Quebrada Jurado... ..	66
8.3. Relación macroinvertebrados con parámetros fisicoquímicos en la quebrada Jurado, Pamplona-Colombia.....	67
9. Conclusiones	68
Referencias Bibliográficas	70
Anexos	79

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Morfología de las Ninfas de Efemerópteros.	9
Ilustración 2. Vista general de una ninfa de Plecóptera.	10
Ilustración 3. Odonatos - Morfología de la Ninfa	11
Ilustración 4. Macroinvertebrados bentónicos	12
Ilustración 5. Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP / Col	23
Ilustración 6. Ubicación geográfica de la Quebrada Jurado.....	28
Ilustración 7. Estación de Muestreo 1: Agua Abajo de las Viviendas en la Quebrada ...	29
Ilustración 8. Segunda Estación de Monitoreo Aguas Abajo del Taller de carpintería. .	30
Ilustración 9. Tercera Estación de Monitoreo Aguas Arriba.....	31
Ilustración 10. Muestreo de Agua.	32
Ilustración 11. Recolección de Macroinvertebrados acuáticos (Red Surber).	34
Ilustración 12. Separación de macroinvertebrados en laboratorio.	36
Ilustración 13. Curva de Completitud de Riqueza y Abundancia de Macroinvertebrados en la quebrada Jurado- Pamplona.	43
Ilustración 14. Análisis de Rareza y Abundancia de Familias en la Quebrada Jurado. ..	44
Ilustración 15. Estimación de la Riqueza de Familias de Macroinvertebrados: Diversidad Alfa	47
Ilustración 16. Análisis de Similitud de Bray-Curtis entre Estaciones de Muestreo de Macroinvertebrados en la Quebrada Jurado.	48
Ilustración 17. Escalado multidimensional no métrico (NMDS).	63

Lista de tablas.

Tabla 1. Clasificación de Aguas según ASPT.	21
Tabla 2. Clases y calidad de agua mediante el BMWP/COL.	24
Tabla 3. Estimación del Índice Biótico de Familia.	25
Tabla 4. Perfil de Diversidad de Macroinvertebrados Basado en el Índice de Shannon.	46
Tabla 5. Parámetros Fisicoquímicos Estaciones de Monitoreo en la Quebrada Jurado-Pamplona.....	49
Tabla 6 . Puntajes y Clasificación del Índice BMWP-Col para Macroinvertebrados en la Estación de Muestreo 1.....	51
Tabla 7. Puntajes y Clasificación del Índice BMWP-Col para Macroinvertebrados en la Estación de Muestreo 2.....	52
Tabla 8. Puntajes y Clasificación del Índice BMWP-Col para Macroinvertebrados en la Estación de Muestreo 3.....	53
Tabla 9. Resultados Finales del Índice BMWP-Col.	54
Tabla 10. Cálculo del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) para la Estación 1.....	55
Tabla 11. Cálculo del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) para la Estación 2.....	56
Tabla 12. Cálculo del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) para la Estación 3.....	57
Tabla 13. Resultados del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) en las Estaciones de Muestreo.....	58
Tabla 14. Cálculo del Índice Biótico de Familias (IBF) en la Estación 1.....	59

Tabla 15. Cálculo del Índice Biótico de Familias (IBF) en la Estación 2.....	60
Tabla 16. Cálculo del Índice Biótico de Familias (IBF) en la Estación 2.....	61
Tabla 17. Resultados del Índice Biótico de Familias (IBF) para las Estaciones Muestreadas.	62

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de Shannon-Wiener	19
Ecuación 2. Índice de disimilitud de Bray-Curtis	19
Ecuación 3: Proporción de Individuos.....	20

Resumen

El estudio de la diversidad de macroinvertebrados acuáticos se realizó en la Quebrada Jurado, en Pamplona, Norte de Santander, entre marzo y agosto de 2024. Se analizaron tres estaciones de muestreo, recolectando un total de 36 familias y 14 órdenes de macroinvertebrados. Durante la investigación, se consideraron parámetros fisicoquímicos del agua como el oxígeno disuelto, pH, turbidez, sólidos totales, DQO y DBO5. Los resultados mostraron variabilidad en la composición y abundancia de las comunidades de macroinvertebrados en las estaciones estudiadas, lo que permitió identificar patrones de diversidad relacionados con las condiciones ambientales. Las estaciones E1 y E3 presentaron características similares, mientras que E2 se destacó por sus diferencias significativas en los parámetros fisicoquímicos y una mayor diversidad biológica. Esta investigación enfatizó la importancia de los macroinvertebrados como indicadores sensibles a las variaciones en los factores fisicoquímicos del agua. Además, se observó que la contaminación doméstica y agrícola influía en la abundancia y diversidad de las Familias presentes. Este estudio aporta información clave para la conservación y manejo de ecosistemas acuáticos en la región, resaltando el valor de los macroinvertebrados como herramientas efectivas para evaluar la calidad del agua en sistemas fluviales. Este estudio resalta la importancia de los macroinvertebrados como indicadores naturales de la calidad del agua, proporcionando información esencial para la conservación de los ecosistemas acuáticos locales y promoviendo un enfoque más sostenible en la gestión de nuestros recursos hídricos.

Palabras clave: Macroinvertebrados, Calidad del Agua, Contaminación, Diversidad Biológica, Sostenibilidad Ambiental.

Abstract

The study of aquatic macroinvertebrate diversity was conducted in the Quebrada Jurado, located in Pamplona, Norte de Santander, between August and September 2024. Three sampling stations were analyzed, resulting in the collection of a total of 36 families and 14 orders of macroinvertebrates. During the investigation, various physicochemical parameters of the water were considered, including dissolved oxygen, pH, turbidity, total solids, chemical oxygen demand (COD), and biochemical oxygen demand (BOD5). The results showed variability in the composition and abundance of macroinvertebrate communities across the studied stations, allowing for the identification of diversity patterns related to environmental conditions. Stations E1 and E3 exhibited similar characteristics, while E2 stood out due to significant differences in physicochemical parameters and greater biological diversity. This research highlighted the importance of macroinvertebrates as sensitive indicators of variations in water physicochemical factors. Additionally, it was observed that domestic and agricultural pollution influenced the abundance and diversity of present species. This study provides key information for the conservation and management of aquatic ecosystems in the region, emphasizing the value of macroinvertebrates as effective tools for assessing water quality in river systems. It underscores their role as natural indicators of water quality, offering essential information for the conservation of local aquatic ecosystems and promoting a more sustainable approach to managing our water resources.

Keywords: Macroinvertebrates, Water Quality, Pollution, Biological Diversity, Environmental Sustainability.

3. Introducción

Los ríos son fundamentales en los ecosistemas fluviales a nivel mundial, ya que estos desempeñan un papel crucial en la regulación y distribución del agua dulce, convirtiéndose en parte vital para la sostenibilidad de numerosos sistemas naturales y la subsistencia de las comunidades humanas (Capurro, 2007). En Colombia contamos con aproximadamente 1.600 ríos, la comprensión de estos sistemas acuáticos sigue siendo un desafío (The Nature Conservancy, 2024). A pesar de su importancia, los conocimientos sobre su biodiversidad y funcionamiento ecológico aún presentan lagunas significativas. Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas, se han llevado a cabo diversos estudios científicos que han utilizado a los macroinvertebrados acuáticos como herramientas clave para evaluar la calidad del agua y comprender la salud de los ecosistemas fluviales Orrego-Meza et al., (2020). Investigaciones representativas como las de Roldán (1988, 1999, 2001), Machado (2001), Guerrero et al. (2003), Bernal et al. (2006), Gutiérrez (2008), Duque (2008), Chará-Serna et al. (2010), Mosquera-Murillo et al. (2015), Daza & Patiño (2016) y Madera (2016), han contribuido significativamente a esta área de estudio al establecer correlaciones entre la presencia y abundancia de estos organismos y la salud general de los ecosistemas acuáticos.

En el departamento de Norte de Santander, se han realizado varios estudios importantes sobre macroinvertebrados acuáticos y la calidad del agua. Investigaciones como las de Sánchez et al. (2005), Castellanos (2007) y Rico et al. (2009) los cuales destacan la necesidad de ampliar el conocimiento sobre estos organismos y su interacción con las características fisicoquímicas de otros cuerpos de agua en la región. Estos estudios han evidenciado que la conservación de los ríos está influenciada por factores como el flujo del agua, sus propiedades fisicoquímicas, el caudal, las características de la ribera y el nivel de impacto, todos los cuales pueden ser alterados

por condiciones naturales o actividades humanas. Entre las actividades humanas más impactantes se encuentran la agricultura, la ganadería, la deforestación y la urbanización, que generan contaminación y degradación de los recursos hídricos, afectando tanto la biodiversidad como el paisaje de los ecosistemas fluviales (Navarro-Picado et al. 2017).

Los macroinvertebrados bentónicos, debido a su hábito sedentario y alta sensibilidad a los cambios en el agua, han sido utilizados ampliamente como indicadores de la calidad del agua (Forero, 2017). Estos organismos, que miden entre 0.5 y 5.0 mm, se adhieren a la vegetación y a las rocas en el lecho de ríos y lagos. Entre ellos, los órdenes más representativos son Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera destacan por su riqueza, abundancia y capacidad para indicar la calidad del agua, además de su relación con parámetros fisicoquímicos (Arroyo et al., 2009).

Planteamiento del problema.

Los cuerpos de agua desempeñan un papel crucial en la sustentabilidad de los ecosistemas, ya que son fundamentales para mantener la biodiversidad y garantizar la salud de los entornos acuáticos (United Nations, 2019). En este contexto, la quebrada Jurado en Pamplona, Colombia, surge como un ecosistema vital para la comunidad local (Alcaldía Municipal de Pamplona, 2015). No obstante, La quebrada Jurado enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad del agua y la biodiversidad (CORPONOR, 2018). Entre ellos se destacan la contaminación por aguas residuales domésticas y agrícolas, que deteriora la calidad del agua; la erosión del suelo, que provoca sedimentación y altera los hábitats acuáticos (Villamizar Mendoza, 2017).

En el departamento de Norte de Santander, Colombia, la falta de estudios detallados sobre la calidad del agua en cuerpos hídricos locales, como la quebrada del río Jurado, limita la comprensión de su estado ecológico (Lozano, 2021). Esta situación es preocupante, ya que los macroinvertebrados acuáticos, que incluyen insectos, crustáceos y moluscos, son esenciales como bioindicadores de la calidad del agua. Estos organismos son sensibles a las variaciones en el entorno acuático y su diversidad y abundancia pueden reflejar la salud del ecosistema y la presencia de contaminantes (Barzola, 2020). Por lo tanto, es necesario realizar investigaciones que integren el análisis de macroinvertebrados para obtener una evaluación más completa de la calidad del agua en la quebrada Jurado y así abordar los problemas ambientales de manera efectiva.

A pesar de depender de esta fuente para diversas necesidades, la comunidad carece de conocimientos sobre la posible presencia de contaminantes, agravando la incertidumbre sobre la seguridad de sus actividades cotidianas. Esta falta de información se agrava con la evidencia de

vertimientos de aguas residuales domésticas directamente en la quebrada, señalando prácticas potencialmente perjudiciales que requieren una evaluación detenida (Cufiño, 2016).

La contaminación resultante de estas acciones humanas podría tener consecuencias sustanciales en la salud del ecosistema, especialmente en la comunidad de macroinvertebrados. La falta de datos precisos sobre la calidad del agua y la posible presencia de contaminantes plantea un riesgo latente para la biodiversidad y, por ende, para la sostenibilidad a largo plazo de este ecosistema (Espinosa, 2023).

En este escenario, la pregunta que guiará esta investigación es: ¿Cómo influye la contaminación en la calidad del agua y en la comunidad de macroinvertebrados en la quebrada Jurado? Este interrogante busca identificar los mecanismos de la contaminación y proporcionar una base sólida para estrategias de conservación que aborden tanto la salud del ecosistema acuático como la seguridad de la comunidad local que depende de él (Escobar, 2019).

Justificación.

La presente investigación surge como una respuesta necesaria para abordar los posibles impactos de la contaminación en la calidad del agua de la quebrada Jurado en Pamplona, Colombia. Este ecosistema acuático representa un recurso vital tanto para el medio ambiente como para la comunidad local.

La importancia de comprender y abordar estos posibles impactos se vuelve crítica, considerando la relevancia de la quebrada Jurado en la preservación de la biodiversidad local y su papel fundamental en las actividades cotidianas de la comunidad. La investigación busca proporcionar información esencial para la toma de decisiones informadas y estrategias de conservación que salvaguarden la integridad de este recurso hídrico crucial.

El análisis de los posibles efectos de la contaminación en la diversidad y abundancia de macroinvertebrados permitirá comprender los cambios en el equilibrio del ecosistema acuático y establecer estrategias efectivas de conservación (Nuñez, 2019). Además, la evaluación de la calidad del agua y su relación con la salud humana es fundamental para proteger la comunidad local de posibles riesgos asociados con el consumo de agua contaminada.

Las primeras investigaciones en esta zona proporcionarán información crucial para tomar decisiones informadas y establecer medidas de gestión adecuadas, promoviendo así la preservación del ecosistema acuático y el bienestar de la comunidad local (OEA, 2006).

4. Marco teórico.

4.1. Los ecosistemas acuáticos.

Los ecosistemas acuáticos, especialmente los ríos y quebradas, desempeñan un papel fundamental en la salud y el equilibrio de nuestro planeta. Estos ecosistemas albergan una gran diversidad de vida acuática, desde microorganismos hasta peces y aves, creando complejas redes tróficas y proporcionando servicios ecológicos (Sánchez, 2007).

Los ríos y quebradas actúan como corredores biológicos, permitiendo la conectividad entre diferentes hábitats y facilitando la migración de Familias (Gessner et al., 2010). Estos sistemas acuáticos también son importantes para el ciclo del agua, ya que regulan su flujo, almacenamiento y filtración, contribuyendo así a la disponibilidad de agua dulce tanto para los ecosistemas terrestres como para el consumo humano (Smith, 2010).

Los ecosistemas acuáticos no se limitan a su valor intrínseco; también ofrecen beneficios directos a las comunidades humanas. Estos ecosistemas desempeñan un papel crucial al proporcionar suministro de agua para usos domésticos, agrícolas e industriales, así como en la generación de energía hidroeléctrica y actividades recreativas. Además, contribuyen significativamente a la resiliencia y adaptación al cambio climático al funcionar como sumideros de carbono y al mitigar los impactos derivados de inundaciones y sequías (Armenteras et al., 2016).

Sin embargo, los ríos y quebradas enfrentan numerosas amenazas, como la contaminación, la extracción excesiva de agua, la degradación de hábitats y la construcción de infraestructuras. La evaluación de la calidad del agua y la implementación de medidas de conservación y uso sostenible son fundamentales para proteger estos valiosos ecosistemas y asegurar su vitalidad a largo plazo (Martínez, 2019).

4.2. Calidad del agua.

Este concepto abarca un conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan su aptitud para el consumo humano, el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y el desarrollo de actividades económicas (Villamizar, 2017). Evaluar la calidad del agua se convierte en una herramienta esencial para comprender su estado actual y para tomar medidas encaminadas a su preservación y uso sostenible (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2010).

La calidad del agua no solo impacta los ecosistemas y la economía local, sino que también tiene un efecto directo en la vida de las comunidades que dependen de este recurso hídrico. Asegurar que el agua de la quebrada Jurado cumpla con los estándares de calidad establecidos es una prioridad para garantizar la salud de las personas que la utilizan, ya sea para el consumo directo o para actividades como el riego de cultivos (Ramírez, 2022).

Para una evaluación de la calidad del agua, se consideran aspectos fundamentales entre los cuales se destacan los macroinvertebrados y las variables fisicoquímicas. Los macroinvertebrados, debido a su sensibilidad a las alteraciones ambientales, actúan como indicadores biológicos confiables, reflejando la salud del ecosistema acuático. Por otro lado, las variables fisicoquímicas, como el pH, la concentración de oxígeno disuelto y la presencia de nutrientes, proporcionan información crítica sobre la calidad del agua y su capacidad para sustentar la vida acuática. Comprender cómo estas variables se relacionan con la presencia de macroinvertebrados es fundamental para la evaluación integral de la calidad del agua en la quebrada Jurado (Banco Mundial, 2017).

4.2. Los macroinvertebrados acuáticos

Son organismos diminutos pueden medir entre 2 milímetros y 30 centímetros que habitan en cuerpos de agua dulce, desempeñan un papel vital en los ecosistemas acuáticos. Este diverso grupo comprende una amplia variedad de organismos, que incluyen insectos acuáticos, crustáceos, moluscos y gusanos, entre otros. A pesar de su reducido tamaño, su importancia radica en su excepcional sensibilidad a los cambios en la calidad del agua (González et al., 2015).

Estos organismos se utilizan como indicadores biológicos debido a sus características distintivas. En primer lugar, su ciclo de vida está intrínsecamente ligado al agua, ya que pasan la mayor parte o toda su vida en este medio. Como resultado, su presencia o ausencia en un entorno acuático proporciona información valiosa sobre la calidad y las condiciones del agua circundante. Además, los macroinvertebrados acuáticos exhiben diferentes niveles de tolerancia a la contaminación y a las variaciones en las condiciones ambientales. (Ramírez, 2022).

La evaluación de la diversidad, abundancia y composición de estos organismos permite una evaluación completa del estado de salud de los ecosistemas acuáticos. También proporciona la capacidad de detectar posibles impactos negativos, como la contaminación o la degradación del hábitat, que podrían afectar tanto a los macroinvertebrados como al ecosistema en su conjunto (Armenteras et al., 2016).

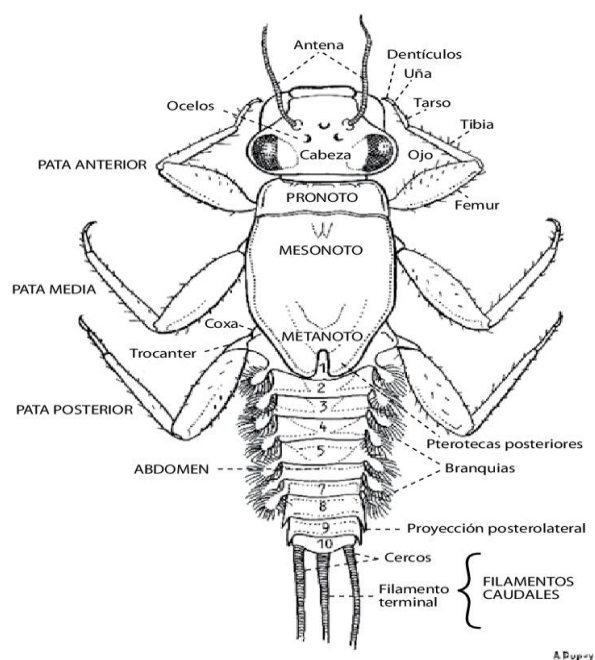
Entre los macroinvertebrados acuáticos utilizados como indicadores biológicos, destacan tres grupos principales:

4.3. Efímeras (Ephemeroptera)

Las efímeras son macroinvertebrados acuáticos caracterizados por su breve periodo de vida adulta, generalmente de unas pocas horas a unos pocos días, mientras que sus ninfas

acuáticas pueden vivir varios meses o incluso años. Su taxonomía se organiza en familias como Baetidae, Heptageniidae, y Ephemeridae (Zumbado, M., et, al 2020). Las ninfas presentan cuerpos alargados y a menudo planos como se puede observar en la ilustración 1, con branquias abdominales que les permiten obtener oxígeno disuelto en el agua. Su presencia indica aguas limpias y bien oxigenadas. Ecológicamente, estas ninfas son fundamentales en las redes tróficas acuáticas, siendo consumidas por peces y otros invertebrados acuáticos (Socha, 2020).

Ilustración 1. Morfología de las Ninfas de Efemerópteros.



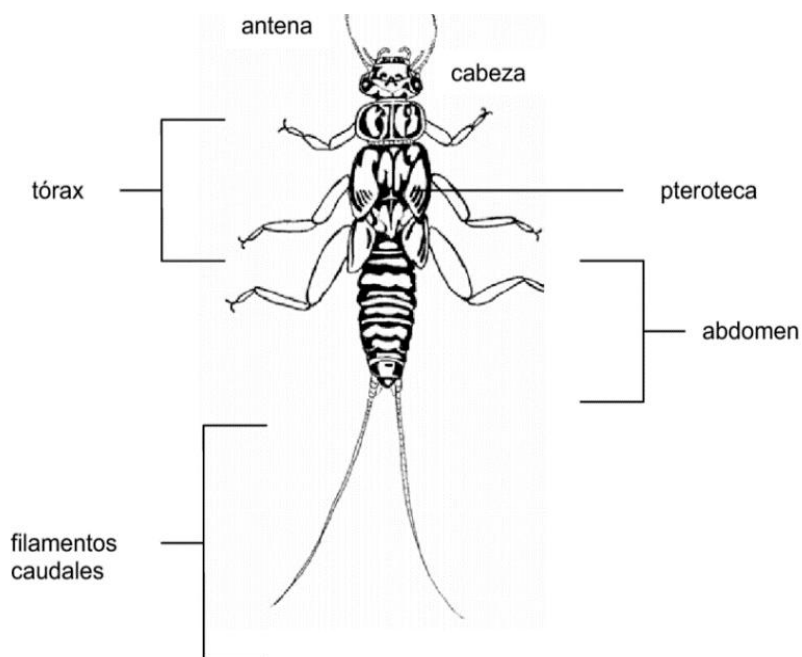
Fuente: Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos, (2006).

Nota: La Ilustración1 ofrece un vistazo conciso a la morfología de las ninfas de efemerópteros, destacando características clave. Estas ninfas, indicadores sensibles del entorno acuático, son cruciales para evaluar la calidad del hábitat.

4.4. Plecópteros (Plecoptera)

Los plec6pteros, tambi6n conocidos como "moscas de piedra", son macroinvertebrados con larvas bent6nicas, lo que nos indica que se desarrollan en el fondo de los cuerpos de agua. Taxon6micamente, se clasifican en familias como Perlidae, Gripopterygidae y Nemouridae (Guti6rrez, et al., 2010). Las larvas de plec6pteros poseen cuerpos robustos (ilustraci6n 2) y a menudo est6n adaptadas a ambientes con fuerte corriente. Son altamente sensibles a la disminuci6n del ox6geno y a la presencia de sustancias t6xicas en el agua. Su presencia o ausencia puede indicar la calidad del h6bitat acu6tico, siendo, por ejemplo, indicadores de aguas bien oxigenadas y de buena calidad (Guti6rrez, 2010).

Ilustraci6n 2. Vista general de una ninfa de Plec6ptera.



Fuente: Dom6nguez et al. (1992).

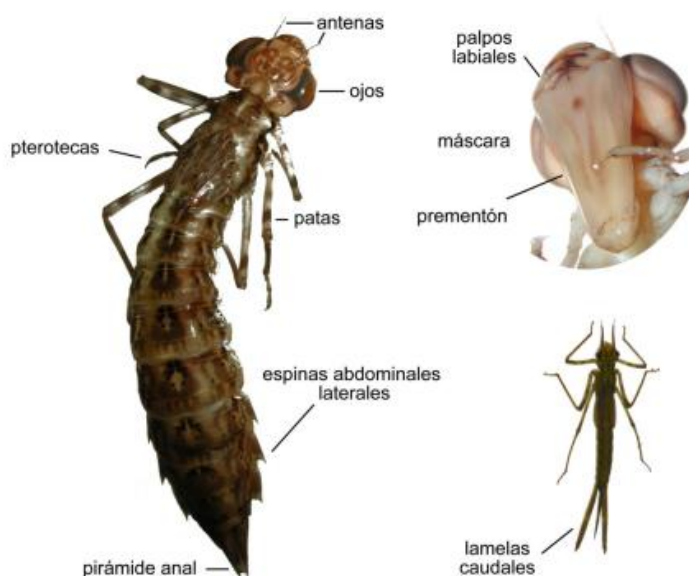
Nota: Se observa la anatomía distintiva de las ninfas de plec6pteros, revelando sus adaptaciones 6nicas para la vida acu6tica. Estas larvas, h6biles indicadores de la calidad del agua, nos ofrecen

valiosa información sobre la salud de los ecosistemas acuáticos. Su estudio meticuloso contribuye a la comprensión y preservación efectiva de estos entornos vitales.

4.5. Odonatos (Odonata)

Los odonatos (ilustración 3) comprenden libélulas y caballitos del diablo, y se dividen en subórdenes como Anisoptera y Zygoptera. Morfológicamente, los adultos tienen cuerpos alargados, dos pares de alas y grandes ojos compuestos. Las ninfas de odonatos son acuáticas y se desarrollan en cuerpos de agua. Prefieren aguas limpias y bien oxigenadas (Neiss, 2012). La diversidad de odonatos en un ecosistema acuático es un indicador claro de la calidad del agua circundante. Su taxonomía es compleja y abarca múltiples familias, como Aeshnidae y Libellulidae. Ecológicamente, los odonatos adultos son depredadores aéreos, controlando poblaciones de mosquitos y otros insectos, mientras que las ninfas son depredadoras acuáticas esenciales en la cadena alimentaria de estos ecosistemas (Rache, 2015).

Ilustración 3. Odonatos - Morfología de la Ninfa



Fuente: Torralba (2015).

Nota: La Ilustración 3 ofrece una visión de la morfología singular de las ninfas de odonatos, revelando sus rasgos distintivos en el ambiente acuático. Desde sus cuerpos alargados hasta sus adaptaciones para la caza, esta exploración visual ofrece una perspectiva detallada de la anatomía que caracteriza a estos macroinvertebrados acuáticos.

Además de su papel como indicadores biológicos, estos macroinvertebrados también desempeñan funciones vitales en los ecosistemas acuáticos, incluyendo su participación en redes tróficas y ciclos biogeoquímicos. Su preservación y conservación son esenciales para mantener la salud de los cuerpos de agua y garantizar la calidad del agua para las comunidades locales. Como se puede observar en la Ilustración 4 que muestra los diferentes grupos familiares de macroinvertebrados bentónicos (Rodríguez et al., 2021).

Ilustración 4. Macroinvertebrados bentónicos



Fuente: Attalea, (2022).

Nota: La identificación y clasificación precisa de los principales grupos taxonómicos de macroinvertebrados son esenciales para una evaluación exhaustiva de los ambientes acuáticos. Este proceso contribuye significativamente a la comprensión de la salud y la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos.

4.6. Pruebas fisicoquímicas.

Las pruebas fisicoquímicas complementan la evaluación de la calidad del agua al proporcionar información sobre parámetros físicos y químicos clave. Estos incluyen algunos como:

4.6.1. Nitratos.

La presencia de nitratos, originada principalmente por la contaminación proveniente de fertilizantes, estiércol y desechos líquidos, representa un indicador significativo de la actividad humana en el entorno. La concentración elevada de nitratos en el agua puede ser perjudicial para la salud humana, destacando riesgos particulares para mujeres embarazadas y bebés (Greenpeace, 2022). Estudios sugieren que estas altas concentraciones están asociadas con un aumento en el riesgo de abortos espontáneos y ciertos defectos de nacimiento. La monitorización precisa de los niveles de nitratos nos brindará información clave sobre la contaminación por fuentes agrícolas y permitirá tomar medidas adecuadas para mitigar los posibles impactos negativos en la salud pública y el ecosistema acuático (Generalitat de les Illes Balears, 2024).

4.6.2. pH (Potencial de Hidrógeno).

La evaluación del pH, que indica la acidez o alcalinidad del agua, se posiciona como una dimensión crítica en nuestro estudio. Este parámetro no solo refleja las características químicas del agua, sino que también desempeña un papel fundamental en la salud y sostenibilidad del ecosistema acuático (Ambientalys, 2022). La escala de pH, que va de 0 a 14, permite categorizar el agua como ácida, neutra o alcalina, influyendo directamente en la disponibilidad de nutrientes y en la capacidad de los organismos acuáticos para llevar a cabo procesos biológicos esenciales (Healthline, 2024).

4.6.3. DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) mide la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos descomponen la materia orgánica en el agua. Este parámetro, vinculado estrechamente a la contaminación orgánica, sirve como una herramienta esencial para evaluar el impacto potencial en los ecosistemas acuáticos. (Osejos et al., 2004). Por otro lado, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) va más allá al incluir la oxidación de compuestos inorgánicos, brindando una perspectiva más completa de la carga contaminante del agua (Air Liquide, 2023).

Ambos indicadores son fundamentales para comprender la salud general del ecosistema acuático. Altos niveles de DBO pueden agotar el oxígeno en el agua, afectando negativamente la vida acuática, mientras que la DQO proporciona una evaluación más holística al considerar tanto la materia orgánica como los compuestos inorgánicos. Estos parámetros no solo destacan la presencia de contaminantes, sino que también indican el nivel de impacto que estos pueden tener en el medio ambiente acuático (Nihonkasetu, 2017).

El análisis de estos parámetros permite identificar la presencia de sustancias tóxicas, evaluar el grado de contaminación y comparar los resultados con los estándares establecidos para determinar si el agua cumple con los requisitos de calidad establecidos para su uso (Aguas Urbanas, 2018). La importancia de garantizar la calidad del agua radica en su valor intrínseco como recurso vital para los seres vivos y en su papel fundamental en el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos. Además de ser necesaria para el consumo humano, el agua es crucial para la agricultura, la industria, la generación de energía y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos. La disponibilidad de agua de calidad adecuada es esencial para el desarrollo sostenible de las comunidades y la preservación de la biodiversidad (Aquanova, 2020).

4.7. Factores que afectan la calidad del agua.

Existen diversos factores que pueden afectar la calidad del agua en la quebrada Jurado, Pamplona, Norte de Santander, Colombia, y algunos de ellos son resultado de actividades humanas. La contaminación del agua por parte de los hogares y la ganadería en la zona es una preocupación importante (FAO, 2021). Los hogares pueden contribuir a la contaminación del agua mediante el vertido de aguas residuales no tratadas o el uso de productos químicos domésticos que terminan en los cuerpos de agua (Garzón et al., 2012). Por otro lado, la ganadería puede aportar contaminantes como el estiércol y los fertilizantes utilizados en los campos, que pueden infiltrarse en el suelo y llegar a la quebrada a través de la escorrentía (Ladrera, 2012).

Estos contaminantes provienen de los hogares y la ganadería pueden tener un impacto negativo en la calidad del agua y en la vida acuática. Pueden provocar la proliferación de algas y plantas acuáticas, disminuir los niveles de oxígeno disuelto y alterar el equilibrio químico del agua, lo que afecta la salud de los organismos acuáticos. Además, los macroinvertebrados acuáticos, como los mencionados anteriormente, pueden ser especialmente sensibles a la contaminación y actuar como indicadores de la calidad del agua en relación con la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Lone, 2016).

La calidad del agua es un tema de vital importancia que requiere atención y acción inmediata. La conservación de la calidad del agua implica la protección de los ecosistemas acuáticos y la implementación de prácticas responsables en el uso del agua. Esto implica minimizar la contaminación por actividades humanas, como la agricultura y los hogares, así como la adopción de tecnologías y prácticas de tratamiento de aguas residuales (Rodríguez, 2022).

Además, la promoción del uso responsable del agua es esencial para asegurar su disponibilidad a largo plazo. Esto implica fomentar la conciencia sobre el valor del agua y promover su uso eficiente en todos los sectores, desde los hogares hasta la agricultura y la industria. El uso responsable del agua implica implementar medidas para reducir el desperdicio, promover la reutilización y adoptar prácticas de conservación del agua (Bizkaia, 2023).

4.8. Relación de los factores fisicoquímicos del agua con los factores bióticos.

Los factores fisicoquímicos del agua, como la profundidad, pH, alcalinidad, dureza, presencia de iones de calcio, composición de los sedimentos, cantidad de materia orgánica y contaminantes, ejercen una influencia significativa en la diversidad y abundancia de la macrofauna acuática, específicamente en los macroinvertebrados bentónicos. Estos factores están ligados al ambiente acuático y tienen la capacidad de modelar la composición y estructura de las comunidades de macroinvertebrados presentes (Longo, 2010).

Sin embargo, es importante destacar que la relación entre los factores fisicoquímicos y la biodiversidad acuática es bidireccional y compleja. Por un lado, las condiciones fisicoquímicas óptimas pueden fomentar la presencia de una variedad de macroinvertebrados bentónicos, cada uno adaptado a nichos específicos (González et al., 2020). Por otro lado, ciertos macroinvertebrados pueden desempeñar un papel activo en la modificación de los parámetros fisicoquímicos del agua a través de su actividad de filtración y degradación de materia orgánica (Sánchez, 2019).

La diversidad biológica en los ecosistemas acuáticos es de importancia crítica. Cada especie de macroinvertebrados bentónicos tiene su propio papel en la cadena alimentaria y en la dinámica del ecosistema. La presencia de una amplia variedad de Familias asegura la resiliencia y la estabilidad de estos sistemas acuáticos, permitiendo adaptarse a cambios ambientales y

perturbaciones naturales. Además, los macroinvertebrados bentónicos son una fuente vital de alimento para peces y aves acuáticas, lo que contribuye aún más a la biodiversidad del ecosistema acuático (Chaux,2019).

Más allá de los factores físico químicos, la calidad del agua también se ve afectada por diversos aspectos relacionados con su conservación y uso responsable. El adecuado manejo de los recursos hídricos, que incluye la protección de fuentes de agua, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la gestión adecuada de los desechos, desempeñan un papel fundamental en la preservación de la calidad del agua y, por ende, en la protección de los ecosistemas acuáticos (Batlle et al., 2001).

4.9. Análisis estadístico para la evaluación de la calidad del agua.

La integración de técnicas estadísticas en el análisis de la relación entre los factores fisicoquímicos del agua y los macroinvertebrados bentónicos ofrece una comprensión más profunda de los ecosistemas acuáticos desde una perspectiva biológica (Braga, 2000). Estas técnicas permiten analizar procesos biológicos complejos y revelar conexiones significativas entre variables ambientales y la salud de los ecosistemas, como se evidencia en el estudio de Garcés y Pacheco (2020), donde se correlacionaron variables fisicoquímicas y la presencia de macroinvertebrados en el río Caney, mostrando la influencia directa de estas variables en la calidad del agua y la biodiversidad de los invertebrados bentónicos.

Por otro lado, estas estadísticas son importantes en el contexto de su capacidad para manejar y analizar grandes volúmenes de datos de manera eficiente. Esto es crucial, ya que los estudios de calidad del agua suelen implicar la recolección de datos complejos y multidimensionales que requieren un análisis detallado y riguroso (Comisión Nacional del Agua, 2019).

Además, las técnicas estadísticas proporcionan herramientas para evaluar la significancia de las diferencias observadas en los datos, lo que permite determinar si las variaciones en los factores fisicoquímicos del agua tienen un impacto significativo en la diversidad y abundancia de los macroinvertebrados bentónicos. Esta información es esencial para comprender cómo las actividades humanas y los cambios ambientales afectan a los ecosistemas acuáticos y para identificar posibles medidas de conservación y gestión (Figueroa, et al., 2003).

4.9.1. Curva de completitud.

La elaboración de una Curva de Completitud se presenta como un componente esencial en la evaluación de la representatividad de las muestras recopiladas en el estudio de calidad del agua, para evaluar esta representatividad de las muestras recopiladas en la investigación de calidad del agua mediante macroinvertebrados y pruebas fisicoquímicas. Esta curva permitirá determinar si la cantidad de muestras obtenidas es significativa para reflejar adecuadamente la diversidad de la población de macroinvertebrados y los parámetros fisicoquímicos en estudio (Suárez, 2017).

La curva de completitud ayuda a responder preguntas críticas, como si se ha muestreado lo suficiente para capturar la totalidad de la variabilidad presente en el ecosistema acuático. Para su medición, se utiliza la riqueza de Familias acumulativa en función del número de muestras. A medida que se añaden más muestras, la curva se estabiliza, indicando que se ha alcanzado un nivel óptimo de representatividad. Este análisis proporciona una visión clara de la exhaustividad del muestreo y su capacidad para capturar la diversidad biológica y las condiciones fisicoquímicas del agua (Hortal, 2003).

4.9.2. Evaluación de la Diversidad de Macroinvertebrados.

La evaluación de la diversidad en ecosistemas acuáticos es fundamental para comprender la salud y el funcionamiento de estos sistemas. La diversidad de macroinvertebrados bentónicos, organismos que habitan en el fondo de los cuerpos de agua, se utiliza como un indicador clave debido a su sensibilidad a los cambios ambientales y su papel en las redes tróficas acuáticas (Lasso, C., & Rodríguez, M., 2015). El estudio de la diversidad de estos organismos permite inferir la calidad del agua y la integridad ecológica de los ecosistemas. Se utilizan los números de Hill para la estimación de los índices de diversidad alfa y beta. La diversidad alfa (H') se calcula utilizando el índice de Shannon-Wiener, que considera tanto la abundancia como la equidad de las Familias presentes en cada estación (IAvH., 2019). Este índice se expresa mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1 Ecuación Shannon-Wiener.

$$H' = -\sum (p_i \cdot \ln p_i)$$

Donde H' es el índice de Shannon, p_i es la proporción de individuos de la especie i en relación al total de individuos muestreados. Para calcular p_i , se utiliza la fórmula:

Ecuación 2. Proporción de Individuos.

$$p_i = N_i / N$$

Donde N_i es el número de individuos de la especie i y N es el número total de individuos en la muestra. Un valor más alto de H' indica una mayor diversidad, lo que sugiere una distribución más equitativa de las Familias y una mayor riqueza de Familias en el área muestreada (Jiménez-Valverde, A., & Hortal, J. 2003). Este índice es particularmente útil para evaluar la salud del ecosistema, ya que una disminución en la diversidad puede ser un indicativo de alteraciones ambientales o contaminación. Por otro lado, se utiliza el índice de Bray-Curtis para evaluar la diversidad beta, lo que permite capturar tanto la variabilidad espacial como la

temporal en la composición de la comunidad de macroinvertebrados a lo largo de su hábitat (Magurran, A. E., & McGill, B. J., 2011). Mide la similitud entre comunidades al considerar las abundancias de las Familias presentes en cada muestra y se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 3. índice de disimilitud de Bray-Curtis.

$$BC = \sum (x_i + y_i) / \sum |x_i - y_i|$$

Donde x_i y y_i son las abundancias de la especie i en las dos comunidades que se están comparando. El valor de BC oscila entre 0 y 1, donde 0 indica que no hay similitud entre las comunidades y 1 indica que son idénticas. Este índice es esencial para entender cómo varían las comunidades de macroinvertebrados en diferentes estaciones y momentos, lo que proporciona información sobre la dinámica ecológica y los posibles efectos de factores ambientales o antropogénicos (Magurran, 2004).

4.9.3. índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT).

Es una medida utilizada en la evaluación de la calidad del agua, especialmente en el contexto de la monitorización biológica de ecosistemas acuáticos. Este índice se calcula mediante la asignación de puntuaciones de sensibilidad a diferentes taxones de macroinvertebrados según su respuesta a la contaminación ambiental (Wilson et al., 2024). Estas puntuaciones se ponderan y se promedian para obtener un valor representativo de la calidad del agua en función de la composición de la comunidad de macroinvertebrados presente en una muestra determinada.

El ASPT se basa en la premisa de que la presencia o ausencia de ciertas Familias indica el estado de contaminación del ecosistema acuático, proporcionando así una medida cuantitativa de la salud del mismo. Este índice se utiliza ampliamente en estudios de monitoreo ambiental y gestión de recursos hídricos para evaluar el impacto de las actividades humanas en los

ecosistemas acuáticos y para guiar estrategias de conservación y restauración (Rodríguez, et al, 2014).

Los valores ASPT se encuentran en un rango entre 0 y 10 como podemos observar en la Tabla 1 y expresan el promedio de indicación de calidad del agua que tienen las familias de macroinvertebrados encontradas. Los valores del BMWP y el ASPT se correlacionan con cinco grados de contaminación y con cinco colores que los representan en la cartografía de calidad de las aguas (Álvarez et al., 2006).

Tabla 1. Clasificación de Aguas según ASPT.

Clase	Calidad	Valor del BMWP	Valor del ASPT	Significado	Color
I	Buena	> 150	> 9-10	Aguas muy limpias	Azul
		101-120	8-9	Aguas no contaminadas	
II	Aceptable	61-100	> 6,5-8	Ligeramente contaminadas: se evidencian efectos de contaminación	Verde
III	Dudosa	36-60	> 4,5-6,5	Aguas moderadamente contaminadas	Amarillo
IV	Crítica	16-35	> 3-4,5	Aguas muy contaminadas	Naranja
V	Muy crítica	< 15	1-3	Aguas fuertemente contaminadas, situación crítica	Rojo

Fuente: Álvarez et al., (2006).

Nota. Las puntuaciones del Índice ASPT y sus rangos correspondientes, mostrando la calidad del agua en función de la diversidad de macroinvertebrados. Los valores se correlacionan con cinco niveles de contaminación, representados con colores para una fácil interpretación.

El ASPT se complementa con el índice BMWP/Col al proporcionar una evaluación adicional de la calidad del agua. Mientras que el BMWP/Col se centra en la sensibilidad de las Familias a la contaminación orgánica, el ASPT amplía esta evaluación al considerar la puntuación promedio por taxón, lo que puede revelar cambios más sutiles en la calidad del agua y en la comunidad biológica (Arango, 2008). En conjunto, el uso combinado de ambos índices

proporciona una evaluación más completa y robusta de la salud del ecosistema acuático, lo que permite una mejor toma de decisiones en la gestión y conservación de los recursos hídricos (Galindo et al., 2012).

4.9.4. El índice BMWP para Colombia (BMWP / COL):

El método BMWP/Col (Biological Monitoring Working Party para Colombia) es una herramienta ampliamente reconocida y utilizada en la evaluación de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos colombianos. Este enfoque se basa en la observación y el análisis de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos presentes en un cuerpo de agua específico. Los macroinvertebrados bentónicos son especialmente adecuados como bioindicadores debido a su estrecha relación con el medio acuático y su respuesta a las condiciones ambientales (Roldán, 2016).

El índice funciona asignando puntajes a diferentes familias de macroinvertebrados según su tolerancia a la contaminación orgánica. En este sistema de puntuación, las familias de macroinvertebrados más sensibles a la contaminación reciben puntajes más altos, mientras que las familias más tolerantes obtienen puntajes más bajos. Estos puntajes varían en un rango de 1 a 10, lo que permite una clasificación detallada de las comunidades de macroinvertebrados en función de su salud y la calidad del agua en la que habitan (Cevallos et al., 2018). En la ilustración 5 se presentan los valores de las familias de macroinvertebrados en términos de su tolerancia, proporcionando ejemplos específicos que ilustran la aplicación del método BMWP/Col en la evaluación de la calidad del agua.

El puntaje total BMWP se calcula sumando los puntajes asignados a todas las familias de macroinvertebrados encontradas en un sitio de muestreo específico. El promedio por taxón, conocido como ASPT (Average Score per Taxon o Puntaje Promedio por Taxón), se utiliza para

evaluar la calidad del agua en ese sitio en particular. Valores bajos de ASPT y puntajes bajos de BMWP indican condiciones graves de contaminación, mientras que valores más altos sugieren un ambiente acuático más saludable (Roldán et al., 2016).

Ilustración 5. Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP / Col

Familias	Puntaje
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hydridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydraenidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Polymitarcyidae, Xiphocentronidae.	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelphusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohiphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.	7
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Halipidae, Empididae, Dolichopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydrometridae, Noteridae.	4
Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae.	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae, Syrphidae	2
Tubificidae	1

Fuente: Pérez, (2003).

Nota: Esta tabla sirve como referencia clave para comprender cómo el índice asigna puntajes a diferentes familias, permitiendo una clasificación detallada de las comunidades de macroinvertebrados y, en última instancia, la evaluación de la calidad del agua en diversos entornos acuáticos colombianos.

Es fundamental destacar que el método BMWP/Col se ha aplicado en numerosos estudios en Colombia y ha sido adoptado como una herramienta inicial para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos del país. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los valores de referencia específicos pueden variar según la región y el tipo de cuerpo de agua en estudio. Los investigadores y expertos locales suelen establecer umbrales de calidad del agua basados en las

características específicas de cada área, lo que permite una evaluación más precisa y contextualizada (Sánchez et al., 2021).

La ilustración 5 detalla los valores de tolerancia de las familias de macroinvertebrados según el método BMWP/Col, ofreciendo una guía esencial para la evaluación de la calidad del agua. Posteriormente, con la aplicación de esta tabla en el cálculo del índice por familia en cada estación de muestreo, se generan los valores y colores que se presentan en la Tabla 2. Esta última tabla proporciona un resumen visual y numérico de la salud de los ecosistemas acuáticos en diversas estaciones, estableciendo correlatos claros entre los puntajes asignados, la tolerancia de las familias y la calidad general del agua en cada ubicación muestreada (García, 2018).

Tabla 2. Clases y calidad de agua mediante el BMWP/COL.

Clase	Calidad	Valor del BMWP	Significado	Color
I	Buena	>101	Aguas muy limpias, no contaminadas ni alteradas de modo apreciable	Celeste
II	Aceptable	61-100	Contaminada	Verde
II	Dudosa	36-60	Aguas claramente contaminadas	Amarillo
IV	Critica	16-35	Agua muy contaminada	Naranja
V	Muy critica	< 15	Agua fuertemente contaminada	Rojo

Fuente: Fernández Deimar. (2014).

Nota: Los colores asignados reflejan el estado del cuerpo de agua en cada estación de muestreo según el Índice BMWP/Col, proporcionando una representación visual clara de la calidad ambiental en diferentes ubicaciones.

4.9.5. Índice Biótico de Familias (IBF).

El Índice Biótico de Familias (IBF) es una herramienta utilizada en estudios de calidad del agua que combina aspectos biológicos y estadísticos para evaluar la salud de los ecosistemas

acuáticos. Desde una perspectiva biológica, el IBF se basa en la diversidad y abundancia de familias de macroinvertebrados acuáticos presentes en un cuerpo de agua (Figueroa et al., 2003).

Estos organismos son excelentes indicadores biológicos, ya que su presencia y composición reflejan las condiciones ambientales del hábitat acuático, incluyendo la calidad del agua y la presencia de contaminantes (Roldán-Pérez, 2018).

Desde el punto de vista estadístico, el IBF es una medida cuantitativa que permite asignar valores numéricos a la composición de las comunidades de macroinvertebrados. Estos valores se utilizan para calcular un índice que indica la calidad del agua en función de la sensibilidad de las Familias de macroinvertebrados a la contaminación (Cárdenas-Castro et al., 2018, p. 590). Cuanto mayor sea el IBF como podemos observar en la tabla 3, mejor será la calidad del agua, ya que implica la presencia de Familias sensibles y una diversidad biológica adecuada en el ecosistema acuático (González & Pérez, 2018).

Tabla 3. Estimación del Índice Biótico de Familia.

IBF	Calidad de gua	Grado de contaminación
0.00-3.75	Excelente	Agua limpia, contaminada orgánica baja probable
3.76-4.25	Muy buena	Con leve contaminación orgánica
4.26-5.00	Buena	Con algo de contaminación orgánica
5.01-5.75	Regular	Contaminación orgánica presente
5.76-6.50	Malsana	Alta contaminación orgánica
6.51-7.25	Nociva	Fuerte contaminación orgánica
7.26-10.000	Muy nociva	Contaminación orgánica severa

Fuente: Cevallos et al., (2018).

Nota: Esta tabla permite determinar el grado de contaminación orgánica de un cuerpo de agua en base a la composición de las comunidades de macroinvertebrados presentes.

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Evaluar la calidad del agua mediante el uso de macroinvertebrados acuáticos y pruebas fisicoquímicas en la quebrada Jurado - Pamplona, Norte de Santander - Colombia.

5.2. Objetivos Específicos

- Estimar la diversidad de familias de macroinvertebrados acuáticos presentes en la quebrada Jurado, Pamplona-Colombia.
- Inferir las propiedades fisicoquímicas del agua de la quebrada Jurado en Pamplona-Colombia.
- Relacionar los macroinvertebrados con parámetros fisicoquímicos en la quebrada Jurado, Pamplona-Colombia.

6. Metodología.

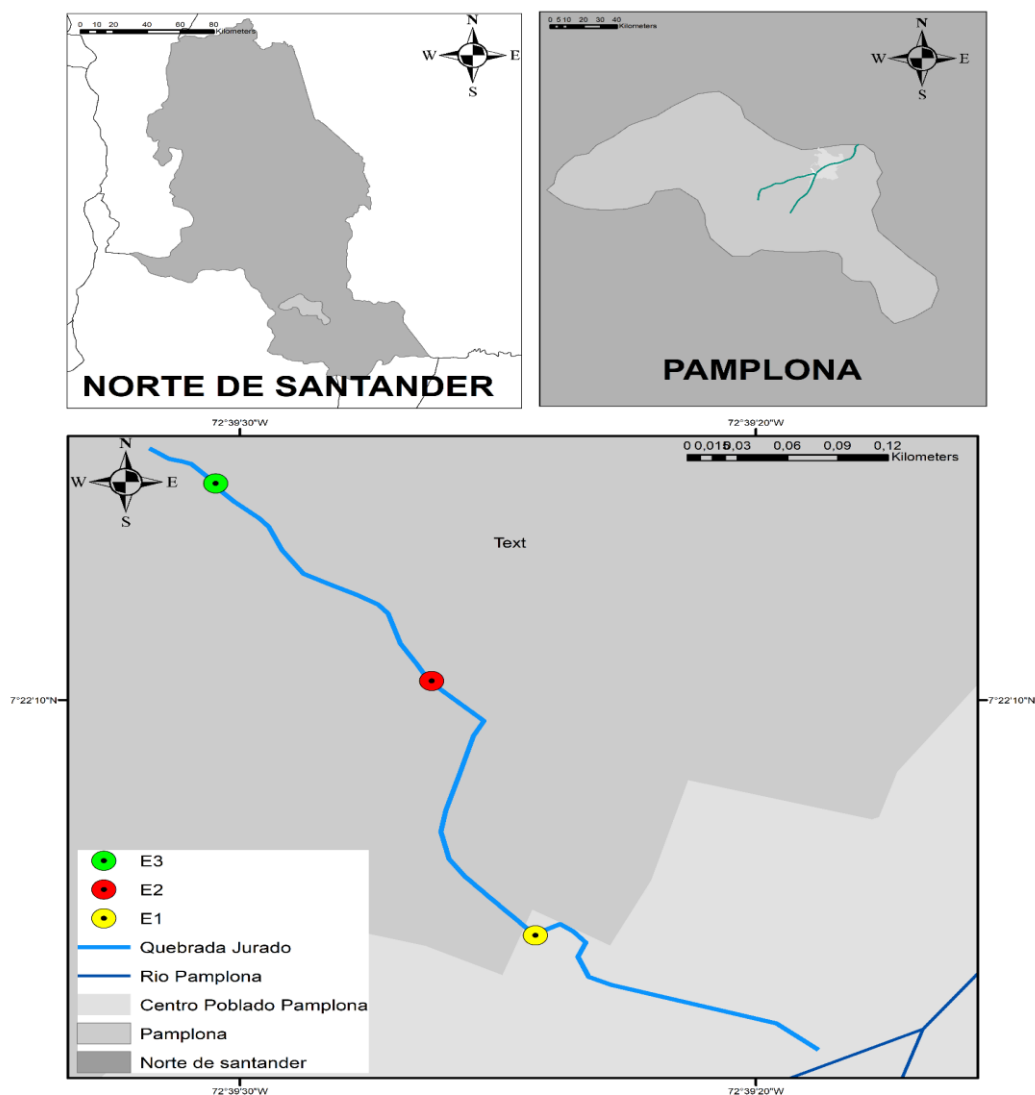
6.1. Área de estudio.

La quebrada Jurado es un brazo del río Pamplonita que se encuentra en el departamento de Norte de Santander, en la región Andina de Colombia. La zona de estudio se ubica en la cuenca hidrográfica del río Pamplonita, abarcando desde el nacimiento del río Jurado hasta su desembocadura en el río Pamplonita como se observa en la Ilustración 7. Se extiende aproximadamente 1.78 km² de extensión (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Esta zona se encuentra a una altitud que varía entre los 2.586 m.s.n.m y tiene un clima templado con temperaturas que oscilan entre los 14 y 16°C. La topografía de la zona de estudio es principalmente montañosa, con algunas zonas planas a lo largo de la quebrada Jurado. El tipo de suelo predominante en la zona de estudio es arcilloso, aunque también pueden encontrarse suelos arenosos y rocosos (CORPONOR, 2010).

La cobertura vegetal en la zona cercana a la Quebrada Jurado está compuesta principalmente por bosques de montaña, que son esenciales para la conservación de la biodiversidad y la regulación del ciclo hídrico (Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo, 2021). Estos bosques albergan una variedad de Familias de flora y fauna adaptadas a las condiciones montañosas y húmedas. Sin embargo, también se encuentran áreas dedicadas a cultivos agrícolas, lo que ha llevado a la fragmentación de estos ecosistemas (Centro Universitario de la Costa, 2015). Las características del área incluyen un relieve montañoso que favorece el drenaje de aguas pluviales hacia la quebrada, así como un sistema hídrico que se ve afectado por la contaminación proveniente de vertimientos de aguas residuales y escorrentía agrícola (Rodríguez et al., 2021).

Ilustración 6. Ubicación geográfica de la Quebrada Jurado.



Fuente: Solano E. (2024)

Nota: La Quebrada Jurado se encuentra en el municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia, y es un recurso hídrico vital que atraviesa un ecosistema diverso. A lo largo de la quebrada, se ubican las estaciones de monitoreo en el siguiente orden: Amarillo (Estación 1), La Roja (Estación 2) y La Verde (Estación 3).

6.2. Fase de campo

En la fase de campo de este estudio, los muestreos se llevaron a cabo en dos periodos: del 20 al 23 de marzo y del 2 al 4 de abril de 2024.

6.2.1. Selección de Puntos de Muestreo

Para garantizar una evaluación de la calidad del agua en la Quebrada del Río Jurado, se seleccionaron tres sitios de muestreo. Cada una de estas estaciones ha sido elegida para representar diversas condiciones ambientales y niveles de exposición a posibles fuentes de contaminación. La ubicación de cada estación se ha planificado con el fin de obtener una mejor evaluación de la diversidad y calidad del entorno acuático a lo largo de la quebrada (Ilustración 5) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

La primera estación (Ilustración 7) de muestreo se localiza aguas abajo en una zona urbana cercana a una vivienda, con énfasis en la presencia de actividades humanas y posibles fuentes de contaminación. Las coordenadas geográficas de esta estación son 07°22'04.30"N, 72°39'24.27"W. (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2021).

Ilustración 7. Estación de Muestreo 1: Agua Abajo de las Viviendas en la Quebrada.



Fuente: Solano E. (2024)

Nota: La imagen muestra la primera estación de monitoreo, situada aguas abajo de las áreas residenciales. Se observa una densa cobertura de vegetación ribereña, que juega un papel crucial en la filtración natural y la estabilización de las riberas.

La segunda estación de muestreo está ubicada aguas abajo, en las cercanías de otro hogar y un taller de carpintería (Ilustración 8). Las coordenadas geográficas de esta estación son 07°22'10.58"N, 70°39'26.09W. Esta ubicación proporcionará información adicional sobre las condiciones específicas de este entorno, permitiendo una comparación entre diferentes áreas urbanas y sus efectos potenciales en la calidad del agua (Corporación Autónoma Regional, 2020).

Ilustración 8. Segunda Estación de Monitoreo Aguas Abajo del Taller de carpintería.



Fuente: Solano E. (2024).

Nota: En esta zona, se observa una disminución significativa de la vegetación ribereña en comparación con la primera estación. La menor cobertura vegetal podría afectar la capacidad de filtración natural y la estabilidad de las riberas, así como incrementar la susceptibilidad a aportes de contaminantes provenientes de la actividad carpintera.

Finalmente, la tercera estación se posiciona aguas arriba, alejada de los hogares. Las coordenadas geográficas de esta estación son 07°22'15.25"N, 70°39'30.47"W.

Ilustración 9. Tercera Estación de Monitoreo Aguas Arriba.



Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Esta estación de monitoreo, ubicada aguas arriba en un entorno natural y alejado de los hogares. Funciona como referencia para comparar la calidad del agua en áreas urbanas, proporcionando un punto de control menos afectado por la actividad humana.

6.3. Recolección de muestras de agua.

Antes de iniciar el muestreo de macroinvertebrados en la Quebrada del Río Jurado, Pamplona, Norte de Santander, se llevó a cabo una recolección de muestras de agua. Este proceso se realizó mediante el uso de botellas estériles, sumergiéndose de 10 a 30 cm de profundidad. (Ilustración 10) para evitar cualquier contaminación por aire durante la toma. Simultáneamente, se registró in situ un conjunto multiparamétrico, calculado con el medidor multifuncional agua10, el cual mide parámetros incluyendo pH, temperatura y concentración de oxígeno disuelto (Higiene Ambiental, 2020).

Ilustración 10. Muestreo de Agua.



Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Las muestras recolectadas, debidamente etiquetadas fueron manejadas durante su transporte al laboratorio de Control y Calidad de la Universidad de Pamplona. Para preservar la

integridad de las muestras y asegurar condiciones óptimas, utilizando cajas de icopor.

6.4. Muestreo de macroinvertebrados.

Una vez completada la recolección de muestras de agua en la Quebrada del Río Jurado, se procedió al muestreo de macroinvertebrados, organismos sensibles a las condiciones ambientales y valiosos como indicadores biológicos de la calidad del agua. Para ello, se utilizó una red Surber de malla fina con una base rectangular que se fijó al sustrato y se arrastró por todo el lecho acuático durante un período de 10 minutos (Ilustración 11C), removiendo el sustrato y limpiando con un cepillo de dientes piedras a las cuales estos suelen adherirse (Roldán, 2010). Esta red, con poros de tamaño de 0.5 mm para la captura efectiva de macroinvertebrados, permitió obtener una muestra representativa de la diversidad de estos organismos (Ríos, 2021). Posteriormente, se realizó una cuidadosa extracción de la red del agua para evitar pérdidas de especímenes y se procedió a la preservación en campo de las muestras recolectadas (CORTOLIMA, 2004).

Se utilizó solución pamper (Ilustración 11B) que se encuentra compuesta por 560 ml de alcohol etílico, 300 ml de agua destilada, 129 ml de formol y 20 ml de ácido acético, con el objetivo de preservar los macroinvertebrados recolectados (Darrigran et al., 2010). El alcohol etílico contribuye a la deshidratación de las muestras, mientras que el formol actúa como agente conservante para prevenir la descomposición de los especímenes. El ácido acético, a su vez, ajusta el pH de la solución, creando condiciones óptimas que aseguran la estabilidad estructural de los especímenes durante el proceso de transporte y almacenamiento (Osejos et al., 2020).

La proporción de 3:1 para adicionar la solución pamper al sustrato fue seleccionada para la preservación de los macroinvertebrados recolectados. Esta relación implica agregar tres partes

de solución por cada parte de sustrato, basada en la necesidad de lograr una cobertura completa y efectiva de los organismos en el medio preservativo (Ministerio de Ambiente y Energía, 2021).

Ilustración 11. Recolección de Macroinvertebrados acuáticos usando la Red Surber).



Fuente: Solano E. (2024).

Nota: La recolección de macroinvertebrados es esencial para evaluar la calidad del agua y la biodiversidad acuática. El uso de soluciones fijadoras, como el formaldehído o el etanol, es crucial para preservar las muestras y mantener su integridad morfológica. Esto permite un análisis más preciso y confiable.

6.5. Análisis de muestras de agua.

Se llevaron a cabo pruebas fisicoquímicas en el Laboratorio de Control y Calidad de la Universidad de Pamplona, abordando una variedad de parámetros para obtener una comprensión completa de las condiciones del agua.

Se analizaron los siguientes parámetros el oxígeno disuelto (OD), la turbidez, el pH, la temperatura, los nitratos, los cloruros, el color, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos totales y la presencia de coliformes totales. Estas pruebas proporcionarán información sobre la composición química del agua para sustentar la vida acuática (Rosenberg & Håkanson, 2006).

Los métodos utilizados fueron: Yodometría WINKLER para el oxígeno disuelto, método potenciométrico para el pH, colorimetría para el color, nefelometría para la turbidez, método Kjeldahl para los nitritos, secado a 103-105°C para los sólidos totales, método Gravimétrico para los cloruros, método fotométrico para el potasio, reflujo cerrado por colorimetría para la DQO y método de incubación en oscuridad para la DBO5 (Chacón, 2016).

Es crucial destacar que estas pruebas se realizaron el mismo día de la recolección de las muestras para evitar alteraciones en las propiedades del agua y garantizar la representatividad de los resultados obtenidos. El proceso de laboratorio se llevó a cabo siguiendo normas y protocolos reconocidos, asegurando la confiabilidad de los datos (Tamaris, 2018).

6.7. Separación e identificación de macroinvertebrados.

La separación e identificación de los macroinvertebrados se realizó utilizando un estereoscopio binocular (Zeiss Stemi DV4) como se observa en la ilustración 12. La técnica de tamizado por estaciones involucró el uso de bandejas para colocar el sustrato, mientras que las pinzas entomológicas se emplearon para la búsqueda y recolección de los macroinvertebrados (Studocu, 2023).

Ilustración 12. Separación de macroinvertebrados en laboratorio.



Fuente: Solano E. (2024)

Nota: Proceso de extracción de macroinvertebrados del sustrato. Este procedimiento es fundamental para su preservación y análisis, permitiendo evaluar la biodiversidad en la Quebrada del Río Jurado.

Los individuos encontrados se guardaron y rotularon en frascos con solución pamper para preservar sus estructuras anatómicas (Jiménez, 2015). La identificación taxonómica se llevó a cabo a nivel de familia, apoyándose en guías especializadas como las de Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia de Roldán (2019) y Guía de macroinvertebrados bentónicos de la provincia de Orellana, Ecuador Salazar (2016).

6.8. Fase analítica

6.8.1. Curva de completitud:

La curva de acumulación de Familias se elaboró con el programa Inext, lo que permitió analizar de manera efectiva la relación entre el esfuerzo de muestreo y el número acumulado de Familias de macroinvertebrados encontrados en la Quebrada Jurado (Jiménez & Hortal, 2003). Este tipo de análisis es esencial para evaluar la completitud del inventario de Familias, ya que ilustra cómo la diversidad biológica tiende a aumentar a medida que se incrementa el número de muestras recolectadas (DANE, 2007). La curva ofrece información valiosa sobre el proceso de muestreo, permitiendo identificar el punto de saturación, en el cual se ha registrado la mayoría de las Familias presentes en el área de estudio (SiB Colombia, 2021). De esta manera, se puede concluir si el muestreo ha sido suficiente para capturar la diversidad de la comunidad de macroinvertebrados en la quebrada (López & García, 2018).

6.8.2. Análisis de diversidad:

Para evaluar la diversidad de macroinvertebrados en las estaciones de la quebrada Jurado, se emplearon los números de Hill, centrándose en el índice de Shannon-Wiener para la diversidad alfa (0D). Este índice no solo mide la cantidad de Familias presentes, sino que también considera cómo se distribuyen las abundancias entre ellas (Magurran, 2004). La diversidad de orden 0 (0D) se refiere a la riqueza total de Familias, es decir, simplemente cuenta cuántas Familias diferentes están presentes en una comunidad (Jost, 2006). Por otro lado, la diversidad de orden 1 (1D) toma en cuenta la equidad de las abundancias, enfatizando cómo se distribuyen las Familias en términos de números. Esto significa que, si algunas Familias son mucho más abundantes que otras, la diversidad será menor en comparación con una comunidad donde las Familias están más equitativamente distribuidas (Figuerola et al., 2006).

Finalmente, la diversidad de orden 2 (2D) se centra en las Familias dominantes, dando más peso a aquellas con mayores abundancias. Este enfoque permite captar cómo los cambios en las poblaciones de Familias dominantes afectan la diversidad general de la comunidad (Roldán, 1988).

Para evaluar la diversidad beta entre las estaciones, se utilizó el índice de Bray-Curtis, que mide la similitud en la composición de comunidades en función de las abundancias de Familias. Este índice es útil para comprender cómo varía la comunidad de macroinvertebrados a lo largo del tiempo y el espacio (Blinn & Kilgore, 2001). Todos estos análisis se realizaron con el software Inext, que facilitó el manejo de datos y la interpretación de los resultados, proporcionando así una visión integral de la diversidad de macroinvertebrados en el ecosistema acuático de la quebrada Jurado.

6.8.3. Índice BMWP-Col.

Se utilizó el índice BMWP/Col (Biological Monitoring Working Party adaptado para Colombia) para evaluar la calidad del agua en las estaciones de muestreo a lo largo de la quebrada Jurado. A cada familia de macroinvertebrados identificada fue asignada un puntaje de acuerdo con su sensibilidad a la contaminación, donde las familias más sensibles reciben puntajes más altos y aquellas con mayor tolerancia a contaminantes obtienen puntajes más bajos (Naranjo-López, et al., 2013). La suma de los puntajes de todas las familias presentes en cada muestra permitió calcular el índice BMWP/Col para cada estación de muestreo (Medina-Tafur et al., 2008).

Los valores obtenidos del índice BMWP/Col fueron interpretados en función de las categorías de calidad del agua establecidas, que van desde "muy buena" hasta "muy mala". Esta interpretación se realizó considerando el contexto ambiental de cada estación y las posibles

fuentes de contaminación en la región. Además, se compararon los índices entre las diferentes estaciones para identificar patrones de calidad del agua a lo largo de la quebrada (Hahn-vonHessberg et al. 2021).

6.8.4. Cálculo índice ASTP.

Se aplicó el índice ASTP (Average Score Per Taxon) a cada estación de muestreo, el cual evalúa la calidad del agua basándose en la presencia y tolerancia de las Familias de macroinvertebrados a la contaminación (Bawa, Muhammad, et al., 2019). Este índice se calcula promediando los puntajes de tolerancia asignados a cada familia de macroinvertebrados, donde un puntaje más alto indica una mejor calidad del agua y una menor tolerancia a contaminantes (Cárdenas-Castro, et al., 2018). El cálculo del ASTP se realiza dividiendo la puntuación total de las familias presentes en la muestra por el número de taxones identificados, lo que proporciona una medida estandarizada que facilita comparaciones entre diferentes estaciones y períodos de muestreo (Merritt, Cummins, & Berg., 2008)

6.8.5. Cálculo índice IBF.

El Índice Biológico de Familias (IBF), propuesto por Hilsenhoff en 1988, se utilizó para evaluar la calidad del agua mediante la categorización de las familias de macroinvertebrados presentes en una muestra. A cada familia fue asignada un puntaje de tolerancia que varía de 0 a 10, donde los valores más bajos indican una mayor sensibilidad a la contaminación (Cárdenas-Castro, et al., 2018). Para calcular el IBF, se toma la sumatoria del producto del número de individuos de cada familia por su respectivo puntaje de tolerancia, lo que permite obtener un valor que refleja la calidad del agua en función de la composición de la comunidad de macroinvertebrados (Álvarez Carrión, et al., 2007).

A diferencia del índice ASTP (Average Score Per Taxon), que se enfoca en el puntaje promedio de tolerancia de las familias presentes, el IBF proporciona una evaluación más directa al considerar la abundancia de individuos de cada familia y su sensibilidad a la contaminación (Leaño Sanabria et al., 2020). Por otro lado, el índice BMWP/Col (Biological Monitoring Working Party adaptado para Colombia) también se basa en la suma de los puntajes de las familias, pero se centra en la presencia y ausencia de grupos taxonómicos específicos sin ponderar la abundancia de individuos (Roldán et al., 2014). Estas diferencias permiten que cada índice ofrezca una perspectiva única sobre la calidad del agua y la salud del ecosistema acuático.

6.8.6. Escalado multidimensional no métrico (NMDS).

El Escalado Multidimensional No Métrico (NMDS) es un método de análisis multivariado que permite visualizar la similitud o disimilitud entre grupos de datos en un espacio de menor dimensión, siendo especialmente útil en ecología para representar la distribución de comunidades biológicas en función de variables ambientales DataNalytics, (2019). Para llevar a cabo el NMDS, se inicia con la construcción de matrices que reflejan las abundancias de diferentes Familias recolectadas en varios sitios de muestreo, así como mediciones fisicoquímicas del entorno, como pH, turbidez y oxígeno disuelto. Luego, se calcula una matriz de distancias entre las muestras utilizando métricas como la distancia de Bray-Curtis o Euclidiana Sánchez Carrión, (1985).

A continuación, se aplica el algoritmo NMDS para reducir la dimensionalidad de los datos, representando las distancias originales en un espacio bidimensional o tridimensional. Los resultados se visualizan a través de gráficos de dispersión (biplots), donde cada punto representa una muestra y su posición refleja su similitud con otras muestras, permitiendo superponer variables ambientales para observar su influencia en la distribución de las Familias Ter Braak,

(1986). Finalmente, a partir del gráfico, se pueden identificar patrones y tendencias sobre cómo las comunidades biológicas responden a las variaciones en las condiciones ambientales, facilitando la identificación de factores clave que afectan la diversidad y abundancia de las Familias analizadas Badii et al., (2008).

7. Resultados

En el análisis de la diversidad de macroinvertebrados acuáticos en la quebrada Jurado, se registraron un total de 295 individuos pertenecientes a 35 familias y distribuidos en 12 órdenes, lo que refleja una rica biodiversidad en este ecosistema. La familia más abundante fue Sphaeriidae, que representó el 21.4% del total, seguida por Oligoneuriidae con un 6.1% y Naididae con un 3.1%. Estas familias dominantes son cruciales para el funcionamiento del ecosistema, ya que su alta presencia sugiere que desempeñan roles importantes en la cadena alimentaria y en la salud del hábitat acuático. En contraste, algunas familias como Cyrenidae y Reduviidae fueron mucho menos representadas, con solo un 1% cada una, y Lumbricidae alcanzó un 2%. A pesar de su menor número, estas familias contribuyen a la diversidad general del sitio y reflejan la complejidad del ecosistema. La variabilidad en la abundancia de las diferentes familias ilustra cómo coexisten diversas familias en la quebrada Jurado.

7.1 Diversidad de Macroinvertebrados en la Quebrada Jurado.

7.1.2. *Curva de Completitud (Evaluación de la Representatividad de las Muestras en la Diversidad de Familias).*

En el análisis de la diversidad de macroinvertebrados acuáticos en la quebrada Jurado, se evidenció una notable variabilidad en la cantidad de individuos y la diversidad de familias entre las tres estaciones de muestreo, E1, E2 y E3, como se resume en la Tabla 4. En la estación E1, se recolectaron 117 individuos, representando un total de 31 familias (Tabla 4). Esta estación

mostró una diversidad moderada, con una distribución relativamente equilibrada de las familias observadas. En la estación E2, se obtuvieron 48 individuos, representando 16 familias (Tabla 4). Aunque la cantidad de individuos fue más baja, la diversidad de familias sigue siendo significativa. Por último, en la estación E3 se recolectaron 115 individuos, con 27 familias identificadas (Tabla 4), lo que refleja una diversidad intermedia entre las otras dos estaciones.

Las curvas de completitud de riqueza y abundancia de macroinvertebrados acuáticos, presentadas en la Ilustración 13, ofrecen una visión más detallada de la representatividad de las muestras. Estas curvas muestran cómo la cobertura de las muestras aumenta a medida que el número de individuos recolectados crece. En la estación E2, la curva de completitud alcanzó su punto más alto, con un porcentaje de muestreo (SC) de 85.68%, a pesar de que el número de individuos fue menor en comparación con E1 (SC de 90.69%) y E3 (SC de 95.73%) (Tabla 4). Esto indica que, a pesar de la menor cantidad de individuos recolectados, la muestra fue capaz de representar una alta proporción de las familias presentes en la estación. Las estaciones E3 y E1 mostraron curvas de completitud que también reflejan una buena representatividad de las Familias, aunque E1 tuvo una menor cobertura en relación con E3.

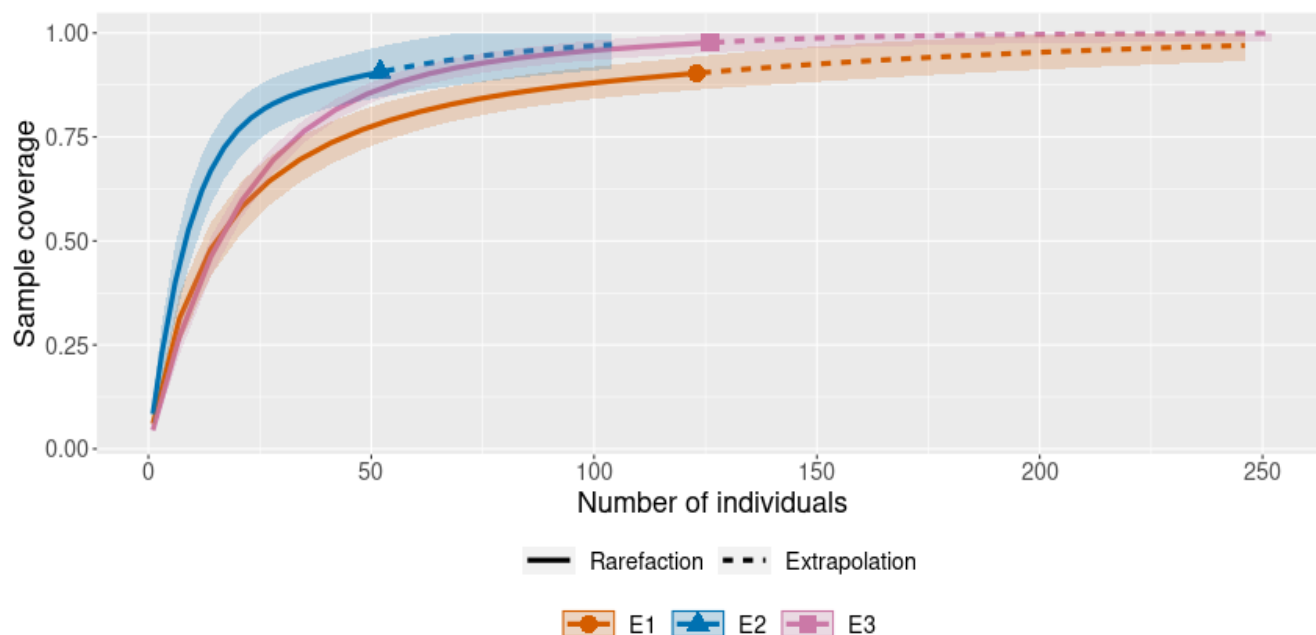
Tabla 4. Resumen de la Diversidad de Macroinvertebrados en la Quebrada Jurado por Estación

Estación	n	S.Obs	SC	f1	f2	f3
E1	117	31	0.9069	11	6	2
E2	48	16	0.8568	7	3	1
E3	115	27	0.9573	5	5	2

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: La tabla muestra el número total de individuos recolectados (n), el número de Familias observadas (S.obs), y el porcentaje de muestreo (SC), que indica la representatividad de las muestras.

Ilustración 13. Curva de Completitud de Riqueza y Abundancia de Macroinvertebrados en la quebrada Jurado- Pamplona.



Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Las curvas de completitud de riqueza y abundancia en E1 (naranja), E2 (azul) y E3 (rosado) indican una alta representatividad de las muestras, con cobertura cercana al 100 % a medida que aumenta el número de individuos. Las líneas continuas reflejan rarefacción y las punteadas extrapolación.

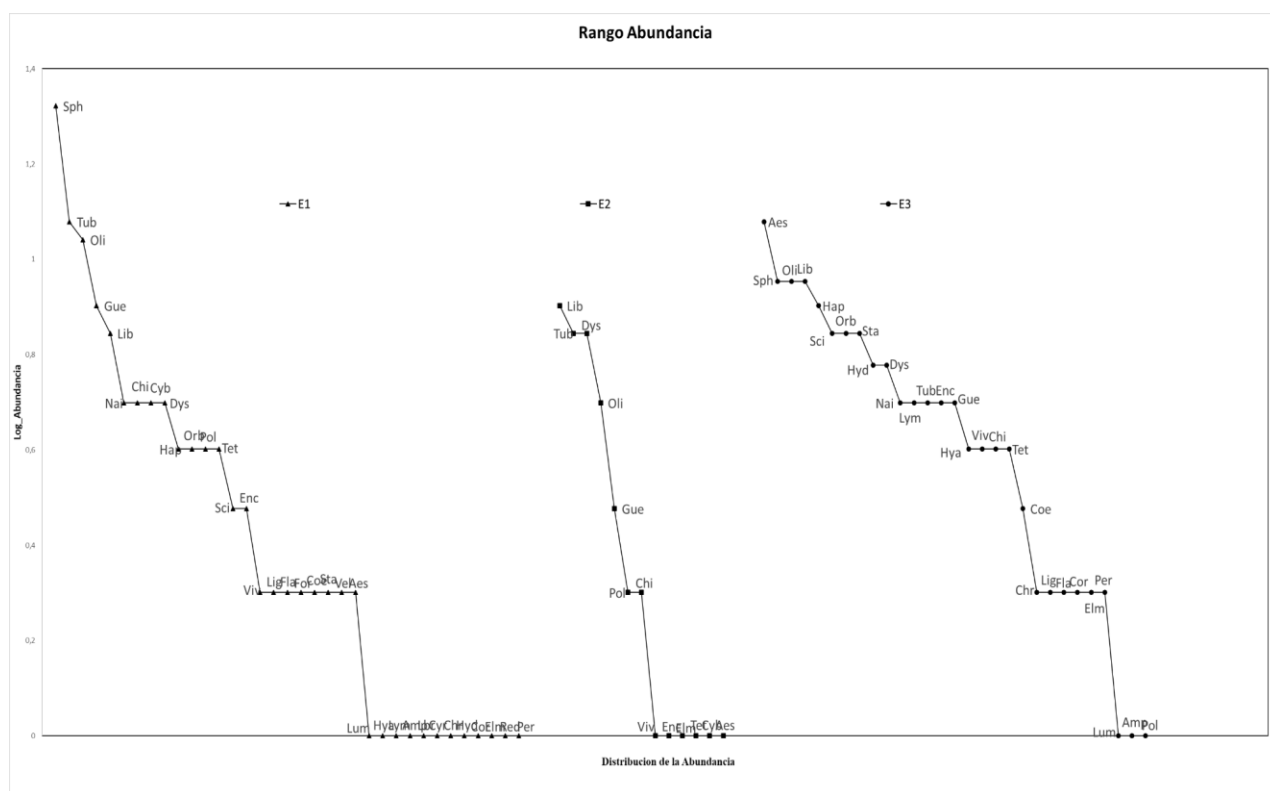
7.1.2 Análisis de Rareza y Abundancia (Distribución y Abundancia de Familias Raras en la Quebrada Jurado).

La gráfica en la Ilustración 14 representa la variación en la cantidad y tipo de macroinvertebrados acuáticos en distintos puntos de la quebrada Jurado. Este análisis de rareza y abundancia revela patrones claramente diferenciados entre las tres estaciones de muestreo.

En E1, se observa el predominio de unas pocas familias en grandes cantidades, mientras que la mayoría de las demás familias se encuentra en números reducidos. Esto sugiere que el ecosistema en esta estación favorece a ciertas familias dominantes. En E2, el patrón es

notablemente diferente. Aunque algunas familias dominantes están presentes, su abundancia es menor, y hay una mayor uniformidad entre las demás familias, lo que podría indicar condiciones menos favorables para las familias más abundantes en comparación con E1 y E3. Finalmente, en E3, la abundancia de las familias es más uniforme, con menos familias dominantes y una mayor diversidad relativa, aunque cada familia está representada por menos individuos en comparación con E1. Esto sugiere que las condiciones en E3 permiten una coexistencia más equilibrada entre las diferentes familias, promoviendo una mayor diversidad en el ecosistema.

Ilustración 14. Análisis de Rareza y Abundancia de Familias en la Quebrada Jurado.



Nota: E1, que presenta pocas Familias dominantes; E2, con un menor número de individuos; y E3, que destaca por su mayor diversidad y una distribución equilibrada. Entre las familias de macroinvertebrados identificadas se encuentran Aeshindae (Aes), Ampharetidae (Amp), Chitonomidae (Chi), Coenagrionidae (Coe), Corixidae (Cor), Cybaeidae (Cyb), Cyrenidae (Cyr),

Dysticidae (Dys), Elmidae (Elm), Enchytraeidae (Enc), Flabelligeridae (Fla), Formicidae (For), Guerridae (Gue), Haplotacidae (Hap), Hyalellidae (Hya), Hydriscopidae (Hyd), Lymnaeidae (Lym), Ligiidae (Lig), Lumbricidae (Lum), Lumbriculidae (Lbr), Naididae (Nai), Oligoneuriidae (Oli), Orbiniidae (Orb), Perlidae (Per), Polycentropidae (Pol), Reduviidae (Red), Sciaroidea (Sci), Sphaeriidae (Sph), Staphynilidae (Sta), Tetragnathidae (Tet), Tubificidae (Tub) y Viviparidae (Viv).

7.1.3. Resultados de la Diversidad Alfa por Índice de Shannon.

Los resultados del índice de Shannon revelan importantes diferencias en la diversidad de macroinvertebrados entre las estaciones analizadas. En $q=0$, que representa la riqueza total de familias sin considerar su abundancia relativa, la Estación M1 destaca con un valor de 43, indicando una alta diversidad y un ecosistema potencialmente saludable. La Estación M3 sigue con 28, sugiriendo también una diversidad considerable, aunque inferior a M1, lo que podría reflejar variaciones en las condiciones ambientales o en la calidad del hábitat. Por otro lado, la Estación M2, con solo 17 familias, muestra una menor riqueza, lo que podría ser indicativo de un ambiente menos favorable para los macroinvertebrados. Al considerar $q=1$, que mide la diversidad teniendo en cuenta la equitatividad o distribución uniforme de las familias, M1 mantiene el mayor valor con 25.87, lo que sugiere no solo una alta riqueza, sino también una distribución relativamente equitativa entre las familias presentes, sin una familia dominante. La Estación M3 se aproxima a este valor con 25.75, indicando condiciones similares que favorecen una diversidad equilibrada. En contraste, M2 muestra una disminución notable a 10.57, lo que sugiere que algunas familias son mucho más abundantes que otras, posiblemente debido a factores como contaminación o alteraciones del hábitat. Finalmente, al evaluar $q=2$, que otorga mayor peso a las familias más abundantes, la diversidad en M2 desciende aún más a 7.75,

resaltando una baja equitatividad y sugiriendo que el ecosistema está dominado por unas pocas familias, lo cual puede comprometer su estabilidad y resiliencia. En comparación, M1 presenta un valor de 16.39 y M3 un valor más alto de 24.44, indicando que, aunque hay muchas familias en M1, algunas son dominantes en M3. Este análisis sugiere que las estaciones presentan diferentes dinámicas ecológicas y resalta la importancia de monitorear estos ecosistemas para comprender mejor su salud y sostenibilidad.

Por otro lado, la Ilustración 15 complementa esta información al mostrar gráficamente cómo la diversidad alfa de macroinvertebrados varía en función del orden q . Este gráfico evidencia los mismos patrones de disminución de la diversidad y resalta que las estaciones M1 y M3 son similares en términos de diversidad, mientras que M2 es notablemente distinta en su estructura de comunidad.

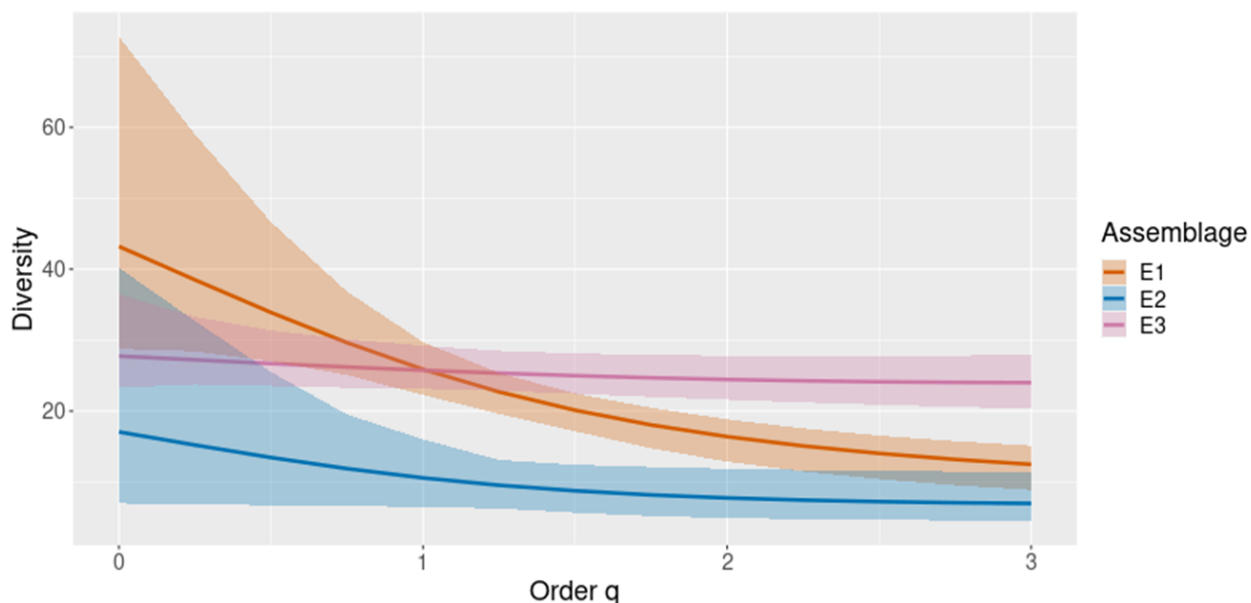
Tabla 5. Perfil de Diversidad de Macroinvertebrados Basado en el Índice de Shannon.

Orden q	Estación M1	Estación M2	Estación M3
0 q	43.20	17.05	27.74
1 q	25.87	10.57	25.75
2 q	16.39	7.75	24.44

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Perfil de diversidad de macroinvertebrados en las estaciones M1, M2 y M3, según el índice de Shannon. Se presentan los valores de diversidad a diferentes órdenes: $q=0$ muestra la riqueza total de Familias, $q=1$ indica la equitatividad entre Familias, y $q=2$ refleja la dominancia de las Familias más abundantes.

Ilustración 15. Estimación de la Riqueza de Familias de Macroinvertebrados: Diversidad Alfa



Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Perfil de diversidad de macroinvertebrados en las estaciones M1, M2 y M3, según el índice de Shannon para diferentes órdenes q .

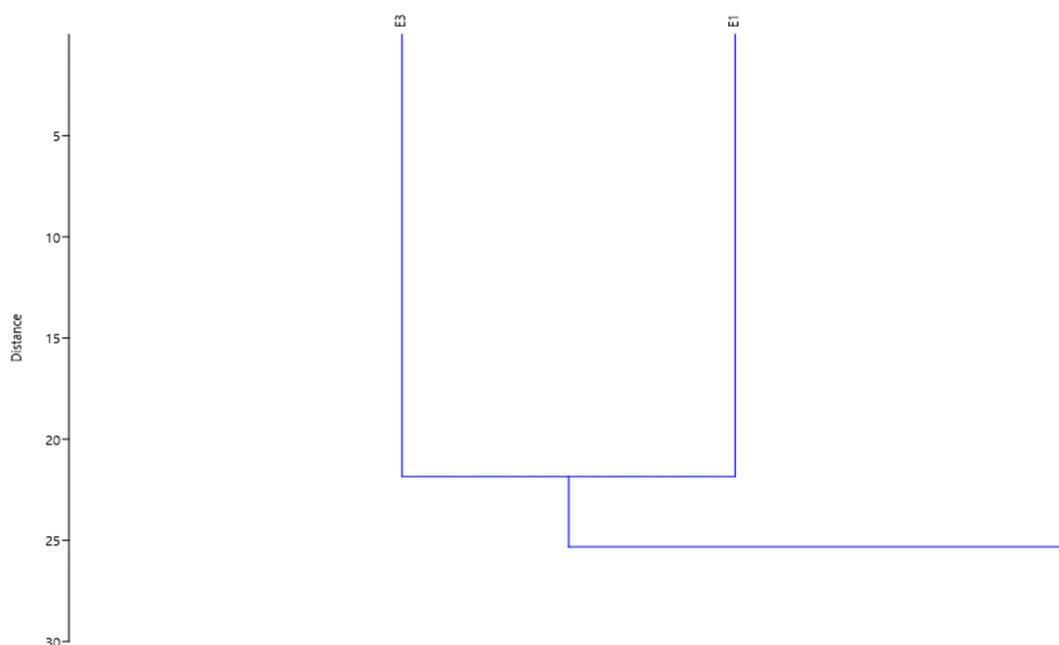
7.1.4. Resultados de la Diversidad Beta por Bray-Curtis.

En la Ilustración 16, se muestra el análisis de similitud de la composición de macroinvertebrados entre las estaciones M1, M2 y M3, utilizando el índice de Bray-Curtis. Este análisis permite visualizar el grado de semejanza en las comunidades de macroinvertebrados presentes en cada estación de muestreo.

Los resultados del análisis de similitud de la composición de macroinvertebrados revelan patrones significativos en la estructura comunitaria de estas estaciones. En el dendograma obtenido, se observa que la Estación M2 se encuentra más alejada de las estaciones M1 y M3, lo que indica una menor similitud en su composición de macroinvertebrados. Esto sugiere que las condiciones ambientales y fisicoquímicas en M2 son significativamente diferentes, posiblemente

debido a la influencia de actividades humanas cercanas, como la proximidad a un hogar y una carpintería, que pueden contribuir a la contaminación del agua. Por otro lado, las estaciones M1 y M3 están más cercanas entre sí lo que indica una alta similitud en la composición de sus comunidades de macroinvertebrados. Esta cercanía puede reflejar condiciones ambientales más homogéneas en ambas estaciones, lo que favorece una estructura comunitaria comparable. La Estación M1, aunque también está sujeta a actividades humanas, muestra una composición que se asemeja más a la de M3, que se encuentra aguas arriba y lejos de áreas residenciales. Esto sugiere que las condiciones en M3 podrían ser más favorables para los macroinvertebrados.

Ilustración 16. Análisis de Similitud de Bray-Curtis entre Estaciones de Muestreo de Macroinvertebrados en la Quebrada Jurado.



Fuente: Solano E. (2024)

Nota: Esta es una representación muestra la relación de similitud entre las estaciones E1, E2 y E3 en función de sus características. La distancia en el eje vertical refleja las diferencias entre las

estaciones: cuanto menor es la distancia, mayor es la similitud entre ellas. En este caso, E1 y E3 presentan una mayor similitud entre sí, mientras que E2 es la más diferente.

7.2. Resultados de parámetros fisicoquímicos.

Los análisis fisicoquímicos, presentados en la Tabla 6, revelan que el oxígeno disuelto varía entre 1.52 mg/l en E2M1 y 3.65 mg/l en E3M1. Los valores de pH oscilan entre 7.02 y 7.35, indicando condiciones generalmente neutras en las muestras. En cuanto al color del agua, se reportan valores de 35 UptCo en E3M2 y 73 UptCo en E2M2, lo que sugiere diferencias en la materia orgánica presente. La turbidez presenta valores que van de 5.39 NTU en E1M1 a 11.1 NTU en E3M1, mientras que las concentraciones de nitritos son bajas, variando de 0.007 mg/l en E3M1 a 0.045 mg/l en E1M2.

Los sólidos totales, se encuentran entre 23 mg/l en E3M1 y 126.6 mg/l en E2M1. Los niveles de cloruros se observan entre 7.09 mg/l en E3M1 y 8.5 mg/l en E2M1. En cuanto al potasio, las concentraciones fluctúan entre 0.098 mg/l en E2M1 y 3.03 mg/l en E1M1. La DQO se reporta entre 25 mg/l en E3M1 y 71 mg/l en E2M1, mientras que la DBO5 varía de 15.5 mg/l en E3M1 a 46 mg/l en E2M2.

Tabla 6. Parámetros Fisicoquímicos Estaciones de Monitoreo en la Quebrada Jurado-Pamplona

Parámetro	E1M1	E2M1	E3M1	E1M2	E2M2	E3M2
Oxígeno D. (mg/l)	2.98	1.52	3.65	3.15	1.85	3.40
Ph	7.15	7.02	7.27	7.25	7.10	7.35
Color (UptCo)	66	70	37	64	73	35
Turbidez (NTU)	5.39	9.35	11.1	5.75	8.50	10.0
Nitritos (mg/l)	0.039	0.011	0.007	0.045	0.012	0.009

Sólidos Totales (mg/l)	40	126.6	23	39	125	24
Cloruro (mg/l)	7.7	8.5	7.09	7.6	8.3	7.10
Potasio (mg/l)	3.03	0.098	2.51	3.05	0.105	2.55
DQO (mg/l)	67	71	25	68	69	26
DBO5 (mg/l)	42.2	44.5	15.5	41	46	17

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Resultados de las pruebas fisicoquímicas en las estaciones M1 y M2. Se presentan los valores de oxígeno disuelto, pH, color, turbidez, nitritos, sólidos totales, cloruros, potasio, DQO y DBO5, reflejando las condiciones del agua en cada estación.

7.3. Biological Monitoring Working Party para Colombia (BMWP-Col).

Los resultados del Índice BMWP-Col para macroinvertebrados en Colombia, obtenidos de tres estaciones de muestreo, ofrecen una visión detallada de la calidad del agua y la diversidad biológica en los ecosistemas acuáticos. En la Estación de Muestreo 1, se registró un puntaje total de 70, lo que indica una calidad de agua aceptable (Clasificación II), con una diversidad moderada de organismos como Naididae y Sphaeriidae. Sin embargo, este puntaje sugiere la posibilidad de contaminación o alteraciones en el ambiente acuático. Por otro lado, la Estación de Muestreo 2 alcanzó un puntaje total más alto de 88, también clasificado como aceptable, destacándose por una mayor riqueza y diversidad de macroinvertebrados, incluyendo familias como Polycetropidae y Coenagrionidae, lo que sugiere un ecosistema más saludable. En contraste, la Estación de Muestreo 3 obtuvo un puntaje total de 67, que se clasifica igualmente como aceptable, pero es ligeramente inferior al de la Estación 2. Esta estación incluye familias como Perlidae y Libellulidae, indicando una diversidad razonable, aunque sugiere que pueden existir factores limitantes que afectan la abundancia o variedad de Familias. En conjunto, los

datos revelan que todas las estaciones presentan una calidad de agua aceptable, lo cual es alentador para la salud general de los ecosistemas acuáticos en Colombia; no obstante, las diferencias en los puntajes entre las estaciones subrayan la importancia de continuar el monitoreo para identificar posibles fuentes de contaminación

Tabla 7 . Puntajes y Clasificación del Índice BMWP-Col para Macroinvertebrados en la Estación de Muestreo 1.

Estación	Familia	Puntaje
1	Naididae	6
1	Sphaeriidae	10
1	Lumbricidae	4
1	Sciaroidea	7
1	Hyalellidae	5
1	Haplotacidae	6
1	Lymnaeidae	7
1	Ampharetidae	6
1	Lumbriculidae	6
1	Viviparidae	6
1	Cyrenidae	8
1	Chironomidae	4
1	Orbiniidae	5
1	Ligiidae	6
Total, Estación 1= 70		
Fuente: Solano E. (2024)		

Nota: La tabla muestra los puntajes asignados a las familias de macroinvertebrados recolectados en la Estación 1. Los valores reflejan la diversidad de organismos presentes y su relación con la calidad del agua. El puntaje total de 70 indica una calidad aceptable del agua en esta estación.

Tabla 8. Puntajes y Clasificación del Índice BMWP-Col para Macroinvertebrados en la Estación de Muestreo 2.

Estación	Familia	Puntaje
2	Oligonetridae	5
2	Tubificidae	4
2	Polycentropidae	9
2	Flabelligeridae	6
2	Hydriscopidae	6
2	Enchytraeidae	5
2	Chironomidae	6
2	Ligiidae	6
2	Oligoneuridae	7
2	Corixidae	8
2	Formicidae	4
2	Coenagrionidae	9
2	Elmidae	7
2	Tetragnathidae	6
2	Reduviidae	6
2	Naididae	6
Total, Estación 2= 88		

Fuente: Solano E. (2024)

Nota: En esta tabla se presentan los puntajes de las familias de macroinvertebrados de la Estación 2. Con un puntaje total de 88, esta estación muestra una mayor riqueza y diversidad en comparación con la Estación 1.

Tabla 9. Puntajes y Clasificación del Índice BMWP-Col para Macroinvertebrados en la Estación de Muestreo 3.

Estación	Familia	Puntaje
3	Cybaeidae	5
3	Guerridae	6
3	Staphynilidae	6
3	Veliidae	5
3	Perlidae	7
3	Libellulidae	7
3	Coenagrionidae	9
3	Aeshinae	6
3	Calopterygidae	8
3	Viviparidae	6
Total, Estación 3= 67		

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: La tabla correspondiente a la Estación 3 refleja los puntajes asignados a las familias de macroinvertebrados recolectados en esta área. Con un puntaje total de 67, la calidad del agua se clasifica como aceptable, aunque es ligeramente inferior a la de la Estación 2.

Tabla 10. Resultados Finales del Índice BMWP-Col.

Estación	Puntaje Total	Clasificación	Calidad
1	70	II	Aceptable
2	88	II	Aceptable
3	67	II	Aceptable

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Esta tabla resume los puntajes totales obtenidos en cada estación de muestreo según el índice BMWP-Col, junto con su clasificación y el color correspondiente. Los resultados indican que todas las estaciones presentan una calidad de agua aceptable (clasificación II), lo que sugiere un ambiente acuático relativamente saludable, aunque puede haber indicios de contaminación o alteraciones.

7.4. Índice de Puntuación Promedio por Taxón (ASPT).

Los análisis realizados en las estaciones de muestreo utilizando el índice BMWP-Col para macroinvertebrados revelan información significativa sobre la calidad del agua en el área estudiada. En la Estación 1, se registró un puntaje total de 70, indicando una calidad del agua clasificada como aceptable (Clasificación II). Este puntaje refleja la presencia de diversas familias de macroinvertebrados, aunque con una riqueza menor en comparación con las otras estaciones. La Estación 2 mostró un puntaje total de 88, lo que sugiere una mayor diversidad y riqueza de organismos, también clasificada como aceptable. Finalmente, la Estación 3 obtuvo un puntaje total de 67, que, aunque también se considera aceptable, es inferior al de la Estación 2 y similar al de la Estación 1.

Tabla 11. Cálculo del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) para la Estación 1.

Estación	Familia	Puntos
1	Naididae	7
1	Sphaeriidae	9
1	Lumbricidae	2
1	Sciaroidea	3
1	Hyaellidae	7
1	Haplotacidae	7
1	Lymnaeidae	7
1	Ampharetidae	9
1	Lumbriculidae	7
1	Viviparidae	9
1	Cyrenidae	9
1	Chironomidae	1
1	Orbiniidae	9

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: La tabla presenta el cálculo del Índice ASPT para la Estación 1, obteniendo un valor de **6.86**. Este resultado permite evaluar la calidad del agua en la estación y sugiere la necesidad de un monitoreo continuo.

Total, Puntuación Estación 1: $7 + 9 + 2 + 3 + 7 + 7 + 7 + 9 + 7 + 9 + 9 + 1 + 9 + 6 = 96$

Número de taxones: 14

ASPT Estación 1: $96 / 14 = 6.86$

Tabla 12. Cálculo del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) para la Estación 2.

Estación	Familia	Puntos
2	Oligonetridae	7
2	Tubificidae	1
2	Polycentropidae	8
2	Flabelligeridae	9
2	Hydriscopidae	9
2	Enchytraeidae	7
2	Chitonomidae	7
2	Ligiidae	6
2	Oligoneuridae	9
2	Corixidae	9
2	Formicidae	6
2	Coenagrionidae	8
2	Elmidae	9
2	Tetragnathidae	8
2	Reduviidae	2
2	Naididae	7

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: La tabla presenta el cálculo del Índice ASPT para la Estación 2, con un puntaje de 6.50 y un total de 16 taxones. Este resultado refleja la diversidad de macroinvertebrados presentes

Total, Puntuación Estación 2: $7 + 1 + 8 + 9 + 9 + 7 + 7 + 6 + 9 + 9 + 6 + 8 + 9 + 8 + 2 + 7 = 104$

Número de taxones: 16

ASPT Estación 2: $104 / 16 = 6.50$

Tabla 13. Cálculo del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) para la Estación 3.

Estación	Familia	Puntos
3	Cybaeidae	7
3	Guerridae	9
3	Staphynilidae	8
3	Veliidae	7
3	Perlidae	10
3	Libellulidae	9
3	Coenagrionidae	8
3	Aeshinae	7
3	Dysticidae	7
3	Calopterigidae	8
3	Coenagrionidae	8
3	Viviparidae	9

Fuente: Autor.

Nota: La tabla muestra el cálculo del Índice ASPT para la Estación 3, con un puntaje de 7.46 y un total de 13 taxones.

Total, Puntuación Estación 3: $7 + 9 + 8 + 7 + 10 + 9 + 8 + 7 + 7 + 8 + 8 + 9 + 9 = 97$

Número de taxones: 13

ASPT Estación 3: $97 / 13 = 7.36$

Tabla 14. Resultados del Índice Promedio de Puntuación por Taxón (ASPT) en las Estaciones de Muestreo

Estación	ASPT	Clase de Calidad
1	6.86	III
2	6.50	III
3	7.46	II

Fuente: Solano E. (2024)

Nota: La tabla muestra los resultados del índice ASPT para las tres estaciones de muestreo. La Estación 1 obtuvo un ASPT de 6.86 y se clasifica como Clase III (Ligeramente contaminadas). La Estación 2 presentó un ASPT de 6.50, también en Clase III, mientras que la Estación 3 alcanzó un ASPT de 7.46, clasificada como Clase II (Aguas no contaminadas).

7.5. Índice Biótico De Familias De Macroinvertebrados (IBF).

Los resultados del Índice Biótico de Familias (IBF) en las estaciones muestreadas indican diferentes niveles de calidad del agua. En la Estación 1, el IBF es de 4.07, lo que sugiere una calidad muy buena con leve contaminación orgánica. La Estación 2 presenta un IBF de 4.38, indicando una calidad buena con algo de contaminación orgánica. Por último, la Estación 3 muestra un IBF de 5.40, lo que se clasifica como regular, señalando la presencia de contaminación orgánica.

Tabla 15. Cálculo del Índice Biótico de Familias (IBF) en la Estación 1.

Morfotipo	Familia	Valor de Tolerancia
M1	Naididae	3
M2	Sphaeriidae	5
M3	Lumbricidae	4
M4	Sciaroidea	5
M5	Hyalellidae	4
M6	Haplotacidae	5
M7	Lymnaeidae	6
M8	Ampharetidae	3
M9	Lumbriculidae	4
M10	Viviparidae	5
M11	Cyrenidae	6
M12	Chironomidae	4
M13	Orbiniidae	3
M20	Ligiidae	5

Fuente: Solano E. (2024).

Nota: Esta tabla presenta las familias de macroinvertebrados recolectadas en la Estación 1, junto con sus respectivos valores de tolerancia a la contaminación. El Índice Biótico de Familias (IBF) se calculará a partir de estos datos, resultando en un valor que indicará la calidad del agua en esta estación.

Total, de familias presentes (N): 14

Suma de valores de tolerancia:

$$3+5+4+5+4+5+6+3+4+5+6+4+3+5=57$$

$$IBF1=14\div 57\approx 4.07$$

Tabla 16. Cálculo del Índice Biótico de Familias (IBF) en la Estación 2.

Morfotipo	Familia	Valor de Tolerancia
M21	Oligonetridae	4
M14	Tubificidae	7
M15	Polycentropidae	4
M16	Flabelligeridae	3
M17	Hydriscopidae	5
M18	Enchytraeidae	3
M19	Chitonomidae	6
M20	Ligiidae	5
M21	Oligoneuridae	4
M31	Corixidae	5
M32	Formicidae	7
M36	Coenagrionidae	4
M33	Elmidae	3
M34	Tetragnathidae	5
M38	Reduviidae	6
M1	Naididae	3

Fuente: Solano E. (2024)

Nota: Esta tabla muestra las familias de macroinvertebrados identificadas en la Estación 2, junto con sus valores de tolerancia.

Total, de familias presentes (N): 16

Suma de valores de tolerancia:

$4+7+4+3+5+3+6+5+4+5+7+4+3+5+6+3=70$

$IBF2=70 \div 16 \approx 4.38$

Tabla 17. Cálculo del Índice Biótico de Familias (IBF) en la Estación 2.

Morfotipo	Familia	Valor de Tolerancia
M37	Cybaeidae	4
M38	Guerridae	6
M22	Staphynilidae	4
M23	Veliidae	5
M24	Perlidae	4
M25	Libellulidae	5
M26	Coenagrionidae	4
M27	Aeshindae	5
M28	Dysticidae	6
M29	Calopterigidae	5

Fuente: Solano E. (2024)

Nota: En esta tabla se listan las familias de macroinvertebrados encontradas en la Estación 3, junto con sus valores de tolerancia. El cálculo del IBF se realizará con estos datos para determinar la calidad del agua en esta estación.

Suma de valores de tolerancia: $4+6+4+5+4+5+4+5+6+5=54$

$IBF\ 3=10\div 54=5.40$

Tabla 18. Resultados del Índice Biótico de Familias (IBF) para las Estaciones Muestreadas.

Estación	Valor IBF	Grado de Contaminación
Estación 1	4.07	Muy buena (leve contaminación orgánica)
Estación 2	4.38	Buena (algo de contaminación orgánica)
Estación 3	5.40	Buena

Fuente: Solano E. (2024)

Nota: Esta tabla presenta los resultados del Índice Biótico de Familias (IBF) calculados para tres estaciones muestreadas. Se incluye el valor del IBF, el grado de contaminación y el color asociado a cada estación. Los valores indican la calidad del agua, donde un IBF más bajo sugiere mejor calidad y menor contaminación orgánica, mientras que valores más altos indican una mayor presencia de contaminación.

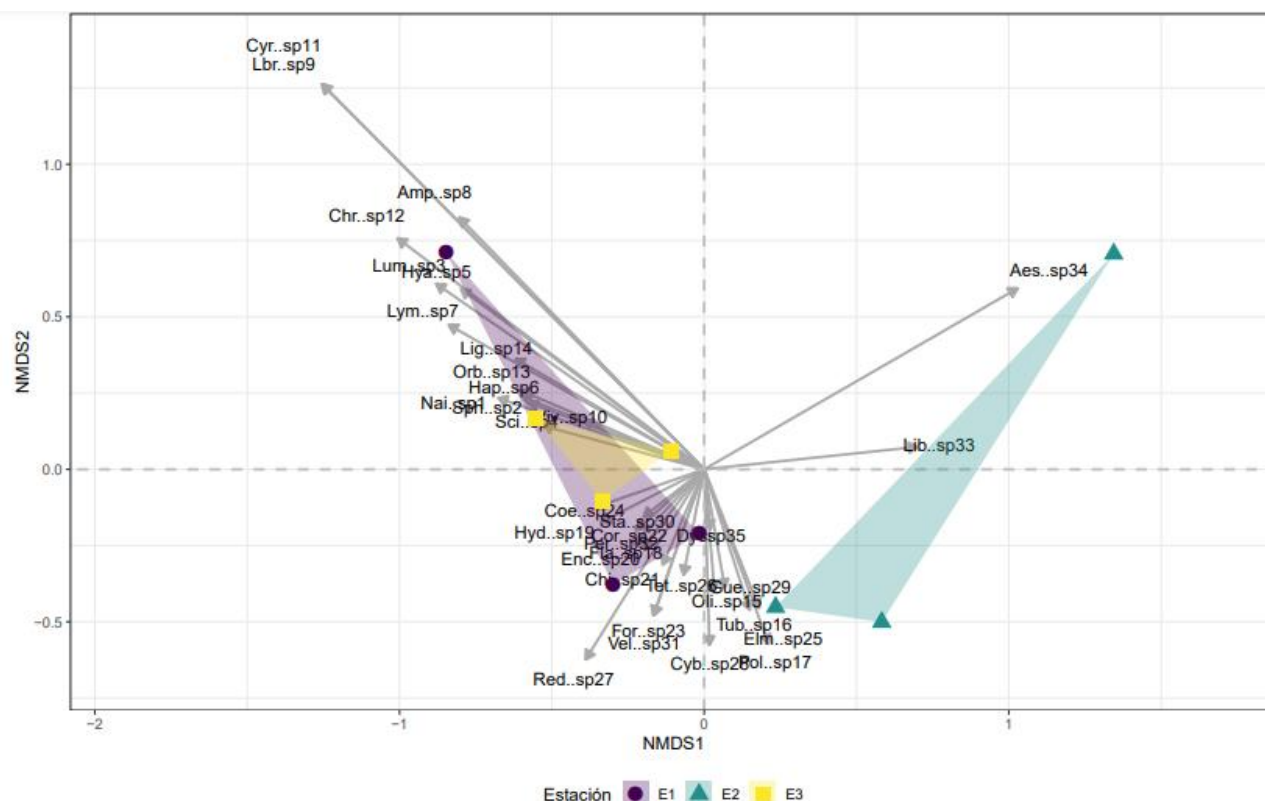
7.6. Escalado multidimensional no métrico (NMDS).

El análisis NMDS revela que las comunidades de macroinvertebrados están estructuradas por gradientes ambientales representados por los factores físico-químicos. La Estación E1 (morado) se encuentra en una posición intermedia, lo que indica que alberga una comunidad diversa con familias como *Lumbricus* sp5, *Lymnaea* sp7 y *Amp* sp8. Estas familias están

adaptadas a condiciones ambientales moderadas, ya que los factores físico-químicos (representados por flechas cercanas) no ejercen influencias extremas. En contraste, la Estación E3 (amarillo) ocupa una posición central, reflejando características compartidas tanto con E1 como con E2. La comunidad en E3 está asociada con familias como Orb sp13 y Sci sp10, que prosperan bajo una combinación de factores ambientales más equilibrados, indicando que esta estación presenta condiciones menos extremas y más homogéneas.

Por otro lado, la Estación E2 (azul) se encuentra claramente separada en el espacio NMDS, asociándose con familias únicas como Aes sp34 y Lib sp33. Esto sugiere que E2 está definida por condiciones físico-químicas extremas, representadas por la flecha más larga que indica un factor ambiental predominante, como alta conductividad, pH extremo o temperatura elevada. Esta influencia dominante crea un ambiente que favorece familias especializadas, diferenciándola significativamente de las otras estaciones.

Ilustración 17. Escalado multidimensional no métrico (NMDS).



Fuente: Solano E. (2024)

Nota: Análisis NMDS de las estaciones E1, E2 y E3 en la quebrada Jurado, mostrando diferencias en la composición de macroinvertebrados asociadas a un gradiente ambiental. E1 está representada por el polígono morado, E2 por el amarillo y E3 por el verde turquesa, reflejando variaciones en los parámetros fisicoquímicos entre las estaciones. Aeshindae (Aes), Ampharetidae (Amp), Chitonomidae (Chi), Coenagrionidae (Coe), Corixidae (Cor), Cybaeidae (Cyb), Cyrenidae (Cyr), Dysticidae (Dys), Elmidae (Elm), Enchytraeidae (Enc), Flabelligeridae (Fla), Formicidae (For), Guerriidae (Gue), Haplotacidae (Hap), Hyalellidae (Hya), Hydriscopidae (Hyd), Lymnaeidae (Lym), Ligiidae (Lig), Lumbricidae (Lum), Lumbriculidae (Lbr), Naididae (Nai), Oligoneuriidae (Oli), Orbiniidae (Orb), Perlidae (Per), Polycentropidae (Pol), Reduviidae (Red), Sciaroidea (Sci), Sphaeriidae (Sph), Staphynilidae (Sta), Tetragnathidae (Tet), Tubificidae (Tub) y Viviparidae (Viv).

8. Discusión

8.1. Estimación de la diversidad de familias de macroinvertebrados acuáticos presentes en la quebrada Jurado, Pamplona-Colombia.

La evaluación de la diversidad de macroinvertebrados en la quebrada Jurado, ubicada en Pamplona, Norte de Santander, proporciona información valiosa sobre cómo las variaciones ambientales influyen en la estructura de estas comunidades biológicas. Los resultados obtenidos muestran que la Estación E2 es la menos diversa, con un total de 48 individuos y 16 familias observadas, lo que se traduce en un porcentaje de cobertura de familias (SC) del 85.68%. Esta baja diversidad sugiere un ambiente más homogéneo que podría favorecer a unas pocas familias comunes, posiblemente debido a condiciones ambientales menos variables y a la influencia de actividades humanas cercanas.

En contraste, las estaciones E1 y E3 presentan una mayor abundancia y diversidad, con 117 y 115 individuos respectivamente, y 31 y 27 familias observadas. Los porcentajes de cobertura en estas estaciones son significativamente más altos, alcanzando 90.69% en E1 y 95.73% en E3. La similitud en la diversidad entre E1 y E3 indica que ambas estaciones comparten características ambientales que permiten una coexistencia más equilibrada entre las familias de macroinvertebrados. Esto podría estar relacionado con una mayor variabilidad en el sustrato y la calidad del agua, factores que han demostrado influir en la diversidad y equitatividad de las comunidades acuáticas (Roldán et al., 2020).

Además, el predominio de pocas familias dominantes en E2 puede ser un indicativo de estrés ambiental o perturbaciones que limitan la diversidad biológica. En cambio, E1 y E3 parecen ofrecer condiciones más favorables para una variedad más amplia de macroinvertebrados, lo que sugiere un ecosistema más saludable y resiliente. Esta diferencia también puede reflejar variaciones en parámetros fisicoquímicos como la concentración de oxígeno disuelto y la presencia de materia orgánica, factores conocidos por alterar significativamente la composición de macroinvertebrados en sistemas acuáticos (Montaño-Contreras et al., 2019).

Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones previas que demuestran cómo factores como la calidad del agua y el tipo de sustrato influyen en la diversidad y equitatividad de los macroinvertebrados en cuerpos de agua dulce (Roldán et al., 2020). Las estaciones E1 y E3 comparten características similares en sus comunidades, lo que sugiere condiciones ambientales más favorables para una mayor diversidad. En contraste, la Estación E2, ubicada aguas abajo cerca de un hogar y una carpintería, presenta una estructura comunitaria distinta y es la menos diversa. Esta menor diversidad puede estar relacionada con un ambiente

más homogéneo y la influencia de actividades humanas que generan contaminación. Por otro lado, E1, situada en una zona con actividades humanas, podría experimentar perturbaciones que afectan negativamente a los macroinvertebrados, mientras que E3, ubicada aguas arriba y lejos de áreas residenciales, muestra condiciones más favorables, sugiriendo que el uso para riego y la menor presión antrópica contribuyen a una mayor diversidad.

8.2. Inferencia de las Propiedades Fisicoquímicas del Agua en la Quebrada Jurado.

La evaluación de los parámetros fisicoquímicos en la quebrada Jurado revela diferencias significativas en las condiciones ambientales de las tres estaciones de muestreo. El oxígeno disuelto, un indicador crucial de la calidad del agua y las condiciones para la vida acuática, mostró variaciones notables, con un mínimo de 1.52 mg/l en E2M1 y un máximo de 3.65 mg/l en E3M1. La baja concentración de oxígeno en E2M1 sugiere una mayor carga orgánica o condiciones de eutrofización, lo que podría favorecer a Familias más tolerantes a bajos niveles de oxígeno y restringir la diversidad general (Roldán, 2003). En contraste, el nivel más alto en E3M1 indica un ambiente más oxigenado, propicio para una comunidad de macroinvertebrados diversa y con Familias menos tolerantes a condiciones hipóxicas.

Los valores de pH, que oscilaron entre 7.02 y 7.35, reflejan condiciones generalmente neutras en todas las estaciones, lo cual es favorable para la mayoría de los organismos acuáticos (Calderón, 2002). Sin embargo, pequeñas variaciones en el pH pueden estar vinculadas a diferencias en la composición del sustrato y la influencia de fuentes de materia orgánica o actividad antropogénica. La turbidez y el color también mostraron variaciones notables: la turbidez osciló entre 5.39 NTU en E1M1 y 11.1 NTU en E3M1, mientras que el color se mantuvo entre 35 y 73 UptCo. Estos parámetros sugieren variabilidad en la cantidad de material suspendido y materia orgánica disuelta en las estaciones. Las estaciones E2M2 y E3M1, con

valores más altos de turbidez y color, podrían estar recibiendo una mayor carga de materia orgánica o sedimentos, lo que puede afectar la penetración de luz y, por ende, el hábitat de los organismos acuáticos (Perdomo et al., 2000).

Los sólidos totales y las concentraciones de nitritos y cloruros también varían entre estaciones. La mayor cantidad de sólidos totales en E2M1 (126.6 mg/l) indica una alta presencia de materia particulada en suspensión, posiblemente debido a procesos de erosión o descargas orgánicas; mientras que los niveles más bajos en E3M1 (23 mg/l) reflejan una menor carga de sólidos, lo cual podría favorecer una mayor claridad del agua y diversidad biológica en esta estación (Castañeda et al., 2022).

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO5), ambos son indicadores relevantes del contenido de materia orgánica y su nivel de degradación. Los valores más altos de DQO y DBO5 en E2M1 y E2M2 (71 mg/l y 46 mg/l, respectivamente) sugieren una mayor presencia de materia orgánica en estas estaciones, posiblemente resultado de aportes externos como descargas domésticas o agrícolas. Estas condiciones favorecen a Familias adaptadas a ambientes con alta carga orgánica y pueden limitar la presencia de organismos menos tolerantes (Roldán, 2003).

8.3. Relación macroinvertebrados con parámetros fisicoquímicos en la quebrada Jurado, Pamplona-Colombia.

La distribución de macroinvertebrados en las tres estaciones refleja la compleja relación entre las comunidades biológicas y los factores físico-químicos del entorno. La clara separación de la Estación E2 sugiere que los factores ambientales juegan un rol crucial en la estructuración de las comunidades. En E2, la fuerte influencia de un factor físico-químico específico puede haber creado un nicho ecológico único, favoreciendo a familias especializadas que no se

encuentran en E1 o E3. Esto resalta la importancia de los gradientes ambientales como determinantes en la diversidad biológica, mostrando cómo pequeñas variaciones en las condiciones del agua pueden generar comunidades completamente diferentes en términos de composición de familias. Por otro lado, la cercanía entre E1 y E3 indica que estas estaciones son más similares y presentan mejores condiciones que E2. Esto sugiere que las familias presentes en E1 y E3 son más tolerantes a una gama más amplia de condiciones, lo que les permite coexistir sin estar restringidas por factores extremos. Además, se evidencia que los macroinvertebrados están afectados por los cambios en los parámetros físico-químicos relacionados con la calidad del agua. El patrón observado subraya la necesidad de considerar los factores físico-químicos no solo como variables aisladas, sino como componentes interactivos que configuran el entorno para las familias de manera dinámica.

9. Conclusiones

El estudio mostró una alta riqueza de familias de macroinvertebrados, lo que refleja un ecosistema con buena biodiversidad y condiciones generalmente saludables. Aunque se observaron diferencias en la composición de las comunidades entre las estaciones, la quebrada en su conjunto mantiene un nivel notable de diversidad. Esto sugiere que, a pesar de algunos desafíos ambientales, como la turbidez y la contaminación orgánica, la quebrada todavía presenta áreas con condiciones óptimas para la vida acuática.

Los análisis fisicoquímicos revelaron niveles elevados de DQO y DBO₅, lo que indica una carga significativa de contaminación orgánica en la quebrada Jurado. Estos niveles, combinados con un oxígeno disuelto bajo en la estación E2, destacan el impacto de los aportes de materia orgánica, que afectan la calidad del agua y limitan la diversidad de las comunidades.

La turbidez elevada observada en varias estaciones también es un indicativo de la presencia de partículas suspendidas que pueden alterar los hábitats de los macroinvertebrados.

La variabilidad en los parámetros fisicoquímicos de la quebrada, como el oxígeno disuelto, el pH y la turbidez, influye directamente en la distribución y diversidad de las comunidades de macroinvertebrados. Las estaciones con mejores condiciones de calidad de agua, como niveles óptimos de oxígeno y un pH equilibrado, mostraron una mayor riqueza de familias. En cambio, en las zonas con una mayor influencia de contaminación, las comunidades se volvieron más especializadas y menos diversas, adaptándose a un entorno con condiciones más severas.

Referencias Bibliográficas

- Aguas Urbanas. (2018, 14 de noviembre). Monitoreo biológico de calidad de agua. <https://www.aguasurbanas.ei.udelar.edu.uy/index.php/2018/11/14/monitoreo-biologico-de-calidad-de-agua/>
- Alcaldía Municipal de Pamplona. (2015). *Proyecto de acuerdo PBOT Pamplona*. <https://www.pamplona-nortedesantander.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionControl/PROYECTO%20DE%20ACUERDO%20PBOT%20PAMPLONA.pdf>
- Alcolado, P. (s.f.). *Conceptos e índices relacionados con la diversidad*. https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Alcolado-2/publication/265963780_Conceptos_e_indices_relacionados_con_la_diversidad/links/54662c150cf25b85d17f5abd/Conceptos-e-indices-relacionados-con-la-diversidad.pdf
- Alonso Duré, J. A. (2018). *Índice multimétrico basado en macroinvertebrados acuáticos para evaluar la calidad de las aguas en arroyos del sur del departamento de Itapúa (Tesis doctoral)*. Universidad Nacional de Itapúa, Paraguay. <https://repositorio.conacyt.gov.py/xmlui/handle/20.500.14066/3140>
- Álvarez Carrión, S. M., & Pérez Rivera, L. (2007). *Evaluación de la calidad de agua mediante la utilización de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca del Yeguaré, Honduras. Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero e Ingeniera en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente*, Zamorano, Honduras.
- Álvarez, L. F. (2006). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Instituto Alexander von Humboldt, en proceso de publicación.
- Ambientalys. (2022, 2 de enero). *Análisis de parámetros en aguas de consumo: el pH*. <https://www.ambientalys.com/analisis-aguas-consumo-ph>
- Arango, M. C., Álvarez, L. F., Arango, G. A., Torres, O. E., & Monsalve, A. J. (2008). *Calidad del agua de las quebradas La Cristalina y La Risaralda, San Luis, Antioquia*. Revista EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia, 9, 121-141
- Armenteras, D., González, T. M., Vergara, L. K., Luque, F. J., Rodríguez, N., & Bonilla, M. A. (2016). *Revisión del concepto de ecosistema como "unidad de la naturaleza" 80 años después de su formulación*. Ecosistemas, 25(1), 83-89. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25>
- Arroyo, D. C., & Encalada, A. C. (2009). *Evaluación de la calidad de agua a través de macroinvertebrados bentónicos e índices biológicos en ríos tropicales en bosque de neblina montano*. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, 1(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v1i1.4>
- Attalea. (2022, 30 de noviembre). *Macroinvertebrados Acuáticos: Bioindicadores de la calidad ambiental de nuestros ríos amazónicos*. <http://attalea.iiap.gob.pe/2022/11/30/macroidvertebrados-acuaticosbioindicadores-de-la-calidad-ambiental-de-nuestros-rios-amazonicos/>

- Braga, M. I. J. (2000). Integración de las funciones y servicios de los ecosistemas de agua dulce a los proyectos de desarrollo hídrico. Washington, D.C.: Informe de Trabajo.
- Calderón Sáenz, A. (2002). *Parámetros fisicoquímicos del agua: Guía para el monitoreo ambiental*.
- Cárdenas-Castro, E., et al. (2018). *Aplicación del índice biótico de familias de macroinvertebrados para la caracterización del agua del río Teusacá, afluente del río Bogotá*. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 587-597. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1004>
- Castañeda, M., Ramírez, J., & Arango, J. (2022). *Parámetros fisicoquímicos y su influencia en macroinvertebrados*. *Investigaciones Acuáticas*, 10(4), 78-90.
- CEMIE Océano. (s.f.). *Ecología e integración del ambiente*. <https://cemieoceano.mx/ecologia-integracion-ambiente.html>
- Centro Universitario de la Costa. (2015). *Fragmentación y sus implicaciones: Análisis y reflexión documental*. <http://www.cuc.udg.mx/sites/default/files/publicaciones/2015%20-%20Fragmentaci%C3%B3n%20y%20sus%20implicaciones.%20An%C3%A1lisis%20y%20reflexi%C3%B3n%20documental.pdf>
- Chacón, M. (2016). *Análisis químico del agua*. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33953/Capitulo3Analisisquimico2016MyriamChacon.pdf>
- Chaux, J. P. (2019). *Biodiversidad de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos asociados al Río Fragua Chorroso y su papel como bioindicador de calidad de agua*. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 15(2), 1-10. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/3222/3427>
- Ciespinosa. (n.d.). *Análisis multivariante de la comunidad: Capítulo 2 Ordenaciones*. <https://ciespinosa.github.io/AnalisisMultivariante/ordenaciones.html>
- Comisión Nacional del Agua. (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONASA. (s.f.). *Monitoreo y vigilancia de calidad del agua - SANAA*. <https://conasa.hn/files/65/Capacitaciones-del-Sector/347/Monitoreo-y-vigilancia-de-calidad-del-agua--muestreo---SANAA.pdf>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). (2004). *BIODIVERSIDAD 2.10.1.1 MACROINVERTE*. https://cortolima.gov.co/images/planes_y_programas/recurso_hidrico/pomca/COELLO/2004/II_FASE_DIAGNOSTICO/k%202.10%20BIODIVERSIDAD%20%202.10.1.1%20MACROINVERTE.pdf
- DKV. (2023, 28 de agosto). *Conservación de un ecosistema: qué es y qué importancia tienen para la vida del planeta*. <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/naturaleza/conservar-ecosistemas>.
- Domínguez, E., Fernández, H. R., & Armitage, B. J. (2006). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología*. Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina.

- Energy5. (2023, 14 de noviembre). *La importancia de la biodiversidad acuática en la salud de los ecosistemas*. <https://energy5.com/es/la-importancia-de-la-biodiversidad-acu225tica-en-la-salud-de-los-ecosistemas>
- Espinosa Ramírez, A. J. (2023). *Tesis doctoral [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]*. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63149/PhD%20Adriana%20J%20EspinosaRamirez.pdf?sequence=1>
- FAO. (2023). Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta. iAgua. <https://www.iagua.es/noticias/fao/contaminantes-agricolas-grave-amenaza-agua-planeta>
- Evaluación de la calidad del agua mediante el uso de índices bióticos en el río San Andrés*. Revista Ventana Científica. http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?lng=en&nrm=iso&pid=S2305-60102014000200002&script=sci_arttext
- Figuerola, R., Valdovinos, C., Araya, E., & Parra, O. (2003). *Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de ríos del sur de Chile*. Revista chilena de historia natural, 76(2), 275-285
- Forero Duarte, J. (2017). *Macroinvertebrados bentónicos y su relación con la calidad del agua en la cuenca alta del Río Frío (Tabio, Cundinamarca) [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]*. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/34419/ForeroDuarteJulian2017.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Fundación Aquae. (2020). *¿Cómo reducir la contaminación del agua?* <https://www.fundacionaquae.org/wiki/reducir-contaminacion-agua/amp/>
- Fundación Aquae. (2023, 7 de noviembre). *Consejos para cuidar los ecosistemas*. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/cuidar-ecosistemas/amp/>
- Galindo-Leva, L. Á., Constantino-Chuaire, L. M., Benavides-Machado, P., Montoya-Restrepo, E. C., & Rodríguez-Valencia, N. (2012). *Evaluación de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua en quebradas de fincas cafeteras de Cundinamarca y Santander, Colombia*. Revista Cenicafé, 63(1), 70-92.
- Garay Rey, K. M., & Cárdenas Castro, E. (2018). *Análisis comparativo de la cobertura vegetal (2015) con la frontera agrícola (2018) en la región de Nariño, Colombia*. Revista de Ciencias Ambientales, 12(1), 45-59.
- Garcés Ruiz, D. F., & Pacheco Gutiérrez, L. A. (2020). *Análisis de la calidad del agua a partir de la correlación entre variables fisicoquímicas y macroinvertebrados en tres sectores del río Caney, Restrepo – Meta*. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental, Universidad Santo Tomás, Villavicencio.
- García, D. P. (2018). *Determinación del índice BMWP/Col mediante la utilización de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad de agua en el cauce del río*

- Garzón, M. J., Soto, A. M., Usma, J.I., et al. (2012). *Contaminantes emergentes en aguas: efectos y posibles tratamientos*. *Producción + Limpia*, 7(2), 52-73. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Generalitat de les Illes Balears. (2024, 6 de enero). Preguntas y respuestas sobre los nitratos en el agua de consumo. <https://www.caib.es/sites/salutambiental/es/nitrats-26197/>
- Gessner, M. O., et al. (2010). *Global threats to human water security and river biodiversity*. *Nature*, 467(7315), 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- González, F., Martínez, L., & Castro, R. (2021). *Diversidad de macroinvertebrados acuáticos: relación con el sustrato*. *Ecología Aplicada*, 15(3), 112-120.
- González, M., & Pérez, J. (Eds.). (2018). *Manual de calidad del agua*. Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible. https://par-manglares.net/images/docs/publicaciones/Chile/Manual_calidad_del_agua.pdf?_imgdEmgyzw=226142401125943569
- González, M., & Pérez, M. (2019). Aspectos fundamentales del monitoreo de calidad de las aguas: el río Almendares como caso de estudio. *Revista Tecnológica-EIIT*, 31(1), 39-50. <https://www.redalyc.org/journal/1812/181271968004/html/>
- González-Acosta, J. A., & Tenjo-Morales, A. I. (2019). *Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia)*. *Revista de Biología Tropical*, 67(2), 269-284.
- Greenpeace. (2022). ¿Qué son los nitratos? *Un agua de mierda: el legado de las macrogranjas*. <https://es.greenpeace.org/es/en-profundidad/un-agua-de-mierda-el-legado-de-las-macrogranjas/que-son-los-nitratos/>
- Guevara Mora, M. (2011). *Insectos acuáticos y calidad del agua en la cuenca y embalse del río Peñas Blancas, Costa Rica*. *Revista de Biología Tropical*, 59(2), 635-654.
- Guía para el estudio de macroinvertebrados. (s.f.). Calaméo. <https://www.calameo.com/books/001221397c2b4f9690de8>
- Gutiérrez-Fonseca, P. E. (2010). Capítulo 6: Plecoptera. *Revista de Biología Tropical*, 58(suppl. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442010000800006&script=sci_arttext
- Healthline. (2024, 10 de enero). Lemon juice: Acidic or alkaline, and does it matter? <https://www.healthline.com/nutrition/lemon-juice-acidic-or-alkaline>
- IUCN. (2020, 27 de mayo). *Agua, salud y ecosistemas*. <https://www.iucn.org/news/south-america/202005/agua-salud-y-ecosistemas>
- Jiménez Sandoval, J.A. (2015). Morfología funcional y hábitat de macroinvertebrados acuáticos en lagunas del parque nacional natural Chingaza.
- Jiménez-Valverde, A., & Hortal, J. (2003). *Las curvas de acumulación de Familias y la necesidad de evaluar la calidad de los inventarios biológicos*. *Revista Ibérica de Aracnología*, 8, 151-161. https://jhortal.com/pubs/2003-Jimenez-Valverde%26Hortal_Rev_Ib_Aracnol.pdf
- Jost, L. (2006). *Entropy and diversity*. *Oikos*, 113(2), 363-375.

- Ladrera, R., Rieradevall, M., & Prat, N. (2013). *Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos: una herramienta didáctica*. <https://www.ucipfg.com/biblioteca/files/original/fcfc5d0423048bba63684c6e7e04f08.pdf>
- Lasso, C., & Rodríguez, M. (2015). *Evaluación rápida de la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos de la confluencia de los ríos Orinoco y Ventuari, Estado Amazonas, Venezuela*. https://www.researchgate.net/publication/277011628_Evaluacion_Rapida_de_la_Biodiversidad_de_los_Ecosistemas_Acuaticos_de_la_Confluencia_de_los_Rios_Orinoco_y_Ventuari_Estado_Amazonas_Venezuela
- Leaño Sanabria, J.J., & Pérez Barriga, D.(2020). *Determinación de la calidad del agua mediante el índice BMWP/BOL (bioindicadores ecológicos) del Río Trancas, Municipio de Entre Ríos - Tarija*. *RevActaNova*, 9(4). http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892020000100007&script=sci_arttext
- Longo, A.(2010). *Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua*. *Revista de Biología Tropical*, 58(1), 139-150. https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0370-39082016000200007&script=sci_arttext
- López Medina, C.F., & Cufiño Sánchez, M.A.(2016). *Análisis del índice de riesgo de calidad del agua-IRCA-y su relación con variables meteorológicas y ubicación geográfica para el departamento Norte Santander en los años 2012-2013*. Universidad La Salle. Facultad Ingeniería. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/528
- López, J.A. & García, M.(2018). *Inventarios y estimaciones de la biodiversidad*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/324925621_INVENTARIOS_Y_ESTIMACIONES_DE_LA_BIODIVERSIDAD
- Lozano Arenas, J. F., & Torrado Cuadros, E. (2021). *Revisión y análisis de información secundaria de la calidad del agua de consumo del municipio de Ocaña, Norte de Santander* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Tecnología en Saneamiento Ambiental]. <https://repository.unad.edu.co/jspui/handle/10596/40532>
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Science Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470015902>
- Magurran, A. E., & McGill, B. J. (Eds.). (2011). *Biological diversity: Frontiers in measurement and assessment*. Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/biological-diversity-9780199580675>
- Medina-Tafur, C., Hora-Revilla, M., Asencio-Guzmán, I., Pereda-Ruíz, W., & Gabriel-Aguilar, R. (2008). *El índice Biological Monitoring Working Party (BMWP), modificado y adaptado a tres microcuencas del Alto Chicama*. *SCIENDO*, 13(1-2). <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/view/280>
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., & Berg, M. B. (2008). *An introduction to the aquatic insects of North America* (4th ed.). Kendall/Hunt Publishing Company.

- Ministerio de Ambiente y Energía. (2021). *Análisis de la microcuenca del* [PDF]. <https://img1.wsimg.com/blobby/go/ddc6efbe-c9ee-4cdd-add72718f5a0a86f/downloads/BERM%C3%9ID~1.PDF?ver=1664161769107>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2013). *Evaluación preliminar de los impactos del cambio climático en España*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/evaluacion_preliminar_impactos_2005_tcm30-178491.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2013). *Muestreo y laboratorio: Fauna bentónica de invertebrados en ríos vadeables*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/ML-Rv-I-2013_Muestreo%20y%20laboratorio_Fauna%20bent%C3%B3nica%20de%20invertebrados_%20R%C3%ADos%20vadeables_24_05_2013_tcm30-175284.pdf
- Montes, C. (2021). *Los bioindicadores como herramienta de evaluación de la calidad de agua en uno de los afluentes del Río Combeima* [Monografía]. <https://www.monografias.com/trabajos71/bioindicadores-herramienta-evaluacion-calidad-agua/bioindicadores-herramienta-evaluacion-calidad-agua2>
- Mora Campos, M. R., & Tamay Heras, A. A. (2022). *Determinación del índice de calidad de agua mediante el monitoreo de macroinvertebrados, parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en el río Sinincay, Cuenca - Ecuador* [Trabajo de titulación]. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21888/1/UPS-CT009573.pdf>
- Moreno-Gaona, D.A., Morales-Puentes, M.E., & Gil-Novoa, J.(n.d.). *Estructura de las comunidades de briófitos en los complejos de páramos de Boyacá-Colombia*.
- Neiss, U.G. (2012). *Taxonomía de Odonata (Insecta), con énfasis en la caracterización morfológica y biología de larvas en la Amazonía Central, Brasil*.
- NRDC. (s.f.). *La contaminación del agua: Todo lo que necesitas saber*. <https://www.nrdc.org/es/stories/contaminacion-agua-todo-lo-necesitas-saber>
- Núñez, J.C., & Frago-Castilla, P.J.(2019). *Uso de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de contaminación del agua de la Ciénaga Mata de Palma (Colombia)*. Información Tecnológica, 30(5), 319-330. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500319>
- OEA. (2006). *Evaluación de los impactos ambientales y capacidad institucional frente al libre comercio en la región andina Colombia*. <https://www.oas.org/dsd/environmentlaw/documents/informe%20oea%2014%20de%20julio%20de%202006.pdf>
- Orrego-Meza, J.G., Hernández-Cortés, I.C., Marulanda-López, J.F., Rivera-Pérez, J.M., Viteri-Delgado, J.P., Franco-Torres, M., Llano-Arias, C.A., & Gomes-Dias, L.(2020). *Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en el Parque Nacional Natural Selva de*

- Florencia, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 44(171), 560-571.
- Osejos Merino, M.A., Cano Andrade, R.J., & Merino Conforme, M.V. (s.f.). *Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua de la parte céntrica del río Jipijapa - Ecuador*. <https://www.recimundo.com/index.php/es/article/download/962/1646?inline=1>
- Osejos Merino, M.A., Merino Conforme, M.C., Merino Conforme, M.V. & Solis Barzola, J.L. (2020). *Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua de la parte céntrica del río Jipijapa - Ecuador*. RECIMUNDO, 4(4), 454-467. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.454-467](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.454-467)
- Palacio, F.X., Apodaca, M.J. & Crisci, J.V. (2024). **Análisis multivariado para datos biológicos: Teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R.** Fundación de Historia Natural Félix de Azara. <https://fundacionazara.org.ar/img/libros/analisis-multivariado-para-datos-biologicos/analisis-multivariado-para-datos-biologicos.pdf>.
- Perdomo, J. & Gómez, R. (2000). **Impacto del uso del suelo sobre la calidad del agua.** Ecología Aplicada.
- Pla, L. (2006). *Biodiversidad: inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza*. Interciencia, 31(8), 583-590. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33911906.pdf>
- Prat, N. & Rieradevall, M. (1992). **Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos: una herramienta didáctica*. Ikastorratza, 11, 1-16. https://www.ehu.eus/ikastorratza/11_alea/macro.pdf
- Rache Rodríguez, L. (2015). *Caracterización de hábitat y morfología de algunas Familias del género Perithemis (Odonata: Anisoptera) presentes en la Cordillera Oriental*.
- Ramírez Rodríguez, M. P. (2022). *Uso de los macroinvertebrados acuáticos como metodología de evaluación de la calidad ecológica en la cuenca del río Negro (Colombia)* [Tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/41360>
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). *Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales: formulaciones y aplicación*. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(3). http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-53831997000100009&script=sci_arttext
- Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo. (2021). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal de la microcuenca El Volcán a partir de la compra de áreas estratégicas*. 11(1), 1-10. <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.381>
- Rodríguez, J. A., & Rodríguez, J. M. (2021). *Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de la calidad del agua en la cuenca del río Gachaneca en Boyacá*. Prospectiva Científica, 17(17), 1-12. https://www.researchgate.net/publication/359560770_Macroinvertebrados_Acuaticos_como_Bioindicadores_de_la_Calidad_del_Agua_en_la_Cuenca_del_Rio_Gachaneca_en_Boyaca_Prospectiva_Cientifica_ISSN1794-7774_Ano_17_No_17_2021

- Rodríguez-Miranda, J. A., García-Ubaque, M. A., & Pardo-Pinzón, A. (2021). *Impacto ambiental del vertimiento de aguas servidas en aglomerados urbanos*. Revista de Ciencias Ambientales, 21(2), 43-56. <https://doi.org/10.24054/rca.v21n2.381>
- Roldán, A. (2010). Métodos de recolección. En Revista de Biología Tropical (Vol. 58, Supl. 4, pp. 41-50). https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442010000800002&script=sci_arttext
- Roldán, A. M., & Pérez, J. (2014). *Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICE RN-MAE), Colombia*. Revista de Biología Tropical, 62(Supl.)
- Roldán, G. (2016, 6 de abril). *Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica*. Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v40n155/v40n155a07.pdf>
- Roldán, J. (2003). *Calidad del agua: parámetros fisicoquímicos e indicadores biológicos*. Revista Colombiana de Ecología.
- Roldán, J., Pérez, M., & López, A. (2020). Impacto del uso del suelo sobre la biodiversidad acuática. Revista Colombiana de Ecología, 22(1), 45-58.
- Roldán-Pérez, J. (2018). *Evaluación de la calidad del agua del río Teusacá mediante el Índice Biótico de Familias (IBF)*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 42(2), 587-600. <http://doi.org/10.18257/raccefyn.1285>
- Sánchez, J. (2019). *El papel de los macroinvertebrados en los ecosistemas acuáticos*. Ecología y Conservación, 12(3), 45-60. <https://www.ecologiayconservacion.org/articulos/macroinvertebrados>
- Sensorex Liquid Analysis Technology. (2023, 30 de octubre). Three main types of water quality parameters explained. <https://sensorex.com/three-main-types-of-water-quality-parameters-explained/>
- Socha, A. (2020). *Los macroinvertebrados acuáticos del curso alto del río Bogotá [Tesis de pregrado, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales - U.D.C.A.]*. <https://www.repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/2743/DocumentoFinalTesisAndr%C3%A9sSocha20enero2020.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Springer, M. (2010). *Capítulo 5: Odonata*. Revista de Biología Tropical, 58(3), 979-993. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442010000800005&script=sci_arttext
- Studocu. (2023). Conservación y transporte de muestras biológicas. <https://www.studocu.com/en-us/document/long-island-university/nursing-pathophysiology/conservacion-y-transporte-de-muestras-biologicas/16958586>
- Tamaris-Turizo, C. (2018). *Evaluación de calidad del agua en la Quebrada Jui, afluente del río Sinú, Colombia*. Revista de la Universidad de Córdoba, 2021. https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262021000100024&script=sci_arttext

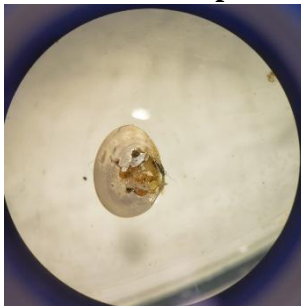
- The Nature Conservancy. (2024, 31 de marzo). *Mejores decisiones para proteger los ríos de Colombia*. <https://www.nature.org/es-us/sobre-tnc/donde-trabajamos/tnc-en-latinoamerica/colombia/proteger-rio-magdalena-buenas-decisiones/>
- UCIPFG. (s.f.). Guía para la elaboración de trabajos académicos [PDF]. <https://www.ucipfg.com/biblioteca/files/original/fcfa5d0423048bba63684c6e7e04f08.pdf>
- United Nations. (2019). *Decenio Internacional para la Acción 'El agua, fuente de vida' 2005-2015*. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water_and_sustainable_development.shtml
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. (2011). *Módulo: Biodiversidad* [PDF]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4770/biodiversidad.pdf>
- Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Wilson, J., & Pripack, M. (2024, 9 de febrero). *Monitoreo de ecosistemas*. https://espanol.libretexts.org/Biologia/Ecolog%C3%ADa/Biolog%C3%ADa_de_la_Conservaci%C3%B3n_en_%C3%81frica_Subsaariana_%28Wilson_y_Pripack%29/10%3A_Conservando_Ecosistemas/10.01%3A_Monitoreo_de_Ecosistemas
- Zumbado, M., & Azofeifa, D. (2020). *Insectos de importancia agrícola: guía básica de entomología*. https://www.academia.edu/43654721/INSECTOS_de_importancia_agr%C3%ADcola_Gu%C3%ADa_b%C3%A1sica_de_entomolog%C3%ADa

Anexos

Estacion 1 07°22'04.30" N 72°39'20.27" W

Morfotipo 1

Familia: Naididae

Morfotipo 2

Familia: Sphaeriidae

Morfotipo 3

Familia: Lumbricidae

Morfotipo 4

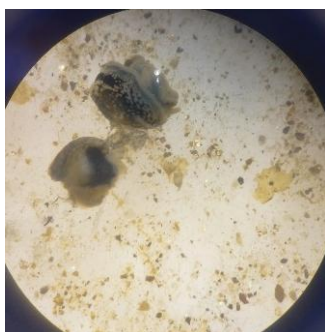
Familia: Sciaroidea

Morfotipo 5

Familia: Hyalellidae

Morfotipo 6

Familia: Haplotacidae

Morfotipo 7

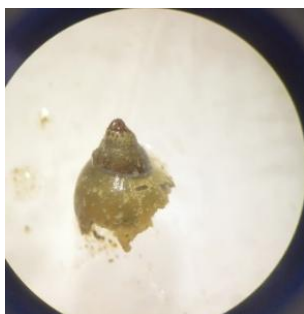
Familia: Lymnaeidae

Morfotipo 8

Familia: Ampharetidae

Morfotipo 9

Familia: Lumbriculidae

Morfotipo 10

Familia: Viviparidae

Morfotipo 11

Familia: Cyrenidae

Morfotipo 12

Familia: Chironomidae

Morfotipo 13

Familia: Orbiniidae

Estacion 2 07°22'10.58" N 72°39'26.09" W

Morfotipo 14



Familia: Ligiidae

Morfotipo 15



Familia: Oligonetridae

Morfotipo 16



Familia: Tubificidae

Morfotipo 17

Familia: Polycentropidae



Morfotipo 18

Familia: Flabelligeridae



Morfotipo 19

Familia: Hydriscopidae



Morfotipo 20



Familia: Enchytraeidae

Morfotipo 21



Familia: Chironomidae

Morfotipo 31



Familia: Staphylinidae

Morfotipo 32

Familia: Veliidae

Morfotipo 33

Familia: Perlidae

Morfotipo 34

Familia: Libellulidae

Morfotipo 35

Familia: Aeshnidae

Morfotipo 36

Familia: Dytiscidae

Estacion 3 07°22'12.15" N 72°39'30.47" W

Morfotipo 23



Familia: Corixidae

Morfotipo 24



Familia: Formicidae

Morfotipo 25



Familia: Coenagrionidae

Morfotipo 26



Familia: Elmidae

Morfotipo 27



Familia: Tetragnathidae

Morfotipo 28



Familia : Reduviidae

Morfotipo 29



Familia: Cybaeidae

Morfotipo 30



Familia: Guerridae