



UNIVERSIDAD NACIONAL

SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**RELACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MACROINVERTEBRADOS Y
LOS AGUJEROS DE CRIOCONITA DEL GLACIAR
ARTESONRAJU, CORDILLERA BLANCA, 2024**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

Ingeniera Ambiental

Autora:

Br. Jaimes Rojas, Yomira Talía

Asesora:

M.Sc. Medina Marcos, Katy Damacia

 <https://orcid.org/0000-0002-2910-6808>

Asesora externo:

Blga. Rodriguez Venturo, Sofia Cristina Ana

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Biología y/o química de biodiversidad de ecosistemas, especies y
genética

Huaraz – Perú

2025





"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"

ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el Auditorio de la Facultad de Ciencias del Ambiente (FCAM) de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), 1er. Piso - Pabellón J - Ciudad Universitaria - Independencia - Huaraz, de conformidad a la normatividad vigente procesan el acto académico público de sustentación y defensa de la tesis "RELACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MACROINVERTEBRADOS Y LOS AGUJEROS DE CRIOCONITA DEL GLACIAR ARTESONRAJU, CORDILLERA BLANCA, 2024", que presenta Bach. JAIMES ROJAS YOMIRA TALIA, para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

En seguida, después de haber atendido la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, lo declaramos:

APROBADO CON DISTINCIÓN

Con el calificativo de: DIECISIETE (17)

En consecuencia, JAIMES ROJAS YOMIRA TALIA, queda expedita para que el Consejo de Facultad de la FCAM-UNASAM apruebe el otorgamiento de su Título Profesional de Ingeniero Ambiental de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario N° 399-2015-UNASAM), el Art. 48° y 4ta. disposición complementaria del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 761-2017-UNASAM).

Huaraz, 27 de noviembre de 2025

Ph.D. EDWIN ANIBAL LOARTE CADENAS
Jurado de tesis (presidente)

M. Sc. YRMA SOLEDAD MINAYA SALINAS
Jurado de tesis (1er. miembro)

M.Sc. FRANCISCO NEMEICIO CASTILLO VERGARA
Jurado de tesis (2do. miembro)

M. Sc. KATY DAMACIA MEDINA MARCOS
Asesora de tesis

Blga. SOFIA CRISTINA ANA RODRIGUEZ VENTURO
Co-asesora de tesis



"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"

ACTA DE CONFORMIDAD IMPRESIÓN Y EMPASTADO DE TESIS

Los que suscriben, miembros del jurado evaluador de la tesis de la bachiller JAIMES ROJAS YOMIRA TALIA, con código universitario 161.0605.517; al haber sustentado y defendido la tesis "RELACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MACROINVERTEBRADOS Y LOS AGUJEROS DE CRIOCONITA DEL GLACIAR ARTESONRAJU, CORDILLERA BLANCA, 2024" el 27/noviembre/2025 y haber obtenido el calificativo de DIECISIETE (17) sin observaciones. Por tanto, el Jurado Evaluador, autoriza su edición, impresión y empastado de la mencionada tesis, de conformidad al formato establecido por el repositorio institucional y el Reglamento General de Grados y Títulos–UNASAM, en su artículo 46, inciso p).

Huaraz, 03 de diciembre de 2025.

PhD. **EDWIN ANIBAL LOARTE CADENAS**
Presidente
Jurado de Tesis

MSc. **YRMA SOLEDAD MINAYA SALINAS**
Primer miembro
Jurado de Tesis

MSc. **FRANCISCO NEMECIO CASTILLO VERGARA**
Segundo miembro
Jurado de Tesis

C.c.
- Arch.



CONSTANCIA 143-2025-UI-FCAM–UNASAM EVALUACIÓN DE SIMILITUD


El que suscribe, Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo hace constar que:

La versión final de la tesis **“RELACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MACROINVERTEBRADOS Y LOS AGUJEROS DE CRIOCONITA DEL GLACIAR ARTESONRAJU, CORDILLERA BLANCA, 2024”** de la señorita **JAIMES ROJAS YOMIRA TALIA**, identificada con **DNI N° 76330020**, tras ser sometido a revisión mediante la plataforma de evaluación de similitud por su asesora la MSc. **KATY DAMACIA MEDINA MARCOS**, conforme el Artículo 11° del Reglamento de Originalidad y/o Grado de Similitud de la Producción Académica, Científica e Investigativa de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Resolución de Consejo Universitario N° 126-2022-UNASAM, tiene una **similitud del 6%**.

Se expide la presente constancia, a solicitud del interesado para los fines que estime pertinente.

Huaraz, **03 de diciembre de 2025**.

Firmado digitalmente por:
LOARTE CADENAS EDWIN
ANIBAL FIR 44909386 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 03/12/2025 22:52:07-0300

 Ph.D Edwin Anibal Loarte Cadenas
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACION
FCAM - UNASAM

Anexo de la R.C.U N° 126 -2022 -UNASAM
ANEXO 1
INFORME DE SIMILITUD.

El que suscribe (asesor) del trabajo de investigación titulado:

Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar
Artesonraju, cordillera Blanca, 2024

Presentado por: Jaimes Rojas, Yomira Talía

con DNI N°: 76330020

para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Informo que el documento del trabajo anteriormente indicado ha sido sometido a revisión, mediante la plataforma de evaluación de similitud, conforme al Artículo 11° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de :6%..... de similitud.

Evaluación y acciones del reporte de similitud de los trabajos de los estudiantes/ tesis de pre grado (Art. 11, inc. 1).

Porcentaje			
Trabajos de estudiantes	Tesis de pregrado	Evaluación y acciones	Seleccione donde corresponda
Del 1 al 30%	Del 1 al 25%	Esta dentro del rango aceptable de similitud y podrá pasar al siguiente paso según sea el caso.	<input checked="" type="radio"/>
Del 31 al 50%	Del 26 al 50%	Se debe devolver al estudiante o egresado para las correcciones con las sugerencias que amerita y que se presente nuevamente el trabajo.	<input type="radio"/>
Mayores a 51%	Mayores a 51%	El docente o asesor que es el responsable de la revisión del documento emite un informe y el autor recibe una observación en un primer momento y si persistiese el trabajo es invalidado.	<input type="radio"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor/ Jefe de Grados y Títulos de la EPG UNASAM/ Director o Editor responsable, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software anti-plagio.

Huaraz, 11/12/2025

FIRMA

Apellidos y Nombres: Medina Marcos, Katy Damacia

DNI N°: 44752984

Se adjunta:

1. Reporte completo Generado por la plataforma de evaluación de similitud

YOMIRA TALIA JAIMES ROJAS

RELACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MACROINVERTEBRADOS Y LOS AGUJEROS DE CRIOCONITA DEL GLACIAR ARTESONRAJ...

 Pregrado

 Pregrado

 Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::8100:535571596

Fecha de entrega

2 dic 2025, 8:28 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

2 dic 2025, 8:42 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TesisFinal_YomiraJaimes.pdf

Tamaño del archivo

9.8 MB

188 páginas

37.300 palabras

211.102 caracteres




6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme y poner en mi camino a personas bondadosas, talentosas y proactivas que me han impulsado a seguir adelante.

A mis padres, por darme todo y más de lo que tenían, brindándome una educación y valores que me han convertido en la persona que soy hoy.

A mis hermanos, por su cariño incondicional y por los valiosos consejos que siempre me han ofrecido.

Yomira Talia Jaimes Rojas



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis asesores de tesis: a la M.Sc. Katy Damacia Medina Marcos, por su asesoramiento constante, valioso aporte científico y orientación académica durante el desarrollo de esta investigación, así como por su apoyo durante el trabajo de campo. Su dedicación fue fundamental para la culminación exitosa de este proyecto. Asimismo, agradezco a mi asesora externa, Blga. Sofia Cristina Ana Rodriguez Venturo, por su apoyo incondicional y desinteresado durante la ejecución de esta investigación, así como por sus consejos y su invaluable experiencia científica.

Un reconocimiento especial a los profesionales que me apoyaron durante el trabajo de campo: al Ing. Rolando Cesai Cruz Encarnación y al Ing. Jhon River Macedo Tolentino, por su colaboración durante la recolección de muestras.

Agradezco profundamente a mis jurados de tesis: al M.Sc. Francisco Nemecio Castillo Vergara, por su valiosa orientación y exigencia académica; al Ph.D. Edwin Aníbal Loarte Cadenas, por su apoyo y orientación en la elaboración de esta investigación; y a la M.Sc. Yrma Soledad Minaya Salinas, por su dedicación en la revisión rigurosa de esta investigación. Estos profesionales brindaron un aporte significativo que contribuyó a la mejora de esta investigación.

Al Grupo de Investigación Permafrost y Ecosistemas de Montañas (PAMEC) por su compromiso en promover y fomentar la investigación científica, brindando soporte científico, logístico y humano a los nuevos investigadores. De igual forma, al Grupo de Investigación Ecología, Biodiversidad y Biotecnología de Ecosistemas de Montaña (EcoBIOTEM), cuyos integrantes me brindaron un apoyo invaluable durante la elaboración de esta investigación y a quienes tengo un gran aprecio por su calidad humana y profesional ejemplar.

Al Centro de Investigación en Ciencias de la Tierra, Ambiente y Tecnología (ESAT), por su compromiso con la investigación científica a nivel local, nacional e internacional, y por su esfuerzo en generar nueva información para la comunidad académica.

Finalmente, esta investigación reconoce el apoyo financiero otorgado a través del "Concurso de subvenciones económicas a favor de graduados y estudiantes de pregrado para el desarrollo de actividades académicas y de investigación UNASAM-2024", de la Dirección del Instituto de Investigación (DII) y el Vicerrectorado de Investigación (VRI) de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM).

RESUMEN

Los agujeros de crioconita, depresiones llenas de agua sobre la superficie de los glaciares, constituyen ecosistemas únicos de biodiversidad. Sin embargo, la fauna de macroinvertebrados que habita estos microhábitats en los Andes tropicales permanece en gran parte inexplorada, a pesar de la acelerada amenaza que representa el retroceso glaciar inducido por el cambio climático. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la relación entre la comunidad de macroinvertebrados y las características físicas, químicas y morfométricas de los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, en la cordillera Blanca, Perú. Se realizó un muestreo en 25 agujeros de crioconita distribuidos en cinco zonas de la zona de ablación del glaciar, donde se caracterizó la comunidad de macroinvertebrados y se midieron las variables ambientales. Los resultados revelaron una comunidad de baja diversidad, con una estructura de dominancia extrema del quironómido del género *Parochlus*, presente en el 100% de las muestras y constituyendo más del 89% de la abundancia relativa. Taxones como *Cricotopus* sp. y colémbolos (orden Poduromorpha) fueron componentes secundarios o accidentales. El entorno abiótico mostró una notable heterogeneidad espacial, con estabilidad térmica (media de 1.07 °C) pero amplias variaciones en conductividad eléctrica (1.0-62.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y materia orgánica (1.38-10.31%). El análisis multivariado identificó gradientes de mineralización y alcalinidad que estructuran este sistema aparentemente homogéneo en distintos tipos funcionales de microhábitats. La morfometría mostró una relación inversa significativa con la altitud, donde los agujeros de mayor tamaño y volumen se localizaron en las cotas más bajas. Los análisis de regresión indicaron que las variables ambientales individuales son predictores débiles de la diversidad. No obstante, el análisis de componentes principales fue clave, revelando una estructura jerárquica con el 57.1% de la varianza total explicada, donde el gradiente altitudinal emergió como un filtro ambiental fundamental. Se concluye que la comunidad está estructurada por la interacción de gradientes ambientales complejos más que por respuestas lineales a factores abióticos específicos. Estos hallazgos demuestran la adaptación extremófila de la fauna local, pero subrayan su alta vulnerabilidad ante la inminente pérdida de hábitat.

Palabras clave: cambio climático, crioconita, glaciares tropicales. gradiente altitudinal, macroinvertebrados, *Parochlus*,

ABSTRACT

Cryoconite holes, water-filled depressions on the surface of glaciers, are unique ecosystems rich in biodiversity. However, the macroinvertebrate fauna inhabiting these microhabitats in the tropical Andes remains largely unexplored, despite the accelerating threat posed by glacial retreat induced by climate change. This research aimed to evaluate the relationship between the macroinvertebrate community and the physical, chemical, and morphometric characteristics of cryoconite holes on the Artesonraju glacier in the cordillera Blanca, Peru. Sampling was carried out in 25 cryoconite holes distributed across five areas of the glacier's ablation zone, where the macroinvertebrate community was characterized and environmental variables were measured. The results revealed a community of low diversity, with an extreme dominance of chironomids of the genus *Parochlus*, present in 100% of the samples and constituting more than 89% of the relative abundance. Taxa such as *Cricotopus* sp. and springtails (order Poduromorpha) were secondary or accidental components. The abiotic environment showed remarkable spatial heterogeneity, with thermal stability (mean of 1.07 °C) but wide variations in electrical conductivity (1.0-62.0 µS/cm) and organic matter (1.38-10.31%). Multivariate analysis identified mineralization and alkalinity gradients that structure this apparently homogeneous system into different functional types of microhabitats. Morphometry showed a significant inverse relationship with altitude, with larger holes and greater volume located at lower elevations. Regression analyses indicated that individual environmental variables are weak predictors of diversity. However, principal component analysis was key, revealing a hierarchical structure with 57.1% of the total variance explained, where the altitudinal gradient emerged as a fundamental environmental filter. It is concluded that the community is structured by the interaction of complex environmental gradients rather than by linear responses to specific abiotic factors. These findings demonstrate the extremophile adaptation of the local fauna, but underscore its high vulnerability to imminent habitat loss.

Keywords: climate change, cryoconite, tropical glaciers, altitudinal gradient, macroinvertebrates, *Parochlus*.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	xii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Hipótesis.....	5
1.4. Variables	5
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes	8
2.2. Bases teóricas.....	12
2.3. Definición de términos básicos.....	26
CAPÍTULO III	
MARCO METODOLÓGICO.....	28
3.1. Tipo de investigación.....	28
3.2. Diseño de investigación	29
3.3. Métodos y técnicas de investigación.....	29



3.4. Población y muestra	34
3.4.1. Población	34
3.4.2. Tipo de muestreo	34
3.4.3. Unidad de análisis o muestra	35
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos e información	36
3.6. Plan de procesamiento y análisis de los datos e información	37
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS	41
4.1. Caracterización de la comunidad de macroinvertebrados	41
4.2. Determinación de los parámetros físicos, químicos y de sedimento.....	52
4.3. Determinación de la morfometría de los agujeros de crioconita	68
4.4. Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los parámetros abióticos.....	78
CAPÍTULO V	
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	94
5.1. Caracterización de la comunidad de macroinvertebrados	94
5.2. Determinación de los parámetros físicos, químicos y de sedimento.....	96
5.3. Determinación de la morfometría de los agujeros de crioconita	99
5.4. Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los parámetros abióticos.....	101
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
6.1. Conclusiones.....	106
6.2. Recomendaciones.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS.....	121



LISTA DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de las variables de estudio	6
Tabla 2 Métodos de análisis de laboratorio de los análisis del agua y de sedimento	32
Tabla 3 Coordenadas UTM y altitud de los puntos de muestreo	36
Tabla 4 Técnicas e instrumentos de la recolección de datos e información	37
Tabla 5 Grado de relación según coeficiente de correlación de Spearman y Pearson	39
Tabla 6 Abundancia de macroinvertebrados por punto de muestreo y estadio de desarrollo	41
Tabla 7 Índices de diversidad de macroinvertebrados por punto de muestreo	45
Tabla 8 Abundancia relativa (%) de macroinvertebrados por punto de muestreo	49
Tabla 9 Resumen del cálculo de la frecuencia relativa	51
Tabla 10 Parámetros físicos del agua de los agujeros de crioconita	52
Tabla 11 Parámetros químicos del agua de los agujeros de crioconita	55
Tabla 12 Parámetros químicos adicionales del agua de los agujeros de crioconita	57
Tabla 13 Resumen de los datos del análisis de sedimento de laboratorio	58
Tabla 14 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para variables fisicoquímicas	60
Tabla 15 Variables físicas, químicas y de sedimento por zona de muestreo	63
Tabla 16 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para variables fisicoquímicas y de sedimento	63
Tabla 17 Tabla de cargas (loadings) del PCA.....	65
Tabla 18 Parámetros morfométricos de los agujeros de crioconita	68
Tabla 19 Resumen de los resultados de Shapiro Wilk.....	70
Tabla 20 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para variables ambientales y de diversidad	78
Tabla 21 Coeficientes del modelo de regresión lineal para la riqueza S	82
Tabla 22 Coeficientes del modelo de regresión lineal para el índice H'	84
Tabla 23 Coeficientes del modelo de regresión lineal para el índice de índice 1-D.....	86



Tabla 24 Coeficientes del modelo de regresión lineal para el índice D_{Mg} 88

Tabla 25 Cargas de las variables en los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2) y su nivel de contribución 92



LISTA DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura 1 Abundancia de <i>Parochlus</i> sp. por punto de muestreo según estadio ontogenético	43
Figura 2 Abundancia de <i>Cricotopus</i> sp. por punto de muestreo según estadio ontogenético	43
Figura 3 Abundancia de <i>Poduromorpha</i> por punto de muestreo según estadio ontogenético	44
Figura 4 Valores de los índices de diversidad por punto de muestreo	47
Figura 5 Boxplot de la riqueza S, índice DMg, índice H' e índice 1-D	48
Figura 6 Análisis comparativo de la riqueza S y el índice H' por punto de muestreo	48
Figura 7 Comparación de temperatura entre zonas de muestreo	53
Figura 8 Comparación de CE entre zonas de muestreo	54
Figura 9 Comparación de TDS entre zonas de muestreo	54
Figura 10 Comparación de pH entre zonas de muestreo	56
Figura 11 Comparación de OD entre zonas de muestreo	56
Figura 12 Boxplot de MO presente en el sedimento	59
Figura 13 Boxplot de metales (Ca, Mg y K) presente en el sedimento	59
Figura 14 Boxplot de granulometría por zona de muestreo	60
Figura 15 Matriz de correlación de Spearman entre variables fisicoquímicas	61
Figura 16 Relación entre temperatura y OD	62
Figura 17 Correlación de Pearson entre variables fisicoquímicas y de sedimento	64
Figura 18 PCA – Biplot con variables fisicoquímicas y de sedimento por zona de muestreo	65
Figura 19 PCA – Biplot con variables fisicoquímicas y de color de sedimento	67
Figura 20 Correlación entre dimensiones (largo, ancho, profundidad) con el volumen/área por método	71

Figura 21 Relaciones lineales entre las dimensiones y el área/volumen de los agujeros de crioconita	72
Figura 22 Comparación de área entre métodos	73
Figura 23 Comparación de volumen entre métodos.....	74
Figura 24 Distribución del área de los agujeros de crioconita	75
Figura 25 Distribución de los agujeros de crioconita según área y volumen.....	76
Figura 26 Relación entre área y volumen con la altitud.....	77
Figura 27 Relación en 3D entre área y volumen con la altitud	77
Figura 28 Correlación de Spearman entre índices de diversidad y variables ambientales	79
Figura 29 Importancia de variables predictoras (valor t absoluto).....	83
Figura 30 Regresión lineal de la riqueza s: valores observados vs predichos	83
Figura 31 Importancia de variables predictoras (valor t absoluto).....	85
Figura 32 Regresión lineal del índice H': valores observados vs predichos	86
Figura 33 Importancia de variables predictoras (valor t absoluto).....	87
Figura 34 Regresión lineal del índice 1-D: valores observados vs predichos	88
Figura 35 Importancia de variables predictoras (valor t absoluto).....	90
Figura 36 Regresión lineal del índice D_{Mg} : valores observados vs predichos	90
Figura 37 Biplot del PCA con agrupamiento k-means por características ambientales ..	91

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACRÓNIMO	DENOMINACIÓN
CE	Conductividad Eléctrica
INAIGEM	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña
PAST	Paleontological Statistics
PCA	Análisis de Componentes Principales
pH	Potencial de Hidrógeno
OD	Oxígeno Disuelto
OTUs	Unidades Taxonómicas Operacionales
TDS	Sólidos Totales Disueltos
UNASAM	Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Durante muchas décadas, los glaciares y las capas de hielo fueron considerados ambientes biológicamente inertes o estériles (Cook et al., 2016; Stibal et al., 2020). Sin embargo, esta perspectiva ha experimentado una transformación radical en las últimas décadas, evolucionando de un paradigma abiótico a uno biótico (Anesio y Laybourn, 2012; Cook et al., 2016). Esta transformación ha llevado al reconocimiento formal de estos sistemas como un bioma terrestre por derecho propio que abarca aproximadamente el 10% de la superficie del planeta (Anesio y Laybourn, 2012). Esta nueva conceptualización los identifica como los biomas más fríos de la Tierra, pero paradójicamente también como focos dinámicos de actividad biológica y reservorios únicos de biodiversidad especializada en organismos psicrófilos (Anesio y Laybourn, 2012; Stibal et al., 2020).

El bioma glaciar alberga una sorprendente diversidad de formas de vida que incluye virus, procariotas y eucariotas (Hodson et al., 2008). Estos organismos están adaptados a condiciones extremas caracterizadas por temperaturas permanentemente bajas, una marcada estacionalidad y alta exposición a radiación ultravioleta (UV) (Gunde-Cimerman et al., 2003; Hodson et al., 2008). La actividad biológica que ocurre en las superficies glaciares, combinada con la meteorización de minerales, confiere a estos ecosistemas un papel significativo en los ciclos biogeoquímicos globales (Bagshaw et al., 2013; Stibal et al., 2012). Irónicamente, ha sido su marcada vulnerabilidad al cambio climático lo que ha intensificado el interés científico, transformando la antigua percepción de desiertos de hielo hacia el reconocimiento de su notable complejidad ecológica (Edwards et al., 2011; Hodson et al., 2008).

La mayor parte de esta actividad biológica se concentra en la zona supraglacial, que es la interfaz entre el hielo y la atmósfera, que constituye el ambiente más activo y productivo del ecosistema glaciar (Cook et al., 2016; Hodson et al., 2008). En esta

superficie, la interacción entre polvo mineral, material orgánico y microorganismos transportados por el viento genera la formación de un sedimento oscuro conocido como crioconita (del griego *kryos*, frío y *konis*, polvo) (Cook et al., 2016; Hodson et al., 2008). Este material es un sedimento complejo, compuesto por partículas minerales, materia orgánica y una comunidad viva de microorganismos que incluye bacterias, algas, hongos y microinvertebrados (Edwards et al., 2014; Rozwalak et al., 2022; Wharton et al., 1985).

La crioconita reduce drásticamente el albedo de la superficie del hielo, lo que incrementa la absorción de energía solar y consecuentemente provoca el derretimiento diferencial del hielo subyacente (Hodson et al., 2008; Wharton et al., 1985). Este proceso crea estructuras únicas conocidas como agujeros de crioconita, que son depresiones cuasi cilíndricas llenas de agua que, junto con arroyos, estanques y lagunas supraglaciares, forman un mosaico de hábitats acuáticos que sustentan la vida en la superficie del glaciar (Hodson et al., 2008; Winkel et al., 2022).

Los agujeros de crioconita son verdaderos puntos calientes (*hotspots*) de biodiversidad, siendo considerados los ambientes con mayor actividad biológica, diversidad y productividad dentro del ecosistema glaciar (Cook et al., 2016; Franzetti et al., 2017; Stibal et al., 2020; Zawierucha et al., 2015). Actúan como biorreactores productores de materia orgánica que sostienen redes tróficas relativamente complejas, con productores primarios (cianobacterias, algas), consumidores (bacterias heterótrofas, microinvertebrados) y descomponedores (hongos, levaduras), todos adaptados a condiciones extremas con temperaturas cercanas a 0 °C (Cook et al., 2016; Hodson et al., 2008; Zawierucha et al., 2020). En muchos casos, la producción primaria neta excede la respiración comunitaria, lo que sugiere que estos hábitats pueden ser ecosistemas autótrofos netos, fijando el CO₂ atmosférico y participando activamente en los ciclos del carbono y nitrógeno (Anesio et al., 2009; Hodson et al., 2008; Säwström et al., 2002).

La fauna de invertebrados en estos ecosistemas exhibe una diversidad notable que incluye representantes de cinco filos principales: Rotifera, Nematoda, Annelida, Tardigrada y Arthropoda, identificados en glaciares alpinos, antárticos, árticos e himalayos (Zawierucha et al., 2015). La colonización ocurre principalmente a través del transporte eólico desde áreas proglaciares o ecosistemas distantes (Zawierucha et al., 2019a). Entre los artrópodos documentados se incluyen dípteros (especialmente larvas de Chironomidae), plecópteros, y particularmente colémbolos (Buda et al., 2020a).

Esta investigación buscó evaluar la relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju y se estructura en las siguientes

secciones: Introducción; Marco teórico; Marco metodológico; Resultados, Discusión de resultados; Conclusiones; Recomendaciones y Referencias. Así mismo, se presentan los Anexos más resaltantes de la investigación.

1.1. Planteamiento y formulación del problema

A pesar de su importancia en la biosfera global, el estudio de la biota asociada a la crioconita presenta dos sesgos significativos que limitan el conocimiento ecológico. Primero, un sesgo taxonómico: la investigación se ha enfocado predominantemente en la diversidad microbiana (bacterias, algas, cianobacterias), mientras que los invertebrados, a pesar de funcionar como consumidores y depredadores clave, han sido frecuentemente ignorados (Zawierucha et al., 2015). Segundo, un sesgo geográfico: la literatura se concentra mayormente en glaciares polares (Ártico y Antártico), dejando rezagados los estudios sobre glaciares alpinos y, de manera crítica, los glaciares tropicales de alta montaña (Cook et al., 2016; Pittino et al., 2023).

Esta carencia de información es particularmente alarmante en el contexto sudamericano, donde se concentra casi el 99% de los glaciares tropicales mundiales (INAIGEM, 2023). A la fecha, no existen estudios publicados sobre las comunidades de macroinvertebrados en los agujeros de crioconita de los glaciares andinos, constituyendo una laguna significativa considerando que los Andes albergan la red glaciar tropical más extensa del mundo, y documentar esta biota es crucial, ya que podría poseer adaptaciones únicas y rasgos biogeográficos distintivos, encontrándose bajo seria amenaza ante el retroceso glaciar acelerado por el cambio climático (Crosta et al., 2025; Stibal et al., 2020).

El cambio climático actual confiere una urgencia crítica a esta brecha de conocimiento. Los glaciares experimentan reducciones masivas a escala global, siendo los tropicales particularmente vulnerables, sensibles a las variaciones climáticas y excelentes indicadores del calentamiento global (Zawierucha y Shain, 2019; Francou, 2013). Esta situación se manifiesta de forma crítica en la cordillera Blanca peruana, la cadena montañosa nevada más extensa de la zona tropical (Palacios, 2021) la cual ha registrado una pérdida de superficie glaciar del 41.50% en las últimas seis décadas, constituyendo una de las tasas de retroceso más altas documentadas para glaciares tropicales (INAIGEM, 2023). Esta alarmante tendencia se verifica también en el glaciar Artesonraju, el cual evidenció una reducción

volumétrica del 30% durante un periodo de cuarenta años, con una tasa promedio de pérdida de masa de 0.6 metros de agua equivalente por año (Rabatel et al., 2013).

Esta desglaciación acelerada representa una amenaza inminente para la biodiversidad glaciar, con pérdida de hábitat y riesgo real de que numerosos taxones criófilos especializados desaparezcan antes de ser descritos, catalogados o comprendidos ecológicamente (Gobbi et al., 2006; Pittino et al., 2023; Stibal et al., 2020). La pérdida de estos hábitats únicos implicaría no solo la extinción de especies altamente especializadas, sino también la desaparición de un valioso acervo genético adaptado al frío, incluyendo organismos con potencial biotecnológico, enzimas activas en frío, proteínas anticongelantes y metabolitos especializados con aplicaciones en biotecnología industrial, medicina y desarrollo de biomateriales (Anesio y Laybourn, 2012; Singh et al., 2014). Frente a este escenario de pérdida acelerada, se hace imperativo caracterizar estas comunidades inexploradas y comprender los factores que estructuran su funcionamiento.

La presente investigación aborda directamente este vacío, planteando como problema central: ¿Cuál es la relación entre la comunidad de macroinvertebrados y las características de los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, en la Cordillera Blanca, durante 2024?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca, 2024.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la comunidad de macroinvertebrados en la zona de ablación del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca.
- Determinar los parámetros físicos, químicos y de sedimento en los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca.
- Determinar la morfometría de los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca.
- Analizar la relación de la comunidad de macroinvertebrados y los parámetros físicos, químicos y morfométricos de los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca.

1.3. Hipótesis

Existe una relación significativa entre la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca, 2024.

Se predice que las características de los agujeros de crioconita, como los parámetros físicos, químicos y morfológicos influirán en la riqueza y diversidad de la comunidad de macroinvertebrados que habitan en ellos. Esta hipótesis implica que las características mencionadas de los agujeros de crioconita tendrán una clasificación significativa (positiva o negativa) con la abundancia de ciertos grupos de macroinvertebrados.

1.4. Variables

1.4.1. Variable independiente

La variable independiente estuvo constituida por los agujeros de crioconita.

1.4.2. Variable dependiente

La variable dependiente estuvo constituida por la comunidad de macroinvertebrados.

1.4.3. Definición operacional de las variables

En la Tabla 1 se presenta la operacionalización de las variables.

Tabla 1

Operacionalización de las variables de estudio

Variables	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Escala de medición
Independiente					
Agujeros de crioconita	Depresiones que se forman en la superficie glaciar debido a la acumulación de sedimentos orgánicos e inorgánicos, conformando microhábitats únicos dentro del ambiente glaciar.	Parámetros físicos	Temperatura	°C	Cuantitativa de intervalo
			Conductividad eléctrica	μS/cm	Cuantitativa de razón
			Sólidos totales disueltos	mg/l	Cuantitativa de razón
			pH	-	Cuantitativa de intervalo
		Parámetros químicos	Oxígeno disuelto	mg/l	Cuantitativa de razón
			Nitrógeno total	mg/l	Cuantitativa de razón
			Fosfato	mg/l	Cuantitativa de razón
			Largo	cm	Cuantitativa de razón
			Ancho	cm	Cuantitativa de razón
			Profundidad	cm	Cuantitativa de razón
Parámetros morfométricos	Área	cm ²	Cuantitativa de razón		
	Volumen	cm ³	Cuantitativa de razón		

			Media del tamaño granular	mm	Cualitativa nominal
			Color	-	Cualitativa nominal
	Sedimento		Materia orgánica	%MO	Cuantitativa de razón
			Minerales (calcio total, magnesio total y potasio total)	mg/l	Cuantitativa de razón
Dependiente					
			Frecuencia relativa	%	Cuantitativa de razón
			Abundancia relativa	%	Cuantitativa de razón
Comunidad de macroinvertebrados	Conjunto de organismos invertebrados macroscópicos, cuya presencia, abundancia y diversidad posiblemente se ven influenciadas por las características de los agujeros de crioconita.	Índices de biodiversidad	Riqueza específica (S)	-	Cuantitativa de razón
			Índice de Shannon-Wiener (H')	-	Cuantitativa de razón
			Índice de Simpson (1-D)	-	Cuantitativa de razón
			Índice de Margalef (D _{Mg})	-	Cuantitativa de razón

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Internacionales

López (2022) en su investigación *Caracterización ecológica de diatomeas en crioconitas del glaciar Norte del volcán Cotopaxi*, analizó la comunidad de diatomeas en el glaciar del volcán Cotopaxi, Ecuador. El estudio analizó 35 muestras de agujeros de crioconita recolectadas en la zona noreste del volcán, en un rango altitudinal de 4902 a 5097 m s.n.m. Se realizaron mediciones de variables abióticas y la caracterización taxonómica se llevó a cabo mediante métodos estándar. Se evaluaron variables morfométricas y fisicoquímicas, registrando rangos como: área (15-2620 cm²), volumen (15-55020 cm³), profundidad (3-23 cm), temperatura (-3 a -4 °C), pH (6.68-8.23) y conductividad (2-6 µS/cm). Mediante el análisis multivariante, incluyendo un modelo de regresión lineal generalizado (GLM), el estudio concluyó que la abundancia de la comunidad de diatomeas respondía en mayor grado a las variables morfométricas (como el área y el volumen) que a las fisicoquímicas. Sin embargo, se identificó que la elevación y la radiación solar al interior de los agujeros eran los factores clave que influenciaban la diversidad y riqueza de las especies.

Fair et al. (2020) llevaron a cabo la investigación *Physical, chemical and biological characteristics of supraglacial pools on a debris-covered glacier in Mt. Gongga, Tibetan Plateau*. Muestrearon 46 pozas supraglaciales durante 2018 y 2019, donde se midieron variables físicas (área, profundidad, tamaño del sustrato), químicas

(temperatura, conductividad, pH) y del paisaje glaciar. Los macroinvertebrados se recolectaron con redes de inmersión de malla 750-800 μm , y los análisis emplearon modelos lineales generalizados (GLM) y el Criterio de Información de Akaike (AICc). Las pozas en este glaciar cubierto de detritos presentaron características distintivas comparadas con agujeros de crioconita de glaciares limpios: área media de 3539 cm^2 , profundidad de 42 cm, sustratos más heterogéneos (tamaño medio de grano de 12.5 mm), temperatura de 0.70 $^{\circ}\text{C}$, conductividad de 20.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH de 7.76. Biológicamente, se encontraron larvas de Chironomidae (18/46 pozas) e Isotomidae (23/46 pozas). La conductividad (con relación negativa) fue el mejor predictor de presencia y abundancia de Isotomidae y macroinvertebrados en general, mientras que ninguna de las trece variables medidas explicó la presencia de Chironomidae. Se concluyó que estas pozas son ecosistemas únicos y que la conductividad es un factor clave y novedoso para predecir su fauna.

Araya (2020) realizó el estudio *Microalgas (diatomeas) del glaciar Antisana como bioindicadores de alerta temprana sobre el cambio climático*, enfocándose en las diatomeas como bioindicadores. Su propósito fue caracterizar estas comunidades en agujeros de crioconita a lo largo de la gradiente altitudinal del glaciar Antisana (4700 a 5200 ms.n.m.), para indicar el derretimiento acelerado. Durante 6 meses, se recolectaron 54 muestras, donde se confirmó la presencia de diatomeas. Se registraron parámetros fisicoquímicos que indicaron condiciones de agua pura (nitritos y nitratos en 0 mg/l) con rangos de: conductividad de 0 a 9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, temperatura de 1.39 a 2.58 $^{\circ}\text{C}$, pH de 6.04 a 8.61 y saturación de oxígeno disuelto de 23 % a 77 %. Los resultados mostraron que la abundancia de diatomeas no estaba relacionada con el volumen de las crioconitas (volumen medio de 6581.97 cm^3). El análisis de la comunidad reveló baja diversidad, como es esperado en hábitats extremos (índice de Shannon-Wiener $H' = 1.147$) y alta dominancia (índice de Simpson $\lambda = 0.185$).

Zawierucha et al. (2020) condujeron la investigación *A hole in the nematosphere: tardigrades and rotifers dominate the cryoconite hole environment, whereas nematodes are missing*. Analizaron muestras de crioconita de 42 glaciares a nivel global. Los resultados demostraron que, aunque los agujeros de crioconita acumulan altos niveles de materia orgánica y son puntos calientes de biodiversidad, la diversidad faunística general es muy baja. La comunidad de microinvertebrados estuvo dominada por tardígrados y rotíferos, con una notable ausencia de nemátodos. El estudio documentó la presencia de macroinvertebrados, pero estos mostraron distribuciones geográficas muy restringidas y endémicas. Los ejemplos clave incluyen

Plecóptera (*Andiperla willinki*) en Patagonia, Díptera en Nueva Zelanda e Himalaya, y Acari (*Nanorchestes nivalis*) en la Antártida. Los colémbolos (Collembola) se consideraron elementos alóctonos (arrastrados pasivamente) y no residentes del bentos. Los autores concluyeron que la baja diversidad animal no depende de la región biogeográfica o el tipo de glaciar, sino de severos factores de estrés que limitan la vida, independientemente de la morfometría de los agujeros. El factor principal es la temperatura permanentemente baja (media de 0.08 °C en el verano ártico), que suprime actividades vitales como la reproducción. Otros factores limitantes son la baja disponibilidad de nitrógeno y fósforo, y los cambios rápidos de oxígeno en el sedimento.

Buda et al. (2020b) condujeron la investigación *Biotope and biocenosis of cryoconite hole ecosystems on Ecology Glacier in the maritime Antarctic*, muestrearon 23 agujeros de crioconita en el glaciar Ecology (Isla Rey Jorge, Antártida Marítima) durante el verano austral de 2017. Midieron variables de profundidad, diámetro, contenido de materia orgánica, radionucleidos, biomasa de productores primarios y densidad de invertebrados. Los agujeros presentaron una profundidad media de 15.9 ± 4 cm y un diámetro medio de 10.0 ± 2.5 cm, donde los agujeros a menor altitud fueron más profundos. El contenido de materia orgánica osciló entre 5.4 % y 7.6 % (mediana = 6.72 %), sin correlación significativa con altitud o profundidad. La comunidad estuvo dominada por diatomeas, cuya biomasa fue significativamente mayor que la de cianobacterias y algas verdes. Se registraron tres especies de rotíferos, mientras que no se encontraron tardígrados. La biodiversidad fue relativamente baja (4 a 10 especies por agujero de crioconita), caracterizada por extremófilos adaptados al frío extremo, ciclos de deshielo/congelación y alta radiación UV. Los radionucleidos artificiales (Plomo-210) presentaron concentraciones 2-3 veces superiores a las de musgos y líquenes circundantes.

Zawierucha et al. (2016) condujeron la investigación *Area, depth and elevation of cryoconite holes in the Arctic do not influence Tardigrada densities*. Recolectaron 48 muestras de crioconita de los glaciares, midiendo las características físicas de los agujeros (área, profundidad, elevación) y cuantificando la densidad de tardígrados por gramo de sedimento. Los agujeros presentaron morfometría altamente variable: área media de 1287.21 ± 2400.8 cm², profundidad media de 10.8 ± 11.2 cm, y elevación media de 172.6 ± 109.66 ms.n.m. Los resultados mostraron que, aunque los tardígrados estaban presentes en el 87.5 % de las muestras (identificándose cinco taxones, incluyendo *Hypsibius dujardini*), el modelo estadístico no pudo explicar la

variación en su densidad basándose en el área, la profundidad o la elevación de los agujeros ($p = 0.54$, $R^2 = 0.059$). La conclusión principal fue que las características físicas de los agujeros de crioconita no influyen en las densidades de tardígrados en el Ártico. Los autores atribuyen esta falta de correlación a la naturaleza dinámica de los ecosistemas supraglaciales árticos, donde el rápido derretimiento provoca un lavado y mezcla constantes de los sedimentos, alterando la estabilidad de los hábitats y haciendo que factores abióticos fijos sean menos determinantes que en entornos más estables.

Zawierucha et al. (2015) realizaron la investigación *What animals can live in cryoconite holes?* donde se exploró por primera vez de manera exhaustiva la fauna en los agujeros de crioconita de los glaciares alpinos, antárticos, árticos, del Himalaya y patagónicos. El estudio reveló que más de 25 especies de invertebrados pertenecientes a cinco filos diferentes: Rotífera, Anélida, Tardígrada, Nemátoda y Artrópoda coexisten en estos microhábitats. Los resultados indicaron variaciones geográficas en las relaciones tróficas, dentro de los agujeros de crioconita y resaltaron la complejidad de los ecosistemas. Además, se observaron adaptaciones específicas en la fauna, como la anabiosis y la producción de formas resistentes. La investigación subrayó la necesidad de profundizar en el estudio de la pigmentación de invertebrados glaciares debido a la radiación ultravioleta. Se enfatizó la importancia de mejorar la metodología taxonómica y de realizar un análisis más detallado de la biodiversidad en agujeros de crioconita para contribuir a la conservación de estos ecosistemas únicos y amenazados.

Nacionales

Hoyos (2019) condujo la investigación *Calidad del agua en función a los macroinvertebrados bentónicos y parámetros fisicoquímicos en el río Muyoc Grande, Miguel Iglesias, Celendín-2018*. El estudio, realizado entre octubre de 2018 y enero de 2019 en seis puntos de monitoreo, evaluó parámetros fisicoquímicos y la comunidad de macroinvertebrados bentónicos. Se recolectaron 1408 individuos pertenecientes a 11 órdenes y 18 familias, con predominancia de Díptera, Amphipoda y Lumbricina. Los índices bióticos (EPT y BMWP/Col) indicaron una calidad de agua que osciló entre pobre y crítica. El análisis de correlación reveló que el pH mostró una relación inversamente proporcional significativa ($r = -0.86$) con la abundancia de macroinvertebrados, influyendo negativamente en un 74.79 %. La temperatura también presentó correlación inversa, mientras que la conductividad eléctrica y la

altitud mostraron correlaciones positivas débiles. El oxígeno disuelto condicionó la dominancia de Chironominae, tolerante a bajos niveles de oxígeno. El autor concluyó que el río Muyoc Grande presenta una calidad de agua deficiente, principalmente por contaminación derivada de actividades antrópicas como ganadería, agricultura y vertimiento de aguas residuales domésticas.

Locales

Palacios (2021) en su estudio *Influencia del gradiente de cobertura glaciar de la cordillera Blanca en la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos, 2019-2020* examinó cómo la influencia glaciar afecta la biodiversidad acuática. Durante las épocas seca y húmeda, se recolectaron muestras de macroinvertebrados y se midieron parámetros fisicoquímicos en 11 puntos de las unidades hidrográficas de Parón, Huaytapallana y Llanganuco. El estudio confirmó que la riqueza de especies y los índices de diversidad (Margalef, Shannon-Wiener y Alpha de Fisher) fueron significativamente menores en corrientes con alto gradiente de cobertura glaciar (GCG). Los puntos con GCG alto presentaron condiciones más hostiles: bajas temperaturas, baja conductividad (8.83 a 61.84 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y menor diversidad local. La temperatura fue el parámetro con mayor influencia sobre la biodiversidad, mientras que el GCG se correlacionó negativamente con la riqueza e índices de diversidad. La composición taxonómica fue sensible al GCG, ya que en puntos con alto GCG predominaron individuos de la familia Chironomidae, mientras que en puntos con menor GCG predominaron las familias Simuliidae y Baetidae.

2.2. Bases teóricas

a. Ecosistema de glaciares

Históricamente considerados ambientes inertes, los glaciares y las capas de hielo han sido reconocidos recientemente como un bioma terrestre por derecho propio (Anesio y Laybourn, 2012). Estos ambientes, que representan uno de los biomas más fríos del planeta, son importantes focos de actividad biológica y albergan una biodiversidad única de organismos psicrófilos (amantes del frío) (Anesio y Laybourn, 2012; Stibal et al., 2020). La vida en estos ecosistemas está condicionada por temperaturas extremadamente bajas, una marcada estacionalidad, redes tróficas truncadas y una alta exposición a la radiación ultravioleta (UV), lo que exige adaptaciones fisiológicas notables en sus habitantes (Hodson et al., 2008; Zawierucha et al., 2020).

La actividad biológica en las superficies glaciares, junto con la meteorización de minerales, les confiere un papel crucial en los ciclos biogeoquímicos globales, especialmente los del carbono y el nitrógeno (Bagshaw et al., 2013; Stibal et al., 2012). La mayor parte de esta actividad biótica se concentra en la zona de ablación, donde la pérdida de hielo supera la ganancia, y cuya extensión tiende a aumentar a nivel mundial debido al cambio climático (Hodson et al., 2008).

b. El ambiente supraglacial y la formación de crioconita

La zona supraglacial es el entorno más productivo y biológicamente más activo de un glaciar (Hodson et al., 2008). En esta interfaz entre el hielo y la atmósfera, la deposición de polvo mineral, material orgánico y microorganismos transportados por el viento da lugar a la formación de un sedimento oscuro conocido como crioconita (Cook et al., 2016; Hodson et al., 2008). El término “crioconita”, que significa “polvo frío” (del griego *kryos*, frío y *konis*, polvo), fue acuñado por el explorador Nordenskjöld en 1879 (Cook et al., 2016).

La crioconita está compuesto por un consorcio de partículas minerales (como filosilicatos, cuarzo), materia orgánica y una comunidad viva de productores primarios (algas, cianobacterias) y consumidores (bacterias, microinvertebrados) (Edwards et al., 2014; Rozwalak et al., 2022). Debido a su color oscuro, la crioconita reduce el albedo (la capacidad de reflejar la radiación solar) de la superficie del hielo, absorbiendo eficazmente la radiación solar y acelerando el derretimiento (Hodson et al., 2008; Takeuchi, 2002). Este derretimiento localizado perfora depresiones en el hielo, creando los agujeros de crioconita, que son cavidades casi cilíndricas llenas de agua de deshielo (Hodson et al., 2008). Estos agujeros, junto con arroyos, estanques y lagunas supraglaciares, conforman un mosaico de hábitats acuáticos que sustentan la vida sobre el glaciar (Hodson et al., 2008; Winkel et al., 2022).

c. Los agujeros de crioconita

Los agujeros de crioconita son depresiones casi cilíndricas que se forman en las superficies de hielo de glaciares en diversas regiones globales, incluyendo zonas polares (Ártico y Antártida) y de alta montaña (Alpes, Himalaya, Patagonia y Andes) (Cook et al., 2016; Zawierucha et al., 2020). Si bien su diámetro y profundidad varían desde milímetros hasta decenas de centímetros (Mueller et al., 2001), los agujeros de crioconita pueden fusionarse

y expandir sus dimensiones en respuesta a la dinámica climática (Mueller et al., 2001).

Wharton et al. (1985) conceptualizaron estos agujeros como ecosistemas individuales con límites definidos, un flujo de energía y ciclos de nutrientes definidos. Normalmente, durante los periodos de invierno, el agua en estos agujeros suele permanecer congelada (Poniecka, 2020), pero con el deshielo primaveral, se libera agua líquida y nutrientes esenciales (Hodson et al., 2008; Mueller et al., 2001). Estos nutrientes provienen de la disolución mineral del sedimento, la deposición atmosférica y la descomposición de material orgánico (Mueller et al., 2001; Porazinska et al., 2004). La vida inicia cuando las algas y cianobacterias comienzan la fotosíntesis, sirviendo de base a una red trófica compuesta principalmente por microorganismos (Anesio et al., 2009; Hodson et al., 2008). Finalmente, la microflora y la microfauna son descompuestas por la acción de bacterias heterótrofas y probablemente hongos (Mueller et al., 2001; Porazinska et al., 2004). Hacia el final del verano, el derretimiento continuo puede provocar el drenaje o lavado del agujero, y su expansión horizontal puede resultar en la formación de depresiones amplias o lagunas a través de la fusión de agujeros de crioconita adyacentes (Mueller et al., 2001; Takeuchi et al., 2000).

Los agujeros de crioconita son considerados los ambientes con mayor diversidad, actividad y productividad biológica dentro del ecosistema glaciar (Cook et al., 2016; Stibal et al., 2020; Zawierucha et al., 2015). Estos funcionan como "puntos calientes" de biodiversidad (*hotspots*) y biorreactores que sustentan redes tróficas truncadas pero funcionalmente completas (Hodson et al., 2008). Estas redes están compuestas por productores primarios (cianobacterias y algas), consumidores (bacterias heterótrofas, protozoos y microinvertebrados como tardígrados y rotíferos) y descomponedores (hongos y levaduras) (Cook et al., 2016; Zawierucha et al., 2020). Toda esta biota está adaptada a condiciones extremas con temperaturas estables cercanas a 0 °C y ciclos frecuentes de congelación-descongelación (Zawierucha et al., 2020).

La productividad primaria de estos sistemas es notable, ya que la fotosíntesis, impulsada principalmente por cianobacterias filamentosas, a menudo supera la respiración de la comunidad (Anesio et al., 2009; Säwström et al., 2002). Esto permite que los agujeros de crioconita se comporten como

sumideros netos de CO₂ atmosférico y acumulen materia orgánica (Anesio et al., 2009; Hodson et al., 2008). Además de su rol en el ciclo del carbono, estos ecosistemas son sitios activos de fijación biológica de nitrógeno (Hodson et al., 2008; Telling et al., 2011) y actúan como reservorios de contaminantes atmosféricos, como metales pesados (Hodson et al., 2008; Łokas et al., 2016).

En los agujeros de crioconita coexisten varios grupos de organismos, Charlesworth (1957) indicó que los agujeros de crioconita pueden albergar algas, rotíferos, polen e incluso insectos. Se presume que la inoculación de microorganismos en los agujeros de crioconita proviene principalmente de fuentes acuáticas circundantes y distantes a través del transporte eólico (Cook et al., 2016), lo que genera variaciones regionales en la composición de especies (Zawierucha et al., 2015).

d. Comunidades de macroinvertebrados en ecosistemas glaciares

Mientras que la microfauna (como tardígrados y rotíferos) es un componente bien conocido de la crioconita (Mueller et al., 2001; Zawierucha et al., 2015), el estudio de la presencia y ecología de los macroinvertebrados en estos ambientes es un campo más reciente (Buda et al., 2020a). Las superficies glaciares y los agujeros de crioconita pueden ser colonizados por diversos invertebrados criofílicos, convirtiéndose en puntos calientes de biodiversidad local (Kohshima, 1984; Shain et al., 2001).

La colonización de estos hábitats ocurre principalmente por transporte eólico, con propágulos provenientes tanto de áreas proglaciares adyacentes como de ecosistemas más distantes (Zawierucha et al., 2019b). Diversos estudios en glaciares de variadas regiones han reportado la presencia de múltiples órdenes de artrópodos, incluyendo Dípteros (especialmente larvas de Chironomidae), Coleópteros, Himenópteros, Plecópteros y Colémbolos (Buda et al., 2020a; Kohshima, 1984; Takeuchi et al., 2000; Zawierucha et al., 2015).

Dentro de la red trófica de la superficie glaciar, los colémbolos (como *Vertagopus glacialis*) actúan como consumidores primarios clave, alcanzando a veces densidades extremadamente altas (Buda et al., 2020a). Estos organismos se alimentan de crioconita, algas y polen (Jaroměřská et al., 2023; Kopeszki, 2000). Notablemente, el colémbolo *Desoria calderonis* se considera un indicador de condiciones térmicas frías y de la presencia de hielo subsuperficial (Valle et al., 2022). La red trófica también incluye detritívoros,

como larvas de quironómidos y oligoquetos (Enchytraeidae), que procesan la materia orgánica (Sint et al., 2019), así como depredadores, como escarabajos carábidos (*Nebria castanea*) y arañas lobo (*Pardosa saturator*), que se alimentan de colémbolos (Gobbi et al., 2006).

La supervivencia en este entorno extremo exige adaptaciones específicas, como la tolerancia a la congelación (anabiosis), ciclos de vida rápidos y pigmentación oscura para la protección contra la radiación UV (Zawierucha et al., 2015, 2020). Por lo tanto, se espera que la composición y estructura de estas comunidades de macroinvertebrados reflejen directamente la heterogeneidad y las condiciones únicas de los microhábitats, como los que ofrecen los agujeros de crioconita (Cook et al., 2016; Zawierucha et al., 2019b).

e. Biodiversidad y redes tróficas en los agujeros de crioconita

La base de la red trófica: microorganismos y nutrientes

Los agujeros de crioconita contienen una variedad de microorganismos como arqueas, bacterias, hongos microscópicos y microalgas (incluyendo cianobacterias), que son esenciales en el ciclo biogeoquímico de nutrientes clave como el carbono, fósforo y nitrógeno (Hodson et al., 2008; Mueller et al., 2001; Stibal et al., 2012).

- Producción primaria y carbono: las cianobacterias filamentosas (ej. *Leptolyngbya*, *Phormidium*) son los productores primarios más abundantes a nivel global (Porazinska et al., 2004; Vonnahme, 2014). Dependiendo de factores como la luz, el pH y la estabilidad hidrológica, los agujeros de crioconita pueden actuar como sumideros o fuentes netas de CO₂ atmosférico (Anesio et al., 2009; Pittino et al., 2023; Stibal et al., 2012).
- Ciclo de nutrientes: las bacterias heterótrofas (como las Proteobacterias) son fundamentales para la disponibilidad de elementos (Hodson et al., 2008; Pittino et al., 2023). La capacidad de las cianobacterias para fijar N₂ atmosférico asegura la disponibilidad de nitrógeno (Telling et al., 2011). En contraste, el fósforo es universalmente reconocido como el principal nutriente limitante, ya que se encuentra ligado a los sedimentos (Vonnahme, 2014).

Consumidores: microinvertebrados

Estudios globales (Ártico, Antártida, Alpes, Himalaya, etc.) han identificado fauna en los agujeros de crioconita perteneciente a cinco filos principales:

Rotifera, Annelida, Tardigrada, Nematoda y Arthropoda (Zawierucha et al., 2015, 2020). De estos, los tardígrados y rotíferos son los microinvertebrados más comunes y ubicuos a nivel mundial, destacando por sus adaptaciones a condiciones criofílicas (Porazinska et al., 2004; Zawierucha et al., 2015). Estos metazoos, junto con ciliados y nanoflagelados, son los consumidores dominantes y ejercen un control descendente al actuar como depredadores, herbívoros o microbívoros, pastando sobre bacterias y microalgas y moldeando así la estructura de la comunidad (Mueller et al., 2001; Porazinska et al., 2004; Vonnahme et al., 2016).

Consumidores: macroinvertebrados

El espectro de consumidores se expande con los macroinvertebrados. Aunque su distribución geográfica es más limitada y a menudo son especies obligadas de glaciares (Zawierucha et al., 2015, 2020), ejercen un control significativo en sus respectivos ecosistemas:

- En la Patagonia, los plecópteros actúan como depredadores que consumen pequeños invertebrados como los colémbolos (Kohshima, 1984; Takeuchi y Kohshima, 2004).
- En el Himalaya y Asia, las larvas de quironómidos son consumidores detritívoros importantes (Takeuchi et al., 2000), e incluso se ha sugerido que influyen negativamente en la riqueza microbiana (Fair et al., 2020, 2024).
- En el Noroeste del Pacífico de Norteamérica, se encuentra el anélido gusano de hielo (*Mesenchytraeus solifugus*) (Zawierucha et al., 2015).

Además de los consumidores animales, se postula que los virus y fagos también ejercen un importante control descendente sobre las comunidades microbianas, influyendo en el reciclaje de carbono y nutrientes a través de la lisis celular (Cook et al., 2016; Hodson et al., 2008). Sin embargo, la escasa información sobre la cuantificación de estas interacciones subraya la necesidad urgente de investigaciones más detalladas (Cook et al., 2016; Zawierucha et al., 2015).

f. Factores abióticos que estructuran la vida en los agujeros de crioconita

La comunidad biológica que habita en los agujeros de crioconita es altamente sensible y está fuertemente influenciada por un complejo conjunto de variables ambientales (Pittino et al., 2023).

Parámetros morfométricos

La morfometría de los agujeros de crioconita es un factor determinante para la estabilidad del hábitat (Cook et al., 2016). Estas depresiones varían en sus dimensiones, con diámetros y profundidades que típicamente abarcan desde milímetros hasta decenas de centímetros (Cook et al., 2016; Mueller et al., 2001; Zawierucha et al., 2020). Aunque las profundidades típicas oscilan entre 1 y 30 cm, se han reportado que pueden superar los 60 cm (Cook et al., 2016; Hodson et al., 2008).

La profundidad del agujero esta controlada por un equilibrio energético y térmico (Fountain et al., 2008; McIntyre, 1984). Este se alcanza cuando la tasa de derretimiento en el fondo del agujero, impulsada por la radiación solar absorbida por el sedimento (McIntyre, 1984) iguala la tasa de ablación del hielo circundante (Fountain et al., 2008; Wharton et al., 1985). Los agujeros de crioconita más grandes y profundos se consideran hábitats más estables (Cook et al., 2016) y menos propensos a las fluctuaciones diarias y a eventos de drenaje, por lo que ofrecen un refugio más seguro para los organismos (Porazinska et al., 2004; Zawierucha et al., 2020).

Parámetros físicos

- **Temperatura:** es reconocida como uno de los parámetros físicos más determinantes e influyentes en ecosistemas acuáticos, ya que modifica la solubilidad de sustancias, influye en la velocidad de la actividad biológica, regula la absorción y disponibilidad de oxígeno disuelto y controla procesos como la precipitación de compuestos y la formación de depósitos (Barrenechea, 2001). En los agujeros de crioconita, las temperaturas permanentemente bajas representan el principal factor de estrés ambiental (Anesio y Laybourn, 2012; Hodson et al., 2008; Zawierucha et al., 2020).

Las temperaturas del agua permanentemente bajas en los agujeros de crioconita, oscilan típicamente entre 0.2 y 1.9 °C (Singh et al., 2014) y rara vez superan 1 °C (Fountain et al., 2008).

Estas condiciones térmicas extremas, caracterizadas por valores promedio de 0.08 °C con máximos de 0.22 °C en glaciares árticos durante el verano (Zawierucha et al., 2019c), suprimen actividades vitales básicas de la biota, como la reproducción, la eclosión de huevos y la búsqueda de alimento (Mueller et al., 2001; Zawierucha et al., 2020). Los ciclos diarios

de congelación-descongelación agravan este estrés térmico, con temperaturas máximas al mediodía (0.2-0.6 °C) y mínimas cercanas a la medianoche (-0.2 °C) (Vonnahme, 2014).

Cabe señalar que en el contexto de los agujeros de crioconita, las bajas temperaturas tienen una implicancia directa en el oxígeno disuelto, ya que la solubilidad del oxígeno es inversamente proporcional a la temperatura, permitiendo que el agua fría transporte más oxígeno (Roldán, 2012). Este parámetro se vuelve aún más relevante al considerar la altitud, donde la solubilidad del oxígeno también está relacionada inversamente con la presión parcial atmosférica de oxígeno, que disminuye con la altitud (Pittino et al., 2023).

Las bajas temperaturas características de estos ambientes (<2 °C) limitan la velocidad de crecimiento de productores primarios (Uehlinger et al., 2010), reducen la actividad microbiana y disminuyen las tasas de descomposición de materia orgánica (Rott et al., 2006), lo que repercute directamente en la disponibilidad de recursos alimenticios para los macroinvertebrados bentónicos y, consecuentemente, la composición de la comunidad, la abundancia y la riqueza específica de los macroinvertebrados se ven afectadas negativamente (Uehlinger et al., 2010). De hecho, a medida que decrece la influencia glaciaria en un curso de agua (y aumenta la temperatura), el número de taxa y la biomasa bentónica tienden a aumentar (Gobbi y Lencioni, 2020; Palacios, 2021).

- **Conductividad eléctrica (en adelante CE):** representa la capacidad de una solución acuosa para transportar corriente eléctrica, dependiendo de la presencia, concentración total, movilidad y valencia de los iones disueltos (Barrenechea, 2001). Este parámetro se relaciona directamente con la salinidad del agua y se expresa comúnmente en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Roldán, 2012). Para los limnólogos, la CE (junto con el pH) es una de las medidas que más información aporta sobre la estructura y el funcionamiento de un ecosistema acuático (Hoyos, 2019; Roldán, 2012).

Este parámetro actúa como un factor limitante para los organismos acuáticos, ya que las especies requieren concentraciones iónicas mínimas para su desarrollo y supervivencia, y su baja concentración puede

restringir la riqueza de la flora y fauna (Fair et al., 2024; Palacios, 2021). En general, las corrientes de deshielo glaciar se caracterizan por presentar una CE muy baja (Palacios, 2021).

- **Sólidos Totales Disueltos (en adelante TDS):** representan el residuo de material que permanece después de la evaporación y secado de una muestra de agua, incluyendo sales inorgánicas (bicarbonatos, sulfatos, cloruros, fosfatos, carbonatos) y materia orgánica (Toasa, 2012). Estos sólidos disueltos constituyen partículas menores a un micrómetro que no pueden ser retenidas por filtración convencional (Barrenechea, 2001) y reflejan la presencia de sales disueltas y partículas en suspensión de carácter orgánico e inorgánico (Chacón, 2016; Mora y Tamay, 2022). En ambientes glaciares, la concentración de TDS puede incrementarse significativamente durante períodos de alta fusión, ya que los procesos intensos de escorrentía generados por las altas precipitaciones ocasionan el arrastre de sedimentos (Mora y Tamay, 2022).

Parámetros químicos

- **Oxígeno Disuelto (en adelante OD):** representa la cantidad de oxígeno gaseoso (O_2) presente en el agua, expresada en miligramos por litro (mg/l) o como porcentaje de saturación (CAN, 2008), y constituye un parámetro fundamental para la supervivencia de los organismos acuáticos (Barrenechea, 2001). Los valores normales oscilan entre 7.0 y 8.0 mg/l, siendo niveles superiores indicadores de buena calidad del agua (Roldán, 2012). La concentración de OD está inversamente relacionada con la temperatura, de acuerdo con la Ley de Henry, que establece que la solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial del gas sobre la disolución e inversamente proporcional a la temperatura (Barrenechea, 2001).

En ambientes glaciares de alta altitud, la solubilidad del oxígeno también está relacionada con la presión parcial atmosférica, que disminuye con la elevación (Pittino et al., 2023). A pesar de esta disminución por altitud, los agujeros de crioconita son considerados ambientes generalmente bien oxigenados en la columna de agua (Christner et al., 2003; Pittino et al., 2023). Incluso pueden estar sobresaturados de oxígeno durante los períodos de alta actividad fotosintética ya que la fotosíntesis de

las algas y cianobacterias libera O_2 (Christner et al., 2003; Tranter et al., 2004).

- **pH:** es un parámetro básico que representa el valor absoluto del logaritmo decimal de la concentración de ion hidrógeno e indica el grado de acidez ($pH < 7$) o alcalinidad ($pH > 7$) del agua (Barrenechea, 2001; CAN, 2008). Este parámetro es fundamental para la calidad del agua, ya que puede limitar la posibilidad de vida acuática, fluctuando normalmente en fuentes naturales entre 6.5 y 8.5 (CAN, 2008).

En los agujeros de crioconita, los valores de pH tienden a ser casi neutros o ligeramente alcalinos, con valores medios que pueden oscilar entre 8.57 y 10.47 en glaciares sudamericanos, pudiendo alcanzar extremos de hasta 11 en la Antártida (Pittino et al., 2023; Tranter et al., 2004). Las variaciones del pH en estos hábitats están fuertemente influenciadas por la actividad biológica (Tranter et al., 2004), puesto que los agujeros con mayor actividad biológica y presencia de invertebrados presentan valores de pH más elevados, mientras que aquellos con baja productividad, muestran pH menores (Pittino et al., 2023; Porazinska et al., 2004).

- **Nitrógeno total (en adelante N total):** es una medida que representa la suma de las diferentes formas de nitrógeno encontradas en una muestra de agua (CAN, 2008). Este elemento nutritivo es esencial para el desarrollo de las plantas y algas acuáticas (Barrenechea, 2001; CAN, 2008).

En los ecosistemas glaciares, la fijación activa de nitrógeno atmosférico (N_2) por parte de cianobacterias sugiere que el nitrógeno, a pesar de su abundancia en la atmósfera, puede ser un recurso escaso o limitante para el crecimiento microbiano (Hodson et al., 2008; Mueller et al., 2001; Telling et al., 2011). La detección de esta fijación de N_2 en los agujeros de crioconita implica que el nitrógeno alóctono biodisponible es insuficiente para mantener la producción microbiana y que el elemento puede ser un factor de posible co-limitación (Hodson et al., 2008; Telling et al., 2011).

- **Fosfato:** es un nutriente esencial que se encuentra naturalmente en las rocas y la materia orgánica, que se forma a partir del fósforo inorgánico (Barrenechea, 2001; Bolaños et al., 2017).

Según la OCDE (1982), el fósforo en aguas naturales se encuentra principalmente como fosfatos, los cuales se clasifican en: ortofosfatos, fosfatos condensados (pirofosfatos, metafosfatos y polifosfatos) y organofosfatos. El fosfato es esencial para el crecimiento de organismos acuáticos, y puede ser el nutriente que determinar la productividad biológica en una masa de agua (Gomez e Hidalgo, 2007).

En el contexto de los ecosistemas supraglaciares, el fósforo es a menudo considerado el principal nutriente limitante para el crecimiento microbiano en la crioconita, tanto en el agua como en la fase sedimentaria (Anesio et al., 2009; Hodson et al., 2008). Sin embargo, cuando el fosfato se encuentra en concentraciones elevadas, se convierte en un contaminante que contribuye a la eutrofización de lagos, ríos y aguas, este proceso provoca un crecimiento desmedido de vegetación acuática, disminución del OD e incremento en la descomposición (Bolaños et al., 2017).

Propiedades del sedimento (crioconita)

El sedimento de crioconita es una matriz de partículas minerales y material biológico, considerado el componente fundamental de los ecosistemas supraglaciares (Hodson et al., 2008; Rozwalak et al., 2022).

- **Materia orgánica (en adelante MO):** constituye un componente clave de los gránulos de crioconita y es la base energética de la red trófica heterótrofa (Hodson et al., 2008). La MO se compone por microbios vivos y muertos, sus exudados, productos de descomposición, así como detritos alóctonos (como polen, restos de flora y contaminantes) (Cook et al., 2016; Hodson et al., 2008). La cantidad y calidad de la MO son un predictor clave de la abundancia de organismos detritívoros (Hodson et al., 2008; Zawierucha et al., 2020). El contenido de MO en la crioconita es significativo y a menudo comparable o incluso superior al de lagos oligotróficos (Sävström et al., 2002).
- **Color:** la presencia de sustancias húmicas oscuras (materia orgánica de color oscuro derivada de residuos de descomposición bacteriana) es un factor importante en la coloración de la crioconita (Rozwalak et al., 2022; Takeuchi, 2002). Un mayor contenido de MO se correlaciona con un tono más oscuro de la crioconita (Rozwalak et al., 2022).

- **Composición mineral y granulometría:** la mineralogía está determinada por una mezcla de fuentes locales (morrenas cercanas, paredes rocosas expuestas) y remotas (transporte atmosférico de largo alcance) (Cook et al., 2016; Edwards et al., 2011; Rozwalak et al., 2022). La granulometría es muy variable espacialmente y la composición mineral, a menudo dominada por filosilicatos, tectosilicatos y cuarzo, influyen en la retención de agua y nutrientes, así como en la estructura física del hábitat para los organismos bentónicos (Rozwalak et al., 2022).

g. Índices de biodiversidad

- **Abundancia relativa:** se refiere a la proporción del número de individuos de una especie en relación con el número total de individuos de todas las especies presentes (Maroñas et al., 2010; Morlans, 2004). La medición de la abundancia relativa de cada especie es útil para identificar aquellas con escasa representación en la comunidad, las cuales son más sensibles a las perturbaciones ambientales (Moreno, 2001).
- **Frecuencia relativa:** es una medida que expresa la ocurrencia de un fenómeno en términos de porcentaje del número total de casos, permitiendo comparaciones sin depender de una población específica ni periodos de tiempo determinados (Cuello, 2023). La correcta comprensión de este concepto es crucial para el estudio de la probabilidad y la estadística (Ortiz et al., 1996). En ecología, esta medida es fundamental para estudiar patrones de distribución y abundancia de especies. Por ejemplo, los estudios de mamíferos utilizan frecuencia relativa para analizar patrones de actividad y presencia en ecosistemas específicos (Sevilla, 2023).

La fórmula para calcularla es:

$$Fr\% = \left(\frac{\text{Número de casos de la especie } i}{\text{Total de casos observados}} \right) \times 100$$

- **Riqueza específica (en adelante riqueza S):** constituye el método más básico y directo para cuantificar la biodiversidad, basándose en el conteo total de especies distintas presentes en un área, sin considerar la abundancia relativa (Martinez, 2023; Moreno, 2001). Aunque su enfoque es simplista, proporciona una visión general de la variedad de entidades taxonómicas que coexisten en un ecosistema (Moreno, 2001). La medición

ideal requiere un inventario completo mediante censo exhaustivo de la comunidad (Moreno, 2001).

Este índice resulta útil para evaluar la relación con parámetros ambientales, reflejando la capacidad del ambiente para soportar diversas especies (Palacios, 2021). Generalmente, los ambientes con recursos abundantes o condiciones estables presentan una mayor riqueza específica, lo que a menudo indica ecosistemas saludables (Maroñas et al., 2010). Factores como la heterogeneidad del hábitat y la disponibilidad de recursos influyen directamente en la coexistencia de múltiples especies (Magurran, 2004; Moreno, 2001).

- **Índice de Shannon-Wiener (en adelante índice H')**: métrica ampliamente utilizada para cuantificar la diversidad biológica, ya que integra dos componentes fundamentales: la riqueza de especies y la uniformidad o equitabilidad en la distribución de abundancias (Maroñas et al., 2010; Martínez, 2023). Un mayor valor de H' indica una mayor diversidad dentro de la comunidad (Maroñas et al., 2010).

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \cdot \ln p_i$$

Donde:

p_i : proporción de individuos de la especie i en la muestra respecto al número total de individuos.

S : total de especies

Este índice mide la incertidumbre asociada a la selección aleatoria de dos individuos, al predecir a qué especie pertenecerá un individuo escogido al azar de una colección (Moreno, 2001). Si ambos pertenecen a la misma especie, la incertidumbre es baja (baja diversidad); si pertenecen a especies diferentes, la incertidumbre es alta (alta diversidad) (Somarriba, 1999).

Rangos de interpretación (Escandón y Cáceres, 2022):

- 0: solo hay una especie, lo que indica máxima certeza o mínima diversidad.
- <1.50: baja diversidad

- 1.51-3.00: diversidad media
- >3.01: alta diversidad

El índice refleja que comunidades más diversas presentan mayor riqueza específica y distribución más equitativa de abundancias entre especies (Magurran, 2004; Maroñas et al., 2010).

- **Índice de Simpson (en adelante índice 1-D):** índice de dominancia que mide la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar de una muestra pertenezcan a diferentes especies (Martinez, 2023). Este índice también se conoce como Gini-Simpson (Martinez, 2023) y refleja la relación existente entre riqueza o número de especies y la abundancia o número de individuos por especie (Guerrero et al., 2020).

$$1 - D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$$

Donde:

$$p_i = n_i/N$$

n_i = valor de la especie n_i

N = valor total de todas las especies de la muestra

S = número de especies

Interpretación (Escandón y Cáceres, 2022):

- 0 – 0.35: diversidad baja, valores cercanos a 0, representa una menor diversidad (mayor dominancia)
- 0.36 – 0.75: diversidad media
- 0.76 – 1.00: diversidad alta, valores cercanos a 1 representa una mayor diversidad (menor dominancia)

Este índice es menos sensible a la riqueza S que otros índices, siendo robusto y significativo para evaluar diversidad al reflejar la varianza en la distribución de abundancias específicas (Magurran, 2004).

- **Índice de Margalef (en adelante índice D_{Mg}):** métrica sencilla y ampliamente utilizada para medir la biodiversidad que proporciona información sobre la riqueza específica en función del número total de individuos (Guerrero et al., 2020). Calcula la relación entre el número de

especies y el logaritmo natural del número total de individuos en la muestra (Guerrero et al., 2020).

$$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Dónde:

S = número total de especies

N = número total de individuos

Rangos de interpretación (Mora-Donjuán et al., 2017):

- 0: una sola especie
- <2.00: diversidad baja
- 2.01 – 4.99: diversidad media
- >5.00: diversidad alta

Este índice resulta intuitivo y ampliamente empleado en estudios de diversidad biológica por su simplicidad y utilidad para evaluar la riqueza específica independientemente del tamaño muestral (Magurran, 2004).

2.3. Definición de términos básicos

Glaciar

Masa de hielo que se forma por la acumulación y recristalización de nieve, mostrando movimiento a lo largo del tiempo (Cogley et al., 2011).

Agujeros de crioconita

Pequeñas depresiones llenas de agua que se forman en la superficie de los glaciares cuando sedimentos oscuros absorben radiación solar y derriten el hielo circundante, creando cavidades características en la zona de ablación glaciar (Franzetti et al., 2017; Wharton et al., 1985).

Parámetros físicos

Son aquellos que responden a los sentidos de la vista, el olfato y el tacto y tienen incidencia directa sobre condiciones estéticas y aceptabilidad del agua (Barrenechea, 2001).

Parámetros morfométricos

Conjunto de mediciones que describen cuantitativamente la forma y la estructura de un cuerpo de agua, incluyen características como el volumen, el área, el perímetro, el ancho y la profundidad (Barboza et al., 2016; Rodríguez et al., 2018).

Parámetros químicos

Composición química del agua, incluyendo sustancias, elementos e iones, esenciales para evaluar su calidad (Chacón, 2016).

Macroinvertebrados

Organismos acuáticos visibles cuyo tamaño oscila entre 0.5 mm y 5.0 mm, incluyendo insectos, moluscos y otros grupos taxonómicos que funcionan como indicadores de la salud del ecosistema acuático (Dominguez y Fernández, 2009).

Zona de ablación

Es la parte de un glaciar donde se produce pérdida neta de masa de hielo y nieve. En esta zona predominan los procesos de fusión del hielo y derretimiento sobre los de acumulación. El agua resultante origina corrientes superficiales que alimentan ríos (INAIGEM, 2023).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo correlacional, ya que se buscó determinar el grado de relación existente entre dos o más conceptos o variables, como lo define UNASAM (2019). En este caso, el estudio tuvo como objetivo cuantificar el grado de relación entre la comunidad de macroinvertebrados (variable dependiente) y las características de los agujeros de crioconita (variable independiente) en el glaciar Artesonraju.

Además, se adoptó un enfoque mixto que combina o asocia métodos cualitativos y cuantitativos. Según Creswell (2009), este enfoque permite integrar perspectivas complementarias, enriqueciendo el análisis y proporcionando una comprensión más completa del fenómeno estudiado. El componente cualitativo se aplicó en la recolección de datos a través de la observación científica de los agujeros de crioconita, facilitando una caracterización preliminar de estos y de los macroinvertebrados presentes. El cuantitativo se enfocó en el análisis de datos numéricos mediante pruebas estadísticas para examinar la relación entre las propiedades físicas y químicas de los agujeros de crioconita y la diversidad y abundancia de la comunidad de macroinvertebrados. La integración de los dos enfoques permitió abordar de manera más exhaustiva el problema de investigación en cuestión (UNASAM, 2019). Esta combinación, que puede ser concurrente o secuencial, complementa las perspectivas para una comprensión más exhaustiva del fenómeno (Creswell, 2009).

3.2. Diseño de investigación

El tipo de diseño de la investigación fue no experimental, también conocido como investigación *ex post facto* (después de ocurridos los hechos) (UNASAM, 2019). Esta clasificación se debe a que no se manipularon deliberadamente las variables de investigación, sino que se limitó a observar los fenómenos en su ambiente natural para su posterior análisis (UNASAM, 2019). Además, el subtipo de este diseño fue transversal o transeccional, puesto que se recopilaban datos en un momento específico, con el fin de describir las variables y examinar la relación e influencia recíproca entre ellas en ese momento (UNASAM, 2019).

Al no manipular las propiedades de los agujeros de crioconita, este diseño buscó establecer la relación significativa entre la abundancia y composición de los macroinvertebrados y las características de los agujeros de crioconita.

3.3. Métodos y técnicas de investigación

Las actividades realizadas para cada objetivo de investigación se describen a continuación.

3.3.1. Para caracterizar la comunidad de macroinvertebrados

a) Fase de campo

El 04 de octubre de 2024 y el 12 de febrero de 2025 se recolectaron muestras de 25 agujeros de crioconita. El muestreo se realizó en un rango altitudinal de 4700 a 4850 m s.n.m. Se seleccionaron agujeros de crioconita que contenían agua de deshielo conforme se encontraban, registrando sus coordenadas geográficas mediante el Sistema de Posicionamiento Global (en adelante GPS), tal como lo recomienda Fair et al. (2020). Durante el muestreo se evitó la recolección repetida de agujeros previamente estudiados, comparando las coordenadas GPS de los sitios muestreados. Estos agujeros fueron seleccionados para la recolección de macroinvertebrados y la medición de variables morfométricas, físicas y químicas.

La recolección de muestras biológicas consistió en extraer el sedimento de crioconita del fondo de los agujeros. El sedimento se recolectó utilizando cucharas de acero inoxidable previamente esterilizadas con alcohol etílico, tal como lo recomienda Zawierucha et al. (2022). Las muestras se transfirieron a frascos plásticos de 100 ml. Inmediatamente después de la recolección, las muestras se conservaron en alcohol etílico al 96%, según el procedimiento

empleado por Buda et al. (2020b). Los frascos fueron etiquetados con información detallada que incluía la fecha de muestreo, el código del punto de muestreo y las coordenadas geográficas.

b) Fase de Identificación de macroinvertebrados

Esta fase consistió en la identificación taxonómica de los macroinvertebrados recolectados en los agujeros de crioconita muestreados. Los macroinvertebrados capturados se identificaron utilizando las claves taxonómicas proporcionadas por Thorp y Rogers (2015), Roldán (1996) y Dominguez y Fernández (2009). Previo a la identificación en laboratorio, se realizó una revisión de los principales grupos de macroinvertebrados esperados en las muestras, consultando esquemas taxonómicos y fotografías de referencia.

En el laboratorio, el procesamiento de las muestras se realizó siguiendo una adaptación metodológica basada en el protocolo para bentos propuesto por el Ministerio del Ambiente (MINAM) (Palma y Arana, 2014). Se ejecutaron los siguientes pasos:

- Se colocó una cucharada (aproximadamente 1 cm³) del material crioconítico en placas Petri de plástico, como lo recomienda Zawierucha et al. (2016).
- La muestra se situó en un extremo de la placa de Petri, facilitando su revisión completa bajo el estereomicroscopio (aumentos de 2X a 4X).
- Con ayuda pinzas entomológicas, se separaron los organismos del sedimento, prestando atención a los organismos más pequeños.
- Se procesó gradualmente todo el sedimento de cada muestra.
- Una vez procesada la muestra, se separaron los organismos encontrados en grandes grupos taxonómicos, utilizando guías y claves taxonómicas.

Para asegurar la precisión de las identificaciones, se envió una pequeña muestra de los macroinvertebrados al laboratorio de Servicios Analíticos Generales (SAG) para confirmación taxonómica independiente. Los resultados de esta verificación se encuentran en los anexos del estudio.

Los especímenes se guardaron en frascos previamente etiquetados con el nombre del taxón y punto de muestreo. Cada frasco se conservó con alcohol al 70°, separando los organismos por grupo taxonómico. Se registró en fichas

de identificación el número de individuos, grupo taxonómico, fecha y punto de muestreo de cada espécimen. Los frascos con las muestras más representativas se resguardaron en el acervo del laboratorio del Centro de Investigación ESAT-UNASAM.

c) Fase de procesamiento de datos

Se calcularon los índices de diversidad de cada punto de muestreo. Para ello, se calcularon los siguientes índices, siguiendo los pasos mencionados:

- Para abundancia relativa (%): el cálculo de este índice se hizo por especie encontrada en cada punto de muestreo, utilizando el software Microsoft Excel.
- Para frecuencia relativa (%): el cálculo de este índice se hizo para todo el sitio de muestreo, utilizando el software Microsoft Excel.
- Para los índices de riqueza S, índice H', índice 1-D e índice D_{Mg} , el cálculo se realizó por punto de muestreo, obteniendo un indicador específico para estos. El procesamiento estadístico de los datos se ejecutó utilizando PAST4.17.
- Finalmente, para la caracterización de la comunidad de macroinvertebrados se consultaron diversas fuentes bibliográficas especializadas.

3.3.2. Para determinar los parámetros físicos, químicos y de sedimento

a) Fase de campo

En cada agujero de crioconita (el mismo del cual se tomaron las muestras de macroinvertebrados) se procedió a la medición *in situ* de los parámetros físicos y químicos. Para estas mediciones, los electrodos del equipo multiparámetro (HANNA-HI98194) fueron lavados previamente con agua de deshielo del sitio de muestreo. Cabe señalar que el equipo multiparámetro se calibró al inicio de cada temporada de muestreo para garantizar mediciones precisas y confiables. Las mediciones incluyeron la temperatura, la CE, los TDS, el pH y el OD del agua en cada agujero de crioconita. Es necesario señalar que estas mediciones se realizaron antes de la toma de muestras biológicas.

Además, se recolectaron cinco muestras de agua (1 litro) de la columna de agua ubicada sobre el sedimento de crioconita (Poniecka, 2020), seleccionadas en agujeros específicos de cada zona de muestreo. La selección se basó en la

disponibilidad del volumen de agua necesario. Estas muestras fueron extraídas mediante inmersión directa de botellas de muestreo o, cuando esto no fue posible, utilizando jeringas estériles de 100 ml, según el procedimiento de Telling et al. (2011). Las muestras se almacenaron en botellas plásticas de 1 litro que se habían enjuagado previamente con agua del mismo agujero. El propósito de estas muestras fue el análisis de N total y fosfato.

Adicionalmente, se recolectaron cinco muestras compuestas de sedimento de crioconita (500 g) en cada zona de muestreo utilizando cucharas estériles desinfectados con alcohol, según el procedimiento empleado por Jaroměřská et al. (2023). Debido a que la cantidad de crioconita era insuficiente en los agujeros individuales, las muestras se obtuvieron de la superficie glaciar. La estrategia de muestreo se basó en la recolección de material de múltiples sitios distribuidos espacialmente (separados por decenas de metros) para obtener una representación amplia y diversa del sedimento supraglaciar, considerando la mezcla natural del sedimento debido a precipitación y flujos de agua de deshielo en la superficie glaciar, como lo recomienda Zawierucha et al. (2020). Las muestras se guardaron en bolsas plásticas tipo Ziploc (Poniecka, 2020).

b) Fase de laboratorio

En esta etapa, las cinco muestras de agua recolectadas en las zonas de muestreo fueron enviadas al laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM. Por su parte, las muestras de sedimento fueron remitidas al laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos (Slab). La Tabla 2 detalla el método de análisis empleado para cada parámetro.

Tabla 2

Métodos de análisis de laboratorio de los análisis del agua y de sedimento

Análisis químico del agua	
Parámetro	Método
Fosfato	Vanadatomolibdato
N total	Digestión Koroleff, nitrospectral
Análisis de sedimento	
Parámetro	Método
MO	NOM-021-RECNAT-2000/AS 07 Contenido de materia orgánica.

Metales totales (Ca, K y Mg)	EPA METHOD 3050B, Rev. 2,1996 / EPA METHOD 200.7, Rev.4.4,1994. Acid digestion of sediments, sludges, and soils determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry
Color	Tabla Munsell
Análisis granulométrico	NTP 339.128: 1999. Revisada el 2014. Método de ensayo para el análisis granulométrico

c) Fase de procesamiento de datos

En esta etapa se llevó a cabo la sistematización y el registro de los datos recopilados, utilizando tablas en Microsoft Excel. Se ingresaron los datos obtenidos en campo de los parámetros físicos (temperatura, CE y TDS) y parámetros químicos (pH y OD). Asimismo, se registraron los resultados de los análisis de laboratorio tanto de sedimento (MO, metales, color y media del tamaño granular) como del análisis químico complementario (N total y fosfato).

El análisis de la información recopilada se efectuó mediante el trabajo de gabinete, el cual permitió obtener una valiosa comprensión de la relación entre los parámetros físicos y químicos, así como un análisis complementario de estos con los sedimentos.

3.3.3. Para determinar la morfometría de los agujeros de crioconita

a) Fase de campo

Los agujeros de crioconita (los mismos de los cuales se tomaron las muestras de macroinvertebrados y las mediciones de los parámetros físicos y químicos) presentaron formas diversas, desde irregulares hasta ovaladas, reflejando la heterogeneidad morfológica característica de estas estructuras supraglaciares. Para la caracterización morfométrica de los agujeros de crioconita, se midieron las dimensiones de profundidad, largo y ancho utilizando reglas, según el procedimiento empleado por López (2022) y se realizaron capturas fotográficas para el posterior procesamiento con el software AutoCAD 2021. Todos los datos morfométricos se registraron en fichas de observación de campo.

b) Fase de procesamiento de datos

Se registraron los datos recopilados en campo de los parámetros morfométricos (largo, ancho, profundidad) y se calcularon, por punto de muestreo, el área y el volumen de estos. Debido a la geometría irregular de los agujeros de

crioconita, se emplearon tres métodos de cálculo: (1) asumiendo forma rectangular, (2) asumiendo forma elipsoidal, y (3) cálculo directo del área mediante AutoCAD (ver anexo 11). La ubicación geográfica de cada agujero se determinó mediante el GPS.

3.3.4. Para evaluar la relación de la comunidad de macroinvertebrados y los parámetros abióticos (físicos, químicos y morfométricos)

Este análisis se realizó por punto de muestreo, en el que se tuvo en consideración los índices: riqueza S, índice H', índice 1-D e índice D_{Mg} . Estos índices de biodiversidad (variables dependientes) se relacionaron con todos los parámetros abióticos medidos en campo (variables independientes), es decir parámetros físicos (temperatura, CE y TDS) y parámetros químicos (pH y OD), así como los parámetros morfométricos (área y volumen).

Para obtener una mejor comprensión de este análisis, se utilizaron diversos métodos estadísticos, incluyendo los coeficientes de correlación de Spearman/Pearson, el análisis de regresión múltiple y análisis de componentes principales. Este enfoque integrador, apoyado con diversas fuentes bibliográficas, permitió analizar la relación de la comunidad de macroinvertebrados con todos los parámetros abióticos mencionados.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

Esta investigación tuvo como población a las comunidades de macroinvertebrados presentes en todos los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju de la cordillera Blanca.

3.4.2. Tipo de muestreo

Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que este permitió al investigador estudiar la población más accesible (Anderson et al., 2008; UNASAM, 2019), dadas las características únicas y los desafíos logísticos inherentes a las zonas supraglaciares. Este tipo de muestreo permitió seleccionar los agujeros de crioconita que contenían agua para muestrear los macroinvertebrados y medir los parámetros físicos y químicos, además, permitió la selección de agujeros separados por varios metros para recolectar muestras a lo largo de la zona de ablación e intentar cubrir toda esta área.

3.4.3. Unidad de análisis o muestra

Se tuvo como unidad de muestreo a las comunidades de macroinvertebrados presentes en los 25 de agujeros de crioconita seleccionados como puntos de muestreo del glaciar Artesonraju.

A continuación, se detalla, como se obtuvieron esos puntos.

Metodología de muestreo

- Zonificación glaciar: se realizó la delimitación de las zonas de muestreo en la zona de ablación del glaciar Artesonraju mediante imágenes satelitales obtenidas de Google Earth. La delimitación manual se realizó en ArcMap 10.8 utilizando herramientas de delineación espacial para generar diez cuadrantes de 5x2.
- Diseño de muestreo: se seleccionaron los cinco cuadrantes centrales (ver anexo 1) debido a limitaciones de accesibilidad. El patrón inicial en zigzag fue modificado debido a la presencia de grietas profundas y escombros densos que dificultaron el acceso a los agujeros de crioconita.
- Procedimiento: en cada zona de muestreo se seleccionaron cinco agujeros de crioconita representativos, teniendo en cuenta el tamaño, la presencia de agua y que estuvieran abiertos. Esta selección se realizó directamente en campo, debido a que los agujeros de crioconita no son visibles en imágenes aéreas, asegurando una distribución equilibrada de puntos de muestreo (Fair et al., 2020).
- Consideraciones temporales: el muestreo se llevó a cabo durante la época húmeda, debido a que en esta época es donde hay mayor ablación en glaciar Artesonraju (Palacios, 2021; UGRH, 2003), incrementando la probabilidad de encontrar agujeros de crioconita abiertos.

Ubicación de los puntos de muestreo

En campo, en cada zona de muestreo delimitada, se recolectaron cinco agujeros de crioconita a lo largo del área seleccionada para reflejar la heterogeneidad y diversidad biótica de la superficie del glaciar (Jaroměřská et al., 2023; Zawierucha et al., 2016). Este proceso se repitió en las cinco áreas de muestreo establecidas, resultando en un total de 25 puntos de muestreo (n=25). Estos puntos constituyeron la base para el análisis de los agujeros de crioconita en el glaciar Artesonraju.

El número de puntos seleccionados es representativo y adecuado para obtener resultados confiables, alineándose con estudios previos en glaciares de alta montaña que emplearon tamaños muestrales similares: López (2022) utilizó 35 puntos, Sommers et al. (2018) recolectó 19 muestras y Buda et al. (2020b) muestreó 23 agujeros de crioconita.

En la Tabla 3 se presentan las coordenadas y la altitud de los 25 puntos de muestreo:

Tabla 3

Coordenadas UTM y altitud de los puntos de muestreo

Zona	Punto	Coordenadas UTM (18S)		Altitud (ms.n.m.)
		Este (X)	Norte (Y)	
1	1.1.	210757.02	9008018.78	4794
	1.2.	210750.06	9007965.44	4800
	1.3.	210799.07	9007920.26	4816
	1.4.	210686.85	9007964.74	4789
	1.5.	210598.11	9007983.5	4783
2	2.1.	210545.37	9007855.45	4787
	2.2.	210491.38	9007803.83	4764
	2.3.	210397.08	9007754.22	4764
	2.4.	210299.18	9007798.65	4752
	2.5.	210366.43	9007872.99	4759
3	3.1.	210386.53	9008001.29	4747
	3.2.	210481.18	9008029.64	4764
	3.3.	210525.75	9007952.49	4779
	3.4.	210329.09	9007964.07	4755
	3.5.	210269.56	9007986.62	4748
4	4.1.	209877.89	9007867.60	4730
	4.2.	209977.08	9007846.18	4746
	4.3.	210060.9	9007789.23	4748
	4.4.	210085.58	9007876.28	4779
	4.5.	210164.31	9007900.20	4769
5	5.1.	210187.65	9008036.39	4757
	5.2.	210116.47	9008019.28	4774
	5.3.	210007.71	9007993.37	4752
	5.4.	209910.19	9007966.89	4760
	5.5.	209864.06	9007953.94	4721

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos e información

En esta investigación se emplearon las técnicas e instrumentos de obtención de datos validados que se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4*Técnicas e instrumentos de la recolección de datos e información*

Técnicas	Instrumentos
Análisis documentario	Artículos científicos, tesis, revistas científicas, manuales, guías y libros.
Observación directa	Ficha de observación en campo, navegador GPS o aplicación móvil de GPS, regla, estereomicroscopio, multiparámetro.
Análisis de laboratorio	Análisis de los parámetros químicos (N total y fósforo) y de sedimento (materia orgánica, minerales: calcio total, magnesio total y potasio total).
Análisis de datos	Microsoft Excel, software ArcMap 10.8, software AutoCAD 2021, software Rstudio 4.4.1 y Past4.17.

3.6. Plan de procesamiento y análisis de los datos e información

3.6.1. Cálculo de los índices de biodiversidad

El cálculo de los índices de diversidad se inició luego de la identificación de los macroinvertebrados. Los datos taxonómicos de estos organismos, que incluían el orden, la familia y el género (la especie solo se pudo determinar como sp.), junto con el punto de muestreo y el número de individuos hallados en cada uno, se registraron en una tabla de hoja de cálculo de Excel. Con base en esta información, se procedió a calcular los indicadores de diversidad, específicamente riqueza S, el índice H', el índice 1-D y el índice D_{Mg} mediante el uso del programa PAST4.17. Adicionalmente, se empleó el software Microsoft Excel para hallar la abundancia relativa (%) y frecuencia relativa (%).

3.6.2. Análisis estadístico mediante la correlación de Pearson/Spearman

El análisis estadístico se centró en determinar el tipo de correlación (Pearson/Spearman) más adecuado para este estudio, aplicado a las variables seleccionadas. Las variables consideradas incluyeron los índices de diversidad y los parámetros físicos, químicos y morfométricos analizados.

Para seleccionar el coeficiente de correlación apropiado, se ejecutó una prueba de normalidad (Mora y Tamay, 2022).

- a) La hipótesis de normalidad se formuló tentativamente asumiendo que H_0 (los datos siguen una distribución normal) y su opuesta H_1 (los datos no siguen una distribución normal).
- b) Se definió del nivel de significancia (α) en 0.05 (que corresponde a un nivel de confianza del 95% y un error del 5%).
- c) Dado que la muestra fue menor a 50, se empleó el estadístico de Shapiro-Wilk para respaldar la hipótesis de normalidad.
- d) La regla de decisión se basó en el valor de p: si el valor de p es menor que 0.05, se rechaza H_0 , lo que implica que los datos no se distribuyen normalmente; si el valor p es mayor o igual a 0.05, se acepta H_0 y se rechaza H_1 . El valor p representa el riesgo mínimo para demostrar la hipótesis de normalidad (Anderson et al., 2008).

Finalmente, el coeficiente de correlación apropiado, determinado por el resultado de la prueba de normalidad, se calculó utilizando el programa estadístico software Rstudio 4.4.1. para analizar la relación entre las variables.

El coeficiente de correlación de rangos de Spearman (ρ) puede puntuar desde -1.0 hasta +1.0, y se interpreta así: los valores cercanos a +1.0, indican que existe una fuerte asociación entre las clasificaciones, o sea que a medida que aumenta un rango el otro también aumenta; los valores cercanos a -1.0 señalan que hay una fuerte asociación negativa entre las clasificaciones, es decir que, al aumentar un rango, el otro decrece. Cuando el valor es 0.0, no hay correlación (Anderson et al., 2008).

El coeficiente de correlación de Pearson (r) mide la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables. Un coeficiente de ± 1 indica una perfecta asociación lineal positiva o negativa, según sea el signo. Por el contrario, un coeficiente de 0 evidencia que no existe relación lineal entre las variables analizadas, pero no constituye prueba de independencia estadística (Hernández et al., 2018).

La interpretación de la magnitud del coeficiente de correlación de Spearman y Pearson, se ha expresado por diversos autores en escalas, siendo una de las más utilizadas la que se presenta a continuación (Hernández et al., 1997).

Tabla 5

Grado de relación según coeficiente de correlación de Spearman y Pearson

Rango	Relación
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0.00	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

3.6.3. Análisis de regresión múltiple

El análisis de regresión múltiple se empleó para examinar la relación existente entre los índices de biodiversidad y las variables que comprenden los parámetros físicos, químicos y morfométricos presentes en los agujeros de crioconita. Este método estadístico permite estudiar la relación de una variable dependiente con dos o más variables independientes (Anderson et al., 2008).

Para este análisis, se definieron dos conjuntos de datos:

- Variables biológicas: estas actuaron como variables dependientes o variables de respuesta. En este grupo se incluyeron los índices de biodiversidad, tales como la riqueza S, índice H', índice 1-D, índice D_{Mg} .
- Variables ambientales: estas fueron las variables independientes o explicativas. Aquí se consideraron los parámetros físicos, químicos y morfométricos.

La correlación de estas variables facilitó una organización sistemática de los factores involucrados en el análisis, facilitando su estudio e interpretación. Esta evaluación permitió comprender cómo las variables ambientales influyen en los

índices de biodiversidad. El análisis de regresión múltiple se llevó a cabo utilizando el software Rstudio 4.4.1.

3.6.4. Análisis de componentes principales (en adelante PCA)

Se realizó un análisis de componentes principales, el cual es un método exploratorio para la reducción de dimensiones y la síntesis de la información (Mora y Tamay, 2022). El procedimiento busca que los nuevos componentes (ejes o dimensiones) expliquen la mayor cantidad de varianza de los datos originales. El primer componente extraído es el que explica la mayor parte de la varianza total, el segundo explica gran parte de la varianza restante, y así sucesivamente (García et al., 2016).

Este análisis se ejecutó utilizando las variables de los parámetros físicos, químicos, morfológicos y los índices de diversidad: riqueza S, índice H', índice 1-D, índice D_{Mg} . Estos datos, provenientes de los puntos de muestreo, fueron analizados mediante el software Rstudio 4.4.1.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Caracterización de la comunidad de macroinvertebrados

La identificación taxonómica de los macroinvertebrados presentes en las muestras recolectadas en el glaciar Artesonraju reveló la presencia de tres grupos taxonómicos principales. Los dípteros estuvieron representados únicamente por la familia Chironomidae, con identificación a nivel de género de *Parochlus* y *Cricotopus*. Adicionalmente, se identificaron colémbolos del orden Poduromorpha, los cuales no pudieron ser determinados a niveles taxonómicos inferiores debido a las limitaciones morfológicas de los especímenes preservados. En total se recolectaron 1203 individuos, siendo el género *Parochlus* el más abundante con 1144 individuos, seguido de *Cricotopus* con 32 y Poduromorpha con 27 individuos.

La síntesis de estos resultados se presenta en la Tabla 6, donde se detallan las abundancias de cada taxón identificado por punto de muestreo y su estadio de desarrollo.

Tabla 6

Abundancia de macroinvertebrados por punto de muestreo y estadio de desarrollo

Punto	Orden: Diptera Familia: Chironomidae Género: <i>Parochlus</i>			Orden: Diptera Familia: Chironimidae Género: <i>Cricotopus</i>		Orden: Poduromorpha	Total
	Larva	Pupa	Adulto	Larva	Pupa	Adulto	
1.1.	51	25	-	-	-	-	76
1.2.	10	15	-	-	-	2	27

1.3.	47	13	3	2	-	-	65
1.4.	50	10	2	2	1	-	65
1.5.	25	12	1	-	-	1	39
Total	183	75	6	4	1	3	272
2.1.	47	12	3	1	1	2	66
2.2.	29	8	1	1	-	-	39
2.3.	18	4	1	-	-	1	24
2.4.	38	2	1	1	-	-	42
2.5.	55	13	2	3	-	-	73
Total	187	39	8	6	1	3	244
3.1.	9	5	2	-	-	1	17
3.2.	10	3	-	1	-	-	14
3.3.	24	4	2	2	-	-	32
3.4.	10	7	1	1	1	-	20
3.5.	9	2	1	-	-	1	13
Total	62	21	6	4	1	2	96
4.1.	23	8	-	1	-	2	34
4.2.	36	8	-	1	-	-	45
4.3.	14	8	1	1	1	-	25
4.4.	25	8	-	-	-	2	35
4.5.	54	11	-	1	-	2	68
Total	152	43	1	4	1	6	207
5.1.	29	10	1	-	-	2	42
5.2.	28	19	2	2	1	-	52
5.3.	58	31	1	-	-	4	94
5.4.	65	30	1	3	-	5	104
5.5.	30	56	-	3	1	2	92
Total	210	146	5	8	2	13	384

Los resultados revelan una dominancia numérica marcada de *Parochlus* sp. en la totalidad de las muestras analizadas. Este taxón se registró en sus tres estadios ontogenéticos (larva, pupa y adulto), con las larvas representando consistentemente el estadio más abundante, exhibiendo densidades que variaron entre 9 y 65 individuos por punto de muestreo. Las pupas de *Parochlus* sp. mantuvieron una distribución ubicua con abundancias intermedias (2-56 individuos), mientras que los adultos presentaron las menores densidades numéricas.

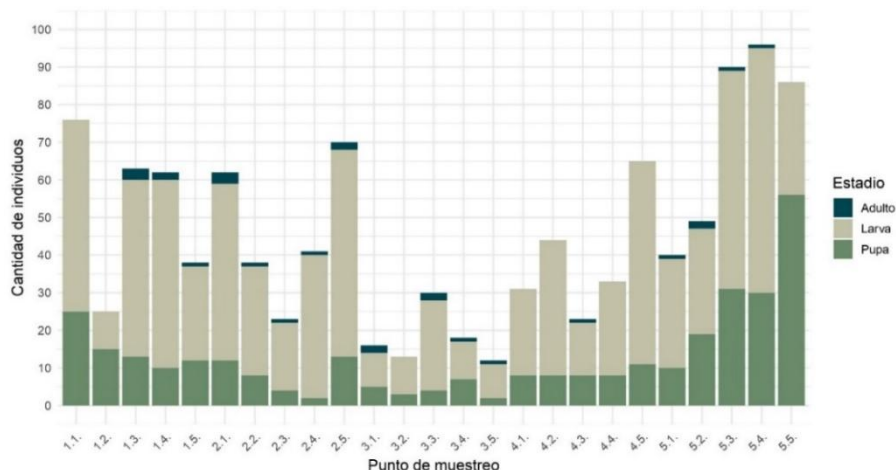
En contraste, *Cricotopus* sp. mostró una presencia restringida a los estadios larval y pupal, con densidades considerablemente reducidas (1-3 individuos por muestra). Los colémbolos del orden Poduromorpha, representados únicamente por

individuos adultos, exhibieron patrones de abundancia similares a *Cricotopus* sp. (1-5 individuos por muestra).

La distribución de abundancias por estadio ontogenético y punto de muestreo se ilustra en las Figuras 1, 2 y 3, donde se evidencia la estructura poblacional diferencial entre los taxones identificados.

Figura 1

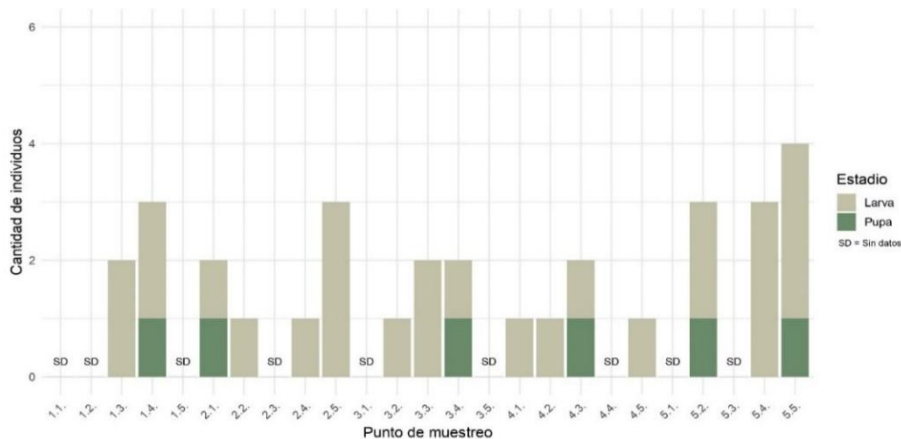
Abundancia de Parochlus sp. por punto de muestreo según estadio ontogenético



La Figura 1 confirma que el estadio larval de *Parochlus* sp. predomina en la mayoría de los puntos de muestreo, registrando concentraciones particularmente elevadas en los puntos 1.1, 2.5, 5.3, 5.4 y 5.5. Los estadios de pupa y adulto se presentan en menores proporciones, estableciendo la dominancia de las fases juveniles en la estructura poblacional observada.

Figura 2

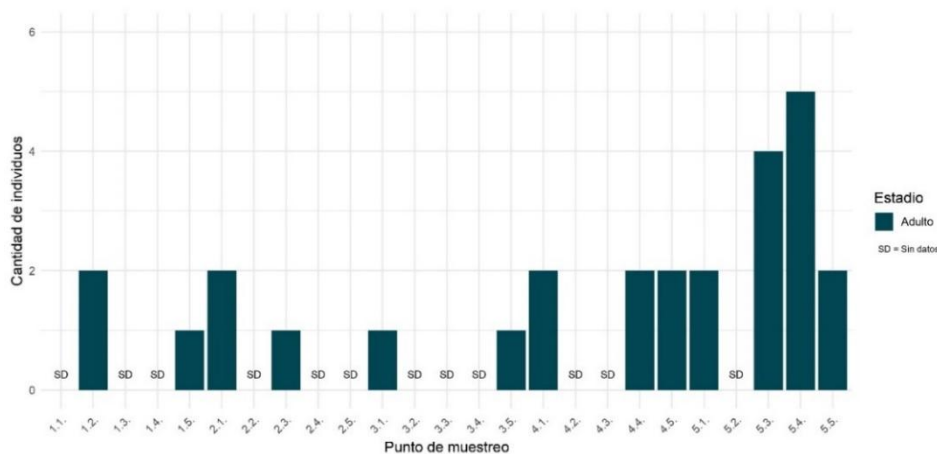
Abundancia de Cricotopus sp. por punto de muestreo según estadio ontogenético



La Figura 2 revela un patrón contrastante de distribución espacial para *Cricotopus* sp. Este taxón exhibe abundancias notablemente reducidas, con un máximo de tres larvas registrado en los puntos 2.5 y 5.4, mientras que el punto 5.5 alcanzó la mayor abundancia total con cuatro individuos (3 larvas + 1 pupa). Las larvas y pupas se distribuyen de forma irregular en múltiples puntos de muestreo, registrándose una ausencia completa en nueve puntos (1.1, 1.2, 1.5, 2.3, 3.1, 3.5, 4.4, 5.1 y 5.3). Este patrón sugiere una distribución fragmentada y densidades poblacionales significativamente inferiores en comparación con *Parochlus* sp.

Figura 3

Abundancia de *Poduromorpha* por punto de muestreo según estadio ontogenético



La Figura 3 documenta la abundancia del orden Poduromorpha, evidenciando la menor representatividad numérica entre todos los taxones analizados. Los individuos de este grupo, registrados exclusivamente en estadio adulto, se detectaron en densidades mínimas (1-5 individuos) y con una distribución espacial limitada. Su presencia se documentó en los puntos 1.2, 1.5, 2.1, 2.3, 3.1, 3.5, 4.1, 4.4, 4.5, 5.1, 5.3, 5.4 y 5.5, manteniéndose ausente en las estaciones restantes. Esta baja abundancia y distribución restringida indica que los Poduromorpha constituyen un componente secundario de las comunidades estudiadas, contrastando marcadamente con la dominancia observada en *Parochlus* sp.

4.1.1. Diversidad de macroinvertebrados

Para cuantificar la biodiversidad de las comunidades de macroinvertebrados asociadas a los agujeros de crioconita, se calcularon cuatro índices ecológicos complementarios: riqueza S, índice H', índice 1-D e índice D_{Mg} . En estos análisis se consideraron como unidades taxonómicas operacionales (OTUs) a *Parochlus* sp.,

Cricotopus sp. y Poduromorpha, agrupando todos los estadios ontogenéticos de cada taxón.

No obstante, para los quironómidos (*Parochlus* sp. y *Cricotopus* sp.) se excluyeron los adultos de los cálculos, dado que estos individuos alados no constituyen habitantes permanentes de los microhábitats acuáticos como los agujeros de crioconita, sino que utilizan la superficie glaciaria durante sus actividades reproductivas. Esta decisión metodológica asegura que los índices reflejen únicamente la diversidad de la fauna que depende directamente del ecosistema de crioconita para su desarrollo.

Los valores calculados para cada índice en los diferentes puntos de muestreo se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Índices de diversidad de macroinvertebrados por punto de muestreo

Punto	Especie	Cantidad	Riqueza S	Índice H'	Índice 1-D	Índice D _{Mg}
1.1	<i>Parochlus</i> sp.	76	1	0.00	0.00	0.00
1.2	<i>Parochlus</i> sp.	25	2	0.28	0.14	0.30
	Poduromorpha	2				
1.3	<i>Parochlus</i> sp.	60	2	0.15	0.06	0.24
	<i>Cricotopus</i> sp.	2				
1.4	<i>Parochlus</i> sp.	60	2	0.20	0.09	0.24
	<i>Cricotopus</i> sp.	3				
1.5	<i>Parochlus</i> sp.	37	2	0.13	0.05	0.27
	Poduromorpha	1				
2.1	<i>Parochlus</i> sp.	59	3	0.30	0.12	0.48
	<i>Cricotopus</i> sp.	2				
2.2	Poduromorpha	2	2	0.13	0.05	0.27
	<i>Parochlus</i> sp.	37				
2.3	<i>Cricotopus</i> sp.	1	2	0.20	0.09	0.32
	<i>Parochlus</i> sp.	22				
2.4	Poduromorpha	1	2	0.13	0.05	0.27
	<i>Parochlus</i> sp.	40				
2.5	<i>Cricotopus</i> sp.	1	2	0.18	0.08	0.23
	<i>Parochlus</i> sp.	68				
3.1	<i>Cricotopus</i> sp.	3	2	0.28	0.13	0.37
	<i>Parochlus</i> sp.	14				
3.2	Poduromorpha	1	2	0.29	0.14	0.38
	<i>Parochlus</i> sp.	13				

	<i>Cricotopus</i> sp.	1				
3.3	<i>Parochlus</i> sp.	28	2	0.26	0.13	0.29
	<i>Cricotopus</i> sp.	2				
3.4	<i>Parochlus</i> sp.	17	2	0.36	0.20	0.34
	<i>Cricotopus</i> sp.	2				
3.5	<i>Parochlus</i> sp.	11	2	0.33	0.17	0.40
	Poduromorpha	1				
<hr/>						
	<i>Parochlus</i> sp.	31				
4.1	<i>Cricotopus</i> sp.	1	3	0.38	0.17	0.57
	Poduromorpha	2				
4.2	<i>Parochlus</i> sp.	44	2	0.12	0.04	0.26
	<i>Cricotopus</i> sp.	1				
4.3	<i>Parochlus</i> sp.	22	2	0.31	0.16	0.31
	<i>Cricotopus</i> sp.	2				
4.4	<i>Parochlus</i> sp.	33	2	0.23	0.11	0.28
	Poduromorpha	2				
	<i>Parochlus</i> sp.	65				
4.5	<i>Cricotopus</i> sp.	1	3	0.22	0.09	0.47
	Poduromorpha	2				
<hr/>						
5.1	<i>Parochlus</i> sp.	39	2	0.21	0.10	0.27
	Poduromorpha	2				
5.2	<i>Parochlus</i> sp.	47	2	0.24	0.12	0.26
	<i>Cricotopus</i> sp.	3				
5.3	<i>Parochlus</i> sp.	89	2	0.18	0.08	0.22
	Poduromorpha	4				
	<i>Parochlus</i> sp.	95				
5.4	<i>Cricotopus</i> sp.	3	3	0.33	0.15	0.43
	Poduromorpha	5				
	<i>Parochlus</i> sp.	86				
5.5	<i>Cricotopus</i> sp.	4	3	0.29	0.13	0.44
	Poduromorpha	2				

Los resultados evidencian una diversidad extremadamente reducida en la totalidad de los puntos muestreados. La riqueza S registró valores consistentemente bajos, variando entre 1 y 3 taxones por punto de muestreo, siendo el punto 1.1 el único sitio con presencia exclusiva de *Parochlus* sp. (S = 1). Los puntos con mayor riqueza (S = 3) correspondieron únicamente a 2.1, 4.1, 4.5, 5.4 y 5.5, donde coexistieron los tres taxones identificados.

El índice H' reflejó patrones de equitatividad diferencial entre comunidades. Los valores oscilaron desde 0.00 (monocultura absoluta en el punto 1.1) hasta 0.38

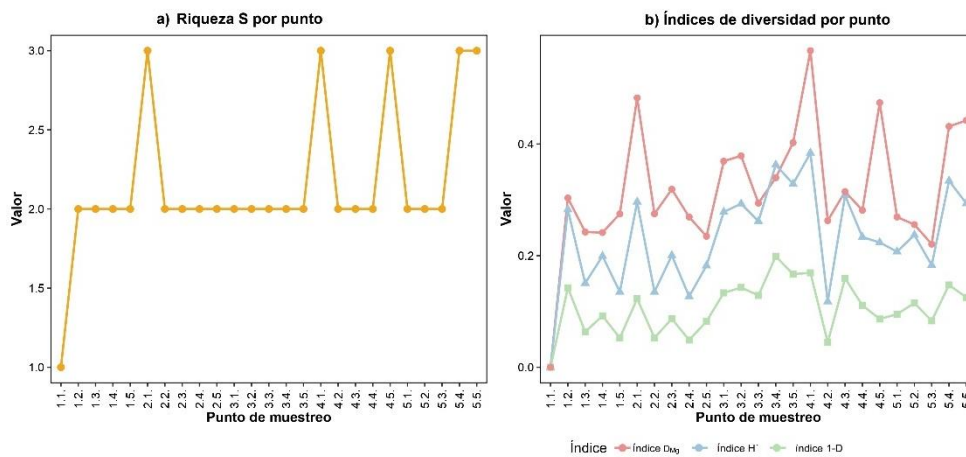
en el punto 4.1, donde se registró la mayor equitatividad entre taxones. Los valores intermedios de H' (0.15-0.36) caracterizaron la mayoría de los puntos, indicando dominancia marcada de *Parochlus* sp. con presencia secundaria de los otros taxones.

El índice 1-D corroboró estos patrones, con valores máximos de 0.20 (punto 3.4), confirmando la baja probabilidad de encontrar individuos de diferentes especies en una muestra aleatoria. Los valores del índice D_{Mg} oscilaron entre 0.00 y 0.57, siendo el punto 4.1 el que presentó la mayor diversidad relativa considerando el tamaño muestral.

Esta estructura de baja diversidad y alta dominancia es característica de comunidades extremófilas en ambientes glaciares, donde las condiciones ambientales restrictivas favorecen la presencia de taxones altamente especializados. En las Figuras 4 y 5 se pueden observar los patrones de baja diversidad que caracteriza a las comunidades de macroinvertebrados en los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju.

Figura 4

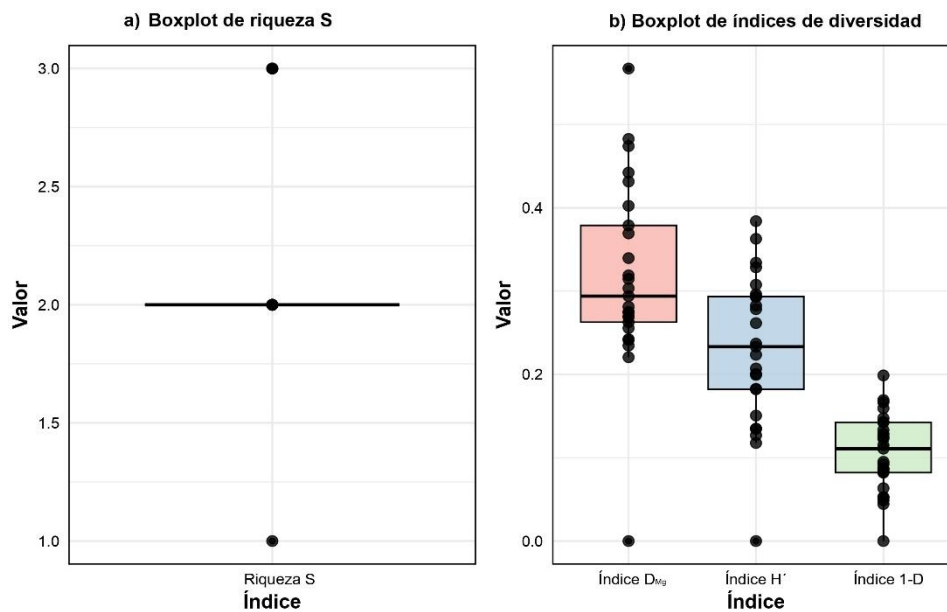
Valores de los índices de diversidad por punto de muestreo



La Figura 4 muestra el análisis conjunto de los índices, el cual revela consistentemente una riqueza S restringida ($S = 1-3$ taxones) y una marcada inequitatividad en la distribución de abundancias, evidenciada por los valores reducidos de Shannon-Wiener ($H' < 0.4$), Simpson ($1-D < 0.2$) y Margalef ($D_{Mg} < 0.6$).

Figura 5

Boxplot de la riqueza S, índice DMg, índice H' e índice 1-D

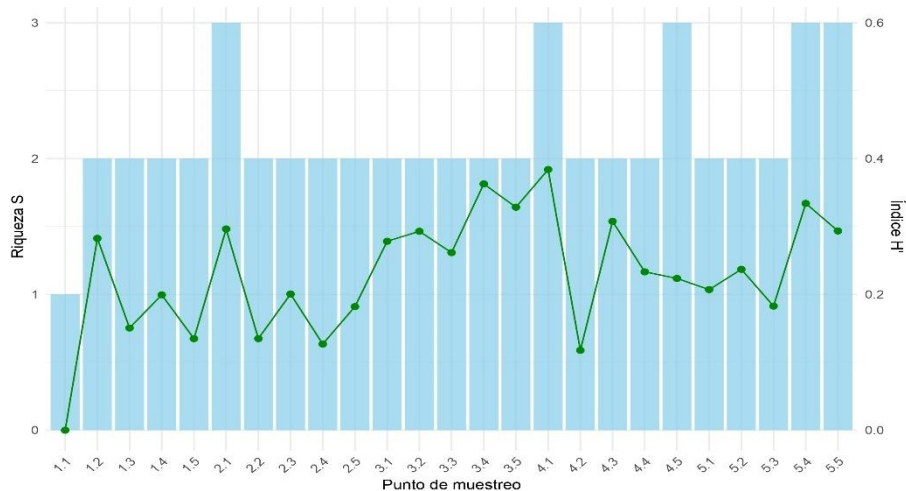


En la Figura 5 los diagramas de caja evidencian la distribución asimétrica de todos los índices, con medianas próximas a los valores mínimos y presencia de valores atípicos que corresponden a los pocos puntos con mayor equitatividad relativa.

En la Figura 6 se muestra un análisis comparativo entre la riqueza S y el índice H', el cual revela patrones complejos en la estructura de las comunidades de macroinvertebrados asociadas a los agujeros de crioconita.

Figura 6

Análisis comparativo de la riqueza S y el índice H' por punto de muestreo



La riqueza S muestra una distribución dominada por comunidades con $S = 2$ taxones (19 de 25 puntos), mientras que solo un punto presenta monocultura (punto 1.1, $S = 1$) y cinco puntos alcanzan la riqueza máxima observada ($S = 3$: puntos 2.1, 4.1, 4.5, 5.4 y 5.5). El índice H' exhibe una variabilidad considerablemente mayor, oscilando entre 0.00 (punto 1.1) y aproximadamente 0.38 (punto 4.1), con fluctuaciones notables que no siguen necesariamente los cambios en riqueza S. Esta desconexión parcial entre ambos índices evidencia la influencia crítica de la equitatividad en la diversidad total y ausencia de correlación lineal entre ambos índices, lo que confirma que el índice H' integra tanto riqueza como uniformidad.

4.1.2. Frecuencia y abundancia relativa

Para complementar el análisis de los índices de diversidad, se examinó la distribución de las abundancias relativas por punto de muestreo (Tabla 8) y la frecuencia de aparición de cada taxón (Tabla 9).

Tabla 8

Abundancia relativa (%) de macroinvertebrados por punto de muestreo

Punto	Especie	Abundancia relativa (%)
1.1	<i>Parochlus</i> sp.	100.00
1.2	<i>Parochlus</i> sp.	92.59
	Poduromorpha	7.41
1.3	<i>Parochlus</i> sp.	96.77
	<i>Cricotopus</i> sp.	3.23
1.4	<i>Parochlus</i> sp.	95.24
	<i>Cricotopus</i> sp.	4.76
1.5	<i>Parochlus</i> sp.	97.37
	Poduromorpha	2.63
2.1	<i>Parochlus</i> sp.	93.65
	<i>Cricotopus</i> sp.	3.17
	Poduromorpha	3.17
2.2	<i>Parochlus</i> sp.	97.37
	<i>Cricotopus</i> sp.	2.63
2.3	<i>Parochlus</i> sp.	95.65
	Poduromorpha	4.35
2.4	<i>Parochlus</i> sp.	97.56
	<i>Cricotopus</i> sp.	2.44
2.5	<i>Parochlus</i> sp.	95.77
	<i>Cricotopus</i> sp.	4.23

3.1	<i>Parochlus</i> sp.	93.33
	Poduromorpha	6.67
3.2	<i>Parochlus</i> sp.	92.86
	<i>Cricotopus</i> sp.	7.14
3.3	<i>Parochlus</i> sp.	93.33
	<i>Cricotopus</i> sp.	6.67
3.4	<i>Parochlus</i> sp.	89.47
	<i>Cricotopus</i> sp.	10.53
3.5	<i>Parochlus</i> sp.	91.67
	Poduromorpha	8.33
4.1	<i>Parochlus</i> sp.	91.18
	<i>Cricotopus</i> sp.	2.94
	Poduromorpha	5.88
4.2	<i>Parochlus</i> sp.	97.78
	<i>Cricotopus</i> sp.	2.22
4.3	<i>Parochlus</i> sp.	91.67
	<i>Cricotopus</i> sp.	8.33
4.4	<i>Parochlus</i> sp.	94.29
	Poduromorpha	5.71
4.5	<i>Parochlus</i> sp.	95.59
	<i>Cricotopus</i> sp.	1.47
	Poduromorpha	2.94
5.1	<i>Parochlus</i> sp.	95.12
	Poduromorpha	4.88
5.2	<i>Parochlus</i> sp.	94.00
	<i>Cricotopus</i> sp.	6.00
5.3	<i>Parochlus</i> sp.	95.70
	Poduromorpha	4.30
5.4	<i>Parochlus</i> sp.	92.23
	<i>Cricotopus</i> sp.	2.91
	Poduromorpha	4.85
5.5	<i>Parochlus</i> sp.	93.48
	<i>Cricotopus</i> sp.	4.35
	Poduromorpha	2.17

Los resultados revelan una dominancia marcada y consistente de *Parochlus* sp. a lo largo de toda el área de estudio. Este constituyó más del 89% de la abundancia relativa en todos los puntos de muestreo, alcanzando una dominancia absoluta (100%) en el punto 1.1. En 24 de los 25 puntos evaluados, *Parochlus* sp. representó más del 90% de la comunidad, confirmando su establecimiento como la especie estructuralmente dominante del ecosistema estudiado. *Cricotopus* sp. y

Poduromorpha mantuvieron una presencia consistentemente minoritaria. Sus abundancias relativas individuales no excedieron el 10.53% en ningún punto de muestreo, y en múltiples sitios su presencia fue marginal (<5%) o completamente ausente. Esta distribución sugiere que ambos taxones funcionan como componentes secundarios de la estructura comunitaria.

Aunque *Parochlus* sp. mantuvo una dominancia generalizada, se identificaron variaciones espaciales notables en la equitatividad de la comunidad. El punto 3.4 representó el sitio con mayor equitatividad relativa, donde *Parochlus* sp. alcanzó su menor abundancia relativa (89.47%), permitiendo que *Cricotopus* sp. registrara su máxima representación (10.53%) en todo el conjunto de datos.

Tabla 9

Resumen del cálculo de la frecuencia relativa

Espece	Cantidad de puntos en los que aparece	Frecuencia relativa (%)
<i>Parochlus</i> sp.	25	100.000
<i>Cricotopus</i> sp.	16	64.000
Poduromorpha	13	52.000

Los patrones de frecuencia relativa refuerzan las observaciones derivadas del análisis de abundancia. *Parochlus* sp. exhibió una presencia universal, registrándose en la totalidad de los puntos de muestreo (25 de 25, 100%), confirmando su establecimiento como especie ubicua y dominante en todos los agujeros de crioconita evaluados. Esta omnipresencia, combinada con su elevada abundancia relativa, consolida su posición como el taxón más exitoso ecológicamente en los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju.

En contraste, *Cricotopus* sp. y Poduromorpha mostraron patrones de distribución considerablemente más restringidos, apareciendo en 64% y 52% de los puntos de muestreo, respectivamente. A pesar de esta distribución espacial moderadamente amplia, ambos taxones mantuvieron consistentemente abundancias bajas cuando estuvieron presentes. Este patrón sugiere que, aunque *Cricotopus* sp. y Poduromorpha no constituyen especies raras desde una perspectiva de distribución espacial, funcionan como componentes minoritarios de la estructura comunitaria.

4.2. Determinación de los parámetros físicos, químicos y de sedimento

Este apartado se centró en la caracterización de las condiciones abióticas dentro de los agujeros de crioconita. Los parámetros medidos se clasificaron en físicos, químicos y de sedimento.

4.2.1. Parámetros físicos

La Tabla 10 presenta los resultados de los parámetros físicos medidos en el agua de los agujeros de crioconita: temperatura, CE y TDS.

Tabla 10

Parámetros físicos del agua de los agujeros de crioconita

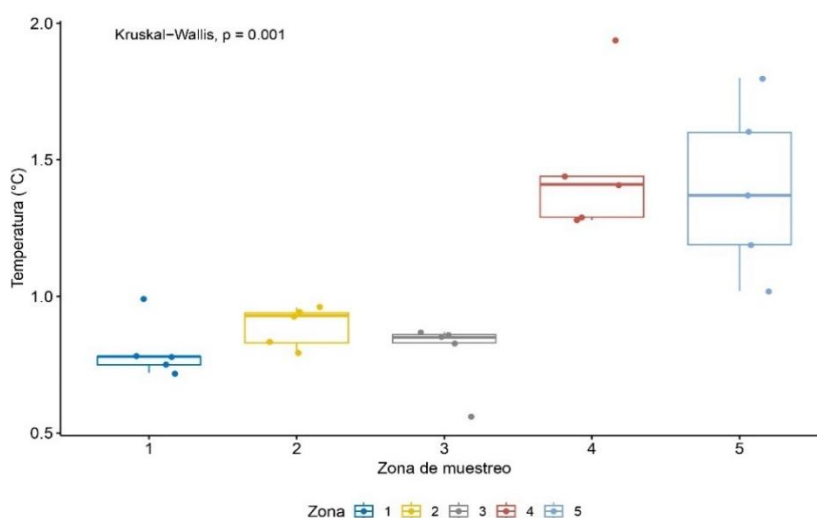
Punto	Temperatura (°C)	CE (μS/cm)	TDS (ppm)
1.1.	0.78	1	1
1.2.	0.75	19	9
1.3.	0.99	11	5
1.4.	0.78	2	1
1.5.	0.72	1	0
2.1.	0.83	22	11
2.2.	0.79	1	0
2.3.	0.96	29	14
2.4.	0.94	29	15
2.5.	0.93	1	0
3.1.	0.56	15	8
3.2.	0.85	11	6
3.3.	0.83	21	10
3.4.	0.86	21	10
3.5.	0.87	22	11
4.1.	1.94	4	2
4.2.	1.28	5	2
4.3.	1.44	14	7
4.4.	1.29	52	26
4.5.	1.41	1	1
5.1.	1.80	62	31
5.2.	1.19	49	24
5.3.	1.37	3	1
5.4.	1.02	58	29
5.5.	1.60	1	1
Media	1.07	18.20	9.00
Desviación estándar	0.36	18.98	9.49

Los parámetros físicos medidos revelaron patrones contrastantes en su variabilidad espacial. La temperatura del agua en los agujeros de crioconita exhibió un rango relativamente estrecho, oscilando entre 0.56 °C (punto 3.1) y 1.94 °C (punto 4.1), con una media de 1.07 °C (± 0.36 °C). Esta distribución térmica confirma las condiciones características de ambientes glaciares, donde las temperaturas se mantienen consistentemente cercanas al punto de congelación del agua. En contraste marcado, tanto la CE como los TDS demostraron una heterogeneidad espacial pronunciada. La CE presentó un rango de variación considerable, desde valores mínimos de 1.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ registrados en múltiples puntos hasta un máximo de 62.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el punto 5.1, resultando en una media de 18.20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (± 18.98 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Paralelamente, los TDS fluctuaron entre 0 ppm (puntos 1.5, 2.2 y 2.5) y 31 ppm (punto 5.1), con una media de 9.00 ppm (± 9.49 ppm).

Cabe señalar que los puntos de muestreo se agruparon en cinco zonas según su ubicación altitudinal y espacial: los puntos 1.1 a 1.5 corresponden a la zona 1, los puntos 2.1 a 2.5 a la zona 2, y así sucesivamente hasta la zona 5 (puntos 5.1 a 5.5). Utilizando esta estratificación espacial, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en los parámetros físicos entre las diferentes zonas de muestreo. Los resultados de este análisis se presentan en las figuras siguientes:

Figura 7

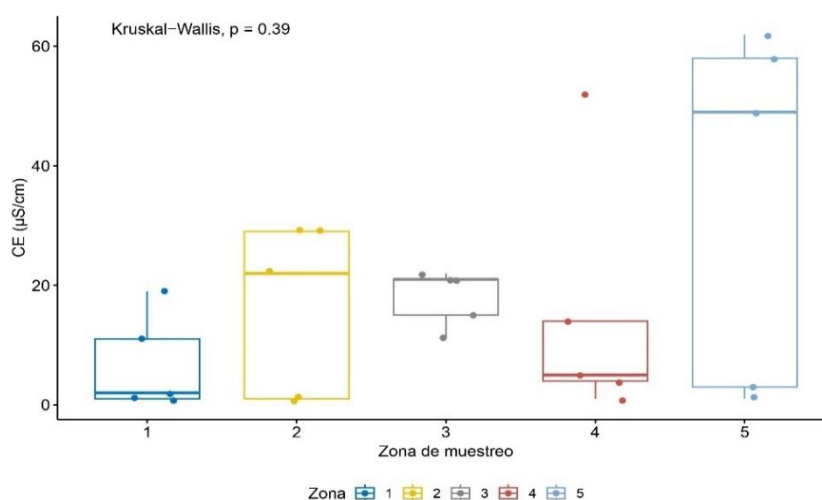
Comparación de temperatura entre zonas de muestreo



De acuerdo con la Figura 7, la temperatura del agua exhibió diferencias estadísticamente significativas entre las zonas de muestreo ($p = 0.001 < 0.05$), lo que sugiere que al menos dos zonas difieren considerablemente entre sí.

Figura 8

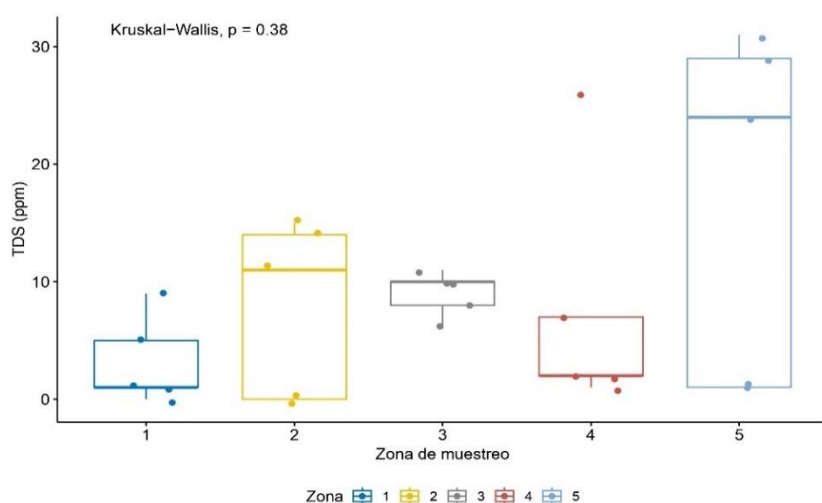
Comparación de CE entre zonas de muestreo



La Figura 8 revela que la CE ($p = 0.39$) no presenta diferencias significativas entre zonas ($p > 0.05$), en contraste con el análisis anterior.

Figura 9

Comparación de TDS entre zonas de muestreo



La Figura 9 muestra que los TDS ($p = 0.38$) no presentan diferencias significativas entre zonas ($p > 0.05$). Estos resultados indican que, a diferencia de la temperatura, la variabilidad de la CE y los TDS es mayor a nivel intrazonal que a nivel zonal.

4.2.2. Parámetros químicos

La Tabla 11 resume los parámetros químicos del agua de los agujeros de crioconita: pH y OD.

Tabla 11*Parámetros químicos del agua de los agujeros de crioconita*

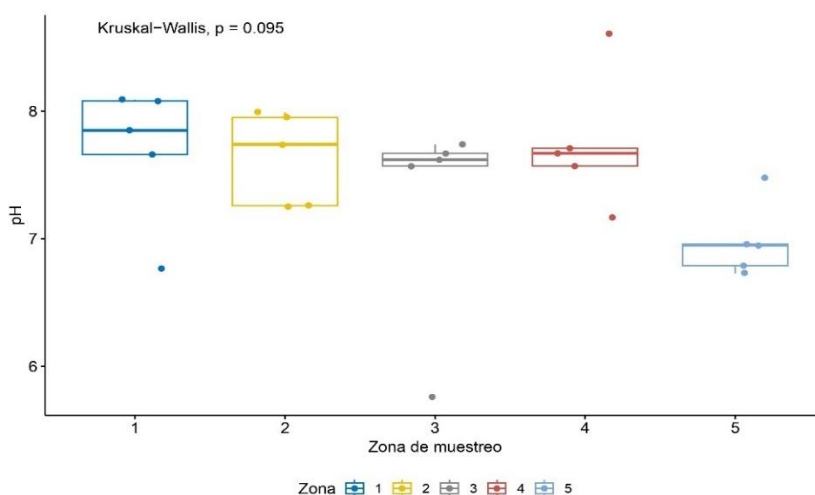
Punto	pH	OD (mg/l)
1.1.	8.09	7.96
1.2.	7.66	7.44
1.3.	7.85	7.56
1.4.	8.08	7.86
1.5.	6.77	6.12
2.1.	7.99	7.02
2.2.	7.95	6.98
2.3.	7.26	6.54
2.4.	7.25	6.43
2.5.	7.74	6.33
3.1.	7.74	7.57
3.2.	5.76	6.94
3.3.	7.67	6.99
3.4.	7.62	6.46
3.5.	7.57	6.00
4.1.	8.61	7.33
4.2.	7.71	8.11
4.3.	7.67	7.44
4.4.	7.57	8.96
4.5.	7.17	8.64
5.1.	6.95	8.40
5.2.	6.96	7.75
5.3.	6.79	7.88
5.4.	7.48	7.98
5.5.	6.73	7.56
Media	7.47	7.37
Desviación estándar	0.58	0.78

Los valores de pH presentaron una variabilidad considerable, oscilando desde condiciones moderadamente ácidas hasta alcalinas, con un rango de 5.76 (punto 3.2) a 8.61 (punto 4.1) y una media de 7.47 (\pm 0.58). Las concentraciones de OD registraron valores entre 6.00 mg/l (punto 3.5) y 8.96 mg/l (punto 4.4), con una media de 7.37 (\pm 0.78 mg/l). Estos niveles de saturación de oxígeno, próximos a la saturación teórica para agua a temperaturas cercanas a 0 °C, confirman condiciones predominantemente aeróbicas dentro de los microhábitats crioconíticos.

Para evaluar la variabilidad espacial de los parámetros químicos entre las cinco zonas de muestreo, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Este análisis permitió determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en pH y OD entre zonas, cuyos resultados se presentan en las siguientes figuras:

Figura 10

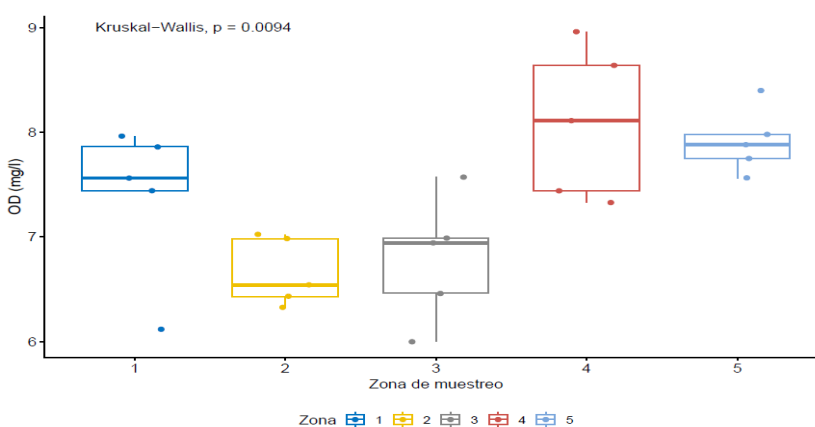
Comparación de pH entre zonas de muestreo



La Figura 10 muestra que los valores de pH no difirieron significativamente entre las zonas de muestreo ($p = 0.095 > 0.05$), lo que sugiere una relativa homogeneidad en el equilibrio ácido-base del agua de crioconita a lo largo del gradiente altitudinal.

Figura 11

Comparación de OD entre zonas de muestreo



La Figura 11 evidencia que el OD presentó diferencias estadísticamente significativas entre al menos dos zonas ($p = 0.0094 < 0.05$).

Como complemento al análisis químico principal, se determinaron las concentraciones de N total y fosfato en las muestras de agua de los agujeros de crioconita. Estas variables, aunque secundarias en el contexto del presente estudio, proporcionan información adicional sobre la disponibilidad de nutrientes en estos microhábitats glaciares. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Parámetros químicos adicionales del agua de los agujeros de crioconita

Zona de muestreo	N total (mg/l)	Fosfato (mg/l)
1	<0.50	0.018
2	<0.50	0.054
3	<0.50	0.047
4	<0.50	0.039
5	<0.50	0.095
Media	<0.50	0.05
Desviación estándar	-	0.03

Las concentraciones de N total se encontraron por debajo del límite de detección del método analítico empleado por el laboratorio (0.50 mg/l) en todas las zonas de muestreo, impidiendo la cuantificación precisa de este nutriente. Esta limitación metodológica sugiere concentraciones extremadamente bajas de nitrógeno disponible, característica típica de ambientes oligotróficos como los ecosistemas glaciares. En contraste, las concentraciones de fosfato fueron cuantificables y mostraron variabilidad moderada entre zonas (0.018-0.095 mg/l), con una concentración media de 0.05 ± 0.03 mg/l. Estos valores, aunque detectables, permanecen en rangos bajos comparados con ecosistemas acuáticos convencionales, reflejando las condiciones nutricionalmente limitadas de estos microhábitats.

Dado el carácter exploratorio de estas determinaciones y las limitaciones analíticas identificadas, estos parámetros no fueron incluidos en los análisis estadísticos multivariados posteriores del presente estudio.

4.2.3. Análisis de sedimentos

La Tabla 13 presenta los resultados del análisis de los sedimentos recolectados en las cinco zonas de muestreo de la zona de ablación del glaciar

Artesonraju, incluyendo MO, concentración de metales (calcio total, magnesio total y potasio total), media del tamaño granular y color.

Tabla 13

Resumen de los datos del análisis de sedimento de laboratorio

Zona de muestreo	MO (%)	Metales			Media del tamaño granular (mm)	Color
		Calcio total (mg/kg)	Magnesio total (mg/kg)	Potasio total (mg/kg)		
1	10.31	683.80	4083.41	1858.14	0.113	Gris oliva oscuro
2	2.76	643.42	3690.96	1654.76	0.100	Negro oliva
3	1.38	772.67	4013.46	1835.52	0.123	Negro oliva
4	8.86	948.48	3774.96	1912.94	0.274	Oliva negro
5	6.32	1229.08	4089.64	2074.70	0.171	Gris oliva oscuro
Media	5.93	855.49	3930.49	1867.21	0.156	-
Desviación estándar	3.83	239.54	185.18	151.13	0.071	-

El contenido de MO en los sedimentos mostró una notable heterogeneidad, con valores que oscilaron entre 1.38 % (zona 3) y 10.31 % (zona 1), y un promedio general de 5.93 % (± 3.83 %). Esta variabilidad es ecológicamente relevante, ya que la MO constituye una fuente primaria de nutrientes para las comunidades de macroinvertebrados en estos sistemas.

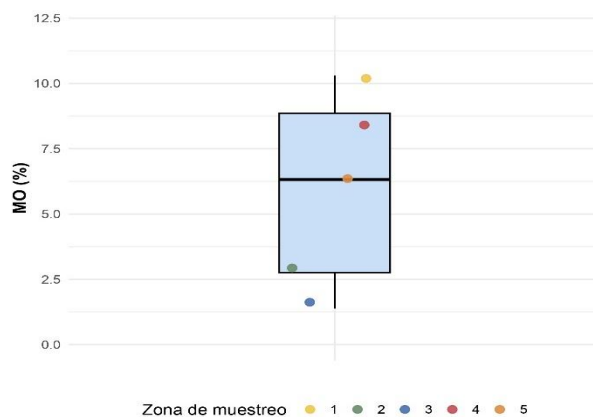
En cuanto a la composición de metales, el calcio total (en adelante Ca) varió ampliamente entre 643.42 mg/kg (zona 2) y 1229.08 mg/kg (zona 5), con un promedio de 855.49 mg/kg (± 239.54 mg/kg). Las concentraciones de magnesio total (en adelante Mg) (3690.96–4089.64 mg/kg, media = 3930.49 ± 185.18 mg/kg) y potasio total (en adelante K) (1654.76–2074.70 mg/kg, media = 1867.21 ± 151.13 mg/kg) mostraron rangos más estrechos y menor variabilidad relativa que el calcio.

La media del tamaño granular (en adelante granulometría) de los sedimentos osciló entre 0.100 mm (zona 2) y 0.274 mm (zona 4), con un valor promedio de 0.156 mm (± 0.071 mm). Las coloraciones registradas (gris oliva oscuro, negro oliva y oliva negro) podrían estar asociadas a diferencias en la composición mineralógica y al contenido de MO.

En las Figuras 12, 13 y 14 se presentan los boxplots de las características del sedimento, los cuales permiten visualizar la distribución, rango y presencia de posibles valores atípicos por zona de muestreo.

Figura 12

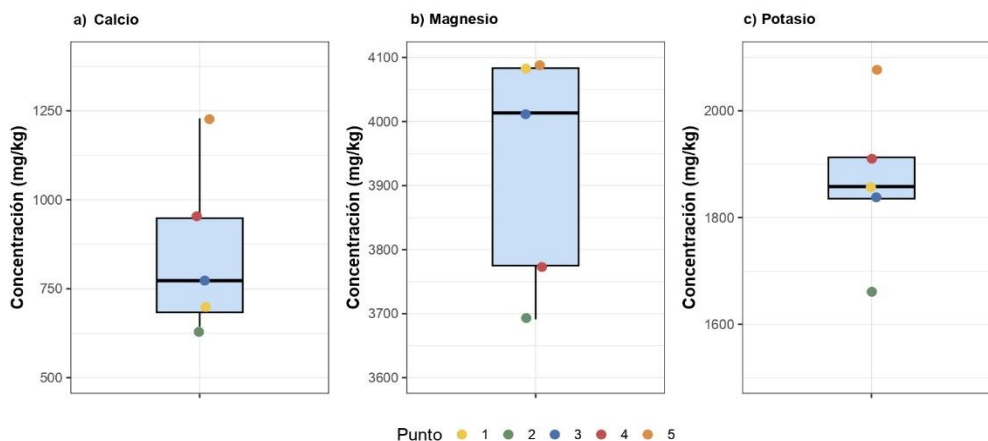
Boxplot de MO presente en el sedimento



El diagrama de cajas muestra la distribución de MO en el sedimento. Los valores oscilan entre 1.38% y 10.31%, con una mediana cercana a 5.93%. La distribución presenta valores atípicos en las zonas 1 y 3.

Figura 13

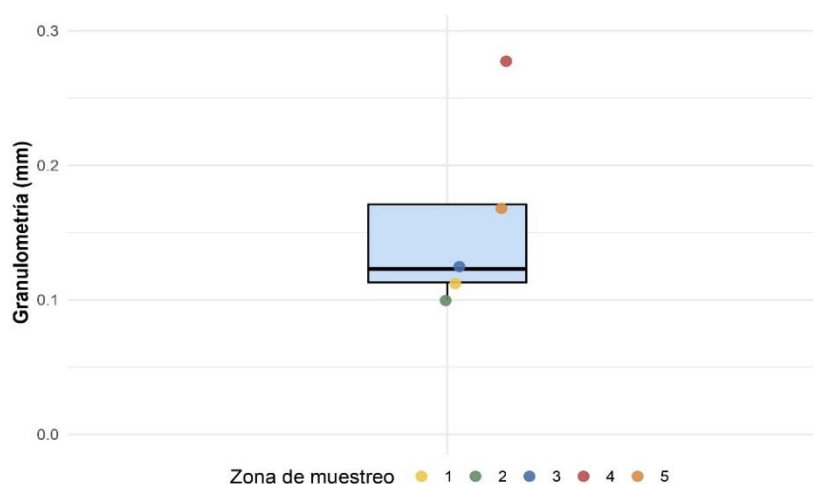
Boxplot de metales (Ca, Mg y K) presente en el sedimento



Los tres diagramas de cajas muestran las concentraciones de: a) Ca (oscilando entre 643.42 y 1229.08 mg/kg, con mediana de 855.49 mg/kg), b) Mg (rango de 3690.96 a 4089.64 mg/kg, con mediana de 3930.49 mg/kg) y c) K (concentraciones entre 1654.76 y 2074.70 mg/kg, con mediana de 1867.21 mg/kg). El Mg muestra la mayor variabilidad absoluta, mientras que el K presenta la distribución más concentrada.

Figura 14

Boxplot de granulometría por zona de muestreo



El diagrama de cajas muestra la granulometría del sedimento, con valores que oscilan entre aproximadamente 0.10 y 0.27 mm. La mediana se ubica cerca de 0.13 mm, indicando una predominancia de partículas finas.

En la distribución de los valores de sedimento por zona, varios datos se sitúan tanto por encima como por debajo de la mediana, en concordancia con la alta variabilidad previamente descrita. Esta dispersión sugiere diferencias entre crioconitas individuales, posiblemente asociadas a condiciones particulares, como el tiempo de exposición, la acumulación diferencial de partículas o la influencia del derretimiento superficial.

Análisis de correlación entre variables fisicoquímicas

Para determinar el método estadístico más apropiado y garantizar la robustez de los análisis posteriores, se evaluó la distribución de normalidad de cada variable mediante la prueba de Shapiro-Wilk previo a la aplicación del análisis de correlación entre las variables fisicoquímicas. La Tabla 14 muestra estos resultados.

Tabla 14

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para variables fisicoquímicas

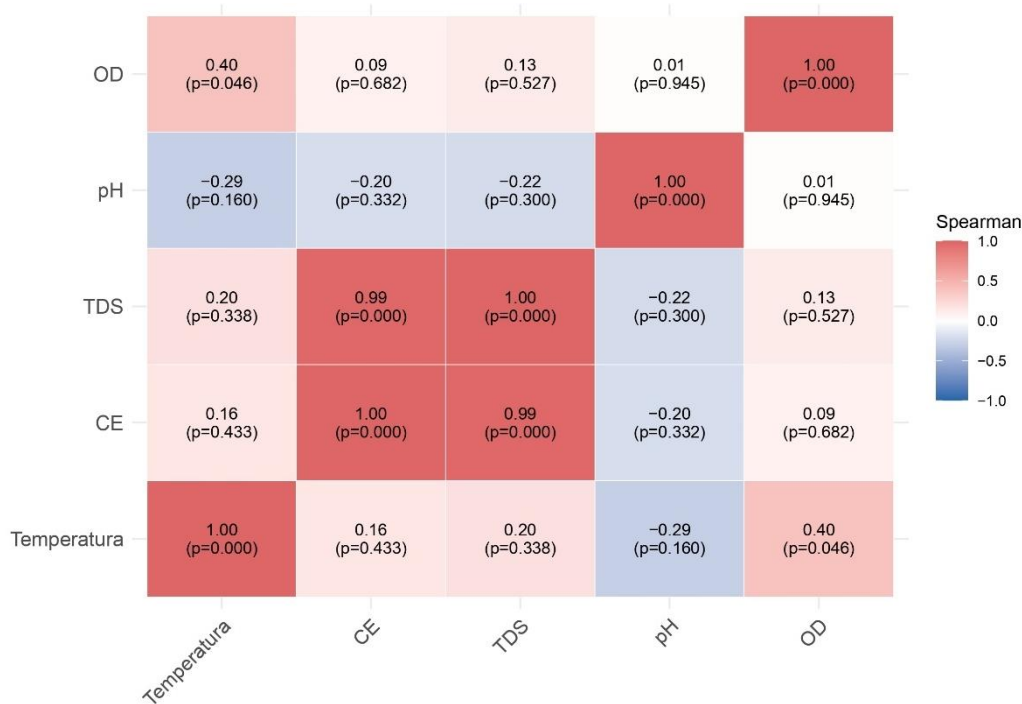
Variable	p-value	Normalidad
CE	0.001	No
OD	0.804	Sí
TDS	0.001	No
Temperatura	0.017	No
pH	0.128	Sí

Los resultados muestran que tres de las cinco variables fisicoquímicas (CE, TDS y temperatura) no presentaron distribución normal ($p < 0.05$), mientras que solo dos variables (OD y pH) mostraron distribución normal ($p > 0.05$). Dado que la mayoría de las variables no cumplieron con el supuesto de normalidad, se aplicó el análisis de correlación de Spearman, apropiado para datos no paramétricos.

Los coeficientes de correlación (ρ) y los valores de p-value resultantes se presentan en la matriz de correlación de Spearman (Figura 15). En esta representación, los colores cálidos (rojo) denotan correlaciones positivas, mientras que los colores fríos (azul) indican correlaciones negativas. La intensidad del color es directamente proporcional a la magnitud del coeficiente, reflejando la fuerza de la relación.

Figura 15

Matriz de correlación de Spearman entre variables fisicoquímicas



La matriz de correlación de Spearman reveló las asociaciones entre las variables abióticas medidas en los agujeros de crioconita. Entre las correlaciones significativas principales, se registró una correlación positiva media entre temperatura y OD ($\rho = 0.40$, $p < 0.05$). Este resultado indica que los agujeros con temperaturas más elevadas presentaron concentraciones mayores de OD. Asimismo, se identificó una correlación negativa media entre pH y temperatura (ρ

= -0.29, $p > 0.05$), evidenciando que los agujeros con temperaturas más altas tendieron a mostrar valores de pH menores.

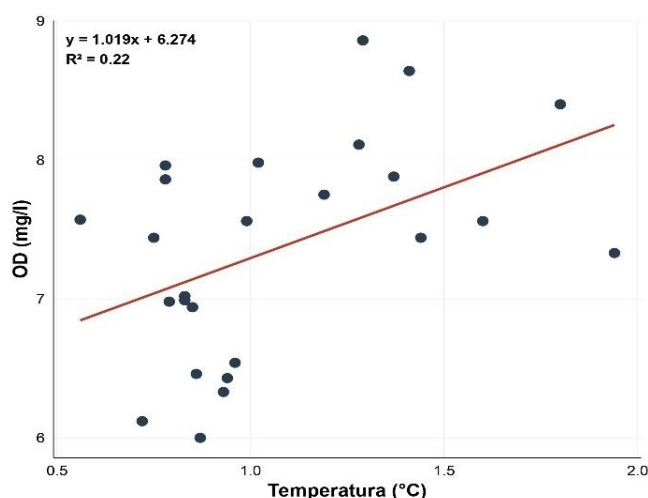
Además, se observaron correlaciones negativas medias entre pH y TDS ($\rho = -0.22$, $p > 0.05$), y entre pH y CE ($\rho = -0.20$, $p > 0.05$). Estos resultados sugieren que un incremento en el contenido iónico del agua se asoció con una disminución del pH en los agujeros de crioconita.

Las demás combinaciones de variables analizadas presentaron correlaciones débiles ($|p| < 0.11$) y no significativas ($p > 0.05$), indicando ausencia de relaciones monotónicas relevantes entre estos parámetros. La correlación entre CE y TDS fue excluida del análisis debido a que ambas variables presentan dependencia instrumental, ya que los TDS se calculan a partir de los valores de CE mediante un factor de conversión del equipo.

Finalmente, la correlación positiva significativa entre temperatura y OD fue confirmada mediante el gráfico de dispersión presentada en la Figura 16.

Figura 16

Relación entre temperatura y OD



En esta figura se observa una relación lineal creciente entre la temperatura y el OD, con una dispersión moderada de los datos alrededor de la línea de tendencia.

4.2.4. Análisis de correlación entre variables fisicoquímicas y las características del sedimento

Para este análisis complementario se utilizaron los valores promediados por zona de muestreo de las variables físicas, químicas y de sedimento, los cuales se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15

Variables físicas, químicas y de sedimento por zona de muestreo

Zona		1	2	3	4	5	
Variables Físicas	Temperatura (°C)	0.80	0.89	0.79	1.47	1.40	
	CE (µS/cm)	6.80	16.40	18.00	15.20	34.60	
	TDS (ppm)	3.20	8.00	9.00	7.60	17.20	
Variables Químicas	pH	7.69	7.64	7.27	7.75	6.98	
	OD (mg/l)	7.39	6.66	6.79	8.10	7.91	
	MO (%)	10.31	2.76	1.38	8.86	6.32	
Sedimento	Metales	Ca (mg/kg)	683.80	643.42	772.67	948.48	1229.08
		Mg (mg/kg)	4083.41	3690.96	4013.46	3774.96	4089.64
		K (mg/kg)	1858.14	1654.76	1835.52	1912.94	2074.70
	Color	Gris oliva oscuro	Negro Oliva	Negro Oliva	Oliva negro	Gris oliva oscuro	
	Granulometría (mm)	0.11	0.10	0.12	0.27	0.17	

Previo al análisis de correlación, se evaluó la distribución de normalidad de cada variable mediante la prueba de Shapiro-Wilk para determinar el método estadístico más apropiado. El resultado de este análisis se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16

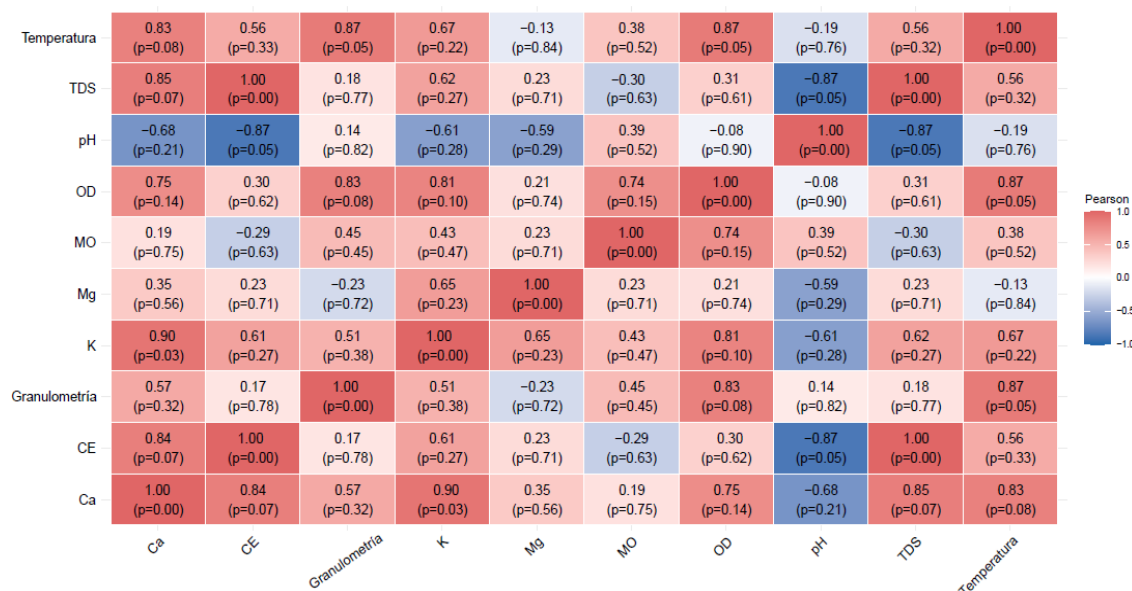
Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para variables fisicoquímicas y de sedimento

Variable	p-value	Normalidad
CE	0.368	Sí
Ca	0.381	Sí
Granulometría	0.142	Sí
MO	0.632	Sí
Mg	0.165	Sí
OD	0.430	Sí
K	0.879	Sí
TDS	0.385	Sí
Temperatura	0.064	Sí
pH	0.234	Sí

Dado que todas las variables presentaron una distribución normal, se aplicó la correlación de Pearson (Figura 17) para el análisis de asociaciones lineales.

Figura 17

Correlación de Pearson entre variables fisicoquímicas y de sedimento



La matriz de correlación de Pearson reveló las asociaciones lineales entre las variables fisicoquímicas y de sedimento en los agujeros de crioconita.

Entre las correlaciones positivas muy fuertes ($r = 0.76-0.90$) se destacaron Ca-K ($r = 0.90$) y temperatura - granulometría ($r = 0.87$), TDS-Ca ($r = 0.85$), CE-Ca ($r = 0.84$), temperatura-Ca ($r = 0.83$), OD-granulometría ($r = 0.83$) y K-OD ($r = 0.81$). Las correlaciones positivas considerables ($r = 0.51-0.75$) incluyeron Ca-OD ($r = 0.75$), MO-OD ($r = 0.74$), temperatura-K ($r = 0.67$), Mg-K ($r = 0.65$), TDS-K ($r = 0.62$), Ca-granulometría ($r = 0.57$), K-granulometría ($r = 0.51$).

Las correlaciones positivas medias ($r = 0.11-0.50$) identificaron Mg - OD ($r = 0.39$), y Mg - granulometría ($r = 0.30$). Las correlaciones negativas medias incluyeron pH-Ca ($r = -0.68$), pH-K ($r = -0.61$), pH-Mg ($r = -0.59$), MO-CE ($r = -0.29$), y MO-TDS ($r = -0.30$). Estos resultados indican que el pH presentó una relación inversa consistente con los metales analizados.

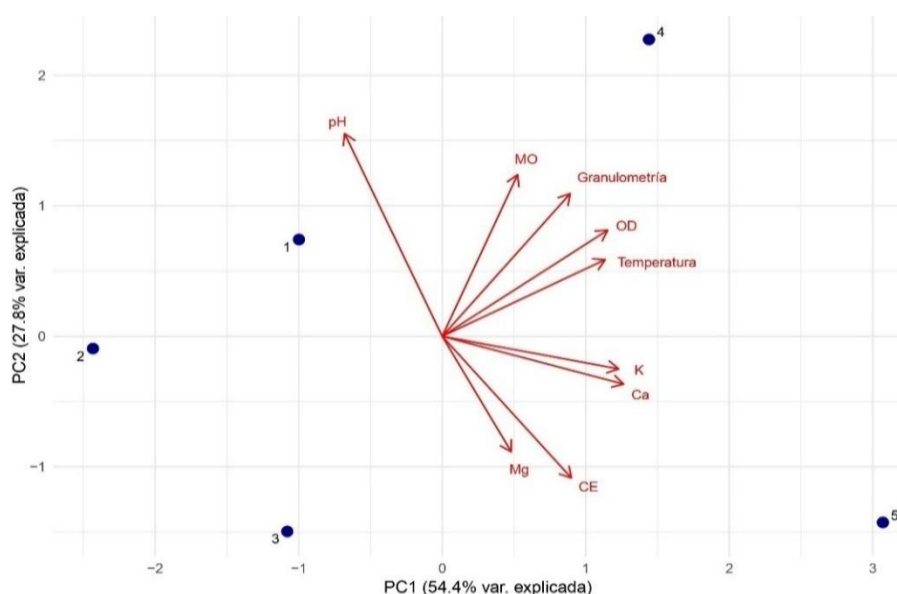
Las demás combinaciones de variables presentaron correlaciones débiles o nulas, como temperatura-Mg ($r = -0.13$), pH-granulometría ($r = 0.14$), sugiriendo independencia.

4.2.5. PCA entre variables físicas, químicas y de sedimento

Se aplicó un PCA para identificar patrones multivariados entre variables fisicoquímicas del agua (temperatura, CE, pH y OD) y características del sedimento (MO, metales totales — Ca, Mg y K— y granulometría). Para evitar redundancia en la información, se excluyeron los TDS debido a su dependencia instrumental con la CE. Este enfoque permitió reducir la dimensionalidad de los datos y visualizar los gradientes ambientales entre las zonas de muestreo. En la Figura 18 se presenta este análisis.

Figura 18

PCA – Biplot con variables fisicoquímicas y de sedimento por zona de muestreo



Varianza explicada:

- Componente principal 1: Explica el 54.4% de la variabilidad total.
- Componente principal 2: Explica el 27.8% de la variabilidad total.
- Total acumulado: 82.2%, lo cual es un valor considerable, que justifica la interpretación de los datos en el espacio bidimensional del biplot.

La Tabla 17 presenta las cargas del PCA y su contribución.

Tabla 17

Tabla de cargas (loadings) del PCA

Variable	PC1	Contrib_PC1	PC2	Contrib_PC2
Temperatura	0.39	Moderada	0.20	Baja
CE	0.31	Moderada	-0.38	Moderada

Variable	PC1	Contrib_PC1	PC2	Contrib_PC2
pH	-0.24	Baja	0.54	Alta
OD	0.40	Moderada	0.28	Baja
MO	0.18	Baja	0.43	Moderada
Ca	0.44	Moderada	-0.13	Baja
Mg	0.17	Baja	-0.31	Moderada
K	0.43	Moderada	-0.09	Baja
Granulometría	0.31	Moderada	0.38	Moderada

Componente Principal 1 (PC1: 54.4% varianza explicada):

Este componente se asoció positivamente con Ca, K, temperatura, OD y granulometría (cargas entre 0.31 y 0.44). Esto indica que las zonas con valores altos en PC1 se caracterizan por una mayor concentración de cationes en el sedimento, temperaturas más elevadas, mayor OD y tamaño granular, sugiriendo una influencia predominante de procesos de meteorización y aporte de material detrítico. Este corresponde a un gradiente de mineralización y meteorización.

Componente Principal 2 (PC2: 27.8% de varianza explicada):

Este componente se asoció positivamente con pH (0.54) y la MO (0.43), y negativamente con la CE (-0.38) y Mg (-0.31). Por tanto, representa un gradiente que contrasta sitios con mayor pH y contenido de MO frente a aquellos con mayor CE y concentraciones de Mg. Este corresponde a un gradiente de alcalinidad y contenido orgánico versus carga de metales.

a) Diferenciación espacial de las zonas de muestreo

La distribución de las zonas en el biplot (Figura 18) reveló una clara separación según los gradientes ambientales definidos por PC1 y PC2. Se identificaron tres agrupaciones:

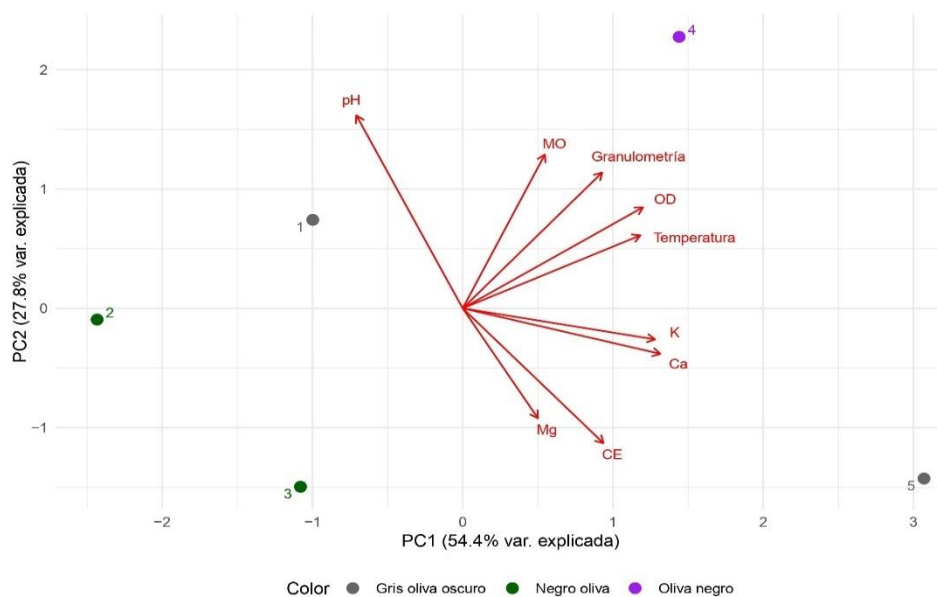
- Zona 4, ubicada en el cuadrante superior derecho, se asoció con las mayores concentraciones de cationes en el sedimento, temperatura elevada, alta oxigenación y pH alcalino.
- Zona 5, posicionada en el cuadrante inferior derecho, también se caracterizó por altas concentraciones de cationes, pero con pH menor y contenido reducido de MO, diferenciándose de la zona 4 en sus condiciones químicas.

- Zonas 1, 2 y 3, situadas en el sector izquierdo del biplot, se asociaron con niveles menores de mineralización y granulometría más fina. La zona 1, en el cuadrante superior izquierdo, se distinguió por su pH más elevado y mayor contenido de MO, mientras que las zonas 2 y 3, en el cuadrante inferior izquierdo, se caracterizaron por mayor CE y concentraciones más altas de Mg, indicando condiciones específicas en su equilibrio iónico.

Además, se realizó un análisis complementario del PCA incorporando el color del sedimento como variable cualitativa externa (Figura 19). Aunque esta característica cualitativa no participó en el cálculo de los componentes principales, permitió visualizar posibles patrones de agrupamiento de las muestras en función de esta característica.

Figura 19

PCA – Biplot con variables fisicoquímicas y de color de sedimento



De la Figura 19 se observó que el valor de la coloración como un indicador agrupador fue inconsistente:

- Alta correspondencia: existió una fuerte correspondencia para el color 'Negro oliva'. Las zonas 2 y 3, que compartieron este color, formaron un clúster compacto. Esto sugirió que dicha coloración estaba consistentemente asociada a las condiciones fisicoquímicas de menor mineralización y granulometría más fina.

- Baja correspondencia y casos aislados: por el contrario, otros colores no mostraron la misma capacidad de agrupación. El color ‘Gris oliva oscuro’ no representó un grupo homogéneo. Las zonas 1 y 5, con esta coloración, se encontraron en extremos opuestos del PC1. Esto demostró que condiciones ambientales drásticamente diferentes pudieron dar lugar a una crioconita de apariencia similar. La zona 4, con su coloración ‘Oliva negro’, se presentó como un punto aislado, indicando un perfil fisicoquímico único, fuertemente influenciado por la MO y el pH.

4.3. Determinación de la morfometría de los agujeros de crioconita

En este apartado se presentan los resultados de las mediciones morfométricas realizadas en los agujeros de crioconita. Estos parámetros permiten caracterizar la forma y el tamaño de los agujeros, lo cual es fundamental para entender su dinámica.

La Tabla 18 detalla las mediciones morfométricas de los agujeros de crioconita, incluyendo sus dimensiones principales (largo, ancho y profundo) y las estimaciones de área y volumen calculadas mediante tres aproximaciones distintas: la asimilación a una forma rectangular, el escalado con AutoCAD y la asimilación a un elipsoide.

Tabla 18

Parámetros morfométricos de los agujeros de crioconita

Punto	Morfometría								
	Largo (cm)	Ancho (Cm)	Profundo (cm)	Aprox. a un rectángulo		A escala con AutoCAD		Aprox. a un elipsoide	
				Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)
1.1.	24.50	10.65	6.80	260.93	1774.29	216.46	1471.93	204.93	1393.52
1.2.	12.20	5.10	5.90	62.22	367.10	52.91	312.17	48.87	288.32
1.3.	20.90	6.50	8.50	135.85	1154.73	99.80	848.30	106.70	906.92
1.4.	18.30	10.50	12.50	192.15	2401.88	140.68	1758.50	150.91	1886.43
1.5.	15.30	9.20	11.80	140.76	1660.97	101.76	1200.77	110.55	1304.52
2.1.	16.80	8.00	6.50	134.40	873.60	109.92	714.48	105.56	686.12
2.2.	13.00	8.70	10.50	113.10	1187.55	104.25	1094.63	88.83	932.70
2.3.	14.20	5.00	7.90	71.00	560.90	63.19	499.20	55.76	440.53
2.4.	14.40	6.00	7.50	86.40	648.00	77.27	579.53	67.86	508.94
2.5.	13.70	4.90	8.40	67.13	563.89	53.86	452.42	52.72	442.88
3.1.	23.50	9.30	8.50	218.55	1857.68	175.35	1490.48	171.65	1459.01
3.2.	27.50	11.50	8.20	316.25	2593.25	296.70	2432.94	248.38	2036.73
3.3.	23.20	7.00	9.50	162.40	1542.80	145.83	1385.39	127.55	1211.71
3.4.	16.20	7.40	5.50	119.88	659.34	107.25	589.88	94.15	517.84
3.5.	8.80	5.10	3.50	44.88	157.08	38.17	133.60	35.25	123.37

4.1.	24.50	18.50	13.00	453.25	5892.25	356.58	4635.54	355.98	4627.76
4.2.	18.40	14.80	12.00	272.32	3267.84	213.70	2564.40	213.88	2566.55
4.3.	14.80	9.70	7.10	143.56	1019.28	112.92	801.73	112.75	800.54
4.4.	26.90	10.50	13.00	282.45	3671.85	211.46	2748.98	221.84	2883.86
4.5.	18.50	16.30	12.00	301.55	3618.60	233.54	2802.48	236.84	2842.04
5.1.	15.60	13.40	10.00	209.04	2090.40	171.76	1717.60	164.18	1641.79
5.2.	31.10	23.80	15.50	740.18	11472.79	553.58	8580.49	581.34	9010.70
5.3.	16.30	12.90	5.00	210.27	1051.35	173.37	866.85	165.15	825.73
5.4.	16.50	14.60	12.50	240.90	3011.25	195.71	2446.38	189.20	2365.03
5.5.	28.70	17.60	9.00	505.12	4546.08	423.23	3809.07	396.72	3570.48

Las dimensiones directas de los agujeros presentaron una notable variabilidad:

- El largo fluctuó entre 8.80 cm (Punto 3.5) y 31.10 cm (Punto 5.2), con un promedio de 18.55 cm.
- El ancho varió desde 4.90 cm (Punto 2.5) hasta 23.80 cm (Punto 5.2), registrando un promedio de 10.25 cm.
- La profundidad se encontró en un rango de 3.50 cm (Punto 3.5) a 15.50 cm (Punto 5.2), con una media de 9.14 cm.

Consecuentemente, los cálculos de área y volumen también reflejaron esta heterogeneidad dimensional a través de los diferentes métodos de estimación:

a. Aproximación a un Rectángulo:

- El área calculada por este método (en adelante Área_Rect) varió de 44.88 cm² (Punto 3.5) a 740.18 cm² (Punto 5.2), con un promedio de 206.93 cm².
- El volumen estimado por este método (en adelante Vol_Rect) osciló entre 157.08 cm³ (Punto 3.5) y 11472.79 cm³ (Punto 5.2), promediando 1970.78 cm³.

b. A escala con AutoCAD:

- El área obtenida mediante AutoCAD (en adelante Área_AutoCAD) se encontró entre 38.17 cm² (Punto 3.5.) y 553.58 cm² (Punto 5.2), con una media de 164.83 cm².
- El volumen escalado con AutoCAD (en adelante Vol_AutoCAD) varió desde 133.60 cm³ (Punto 3.5) hasta 8580.49 cm³ (Punto 5.2), con un promedio de 1575.70 cm³.

c. Aproximación a un Elipsoide:

- El área superficial elipsoidal estimada (en adelante Área_Elipse) varió de 35.25 cm² (Punto 3.5.) a 581.34 cm² (Punto 5.2), con un valor promedio de 161.68 cm².
- El volumen elipsoidal (en adelante Vol_Elipse) se encontró entre 123.37 cm³ (Punto 3.5) y 9010.70 cm³ (Punto 5.2), promediando 1555.98 cm³.

Estos resultados reflejan la alta variabilidad morfométrica de los agujeros de crioconita, tanto en tamaño como en forma. En general, se observa que la aproximación rectangular tiende a sobreestimar las áreas y volúmenes en comparación con los métodos de AutoCAD y elipsoidal, los cuales presentan estimaciones más conservadoras y consistentes entre sí. Esta diferencia es esperable, dado que el modelo rectangular no considera la curvatura natural ni las irregularidades reales del contorno de los agujeros.

4.3.1. Correlaciones entre dimensiones morfométricas y volumen/área

Con el objetivo de evaluar la relación entre las dimensiones morfométricas (largo, ancho y profundidad) y las estimaciones de área y volumen obtenidas mediante distintos métodos, se realizó un análisis de correlación. Previamente, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a cada variable para determinar la pertinencia de utilizar métodos paramétricos o no paramétricos. Los resultados se resumen en la Tabla 19.

Tabla 19

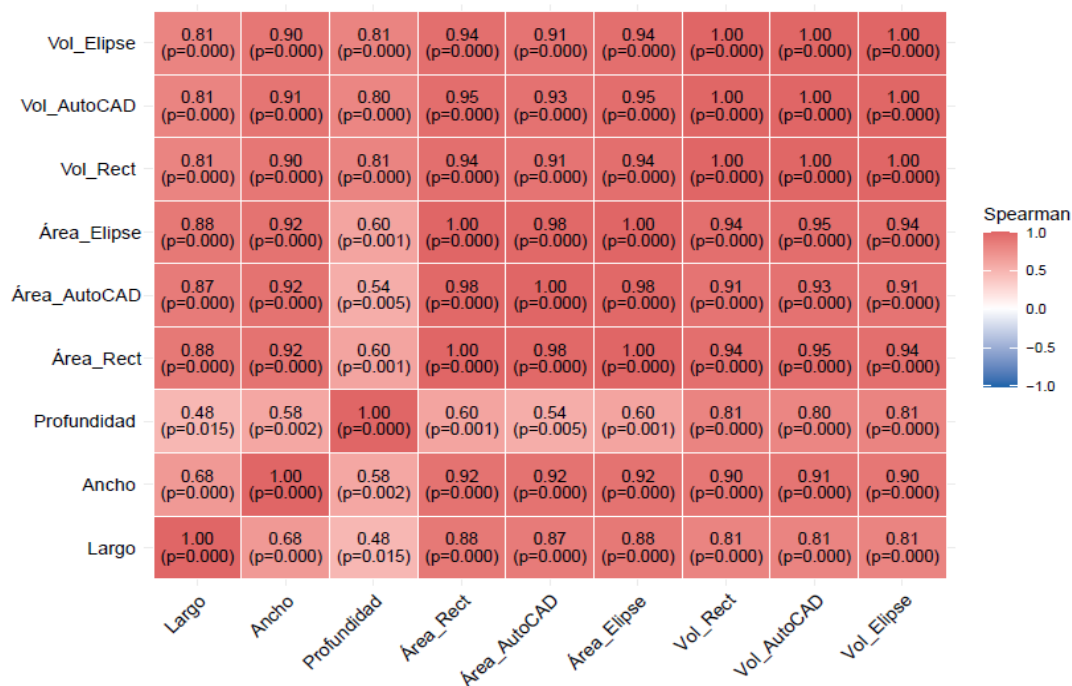
Resumen de los resultados de Shapiro Wilk

Variable	p-value	Normalidad
Largo	0.190	Sí
Ancho	0.065	Sí
Profundidad	0.797	Sí
Area_Rect	0.001	No
Area_AutoCAD	0.002	No
Area_Elipse	0.001	No
Vol_Rect	1.97e-05	No
Vol_AutoCAD	4.27e-05	No
Vol_Elipse	1.97e-05	No

Dado que una parte significativa de las variables analizadas no sigue una distribución normal, se optó por aplicar la correlación de Spearman, adecuada para evaluar relaciones monótonas en datos no paramétricos.

Figura 20

Correlación entre dimensiones (largo, ancho, profundidad) con el volumen/área por método



Se registraron correlaciones positivas perfectas ($\rho = 0.91-1.00$, $p < 0.001$) entre las variables de área (Área_Rect, Área_AutoCAD, Área_Elipse) y entre las variables de volumen (Vol_Rect, Vol_AutoCAD, Vol_Elipse). Estas correlaciones confirman la consistencia metodológica entre los diferentes métodos de cálculo empleados para una misma dimensión morfométrica.

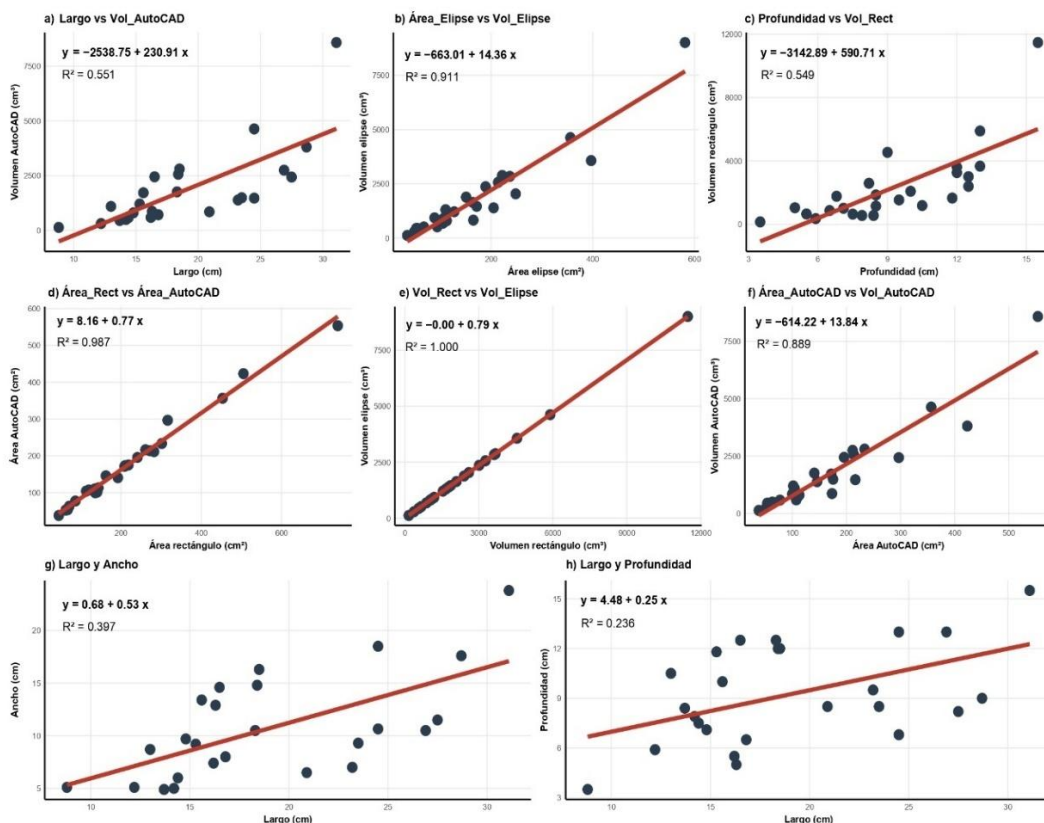
Entre las correlaciones muy fuertes más relevantes, se identificaron relaciones positivas significativas entre las variables de área y las dimensiones lineales. Específicamente, Área_Rect mostró correlaciones de $\rho = 0.88$ ($p < 0.001$) con largo y $\rho = 0.92$ ($p < 0.001$) con ancho. Resultados similares se observaron para Área_AutoCAD (largo: $\rho = 0.87$, $p < 0.001$; ancho: $\rho = 0.92$, $p < 0.001$) y Área_Elipse (largo: $\rho = 0.88$, $p < 0.001$; ancho: $\rho = 0.92$, $p < 0.001$). Las variables de volumen también presentaron correlaciones muy fuertes con el ancho ($\rho = 0.90-0.91$, $p < 0.001$), con el largo ($\rho = 0.81$, $p < 0.001$) y con la profundidad ($\rho = 0.80-0.81$, $p <$

0.001). Estas relaciones evidencian que las dimensiones lineales constituyen determinantes clave del volumen en los agujeros de crioconita.

Entre las correlaciones considerables, se identificó una relación positiva significativa entre largo y ancho ($\rho = 0.68$, $p < 0.001$), indicando que los agujeros de crioconita tienden a expandirse proporcionalmente en estas dimensiones horizontales. La correlación entre ancho y profundidad fue considerable ($\rho = 0.58$, $p = 0.002$), mientras que las correlaciones entre profundidad y las variables de área oscilaron entre $\rho = 0.54-0.60$ ($p \leq 0.005$). La correlación entre largo y profundidad presentó una relación positiva media ($\rho = 0.48$, $p = 0.015$). Las demás combinaciones de variables mantuvieron correlaciones positivas superiores a $\rho = 0.48$, evidenciando que todas las variables morfométricas medidas presentan relaciones positivas consistentes entre sí.

Figura 21

Relaciones lineales entre las dimensiones y el área/volumen de los agujeros de crioconita



La Figura 21 confirma las correlaciones positivas esperadas. La relación entre largo y vol_AutoCAD (Figura 21a) evidencia una tendencia positiva, pero con una

dispersión considerable, resultando en un coeficiente de determinación moderado ($R^2 = 0.551$). De forma similar, la relación entre profundidad y vol_Rect (Figura 21c) presenta una tendencia positiva con dispersión moderada ($R^2 = 0.549$). Las relaciones entre largo y ancho (Figura 21g) y entre largo y profundidad (Figura 21h) son las que muestran una mayor dispersión, con coeficientes R^2 de 0.397 y 0.236 respectivamente, indicando una relación lineal más débil. En contraste, las figuras que relacionan área y volumen, o las que comparan métodos de cálculo, demuestran ajustes lineales muy fuertes. Las relaciones entre el área y el volumen para un mismo método (Figuras 21b y 21f) son fuertes, con $R^2 = 0.911$ (elipse) y $R^2 = 0.889$ (AutoCAD). Notablemente, las gráficas que comparan la consistencia entre métodos de cálculo muestran ajustes casi perfectos: la relación entre área_Rect y área_AutoCAD (Figura 21d) tiene un $R^2 = 0.987$, y la relación entre vol_Rect y vol_Elipse (Figura 21e) muestra un ajuste perfecto ($R^2 = 1.000$), confirmando la alta consistencia metodológica.

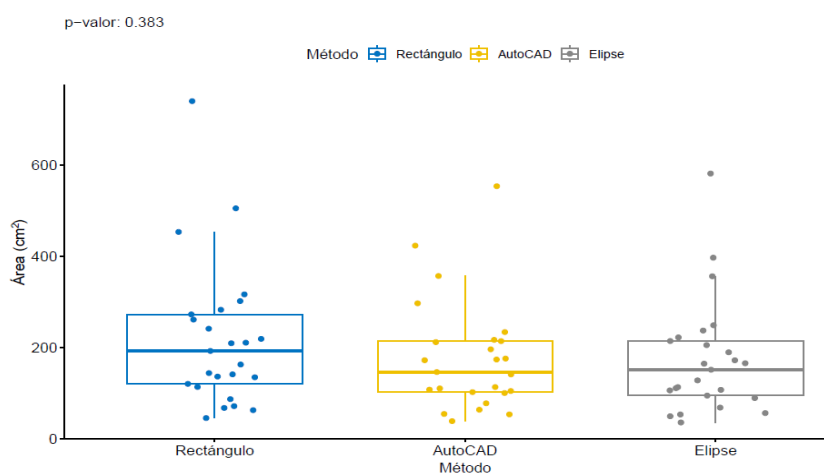
4.3.2. Comparación entre métodos de estimación

Con el fin de determinar cuál de los tres métodos empleados resulta más adecuado para representar la morfometría de los agujeros de crioconita, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, tanto para el área como para el volumen. Esta prueba evalúa si existen diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones de valores obtenidos mediante los métodos: aproximación rectangular, AutoCAD y elipsoidal.

Los resultados se visualizan en las Figuras 22 y 23, correspondientes a las comparaciones de área y volumen, respectivamente, entre los métodos.

Figura 22

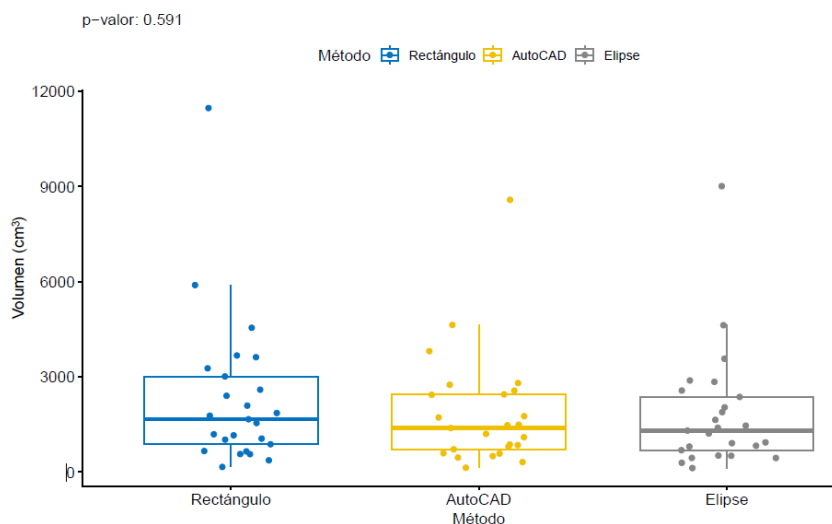
Comparación de área entre métodos



La Figura 22 muestra que, aunque existe variabilidad en los datos, las medianas son relativamente similares. El p-valor de 0.383 indica que no existe una diferencia estadística significativa entre los resultados de los tres métodos.

Figura 23

Comparación de volumen entre métodos



La Figura 23 muestra que, a pesar de la presencia de varios valores atípicos, las medianas son similares. El p-valor de 0.591 confirma que no hay una diferencia estadística significativa entre los volúmenes calculados por los diferentes métodos.

Dado que los resultados estadísticos, tanto del área ($p=0.383$) como del volumen ($p = 0.591$), son mayores a 0.05, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas en las áreas y los volúmenes estimados entre los tres métodos (AutoCAD, elipse y rectángulo).

Aunque los métodos no difieren en términos de sus valores medios desde un enfoque estadístico, el análisis visual de los gráficos revela matices importantes:

- El método AutoCAD presenta menor dispersión y mayor consistencia interna entre observaciones, lo que sugiere una mayor precisión y control en la estimación de formas irregulares reales, al basarse en el contorno digitalizado exacto de cada crioconita.
- En contraste, el método rectangular tiende a sobreestimar el área y el volumen, y presenta mayor variabilidad entre casos. Esto es esperable, ya que se basa en una geometría idealizada que no capta las irregularidades reales del contorno ni las asimetrías en profundidad.

- El método elipsoidal, aunque más realista que el rectangular, también depende de supuestos geométricos que no siempre reflejan con precisión la morfología real, especialmente en crioconitas con formas irregulares o borde erosionado.

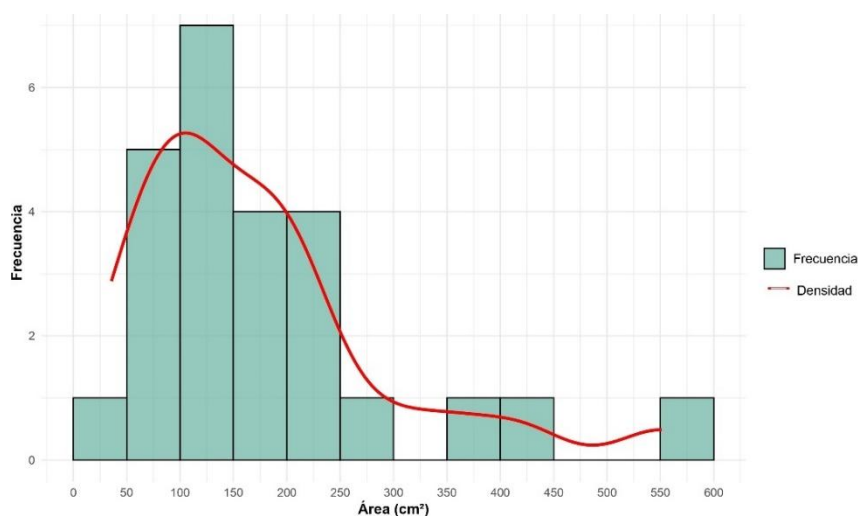
A pesar de que las diferencias entre métodos no son estadísticamente significativas, el análisis visual, la dispersión de los datos y la coherencia interna respaldan la elección del método AutoCAD como la mejor opción para estimar el área y el volumen de los agujeros de crioconita. Esta elección se justifica por su mayor fidelidad geométrica, ya que se basa en contornos reales obtenidos directamente del campo mediante digitalización, lo que lo convierte en el enfoque más representativo y reproducible dentro del contexto de esta investigación.

4.3.3. Distribución general de tamaños de los agujeros de crioconita

El análisis de los parámetros morfométricos permitió evaluar la distribución de tamaños de los agujeros de crioconita tanto de forma global como en función de su altitud y zona de muestreo. La Figura 24 se muestra este resultado.

Figura 24

Distribución del área de los agujeros de crioconita



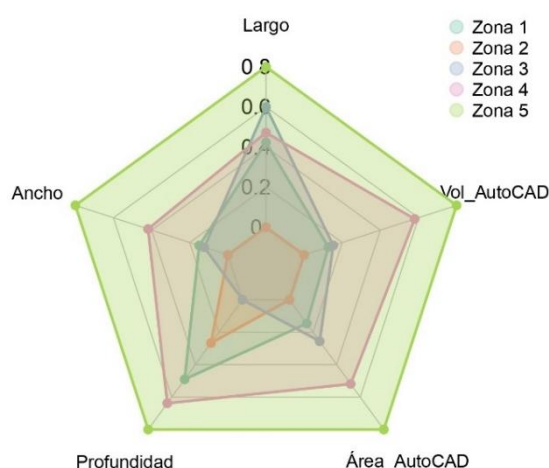
En esta figura se muestra la distribución de frecuencias del área superficial de los agujeros de crioconita. La mayoría de los agujeros se concentran en rangos pequeños a moderados, principalmente entre 50 y 250 cm², mientras que unos pocos presentan áreas superiores a 400 cm², reflejando una distribución asimétrica y sesgada hacia valores bajos.

Este patrón sugiere que la mayoría de los agujeros de crioconita observados se encuentra en fases relativamente tempranas o inestables de desarrollo morfométrico.

En la Figura 25 se muestra la relación conjunta entre área y volumen de los agujeros, diferenciados por zona de muestreo.

Figura 25

Distribución de los agujeros de crioconita según área y volumen



En esta figura se observa claramente que los agujeros de crioconita más grandes y voluminosos se localizan principalmente en las zonas 5 y 4, mientras que los más pequeños se distribuyen en las zonas 1, 2 y 3.

Este patrón tiene una interpretación glaciológica directa, ya que las zonas 5 y 4 corresponden a altitudes más bajas, donde el glaciar ha experimentado mayor retroceso, lo cual permite una mayor permanencia temporal de las crioconitas, facilitando:

- Mayor exposición a la radiación solar.
- Acumulación de detritos oscuros.
- Mayor grado de fusión localizada y evolución del agujero.

En cambio, las zonas más altas representan áreas más recientes en el frente de retroceso, donde los agujeros de crioconita están en fases tempranas de desarrollo, patrón evidenciado en las Figuras 26 y 27.

Figura 26

Relación entre área y volumen con la altitud

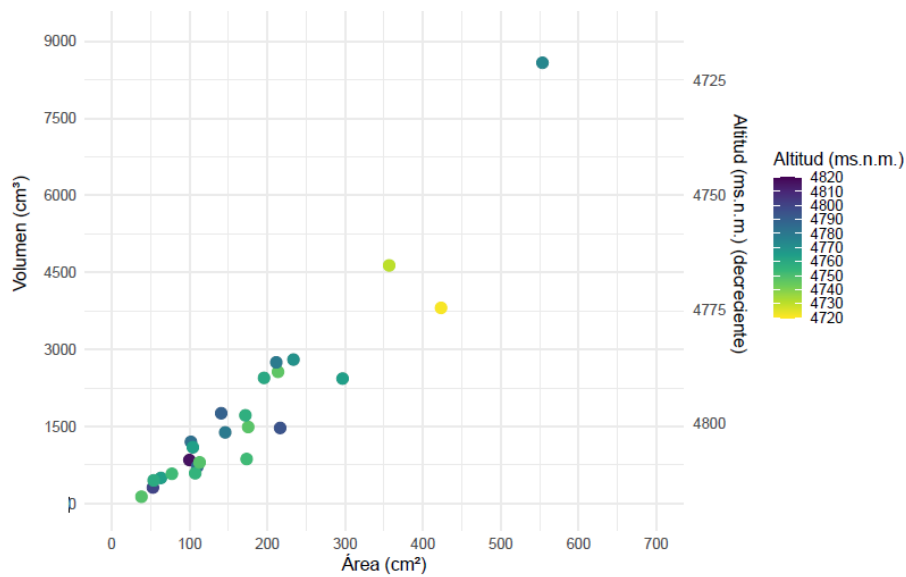
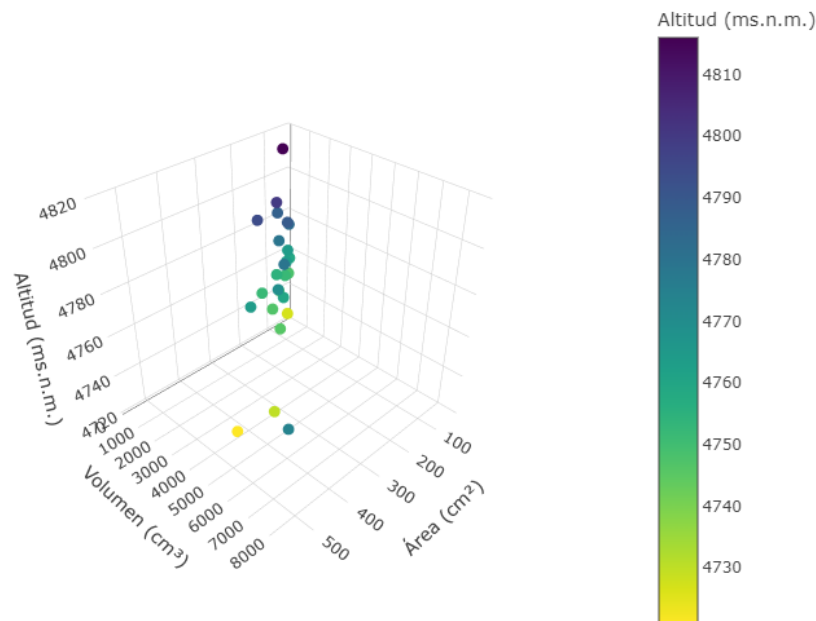


Figura 27

Relación en 3D entre área y volumen con la altitud



Estas figuras muestran la relación entre área, volumen y altitud de los agujeros. Se confirma un patrón claro: los agujeros de mayor tamaño y volumen se encuentran a menor altitud, mientras que los de menor desarrollo morfométrico se sitúan a cotas más elevadas. Este resultado es consistente con los procesos de ablación diferencial y maduración geomorfológica de los criocónitos en zonas de glacial más degradadas o antiguas.

4.4. Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los parámetros abióticos

4.4.1. Pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk)

Previo a la aplicación de análisis de correlación entre la diversidad de macroinvertebrados y los parámetros ambientales (físicos, químicos y morfométricos), se incorporó la variable altitudinal como factor explicativo adicional, considerando su potencial influencia en la estructura y composición de las comunidades acuáticas supraglaciares. Para determinar el método estadístico más apropiado y garantizar la robustez de los análisis posteriores, se evaluó la distribución de normalidad de cada variable mediante la prueba de Shapiro-Wilk, ampliamente reconocida como el test más potente para muestras pequeñas ($n < 50$) y frecuentemente empleada en estudios de ecología de comunidades.

Los resultados del análisis de normalidad se presentan en la Tabla 20, donde se incluyen el estadístico W de Shapiro-Wilk, el valor de probabilidad asociado y la interpretación sobre el cumplimiento de los supuestos de normalidad ($p > 0.05$).

Tabla 20

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para variables ambientales y de diversidad

Variable	W	p-value	Normalidad
Altitud	0.98	0.92	Sí
Área	0.82	0.00	No
CE	0.80	0.00	No
Índice D _{Mg}	0.94	0.07	Sí
Índice H'	0.92	0.70	Sí
Índice 1-D	0.89	0.96	Sí
OD	0.97	0.80	Sí
Riqueza S	0.74	0.00	No
TDS	0.83	0.00	No
Temperatura	0.88	0.02	No
Volumen	0.77	0.00	No
pH	0.92	0.13	Sí

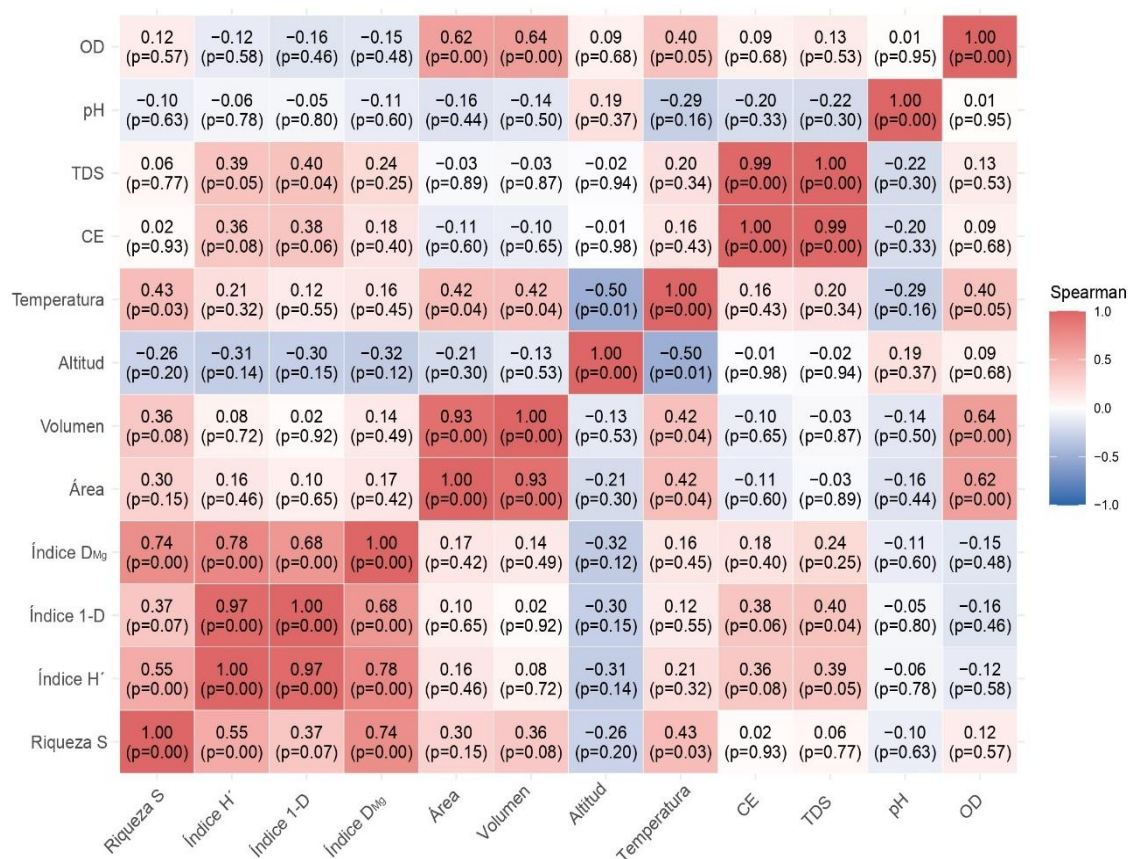
Dado que la mayoría de las variables ambientales y de diversidad no cumplen con los supuestos paramétricos, se empleó la correlación de Spearman como método no paramétrico para evaluar las asociaciones entre variables ambientales e índices de diversidad, garantizando así la validez estadística de los análisis subsecuentes.

4.4.2. Correlación entre índices de diversidad y variables ambientales

Se realizó un análisis de correlación de Spearman para evaluar las relaciones entre los índices de diversidad (riqueza S, índice H', índice 1-D, índice D_{Mg}), las variables físicas (temperatura, CE, TDS), las variables químicas (pH, OD), las variables morfométricas (área, volumen) y la altitud en los agujeros de crioconita. Los coeficientes de correlación (ρ) y su respectivo p-value resultantes se presentan en la matriz de correlación de Spearman (Figura 28).

Figura 28

Correlación de Spearman entre índices de diversidad y variables ambientales



El análisis integral reveló tres patrones principales de asociación: correlaciones positivas perfectas entre índices de diversidad, correlaciones débiles a medias entre parámetros ambientales y diversidad biológica, y un gradiente altitudinal negativo consistente. Las correlaciones positivas perfectas entre el índice H' e índice 1-D ($\rho = 0.97$, $p < 0.001$) y muy fuertes entre índice H' e índice D_{Mg} ($\rho = 0.78$, $p < 0.001$) y riqueza S e índice D_{Mg} ($\rho = 0.74$, $p < 0.001$) confirmaron la

redundancia funcional de estos indicadores en el contexto específico de estos microhábitats extremos.

a) Variables físicas

Las variables físicas mostraron correlaciones predominantemente débiles a medias con los índices de diversidad. La temperatura presentó la asociación más fuerte, registrando una correlación positiva media con la riqueza específica ($\rho = 0.43$, $p = 0.03$). Los TDS y la CE exhibieron correlaciones positivas medias con índice H' (TDS: $\rho = 0.39$, $p = 0.05$; CE: $\rho = 0.36$, $p = 0.08$) e índice 1-D (TDS: $\rho = 0.40$, $p = 0.04$; CE: $\rho = 0.38$, $p = 0.06$). Las demás combinaciones presentaron correlaciones débiles o no significativas, indicando que los macroinvertebrados poseen amplios rangos de tolerancia frente a las fluctuaciones de estas variables abióticas.

b) Variables químicas

Los variables químicas demostraron asociaciones débiles con la estructura comunitaria. El OD presentó correlaciones débiles con todos los indicadores: positiva con la riqueza S ($\rho = 0.12$, $p = 0.57$) y negativas con los índices de diversidad (índice H': $\rho = -0.12$, $p = 0.58$; índice 1-D: $\rho = -0.16$, $p = 0.46$; índice D_{Mg} : $\rho = -0.15$, $p = 0.48$). El pH mostró correlaciones negativas débiles con todos los índices de diversidad (riqueza S: $\rho = -0.10$; índice H': $\rho = -0.06$; índice 1-D: $\rho = -0.05$; índice D_{Mg} : $\rho = -0.11$), todas no significativas ($p > 0.05$), sugiriendo una influencia mínima de la acidez del agua de los agujeros de crioconita sobre la diversidad de macroinvertebrados.

c) Variables morfométricas (área, volumen) y altitud

Las variables morfométricas presentaron un patrón coherente con la teoría del efecto especie-área. Los parámetros de tamaño mostraron correlaciones positivas medias con la riqueza S (área: $\rho = 0.30$, $p = 0.15$; volumen: $\rho = 0.36$, $p = 0.08$), mientras que los índices de diversidad presentaron correlaciones débiles con las dimensiones morfométricas (índice H' y área: $\rho = 0.16$; índice 1-D y área: $\rho = 0.10$; índice H' y volumen: $\rho = 0.08$; índice 1-D y volumen: $\rho = 0.02$).

La altitud emergió como el factor determinante más robusto, exhibiendo correlaciones negativas medias consistentes con todos los índices de diversidad: riqueza S ($\rho = -0.26$, $p = 0.20$), índice H' ($\rho = -0.31$, $p = 0.14$), índice 1-D ($\rho = -0.30$, $p = 0.15$) e índice D_{Mg} ($\rho = -0.32$, $p = 0.12$). Este patrón confirma el gradiente

ecológico universal de declive de diversidad con la elevación en ecosistemas montañosos.

La predominancia de correlaciones débiles a medias entre variables ambientales y biológicas, junto con la ausencia de correlaciones considerables, muy fuertes o perfectas, sugiere que los macroinvertebrados presentes en estos ecosistemas glaciares poseen adaptaciones que les confieren resistencia a las fluctuaciones ambientales extremas características de estos microhábitats criosféricos.

4.4.3. Análisis de regresión múltiple

Se realizaron análisis de regresión múltiple para examinar las relaciones predictivas entre los índices de diversidad (riqueza S, índice H', índice 1-D e índice D_{Mg}) como variables respuesta y el conjunto de variables ambientales como variables predictoras. Este enfoque permitió evaluar el efecto conjunto y la contribución relativa de múltiples factores ambientales sobre la estructura de las comunidades de macroinvertebrados en los agujeros de crioconita.

Para el desarrollo de los modelos de regresión múltiple, se emplearon como variables predictoras: temperatura, CE, pH, OD, área y altitud. Se excluyeron del análisis los TDS y el volumen debido a problemas de multicolinealidad. Los TDS fueron excluidos por su dependencia instrumental de la CE, ya que el multiparámetro empleado calcula los TDS a partir de los valores de CE mediante un factor de conversión específico, generando una correlación artificialmente elevada ($\rho > 0.99$) entre ambas variables.

El volumen fue excluido debido a su correlación positiva perfecta con el área ($\rho = 0.93$, $p < 0.001$), siguiendo lo evaluado por estudios previos en microhábitats acuáticos que utilizan preferentemente el área como variable predictora. La eliminación de estas variables colineales previno la distorsión de los coeficientes de regresión y mejoró la estabilidad e interpretabilidad de los modelos resultantes.

a) Riqueza S

Se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la riqueza S utilizando como variables predictoras: área, temperatura, CE, pH, OD y altitud ($\text{Riqueza S} \sim \text{Área} + \text{Temperatura} + \text{CE} + \text{pH} + \text{OD} + \text{Altitud}$). Los coeficientes estimados, errores estándar, valores t y p-valores para cada variable predictora se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21*Coefficientes del modelo de regresión lineal para la riqueza S*

Variable	Coefficiente estimado (β)	Error estándar	Valor t	p-valor
Intercepto	18.327	28.234	0.649	0.524
Área	0.001	0.001	0.525	0.606
Temperatura	0.417	0.411	1.013	0.325
CE	0.001	0.006	0.154	0.880
pH	0.078	0.181	0.430	0.672
OD	-0.048	0.172	-0.277	0.785
Altitud	-0.004	0.006	-0.593	0.561
Estadísticos del modelo		Valor		
Error estándar residual	0.4802 (df = 18)			
R ² múltiple	0.226			
R ² ajustado	-0.032			
Estadístico F	0.874 (df = 6, 18)			
p-valor	0.533			

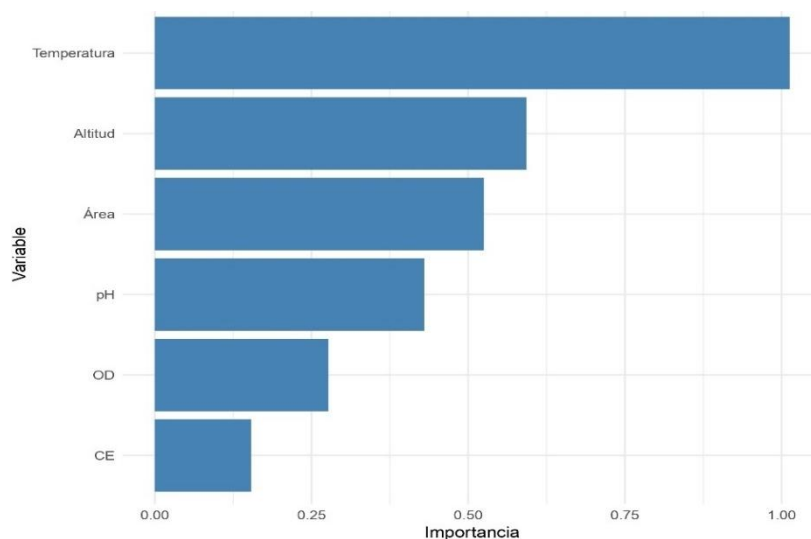
El modelo global para la riqueza S no resultó estadísticamente significativo (estadístico F = 0.874, p = 0.533), indicando que el conjunto de variables predictoras incluidas en este modelo no explica de manera significativa la variabilidad observada en la riqueza S.

El R² múltiple de 0.226 sugiere que aproximadamente el 22.57% de la varianza en la riqueza S es explicada por las variables del modelo. Sin embargo, el R² ajustado es considerablemente más bajo y negativo (-0.032), lo que sugiere que el modelo tiene una capacidad predictiva real muy limitada y podría estar sugiriendo posible sobreajuste debido al número de predictores en relación con el tamaño muestral.

En cuanto a la significancia individual de las variables, ninguna variable predictora mostró efectos estadísticamente significativos sobre la riqueza S (todos los p-valores > 0.05). Todos los p-valores asociados a los coeficientes individuales son altos (superiores a 0.325). La temperatura presentó el coeficiente positivo más alto ($\beta = 0.417$, p = 0.325), seguida por la altitud con el coeficiente negativo más pronunciado ($\beta = -0.004$, p = 0.561), aunque ambos resultaron no significativos.

Figura 29

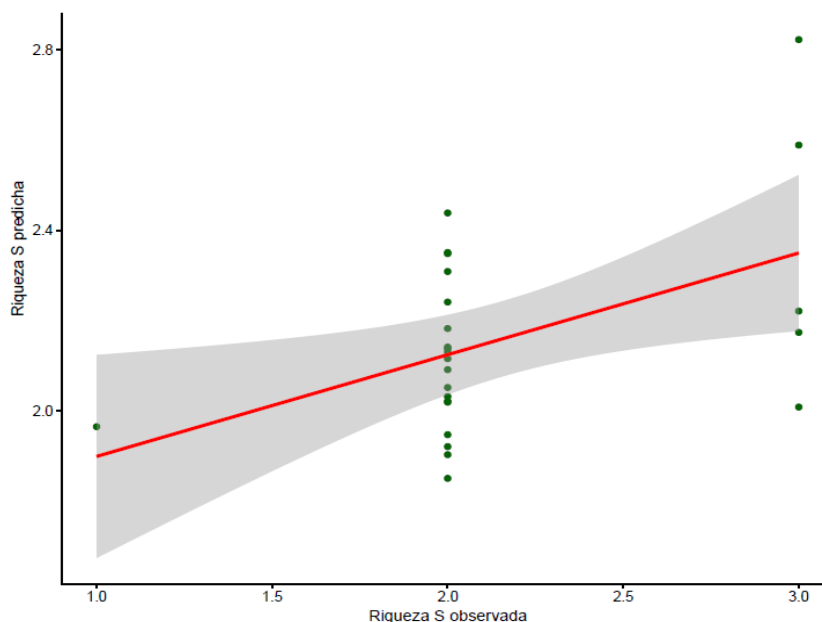
Importancia de variables predictoras (valor t absoluto)



El análisis de importancia relativa basado en valores t absolutos (Figura 29) reveló que la temperatura ($|t| = 1.013$) fue la variable más influyente, seguida por la altitud ($|t| = 0.593$) y el área ($|t| = 0.525$). Estas variables, aunque no significativas, mostraron las contribuciones más sustanciales al modelo predictivo.

Figura 30

Regresión lineal de la riqueza S: valores observados vs predichos



La Figura 30 evidenció una dispersión considerable alrededor de la línea de regresión, con muchos puntos distantes de la predicción ideal. La concentración de puntos en valores discretos de riqueza S (1, 2, 3) es esperable para este tipo de

índice, pero la notable variabilidad en las predicciones para cada valor observado confirma las limitaciones del modelo para capturar la variabilidad real de la riqueza S en los agujeros de crioconita.

b) Índice H'

Se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el índice H' utilizando como variables predictoras: área, temperatura, CE, pH, OD y altitud (índice H' ~ Área + Temperatura + CE + pH + OD + Altitud).

A continuación, se presentan los coeficientes estimados, errores estándar, valores t y p-valores para cada variable predictora.

Tabla 22

Coefficientes del modelo de regresión lineal para el índice H'

Variable	Coefficiente estimado (β)	Error estándar	Valor t	p-valor
Intercepto	6.423	5.160	1.245	0.229
Área	0.000	0.000	0.638	0.532
Temperatura	0.019	0.075	0.249	0.806
CE	0.002	0.001	1.587	0.130
pH	0.024	0.033	0.727	0.477
OD	-0.032	0.031	-1.025	0.319
Altitud	-0.001	0.001	-1.188	0.250
Estadísticos del modelo		Valor		
Error estándar residual	0.088 (df = 18)			
R ² múltiple	0.285			
R ² ajustado	0.047			
Estadístico F	1.196 (df = 6, 18)			
p-valor	0.352			

El modelo global para el índice H' no resultó estadísticamente significativo (estadístico F = 1.196, p = 0.352), indicando que el conjunto de variables predictoras incluidas en este modelo no explica de manera significativa la variabilidad observada en el índice H'.

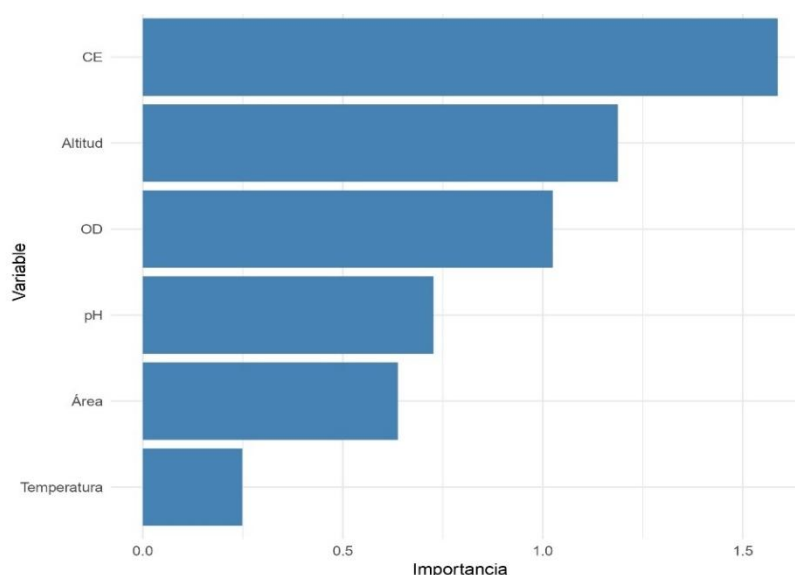
El R² múltiple de 0.285 sugiere que aproximadamente el 28.51% de la varianza en el índice H' es explicada por las variables del modelo. Sin embargo, el

R^2 ajustado es considerablemente más bajo (0.047), lo que sugiere que el modelo tiene una capacidad predictiva real muy limitada y podría estar sobreajustado debido al número de predictores en relación con el tamaño de la muestra.

En cuanto a la significancia individual de las variables, ninguna variable predictora mostró efectos estadísticamente significativos sobre el índice H' (todos los p-valores > 0.05). Todos los p-valores asociados a los coeficientes individuales son altos (superiores a 0.130). La CE presentó el coeficiente positivo más relevante ($\beta = 0.0016$, $p = 0.130$), seguida por la altitud con el coeficiente negativo más pronunciado ($\beta = -0.0013$, $p = 0.250$), aunque ambos resultaron no significativos.

Figura 31

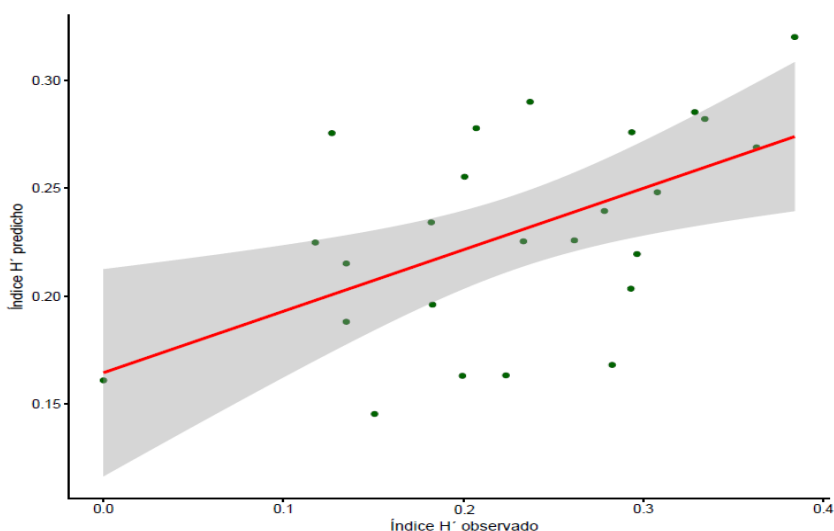
Importancia de variables predictoras (valor t absoluto)



El análisis de importancia relativa basado en valores t absolutos (Figura 31) reveló que la CE ($|t| = 1.587$) fue la variable más influyente, seguida por la altitud ($|t| = 1.188$) y el OD ($|t| = 1.025$). Estas variables, aunque no significativas, mostraron las contribuciones más sustanciales al modelo predictivo.

Figura 32

Regresión lineal del índice H': valores observados vs predichos



La Figura 32 evidenció una dispersión considerable alrededor de la línea de regresión, con muchos puntos distantes de la predicción ideal. Aunque se observa una tendencia positiva general, la notable variabilidad en las predicciones para cada valor observado confirma las limitaciones del modelo para capturar la variabilidad real del índice H' en los agujeros de crioconita.

c) Índice 1-D

Se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el índice 1-D utilizando como variables predictoras: área, temperatura, CE, pH, OD y altitud (índice 1-D ~ Área + Temperatura + CE + pH + OD + Altitud).

En la Tabla 23 se presentan los coeficientes estimados, errores estándar, valores t y p-valores para cada variable predictora.

Tabla 23

Coefficientes del modelo de regresión lineal para el índice de índice 1-D

Variable	Coefficiente estimado (β)	Error estándar	Valor t	p-valor
Intercepto	3.325	2.754	1.207	0.243
Área	0.000	0.000	0.531	0.602
Temperatura	0.001	0.040	0.024	0.981
CE	0.001	0.001	1.677	0.111
pH	0.012	0.018	0.660	0.518
OD	-0.017	0.017	-1.011	0.325
Altitud	-0.001	0.001	-1.150	0.265

Estadísticos del modelo	Valor
Error estándar residual	0.047 (df = 18)
R ² múltiple	0.262
R ² ajustado	0.016
Estadístico F	1.067 (df = 6, 18)
p-valor	0.418

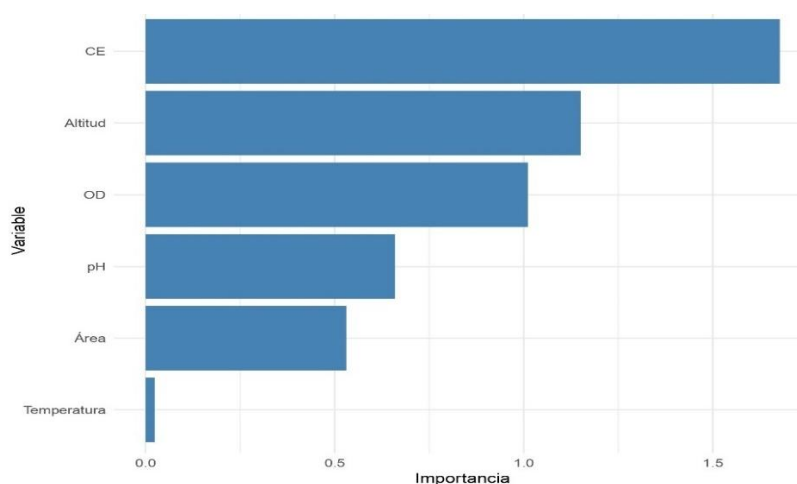
El modelo global para el índice 1-D no resultó estadísticamente significativo (estadístico F = 1.067, p = 0.418), indicando que el conjunto de variables predictoras incluidas en este modelo no explica de manera significativa la variabilidad observada en el índice 1-D.

El R² múltiple fue de 0.262, sugiriendo que aproximadamente el 26.23% de la varianza en el índice 1-D es explicada por las variables del modelo. Sin embargo, el R² ajustado es considerablemente más bajo (0.016), lo que sugiere que el modelo tiene una capacidad predictiva real muy limitada y podría estar sobreajustado debido al número de predictores en relación con el tamaño de la muestra.

En cuanto a la significancia individual de las variables, ninguna variable predictora mostró efectos estadísticamente significativos sobre el índice 1-D (todos los p-valores > 0.05). Todos los p-valores asociados a los coeficientes individuales son altos (superiores a 0.111). La CE presentó el coeficiente positivo más relevante ($\beta = 0.001$, p = 0.111), seguida por la altitud con el coeficiente negativo más pronunciado ($\beta = -0.001$, p = 0.265), aunque ambos resultaron no significativos.

Figura 33

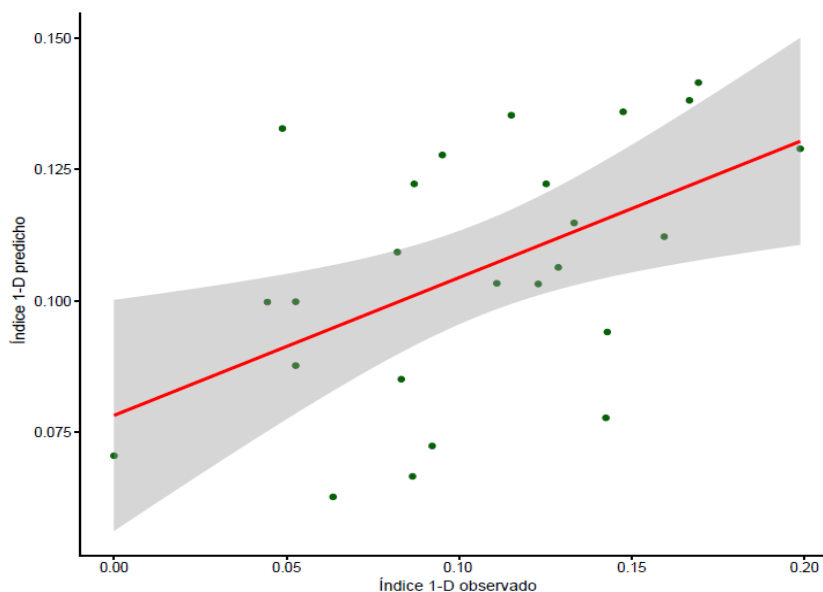
Importancia de variables predictoras (valor t absoluto)



El análisis de importancia relativa basado en valores t absolutos (Figura 33) reveló que la CE ($|t| = 1.677$) fue la variable más influyente, seguida por la altitud ($|t| = 1.150$) y el OD ($|t| = 1.011$). Estas variables, aunque no significativas, mostraron las contribuciones más sustanciales al modelo predictivo.

Figura 34

Regresión lineal del índice 1-D: valores observados vs predichos



La Figura 34 evidenció una dispersión considerable alrededor de la línea de regresión, con muchos puntos distantes de la predicción ideal. Aunque se observa una tendencia positiva general, la notable variabilidad en las predicciones para cada valor observado confirma las limitaciones del modelo para capturar la variabilidad real del índice 1-D en los agujeros de crioconita.

d) Índice de D_{Mg}

Se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el índice D_{Mg} utilizando como variables predictoras: área, temperatura, CE, pH, OD y altitud (índice $D_{Mg} \sim \text{Área} + \text{Temperatura} + \text{CE} + \text{pH} + \text{OD} + \text{Altitud}$).

En la Tabla 24 se presentan los coeficientes estimados, errores estándar, valores t y p-valores para cada variable predictora.

Tabla 24

Coefficientes del modelo de regresión lineal para el índice D_{Mg}

Variable	Coefficiente estimado (β)	Error estándar	Valor t	p-valor
----------	-----------------------------------	----------------	---------	---------

Intercepto	7.904	6.581	1.201	0.245
Área	0.000	0.000	0.451	0.657
Temperatura	0.065	0.096	0.677	0.507
CE	0.001	0.001	0.479	0.637
pH	0.020	0.042	0.478	0.639
OD	-0.033	0.040	-0.818	0.424
Altitud	-0.002	0.001	-1.140	0.269
Estadísticos del modelo	Valor			
Error estándar residual	0.112 (df = 18)			
R ² múltiple	0.255			
R ² ajustado	0.006			
Estadístico F	1.026 (df = 6, 18)			
p-valor	0.440			

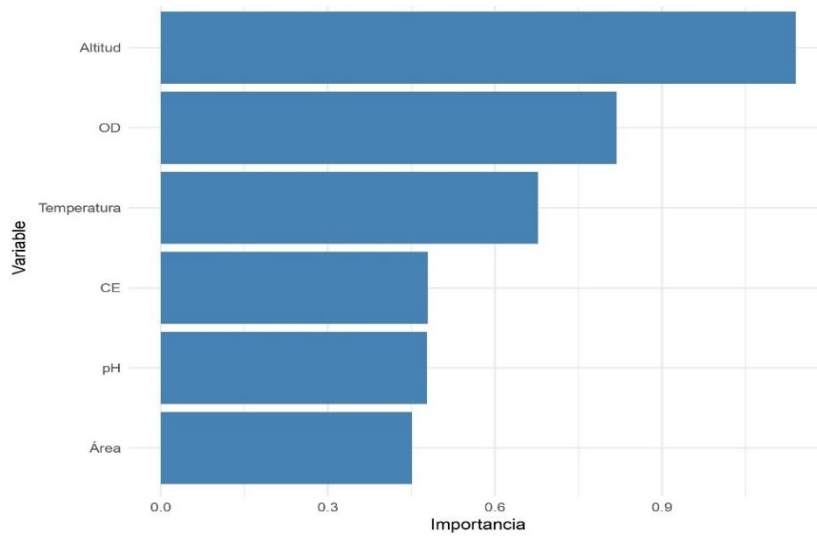
El modelo global para el índice D_{Mg} no resultó estadísticamente significativo (estadístico $F = 1.026$, $p = 0.440$), indicando que el conjunto de variables predictoras incluidas en este modelo no explica de manera significativa la variabilidad observada en el índice de diversidad de índice D_{Mg} .

El R^2 múltiple de 0.255 sugirió que aproximadamente el 25.48% de la varianza en el índice D_{Mg} es explicada por las variables del modelo. Sin embargo, el R^2 ajustado es considerablemente más bajo (0.006), lo que sugiere que el modelo tiene una capacidad predictiva real muy limitada y podría estar sobreajustado debido al número de predictores en relación con el tamaño de la muestra.

En cuanto a la significancia individual de las variables, ninguna variable predictora mostró efectos estadísticamente significativos sobre el índice D_{Mg} (todos los p-valores > 0.05). Todos los p-valores asociados a los coeficientes individuales son altos (superiores a 0.245). La altitud presentó el coeficiente negativo más pronunciado ($\beta = -0.002$, $p = 0.269$), seguida por el OD con el segundo coeficiente negativo más relevante ($\beta = -0.033$, $p = 0.424$), aunque ambos resultaron no significativos.

Figura 35

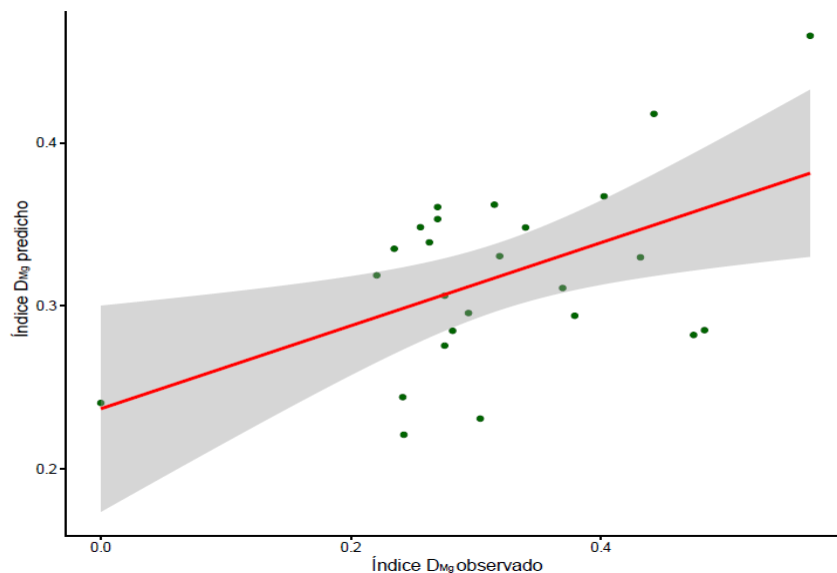
Importancia de variables predictoras (valor t absoluto)



El análisis de importancia relativa basado en valores t absolutos (Figura 35) reveló que la altitud ($|t| = 1.140$) fue la variable más influyente, seguida por el OD ($|t| = 0.818$) y la temperatura ($|t| = 0.677$). Estas variables, aunque no significativas, mostraron las contribuciones más sustanciales al modelo predictivo.

Figura 36

Regresión lineal del índice D_{Mg} : valores observados vs predichos



La Figura 36 evidenció una dispersión considerable alrededor de la línea de regresión, con muchos puntos distantes de la predicción ideal. Aunque se observa una tendencia positiva general, la notable variabilidad en las predicciones para cada

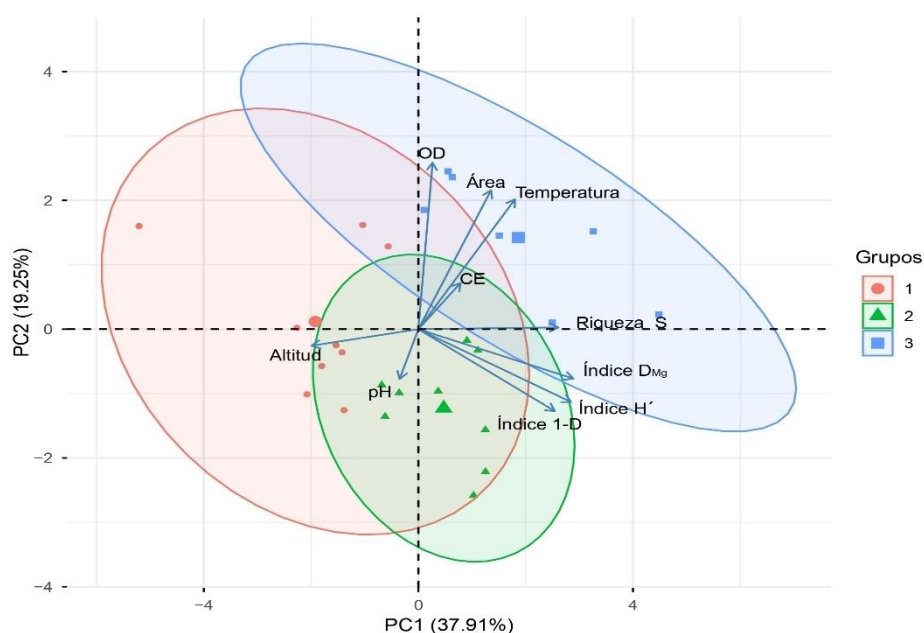
valor observado confirma las limitaciones del modelo para capturar la variabilidad real del índice D_{Mg} en los agujeros de crioconita.

4.4.4. Análisis de componentes principales (PCA)

Se aplicó un PCA para examinar la estructura de las relaciones entre los índices de diversidad (riqueza S, índice H' , índice 1-D e índice D_{Mg}) y las variables ambientales en los agujeros de crioconita. Las variables ambientales incluyeron variables físicas (temperatura y CE), químicas (pH y OD), morfométricas (área) y altitud. Para evitar problemas de multicolinealidad, se excluyeron previamente las variables TDS y volumen debido a su fuerte correlación con CE y área, respectivamente. Posteriormente, se aplicó un análisis de conglomerados *k-means* ($k=3$) sobre las coordenadas de los puntos de muestreo en los dos primeros componentes principales para identificar patrones de agrupamiento en los datos.

Figura 37

Biplot del PCA con agrupamiento k-means por características ambientales



El biplot visualiza los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2), que en conjunto explican el 57.1% de la varianza total de los datos (PC1: 37.9% de la varianza explicada; PC2: 19.2% de la varianza explicada).

Tabla 25

Cargas de las variables en los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2) y su nivel de contribución

Variable	PC1	Contrib_PC1	PC2	Contrib_PC2
Riqueza S	0.415	Moderada	-0.006	Baja
Índice H'	0.452	Moderada	0.252	Baja
Índice 1-D	0.404	Moderada	0.284	Baja
Índice D _{Mg}	0.459	Moderada	0.171	Baja
Área	0.215	Baja	-0.482	Moderada
Altitud	-0.317	Moderada	0.057	Baja
Temperatura	0.286	Baja	-0.450	Moderada
CE	0.125	Baja	-0.160	Baja
pH	-0.056	Baja	0.173	Baja
OD	0.042	Baja	-0.577	Alta

Nota. La contribución se clasifica como: Alta ($|carga| \geq 0.5$), Moderada ($0.3 \leq |carga| < 0.5$), Baja ($|carga| < 0.3$).

- Componente principal 1 (PC1): este componente explica el 37.9% de la varianza total. Las variables que contribuyen de manera moderada a PC1 son los índices de diversidad (riqueza S, índice H', índice 1-D, índice D_{Mg}) y la altitud. Este componente representa un gradiente de biodiversidad versus altitud, donde todos los índices presentan cargas positivas moderadas, mientras que la altitud muestra una carga negativa, indicando una relación inversa entre elevación y diversidad de macroinvertebrados.
- Componente principal 2 (PC2): este componente explica el 19.2% de la varianza total. Las variables que contribuyen de manera alta y moderada a PC2 son OD con contribución alta, y área y temperatura con contribución moderada. Este componente está dominado por variables físicas, químicas y morfométricas del microhábitat, representando un gradiente relacionado con las condiciones fisicoquímicas y de forma de los agujeros.

El análisis de conglomerados (identificación de grupos mediante *k-means*) reveló tres grupos diferenciados de agujeros de crioconita, delimitados por elipses de confianza del 95%:

- **Grupo 1 (círculos rosados, n=6):** posicionado en el cuadrante superior izquierdo del biplot, caracterizado por valores negativos en PC1 y positivos en PC2. Los agujeros de este grupo presentan las mayores altitudes, asociándose con menores valores de diversidad de macroinvertebrados, pero manteniendo niveles moderados de área y OD. Representa microhábitats de alta montaña con comunidades de macroinvertebrados menos diversas.
- **Grupo 2 (triángulos verdes, n=10):** distribuido en la región central del biplot, con valores cercanos a cero en ambos componentes principales. Este grupo representa condiciones intermedias del gradiente ambiental, caracterizándose por valores moderados en la mayoría de las variables analizadas. Constituye el grupo más numeroso y representativo de las condiciones típicas del área de estudio.
- **Grupo 3 (cuadrados celestes, n=9):** localizado en el cuadrante derecho del biplot, con valores positivos en PC1. Se distingue por presentar la mayor diversidad de macroinvertebrados, menores altitudes y condiciones ambientales más favorables para el desarrollo de comunidades de complejas.

El PCA combinado con el análisis de conglomerados *k-means* revela una estructura ecológica clara en los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju. La variabilidad principal está definida por un gradiente altitudinal que controla la diversidad de macroinvertebrados (PC1), modulado por condiciones físicas (temperatura), químicas (OD) y morfométricas (área) locales (PC2).

Los tres grupos identificados evidencian la existencia de diferentes tipos de microhábitats dentro del ecosistema glaciar: condiciones extremas de alta montaña con diversidad reducida (Grupo 1), condiciones promedio del sistema (Grupo 2), y microhábitats favorables para la diversidad de macroinvertebrados (Grupo 3). Esta diferenciación tiene importantes implicaciones para la comprensión de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas glaciares y la respuesta diferencial de las comunidades de macroinvertebrados a los gradientes ambientales en ambientes de alta montaña.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Caracterización de la comunidad de macroinvertebrados

La estructura de la comunidad de macroinvertebrados en los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju se caracteriza por una extrema simplicidad y una marcada dominancia del género *Parochlus* (Chironomidae), el cual estuvo presente en el 100% de los puntos de muestreo y constituyó más del 89% de la abundancia relativa. Este patrón es consistente con hallazgos previos en ecosistemas glaciares, como los de Fair et al. (2020), quienes también reportaron comunidades compuestas casi exclusivamente por larvas de quironómidos y colémbolos. Tal estructura comunitaria, con una bajísima diversidad, es un claro indicador de ecosistemas sometidos a un fuerte estrés ambiental, donde solo especies altamente especializadas logran prosperar (Araya, 2020; Zawierucha et al., 2020).

Aunque este estudio se centra en el hábitat de crioconita, los resultados de Palacios (2021) en corrientes proglaciares de la misma región ofrecen un paralelo ecológico relevante. Palacios (2021) demostró que en arroyos con alta influencia glaciar (mayor cobertura glaciar y menores temperaturas), la diversidad de macroinvertebrados disminuía drásticamente, favoreciendo a taxones especialistas como los quironómidos. Si bien se trata de ecosistemas distintos (léntico vs. lótico), ambos estudios confirman el principio fundamental de que las condiciones periglaciales actúan como un potente filtro ecológico, seleccionando un conjunto reducido de géneros adaptados al frío, como *Parochlus* sp.

La presencia de quironómidos en hábitats glaciares está bien documentada globalmente. Estudios previos han demostrado que algunos agujeros de crioconita del Himalaya estaban habitados por quironómidos (Kohshima, 1984; Takeuchi, 2002). Sin embargo, mientras muchos glaciares de zonas templadas reportan al género *Diamesa* como colonizador principal (Gobbi y Lencioni, 2020), la identificación de *Parochlus* y *Cricotopus* en el glaciar Artesonraju demuestra variabilidad geográfica significativa debido a barreras biogeográficas y condiciones ambientales locales (Zawierucha et al., 2015).

La elevada densidad de *Parochlus* sp. sugiere que ha encontrado en los agujeros de crioconita un microhábitat ideal, funcionando como especie clave del ecosistema. Estos oasis de vida concentran nutrientes y comunidades microbianas que sirven como fuente de alimento (Zawierucha et al., 2020). Los estudios de Fair et al. (2024) han demostrado que las larvas de Chironomidae ejercen un efecto de especie clave en comunidades microbianas, consumiendo selectivamente diatomeas y bacterias asociadas. Las relaciones simbióticas entre diatomeas, algas y bacterias constituyen fuentes importantes de nutrientes, donde las bacterias pueden cubrir hasta el 50% de las necesidades de carbono de los quironómidos (Fair et al., 2024).

En contraste, con la dominancia de *Parochlus* sp., tanto *Cricotopus* sp. como los colémbolos del orden Poduromorpha se presentan como componentes minoritarios y esporádicos. Los colémbolos, siendo organismos principalmente terrestres, su presencia en los agujeros es probablemente accidental por transporte pasivo del viento o agua de deshielo (Jaroměřská et al., 2023; Zawierucha et al., 2019a). Su baja densidad (1-5 individuos) y distribución irregular (52% de los sitios) es consistente con colonización estocástica más que con poblaciones permanentes. Por su parte, *Cricotopus* sp. mostró presencia restringida, sugiriendo que es un competidor inferior a *Parochlus* sp. u ocupa un nicho menos prevalente.

Todos los índices de diversidad confirmaron la simplicidad estructural de la comunidad, con riqueza S que nunca excedió tres taxones por muestra y valores extremadamente bajos de índice H' e índice 1-D. Esta estructura es característica de ecosistemas glaciares, donde las condiciones extremas actúan como filtro ecológico implacable, permitiendo solo la supervivencia de taxones con adaptaciones muy específicas (Zawierucha et al., 2020). La fuerte presión selectiva

de las condiciones extremas influye en el carácter único de los organismos glaciares (Zawierucha et al., 2016).

Es importante destacar que este estudio se centró específicamente en macroinvertebrados. Globalmente, la meiofauna como tardígrados y rotíferos son los habitantes predominantes de los agujeros de crioconita debido a sus adaptaciones para sobrevivir bajas temperaturas, congelación y alta radiación UV (Zawierucha et al., 2020). Estos grupos probablemente están presentes en el glaciar Artesonraju pero no fueron capturados por la metodología empleada, limitación reconocida en estudios similares (Fair et al., 2020; Zawierucha et al., 2015).

Esta caracterización trasciende el ejercicio taxonómico para constituir un registro crucial de un ecosistema en peligro de extinción. La biodiversidad glaciar tiene valor intrínseco particular, ya que las especies son altamente especializadas y vulnerables a cambios incluso de baja intensidad (Gobbi y Lencioni, 2020). Los organismos criófilos se enfrentan a un doble riesgo: desaparición de hábitat e incapacidad para adaptarse o migrar al ritmo del cambio climático. Además, el deshielo libera contaminantes orgánicos persistentes acumulados durante décadas, representando una amenaza adicional para la fauna glaciar extremadamente sensible a la contaminación. Con el 40% de las especies mundiales de insectos en riesgo de extinción (Gobbi y Lencioni, 2020), la pérdida de hábitat glaciar intensifica esta crisis de biodiversidad.

5.2. Determinación de los parámetros físicos, químicos y de sedimento

La caracterización de los parámetros físicos, químicos y de sedimento de los agujeros de crioconita en el glaciar Artesonraju ha revelado la existencia de un ecosistema de microhábitats heterogéneos y dinámicos. Aunque la temperatura se mantiene relativamente estable, se observa una marcada variabilidad espacial en las propiedades físicas, químicas y de sedimento, lo que subraya la complejidad de este ambiente abiótico.

La temperatura del agua en los agujeros de crioconita se mantuvo en un rango estrecho cercano al punto de congelación (media de 1.07 °C), consistente con las condiciones térmicas reportadas en otros ecosistemas glaciares donde rara vez superan los 2 °C (Fair et al., 2020). Los valores son similares a los reportados para el glaciar Hailuogou en Asia (media de 0.70 °C; Fair et al., 2020) y son comparables al rango observado en el glaciar Antisana, Ecuador (1.39 °C a 2.58 °C; Araya, 2020), confirmando la tendencia de estos microecosistemas a mantener condiciones

térmicas globalmente bajas. Sin embargo, el análisis estadístico reveló diferencias significativas entre zonas de muestreo, sugiriendo influencia de factores locales como profundidad, tamaño o albedo del sedimento.

En contraste con la temperatura, la CE y los TDS presentaron una variabilidad espacial pronunciada. Los valores de CE (media de 18.20 $\mu\text{S/cm}$) son comparables con los 20.78 $\mu\text{S/cm}$ reportados para el glaciar Hailuogou (Fair et al., 2020) y con los valores observados en el glaciar Canadá, Antártida a mediados de verano (20-50 $\mu\text{S/cm}$), los cuales reflejan un estado de dilución del sistema tras el establecimiento de conexiones hidrológicas (Fountain et al., 2008). La alta variabilidad y ausencia de patrón zonal significativo indican control por procesos a microescala como disolución mineral del sedimento, deposición atmosférica y actividad biológica específica de cada agujero son los principales impulsores de la carga iónica (Cook et al., 2016; Fountain et al., 2008). La compensación casi perfecta ($p = 0,99$) entre CE y TDS es esperable, ya que el TDS se deriva de la CE mediante un factor de conversión, lo que confirma que ambas variables reflejan la misma dinámica de iones disueltos.

El pH se mantuvo cercano a la neutralidad (media de 7.47), un valor que coincide con observaciones en glaciares de diversas regiones desde los Andes tropicales hasta Europa. Por ejemplo, en Ecuador, López (2022) reportó valores similares (pH = 7.44) para el glaciar del norte del volcán Cotopaxi y Araya (2020) presentó valores de 6.04 a 8.61 para el glaciar Antisana. La variabilidad observada (pH 5.76 a 8.61) refleja el equilibrio dinámico entre fotosíntesis de cianobacterias que consume CO_2 elevando el pH (Porazinska et al., 2004; Tranter et al., 2004). Porazinska et al. (2004) demostraron que los valores altos de pH resultan de la fotosíntesis activa, mientras que los valores más bajos se encontraron en agujeros sin invertebrados y con bajas tasas de producción primaria, respaldando la interpretación de la variabilidad del pH como indicador de actividad biológica.

Los niveles de OD se mantuvieron altos y cercanos a la saturación, garantizando condiciones aeróbicas esenciales. La correlación positiva entre temperatura y OD ($p = 0.40$) contradice el principio físico-químico esperado según la ley de Henry, la cual establece que la solubilidad de los gases en agua disminuye al aumentar la temperatura (Barrenechea, 2001; Moss, 2010). Esta correlación positiva sugiere que la actividad fotosintética es más intensa en agujeros ligeramente más cálidos, superando el efecto físico de la temperatura sobre la

solubilidad del oxígeno. Adicionalmente, Pittino et al. (2023) observaron variaciones significativas en las concentraciones de oxígeno entre glaciares patagónicos, confirmando que este parámetro está fuertemente influenciado por procesos biológicos y ambientales locales.

El sedimento de crioconita actúa como sustrato, fuente de nutrientes y reactor biogeoquímico (Cook et al., 2016). El contenido de MO en Artesonraju (media de 5.93%) se sitúa dentro del rango mundial de 1% a 38% (Rozwalak et al., 2022) y es comparable con valores de la Antártida Marítima (6.7%; Buda et al., 2020b). La alta variabilidad en MO entre zonas es ecológicamente crucial, ya que constituye la base energética para la red trófica heterótrofa (Cook et al., 2016).

El color oscuro de los sedimentos (gris oliva oscuro, negro oliva y oliva negro) reduce el albedo de la superficie del hielo, promoviendo la fusión y la formación de los agujeros. Rozwalak et al. (2022) demostraron que el tono más oscuro de la crioconita se relaciona directamente con el contenido de MO en los sedimentos, indicando que el principal impulsor de la coloración de la crioconita se basa no solo en la fuente de roca, sino también en la concentración de materia orgánica. La presencia de sustancias húmicas y cianobacterias pigmentadas contribuye significativamente a la coloración (Cook et al., 2016; Rozwalak et al., 2022).

La composición mineralógica mostró alta variabilidad, indicando diversas fuentes de sedimento y diferentes grados de meteorización. Rozwalak et al. (2022) confirmaron que la composición elemental de la crioconita no depende únicamente del entorno geológico local, sino que también se ve afectada por las aportaciones de MO y minerales de otras fuentes, incluyendo orígenes glaciales y transporte a larga distancia. La granulometría (0.100 a 0.274 mm) se encontró dentro del rango reportado por Takeuchi et al. (2014).

El PCA explicó un 82.2 % de la variación total (PC1: 54.4 %, PC2: 27.8 %). El PC1 representó un gradiente de mineralización, separando agujeros con alta concentración de metales, granulometría gruesa y mayor oxigenación. El PC2 representó un gradiente de alcalinidad y contenido de MO, contrastando agujeros con alta CE y Mg frente a aquellos con pH elevado y mayor MO. Se identificaron patrones espaciales diferenciados: la zona 4 mostró alta mineralización alcalina y oxigenada; la zona 5 presentó alta concentración de metales con menor pH; y las zonas 1, 2 y 3 se caracterizaron por menor mineralización y granulometría fina. Esta

heterogeneidad demuestra que la superficie del glaciar constituye un mosaico de condiciones abióticas que determina la estructura de la comunidad biológica.

La limitación de nutrientes, particularmente el fósforo, puede ser un factor crítico que influye en la diversidad de invertebrados. Telling et al. (2011) encontraron que el fósforo es generalmente el principal nutriente limitante en los glaciares, mientras que el nitrógeno suele ser introducido por precipitación atmosférica. Esta limitación nutricional podría explicar la baja diversidad observada en estos hábitats extremos (Zawierucha et al., 2020).

5.3. Determinación de la morfometría de los agujeros de crioconita

Los agujeros de crioconita en Artesonraju mostraron un amplio rango de dimensiones, con longitudes de 8.80 a 31.10 cm, anchos de 4.90 a 23.80 cm y profundidades de 3.50 a 15.50 cm. Los resultados son consistentes con las descripciones de agujeros de crioconita clásicos reportados globalmente, ajustándose al rango de 7 a 95 cm documentado en glaciares antárticos (Sommers et al., 2020) y siendo comparables con las medidas de 12 a 25 cm reportados por Zawierucha et al. (2019b) en la Antártida Marítima. Jaroměřská et al. (2023) describieron agujeros con profundidades de pocos centímetros y diámetros de hasta aproximadamente 30 cm, por su parte López (2022) reportó profundidades en un rango de 3 a 23 cm. Esta concordancia confirma que los hábitats estudiados en Artesonraju corresponden efectivamente a agujeros de crioconita típicos.

El hallazgo más significativo es la clara relación inversa entre altitud y tamaño de los agujeros: los más grandes y voluminosos se localizaron sistemáticamente en zonas de menor altitud. Este patrón confirma una tendencia bien documentada mundialmente. Cook et al. (2010) documentaron una disminución en el tamaño de los agujeros con el aumento de la elevación en Groenlandia, hallazgo citado por Fair et al. (2020). Porazinska et al. (2004) encontraron que los agujeros en la elevación más baja fueron significativamente más grandes y tuvieron más sedimento que los agujeros a mayor altitud en glaciares antárticos. Buda et al. (2020b) confirmaron este patrón, reportando que los agujeros de crioconita ubicados a menor altitud tienen mayor profundidad debido a una mayor disponibilidad de energía para el derretimiento en elevaciones más bajas.

En cuanto a su geometría, la compensación considerable entre largo y ancho ($p = 0.68$) sugiere un patrón de crecimiento relativamente proporcional, coherente con las formas generalmente circulares a elípticas descritas por Porazinska et al.

(2004) y la mayor diversidad de formas, tamaños, profundidades incluyendo formas ovoides, rectangulares y poligonales irregulares reportadas por Fair et al. (2020). Cook et al. (2010) dictaminó que el área de un agujero de crioconita se correlaciona directamente con la masa del sedimento en el interior, y la adición de más sedimento aumenta el diámetro del agujero para mantener una profundidad de sedimento relativamente constante. Este principio explica las correlaciones observadas y sugiere que el crecimiento sigue patrones predecibles basados en la acumulación de sedimento.

Desde una perspectiva metodológica, este estudio aporta una valiosa comparación de tres métodos de estimación de área y volumen. Aunque la prueba de Kruskal-Wallis no encontró diferencias estadísticamente significativas entre métodos, la aproximación rectangular tiende a sobreestimar al no considerar las formas irregulares documentadas por Fair et al. (2020) y Cook et al. (2016). El método de escalado con AutoCAD, al basarse en el contorno real digitalizado, ofrece la estimación más precisa y con menor dispersión, capturando mejor la complejidad morfológica de estos hábitats.

La morfometría es ecológicamente relevante porque define el volumen del hábitat disponible para la comunidad biológica, relacionándose con la estabilidad del sistema y los insumos de energía y nutrientes. Edwards et al. (2011) sugiere que el volumen de crioconitas tiene una influencia positiva ya que está en gran parte lleno de agua de deshielo, por lo que esto reflejaría entradas en las crioconitas, en términos de radiación solar o nutrientes dentro del agua de deshielo. Los agujeros más grandes y profundos, encontrados a menor altitud, probablemente constituyen hábitats más estables con mayor resiliencia a perturbaciones ambientales como congelación completa o lavado por agua de deshielo (Zawierucha et al., 2020).

Esta estabilidad podría favorecer a las comunidades biológicas, ya que los agujeros más grandes ofrecen un mayor nicho disponible (Porazinska et al., 2004), permitiendo el sostenimiento de poblaciones de invertebrados más grandes o diversos. Curiosamente, la relación podría ser bidireccional. Zawierucha et al. (2016) propone que los organismos glaciares pueden influir en el tamaño de los agujeros de crioconita, sugiriendo que la presencia o ausencia de invertebrados podría afectar el derretimiento de las superficies de los glaciares. Este potencial ciclo de retroalimentación, donde el hábitat moldea a la comunidad y la comunidad

modifica el hábitat, representa una vía fascinante para futuras investigaciones que integran biología y glaciología.

5.4. Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los parámetros abióticos

El análisis de las interacciones entre la comunidad de macroinvertebrados y las variables ambientales en los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju revela una relación compleja, donde los patrones ecológicos no son dictados por un único factor dominante, sino por una jerarquía de influencias que operan a distintas escalas. Uno de los hallazgos más reveladores de este estudio es la falta de relaciones fuertes y estadísticamente significativas entre los índices de diversidad y las variables físicas, químicas y morfométricas individuales, lo cual, lejos de ser un resultado anómalo, es una característica ecológica coherente con otros ecosistemas supraglaciares del mundo.

Los modelos de regresión múltiple no lograron explicar la variabilidad en la riqueza S ni en los índices de diversidad (índice H', índice 1-D e índice D_{Mg}) como lo demuestran los valores de R^2 ajustado negativos o cercanos a cero y la falta de significancia estadística ($p > 0.05$).

Esta aparente desconexión entre la comunidad biológica y su entorno abiótico inmediato es consistente con investigaciones en hábitats glaciares de otras latitudes (Zawierucha et al., 2016). De manera notable, Fair et al. (2020) se encontraron con la sorpresa de que ninguna de las variables ambientales medidas tenía una relación significativa con la abundancia y presencia de quironómidos en pozas supraglaciares del glaciar Hailuogou. Los autores reportaron explícitamente: "Nos sorprendió que ninguna de las variables seleccionadas de química del agua, hábitat físico y ambiente glaciar tuviera una relación significativa con la abundancia y presencia de quironómidos" (Fair et al., 2020, p. 646).

De igual forma, un estudio en el Ártico concluyó que los modelos estadísticos nulos (sin variables predictoras) eran los que mejor explicaban la distribución de tardígrados, rotíferos y cianobacterias, indicando una falta de correlación con los factores abióticos medidos (Zawierucha et al., 2018). Esta convergencia de resultados entre diferentes regiones glaciares (Andes tropicales, Tíbet, Ártico) sugiere que la débil predicción ambiental es una característica intrínseca de estos ecosistemas. La explicación de esta débil predicción es multifactorial:

- Resiliencia de los organismos extremófilos: los macroinvertebrados que colonizan estos hábitats, en particular la especie dominante *Parochlus* sp., son por definición extremófilos. Poseen amplias tolerancias fisiológicas que les permiten prosperar en un rango variable de temperatura, pH y CE. Su éxito no depende de condiciones óptimas y estables, sino de su capacidad para sobrevivir en un entorno fluctuante. Esta interpretación es respaldada por Fair et al. (2020), quienes, además, sugieren que es posible que los quironómidos adultos seleccionaran aleatoriamente charcas supraglaciares para depositar huevos o respondieran a una variable ambiental no medida.
- Inestabilidad temporal del hábitat: los agujeros de crioconita son sistemas dinámicos y efímeros. Fair et al. (2020) atribuyen la falta de relaciones ambientales significativas a la naturaleza inestable de las pozas supraglaciares, un fenómeno que se aplica directamente a los agujeros de crioconita. Sin embargo, estudios a largo plazo revelan una paradoja temporal importante. Porazinska et al. (2004) encontraron que las propiedades de los agujeros se mantuvieron estables entre temporadas de muestreo, sugiriendo que los cambios en las propiedades de los agujeros de crioconita se desarrollan en escalas temporales más extensas que las anuales. Por lo tanto, las comunidades de macroinvertebrados podrían estar respondiendo a la estabilidad promedio a largo plazo del microhábitat, en lugar de a las fluctuaciones a corto plazo que fueron medidas en este estudio.
- Importancia de factores no medidos: es probable que variables no cuantificadas en este estudio, como la composición de la comunidad microbiana, desempeñen roles críticos. Zawierucha et al. (2018) sugieren que los gránulos de crioconita (consorcio de arqueas, cianobacterias, bacterias heterótrofas, algas y hongos) podrían ser una fuente abundante y estable de alimento para los invertebrados. La débil respuesta a variables individuales también puede reflejar procesos de sucesión ecológica únicos en estos ambientes. Pittino et al. (2018) evidenciaron que los procesos observados en los agujeros de crioconita son similares a las sucesiones ecológicas que ocurren en áreas con condiciones climáticas similares, pero en diferentes regiones biogeográficas, donde las sucesiones tienden al mismo clímax, pero la composición de especies difiere.

Paralelamente, se observó una correlación positiva moderada entre la riqueza S y las variables morfométricas (área: $\rho = 0.30$; volumen: $\rho = 0.36$). Esto apoya la

teoría de la relación especie-área. No obstante, la debilidad de esta relación coincide con hallazgos previos. Zawierucha et al. (2016) reportaron que un modelo, que incluyó área, profundidad y elevación como variables independientes, no lograba explicar la densidad de tardígrados en agujeros de crioconita. Los autores sugieren que se podría afirmar que el área, la profundidad y la elevación no influyen en las densidades de tardígrados en los agujeros de crioconita en el Ártico tanto como la cantidad de nutrientes, el valor del agua de deshielo y las descargas de sedimentos son probablemente más influyentes que las simples dimensiones físicas del hábitat (Zawierucha et al., 2016)

Asimismo, aunque en este estudio ninguna variable fisicoquímica individual mostró relaciones fuertes, la literatura revela que ciertos parámetros pueden ser importantes en otros sistemas acuáticos (Hoyos, 2019). Fair et al. (2020) identificaron la CE como un predictor clave en pozas supraglaciares tibetanas, donde el modelo univariante de conductividad se identificó como el mejor modelo para predecir la presencia de macroinvertebrados. Los autores sugieren que la CE podría servir como indicador de las concentraciones de nutrientes en charcas supraglaciares (Fair et al., 2020). Sin embargo, en Artesonraju, la CE no mostró relaciones significativas con los índices de diversidad, sugiriendo que los factores limitantes pueden variar considerablemente entre diferentes glaciares, dependiendo de la geología local, el clima y la biota específica.

Para los colémbolos específicamente, Fair et al. (2020) encontraron que la abundancia de isótomos (colémbolos), se correlacionó negativamente con la CE y positivamente con la profundidad media del agua, y que las pozas supraglaciares con grandes profundidades de la superficie del hielo al agua podrían haber funcionado como trampas de caída para los isótomos originarios de áreas adyacentes o como refugios contra el viento y otras variables climáticas.

Dado que las relaciones individuales eran débiles, PCA resultó ser una herramienta mucho más poderosa para entender el sistema. Esta aproximación ha demostrado ser exitosa en otros estudios de ecosistemas glaciares. Zawierucha et al. (2018) utilizaron PCA para explicar el 43.7%, 24.3% y 13.6% de la varianza en agujeros de crioconita árticos, identificando gradientes químicos específicos.

En este estudio, el PCA logró sintetizar el 57.1% de la varianza total, revelando dos gradientes principales que estructuran la comunidad:

- Componente principal 1 (37.9% de la varianza): representa un gradiente de biodiversidad versus altitud. Este eje separó claramente los agujeros con mayores índices de diversidad (riqueza S, índice H', índice 1-D e índice D_{Mg}), que cargaron positivamente, de aquellos situados a mayor altitud, que cargó negativamente. Esto confirma que la altitud actúa como un filtro ambiental que modula la capacidad de colonización y establecimiento de las especies.
- Componente principal 2 (19.2% de la varianza): representa un gradiente de condiciones físicas, químicas y morfométricos de los agujeros. Este eje estuvo dominado por el OD, y de forma moderada por el área y la temperatura. Este componente describe las condiciones locales del microhábitat, contrastando agujeros más grandes, fríos y con menor OD con aquellos más pequeños, cálidos y mejor oxigenados.

Más importante aún, el análisis de agrupamiento (*K-means*) basado en el PCA identificó tres grupos diferenciados de agujeros de crioconita: un grupo de agujeros caracterizados por las mayores altitudes, asociándose con menores valores de diversidad de macroinvertebrados (grupo 1), un grupo con condiciones intermedias del gradiente ambiental, caracterizándose por valores moderados en la mayoría de las variables analizadas (grupo 2), y un grupo de agujeros de menores altitudes, presenta la mayor diversidad de macroinvertebrados y condiciones ambientales más favorables (grupo 3).

Esta clasificación demuestra que, en lugar de una respuesta lineal a variables individuales, la comunidad y el ambiente interactúan para formar estados de ecosistema discretos sobre la superficie del glaciar. Este enfoque es similar al utilizado por Vonnahme et al. (2016), quienes encontraron que el primer eje explica la mayor parte de la variación para las microalgas verdes y los herbívoros. Los grupos de cianobacterias se explican principalmente por el segundo eje, indicando controles ambientales para organismos eucariotas y procariotas.

El PCA revela una estructura ecológica clara: la variabilidad principal está definida por el gradiente altitudinal que controla la diversidad (PC1), y esta es modulada secundariamente por las condiciones físicas, químicas y morfométricas locales (PC2). Este hallazgo subraya la importancia de los análisis multivariados para comprender sistemas complejos donde las interacciones jerárquicas son más determinantes que los efectos individuales.

Fortalezas y debilidades del trabajo

Fortalezas

- Estudio pionero: esta es la primera investigación que caracteriza de manera sistemática las comunidades de macroinvertebrados en agujeros de crioconita de glaciares tropicales peruanos, estableciendo una línea base biológica esencial para un ecosistema de alta montaña severamente amenazado por el cambio climático.
- Enfoque ecosistémico integral: la investigación va más allá de un simple inventario biológico al correlacionar la biota con un amplio conjunto de variables abióticas, que incluyen parámetros físicos, químicos y morfométricos.

Debilidades o limitaciones

- Alcance y resolución taxonómica: al enfocarse exclusivamente en macroinvertebrados, el estudio excluye a la meiofauna (como tardígrados y rotíferos), reconocida globalmente como componente dominante en ecosistemas agujeros de crioconita. Además, la identificación taxonómica se mantuvo a nivel de género (*Parochlus*, *Cricotopus*) u orden (Poduromorpha), lo que limita la posibilidad de realizar análisis biogeográficos más detallados.
- Carácter puntual (ausencia de estacionalidad): el muestreo, realizado en momentos específicos (octubre 2024 y febrero 2025), proporciona una instantánea del ecosistema sin capturar la dinámica estacional ni la variabilidad interanual, aspectos fundamentales para comprender ambientes glaciares por su naturaleza dinámica y sus fluctuaciones temporales.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se caracterizó la comunidad de macroinvertebrados que habita los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju como un sistema ecológicamente simple, con baja diversidad, riqueza de especies y una estructura de dominancia extrema. El quironómido del género *Parochlus* sp. constituye el componente estructuralmente dominante, con una presencia ubicua (100% de los puntos) y una abundancia relativa que supera el 89% en todas las muestras analizadas. Los otros taxones registrados, *Cricotopus* sp. y colémbolos (orden Poduromorpha), actúan como elementos secundarios o accidentales, con densidades bajas y una distribución espacial restringida. Esta configuración establece una línea base biológica crucial para un ecosistema de alta montaña poco estudiado y define a la comunidad como un sistema resiliente y adaptado a condiciones extremas, pero inherentemente vulnerable a la pérdida de su hábitat por el acelerado retroceso glaciar.

Se determinaron los parámetros físicos, químicos y de sedimento de los agujeros de crioconita en el glaciar Artesonraju, los cuales se caracterizaron por una notable estabilidad térmica y una pronunciada heterogeneidad física, química y sedimentológica. A pesar de que la temperatura del agua se mantiene consistentemente cercana al punto de congelación (media 1.07 °C), se registraron amplias y significativas variaciones espaciales en la CE (1.0 a 62.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$), el pH (5.76 a 8.61) y, crucialmente, en el contenido de materia orgánica del sedimento (1.38% a 10.31%). El PCA confirmó que esta heterogeneidad no es aleatoria, sino

que estructura el ecosistema a lo largo de gradientes principales de mineralización y alcalinidad (82.2% de la varianza explicada), definiendo un sistema complejo de nichos ecológicos diferenciados sobre la superficie glaciar.

Se determinó la morfometría de los agujeros de crioconita, la cual está fuertemente estructurada por el gradiente altitudinal del glaciar. Se confirmó una relación inversa y significativa entre el tamaño del microhábitat (área y volumen) y la altitud, de modo que los agujeros más grandes y volumétricos se localizan sistemáticamente en las cotas más bajas de la zona de ablación. Este patrón es un reflejo directo de los procesos glaciológicos, donde el mayor tiempo de exposición al deshielo en las zonas más bajas y antiguas del glaciar permite un mayor desarrollo morfométrico. Adicionalmente, el estudio metodológico comparativo demostró que la digitalización y cálculo mediante software AutoCAD es el enfoque más preciso y reproducible para estimar el área y volumen de estos hábitats de forma irregular.

Se analizó la relación entre la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita, la cual no responde a factores lineales simples, patrón consistente con otros ecosistemas supraglaciares mundiales. Los análisis de regresión múltiple demostraron que las variables físicas, químicas y morfométricas individuales son predictores débiles de la diversidad biológica. El único factor con una influencia consistente, aunque moderada, fue la altitud, que se correlacionó negativamente con todos los índices de diversidad, actuando como un indicador integrado de estrés ambiental. Esta débil predicción refleja la resiliencia fisiológica de organismos extremófilos como *Parochlus* sp., la inestabilidad temporal del hábitat y la influencia de factores no medidos como comunidades microbianas y procesos de sucesión ecológica. El PCA fue clave para revelar que la variabilidad del sistema se organiza según gradientes multidimensionales (57.1% de varianza explicada), donde el gradiente altitudinal-diversidad (PC1: 37.9%) actúa como filtro ambiental, modulado por condiciones físicas, químicas y morfométricas locales (PC2: 19.2%). Esta aproximación permitió identificar tres tipos funcionales discretos de agujeros de crioconita, evidenciando que la estructura comunitaria responde principalmente a la interacción de gradientes ambientales y procesos estocásticos de colonización, más que a respuestas lineales frente a umbrales abióticos específicos.

6.2. Recomendaciones

- Incorporar el estudio de la meiofauna y la taxonomía molecular, dado que el presente estudio se centró metodológicamente en macroinvertebrados. La

literatura internacional indica que la mayor parte de la diversidad animal en crioconitas reside en la meiofauna (tardígrados, rotíferos). Se sugiere realizar futuros muestreos con técnicas específicas para capturar estos grupos, así como implementar herramientas moleculares como el código de barras de ADN para alcanzar resolución taxonómica a nivel de especie, fundamental para estudios biogeográficos y de conservación.

- Establecer un programa de monitoreo a largo plazo, puesto que esta investigación proporciona una caracterización puntual de la comunidad. Se sugiere implementar un monitoreo anual de los mismos cuadrantes para evaluar la dinámica temporal, detectar cambios en la dominancia específica y medir el impacto directo del retroceso glaciar sobre estos microhábitats únicos.
- Ampliar la escala de estudio a nivel regional. Siendo este un trabajo pionero para la cordillera Blanca, es fundamental replicar la metodología en otros glaciares de la cordillera y del sistema andino peruano para determinar si la dominancia de *Parochlus* representa un patrón local o regional, permitiendo análisis biogeográficos e identificación de posibles endemismos.
- Aplicar análisis de isótopos estables ($\delta^{13}C$ para identificar las fuentes de carbono y $\delta^{15}N$ para determinar el nivel trófico) en la biota (macroinvertebrados, meiofauna, algas, bacterias). Esto permitiría confirmar las relaciones depredador-presa, cuantificar el flujo de energía y entender el rol ecológico preciso de cada componente del ecosistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara Carrió, J., Cabrera Vega, L., Alonso Bilbao, I., Alejo, I., Rey, S., y Gago, L. (2001). Parámetros granulométricos: comparación entre el método gráfico y el método de los momentos. In *Geotemas* (pp. 33–37). Geotemas.
- Anderson, D., Sweeney, D., y Williams, T. (2008). *Estadística para administración y economía*, Cengage Learning Editores, S.A. https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/estadistica-para-administracion-y-economia_anderson_sweeney_y_williams.pdf
- Anesio, A. M., Hodson, A. J., Fritz, A., Psenner, R., y Sattler, B. (2009). High microbial activity on glaciers: importance to the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 15(4), 955–960. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01758.x>
- Anesio, A. M., y Laybourn, J. (2012). Glaciers and ice sheets as a biome. *Trends in Ecology and Evolution*, 27(4), 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.09.012>
- Araya, F. A. (2020). *Microalgas (diatomeas del glaciar Antisana como bioindicadoras de alerta temprana sobre el cambio climático*. Universidad Internacional SEK.
- Bagshaw, E. A., Tranter, M., Fountain, A. G., Welch, K., Basagic, H. J., y Lyons, W. B. (2013). Do cryoconite holes have the potential to be significant sources of C, N, and P to downstream depauperate ecosystems of Taylor Valley, Antarctica? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 45(4), 440–454. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-45.4.440>
- Barboza, C. E., Maicelo, Q. J. L., Vigo, M. C., y Castro, Silupú Segundo Manuel Oliva, C. J. (2016). Análisis morfométrico y batimétrico del lago Pomacochas (Perú). *Rev. Indes*, 2(2), 90–97. <https://doi.org/10.25127/indes.20140>
- Barrenechea, A. (2001). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. In *Manual I: Teoría* (pp. 1–55).
- Blott, S. J., y Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Bolaños, J. D., Cordero, G., y Segura, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología En Marcha*, 30(4), 15. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- Buda, J., Azzoni, R. S., Ambrosini, R., Franzetti, A., y Zawierucha, K. (2020a). Effects of

- locality and stone surface structure on the distribution of Collembola inhabiting the stone-ice border on an alpine glacier. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., April, 1–25.
- Buda, J., Łokas, E., Pietryka, M., Richter, D., Magowski, W., Iakovenko, N. S., Porazinska, D. L., Budzik, T., Grabiec, M., Grzesiak, J., Klimaszuk, P., Gaca, P., y Zawierucha, K. (2020b). Biotope and biocenosis of cryoconite hole ecosystems on Ecology Glacier in the maritime Antarctic. *Science of the Total Environment*, 724(138112). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138112>
- CAN. (2008). *Manual de estadísticas ambientales andinas*. Secretaría General de la Comunidad Andina.
- Chacón, M. (2016). Análisis físico y químico de la calidad del agua. In *Universidad Santo Tomás* (Primera ed). Ediciones USTA.
- Charlesworth, J. K. (1957). The Quaternary. In E. Arnold (Ed.), *Quaternary Era* (p. 1790357). https://www.jstor.org/stable/1790357?read-now=1&seq=1#page_scan_tab_contents
- Christner, B. C., Kvitko, B. H., y Reeve, J. N. (2003). Molecular identification of Bacteria and Eukarya inhabiting an Antarctic cryoconite hole. *Extremophiles*, 7(3), 177–183. <https://doi.org/10.1007/s00792-002-0309-0>
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., P.Jansson, Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L., y Zemp, M. (2011). Glossary of glacier mass and related terms. *IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, 86*(IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86), 114. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000192525>
- Cook, J., Edwards, A., Takeuchi, N., y Irvine-Fynn, T. (2016). Cryoconite: the dark biological secret of the cryosphere. *Progress in Physical Geography*, 40(1), 66–111. <https://doi.org/10.1177/0309133315616574>
- Cook, J., Hodson, A., Telling, J., Anesio, A., Irvine-Fynn, T., y Bellas, C. (2010). The mass-area relationship within cryoconite holes and its implications for primary production. *Annals of Glaciology*, 51(56), 106–110. <https://doi.org/10.3189/172756411795932038>
- Creswell, J. (2009). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. In *Microbe Magazine* (3rd editio, Vol. 4, Issue 11). <https://doi.org/10.1128/microbe.4.485.1>

- Crosta, A., Valle, B., Caccianiga, M., Gobbi, M., Ficetola, F. G., Pittino, F., Franzetti, A., Azzoni, R. S., Lencioni, V., Senese, A., Corlatti, L., Buda, J., y Poniecka, E. (2025). *Ecological interactions in glacier environments : a review of studies on a model Alpine glacier*. 100, 227–244. <https://doi.org/10.1111/brv.13138>
- Cuello, C. (2023). Estudios de frecuencia relativa. *Revista Brasileira de Cancerologia*, 26(1), 19–23. <https://doi.org/10.32635/2176-9745.rbc.1976v26n1.3705>
- Dominguez, E., y Fernández, H. R. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología* (E. Domínguez y H. R. Fernández (eds.)). Fundación Miguel Lillo.
- Edwards, A., Anesio, A. M., Rassner, S. M., Sattler, B., Hubbard, B., Perkins, W. T., Young, M., y Griffith, G. W. (2011). Possible interactions between bacterial diversity, microbial activity and supraglacial hydrology of cryoconite holes in Svalbard. *ISME Journal*, 5(1), 150–160. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.100>
- Edwards, A., Mur, L. A. J., Girdwood, S. E., Anesio, A. M., Stibal, M., Rassner, S. M. E., Hell, K., Pachebat, J. A., Post, B., Bussell, J. S., Cameron, S. J. S., Griffith, G. W., Hodson, A. J., y Sattler, B. (2014). Coupled cryoconite ecosystem structure–function relationships are revealed by comparing bacterial communities in alpine and Arctic glaciers. *FEMS Microbiology Ecology*, 89(2), 222–237. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1574-6941.12283>
- Escandón, C., y Cáceres, M. (2022). *Análisis de la calidad del agua mediante parámetros físicos químicos y macroinvertebrados bentónicos, presentes en la microcuenca del río San Francisco-Gualaceo*.
- Fair, H., Hamilton, T. L., Smiley, P. C., y Liu, Q. (2024). Determinants of microbial community structure in supraglacial pool sediments of monsoonal Tibetan Plateau. *Microbiology Spectrum*, 12(9). <https://doi.org/10.1128/spectrum.00754-24>
- Fair, H., Smiley, P. C., y Qiao, L. (2020). Physical, chemical, and biological characteristics of supraglacial pools on a debris-covered glacier in Mt. Gongga, Tibetan Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 52(1), 635–649. <https://doi.org/10.1080/15230430.2020.1839165>
- Fountain, A. G., Nylén, T. H., Tranter, M., y Bagshaw, E. (2008). Temporal variations in physical and chemical features of cryoconite holes on Canada Glacier, McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(1), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2007JG000430>

- Francou, B. (2013). El rápido retroceso de los glaciares en los Andes tropicales : Un desafío para el estudio de la dinámica de los ecosistemas de alta montaña. *Ecología En Bolivia*, 48(2), 69–71.
- Franzetti, A., Navarra, F., Tagliaferri, I., Gandolfi, I., Bestetti, G., Minora, U., Azzoni, R. S., Diolaiuti, G., Smiraglia, C., y Ambrosini, R. (2017). Potential sources of bacteria colonizing the cryoconite of an Alpine glacier. *PLoS ONE*, 12(3), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174786>
- García Rodríguez, J. F., Bouza Herrera, C. N., Cervantes Pérez, D., y Sautto Vallejo, J. M. (2016). *Pobreza, desigualdad y violencia en América Latina. Un enfoque metodológico mixto* (Primera ed, Issue December 2016). Corporación Universitaria Empresarial de Salamanca.
- Gobbi, M., De Bernardi, F., Pelfini, M., Rossaro, B., y Brandmayr, P. (2006). Epigeal arthropod succession along a 154-year Glacier foreland chronosequence in the Forni Valley (Central Italian Alps). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38(3), 357–362. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2006\)38\[357:EASAAAY\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2006)38[357:EASAAAY]2.0.CO;2)
- Gobbi, M., y Lencioni, V. (2020). Glacial Biodiversity: Lessons from Ground-dwelling and Aquatic Insects. *Intech*, 225–240. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Gomez, A., e Hidalgo, J. (2007). *Relaciones de las variables fisicoquímicas con la diversidad de macroinvertebrados en sistemas acuáticos lóticos del altiplano Nariñense*. Universidad de Nariño.
- Guerrero, J. P., Salazar, A. M., Fernando, S., Jácome, C. S., Santiago, C., Valverde, C. R., y Jiménez, Y. J. (2020). *Evaluación y restauración ecológica “Lisan Wasi” comunidad San Pedro, parroquia Tarqui, Cantón Pastaza*. 13, 1–12.
- Gunde-Cimerman, N., S. Sonjak, P., Zalar, P., Frisvad, J., Diderichsen, B., y Plemenitaš, A. (2003). *Hongos extremófilos en el hielo ártico : una relación entre la adaptación a las bajas temperaturas y la actividad del agua*. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.056>
- Hernández, J., Espinosa, J. F., Peñaloza, M. E., Rodríguez, J. E., Rodríguez, J. E., Chacón, J. G., Toloza, C. A., Arenas, M. K., Carrillo, S. M., y Bermúdez, V. J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *ResearchGate, December*. <http://www.revistaavft.com/>

- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (1997). Metodología de la investigación. In M. de la L. C. Pérez (Ed.), *Entretexos* (Vol. 9, Issue 25). <https://doi.org/10.59057/iberoleon.20075316.201725338>
- Hodson, A., Anesio, A. M., Tranter, M., Fountain, A., Osborn, M., Priscu, J., Laybourn-Parry, J., y Sattler, B. (2008). Glacial ecosystems. *Ecological Monographs*, 78(1), 41–67. <https://doi.org/10.1890/07-0187.1>
- Hoyos, N. (2019). *Calidad del agua en función a los macroinvertebrados bentónicos y parámetros físicoquímicos en el río Muyoc Grande, Miguel Iglesias, Celendín-2018*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- INAIGEM. (2023). *Memoria descriptiva del Inventario Nacional de glaciares y lagunas de origen glaciar 2023*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
- Jaroměřská, T. N., Ambrosini, R., Mazurkiewicz, M., Franzetti, A., Klimaszuk, P., Rozwalak, P., Poniecka, E., Vondrovicová, L., y Zawierucha, K. (2023). Spatial distribution and stable isotopic composition of invertebrates uncover differences between habitats on the glacier surface in the Alps. *Limnology*, 24(2), 83–93. <https://doi.org/10.1007/s10201-023-00713-w>
- Kohshima, S. (1984). A novel cold-tolerant insect found in a Himalayan glacier. *Nature*, 310(5974), 225–227. <https://doi.org/10.1038/310225a0>
- Kopeszki, H. (2000). Auf der Suche nach roten Gletscherflöhen – Funde hochalpiner Springschwänze (Collembola). *Vorarlberger Naturschau*, 8, 133–144.
- Łokas, E., Zaborska, A., Kolicka, M., Różycki, M., y Zawierucha, K. (2016). Accumulation of atmospheric radionuclides and heavy metals in cryoconite holes on an Arctic glacier. *Chemosphere* 160. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653516308098>
- López, S. E. (2022). *Caracterización ecológica de diatomeas en crioconitas del glaciar Norte del volcán Cotopaxi*. Universidad Internacional SEK.
- Magurran, A. E. (2004). Measuring biological diversity. In *Journal of the Torrey Botanical Society* (Vol. 131, Issue 3). <https://doi.org/10.2307/4126959>
- Maroñas, M., Marzoratti, G., Vilches, A., Legarralde, T., y Darrigran, G. (2010). *Guía para el estudio de macroinvertebrados. II.- Introducción a la metodología de muestreo y análisis de datos* (Serie Tecn). ProBiota, FCNyM, UNLP.

- Martinez Arevalo, J. V. (2023). El cálculo de diversidad biológica. Parte I: Diversidad biológica alfa. *Tikalía*, August, 1–12. <https://www.researchgate.net/publication/372854379%0AEI>
- McIntyre, N. F. (1984). Cryoconite hole thermodynamics. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21(2), 152–156. <https://doi.org/10.1139/e84-016>
- Mora-Donjuán, C. A., Burbano-Vargas, O. N., Méndez-Osorio, C., y Castro-Rojas, D. F. (2017). *Evaluación de la biodiversidad*. 14, 68–75. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i35.3154>
- Mora, M., y Tamay, A. (2022). *Determinación del Índice de Calidad de Agua mediante el monitoreo de macroinvertebrados, parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en el río Sinincay, Cuenca - Ecuador* [Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. [https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21888#:~:text=La determinación de la calidad,y proponer propuestas para la](https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21888#:~:text=La%20determinaci3n%20de%20la%20calidad,y%20proponer%20propuestas%20para%20la)
- Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. In ORCYT Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Ed.), *M&T - Manuales y Tesis SEA* (Primera Ed, Vol. 1). GORFI, S.A.
- Morlans, M. C. (2004). Introducción a la ecología de poblaciones. In *Editorial Científica Universitaria* (Vol. 1). Editorial Científica Universitaria - Universidad Nacional de Catamarca. <http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicaciones/line/Ecologia/imagenes/pdf/012-poblacion.pdf>
- Moss, B. (2010). Ecology of freshwaters : a view for the twenty-first century. In *Sustainability (Switzerland)* (4th editio, Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Mueller, D. R., Vincent, W. F., Pollard, W. H., y Fritsen, C. H. . (2001). Glacial cryoconite ecosystems: a bipolar comparison of algal communities and habitats. *Nova Hedwigia Beiheft*, 1–4.
- OCDE. (1982). Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. In *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* (Vol. 69, Issue 2). Organisation for Economic Co-Operation and Development.

- Ortiz, J., Batanero, C., y Serrano, L. (1996). LAS FRECUENCIAS RELATIVAS Y SUS PROPIEDADES EN LOS TEXTOS. *ResearchGate*, January 1996.
- Palacios, E. D. (2021). *Influencia del gradiente de cobertura glaciar de la cordillera Blanca en la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos, 2019-2020*. Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo."
- Palma, C., y Arana, J. (2014). Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú. In *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. (p. 75). Ministerio del Ambiente. <http://www.minam.gob.pe/diversidadbiologica/wp-content/uploads/sites/21/2014/02/Métodos-de-Colecta-identificación-y-análisis-de-comunidades-biológicas.compressed.pdf>
- Pittino, F., Ambrosini, R., Seeger, M., Azzoni, R. S., Diolaiuti, G., Alviz Gazitua, P., y Franzetti, A. (2023). Geographical variability of bacterial communities of cryoconite holes of Andean glaciers. *Scientific Reports*, 13(1), 2633. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24373-5>
- Pittino, F., Maglio, M., Gandolfi, I., Azzoni, R. S., Diolaiuti, G., Ambrosini, R., y Franzetti, A. (2018). Bacterial communities of cryoconite holes of a temperate alpine glacier show both seasonal trends and year-to-year variability. *Annals of Glaciology*, 59(77), 1–9. <https://doi.org/10.1017/aog.2018.16>
- Poniecka, E. A. (2020). *The role of heterotrophs in glacier surface ecosystem productivity* (Issue October) [Cardiff University]. [chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/138342/1/2020PonieckaPhD.pdf](https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/138342/1/2020PonieckaPhD.pdf)
- Porazinska, D. L., Fountain, A. G., Nylen, T. H., Tranter, M., Virginia, R. A., y Wall, D. H. (2004). The biodiversity and biogeochemistry of cryoconite holes from McMurdo Dry Valley glaciers, Antarctica. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 84–91. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0084:TBABOC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0084:TBABOC]2.0.CO;2)
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>

- Rodríguez Curcio, J. de J., Linero-Cueto, J., y Barros Ortíz, L. J. (2018). Caracterización morfométrica de una laguna costera neotropical (ciénaga El Chino, Magdalena - Colombia). *Intropica*, 13(1), 21. <https://doi.org/10.21676/23897864.2355>
- Roldán, G. (1996). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. In *Universidad de Antioquia*. Fondo para la Protección del Medio Ambiente “José Celestino Mutis.” <https://www.ianas.org/docs/books/wbp13.pdf>
- Roldán, G. (2012). *Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad de agua*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Rott, E., Cantonati, M., Füreder, L., y Pfister, P. (2006). Benthic algae in high altitude streams of the Alps - A neglected component of the aquatic biota. *Hydrobiologia*, 562(1), 195–216. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1811-z>
- Rozwalak, P., Podkowa, P., Buda, J., Niedzielski, P., Kawecki, S., Ambrosini, R., Azzoni, R. S., Baccolo, G., Ceballos, J. L., Cook, J., Di Mauro, B., Ficetola, G. F., Franzetti, A., Ignatiuk, D., Klimaszuk, P., Łokas, E., Ono, M., Parnikoza, I., Pietryka, M., ... Zawierucha, K. (2022). Cryoconite – From minerals and organic matter to bioengineered sediments on glacier’s surfaces. *Science of The Total Environment*, 807, 150874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150874>
- Sävström, C., Mumford, P., Marshall, W., Hodson, A., y Laybourn-Parry, J. (2002). The microbial communities and primary productivity of cryoconite holes in an Arctic glacier (Svalbard 79°N). *Polar Biology*, 25(8), 591–596. <https://doi.org/10.1007/s00300-002-0388-5>
- Sevilla, L. (2023). *Patrones de actividad y frecuencia relativa de mamíferos grandes y medianos en la Reserva*. 2023(5), 123–126. <https://doi.org/https://doi.org/10.59763/mam.aeq.v5i.73>
- Shain, D. H., Mason, T. A., Farrell, A. H., y Michalewicz, L. A. (2001). Distribution and behavior of ice worms (*Mesenchytraeus solifugus*) in south-central Alaska. *Canadian Journal of Zoology*, 1813–1821. <https://doi.org/DOI: 10.1139/cjz-79-10-1813>
- Singh, P., Hanada, Y., Singh, S. M., y Tsuda, S. (2014). Antifreeze protein activity in Arctic cryoconite bacteria. *FEMS Microbiology Letters*, 351(1), 14–22. <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12345>
- Sint, D., Kaufmann, R., Mayer, R., y Traugott, M. (2019). Resolving the predator first paradox: Arthropod predator food webs in pioneer sites of glacier forelands. *Molecular*

Ecology, 28(2), 336–347. <https://doi.org/10.1111/mec.14839>

- Somarriba, E. (1999). *Índice de Shannon*. Agroforestería en las Américas. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6079/Diversidad_Shannon.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sommers, P., Darcy, J. L., Gendron, E. M. S., Stanish, L. F., Bagshaw, E. A., Porazinska, D. L., y Schmidt, S. K. (2018). Diversity patterns of microbial eukaryotes mirror those of bacteria in Antarctic cryoconite holes. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(1), 1–11. <https://doi.org/10.1093/femsec/fix167>
- Sommers, P., Porazinska, D. L., Darcy, J. L., Gendron, E. M. S., Vimercati, L., Solon, A. J., y Schmidt, S. K. (2020). Microbial species–area relationships in antarctic cryoconite holes depend on productivity. *Microorganisms*, 8(11), 1–16. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111747>
- Stibal, M., Bradley, J. A., Edwards, A., Hotaling, S., Zawierucha, K., Rosvold, J., Lutz, S., Cameron, K. A., Mikucki, J. A., Kohler, T. J., Šabacká, M., y Anesio, A. M. (2020). Glacial ecosystems are essential to understanding biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology and Evolution*, 4(5), 686–687. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1163-0>
- Stibal, M., Šabacká, M., y Žárský, J. (2012). Biological processes on glacier and ice sheet surfaces. *Nature Geoscience*, 5(11), 771–774. <https://doi.org/10.1038/ngeo1611>
- Swan, D., Clague, J. J., y Luternauer, J. L. (1978). Grain-Size Statistics I: Evaluation of the Folk and Ward Graphic Measures. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 48(April). <https://doi.org/10.1306/212f7595-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Swan, D., Clague, J. J., y Luternauer, J. L. (1979). Grain-size statistics II: evaluation of grouped moment measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49(2), 487–500. <https://doi.org/10.1306/212f7775-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Takeuchi, N. (2002). Surface albedo and characteristics of cryoconite (biogenic surface dust) on an Alaska glacier, Gulkana Glacier in the Alaska Range. *Bulletin of Glaciological Research*, 19(October), 63–70. http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/~takeuchi/pdf/02bgr_gulkana_ch.pdf
- Takeuchi, N., y Kohshima, S. (2004). A Snow Algal Community on Tyndall Glacier in the Southern Patagonia Icefield, Chile. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 92–99. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036)

- Takeuchi, N., Kohshima, S., Yoshimura, Y., y Fujita, K. (2000). *Characteristics of cryoconite holes on a Himalayan glacier , Yala Glacier Central Nepal. September 2014.* https://www.researchgate.net/publication/265385204_Characteristics_of_cryoconite_holes_on_a_Himalayan_glacier_Yala_Glacier_Central_Nepal
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J., y Shimada, R. (2014). Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bulletin of Glaciological Research*, 32(1), 85–94. <https://doi.org/10.5331/bgr.32.85>
- Telling, J., Anesio, A. M., Tranter, M., Fynn, T. I., Hodson, A., Butler, C., y Wadham, J. (2011). *Nitrogen fixation on Arctic glaciers , Svalbard Nitrogen fixation on Arctic glaciers , Svalbard. December 2013.* <https://doi.org/10.1029/2010jg001632>
- Thorp, J. H., y Rogers, D. C. (2015). *Ecology and general biology Thorp and Covich's Freshwater* (Fourth Edi).
- Toasa, F. (2012). *Validación de los métodos de ensayo para fenoles, tensoactivos, solidos suspendidos y total de solidos disueltos (TDS)* [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/894/1/T-UCE-0017-19.pdf>
- Tranter, M., Fountain, A. G., Fritsen, C. H., Lyons, W. B., Priscu, J. C., Statham, P. J., y Welch, K. A. (2004). *Extreme hydrochemical conditions in natural microcosms entombed within Antarctic ice.* 387(June 2003), 379–387. <https://doi.org/10.1002/hyp.5217>
- Uehlinger, U., Robinson, C. T., Hieber, M., y Zah, R. (2010). The physico-chemical habitat template for periphyton in alpine glacial streams under a changing climate. *Hydrobiologia*, 657(1), 107–121. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9963-x>
- UGRH. (2003). *Monitoreo de glaciar Artesonraju - cordillera Blanca* (M. de A.-I. N. de R. N. (INRENA) (ed.)). Hídricos, Unidad de Glaciología y Recursos. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1497>
- UNASAM. (2019). *Guía técnica de orientación para la elaboración de proyectos de investigación y tesis.* Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- Valle, B., Musciano, M., Gobbi, M., Bonelli, M., Colonnelli, E., Gardini, G., Migliorini, M., Pantini, P., Zanetti, A., Berrilli, E., Frattaroli, A. R., Fugazza, D., Invernizzi, A., y Caccianiga, M. (2022). Biodiversity and ecology of plants and arthropods on the last preserved glacier of the Apennines mountain chain (Italy). *The Holocene*, 32(8), 853–865. <https://doi.org/10.1177/09596836221096292>

- Vonnahme, T. (2014). Microbial community structure in cryoconite holes in high Arctic glaciers on Svalbard [University of Konstanz]. In *Greenland Institute of Natural Resources*. <https://www.researchgate.net/publication/335128402%0AMicrobial>
- Vonnahme, T. R., Devetter, M., Žárský, J. D., Šabacká, M., y Elster, J. (2016). Controls on microalgal community structures in cryoconite holes upon high-Arctic glaciers, Svalbard. *Biogeosciences*, 13(3), 659–674. <https://doi.org/10.5194/bg-13-659-2016>
- Wentworth C K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30, 377–392. <http://www.journals.uchicago.edu/t-and-c>
- Wharton, R. A., McKay, C. P., Simmons, G. M., y Parker, B. C. (1985). Cryoconite holes on glaciers. *Bioscience*, 35(8), 499–503. <https://doi.org/10.2307/1309818>
- Winkel, M., Trivedi, C. B., Mouro, R., Bradley, J. A., Vieth-Hillebrand, A., y Benning, L. G. (2022). Seasonality of glacial snow and ice microbial communities. *Frontiers in Microbiology*, 13(May). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.876848>
- Zawierucha, K., Buda, J., Azzoni, R. S., Niškiewicz, M., Franzetti, A., y Ambrosini, R. (2019a). Water bears dominated cryoconite hole ecosystems: densities, habitat preferences and physiological adaptations of Tardigrada on an alpine glacier. *Aquatic Ecology*, 53(4), 543–556. <https://doi.org/10.1007/s10452-019-09707-2>
- Zawierucha, K., Buda, J., Fontaneto, D., Ambrosini, R., Franzetti, A., Wierzoń, M., y Bogdziewicz, M. (2019b). Fine-scale spatial heterogeneity of invertebrates within cryoconite holes. *Aquatic Ecology*, 9, 179–190. <https://doi.org/10.1007/s10452-019-09681-9>
- Zawierucha, K., Buda, J., y Nawrot, A. (2019c). Extreme weather event results in the removal of invertebrates from cryoconite holes on an Arctic valley glacier (Longyearbreen, Svalbard). *Ecological Research*, 34(3), 370–379. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.1276>
- Zawierucha, K., Buda, J., Pietryka, M., Richter, D., Łokas, E., Lehmann-Konera, S., Makowska, N., y Bogdziewicz, M. (2018). Snapshot of micro-animals and associated biotic and abiotic environmental variables on the edge of the south-west Greenland ice sheet. *Limnology*, 19(1), 141–150. <https://doi.org/10.1007/s10201-017-0528-9>
- Zawierucha, K., Kolicka, M., Takeuchi, N., y Kaczmarek, Ł. (2015). What animals can live in cryoconite holes? A faunal review. *Journal of Zoology*, 295(3), 159–169. <https://doi.org/10.1111/jzo.12195>

- Zawierucha, K., Porazinska, D. L., Ficetola, G. F., Ambrosini, R., Baccolo, G., Buda, J., Ceballos, J. L., Devetter, M., Dial, R., Franzetti, A., Fuglewicz, U., Gielly, L., Łokas, E., Janko, K., Novotna Jaromerska, T., Kościński, A., Kozłowska, A., Ono, M., Parnikoza, I., ... Takeuchi, N. (2020). A hole in the nematosphere: tardigrades and rotifers dominate the cryoconite hole environment, whereas nematodes are missing. *Journal of Zoology*, 313(1), 18–36. <https://doi.org/10.1111/jzo.12832>
- Zawierucha, K., y Shain, D. H. (2019). *Disappearing Kilimanjaro snow — Are we the last generation to explore equatorial glacier biodiversity?* *April*, 8911–8918. <https://doi.org/10.1002/ece3.5327>
- Zawierucha, K., Trzebny, A., Buda, J., Bagshaw, E., Franzetti, A., Dabert, M., y Ambrosini, R. (2022). Trophic and symbiotic links between obligate-glacier water bears (Tardigrada) and cryoconite microorganisms. *PLoS ONE*, 17(1 January), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262039>
- Zawierucha, K., Vonnahme, T. R., Devetter, M., Kolicka, M., Ostrowska, M., Chmielewski, S., y Kosicki, J. Z. (2016). Area, depth and elevation of cryoconite holes in the Arctic do not influence Tardigrada densities. *Polish Polar Research*, 37(2), 325–334. <https://doi.org/10.1515/popore-2016-0009>

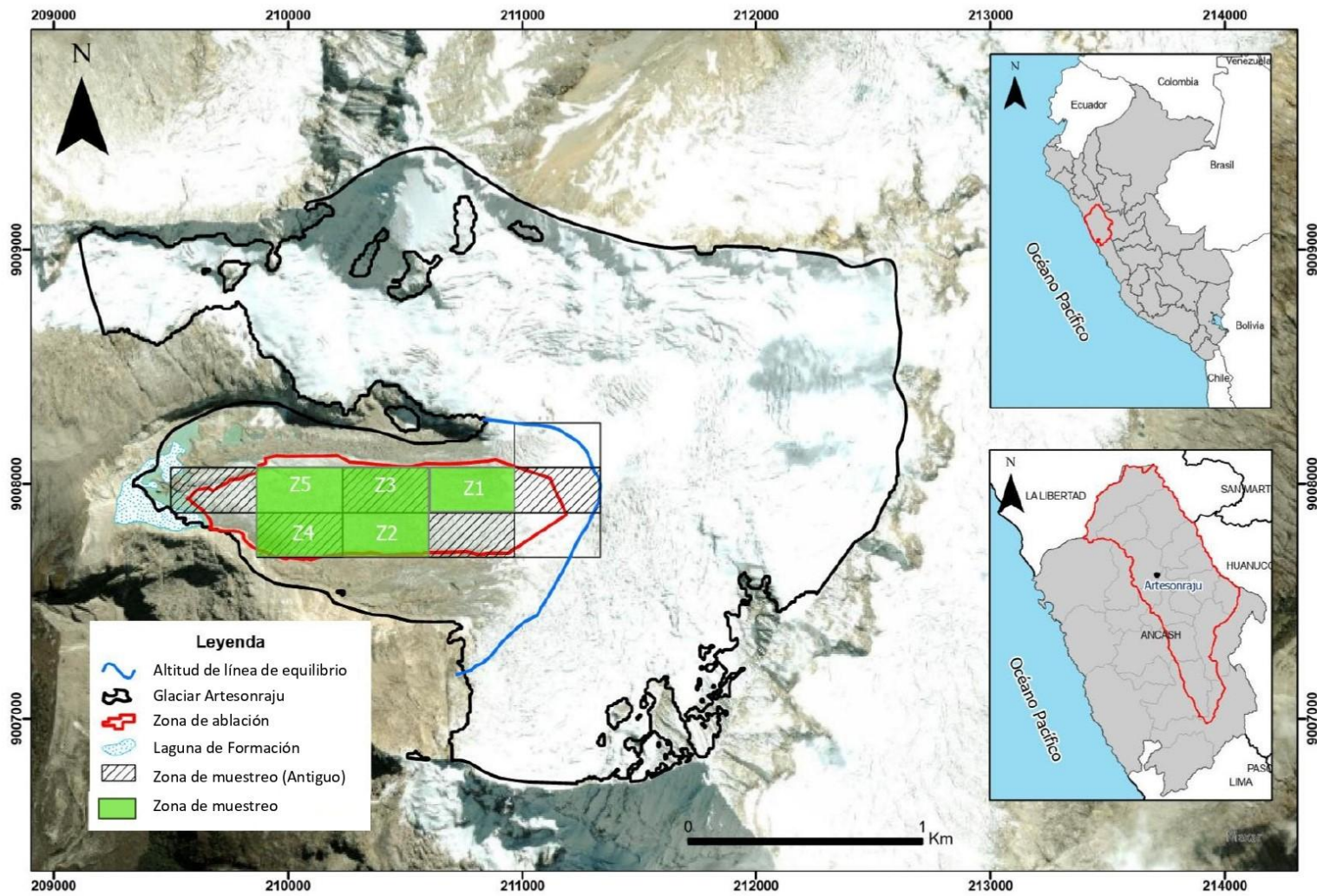
ANEXOS



ANEXO 1

DETERMINACIÓN LAS ZONAS DE MUESTREO





ANEXO 2

UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO



Ubicación de puntos de muestreo

Zona de ablación del glaciar Artesonraju



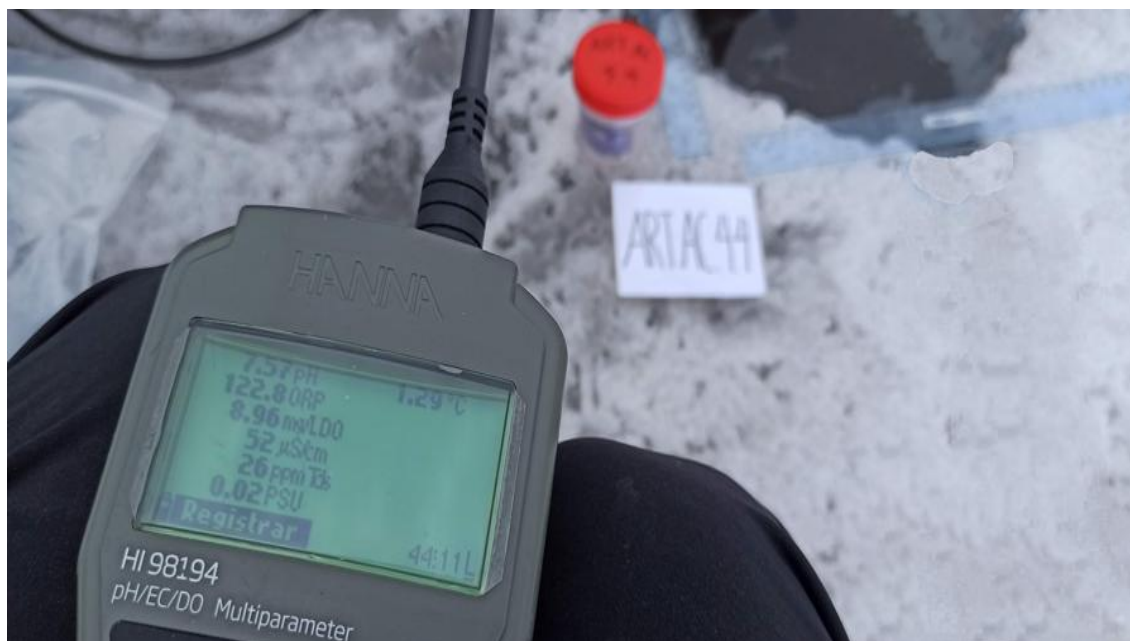
ANEXO 3

PANEL FOTOGRAFICO

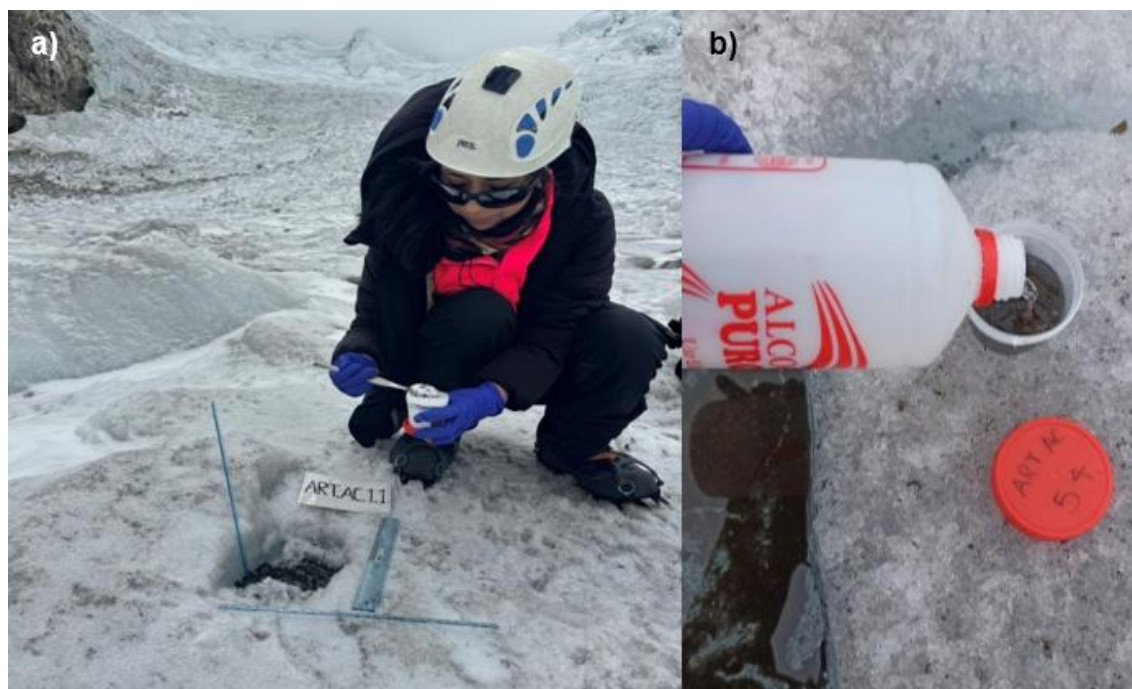


En campo

Medición *in situ* de parámetros físicos y químicos utilizando el equipo multiparámetro Hanna HI98194.

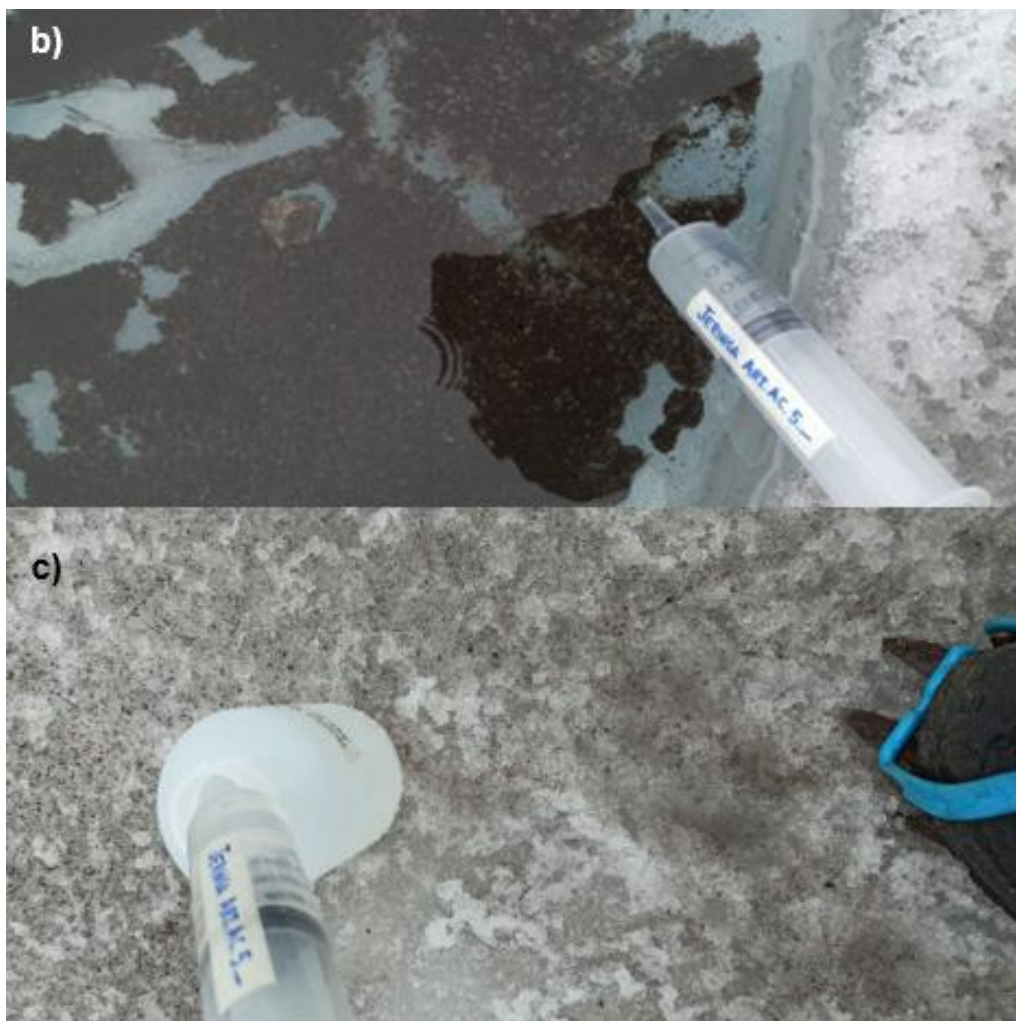


Recolección de muestras de macroinvertebrados en agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju. a) Extracción de sedimento utilizando cucharas de muestreo, b) preservación de la muestra mediante adición de alcohol al 96%.



Recolección de muestras de agua en agujeros de crioconita. a) Extracción directa mediante inmersión de la botella de muestreo, b) y c) extracción con jeringas cuando las condiciones del agujero dificultan la recolección directa.



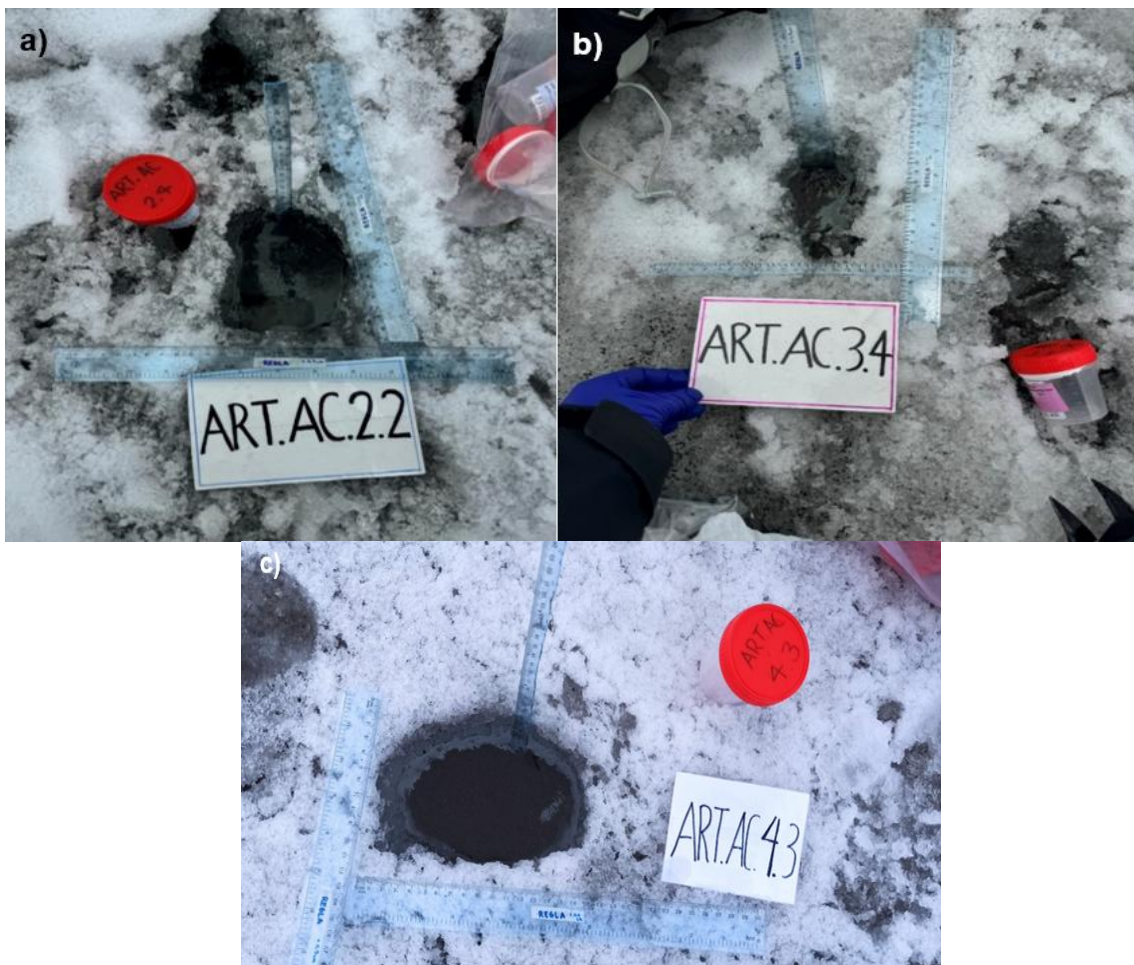


Recolección de muestras de sedimento en el glaciar Artesonraju. a) Extracción de sedimento utilizando cucharas de muestreo, b) sedimento superficial presente en la zona de ablación del glaciar Artesonraju.



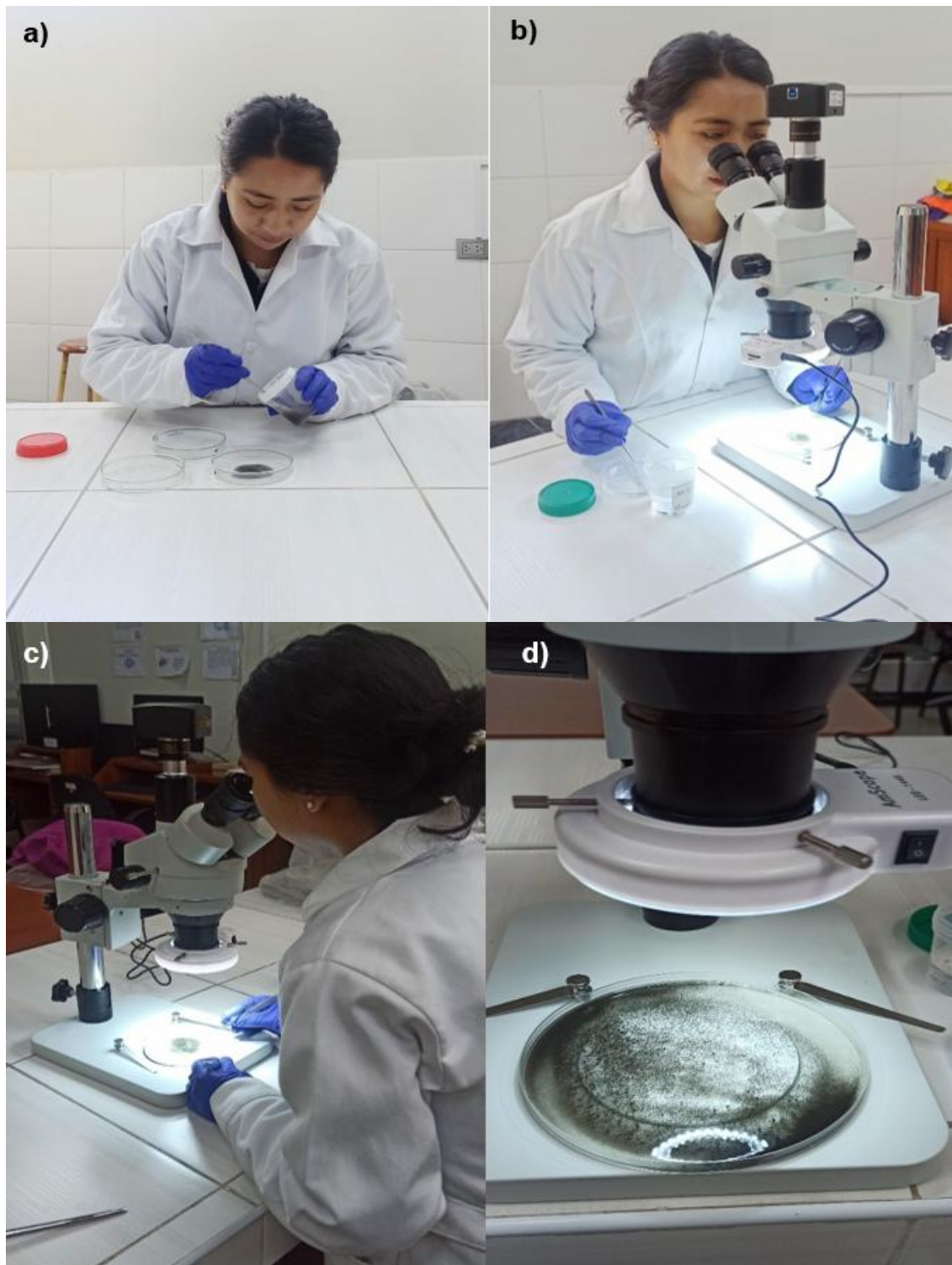


Medición de las dimensiones (profundidad, largo y ancho) de agujeros de crioconita en el glaciar Artesonraju.



En el laboratorio

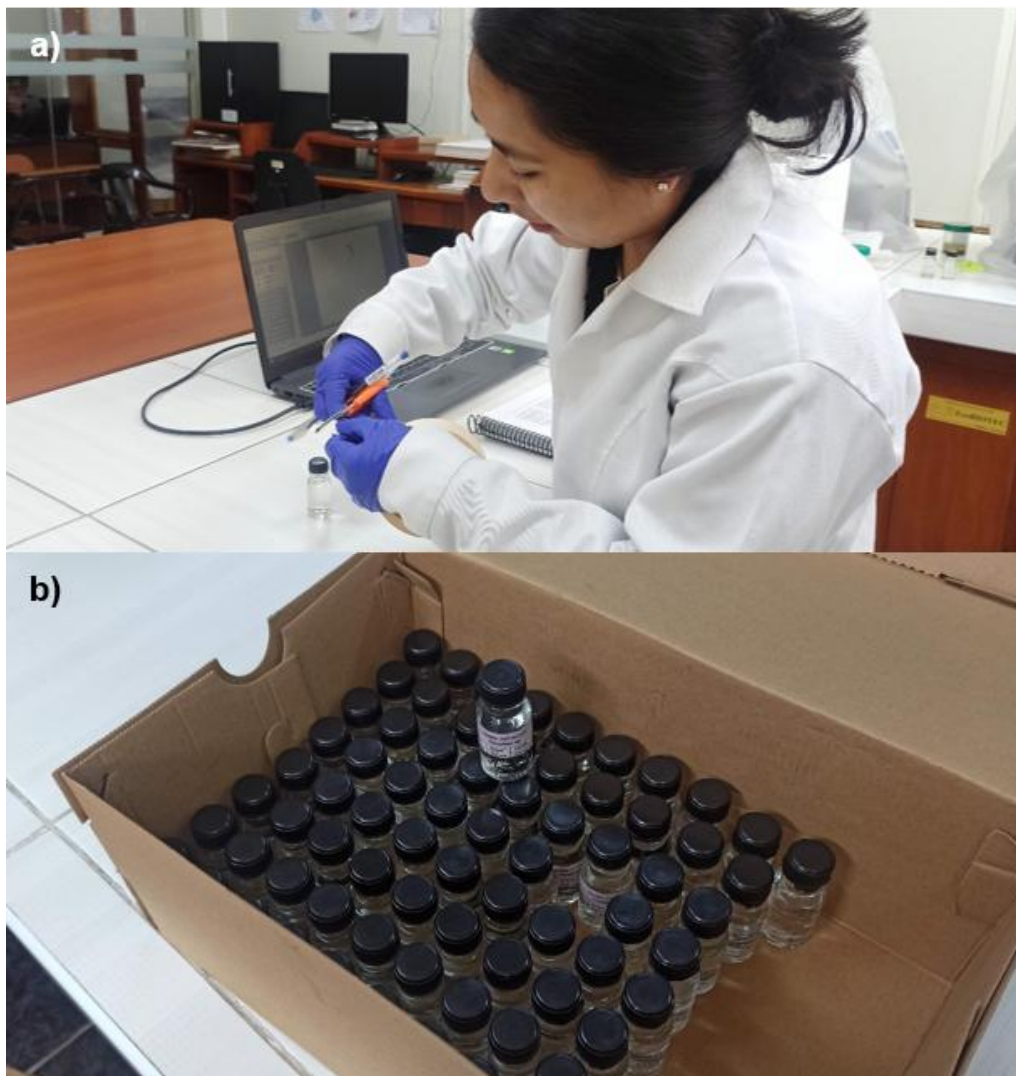
Separación de macroinvertebrados del material crioconítico en el laboratorio. a) Colocación de una cucharada de sedimento en la placa Petri, b) y c) extracción sistemática de organismos bajo estereomicroscopio, d) sedimento procesado tras la separación de macroinvertebrados.



Identificación taxonómica de macroinvertebrados en laboratorio. a) Consulta y comparación con claves taxonómicas especializadas, b) observación detallada del individuo bajo el estereomicroscopio, c) registro del macroinvertebrado identificado.



Almacenamiento de macroinvertebrados identificados en el laboratorio del ESAT. a) Colocación de etiquetas con información taxonómica (clase, orden, familia y género), b) almacenamiento de los organismos identificados.

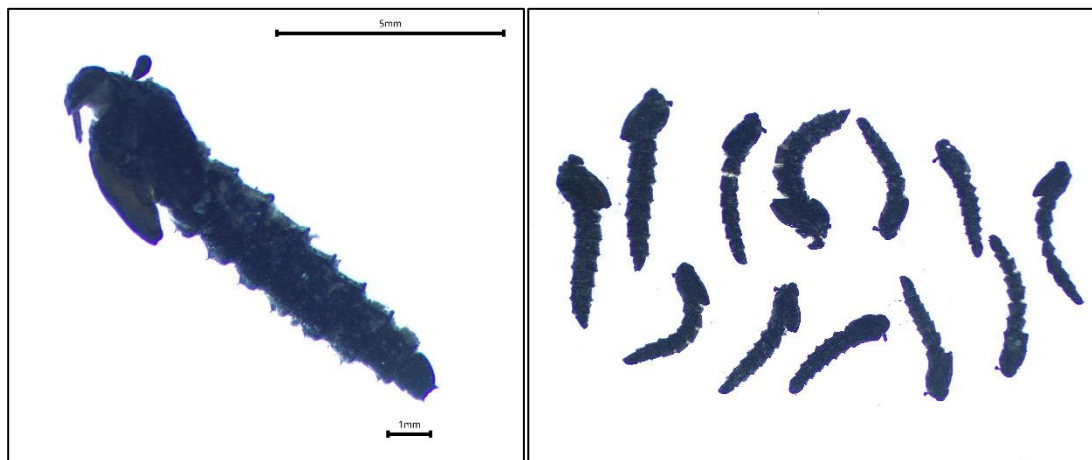


ANEXO 4

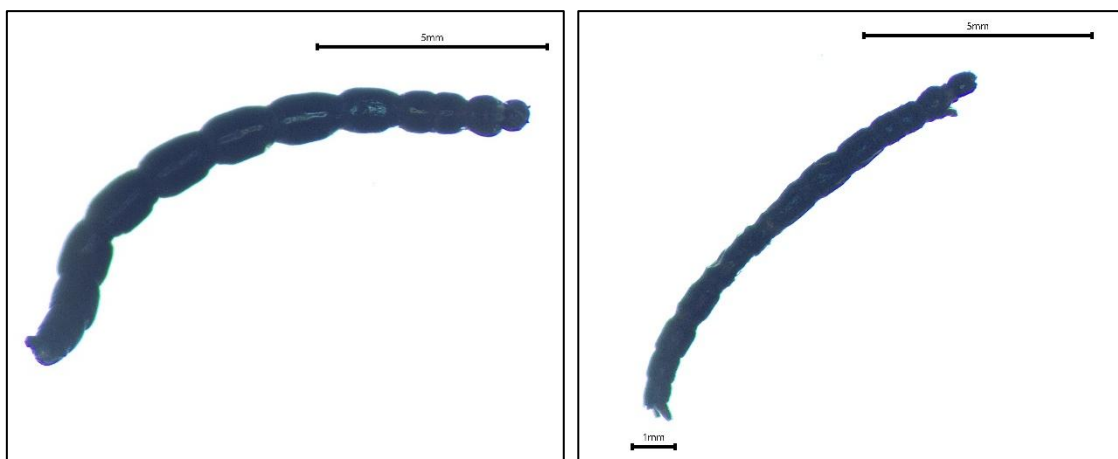
**MACROINVERTEBRADOS ENCONTRADOS
EN LA ZONA DE ABLACIÓN DEL GLACIAR
ARTESONRAJU**



Pupa del género *Parochlus* identificada en muestras crioconíticas



Larva del género *Parochlus* identificada en muestras crioconíticas



Adulto del género *Parochlus* identificado en muestras crioconíticas



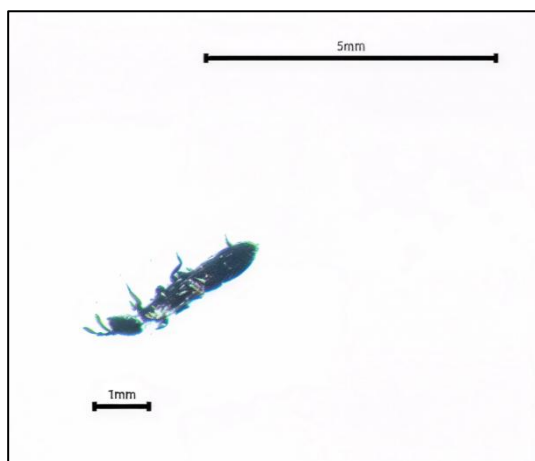
Pupa del género *Cricotopus* identificada en muestras crioconíticas



Larva del género *Cricotopus* identificada en muestras crioconíticas



Adulto de orden Poduromorpha identificada en muestras crioconíticas



ANEXO 5

**AUTORIZACIÓN DEL SERNANP PARA EL
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
DENTRO DEL PARQUE NACIONAL
HUASCARÁN**





Firmado digitalmente por
VILLOSLADA, TAIRPE Abdías FAU
20478053178 soft
Cargo: Jefe De Ámp - Parque Nacional
Huascarán(E)
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.10.2024 11:59:16 -05:00

Huaraz, 23 de Octubre del 2024

RESOLUCION JEFATURAL N° 000033-2024-SERNANP/PNHUA-SGD

VISTO:

El Informe N° 000095-2024-SERNANP/PNHUA-SGD-MLSP de fecha 22 de octubre del 2024, que evalúa la solicitud presentada por la señora Yomira Talía Jaimes Rojas, identificado con DNI N° 76330020, tesista de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - UNASAM, para realizar investigación que por su naturaleza prevé el ingreso a ámbitos de acceso restringido y colecta o extracción de muestras, en el marco de investigación **"Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, Cordillera Blanca, 2024"**, a ser desarrollada en el ámbito de la quebrada Parón, jurisdicción del Parque Nacional Huascarán, por periodo de dos (02) años.

CONSIDERANDO:

Que, según lo previsto en los incisos g) e i) del artículo 2° de la Ley N° 26834, Ley de Áreas Naturales Protegidas, uno de sus principales objetivos de protección es servir de sustento y proporcionar medios y oportunidades para el desarrollo de la investigación científica;

Que, en concordancia con ello, en el artículo 29° de la precipitada Ley, se establece que el Estado reconoce la importancia de las Áreas Naturales Protegidas para el desarrollo de la investigación científica básica y aplicada, siempre que no afecte los objetivos de conservación, se respete la zonificación y las condiciones establecidas en el Plan Maestro;

Que, la actualización del Plan Director de las Áreas Naturales Protegidas, aprobada por Decreto Supremo N° 016-2009-MINAM, refiere que la investigación científica constituye una herramienta básica para la generación de información que permita mejorar el conocimiento sobre la diversidad biológicas, así como para el manejo de recursos naturales y la gestión de riesgos y amenazas;

Que, mediante Decreto Supremo N° 010-2015-MINAM, publicado el 23 de setiembre de 2015, se declara de interés nacional el desarrollo de investigaciones al interior de las Áreas Naturales Protegidas de administración nacional, determinándose su gratuidad, así como los procedimientos de aprobación automática y evaluación previa para su otorgamiento;

Que, en el artículo 4° del mencionado Decreto Supremo, se prevé cinco supuestos en los que la autorización de investigación requiere de evaluación previa: a) ingreso a ámbitos de acceso restringido, b) la colecta o extracción de muestras biológicas, c) se prevea la alteración del entorno o instalación de infraestructura en el caso de áreas naturales protegidas de administración nacional, d) el uso de equipo o infraestructura perteneciente a las ANP de administración nacional, e) investigación en predios privados;

Que, mediante Resolución Presidencial N° 214-2021-SERNANP, publicada el 07 de octubre de 2021, se aprueba las Disposiciones Complementarias del Reglamento de la Ley de Áreas Naturales Protegidas en materia de investigación, las mismas que establecen las normas y lineamientos que regulan las investigaciones realizadas al interior de las Áreas Naturales Protegidas de administración nacional;

Que, en el artículo 23° de las precipitadas Disposiciones Complementarias se establecen los criterios de evaluación del Plan de Investigación;



Que, mediante Decreto Supremo N° 004-2023-MINAM de fecha 23 de marzo de 2023, se modifica el Texto y Procedimientos Administrativos (TUPA) del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado,

Firmado digitalmente por BEDON
NEGREIROS Johnny Crescencio
FAU 20478053178 soft
Motivo: Doy Vº Bº
Fecha: 23.10.2024 11:48:36 -05:00



aprobado mediante Decreto Supremo N° 002-2012-MNAM y modificado mediante la Resolución Ministerial N° 152-2016-MINAM, Resolución Ministerial N° 315-2016-MINAM, Resolución Ministerial N° 35-2017-MINAM y, la Resolución Presidencial N° 155-2020-SERNANP;

Que, mediante la Resolución Presidencial N° 140-2020-SERNANP del 11 de septiembre del 2020, se aprueba la Directiva N° 004-2020-SERNANP-DGANP "Directiva para implementar la prohibición de ingreso de plásticos de un solo uso en las Áreas Naturales Protegidas";

Que, mediante el Decreto Supremo N° 022-2022-MINAM del 16 de enero de 2022, se actualizan los procedimientos administrativos a cargo del SERNANP que otorgan Títulos Habilitantes;

Que, mediante Carta N° 007-2024-UNASAM-ATSCI/KDMM de fecha 11 de octubre de 2024, la Coordinadora del Grupo de Investigación en Ciencias Atmosféricas de la UNASAM, presenta a la señorita Yomira Talía Jaimes Rojas, tesista de pregrado, con la finalidad que la Jefatura del Parque Nacional Huascarán, le brinde las facilidades necesarias para que realice el proyecto de tesis titulado "**Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, Cordillera Blanca, 2024**";

Que, a través del documento del visto, la señora Yomira Talía Jaimes Rojas, identificado con DNI N° 76330020, en su calidad de tesista de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - UNASAM, solicita autorización para realizar investigación que por su naturaleza prevé el ingreso a ámbitos de acceso restringido y colecta o extracción de muestras, en el marco de la investigación "**Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, Cordillera Blanca, 2024**", a ser desarrollada en el ámbito de la quebrada Parón, jurisdicción del Parque Nacional Huascarán, por el periodo de dos (02) años;

Que, mediante Informe N° 000095-2024-SERNANP/PNHUA-SGD-MLSP de fecha 22 de octubre del 2024, se evaluó la solicitud presentada, en el que se concluye que, la administrada cumplió con adjuntar todos los requisitos exigidos en el Texto Único de Procedimientos Administrativos – TUPA del SERNANP; y emite opinión favorable a la solicitud presentada;

Que, estando al párrafo precedente y, de la revisión del expediente administrativo, en efecto, la administrada ha cumplido con presentar los requisitos establecidos en la normativa que rige el procedimiento para realizar acciones de investigación en las Áreas Naturales Protegidas; siendo ello así, corresponde emitir la presente resolución que autoriza a la administrada a realizar la investigación "**Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, Cordillera Blanca, 2024**", a ser desarrollada en el ámbito de la quebrada Parón, jurisdicción del Parque Nacional Huascarán, por el periodo de dos (02) años;

En uso de las atribuciones conferidas por el artículo 22° del Reglamento de Organización y Funciones del SERNANP, aprobado mediante Decreto Supremo N° 006-2008-MINAM.

SE RESUELVE:

Artículo 1°.- Otorgar autorización para el desarrollo de la investigación "**Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca, 2024**", a favor de la señora Yomira Talía Jaimes Rojas, en su condición de tesista de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo – UNASAM, a ser desarrollado en el ámbito de la quebrada Parón, jurisdicción del Parque Nacional Huascarán, por el periodo de dos (02) años, contados a partir de la fecha de emisión de la presente Resolución.

Artículo 2°.- Autorizar el desarrollo de la investigación en la quebrada Parón, según el siguiente detalle:

Cuadro 1

Quebrada	Coordenadas UTM, WGS 84, Zona 18S		Zonificación
Parón	211330.070	9007895.576	Zona Silvestre
	11303.612	9008070.202	
	210970.236	9008064.910	
	210964.944	9007879.701	
	210964.944	9007689.201	
	210599.818	9007699.784	
	210605.110	9007879.701	
	210599.818	9008064.910	
	210229.401	9008070.202	
	210234.693	9007884.993	
	210234.693	9007694.493	
	209864.275	9007694.493	
	209864.275	9007879.701	
	209858.984	9008070.202	
	209504.441	9008070.202	
209499.073	9007880.319		

Artículo 3°. - Establecer que el equipo de trabajo autorizado para desarrollar las actividades de investigación está conformado por:

Cuadro 2

Apellido y Nombre	DNI	Nacionalidad	Cargo	Institución
Jaimes Rojas Yomira Talía	76330020	Peruana	Responsable	UNASAM
Medina Marcos Katy Damacia	44752984	Peruana	Colaborador	UNASAM
Loarte Cadenas Edwin Aníbal	44909386	Peruano	Colaborador	UNASAM
Cruz Encarnación Rolando Cesai	44233607	Peruano	Colaborador	Autoridad Nacional del Agua - ANA
Rodríguez Venturo Sofia Cristina Ana	72728855	Peruana	Voluntario	Universidad Nacional Mayor de San Marcos UNMSM
Nolasco Gómez Mariluz Miriam	74124201	Peruana	Voluntario	UNASAM
Macedo Tolentino Jhon River	70110363	Peruano	Voluntario	UNASAM

Artículo 4°. - La investigación se desarrollará en la Zona de Uso Silvestre, con fines de registro de datos.

Artículo 5° Los integrantes del equipo de investigación son responsable de conocer y cumplir las disposiciones contenidas en la Ley N° 26834, Ley de Áreas Naturales Protegidas, su Reglamento aprobado mediante

Decreto Supremo N° 038-2001-AG, el Decreto Supremo N° 010-2015-MINAM, modificado por Decreto Supremo N°001-2019-MINAM, así como sus disposiciones complementarias.

Asimismo, los investigadores deberán cumplir con las normas que la Jefatura y su personal dispongan durante el desarrollo de la investigación, entre ellas, lo dispuesto por la Resolución Presidencial N° 140- 2020-SERNANP.

Artículo 6°.- La señora Yomira Talía Jaimes Rojas, autorizada en el artículo 1° de la presente Resolución, en su calidad de responsable de la investigación, asume las siguientes obligaciones y compromisos:

Obligaciones:

- a. Presentar copia de la autorización de investigación y autorización de ingreso de corresponder al personal del ANP que lo solicite.
- b. No extraer muestras biológicas, distintas a las autorizadas.
- c. No utilizar las muestras biológicas con fines de acceso a recursos genéticos o sus productos derivados; así como, no utilizar los conocimientos colectivos vinculados a los recursos biológicos de pueblos indígenas; sin contar con el contrato de acceso correspondiente.
- d. No ingresar bolsas de plástico de un solo uso, sorbetes plásticos y envases de tecnopor (poliestireno expandido) para bebidas y alimentos de consumo humano en el ámbito del ANP.

Compromisos:

Entregar al Parque Nacional Huascarán una copia digital de la investigación y autorizar su registro en la biblioteca digital del SERNANP para su ingreso a la biblioteca digital (incluye versión digital), conteniendo material fotográfico en formato MS Excel en el marco de la presente autorización.

Artículo 7°.- La autorización a la que se refiere el artículo 1° caducará automáticamente al vencer el plazo concedido, por el incumplimiento injustificado de los compromisos adquiridos o por cualquier daño al patrimonio natural, sin perjuicio de las responsabilidades administrativas, civiles y/o penales que pudieran originarse.

Artículo 8°.- El SERNANP no se responsabiliza por los accidentes o daños que pueda sufrir el integrante del equipo de investigación durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Artículo 9°.- Una vez concluida la investigación de acuerdo al cronograma establecido en el plan de investigación y el periodo de autorización, las áreas intervenidas debe ser restauradas a condiciones similares al estado en que se encontró antes de su intervención.

Artículo 10°.- Notificar la presente Resolución a la señora Yomira Talía Jaimes Rojas.

Artículo 11°.- Regístrese la presente Resolución en el Modulo de Seguimiento a las autorizaciones de investigaciones del SERNANP, así como en el archivo de autorizaciones del Parque Nacional Huascarán.

Artículo 12°.- Disponer la publicación de la presente Resolución en el portal institucional: <https://www.gob.pe/sernanp>.

Documento firmado digitalmente

ABDIAS VILLOSLADA TAIPE



JEFE DE ANP - PARQUE NACIONAL HUASCARAN

ANEXO 6

FICHA DE OBSERVACIÓN EN CAMPO Y

FICHA DE IDENTIFICACIÓN



	FICHA DE OBSERVACIÓN EN CAMPO		
	Código: FOC-01	Versión: 01	

DATOS IDENTIFICATIVOS DEL MUESTREO					
Nombre del glaciar:					
Código del punto de muestreo:		Coordenadas (UTM):			
Muestreador:					
Código de muestra:		Objetivo:			
Fecha: ____/____/____	Hora inicio: ____:____				
	Hora fin: ____:____				
Conservación de la muestra: <input type="checkbox"/> Alcohol etílico <input type="checkbox"/> Formaldehido					
Descripción de acceso o ubicación:					
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
Temperatura (°C):					
Conductividad eléctrica (µS/cm):					
Sólidos totales disueltos (mg/L):					
Observaciones:					
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS					
pH (unidades):					
Oxígeno disuelto (mg/l):					
Observaciones:					
CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS					
Largo (cm):		Área (cm²):			
Ancho (cm):		Volumen (cm³):			
Profundidad (cm):					
Observaciones:					
FOTOGRAFÍA DEL PUNTO DE MUESTREO					

Adaptado de: MAGRAMA (2013) e INAIGEM (2017).

ANEXO 7

RESULTADOS DE LABORATORIO DE

MUESTRAS DE AGUA





INFORME DE ENSAYO AG240350

CLIENTE
 Razón Social: RELACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MACROINVERTEBRADOS Y LOS AGUJEROS DE CRIOCONITA DEL GLACIAR ARTESONRAJU, CORDILLERA BLANCA, 2024.
 Dirección: Huaraz
 Atención: Yomira Talia Jaimes Rojas

MUESTRA
 Producto declarado: Agua de Glaciar¹
 Matriz: Aguas Naturales - Agua Superficial
 Procedencia: Glaciar Artesonraju¹
 Ref./Condición: Cadena de Custodia CC240268

MUESTREO
 Responsable: Muestra proporcionada por el cliente
 Referencia: No indica

LABORATORIO
 Fecha de recepción: 05 / Octubre / 2024
 Fecha de análisis: 05 de Octubre - 15 de Octubre / 2024
 Cotización N°: CO240631

CÓD.	PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA				
					Código del cliente	ART.AC.1	ART.AC.2	ART.AC.3	ART.AC.4
					Fecha de muestreo ¹	04/10/2024	04/10/2024	04/10/2024	04/10/2024
					Hora de muestreo ¹	09:45	10:26	10:47	10:55
					Código del Laboratorio	AG240790	AG240791	AG240792	AG240793
FQ	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS								
FQ20	Fosfato	mg/l PO ₄ ³⁻ - P	Vanadatomolibdato	0.010	0.018	0.054	0.047	0.039	
NU	ANÁLISIS DE NUTRIENTES								
NU06	Nitrógeno Total	mg/l N	Digestión - Koroleff, nitrospectral	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	

¹ Datos proporcionados por el cliente

"Fin del Informe de Ensayo"

Huaraz, 15 de Octubre de 2024



Dr. Mario Leyva Collas
 Administrador del Laboratorio de Calidad Ambiental
 FCAM - UNASAM
 CQP N° 604

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
 Está prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental.
 Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dirimentes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.

LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL
 FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL "SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"
 Av. Coneliano N°200-Huaraz-Ancash. Telef. 043 640020 - Anexos 3602-3501
 E-mail: dgcie-lca-av@unasam.edu.pe

FI-001/Versión: 01/F.E: 22-03-10

Página 1 de 1





INFORME DE ENSAYO AG250027

CLIENTE Razón Social : PROYECTO DE TESIS: "RELACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MACROINVERTEBRADOS Y LOS AGUJEROS DE CRIOCONITA DEL GLACIAR ARTESONRAJU, CORDILLERA BLANCA, 2024.
Dirección : Huaraz
Atención : Jaimes Rojas Yomira Talia

MUESTRA Producto declarado : Agua de Glaciar¹
Matriz : Aguas Naturales - Agua Superficial
Procedencia : Glaciar Artesonraju¹
Ref./Condición : Cadena de Custodia CC250021

MUESTREO Responsable : Muestra proporcionada por el cliente
Referencia: : No indica

LABORATORIO Fecha de recepción : 13 / Febrero / 2025
Fecha de análisis : 13 de Febrero - 20 de Febrero / 2025
Cotización N° : CO240531 - CO250061

CÓD.	PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA		
					Código del cliente	ART-AC-4	ART-AC-5
					Fecha de muestreo ¹	12/02/2025	12/02/2025
					Hora de muestreo ¹	10:47	11:27
					Código de Laboratorio	AG250043	AG250044
FQ	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS						
FQ20	Fosfato	mg/l PO ₄ ³⁻ - P	Vanadatomolibdato	0.010	0.135	0.095	
NU	ANÁLISIS DE NUTRIENTES						
NU06	Nitrogeno Total	mg/l N	Digestión Koroleff, nitrospectral	0.5	6.5	< 0.5	

¹ Datos proporcionados por el cliente

Huaraz, 20 de Febrero de 2025

"Fin del Informe de Ensayo"



Dr. Mario Leyva Collas
Administrador del Laboratorio de Calidad Ambiental
FCAM - UNASAM
COP N° 604

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
Está prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental.
Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dirmentes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.

LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL "SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"
Av. Centenario N°200-Huaraz- Ancash. Telef. 043 640020 - Anexos: 3602- 3501
E-mail: dgcie-lca-av@unasam.edu.pe

FI-001/Versión: 01/F.E: 22-03-10

Página 1 de 1



ANEXO 8

RESULTADOS DE LABORATORIO DE

IDENTIFICACIÓN DE

MACROINVERTEBRADOS





LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA CON REGISTRO N° LE - 047



INFORME DE ENSAYO N° 1906682-2025 CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL : UNIVERSIDAD NACIONAL SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO
DOMICILIO LEGAL : AV. CENTENARIO NRO. 200- INDEPENDENCIA - ANCASH - HUARAZ
SOLICITADO POR : UNIVERSIDAD NACIONAL SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO
REFERENCIA : RESERVADO POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA : ARTESONRAJU
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2025-04-25
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2025-04-25 AL 2025-05-07
FECHA(S) DE MUESTREO : 2025-04-14
MUESTREADO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C	Unidades
Macrobentos o Macroinvertebrados Bentónicos (cuantitativo)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 10500 A2, C. 24th Ed., 2023. Benthic Macroinvertebrates. Samples Processing and Analysis.	1	Org./muestra

L.C.: límite de cuantificación.

Ing. TELLO PAUCAR
MÁRILU
SERVICIOS ANALÍTICOS
GENERALES SAC
Firmado con www.tocapu.pe



DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

**EXPERTS
WORKING
FOR YOU**

Cod. FI 002 / Versión: 11 / F.E.: 06/2023

Este informe de ensayo al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego será eliminadas.

IMPORTANTE: • Este documento fue emitido con firma electrónica de valor legal en formato PDF. Debe solicitar su documento electrónico para verificar la autenticidad. Puedes comprobar la validez del mismo haciendo clic sobre la firma, saldrá un aviso: 'Validez de firma: firma válida', de no validarse el documento es falso. Notifique al correo: laboratorio@sagperu.com si su informe ha sido adulterado.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorios: INACAL-DA (Sede Lima 1): Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima y **INACAL-DA (Sede Lima 2):** Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima.

• Central telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico: sagperu@sagperu.com

Página 1 de 2



**INFORME DE ENSAYO N° 1906682-2025
CON VALOR OFICIAL**

II. RESULTADOS:

Producto declarado		Sedimento
Matriz analizada		Sedimento Epicontinental
Fecha de muestreo		2025-04-14
Hora de inicio del muestreo (h)		10:56
Coordenadas UTM WGS 84		209647.3E 9008070.2N
Condiciones de la muestra		Preservada; Área: 0.09 m²
Código del Cliente		ART.AC.5
Código del Laboratorio		25041533
ENSAYO ACREDITADO ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 2)		
Taxa¹¹⁾		Ensayo Cuantitativo de Macroinvertebrados (Org./muestra)
PHYLUM ARTHROPODA: COLLEMBOLA		
PODUROMORPHA	Adulto	15
PHYLUM ARTHROPODA: DIPTERA		
Cricotopus sp.	Larva	1
Parochlus sp.	Larva	10
Parochlus sp.	Pupa	2

¹¹⁾ La identificación se realizará hasta el menor nivel taxonómico posible, dependiendo del estado de la muestra.

Nota 1: <1 es equivalente a cero, lo que indica la no detección de Organismos/muestra.

Lima, 07 de Mayo del 2025.

Este informe de ensayo al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego será eliminadas.

IMPORTANTE: • Este documento fue emitido con firma electrónica de valor legal en formato PDF. Debe solicitar su documento electrónico para verificar la autenticidad. Puedes comprobar la validez del mismo haciendo clic sobre la firma, saldrá un aviso: 'Validez de firma: firma válida', de no validarse el documento es falso. Notifique al correo: laboratorio@sagperu.com si su informe ha sido adulterado.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorios: INACAL-DA (Sede Lima 1): Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima y **INACAL-DA (Sede Lima 2):** Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima.

• Central telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico: sagperu@sagperu.com

ANEXO 9

RESULTADOS DE LABORATORIO DE

MUESTRAS DE SEDIMENTO



**INFORME DE ENSAYO
IE-2024-2914**

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : YOMIRA JAIMES ROJAS
1.2 RUC o DNI : 76330020
1.3 Dirección : PSJ. SANTA CATALINA S/N- BARRIO NUEVA ESPERANZA-
TACLLAN ALTO- HUARAZ - ÁNCASH.

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : SEDIMENTO
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2024-10-09
2.5 Periodo de Ensayo : 2024-10-09 al 2024-10-21
2.6 Fecha de Emisión : 2024-11-15
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : 2024-10-04 / 09:36 (c)
2.8 N° de cotización : COT-142270-SL24

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000 / AS 07 Contenido de materia orgánica. VALIDADO
Metales Totales (Calcio, Potasio, Magnesio)	EPA METHOD 3050B, Rev. 2, 1996 / EPA METHOD 200.7, Rev. 4.4, 1994. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Color	Tabla Munsell
Análisis Granulométrico	Análisis de tamaño de partícula por tamizado

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: ART.AC.1. (c)

E: 9007879.701 / N: 210964.944

Lugar de Muestreo: Glaciar Artesonraju

Proyecto: Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar
Artesonraju, cordillera Blanca, 2024.



DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS VARIADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-4834	Materia Orgánica	%	0.01	10.31
	Color	Sin Unidad	N.A.	HUE 5 GY 3/1 GRIS OLIVA OSCURO

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN METALES TOTALES

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-4834	Calcio, Ca	mg/Kg	3.33	683.80
	Potasio, K	mg/Kg	100.00	1858.14
	Magnesio, Mg	mg/Kg	6.67	4083.41

4.4. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANALISIS GRANULOMÉTRICO

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS

N° de Malla	Abertura, mm	Peso retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
20	0.850	5.64	4.70	4.70	95.30
50	0.300	19.32	16.10	20.80	79.20
70	0.212	16.56	13.80	34.60	65.40
100	0.150	21.24	17.70	52.30	47.70
140	0.106	3.90	3.25	55.55	44.45
200	0.075	17.64	14.70	70.25	29.75
Base		35.70	29.75	100.00	0.00

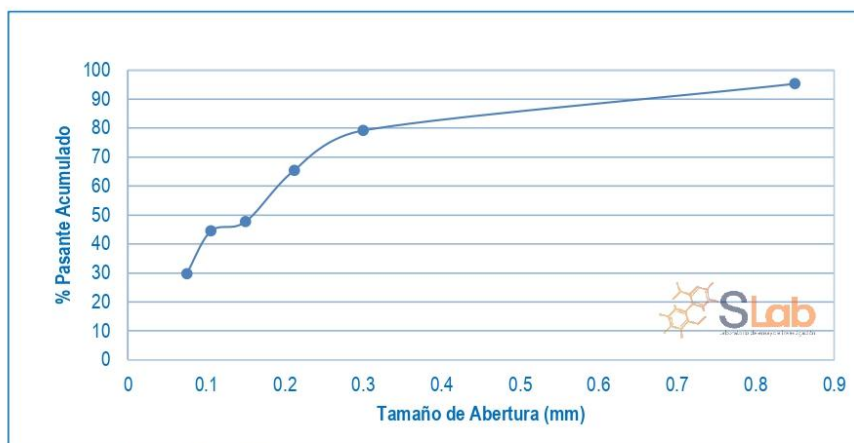


Figura N°1: GRÁFICO DE CURVA GRANULOMÉTRICA

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

N.A. No Aplica.

(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

FIN DE DOCUMENTO

**INFORME DE ENSAYO
IE-2024-2915**

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : YOMIRA JAIMES ROJAS
1.2 RUC o DNI : 76330020
1.3 Dirección : PSJ. SANTA CATALINA S/N- BARRIO NUEVA ESPERANZA-
TACLLAN ALTO- HUARAZ - ÁNCASH.

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : SEDIMENTO
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2024-10-09
2.5 Periodo de Ensayo : 2024-10-09 al 2024-10-21
2.6 Fecha de Emisión : 2024-11-15
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : 2024-10-04 / 10:07 (c)
2.8 N° de cotización : COT-142270-SL24

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000 / AS 07 Contenido de materia orgánica. VALIDADO
Metales Totales (Calcio, Potasio, Magnesio, Potasio)	EPA METHOD 3050B, Rev. 2, 1996 / EPA METHOD 200.7, Rev. 4.4, 1994. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Color	Tabla Munsell
Análisis Granulométrico	Análisis de tamaño de partícula por tamizado

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: ART.AC.2 (c)

E: 9007879.701 / N: 210605.11

Lugar de Muestreo: Glaciar Artesonraju

Proyecto: Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar
Artesonraju, cordillera Blanca, 2024.



DIEGO ROMANO MERCARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS VARIADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-4835	Materia Orgánica	%	0.01	2.76
	Color	Sin Unidad	N.A.	HUE 7.5 Y 3/2 NEGRO OLIVA

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN METALES TOTALES

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-4835	Calcio, Ca	mg/Kg	3.33	643.42
	Potasio, K	mg/Kg	100.00	1654.76
	Magnesio, Mg	mg/Kg	6.67	3690.96

4.4. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS

N° de Malla	Abertura, mm	Peso retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
20	0.850	7.47	6.23	6.23	93.78
50	0.300	13.11	10.93	17.15	82.85
70	0.212	12.36	10.30	27.45	72.55
100	0.150	8.64	7.20	34.65	65.35
140	0.106	10.89	9.08	43.73	56.28
200	0.075	31.98	26.65	70.38	29.63
Base		35.55	29.63	100.00	0.00

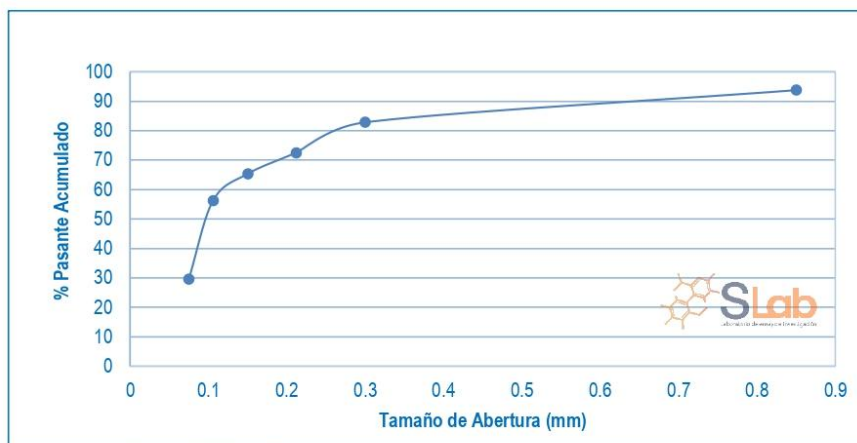


Figura N°1: GRÁFICO DE CURVA GRANULOMÉTRICA

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

N.A. No Aplica.

(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

FIN DE DOCUMENTO

**INFORME DE ENSAYO
IE-2024-2916**

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : YOMIRA JAIMES ROJAS
1.2 RUC o DNI : 76330020
1.3 Dirección : PSJ. SANTA CATALINA S/N- BARRIO NUEVA ESPERANZA-
TACLLAN ALTO- HUARAZ - ÁNCASH.

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : SEDIMENTO
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2024-10-09
2.5 Periodo de Ensayo : 2024-10-09 al 2024-10-21
2.6 Fecha de Emisión : 2024-11-15
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : 2024-10-04 / 10:43 (c)
2.8 N° de cotización : COT-142270-SL24

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000 / AS 07 Contenido de materia orgánica. VALIDADO
Metales Totales (Calcio, Potasio, Magnesio)	EPA METHOD 3050B, Rev. 2, 1996 / EPA METHOD 200.7, Rev. 4.4, 1994. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Color	Tabla Munsell
Análisis Granulométrico	Análisis de tamaño de partícula por tamizado

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: ART.AC.3 (c)

E: 9007884.993 / N: 210234.693

Lugar de Muestreo: Glaciar Artesonraju

Proyecto: Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los agujeros de crioconita del glaciar
Artesonraju, cordillera Blanca, 2024.



DIEGO ROMANO MERCARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS VARIADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-4836	Materia Orgánica	%	0.01	1.38
	Color	Sin Unidad	N.A.	HUE 7.5 Y 3/1 NEGRO OLIVA

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN METALES TOTALES

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-4836	Calcio, Ca	mg/Kg	3.33	772.67
	Potasio, K	mg/Kg	100.00	1835.52
	Magnesio, Mg	mg/Kg	6.67	4013.46

4.4. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANALISIS GRANULOMÉTRICO

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS

N° de Malla	Abertura, mm	Peso retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
20	0.850	13.80	11.50	11.50	88.50
50	0.300	20.52	17.10	28.60	71.40
70	0.212	12.16	10.13	38.73	61.27
100	0.150	5.60	4.67	43.40	56.60
140	0.106	9.72	8.10	51.50	48.50
200	0.075	24.84	20.70	72.20	27.80
Base		33.36	27.80	100.00	0.00

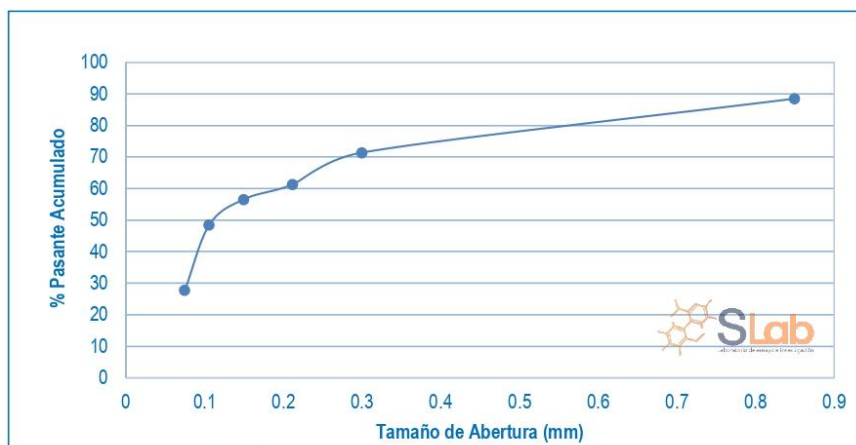


Figura N°1: GRÁFICO DE CURVA GRANULOMÉTRICA

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

N.A. No Aplica.

(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

FIN DE DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO

IE-2025-0627

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : JAIMES ROJAS YOMIRA TALIA
1.2 RUC o DNI : 76330020
1.3 Dirección : PSJ. SANTA CATALINA S/N - BARRIO NUEVA ESPERANZA -
TACLLAN ALTO - HUARAZ - ANCASH

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : SUELOS
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2025-02-17
2.5 Periodo de Ensayo : 2025-02-17 al 2025-02-24
2.6 Fecha de Emisión : 2025-03-01
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : 2025-02-12 / 10:45
2.8 N° de cotización : COT-142270-SL24

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Análisis Granulométrico	NTP 339.128: 1999. Revisada el 2014. Método de Ensayo para el Análisis Granulométrico
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000 / AS 07 Contenido de materia orgánica. VALIDADO
Metales Totales (Calcio, Potasio, Magnesio, Potasio)	EPA METHOD 3050B, Rev. 2, 1996 / EPA METHOD 200.7, Rev. 4.4, 1994. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Color	Tabla Munsell

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: ART.AC.4

COORDENADAS: N: 9007789.2 / E: 210060.9

LUGAR DE MUESTREO: GLACIAR ARTESONRAJU

PROYECTO: Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los
agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca, 2024. (c)



DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS VARIADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-0822	Materia Orgánica	%	0.01	8.86
	Color	Sin Unidad	N.A.	HUE 7.5Y / Oliva negro (2/2)

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-0822	Calcio, Ca	mg/Kg	3.33	948.48
	Potasio, K	mg/Kg	100.00	1912.94
	Magnesio, Mg	mg/Kg	6.67	3774.96

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS

N° de Malla	Abertura, mm	Peso retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
20	0.850	39.90	33.25	33.25	66.75
50	0.300	22.18	18.48	51.74	48.26
70	0.212	31.17	25.97	77.71	22.29
100	0.150	9.03	7.52	85.23	14.77
140	0.106	0.75	0.63	85.86	14.14
200	0.075	2.16	1.80	87.66	12.34
Base	-	14.81	12.34	100.00	0.00

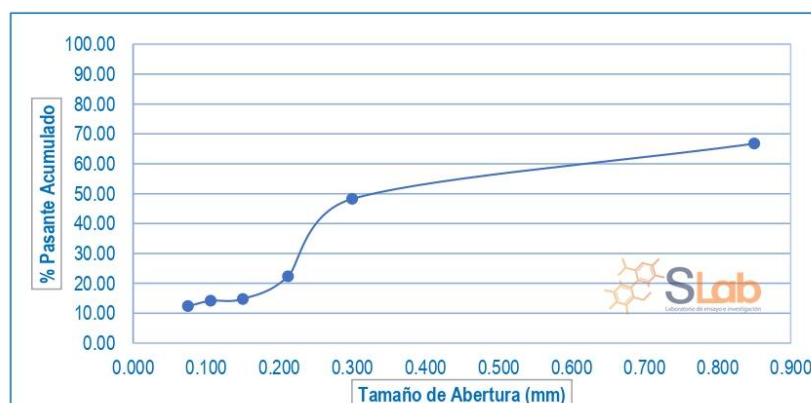


FIGURA N°1: GRÁFICO DE CURVA GRANULOMÉTRICA

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

N.A. No Aplica.

^(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.



INFORME DE ENSAYO

IE-2025-0628

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : JAIMES ROJAS YOMIRA TALIA
1.2 RUC o DNI : 76330020
1.3 Dirección : PSJ. SANTA CATALINA S/N - BARRIO NUEVA ESPERANZA -
TACLAN ALTO - HUARAZ – ANCASH

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : SUELOS AGRÍCOLAS
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2025-02-17
2.5 Periodo de Ensayo : 2025-02-17 al 2025-02-24
2.6 Fecha de Emisión : 2025-03-01
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : 2025-02-12 / 12:07
2.8 N° de cotización : COT-107150-SL25

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Análisis Granulométrico	NTP 339.128: 1999. Revisada el 2014. Método de Ensayo para el Análisis Granulométrico
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000 / AS 07 Contenido de materia orgánica. VALIDADO
Metales Totales (Calcio, Potasio, Magnesio)	EPA METHOD 3050B, Rev. 2, 1996 / EPA METHOD 200.7, Rev. 4.4, 1994. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solis Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Color	ASTM D1535-14 (2018). Práctica estándar para la especificación del color según el sistema Munsell

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: ART.AC.5

COORDENADAS: N: 9007993.4 / E: 210008

LUGAR DE MUESTREO: GLACIAR ARTESONRAJU

PROYECTO: Relación de la comunidad de macroinvertebrados y los
agujeros de crioconita del glaciar Artesonraju, cordillera Blanca, 2024. (c)



DIEGO ROMÁN VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS VARIADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-0823	Materia Orgánica	%	0.01	6.32
	Color	Sin Unidad	N.A.	HUE 2.5GY / Gris Oliva Oscuro (3/1)

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-0823	Calcio, Ca	mg/Kg	3.33	1229.08
	Potasio, K	mg/Kg	100.00	2074.70
	Magnesio, Mg	mg/Kg	6.67	4089.64

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS

N° de Malla	Abertura, mm	Peso retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
20	0.850	32.47	27.05	27.05	72.95
50	0.300	14.78	12.32	39.37	60.63
70	0.212	7.94	6.61	45.99	54.01
100	0.150	7.68	6.40	52.39	47.61
140	0.106	10.03	8.36	60.75	39.25
200	0.075	21.29	17.74	78.49	21.51
Base	-	25.81	21.51	100.00	0.00

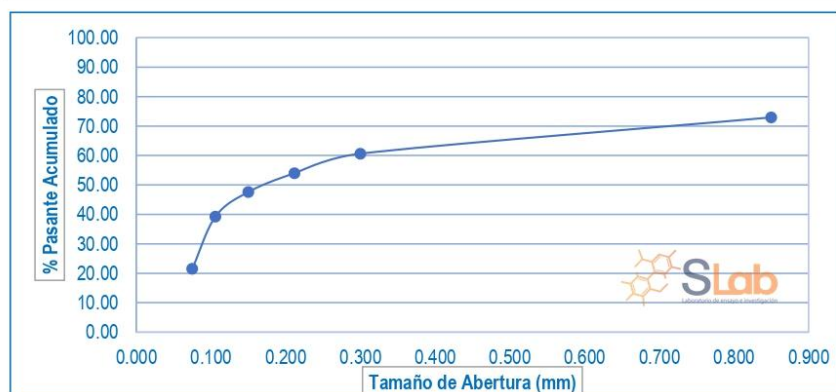


FIGURA N°1: GRÁFICO DE CURVA GRANULOMÉTRICA

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

N.A. No Aplica.

^(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.



ANEXO 10

**CÁLCULO DE LA MEDIA DEL TAMAÑO
GRANULAR**



Los parámetros granulométricos, como el tamaño medio, se obtienen a partir de la distribución granulométrica de la muestra mediante la aplicación de métodos de cálculo específicos. Los dos métodos más empleados son el método gráfico y el método de los momentos (Alcántara et al., 2001).

El tamaño medio de grano no solo clasifica la muestra dentro de una escala de tamaños, sino que también se relaciona con la energía cinética media a la que está sometido el ambiente sedimentario (Alcántara et al., 2001). La principal crítica al método gráfico radica en la utilización de solo unos percentiles, mientras que el método de los momentos se basa en toda la distribución granulométrica. No obstante, ambos métodos son igualmente válidos para determinar el tamaño medio de grano (Alcántara et al., 2001).

Para el cálculo del tamaño medio granular del sedimento se utilizó principalmente el método de momentos, realizándose una comparación con el método gráfico propuesto por Folk y Ward, utilizando las fórmulas encontradas en Alcántara et al. (2001). El procedimiento se desarrolló de la siguiente manera:

1. Datos requeridos

Se empleó la tabla de resultados del análisis granulométrico y la curva granulométrica de cada muestra, utilizando los porcentajes acumulados que pasaron por diferentes tamaños de malla durante el análisis de tamizado.

2. Cálculo del tamaño medio granular por el método de momentos

El tamaño medio granular por momentos se calculó como el promedio ponderado de ϕ (ϕ) según el peso retenido, aplicando la siguiente ecuación:

$$X_{\phi} = \frac{\sum f m_{\phi}}{100}$$

Donde:

f: porcentaje en peso de cada fracción de tamaño

m_{ϕ} : valor medio del rango de tamaños que cubre cada tamiz

3. Cálculo del tamaño medio granular por el método gráfico de Folk y Ward

El tamaño medio granular se determinó mediante la fórmula propuesta por Folk y Ward (1957):

$$\phi_{medio} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

4. Resultados y análisis

4.1. Datos granulométricos obtenidos

Los resultados del análisis granulométrico se presentaron de la siguiente manera:

Tabla 1

Resultados obtenidos del análisis granulométrico de la zona de muestreo 1 como ejemplo para los cálculos

N° de malla	Abertura, mm	Peso retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
20	0.850	5.64	4.70	4.70	95.30
50	0.300	19.32	16.10	20.80	79.20
70	0.212	16.56	13.80	34.60	65.40
100	0.150	21.24	17.70	52.30	47.70
140	0.106	3.90	3.25	55.55	44.45
200	0.075	17.64	14.70	70.25	29.75
Base		35.70	29.75	100.00	0.00

4.2. Consideraciones sobre la fracción base

Para abordar la apertura de la base en el análisis granulométrico, cuando la fracción más fina (<0.075 mm) no estaba subdividida, se constató que asumir como tamaño mínimo el límite superior de dicha fracción introduce un sesgo significativo. Por ello se asignó un valor representativo al tamaño medio de la fracción no medida en lugar de redistribuirla arbitrariamente, siguiendo la recomendación de asignar el material no analizado a una única fracción con un *mid-phi* apropiado (Swan et al., 1978, 1979).

Se evaluaron tres valores representativos para la fracción no subdividida (<0.075 mm). El primero fue 0.038 mm ($\approx 4.72 \phi$), que corresponde al punto medio geométrico del intervalo de limo medio en la clasificación de Wentworth, (1922). El segundo valor fue 0.001 mm ($1 \mu\text{m} \approx 10 \phi$), un valor extremo propuesto por Blott y Pye (2001) como representación práctica de las partículas que permanecen en la bandeja cuando su proporción es muy baja; se incluyó como extremo conservador para evaluar sensibilidad. El tercer valor fue 0.010 mm ($10 \mu\text{m}$), un caso intermedio seleccionado porque la fracción en bandeja excedió el 5 % y, dado que Blott y Pye (2001) recomiendan entonces métodos alternativos (sedimentación o granulometría láser) no disponibles en este estudio, se empleó 0.010 mm -diez veces el valor sugerido por Blott y Pye

(2001)- para valorar cómo cambia la estimación al usar un tamaño fino mayor al recomendado.

Se realizó un análisis de sensibilidad con estos tres valores para cuantificar la incertidumbre introducida por la apertura de la base.

4.3. Conversión de aberturas a la escala *Phi*

Las aberturas de malla (mm) se convirtieron a la escala *phi* (ϕ) mediante la siguiente fórmula:

$$\phi = -\log_2(\text{Abertura mm})$$

Tabla 2

Conversión del tamaño de la apertura a escala phi (ϕ)

Abertura (ϕ)	Retenido (%)
0.23	4.70
1.74	16.10
2.24	13.80
2.74	17.70
3.24	3.25
3.74	14.70
Base	29.75

a) Cálculos por el método de momentos

Se aplicó la fórmula:

$$X\phi = (4.70 \times 0.23 + 16.10 \times 1.74 + 13.8 \times 2.24 + 17.7 \times 2.74 + 3.25 \times 3.24 + 14.7 \times 3.74 + 29.75 \times \text{base}) / 100$$

Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 3

Cálculo de la media del tamaño granular con diferentes valores de base

Base (ϕ)	Tamaño Medio (ϕ)	Tamaño Medio (mm)
4.72 (0.038 mm)	3.14	0.113
9.97 (0.001 mm)	4.70	0.038
6.64 (0.010 mm)	3.72	0.076

b) Cálculos por el método de Folk y Ward (1957)

Se usan los datos obtenidos del gráfico del análisis granulométrico.

Tabla 4

Datos necesarios para el cálculo con el método de Folk y Ward

Abertura (mm)	Pasante Acumulado (%)
0.850	95.30
0.300	79.20
0.212	65.40
0.150	47.70
0.106	44.45
0.075	29.75
Base	0.00

i. Identificación de Intervalos para los percentiles:

Se identificaron los siguientes intervalos:

- $\phi 16$ (16%): El 16% está entre 0.075 mm (29.75%) y base (0.038, 0.001 y 0.010 mm, 0%)
- $\phi 50$ (50%): El 50% está entre 0.150 mm (47.70%) y 0,212 mm (65.40%)
- $\phi 84$ (84%): El 84% está entre 0.300 mm (79.20%) y 0.850 mm (95.30%)

ii. Interpolación lineal para cada percentil:

Se utilizó la siguiente fórmula para interpolar el tamaño correspondiente a cada percentil:

$$dx = d1 + \frac{P_0 - P_1}{P_2 - P_1} \times (d2 - d1)$$

Donde:

- $d1$ = tamaño menor (mm) con porcentaje acumulado menor () P_1
- $d2$ = tamaño mayor (mm) con porcentaje acumulado mayor () P_2
- P_0 = porcentaje deseado (16, 50, 84%)
- dx = tamaño interpolado en mm

Utilizando como ejemplo el valor base de 0.038 mm, se obtuvieron los siguientes resultados:

Para $\phi 16$ (entre 0.075 mm y base):

- $d1=0$ mm, $P_1=0.00\%$
- $d2=0.075$ mm, $P_2=29,75\%$
- $P_0=16\%$

$$d_{16} = 0.038 + \frac{16 - 0}{29.75 - 0} \times (0.075 - 0.038)$$

$$d_{16} = 0.038 + \frac{16}{29.75} \times 0.037 \approx 0.0579 \text{ mm}$$

Para ϕ_{50} (entre 0.150 y 0.212 mm):

- $d_1=0.150\text{mm}$, $P_1=47.70\%$
- $d_2=0.212\text{mm}$, $P_2=65.40\%$
- $P_0=50\%$

$$d_{16} = 0.150 + \frac{50 - 47.70}{65.40 - 47.70} \times (0.212 - 0.150)$$

$$d_{16} = 0.150 + \frac{2.3}{17.7} \times 0.062 \approx 0.1581 \text{ mm}$$

Para ϕ_{84} (entre 0.300 y 0.850mm):

- $d_1=0.300\text{mm}$, $P_1=79.20\%$
- $d_2=0.850\text{mm}$, $P_2=95.30\%$
- $P_0=84\%$

$$d_{16} = 0.300 + \frac{84 - 79.20}{95.30 - 79.20} \times (0.850 - 0.300)$$

$$d_{16} = 0.300 + \frac{4.8}{16.1} \times 0.550 \approx 0.4640 \text{ mm}$$

Convertidos a escala ϕ :

$$\phi = -\log_2(d)$$

- $\phi_{16} = -\log_2(0.0579) = 4.11$
- $\phi_{50} = -\log_2(0.1581) = 2.66$
- $\phi_{84} = -\log_2(0.464) = 1.11$

El tamaño medio calculado se obtuvo como:

$$\phi_{medio} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

$$\phi_{medio} = \frac{4.11 + 2.66 + 1.11}{3} = 2.63$$

Lo que en milímetros es:

$$d_{medio} = 2^{-\phi} = 2^{-2.63} = 0.162$$

4.4. Resultados comparativos por zonas de muestreo



Se calcularon los datos para las zonas 1, 2 y 3 con ambos métodos. Para las zonas 4 y 5 no fue posible determinar los valores mediante el método de Folk y Ward debido a que el percentil 84% no pudo obtenerse gráficamente con los datos disponibles del análisis granulométrico.

Tabla 5

Resumen de cálculos por el método de momentos y Folk y Ward

Zona de muestreo	Base	Momentos (mm)	Folk y Ward (mm)	Diferencia (mm)
1	4.72 (0.038 mm)	0.113	0.162	0.049
	9.97 (0.001 mm)	0.038	0.144	0.106
	6.64 (0.010 mm)	0.076	0.149	0.073
2	4.72 (0.038 mm)	0.100	0.127	0.027
	9.97 (0.001 mm)	0.034	0.113	0.079
	6.64 (0.010 mm)	0.067	0.117	0.050
3	4.72 (0.038 mm)	0.123	0.168	0.045
	9.97 (0.001 mm)	0.045	0.152	0.107
	6.64 (0.010 mm)	0.085	0.156	0.071
4	4.72 (0.038 mm)	0.274		
	9.97 (0.001 mm)	0.176		
	6.64 (0.010 mm)	0.234		
5	4.72 (0.038 mm)	0.171		
	9.97 (0.001 mm)	0.078		
	6.64 (0.010 mm)	0.128		

Se seleccionaron los datos obtenidos mediante el método de momentos utilizando como valor base 0.038 mm, debido a que las diferencias observadas con respecto a los valores del método de Folk y Ward fueron menores en comparación con los otros valores base analizados.

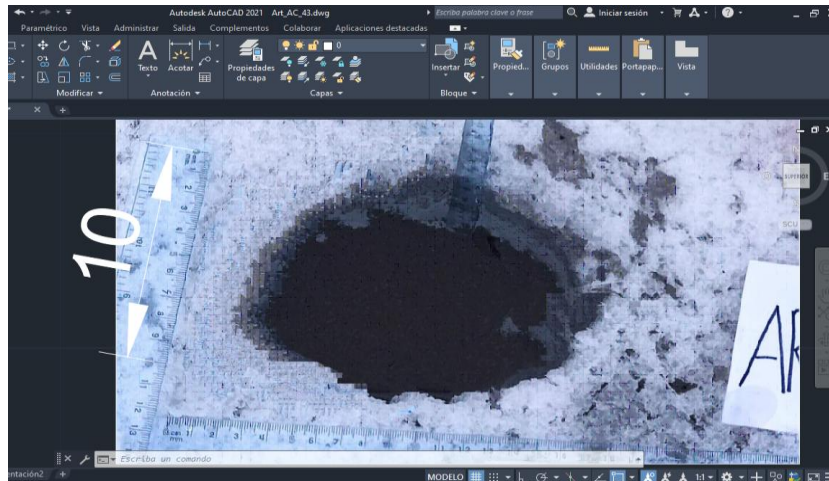
ANEXO 11

CÁLCULO DE ÁREAS POR EL MÉTODO

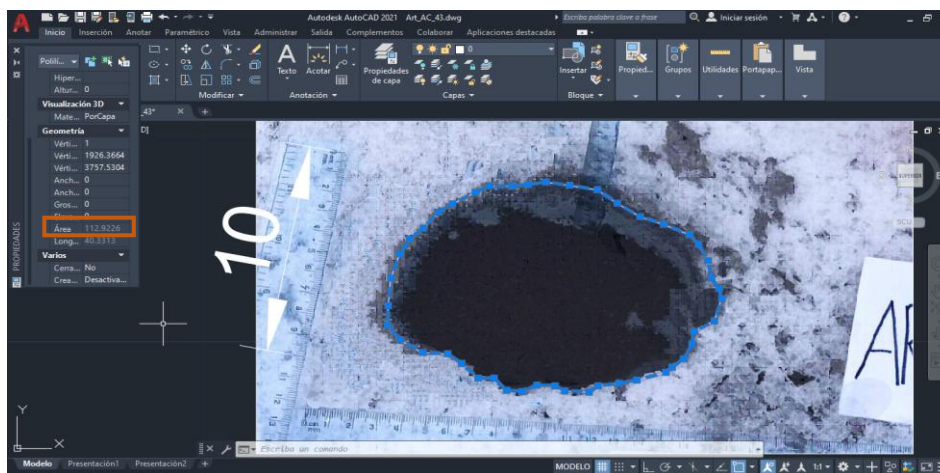
AUTOCAD



El cálculo de las áreas en el software AutoCAD, se realizó como se detalla a continuación: en primer lugar, se procedió a escalar cada imagen utilizando como referencia la regla (en cm) visible en la fotografía. Para ello, se midió un segmento de longitud conocida (p. ej., 10 cm) sobre la regla usando la herramienta Acotado y se ajustó la escala de la imagen para que la medida digital coincidiera con la real.



Una vez escalada la imagen, se delimitó el contorno de cada agujero de crioconita mediante la herramienta Polilínea. Al cerrar el polígono, se consultó su panel de propiedades, del cual se extrajo el valor del campo AREA. Este valor correspondió al área superficial del agujero.



Dicho procedimiento se repitió sistemáticamente para todos los agujeros analizados.

