

**CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN  
COTOPAXI**

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**



Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN  
COTOPAXI”**

Realizado por:

**SARA ELENA LÓPEZ RIVERA**

Directora del proyecto:

**Susana Elizabeth Chamorro Arias, MSc**

Como requisito para la obtención del título  
de:

**MASTER EN GESTIÓN AMBIENTAL**

Quito, 12 de octubre de 2022

**CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN  
COTOPAXI**

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

## DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, SARA ELENA LÓPEZ RIVERA, con cédula de identidad # 0705134849, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



FIRMA  
0705134849

**CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN  
COTOPAXI**

**DECLARATORIA**

El presente trabajo de investigación titulado:

**“CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI”**

Realizado por:

**SARA ELENA LÓPEZ RIVERA**

como Requisito para la Obtención del Título de:

**MÁSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL**

ha sido dirigido por la profesora

**SUSANA ELIZABETH CHAMORRO ARIAS**

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



**FIRMA**

# **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

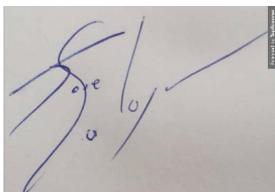
## **LOS PROFESORES INFORMANTES**

Los Profesores Informantes:

**JOSÉ GABRIEL SALAZAR LOOR**

**JUAN CARLOS NAVARRO CASTRO**

Después de revisar el trabajo presentado,  
lo han calificado como apto para su defensa oral  
ante el tribunal examinador



**FIRMA**



**FIRMA**

Quito, 12 de octubre de 2022

# **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

## **DEDICATORIA**

A las investigadoras ecuatorianas que, día a día se esfuerzan por demostrar la importancia del estudio de las Ciencias Ambientales, los avances tecnológicos que, buscan alternativas para apaciguar los impactos y el mejoramiento continuo de la relación ser humano - naturaleza; elementos claves para enfrentar los desafíos que actualmente atraviesan las regiones biodiversas como el Ecuador.

Dedicada a las científicas y académicas que abarcan simultáneamente varias actividades, incluyendo el cuidado de sus familias y los seres vivos de toda índole que conviven con nosotros.

# **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi Tutora Susana Chamorro por la paciencia, guía y apoyo brindado en el campo académico, profesional y humano.

A Jesús López, Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, por depositar su confianza y apoyo en el proyecto.

A todos los colaboradores que contribuyeron a la realización del mismo

**CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN  
COTOPAXI**

0x/0x/20xx 23:25:33

Para someter a:  
To be submitted:

**Caracterización Ecológica de Diatomeas en crioconitas del Glaciar Norte del  
Volcán Cotopaxi.**

Sara López Rivera<sup>1</sup>, Susana Chamorro<sup>1</sup>, José Salazar<sup>1</sup>, Juan  
Carlos Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Internacional SEK, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito,  
Ecuador.

\*AUTOR DE CORRESPONDENCIA: Msc. Susana Chamorro Arias, Universidad  
Internacional SEK, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador.

Teléfono: +593990035913-; email: [susana.chamorro@uisek.edu.ec](mailto:susana.chamorro@uisek.edu.ec)

Título corto o Running title: Volcán Cotopaxi, Ecología y Diatomeas

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

## *Resumen*

El presente estudio tiene como finalidad caracterizar la comunidad de diatomeas pertenecientes al glaciar del Volcán Cotopaxi (Cotopaxi, Ecuador), y estudiar la influencia de las variables medioambientales sobre estas. Se tomaron 35 muestras líquidas de crioconitas ubicadas en la zona de ablación y se midieron las variables abióticas en cada punto, a través de métodos de campo. Por otro lado, la caracterización taxonómica fue realizada mediante la aplicación de métodos estándar. Los análisis multivariantes llevados a cabo identificaron que, la abundancia poblacional responde en mayor grado a las variables morfométricas que las fisicoquímicas, demostrando así que, los grupos de diatomeas identificados en el Volcán Cotopaxi, tienen una estructura de comunidad. El Modelo de Regresión Múltiple por GLM reveló que, la diversidad de diatomeas está fundamentalmente influenciada por la elevación y la radiación solar al interior de la crioconita. El desarrollo del análisis CCA determinó que, existen especies de diatomeas distribuidas en función de variables fisicoquímicas y morfométricas independientemente. Finalmente, este estudio demuestra la presencia de una importante comunidad de diatomeas en glaciares poco estudiados como los pertenecientes a los Andes Ecuatorianos.

*Palabras claves: elevación, radiación solar, multivariantes, morfométricas*

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

## *Abstract*

This study aims to characterize the diatoms community in Cotopaxi Volcano (Cotopaxi, Ecuador) and analyze the influence of environmental factors on these. Samples of 35 cryoconite were collected in the ablation zone, and included the measurement of abiotic variables on field. The taxonomic characterization was assembled by standard methods. Multivariate analysis, identified that given both, morphometry and physicochemistry factors, have an influence over diatoms flora, thus proving that the diatom assemblages collected may constitute from a dominant source. The Multiple Regression Model by GLM, revealed that diatoms diversity is strongly related by elevation and solar radiation inside the cryoconite. The CCA analysis demonstrated the diatoms species distribution in order to morphometry and physicochemistry factors independently. Overall, this investigation highlight an important presence of diatoms community in glaciers less studied like those belonging to the Ecuadorian Andes.

***Key words:*** *elevation, solar radiation, multivariate, morphometry*

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

## Introducción

Las recientes investigaciones han demostrado que, los glaciares son grandes biomas compuestos por microorganismos extremófilos como: bacterias, hongos, microalgas, parásitos y algunas plantas especializadas. Las zonas supraglaciares como los englaciares albergan una microfauna ampliamente diversa y en muchos casos inexplorada por la comunidad científica. Krzysztof & otros (2018) mencionan que, los invertebrados tienden a habitar en la corteza erosionada y agujeros de crioconitas ubicadas en la superficie helada.

Hodson & otros (2008), determinaron que, en los glaciares, se desarrollan dos ecosistemas; uno que habita en la superficie del glaciar (supraglacial) y el otro en la interfaz del lecho del hielo (subglacial). El primero se caracteriza por estar compuesto por un consorcio de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos de varios tipos (hongos, bacterias, diatomeas, entre otros), los cuales habitan y se desarrollan en charcos de fusión conocidos como crioconitas.

García-López (2019), demostró que, existe una gran biodiversidad de comunidades microbianas en siete glaciares del archipiélago de Svalbard; las comunidades microbianas identificadas en los glaciares, corresponden principalmente a *Proteobacteria* (48,8%), *Bacteroidetes* ( 29,1%) y *Cyanobacteria*( 16,3%) (García, Rodríguez, Alcazar, & Cid, 2019). Varios estudios realizados al respecto han demostrado que, la abundancia de comunidades microbianas en general dependerá de propiedades físicas y químicas de las superficies de los glaciares (Edwards, 2020).

García & otros (2019) mencionan la presencia de un índice alto en lo que respecta a cianobacterias y microalgas en la zona del glaciar de Svalbard. Mientras que, Stibal, Sabacká

## **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

& Kastovska (2006), identificaron mayor presencia de bacterias, cianobacterias y algas en crioconitas de varios glaciares de Svalbard (Stibal , Sabacká, & Katovska, 2006). Al interior de los agujeros de crioconitas, el grupo con una mayor abundancia identificada estadísticamente: fueron los tardígrados y rotíferos, cuya presencia puede deberse a procesos tróficos que se desarrollan al interior de las crioconitas en conjunto con la presencia de otras formas de vida (Zawierucha, Kolicka, Takeuchi , & Kaczmarek, 2014). Sin embargo, también se ha podido determinar la presencia de colémbolos, copépodos, gusanos de hielo y ácaros (Krzysztof , Jakub, Karel, Daniel, & Nozomu, 2018).

Los agujeros de crioconitas son pequeños depósitos llenos de agua que no tienen una forma definida de varios tamaños y se encuentran ubicados en la superficie de los glaciares de regiones polares tales como la Antártida, Antártica, Patagonia, Los Alpes, Himalaya y los Andes (Garcia, Rodriguez, Alcazar, & Cid, 2019). Pueden estar cubiertas de hielo o abiertas temporalmente en periodos donde las temperaturas aumentan y el clima en general se torna más cálido (Rusanov & Stanislavskaya, 2012). Se ha identificado que, las crioconitas tienden a fusionarse en charcos y cuencas hídricas, lo que sugiere que, estas cambian drásticamente en función de las condiciones climáticas, aumentando o disminuyendo el tamaño de las crioconitas (Takeuchi, & otros, 2018).

La constitución interna de una crioconita se constituye de material orgánico e inorgánico proveniente de diversa procedencia (Edwards, 2020). El material inorgánico presente en las crioconitas se encuentra dominado por fragmentos de minerales de filosilicato, tectosilicato, cuarzos, entre otros (Cook, Edwards, & Takeuchi, 2016). Sin embargo, el origen geológico donde se asienta la crioconita, causa una variación en la mineralogía de la misma (Bullard, Baddock, Bradwell, & Crusius, 2016). Bullard (2012) menciona que, el material inorgánico de crioconitas pertenecientes al Ártico de Canadá, Antártida Central y zonas marginales del

## **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

sudoeste de Groenlandia, se caracterizan por una mineralogía característica de fuentes locales y distantes. Stibal & otros (2012) identificaron la existencia de material fino suspendido que, se transporta desde fuentes distantes (laderas de valles y morrenas) a superficies grandes de hielo por ráfagas de viento, mientras que, en glaciares más pequeños, la mineralogía se deriva de fuentes locales o más cercanas al glaciar.

Respecto al material orgánico característico de la crioconita, se menciona la presencia de microorganismos endémicos, autóctonos y alóctonos (Cook, Edwards, & Takeuchi, 2016). El término endémico se atribuye a una especie que pertenece a una región muy delimitada, mientras que especies autóctonas son aquellas que pertenecen a una zona pero no de forma exclusiva (Sanchez, 2022). Finalmente, los microorganismos alóctonos son aquellos que no pertenecen al lugar donde fueron identificados (Sanchez, 2022). Además de los microorganismos ya mencionados, es importante indicar que el nivel de antropogénesis cercano a los glaciares, ejerce una influencia mutagénica importante sobre los microorganismos (Bullard, Baddock, Bradwell, & Crusius, 2016). Hodson (2014) determinó que, los contaminantes orgánicos persistentes se pueden incorporar a la crioconita y, al ser estas moléculas resistentes a la degradación ambiental, se produce una bioacumulación que influye en la población de microorganismos. A su vez, los arrastres de estos contaminantes afectan a los ecosistemas río abajo. Otros contaminantes identificados al interior de crioconitas se relacionan con las emisiones provenientes de industrias, medios de transporte, entre otros (Bullard, Baddock, Bradwell, & Crusius, 2016).

Mueller & otros (2001) demostraron que, los agujeros de crioconitas suelen parecer únicamente reservorios de agua a simple vista, sin embargo, investigaciones más exhaustivas han determinado que, las crioconitas se constituyen como ecosistemas que alberga diversas formas de invertebrados (Mueller, Vincent, Pollard, & Fristen, 2001). Por lo tanto, son consideradas

## **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

como microecosistemas extremos con redes tróficas simples y estables que, involucran obligatoriamente la participación de microorganismos como bacterias, hongos, ciliadas o algas (productores primarios) (Zawierucha, Kolicka, Takeuchi , & Kaczmarek, 2014). Hodson & et al (2018), señala que actualmente existe evidencia reveladora sobre el rol de los microorganismos sobre la dinámica, composición y abundancia de nutrientes en glaciares; las reacciones químicas llevadas a cabo por microorganismos tienen un impacto significativo.

Zawierucha & otros (2022), señalan que, la mayoría de microorganismos que habitan en las crioconitas, se encuentran altamente adaptados a condiciones climáticas extremas tales como: bajas temperaturas, variación de nutrientes y altos niveles de radiación UV (Bae, & otros, 2021). Sin embargo, la permanencia de estos hábitats y la continua actividad metabólica interna, son considerablemente vulnerables a los ciclos frecuentes de derretimiento y congelación.

Resulta un campo bastante amplio, el estudio de las comunidades microbianas presentes en crioconitas; por lo que, es importante delimitar el estudio a comunidades específicas, que, para el caso de la presente investigación, serán las comunidades diatomeícas. La cantidad de información acerca de diatomeas en glaciares es aún incipiente y más aún cuando se hace referencia a las regiones andinas de Sudamérica.

Las diatomeas son microorganismos que poseen una pared celular o frústula compuesta por sílice y un esqueleto de cristal, la estructura de la frústula es la base de la clasificación de las diatomeas, dividiéndose así en dos grandes grupos: céntricas (válva radial) y pennadas (valva bilateral). Round & otros (1990), establece que, la clase *Coscinodiscophyceae* incluye las diatomeas céntricas, mientras que, las clases *Fragilariophyceae* y *Bacillariophyceae* incluye las pennadas (Lozano Duque, Vidal, & Navas, 2010).

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Las diferentes especies de diatomeas varían en función de las características físico químicas del entorno donde se desarrollan (Yong Ha, In Young, Hye - Won, Choi, & Shin, 2019). Lotter & Bigler (2000), indican que la profundidad del agua, la disponibilidad de luz y nutrientes son factores relevantes que influyen en el crecimiento de diatomeas. Es así que, la flora diatomológica difiere entre ecosistemas marinos, dulceacuícolas u otros (Edwards, 2020).

Las diatomeas pueden ser de carácter planctónicas (móviles) y bentónicas; las primeras permanecen suspendidas en la columna de agua, y las segundas se adhieren a un sustrato como por ejemplo una roca. (Stibal, Sabacká, & Katovska, 2006). Yong Ha & otros (2019), identificaron una abundante floración de diatomeas bentónicas, que forman parte de una cadena trófica única y altamente eficiente en la zona Fjord del Antártico; se demostró que, las diatomeas son productores primarios y la principal dieta de varias especies megabentonicas. Las diatomeas bentónicas son de suma importancia para sustentar la red alimentaria en las zonas de los glaciares cercanas a la costa (Yong Ha, In Young, Hye - Won, Choi, & Shin, 2019). Hamilton & Havig (2016), hallaron comunidades de diatomeas que secuestran activamente Fe, Mn y P de las rocas locales de los glaciares, con ayuda de la luz proveniente de la nieve.

El estudio de poblaciones diatomológicas, abre las puertas a un posible estudio posterior sobre el uso de las mismas como bioindicadores para predecir las variaciones climáticas que impactan a los ecosistemas. Yong Ha & otros (2019), demostraron que, poblaciones de la especie *Paralia sp.*, pueden desarrollarse en sitios con temperaturas mayores a la detectadas en crioconitas de glaciares ubicados en la Antártica (Yong Ha, In Young, Hye - Won, Choi, & Shin, 2019). Así mismo, Bae & otros (2021), estudiaron los cambios estructurales de la comunidad diatomológica bentónica en diferentes estaciones del Marian Cove en la Antártida; un glaciar que actualmente afronta incrementos de temperatura severos como respuesta al calentamiento

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

global. En este estudio se evidenció que, especies como *Fragilaria striatula* y *Paralia sp.*, se distribuyen ampliamente durante las variaciones climáticas (Bae & otros, 2021). La microfauna de las crioconitas en zonas de glaciares se caracterizan por especies de diatomeas bentónicas, la cual, además, puede variar en respuesta al derretimiento del hielo (Bae & otros, 2021).

La mayoría de los estudios de diatomeas se han enfocado en las regiones del Ártico, Antártida, los Alpes; adicionalmente se han hecho aproximaciones en las regiones polares de Sudamérica, donde se han identificado diatomeas en glaciares de Sajama, Quelccaya y Coropuna (Edwards, 2020). Fritz & et al (2014), identificaron la presencia de diatomeas en sitios cercanos a la cumbre (>5000 msnm) del Quelccaya en Perú, glaciar que forma parte del circuito volcánico de los Andes. Se identificó principalmente del género *Hantzschia*, *Pinnularia* y *Aulacoseira* (Fritz , Brinson, Billups, & Thompson, 2014). Respecto a la zona de los glaciares de los Andes Ecuatorianos, la disponibilidad de información sobre comunidades diatomológicas es escasa, en comparación a la información disponible en las regiones del Ártico, Antártida, los Alpes (Krzysztof , Jakub, Karel, Daniel, & Nozomu, 2018). Glaciares como el Antisana, Cayambe, los Ilinizas, Cotopaxi, Chimborazo, El Altar y Carihuairazo, se constituyen como las siete coberturas glaciares más importantes, predominantes y únicas, del Ecuador (Zambrano, 2021). Los Andes ecuatorianos han sido categorizados como ecosistemas muy sensibles a la variación climática (Vuille & otros, 2018). Durante los últimos años se ha evidenciado un acelerado retroceso de los glaciares ecuatorianos, y se ha concluido que este efecto se da principalmente por el cambio climático; actualmente a causa de la alta radiación solar durante todo el año, el derretimiento de la nieve puede efectuarse en cuestión de días (Hodson & otros, 2008).

El volcán Antisana es un volcán extinto ubicado entre las provincias de Pichincha y Napo, y que además forma parte de la red de los Andes Ecuatoriano, fue uno de los primeros glaciares

## **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

estudiados y los resultados demostraron la presencia de poblaciones de diatomeas cuantificablemente representativas, además de nuevas especies, (Chamorro & otros, 2021).

El presente estudio se centra en el glaciar norte del Volcán Cotopaxi de los Andes Ecuatorianos y pretende caracterizar ecológicamente las poblaciones de diatomeas a diferentes gradientes altitudinales y medir las variables abióticas que influyen sobre estas. Por otro lado, se determinará la influencia de las variables abióticas sobre las abundancias poblacionales, a fin de identificar si se tratan de organismos propios del glaciar y no procedentes de otras regiones. Finalmente se requiere distinguir qué factor influye en mayor medida sobre la riqueza, diversidad y abundancia total de la población de diatomeas identificadas.

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

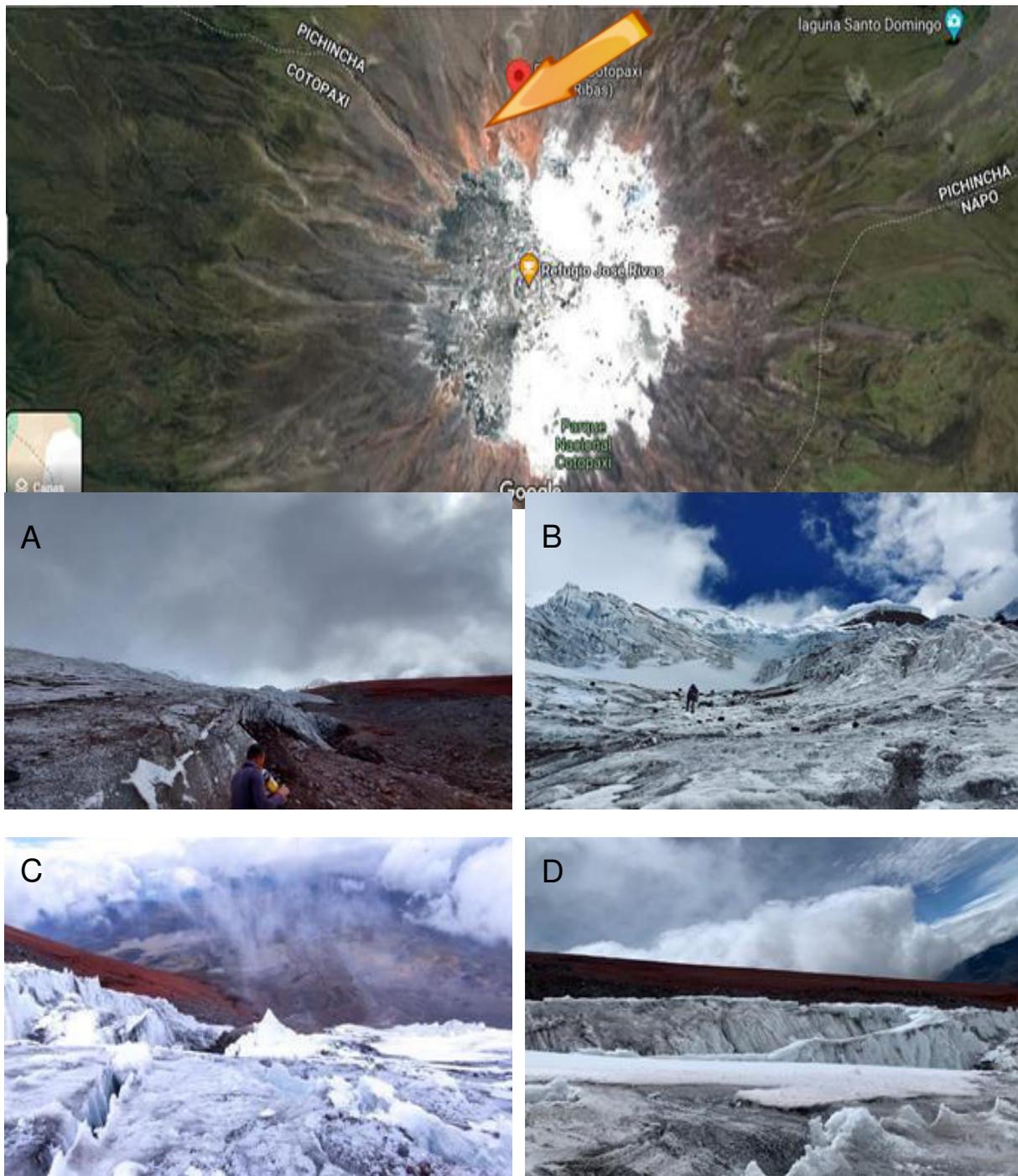
El Cotopaxi es un estratovolcán activo bastante documentado (5897 m; 78°26'W, 0°41'S, figura 1) que, forma parte de la Cordillera Oriental de los Andes y se encuentra ubicado a 50 km del Norte de la provincia de Pichincha, al Sur de la provincia de Tungurahua y Bolívar y al Occidente con la provincia de Los Ríos y al Oriente con Napo (Cáceres, 2015). Estas dos últimas provincias se caracterizan por sus climas tropicales y por índices altos de biodiversidad. El casquete polar del volcán Cotopaxi, comprende un área de 11, 56 km<sup>2</sup>, mientras que la base del volcán tiene un diámetro de 22 km, con un cono simétrico cuyas pendientes varían entre los 35 ° a 40° (Espin, Sierra, Mothes, Hidalgo & Telenchana, 2017). Las quebradas ubicadas en los flancos propios del volcán alimentan a tres importantes sistemas fluviales: Cutuchi, Tambo y Pita (Espin, Sierra, Mothes, Hidalgo & Telenchana, 2017). La zona baja se caracteriza por formaciones vegetales de tipo bosque húmedo de montaña, el páramo pluvial sub-andino, tundra pluvial andina, y el piso nival (Sklenár, Kovár, Palice, & Stancík, 2010), además de estar rodeada por otros volcanes tales como: Sincholagua (4873 msnm), Quilindaña (4876 msnm) y Rumiñahui (4722 msnm) (Espin, Sierra, Mothes, Hidalgo & Telenchana, 2017). El Volcán Cotopaxi, forma parte del área protegida Parque Nacional Cotopaxi, y ha sido catalogado como un importante reservorio de agua dulce que alimenta a las principales ciudades cercanas al sitio. Así mismo, varios estudios han demostrado que, el volcán Cotopaxi, cuenta con ecosistemas únicos propios de los Andes, los cuales se ven altamente influenciados por la variación climática característica; los reportes meteorológicos, demuestran una oscilación de temperatura equivalente a 8,5°C y una precipitación característica de 1140 msnm aproximadamente (Cáceres, 2015). La estación meteorológica, cercana al casquete polar (sitio

## **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

de muestreo para el presente trabajo) estima temperaturas que, oscilan bajo los 0° y una precipitación pluvial de 982 msnm (Sklenár, Kovár, Palice, & Stancík, 2010).

El Cotopaxi es considerado como uno de los volcanes más peligrosos del mundo; tanto por sus características vulcanológicas, como por su proximidad a zonas pobladas (Latacunga y Valle de los Chillos). Las erupciones registradas en el volcán Cotopaxi, han influenciado sin duda en la desglaciación de su zona polar (Cáceres, 2015). Durante los últimos 50 años, se ha presenciado una reducción de la cobertura glaciaria con un porcentaje correspondiente al 54% y un área equivalente de 21,8 km<sup>2</sup> (Hall & Mothes, 2007). La última erupción registrada entre el 2015 – 2016, estuvo caracterizada por una caída de ceniza volcánica significativa sobre el 50% del área total del glaciar, provocando a su vez la disminución del mismo (Hall & Mothes, 2007). Así mismo, las variaciones climatológicas, producto de los efectos del cambio climático, acentúan aún más la problemática de la reducción del glaciar. Se registró un incremento de temperatura en las zonas cercanas al glaciar del volcán Cotopaxi de aproximadamente 2°C. El promedio anual de temperatura fue de 5°C, durante la ejecución del presente estudio. Respecto a la precipitación, es importante considerar que, varió notablemente en el sitio de muestreo. Sin embargo, los datos obtenidos a través del INAHMII (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), indican un periodo más seco entre agosto-noviembre.

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI



**Figura 1:** Sitio de estudio en la zona NE del glaciar en el volcán Cotopaxi, indicado con una flecha. Los puntos A, B, C y D corresponden al área muestreada en diferentes fechas.

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMIAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

## Fase de muestreo

Se realizó un premuestreo para la identificación de crioconitas en la zona del glaciar, que incluyó un análisis visual de la estructura de las mismas; hoyos de diferentes tamaños conformados por sedimento, columna de agua y hielo.

La recolección de muestras se llevó a cabo entre mayo de 2021 y enero de 2022. En principio, se establecieron varios transectos sobre el glaciar de la zona Noreste del volcán Cotopaxi, estos transectos o zonas de muestreo fueron delimitados por la presencia de crioconitas a diferentes pisos altitudinales; variando desde 4902 msnm hasta los 5097 msnm.

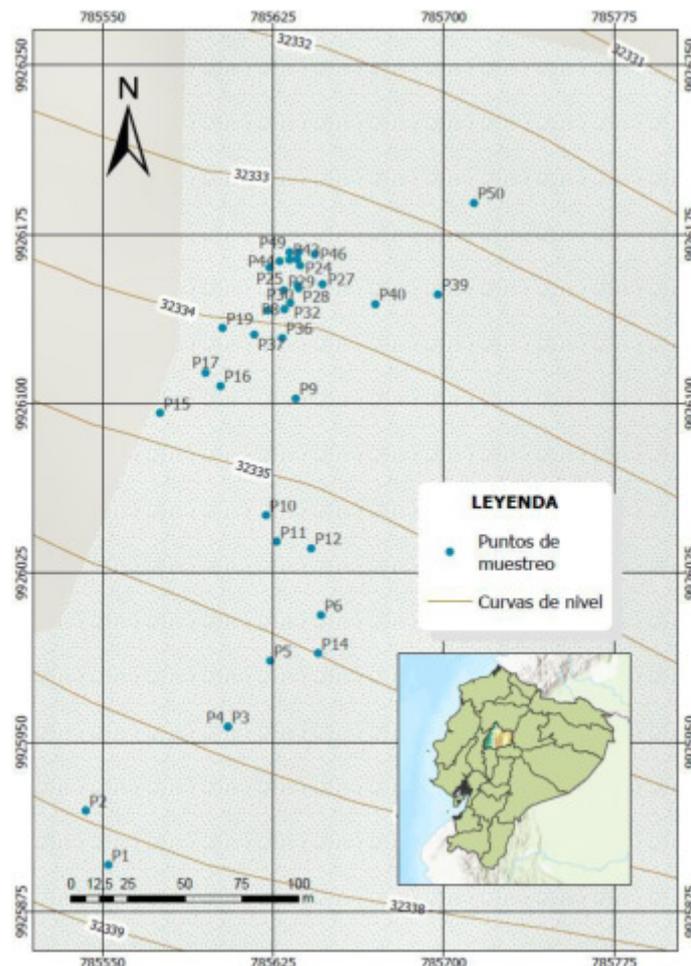


Gráfico 1: Mapa de las crioconitas muestreadas sobre el glaciar del volcán Cotopaxi, desarrollado a través del

Software ARCGIS.

## **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

Un total de (N= 35) muestras de crioconitas fueron recolectadas en la zona de ablación del volcán Cotopaxi. Sin embargo, considerando que, el volcán Cotopaxi presenta grados considerables de pendiente y su glaciar se encuentra en un constante proceso de derretimiento, se tomaron adicionalmente (N=5) muestras de las escorrentías cercanas al glaciar o zona de ablación (Figura: 2).

Para la recolección de las muestras en las crioconitas, se siguió la metodología planteada por Chamorro & otros (2021) que, consistió en romper la capa superficial de la crioconita congelada con la ayuda de un piolet. Esta fase no fue realizada para la ejecución del muestreo en escorrentías cercanas al glaciar. Sin embargo, las secciones de sedimento y columna de agua presentes en los 50 puntos de muestreo (crioconitas y escorrentías), fueron sometidas a un proceso de homogenización, debido a que, las poblaciones de diatomeas y otros microorganismos bentónicos, se encuentran adheridos a los sedimentos ubicados en el fondo de los puntos de monitoreo (Liu, & otros, 2022). Para este fin, se empleó una jeringa de 50 ml y se almacenó el contenido extraído en recipientes con un volumen de 100 ml.

Para evitar el crecimiento celular (especialmente diatomeas) se usó el preservante transeau (agua desionizada, etanol y formalina, en una proporción correspondiente al 6:3:1). Se colocaron las muestras en un cooler a una temperatura inferior a los  $-4^{\circ}\text{C}$  en oscuridad y transportadas al Laboratorio de Limnología de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas en la Universidad Internacional SEK (UISEK).

Las variables morfométricas y físico químicas, fueron evaluadas en cada una de los puntos muestreados. En crioconitas, se midió el largo, ancho y profundidad, para obtener el volumen de cada una. Por otro lado, para las muestras de escorrentías se procedió a medir el largo, ancho

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

y profundidad de los sitios de acumulación de escorrentía (sitio donde se tomó la muestra de sedimento y agua).



**Figura 2:** (A) Sitio de acumulación de escorrentías. (B) Fotografía de una criconita sobre la zona de ablación.

Las variables fisicoquímicas (*temperatura, Ph, conductividad, alcalinidad, dureza, concentración de oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, clorina*) de las 50 muestras, fueron medidas en campo con ayuda del equipo *HANNA multiparametric probe* (Hanna Instruments Czech s.r.o, Czech Republic), también se utilizó el kit Tetra Easy Strips. En lo que respecta a la medición de sólidos disueltos totales se empleó el equipo TDS&EC de Pannellent. Finalmente, se midió la radiación durante la toma de muestras fuera y dentro de la criconita y/o zona de acumulación de escorrentía con el equipo UV A/B Light Meter part N° 850009C.

Los datos de coordenadas, altura, fecha y hora de cada uno de los puntos, fueron obtenidos mediante el *GPS Locusmap*. Posteriormente, se procedió a extrapolar los datos tomados con el GPS, sobre una imagen satelital de la zona muestreada del glaciar del Volcán Cotopaxi en tiempo real con ayuda del software *Google Earth*. De esta manera, se pudo evidenciar el recorrido y cada uno de los puntos de muestreo. Mediante el software *ARGIS*, se ubicaron los puntos referentes con todas las variables mencionadas para obtener un mapa a escala real.

La preparación de las muestras para los análisis microscópicos respectivos, inicialmente, incluyeron un proceso de filtrado con una malla cuyo diámetro es de 0.5 mm, para facilitar la separación de la mayor cantidad de sedimentos de tamaño grueso. Posteriormente, las muestras

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

fueron sometidas a ebullición bajo una temperatura de 90°C en una mezcla compuesta por 30% de peróxido de hidrógeno y 37% de ácido clorhídrico. Las 50 muestras permanecieron por 24 horas bajo este procedimiento para asegurar la eliminación de la mayor cantidad de sólidos pequeños.

La preparación de las placas para observación mediante microscopía electrónica, fueron realizadas con la aplicación de procedimientos basados en estándares europeos y con varias propuestas de mejora por autores como Blanco & otros (2008). Se identificaron alrededor de 998 individuos con el microscopio *EUROMEX PC/DIC* equipado con una cámara *CMEX-PRO 18 cámara 100X* y la interpretación de los resultados fueron realizados en función de la literatura de la *Colección Diatomológica, Iconografía Diatomológica y Diatomeas de Europa*.

La Ley de Shelford o Ley de Tolerancia indica que, la presencia de un organismo tiene una dependencia considerable con variables medioambientales determinadas (Gazzano & Graf, 2006). En este sentido, para determinar si las abundancias se ajustan estadísticamente a una curva de distribución normal con respecto a los parámetros abióticos, se requiere el empleo de métodos de análisis multidimensionales tipo no lineales (*Non linear fit*), los cuales establecen la relación no lineal entre una variable de respuesta y varias variables independientes. En Ecología, la ecuación logística que proviene de un análisis *Non Linear fit*, describe el crecimiento de la población como una función del tiempo y tres parámetros que se ajustan a los datos de crecimiento

$$Nt = \frac{K}{1 + e^{(a-rt)}}$$

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Donde  $N_t$  es el tamaño poblacional de especies en un determinado tiempo  $t$ ,  $a$  y  $r$  es un parámetro de Malthus que describe la tasa natural de incremento poblacional y  $K$  es la capacidad de amortiguamiento del ecosistema (Legendre & Legendre, 2003).

Las regresiones no lineales permiten estimar los parámetros  $a$ ,  $r$  y  $k$  de la curva que mejor se ajustan a los datos proporcionados por los usuarios. Esta metodología fue aplicada al presente estudio para determinar si las abundancias poblacionales se ajustan estadísticamente a una curva de distribución normal con respecto a las variables medioambientales y así, determinar si las diatomeas identificadas corresponden a especies autóctonas o exógenas del sitio muestreado. Para este fin se realizaron los cálculos de regresiones lineales en el Software *Past 4.0.4*.

La Ecología también se interesa por la determinación de los factores responsables de la presencia y ausencia de las especies identificadas en el muestreo (Legendre & Legendre, 2003). Cuando estas variables son de tipo cuantitativas o una mezcla de variables cuantitativas y cualitativas, el modelo de regresión utilizado, es el logístico (Legendre & Legendre, 2003), y su respuesta es binaria (presencia – ausencia, o 1-0). Si lo que se requiere es, predecir la probabilidad de ocurrencia de un evento (la presencia o ausencia de especies o individuos), el modelo a emplearse deberá generar valores numéricos en el rango de 0 a 1, un resultado obtenido mediante la aplicación de los modelos por regresión logística múltiple (Legendre & Legendre, 2003).

En un modelado por regresión logística, la ecuación aplicable proporciona un modelo sigmoideo para la respuesta de las variables analizadas; son por lo general modelados adecuadamente por varios aspectos ecológicos, fenómenos, fisiológicos y químicos:

$$p = \frac{1}{1+e^{-z}}$$

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Donde  $p$  es la probabilidad de ocurrencia de un evento, y  $z$  es una función lineal de las otras variables explicadas:

$$z = b_0 + b_1x \quad \text{para un solo predictor}$$

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \dots + b_px_p \quad \text{para varios predictores}$$

La regresión logística es un caso especial del Modelo Generalizado Linear (GLM: McCullag & Nelder, 1983); el cual tiene tres componentes básicos: componente aleatorio, componente sistemático y una función link. La componente aleatoria de un GLM, está conformado por una variable  $z$  y variables independientes ( $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \dots + b_px_p$ ). siguiendo una distribución *Poisson* o binomial negativa (López Gonzáles & Ruiz Soler, 2011). El componente sistemático de un GLM, es atribuible a las variables explicativas, siendo  $x_j$ , predictores lineales. Finalmente, la función link especifica una función  $z(\cdot)$ , que relaciona  $u$  con el predictor lineal:  $z(u) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \dots + b_px_p$ . Por lo tanto, la función  $z(\cdot)$  relaciona los componentes aleatorios y sistemáticos (López Gonzáles & Ruiz Soler, 2011).

A fin de identificar la principal variable medioambiental que ejerce influencia en la diversidad, riqueza y abundancia Total de diatomeas, se construyó un Modelo de Regresión Múltiple por GLM mediante el Software *Rstudio*.

Los cálculos respectivos para la riqueza responden al método analítico planteado por Hurlbert (1971), el cual realiza una estimación del número de especies en relación a submuestras de individuos seleccionados aleatoriamente (López & Duque, 2010). La siguiente ecuación responde al cálculo de riqueza:

$$pi(N_i, N, n) = 1 - \left[ \left( \frac{N-N_i}{N} \right) \left( \frac{N-N_i-1}{N} \right) \left( \frac{N-N_i-2}{N} \right) \dots \left( \frac{N-N_i-n+1}{N} \right) \right]$$

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Donde  $N_i$  es la abundancia para  $S$  especies, siendo  $N = \sum N_i$  el número total de individuos, el número de  $s$  especies es una submuestra de  $n$  individuos tomados al azar es  $E(s) = \sum p_i(N_i, N, n)$  donde  $p_i(N_i, N, n)$  es la probabilidad de encontrar  $i$  especies en la submuestra (López & Duque, 2010).

A fin de evitar que, una medida se vea afectada por diferencias en el número de individuos totales, se aplica el Índice de Diversidad Alpha Fisher, el cual se encuentra definido por la siguiente muestra:

$$S = \alpha \ln\left(1 + \frac{n}{\alpha}\right)$$

Donde  $S$  es el número de especies,  $n$  es el número de individuos y  $\alpha$  es el coeficiente Alpha Fisher. El *índice alfa de Fisher* es el más conveniente debido a la baja sensibilidad que representa para tamaños de muestra desiguales o muy pequeños (Juárez - Agis, Herrera Castro, Martínez y Pérez, & Reyes Umaña, 2007).

Tanto la Riqueza como el Índice de Diversidad de Alpha Fisher fueron calculados a través del Software *Past 4.04*.

Los modelos lineales de regresión múltiple son empleados comúnmente para analizar y modelar la relación entre una vasta cantidad de datos de carácter multivalente, descrito por una matriz de semejanza y una o más variables predictoras (Aguirre Mendoza, 2013). El modelo lineal de regresión múltiple resulta aplicable al presente estudio en razón de que, es posible la construcción de un modelo simple con un número relativamente alto de variables medioambientales.

Las diferentes variables medidas, fueron separadas en dos grupos llamados: “*morfometría*” y “*fisicoquímicas*”. La identificación taxonómica de diatomeas, fue relacionada con los

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

parámetros fisicoquímicos obtenidos, mediante el modelo lineal de regresión múltiple. Este método relacionó las variables medioambientales obtenidas en la fase de muestreo, con la estructura o morfología de las comunidades de diatomeas encontradas en la fase de análisis microscópico. Chamorro & otros (2021), empleó el análisis de regresión múltiple para identificar la relación entre variables medidas y la morfología de diatomeas encontradas en el volcán Antisana. Gonzáles & otros (2022) emplearon el método de regresión múltiple para explorar la variación de la biodiversidad de diatomeas frente los efectos del cambio climático en 23 arroyos ubicados en la cordillera de los picos de Europa al norte de España (González-Paz & otros, 2022). Así mismo, estudios realizados en volcanes activos del Mar Mediterráneo, han empleado el método de regresión múltiple para relacionar las variables medioambientales y la biodiversidad de la meiofauna y poder comprender los efectos de dicha relación sobre la morfología (Zeppilli, Mea, Corinaldesi, Danovaro, 2011).

Este método implica el empleo de dos tablas: variables biológicas (dependientes o variables de respuesta) y variables ambientales (independientes o variables explicativas). Por lo tanto, mediante la relación de variables dependientes e independientes se facilita la ordenación de todos los objetos inmiscuidos en el análisis (Zornoza, 2015).

La relación entre las variables fisicoquímicas y las identificadas en los análisis microscópicos, fueron también estudiadas mediante el análisis de correspondencia canónico (CCA) que, es un método canónico multivariante el cual, asume una respuesta lineal entre la abundancia de los taxones y las diferentes gradientes ambientales (Galvan Villa, 2015). Para estandarizar los datos obtenidos en el contaje de diatomeas (para abundantes) se empleó el método de *Hellinger*, el cual es una estandarización convexa que ayuda a minimizar los efectos de abundancias totales de muestras muy diferentes. En razón de que, la cantidad de individuos identificados

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

varió drásticamente en cada muestra se optó por eliminar aquellas crioconitas en las cuales no se identificó diatomeas, así como especies que contaban menos de 5 individuos.

### Resultados

Un total de 106 especies de diatomeas y 998 individuos fueron identificadas en el muestreo realizado, eliminándose 66 especies o subespecies en razón de la baja cantidad de individuos presentes en las muestras. Este último paso se realizó únicamente para algunos análisis multivariantes, mientras que, para el cálculo de diversidad y riqueza, se optó por utilizar los datos en su totalidad.

Datos ecología de las comunidades	Promedio por crioconita
Abundancia Total	2 – 297 diatomeas
Riqueza	1 – 35 spp
Diversidad (Alpha Fisher)	0 – 26,78

Tabla 1: Datos calculados relacionados a la ecología de comunidades de diatomeas presentes en Volcán

Cotopaxi. Los resultados fueron obtenidos mediante el software *PAST 4.0.4*.

En lo que respecta a la dominancia de especies, se obtuvieron varios taxones, dentro de los cuales se mencionan los más abundantes y aquellos encontrados con mayor frecuencia en las diferentes crioconitas muestreadas:

Especie de Diatomea	Abundancia relativa (%)	Presencia dentro de las crioconitas (%)
<i>Achnantheidium minutissimum</i>	5,65	43
<i>Gomphonema punae</i>	9,37	11,4
<i>Hantzschia amphioxys</i>	4,21	54
<i>Hannae arcus</i>	3,49	40
<i>Luticola andina</i>	1,53	29
<i>Nitzschia palea</i>	1,72	43
<i>Nitzschia paleacea</i>	6,99	43
<i>Nupela sp1</i>	6,99	43

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

<i>Pinnularia borealis</i> var. <i>lanceolata</i>	1,53	43
<i>Pinnularia</i> sp. Nov (2)	6,99	43
<i>Pinnularia</i> sp 2	6,99	43
<i>Planothidium</i> sp1	6,99	20
<i>Planothidium minutissimum</i>	1,53	43
<i>Sellaphora pupula</i>	6,99	43

Tabla 2: Especies de diatomeas con mayor abundancia relativa y presencia en los diferentes puntos de muestreo del Volcán Cotopaxi.

En relación a los parámetros morfométricos y fisicoquímicos, se procedió a calcular el GVIF (factor de inflación de la varianza), a fin de identificar los factores abióticos que presenten una alta correlación y que pueden generar errores durante el desarrollo de la bioestadística. Una vez calculado el VGIF, se procedió a omitir el factor LATITUD (alta correlación con otros parámetros) de algunos ensayos multivariantes. Se menciona que, previo a la realización de este paso se eliminaron los parámetros fisicoquímicos: *sólidos disueltos totales (TDS)*, *nitratos*, *nitritos*, *dureza*, *clorina* y *alcalinidad*, debido a que los resultados se encontraban bajo los límites de detección en todas las muestras.

<b>Factores</b>	<b>GVIF</b>
Latitud	121,33
Longitud	1,21
Elevación	120,93
Profundidad	3,12
Área	11,13
Volumen	14,93
Radiación solar al interior de la crioconita	1,93
Radiación solar al interior de la crioconita	1,75
Temperatura	1,96
pH	1,85
ORP	1,69
Conductividad	1,31
DO	1,64

Tabla 3: Valores obtenidos del GVIF, después de realizar el cálculo respectivo mediante el programa Brodgar

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Una vez eliminado el factor LATITUD se procedió a realizar nuevamente el cálculo de VGIF para determinar si se identifica un mejor ajuste estadístico de los otros parámetros.

<b>Factores</b>	<b>GVIF</b>
Longitud	1,21
Elevación	2,53
Profundidad	2,93
Área	11,01
Volumen	14,47
Radiación solar al interior de la crioconita	1,85
Radiación solar al exterior de la crioconita	1,75
Temperatura	1,96
pH	1,72
ORP	1,48
Conductividad	1,29
DO	1,57

Tabla 4: Valores obtenidos del GVIF, después de realizar el cálculo respectivo, eliminando la variable LATITUD, mediante el programa Brodgar.

De los datos muestreados para las variables morfométricas y abióticas, se disponen los siguientes rangos y media respectivamente:

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Rango</b>
Área (cm <sup>2</sup> )	534	15 - 2620
Elevación (msnm)	4975	4902 - 5097
Volumen (cm <sup>3</sup> )	6454	15 - 55020
Profundidad (cm)	9,60	3 - 23
Temperatura (°C)	-3	-3 a -4
Ph	7,44	6,68 – 8,23
Conductividad (uscm)	4,30	2 - 6
Radiación solar adentro de la crioconita (mW/cm <sup>2</sup> )	0,81	0,11 – 1,59
Radiación solar afuera de la crioconita (mW/cm <sup>2</sup> )	0,19	0,11 – 0,36
ORP	197	163 – 228,6
DO	0,017	0,03 – 0,01

Tabla 5: Datos tomados en campo de los predictores abióticos en los puntos de muestreo.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Al relacionar las variables abióticas con la cantidad de diatomeas presentes en los puntos muestreados (cada crioconita), mediante la aplicación del modelo Non Linear fit en el *software PAST 4.0.4*, se identificó que, las abundancias poblacionales se ajustan a una curva de distribución normal respecto a los factores ambientales: longitud, área, elevación, volumen y radiación solar al interior de la crioconita, cuyo criterio AIC (calidad relativa de un modelo estadístico) para cada variable mencionada, fue el más idóneo en comparación con el resto de variables.

<b>Parámetro</b>	<b>Akaike IC</b>
Longitud	<b>326,05</b>
Área	<b>480,54</b>
Elevación	<b>705,14</b>
Volumen	<b>351,60</b>
Profundidad	762,09
T	835,43
pH	765,39
Conductividad	877,52
Solar Radiation inside	<b>661,92</b>
Solar Radiation outside	864,52
ORP	763,31
DO	868,51

Tabla 6: Valores de AIC obtenidos para cada uno de los factores abióticos mediante el modelo Non Linear fit del software PAST 4.0.4.

A fin de tener un mejor entendimiento y discrepancia, acerca del ajuste de las poblaciones de cada especie de diatomeas. Se aplicó el modelo *Non Linear fit* para cada abundancia poblacional de cada especie en relación a cada una de las variables abióticas. Se omitieron las variables: temperatura, radiación solar al exterior de la crioconita y oxígeno disuelto para la ejecución del análisis mencionado.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

	Longitud	Área	Elevación	Volumen	Profundidad	pH	ORP	Radiación solar al interior de la crioconita
ADMI	<b>7,3649</b>	<b>7,7624</b>	8,1719	<b>7,5579</b>	8,3787	8,2711	8,352	<b>7,8665</b>
AUGR	4,5858	4,5859	<b>4,584</b>	<b>4,5822</b>	4,5857	<b>4,5841</b>	4,5864	<b>4,579</b>
CEUG	4,4763	<b>4,4758</b>	<b>4,4679</b>	4,4767	<b>4,4759</b>	<b>4,4737</b>	<b>4,4754</b>	<b>4,4753</b>
CSTE	4,9852	<b>4,7444</b>	4,9667	<b>4,6462</b>	4,8878	4,9853	4,9825	4,9527
GPNA	84,259	<b>47,338</b>	81,051	<b>34,115</b>	71,009	84,258	83,637	78,128
HAMP	5,1012	<b>5,0765</b>	<b>5,0899</b>	<b>5,0763</b>	<b>5,0617</b>	5,1049	5,1012	5,1032
HARC	6,6927	<b>5,7296</b>	6,6068	<b>5,3938</b>	<b>6,4092</b>	6,6796	6,7117	<b>6,4722</b>
LAND	4,6497	4,6499	<b>4,6411</b>	<b>4,638</b>	4,6493	4,6496	4,651	4,6515
MVAR	<b>4,5857</b>	<b>4,5854</b>	<b>4,5859</b>	4,5866	<b>4,5857</b>	<b>4,5758</b>	<b>4,5859</b>	<b>4,5607</b>
NLAN	<b>4,4704</b>	4,5416	4,5414	4,541	4,54	4,5341	<b>4,5262</b>	<b>4,5381</b>
NPAL	4,6866	4,696	<b>4,6628</b>	4,6936	4,7056	4,6983	4,6904	4,6972
NIPF	12,908	<b>9,0908</b>	12,548	<b>7,7082</b>	11,56	12,898	12,859	12,118
NPAE	<b>7,9087</b>	8,198	8,6301	<b>8,0555</b>	9,0156	8,89	9,0157	8,3614
NIT1	4,7595	4,7593	4,7597	<b>4,7564</b>	<b>4,7573</b>	4,7606	4,7611	<b>4,7566</b>
NPUS1	<b>7,9087</b>	8,198	8,6301	<b>8,0555</b>	9,0156	8,89	9,0157	8,3614
PBLA	4,7595	4,7593	<b>4,7597</b>	<b>4,7564</b>	<b>4,7573</b>	4,7606	4,7611	<b>4,7566</b>
PMIC	<b>4,6067</b>	<b>4,6059</b>	<b>4,5857</b>	<b>4,6079</b>	<b>4,6037</b>	<b>4,5971</b>	<b>4,6056</b>	<b>4,6042</b>
PIN3	7,7382	<b>4,6057</b>	4,7284	<b>4,5796</b>	<b>4,6824</b>	4,7383	4,737	4,7217
PIS2	<b>7,9087</b>	8,198	8,6301	<b>8,0555</b>	9,0156	8,89	9,0157	8,3614
PI2	<b>7,9087</b>	8,198	8,6301	<b>8,0555</b>	9,0156	8,89	9,0157	8,3614
PMNT	4,7595	4,7593	4,7597	<b>4,7564</b>	<b>4,7573</b>	4,7606	4,7611	<b>4,7566</b>
PLT1	<b>7,9087</b>	8,198	8,6301	<b>8,0555</b>	9,0156	8,89	9,0157	8,3614
RGIB	4,7595	4,7593	4,7597	<b>4,7564</b>	<b>4,7573</b>	4,7606	4,7611	<b>4,7566</b>
SPUP	<b>7,9087</b>	8,198	8,6301	<b>8,0555</b>	9,0156	8,89	9,0157	8,3614
STA1	4,7595	4,7593	4,7597	<b>4,7564</b>	<b>4,7573</b>	4,7606	4,7611	<b>4,7566</b>
SAVE	<b>4,6067</b>	<b>4,6059</b>	<b>4,5857</b>	<b>4,6079</b>	<b>4,6037</b>	<b>4,5971</b>	<b>4,6056</b>	<b>4,6042</b>

Tabla 7: Valores de AIC obtenidos mediante la relación de cada una de las abundancias poblacionales por especie (con mayores individuos) y los factores abióticos mediante el modelo Non Linear fit del software PAST

4.0.4. Aquellos valores resaltados en color negro, son los que presentaron mejores valores de AIC.

Se puede notar que, las variables con mayor correlación son: volumen, radiación solar al interior de la crioconita, profundidad, longitud y elevación.

En relación al análisis de regresión lineal múltiple, se observó que, las diatomeas tienden a responder con mayor afinidad a las siguientes variables predictoras:

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Variable predictora	$Pr(> z )$
<b>Morfométrica (<math>p=2,737 e^{-06}</math>)</b>	
Longitud	0,0059
Volumen	0,0001
Profundidad	0,0089
<b>Fisicoquímica (<math>p=0,167</math>)</b>	
Radiación solar al interior de la crioconita	0,027

Tabla 8: Resultados obtenidos de la aplicación de un modelo de regresión múltiple para las variables predictoras o abióticas, mediante el software *Rstudio software*.

Los datos de Riqueza, Diversidad Alpha Fisher y Abundancia Total, fueron calculados a través del módulo *Diversity* en el software Past 4.0.4. Para el cálculo mencionado, no se omitió ningún dato obtenido en la fase de muestreo y laboratorio.

Al comparar los valores de Riqueza, Abundancia Total y Diversidad Alpha Fisher (variables dependientes) con los factores abióticos (variables independientes), mediante un modelo regresión lineal tipo GLM, se obtuvo como resultado que, los principales factores que, influyen en la variación de las variables dependientes son:

Variable dependiente	Variable independiente	$Pr(> z )$	AIC
Riqueza	Elevación	0,00817	224,91
	Radiación solar al interior de la crioconita	0,015	
Diversidad (Alpha Fisher)	Área	0,0749	302,98
Abundancia Total	Área	0,00952	559,24
	Elevación	0,0078	
	Radiación solar al interior de la crioconita	0,063	
	ORP	0,054	

Tabla 9: Resultados obtenidos de la aplicación de un modelo de regresión múltiple tipo GLM para las variables dependientes Riqueza, Diversidad y Abundancia Total, mediante el software *Rstudio*. Los valores de  $Pr(>|z|)$  son interpretados como el valor p, si el valor de  $Pr(>|z|)$  es menor a 0,05, se infiere que la variable predictora tiene significado estadístico importante en respuesta a la variable dependiente.

Finalmente, la aplicación de un modelo CCA demostró que, las diferentes especies de diatomeas tienen mayor afinidad a diferentes variables abióticas. Sin embargo, también se identificaron algunas especies que, al parecer no responden a ninguna variable.

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

De los resultados obtenidos se obtiene que, la confiabilidad de los ejes analizados arroja una confiabilidad equivalente (eigenvalue: al 100%).

## Discusión

### Diversidad de diatomeas y composición taxonómica

Estudios realizados sobre la caracterización taxonómica de diatomeas, han demostrado que las crioconitas ubicadas en las zonas de ablación de glaciares, se encuentran constituidos por un número considerable de especies (Edwards, 2020). Ecosistemas característicos del Volcán Antisana, formación montañosa perteneciente a los Andes Ecuatorianos, identificaron la presencia de una amplia variedad de taxones diatomeicos (Chamorro & otros, 2021).

Las especies con mayor abundancia en el Volcán Cotopaxi, fueron las especies GPNA, *Gomphonema punae* (95 individuos); NPAE, *Nitzschia paleacea* (73 individuos); NPUS1, *Nupela sp1* (73 individuos); PIS2, *Pinnularia sp. Nov (2)* (73 individuos); PI2, *Pinnularia sp 2;* (73 individuos); PLT1, *Planothidium sp1* (73 individuos) y SPUP, *Sellaphora pupula* (73 individuos). Es importante mencionar que, las especies *Pinnularia sp. Nov (2)* y *Gomphonema punae*, fue identificada también en el volcán Antisana (Chamorro & otros, 2021). La especie *Gomphonema punae* fue identificada en el volcán Antisana en crioconitas que se encontraron bajo los 4760 msnm (Chamorro & otros, 2021). Para el caso del presente estudio, esta especie fue encontrada en altitudes superiores a 4960 msnm, un hallazgo que resulta interesante para comprender si esta especie, propia de ecosistemas ubicados en los Andes Ecuatorianos, es de carácter generalista o especialista. Las crioconitas muestreadas en el Volcán Cotopaxi, fueron únicamente encontradas hasta los 5097 msnm, a gradientes altitudinales superiores, no se observaron más crioconitas.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

La especie bentónica *Nitzschia paleacea* es una diatomea de amplia distribución geográfica, encontrándose este taxón en la región marítima antártica (Hamsher, Kateriña, Kociolek, & Van de Vjver, 2016). Así mismo, el género *Nupela*, fue encontrado en diferentes tramos de dos sistemas loticos de alta montaña en el páramo de Santurbán (Rámirez, 2008), sugiriendo así que, este género tiene una distribución geográfica en ecosistemas fríos. Se identificó una vasta microflora de diatomeas en las zonas glaciares de la montaña Shara & Nidze (Macedonia); y especificando que, el género *Pinnularia* presentó datos de abundancia considerable (Levkov, Krstic, Nakov, & Lj, 2005).

En lo que respecta a la especie *Sellaphora pupula* se menciona que, esta especie fue identificada en la mayoría de los sitios muestreados en la zona de los glaciares de Gran Brentaña (Kelly, Mann, & Duchoslav, 2008).

### Factores ambientales

La flora diatomeica identificada en el volcán Cotopaxi fue relacionada con las variables abióticas (*Tabla:5*), para determinar su estructura.

Parámetro	Akaike IC
Longitud	326,05
Área	480,54
Elevación	705,14
Volumen	351,60
Radiación solar al interior	661,92

*Tabla 10: Resultados relevantes obtenidos de la aplicación del modelo Non Linear fit con el Software Past*

4.0.4. Se relacionó la abundancia poblacional de cada crioconita con las variables abióticas.

La *Tabla 10* demuestra que, la mayoría de las abundancias poblacionales de las crioconitas muestreadas, se ajustan estadísticamente de mejor manera con las variables: longitud, área, elevación, volumen y radiación solar al interior de la crioconita.

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

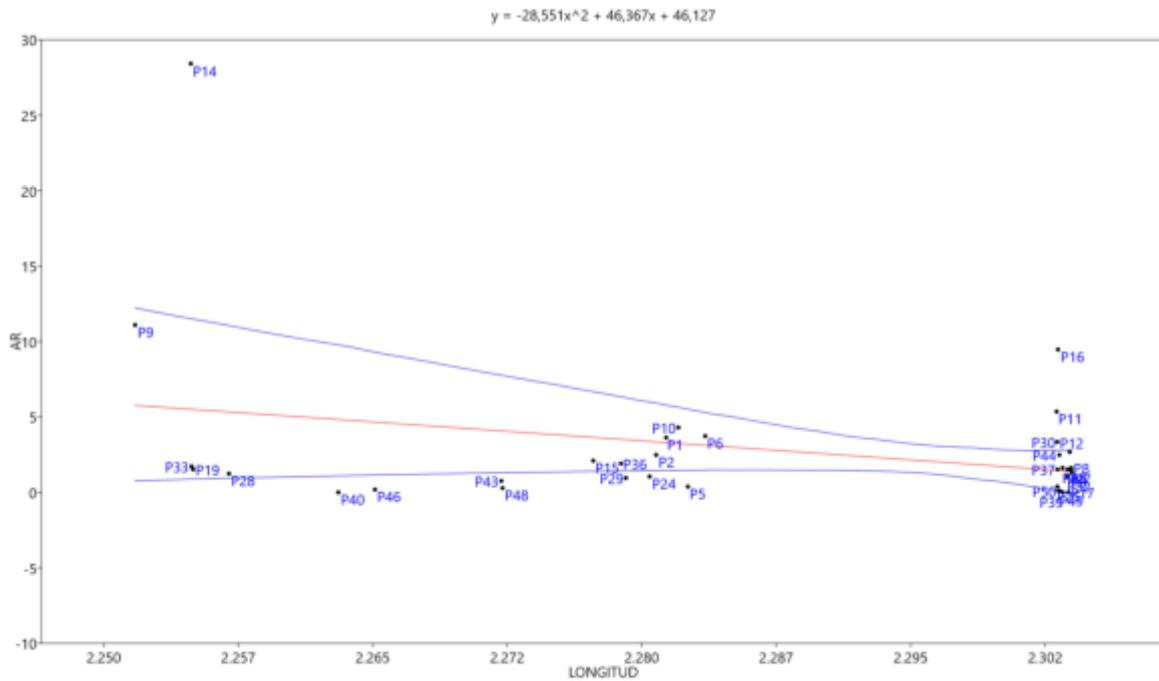


Gráfico 2: Relación no lineal entre los datos de la variable morfológica "longitud" y la abundancia relativa de cada crioconita, obtenido mediante la aplicación del modelo Non Linear Fit en el Software PAST 4.0.4

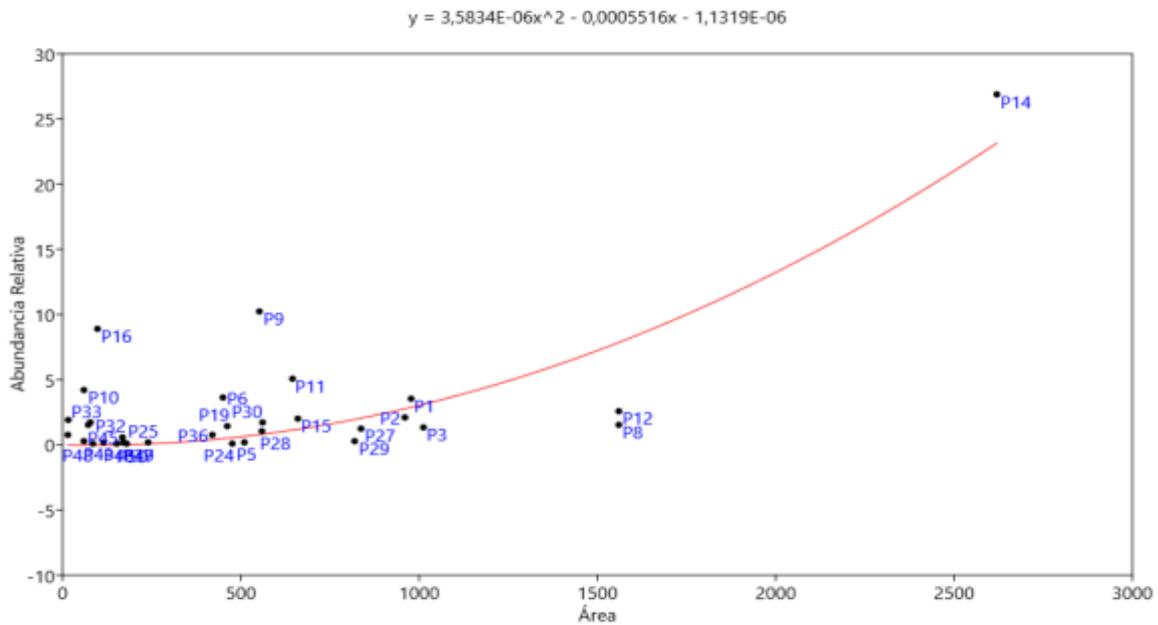


Gráfico 3: Relación no lineal entre los datos de la variable morfológica "área" y la abundancia relativa de cada crioconita, obtenido mediante la aplicación del modelo Non Linear Fit en el Software PAST 4.0.4

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

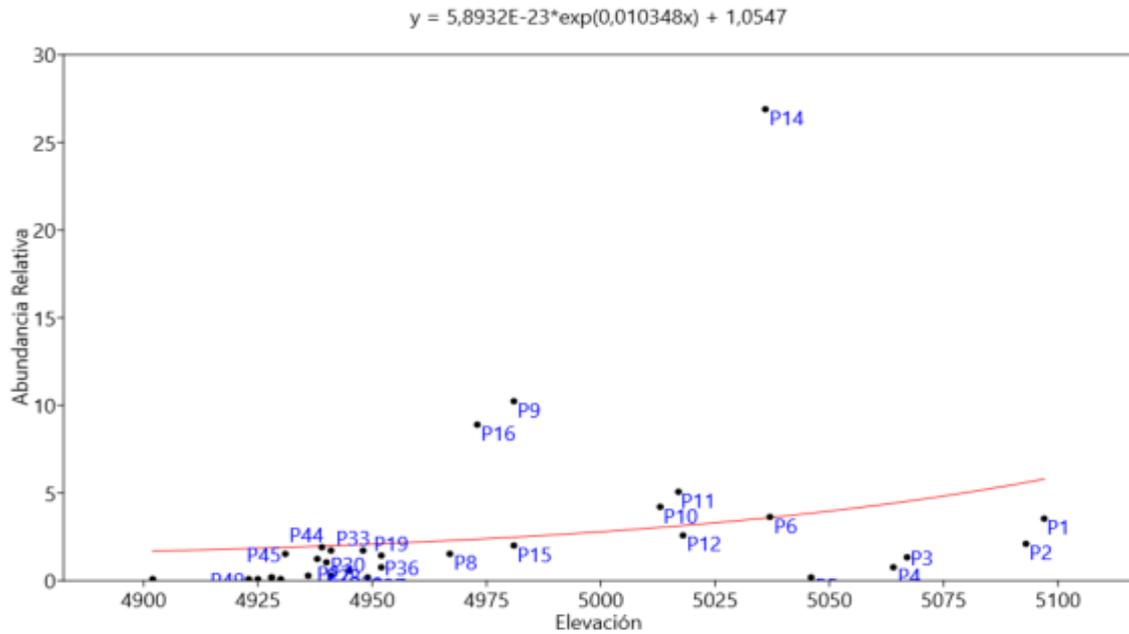


Gráfico 4: Relación no lineal entre los datos de la variable morfométrica “Elevación” y la abundancia relativa de cada crioconita, obtenido mediante la aplicación del modelo Non Linear Fit en el Software *PAST 4.0.4*

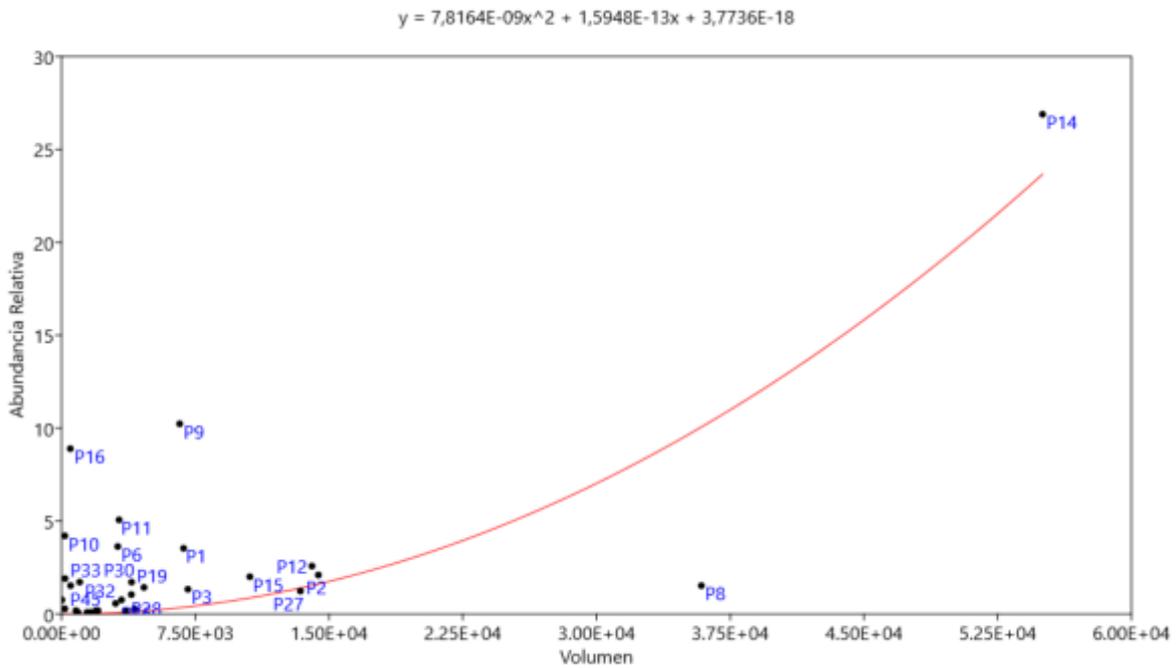


Gráfico 5: Relación no lineal entre los datos de la variable morfométrica “volumen” y la abundancia relativa de cada crioconita, obtenido mediante la aplicación del modelo Non Linear Fit en el Software *PAST 4.0.4*.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

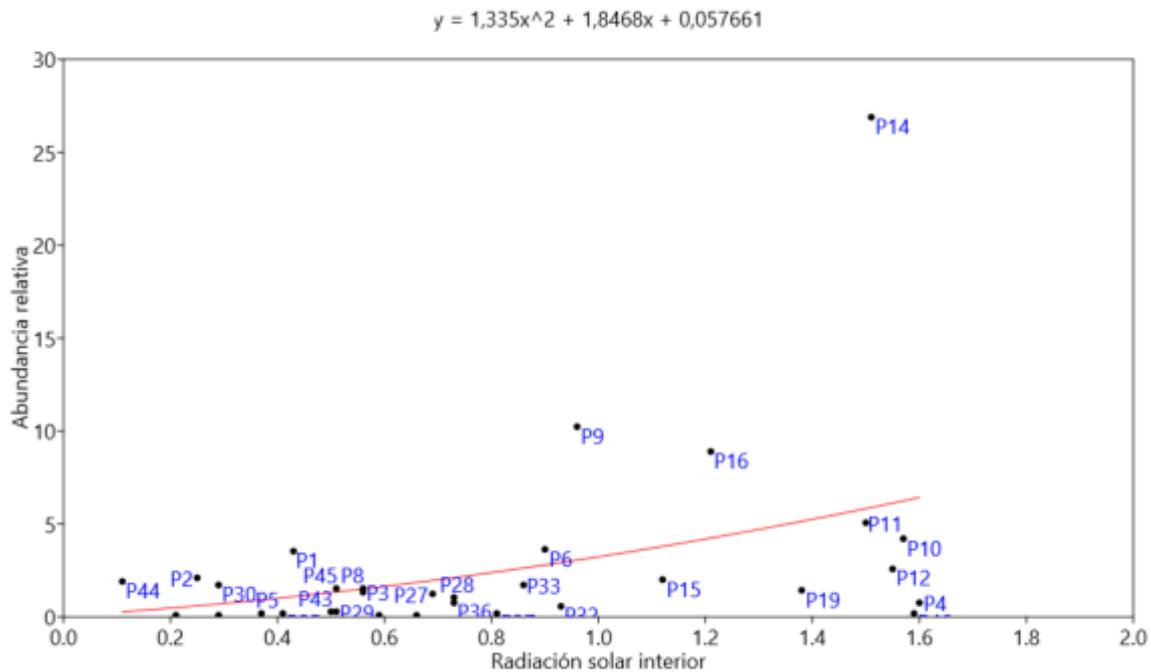


Gráfico 6: Relación no lineal entre los datos de la variable fisicoquímica "Radiación solar al interior de la crioconita" y la abundancia relativa de cada crioconita, obtenido mediante la aplicación del modelo Non Linear

Fit en el Software PAST 4.0.4

Varios estudios de aplicación multivariante, para determinar los impulsores espacio temporales de las comunidades de diatomeas, han demostrado que, esta característica tiene una estrecha relación con las variables abióticas. Estudios realizados en la zona Taylor Valley de la Antártida, revelaron que, la ubicación de las crioconitas muestreadas, fue un factor clave para determinar la estructura de las diatomeas, sugiriendo en este caso, una estrecha relación entre las características geográficas de los glaciares y la flora diatomeica identificada (Stanish, Bagshaw, McKnight, Fountain, & Tranter, 2013). Muñoz - López & Rivera (2021), expusieron que, la profundidad (m) de 60 sitios muestreados en la Cordillera Oriental de Colombia, fue un factor determinante directo del entorno de luz de la columna de agua y por lo tanto, incidió en la composición poblacional de las diatomeas (Muñoz - López & Rivera - Rondón, 2022). S. Lee & otros (2019) comprobó que, el predictor ambiental "longitud", influye notablemente en la abundancia relativa de grupos poblacionales de diatomeas ubicadas en puntos de muestreo

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

de los Estados Unidos (S. Lee, Bishop, Spaulding, Mitchell, & Yuan , 2019). Por otro lado, los análisis estadísticos de las comunidades de diatomeas identificadas en el volcán Antisana, variaron a lo largo de las gradientes altitudinales (Chamorro & otros, 2021).

En el volcán Cotopaxi, no se encontró una estrecha relación con la mayoría de las variables fisicoquímicas muestreadas. Sin embargo, si se pudo identificar una relación mayor con las variables morfométricas. La aplicación del modelo de regresión lineal múltiple entre la abundancia relativa de cada sitio muestreado y las variables abióticas (morfométricas), demostró una alta correlación con el área (0,603), el volumen (0.691). elevación (0.317). Mientras que, para las variables fisicoquímicas se identificó una mayor correlación con la radiación solar al interior de la crioconita.

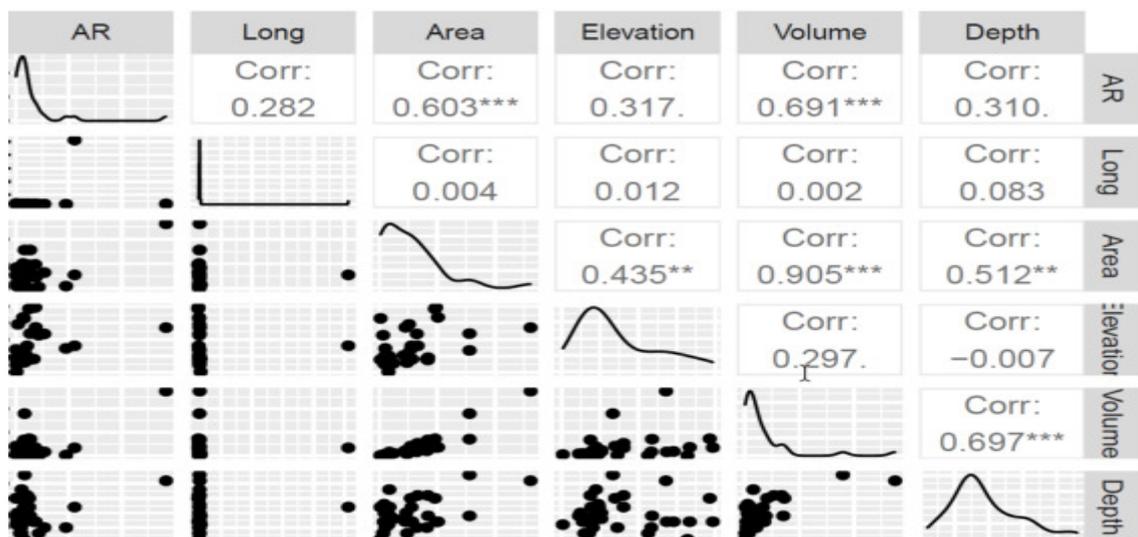


Gráfico 7: Resultados de la relación multivariante entre la abundancia relativa y los datos morfométricos, obtenido mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal múltiple en el Software *RSTUDIO*. Los \*\*\*, indican las variables con mejor correlación.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

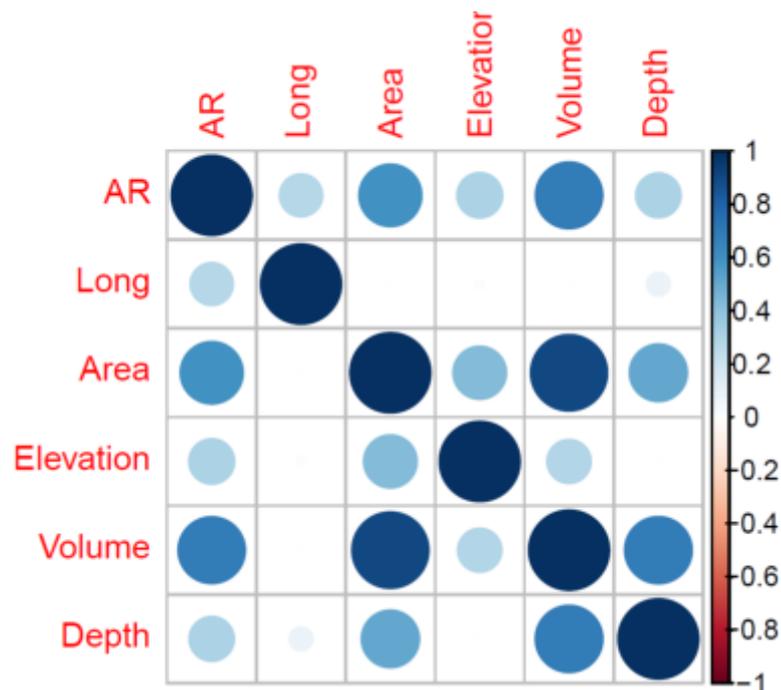


Gráfico 8: Resultados de la relación multivariante entre la abundancia relativa y los datos morfológicos, obtenidos mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal múltiple en el Software *RSTUDIO*. La gradiente colorimétrica y tamaño de círculo, indica el nivel de correlación entre las variables. El gráfico muestra una correlación mayor con las variables área y volumen (azul intenso) y una menor correlación, pero significativa con las variables elevación, profundidad y longitud (celeste).

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

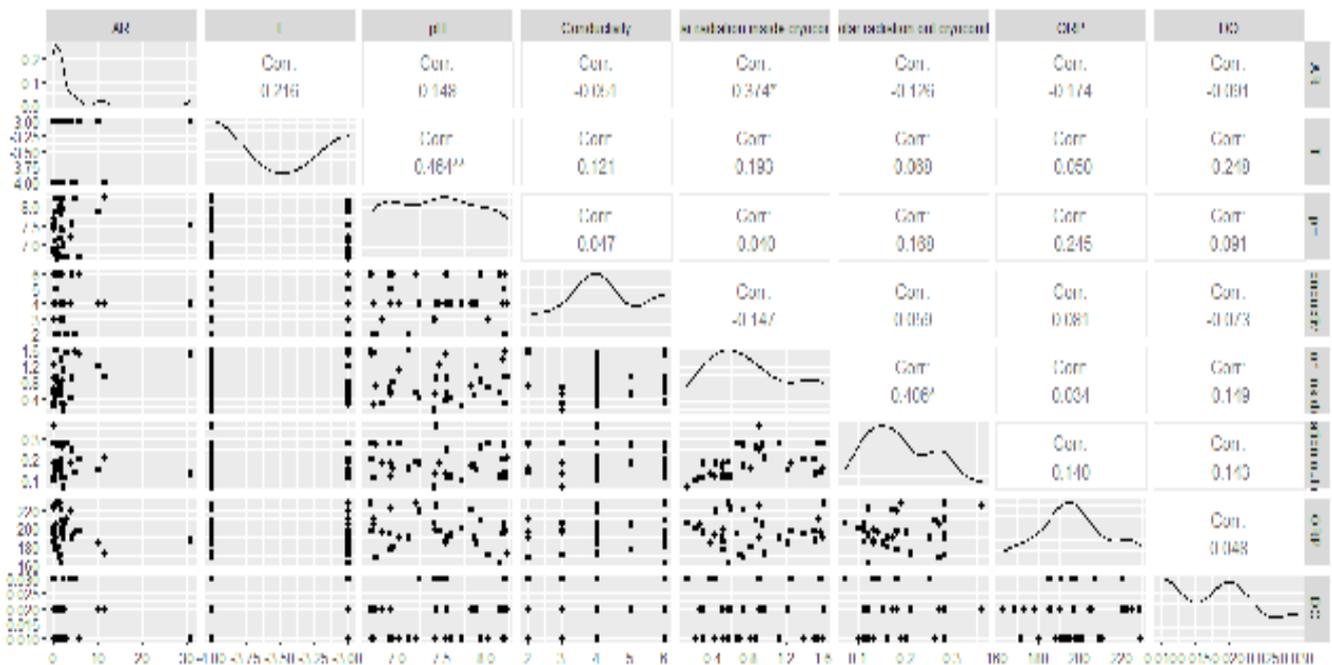


Gráfico 9: Resultados de la relación multivariante entre la abundancia relativa y los datos fisicoquímicos, obtenidos mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal múltiple en el Software *RSTUDIO*. Los \*, indican las variables con mejor correlación.

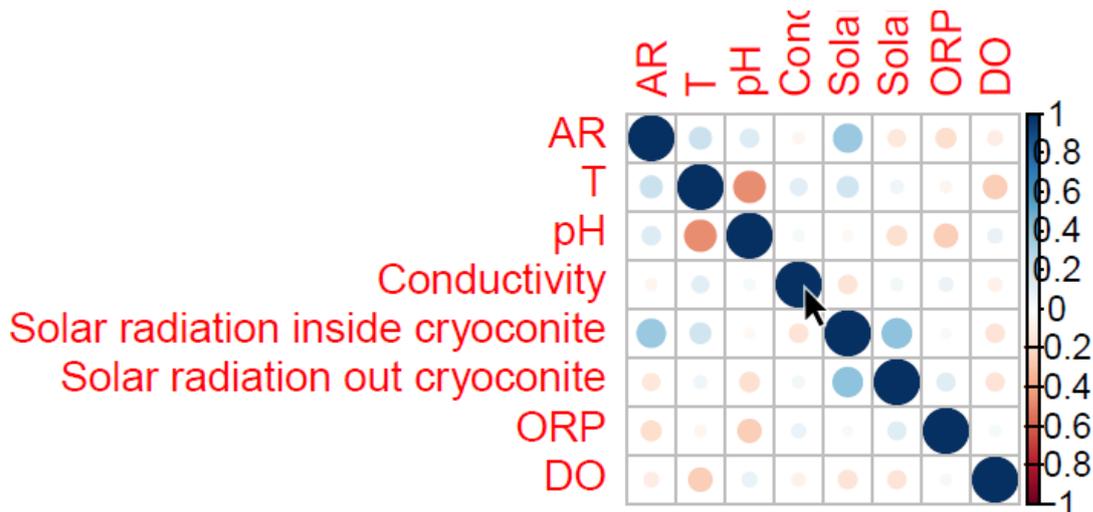


Gráfico 10: Resultados de la relación multivariante entre la abundancia relativa y los datos fisicoquímicos, obtenidos mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal múltiple en el Software *RSTUDIO*. La gradiente colorimétrica y tamaño de círculo, indica el nivel de correlación entre las variables. El gráfico muestra una correlación mayor con la variable radiación solar al interior de la crioconita (celeste).

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

En los análisis estadísticos realizados, a través de un modelo de regresión lineal tipo GLM, para determinar el factor influyente en las variaciones de Riqueza, se identificó que, la elevación y la radiación solar al interior de la crioconita, tienen significancia.

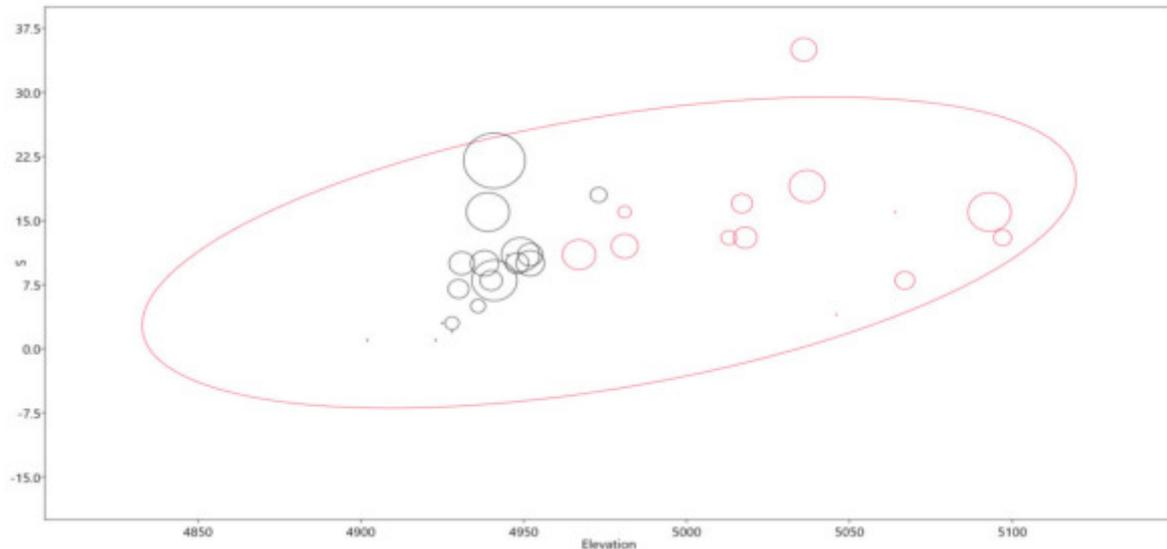


Gráfico 11: Relación entre la Riqueza (S) y elevación (msnm). El tamaño del diámetro es proporcional a los valores del índice de diversidad Alfa Fisher. Zonas en color rojo elevaciones >4980 msnm, zonas de color negro elevaciones < 4980 msnm. Gráfico “Bubble plot” realizado con el Software PAST 4.0.4.

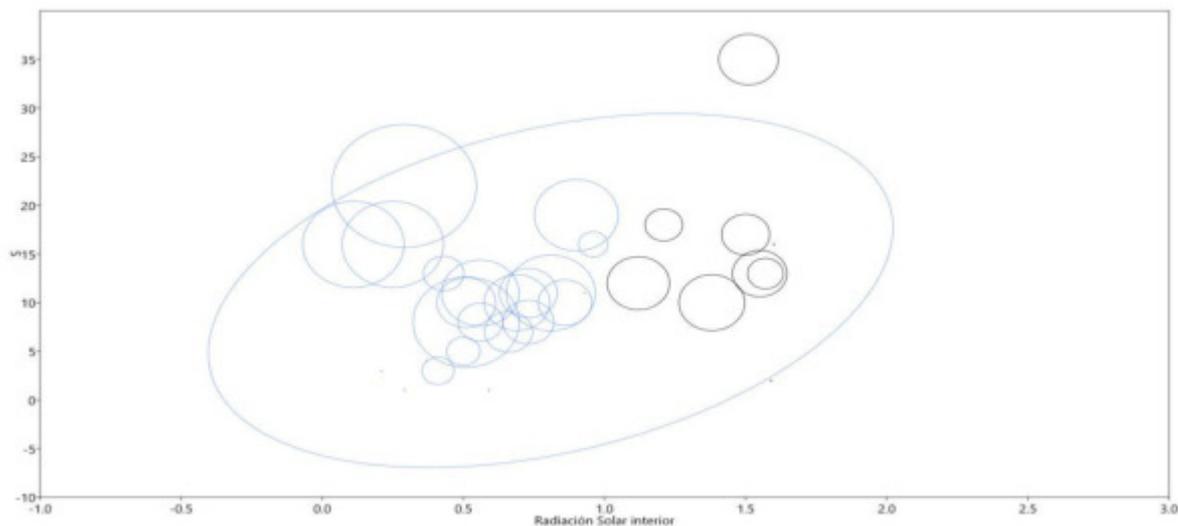


Gráfico 12: Relación entre la Riqueza (S) y radiación solar al interior de las crioconitas (mW/cm<sup>2</sup>). El tamaño del diámetro es proporcional a los valores del índice de diversidad Alfa Fisher. Zonas en color azul radiaciones solares > 1 mW/cm<sup>2</sup>, zonas de color negro elevaciones < 1 mW/cm<sup>2</sup>. Gráfico “Bubble plot” realizado con el Software PAST 4.0.4.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

Al graficar la relación entre el Índice Alpha de Fisher y el área, no se observó una correlación que aporte al estudio. Es importante mencionar que, varios taxones estaban compuestos por pocos individuos ( $n < 5$ ), se cree entonces que, los datos de Alpha Fisher fueron influenciados por el número de individuos totales, que varió en cada muestra. Aquellos taxones con pocos individuos, se los categorizó como *singletons* y fueron omitidos en algunos análisis multivariantes.

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

A través del Análisis Canónico de Correspondencia (CCA), se identificó si las variables abióticas tienen una relación directa con la distribución de las especies de diatomeas.

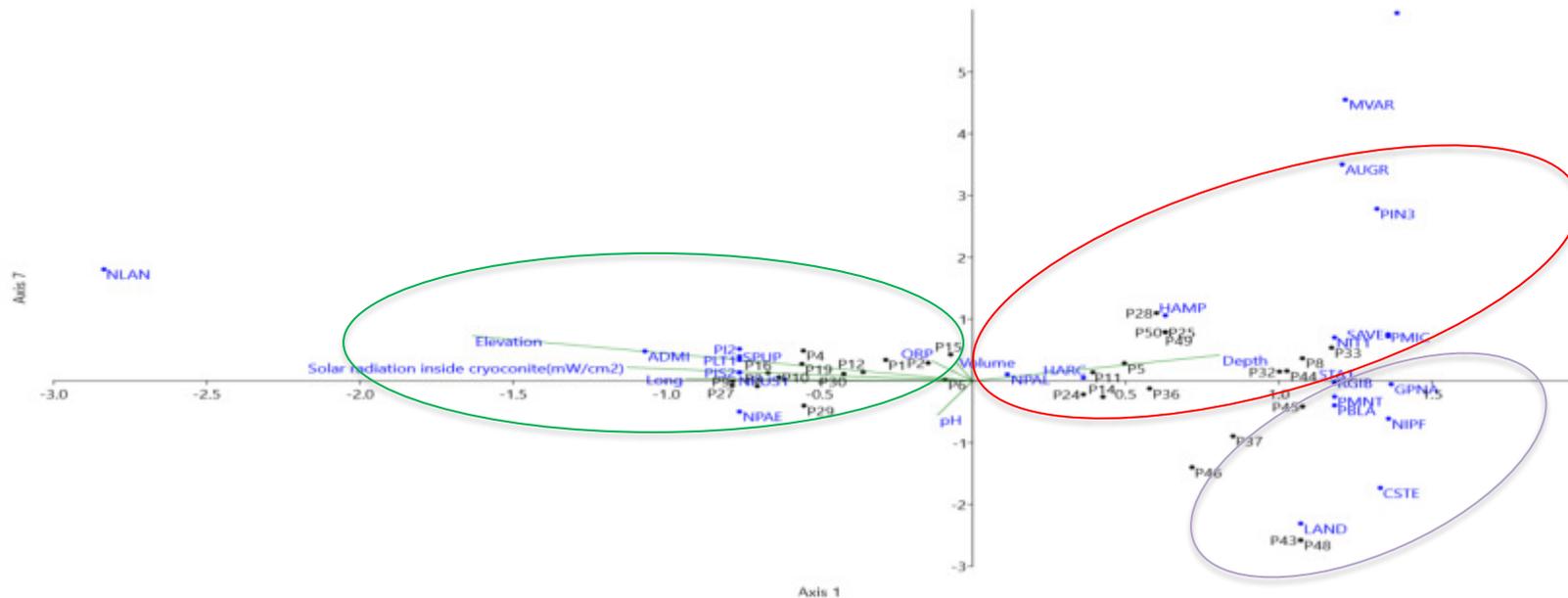


Gráfico 13: Diagrama del análisis canónico de correspondencia (CCA) en el cual se evidencia las especies de diatomeas y los sitios de muestreo en relación con las variables ambientales, obtenido mediante el Software PAST 4.0.4. El círculo rojo agrupa los taxones de diatomeas que responden a la variable profundidad. El círculo verde corresponde al grupo de especies que se ven influenciadas por la elevación, radiación solar al interior de la croconita, ORP, longitud y volumen. El círculo púrpura, relaciona taxones que no se ven influenciados por ninguna variable abiótica medida en el presente estudio

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

El *Gráfico 13* demuestra que, la profundidad es una de las principales variables que, influyen en la distribución de un grupo específico de diatomeas. Así mismo, otra distribución importante de diatomeas evidencia respuesta a las variables: radiación solar al interior de la crioconita, elevación, ORP y volumen. Las especies *Hantzschia amphioxys*, *Hannae arcus*, *Nitzschia palea*, *Nitzschia sp1*, *Pinnularia microstauron*, *Rhopalodia gibba*, *Pinnularia sp* (encontrada en el Volcán Antisana), *Staurosira aventralis* y *Stauroneis sp1*, se distribuyen en función de las variaciones de la profundidad de las crioconitas. Por otro lado, *Nupela sp1*, *Pinnularia sp2*, *Navicula lanceolata*, *Pinnularia sp* (variación de especie encontrada en el Antisana) y *Sellaphora pupula*, responden a la variación de longitud, radiación solar al interior de la crioconita, elevación, ORP y volumen. La distribución de la especie *Nitzschia paleacea* se encuentra asociada a la variable pH. Finalmente, se evidencia un grupo de taxones de diatomeas que, no se relacionan con las variables abióticas.

En este sentido se menciona que, el gráfico CCA fue efectivo para determinar la diferencia de hábitats en las que se encuentran las especies de diatomeas en el Volcán Cotopaxi.

## Conclusiones

De los resultados obtenidos en el presente estudio se puede concluir varios aspectos relacionados a las hipótesis planteadas en inicio. Por un lado, los datos obtenidos mediante la aplicación del módulo *Non Linear Fit*, indican que, las abundancias poblacionales de las crioconitas y/o de cada especie tienden a ajustarse estadísticamente a una curva de distribución normal respecto a los parámetros longitud, área, elevación, volumen y radiación solar. Dado que, las variables área y volumen tienen una intrínseca relación con la abundancia poblacional,

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

se toma con mayor importancia a los parámetros de longitud, elevación y radiación solar como variables que, influyen en la fluctuación de las poblaciones. Por lo tanto, se concluye que, la hipótesis planteada sobre la estructura de las diatomeas identificadas en el volcán Cotopaxi, son de tipo comunidad.

Sin embargo, no se descarta la presencia de taxones provenientes del depósito eólico de células muertas procedentes de otras zonas. Esto se menciona en razón de los datos obtenidos en el análisis CCA; varias especies no se vieron relacionadas con ninguna de las variables abióticas. La relación independiente entre las abundancias relativas de los puntos muestreados con las variables morfométricas y fisicoquímicas, concluye que, la diversidad de diatomeas del Volcán Cotopaxi, responden esencialmente a las variables geográficas, caso similar al descrito por Blanco & otros (2020) (Blanco, Olenici, Ortega, & Jimenez Gomez, 2020). No obstante, la variable fisicoquímica “*radiación solar al interior de la crioconita*” tiende a ser influyente en varios taxones diatomeicos del Volcán Cotopaxi, como el hallazgo identificado por Muñoz - López & Rivera (2021).

Chamorro & otros (2021), concluyeron que, la riqueza diatomeica identificada en el volcán Antisana, varió en diferentes gradientes altitudinales. Los resultados obtenidos en el presente estudio, corroboraron lo mencionado previamente, dado que, se encontró mayor riqueza de especies y abundancia poblacional en rangos altitudinales menores a los 4980 msnm.

Respecto a la “*radiación solar al interior de la crioconita*”, se indica que, la riqueza fue más abundante a radiaciones  $<1 \text{ mW/cm}^2$  en crioconitas del Volcán Cotopaxi. Planteamientos dados por Salleh & McMinn, indican que, las riquezas de las diatomeas bentónicas responden significativamente a las variaciones de irradiación, dado que los procesos fotosintéticos de las mismas se encuentran determinadas a un rango de temperatura específico (Salleh & McMinn, 2021). En este sentido, un estudio más profundo de la respuesta de las diatomeas de glaciares,

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

a la radiación solar, podrían contribuir al establecimiento de estas, como bioindicadores de los cambios bruscos de temperatura que, actualmente afectan a los glaciares.

Respecto a la taxonomía de las diatomeas, es importante subrayar que, la especie encontrada en la mayoría de las crioconitas del Volcán Cotopaxi corresponde a *Hantzschia amphyoxyis* (% de presencia: 54). Así también, esta especie fue identificada en la mayoría de crioconitas muestreadas en el glaciar Nordenskiöld en Billefjorden (Svalbard, Spitsbergen) (Vinšová, Pinseel, Kohler, & Van de Vijver, 2015). En ambas investigaciones, esta especie respondió a la variable de profundidad. En cuanto a la especie con mayor número de individuos, *Gomphonema punae*, se menciona que, a diferencia de los hallazgos planteados por Chamorro & otros (2021), esta especie no se vio influenciada por la elevación o por algún parámetro medioambiental durante la ejecución de este estudio. Lo que supone además que, esta especie pueda soportar variaciones de los factores medioambientales, específicamente las geográficas, siendo una especie cosmopolita.

Para los otros taxones identificados en el Volcán Cotopaxi se concluye que, la distribución de se encuentra relacionada con variables abióticas tanto fisicoquímicas como morfométricas. Dado que el ORP, no resultó tener una correlación significativa con la Riqueza y Abundancia Total, no se consideró como una variable relevante. Sin embargo, el CCA realizado demuestra una relación interesante entre la variable ORP con algunas especies de diatomeas, por lo que convendría estudiar más a fondo esta correlación. En general, se menciona que la taxonomía de diatomeas identificada en el Volcán Cotopaxi, está compuesta por especies de carácter generalista y especialista.; algunas influenciadas por las variables abióticas mientras que, otras parecen no tener relación con la varianza de estas. Finalmente, es importante destacar que, los grupos de diatomeas identificados en la zona de ablación del Volcán Cotopaxi, constituyen un aporte significativo a la colección de estos organismos en los Andes Ecuatorianos. El dar continuidad a estas investigaciones en otros glaciares tales como: el Cayambe, El Altar y el

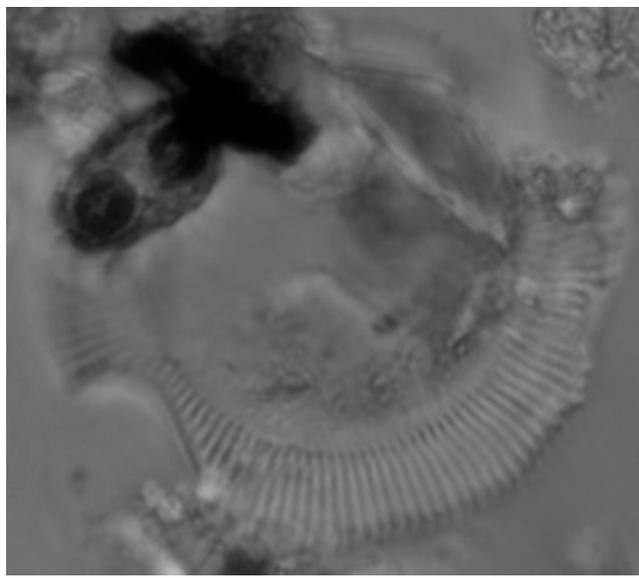
**CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN  
COTOPAXI**

Chimborazo, permitirá un mejor entendimiento de la Biodiversidad de diatomeas existente en los Andes Ecuatorianos.

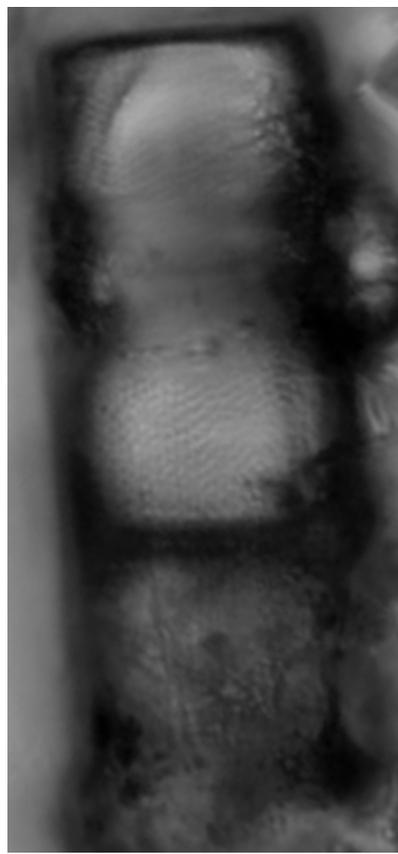
**CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN  
CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN  
COTOPAXI**

**Fotografías de los taxones encontrados**

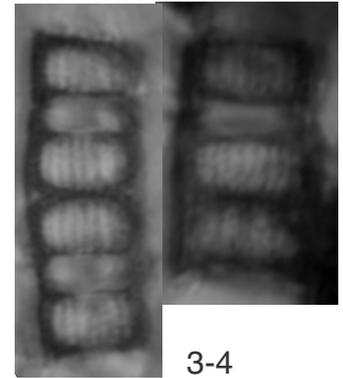
# PLATE 1



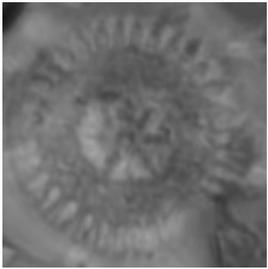
1



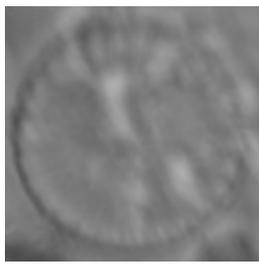
2



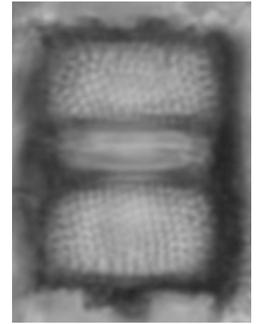
3-4



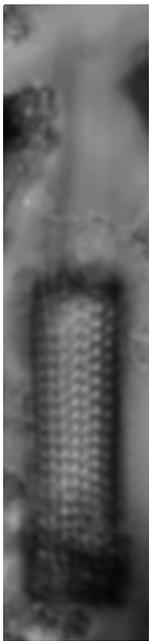
5



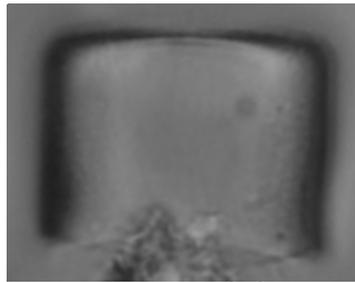
6



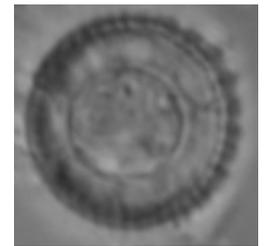
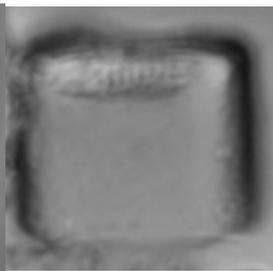
7



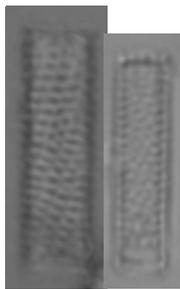
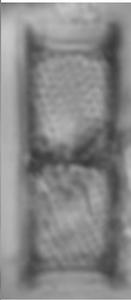
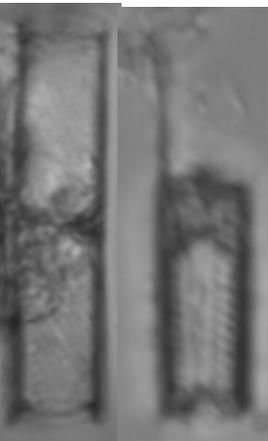
11-14



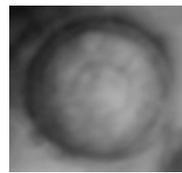
8-9



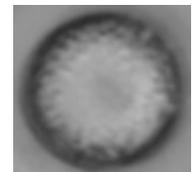
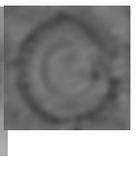
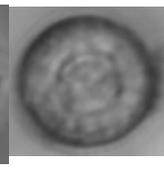
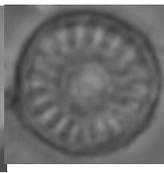
10



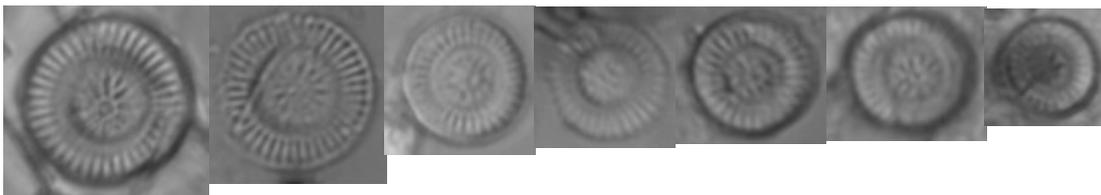
15-16



17-20

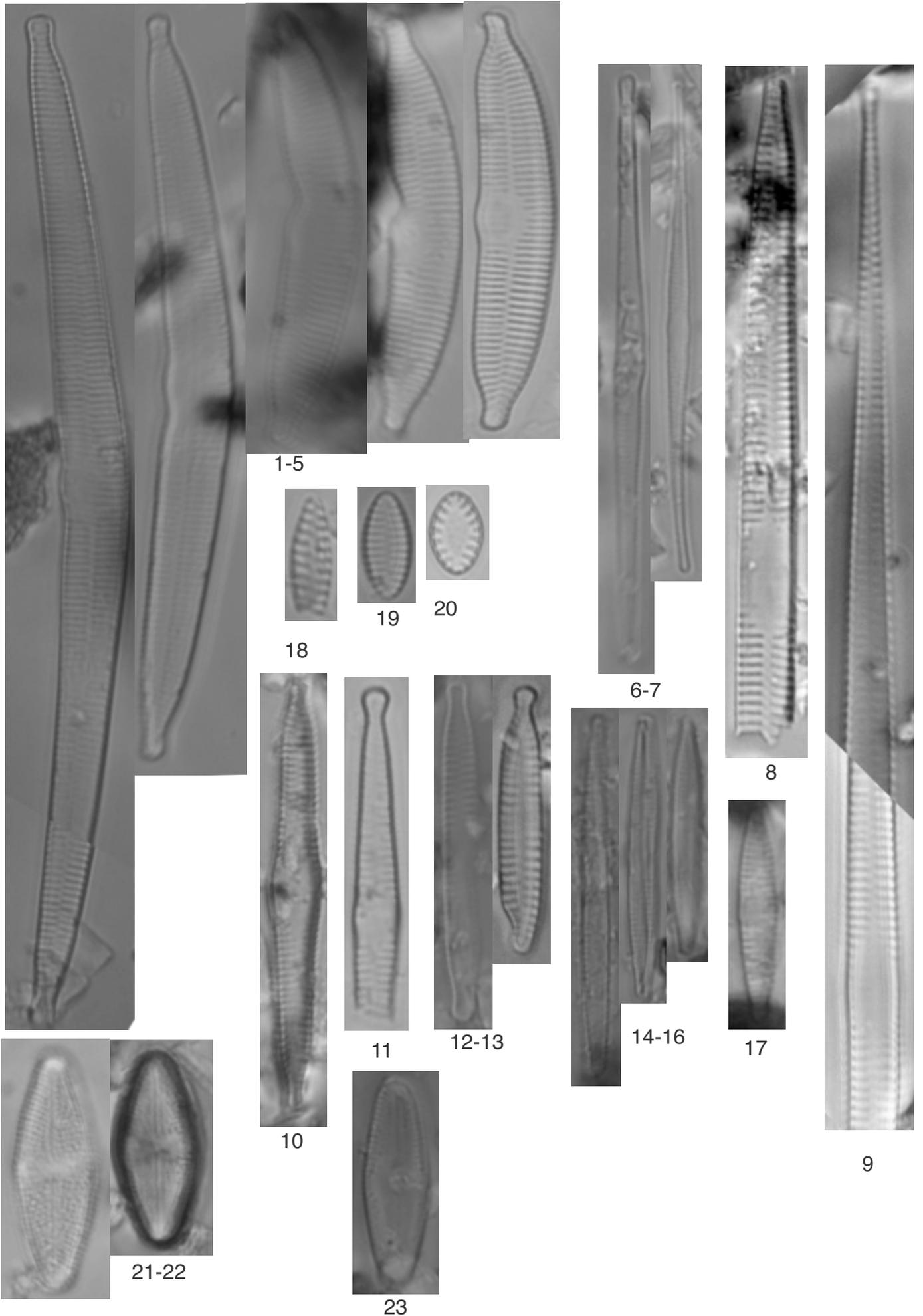


28



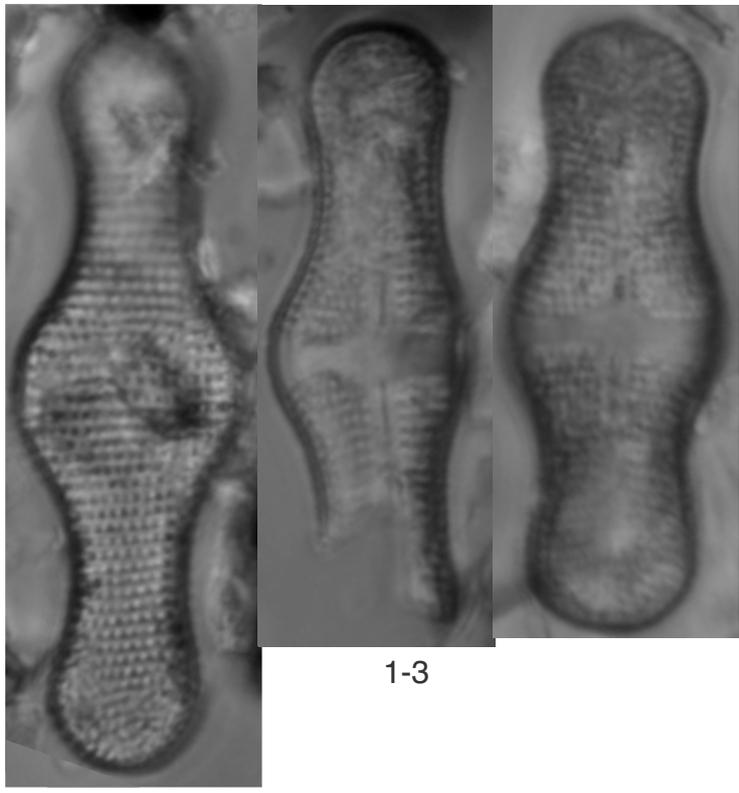
21-27

1. *Cyclotella* sp1; 2. *Aulacoseira* sp1; 3-4. *Aulacoseira* sp2; 6 *Cyclotella meneghiniana*; 7. *Aulacoseira* sp3  
 8-9 *Melosira varians*; 10. *Cyclotella* sp2; 11-14 *Aulacoseira granulata*; 15-16 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*;  
 17-20 *Cyclotella atomus*; 21-27 *Cyclotella stelligera*; 28. *Aulacoseira granulata* (vista valvar)

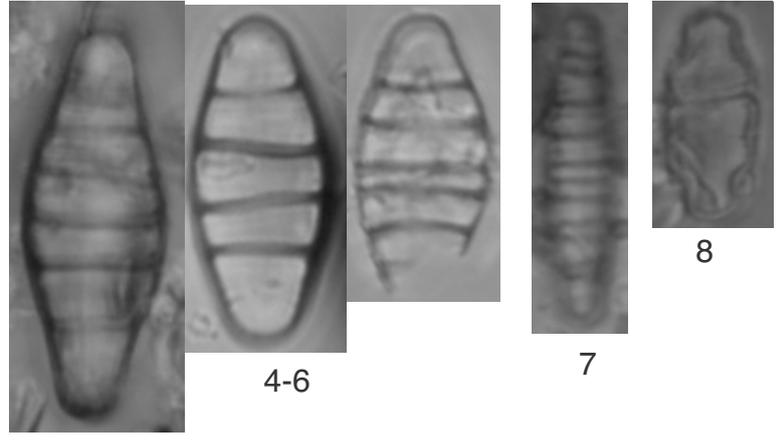


1-5. *Hannaea arcus*; 6-7. *Fragilaria tenera*; 8 *Ulnaria ulna*; 9a-b. *Ulnaria* sp; 10 *Fragilaria* sp. nov. 11. *Fragilaria* sp1; 12-13. *Fragilaria vaucheriae* (teratogenica); 14-16 *Fragilaria gracilis*; 17 *Fragilaria* sp2; 18. *Staurosira venter*; 19. *Staurosira aentralis*; 20 *Frankophila similioides*; 21-22 *Luticola goeppertiana*; 23 *Luticola cohnii*

# PLATE 3



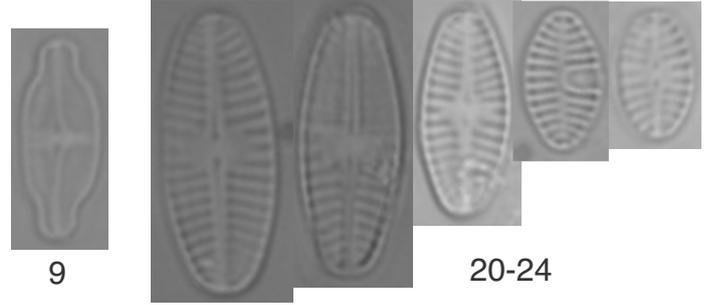
1-3



4-6

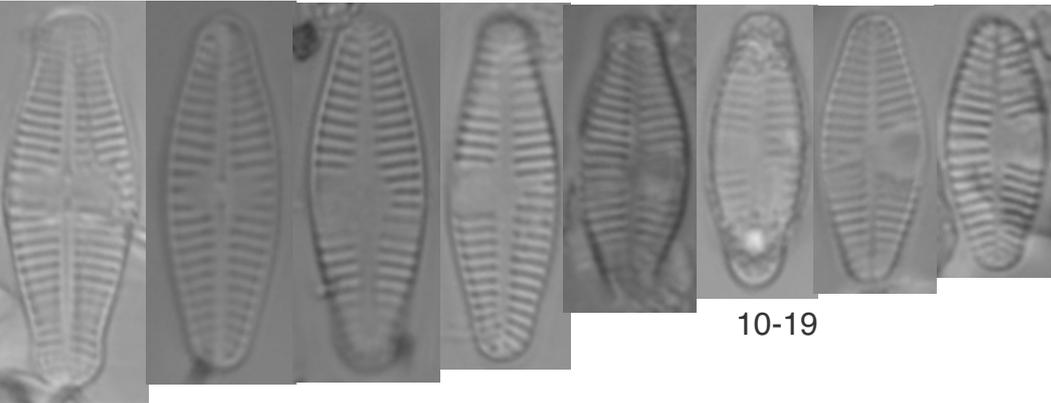
7

8

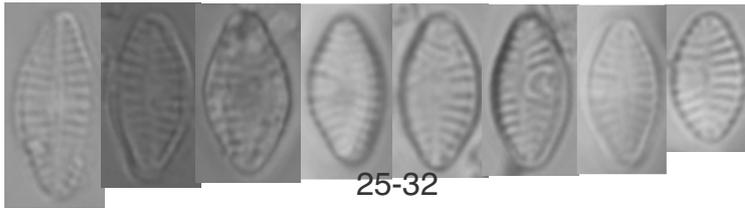


9

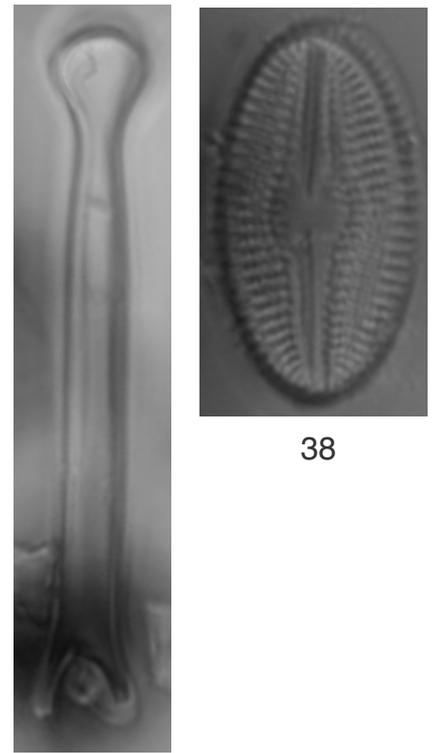
20-24



10-19

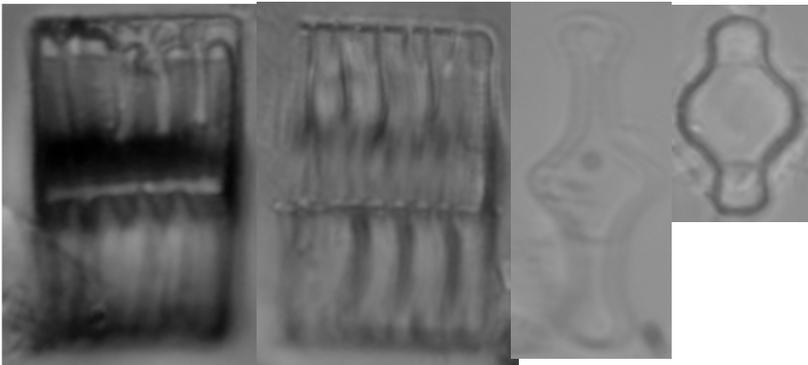


25-32



38

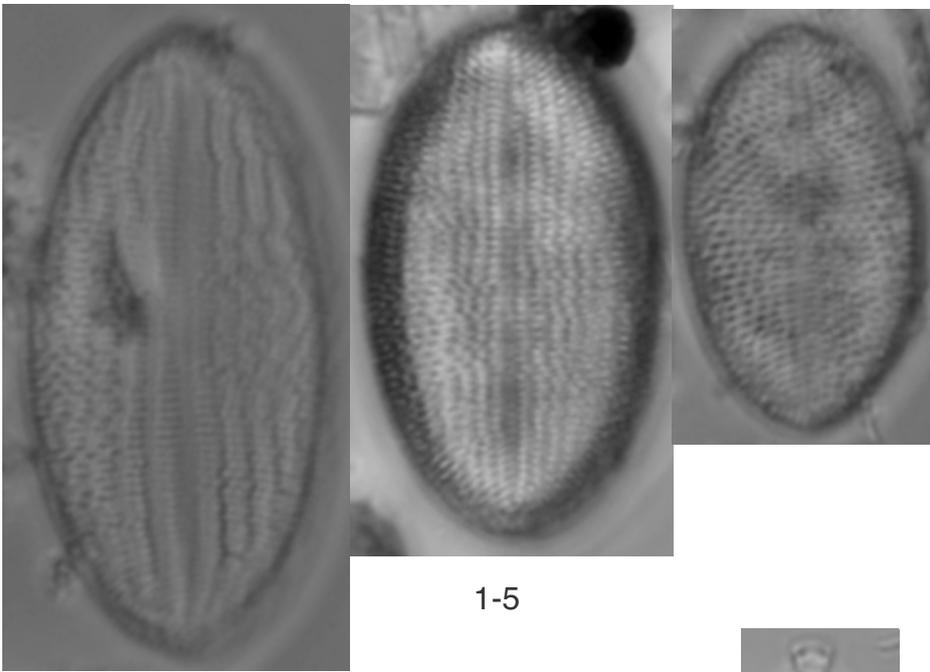
37



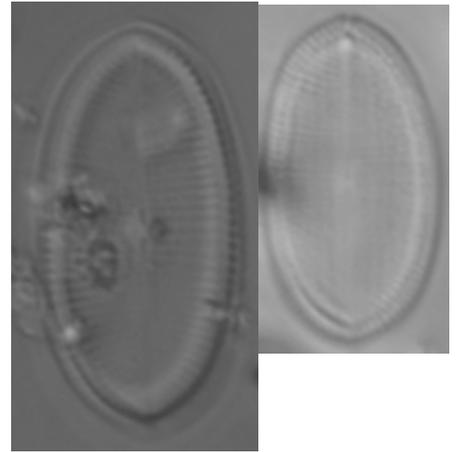
33-36

1-3 *Achnanthes inflata*; 4-6 *Odontidium mesodon*; 7. *Diatoma moniliformis*; 8. *Gogorevia paraexigua*;  
9 *Gogorevia exilis*; 10-24 *Planothidium lanceolatum*; 25-32 *Planothidium frequentissimum*; 33-35 *Tabellaria flocculosa*;  
37 *Tabellaria flocculosa* var. *andina*; 38 *Diploneis ovalis*

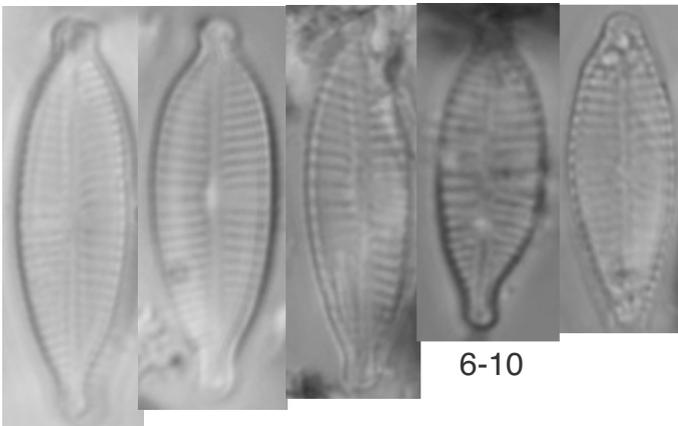
# PLATE 4



1-5



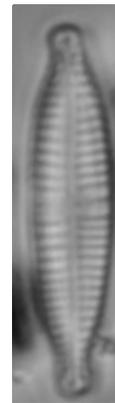
22-23



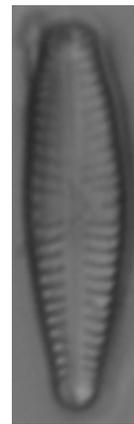
6-10



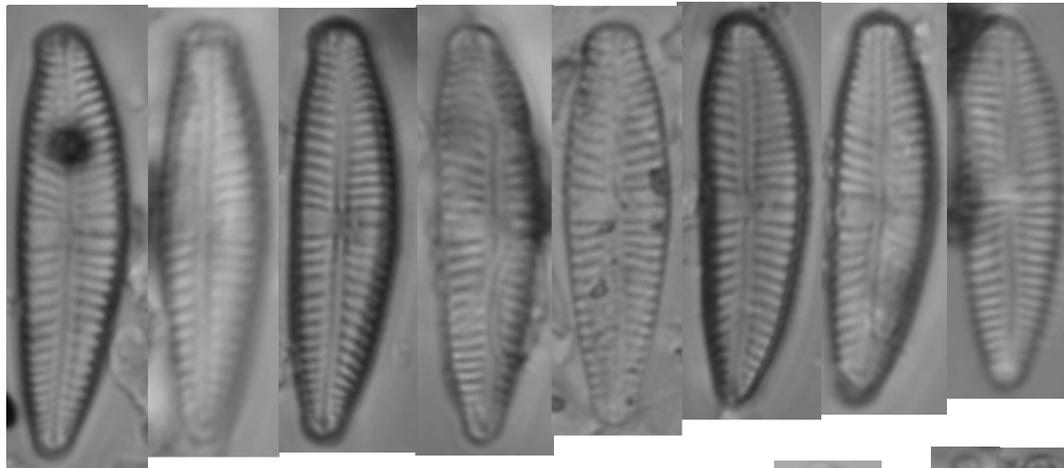
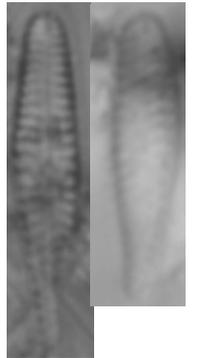
11



12



21



13-20



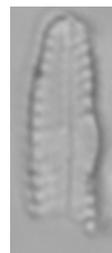
24



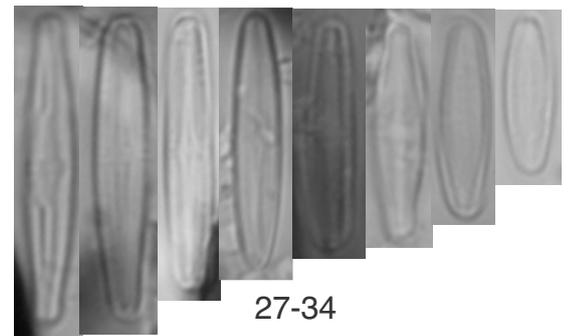
25



26

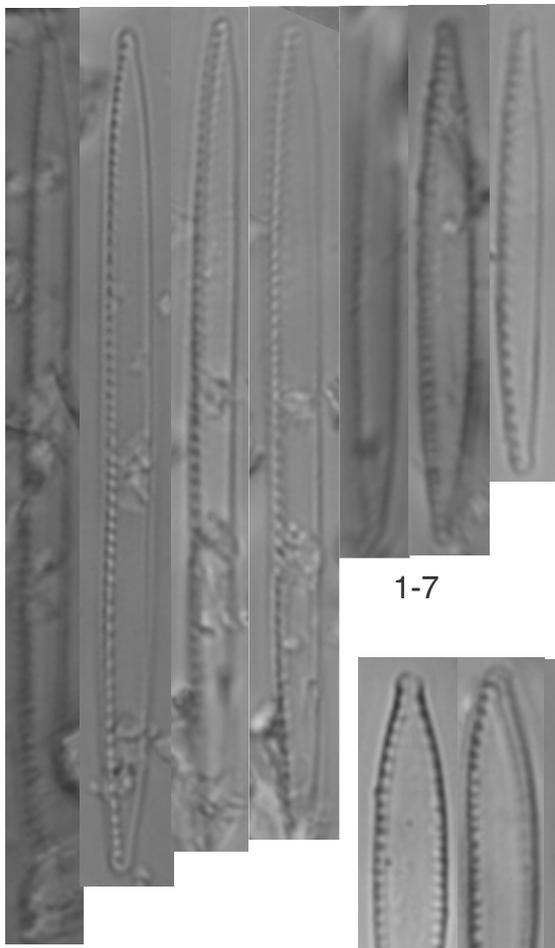


35

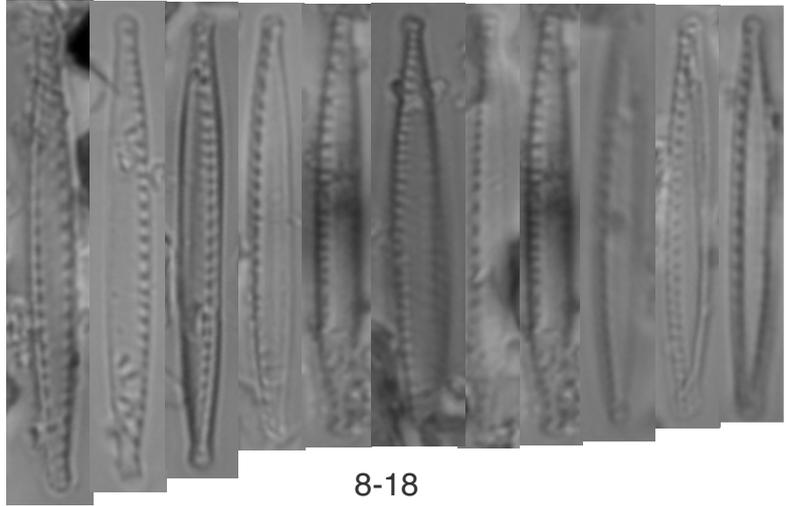


27-34

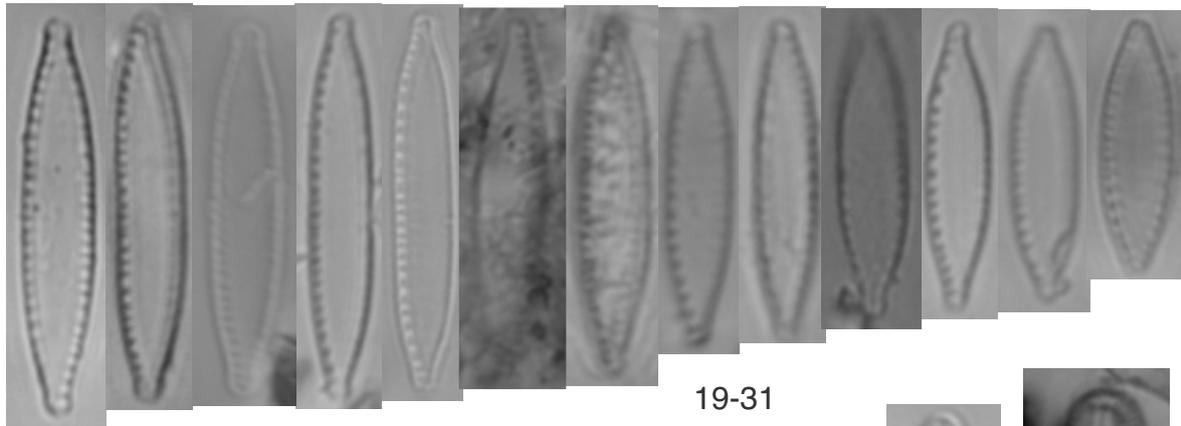
1-5 *Cocconeis euglypta*; 6-10 *Gomphonema parvulum*; 11 *Gomphonema saprophilum*; 12 *Gomphonema lagenula*; 13-20 *Gomphonema punae*; 21 *Gomphonema angustatum*; 22-23 *Gomphonema occultum*; 24 *Gomphonema* sp1; 25 *Gomphonema* sp2; 26 *Gomphonema pumilum* var. *rigidum*; 27-34 *Achnantheidium minutissimum*; 35 *Reimeria sinuata*



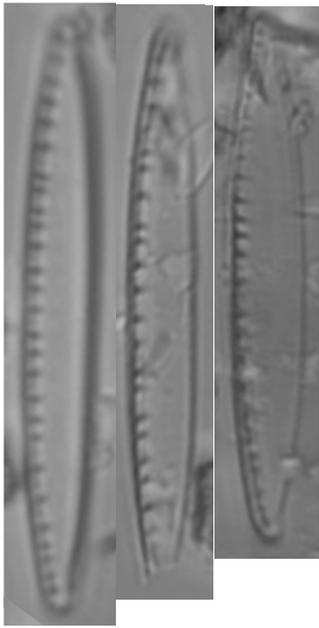
1-7



8-18



19-31



32-34



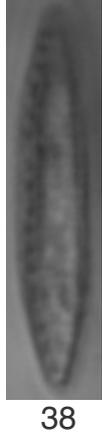
35



36



37



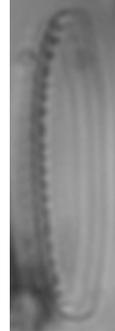
38



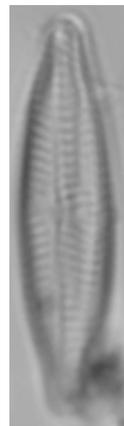
39



40



41



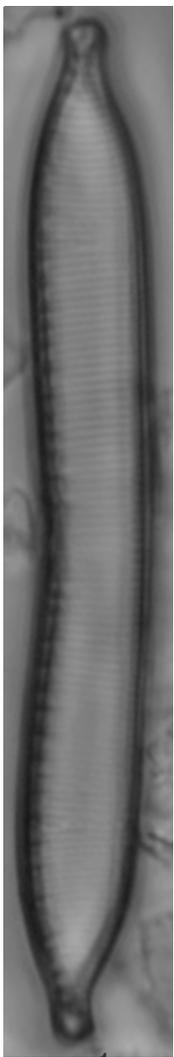
42



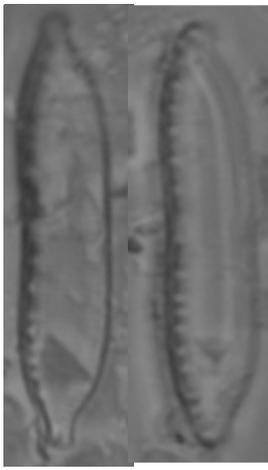
43

1-7 *Nitzschia paleacea*; 8-18 *Nitzschia paleaformis*; 19-31 *Nitzschia palea*; 32-34 *Nitzschia recta*; 35. *Nitzschia* sp1; 36 *Nitzschia* sp2; 37 *Nitzschia* sp3; 38 *Nitzschia amphibia*; 39 *Nitzschia* sp4; 40 *Nitzschia hadriatica*; 41 *Nitzschia communis*; 42 *Navicula cryptocephala*; 43 *Sellaphora* sp1

# PLATE 6



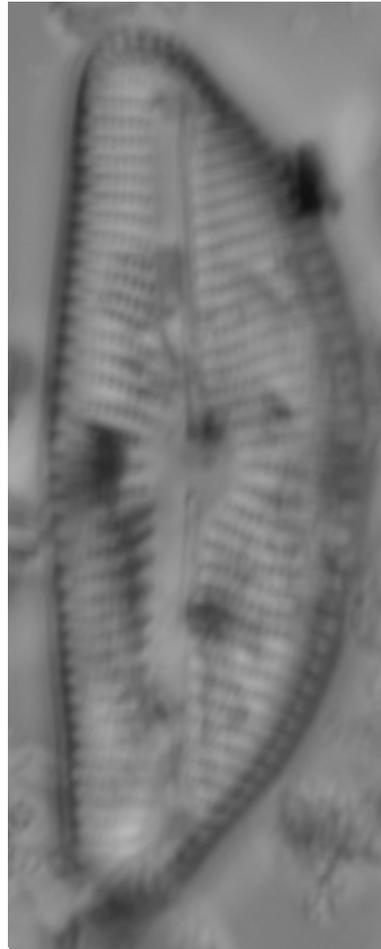
1



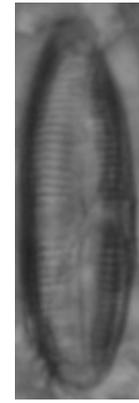
2-3



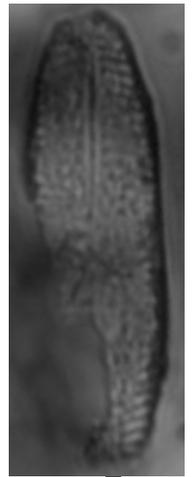
4



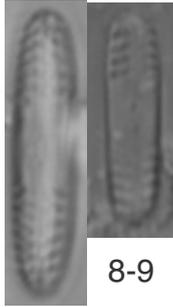
5



6



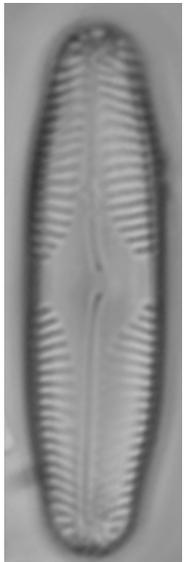
7



8-9



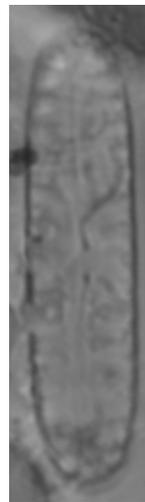
11



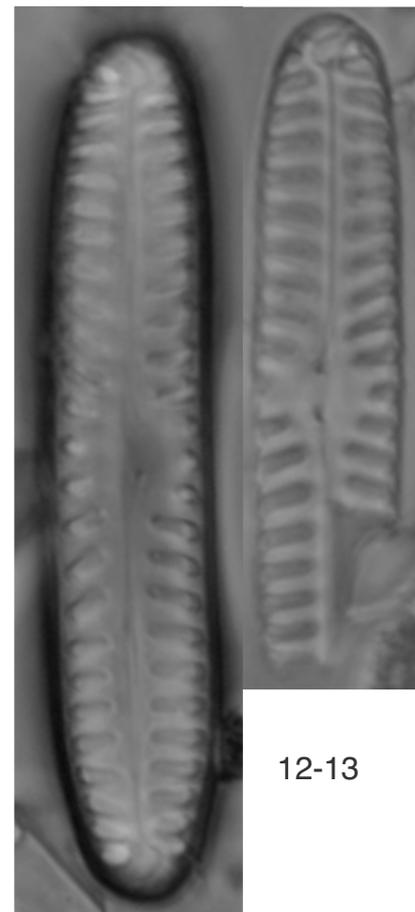
10



14

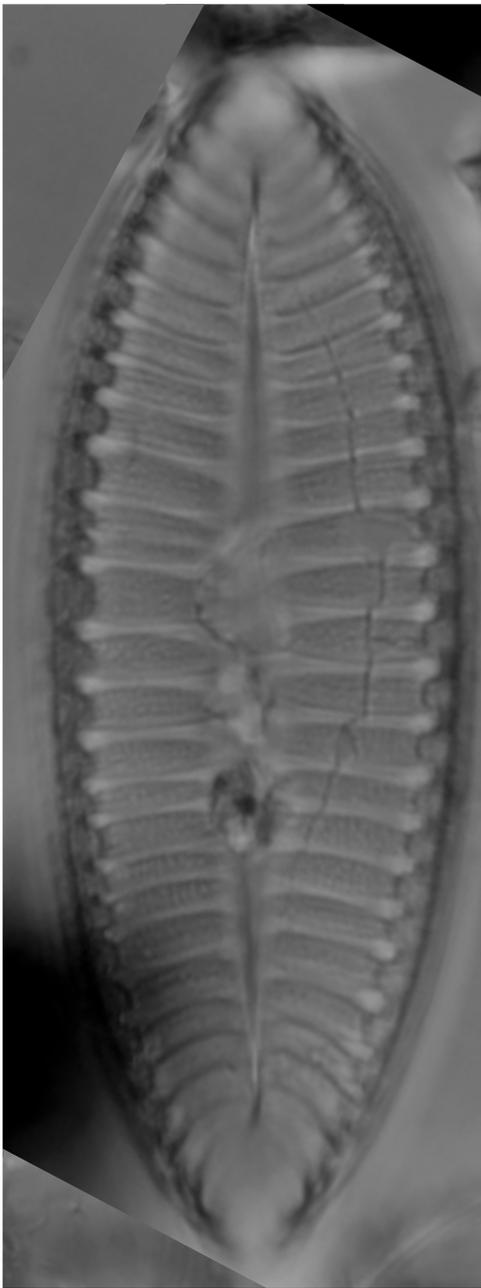


15

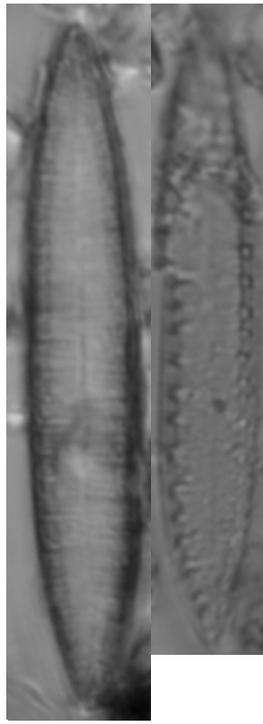


12-13

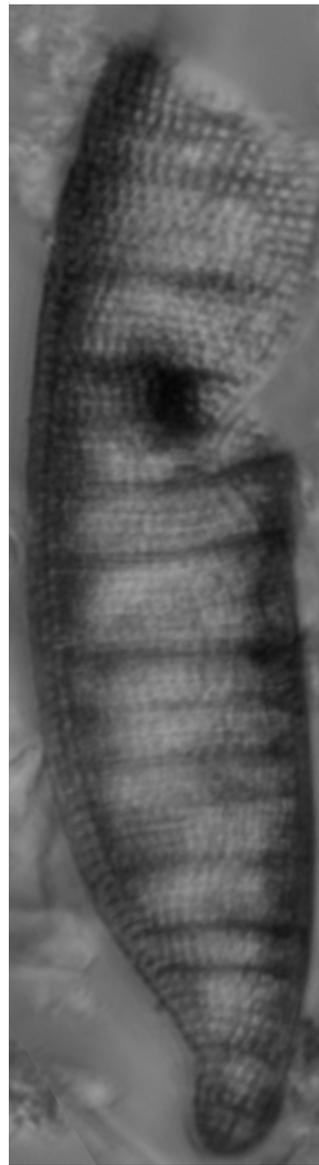
1. *Hantzschia abundans*; 2-3 *Hantzschia amphyoxyis*; 4 *Hantzschia compacta*; 5 *Cymbella tumida*; 6 *Pinnularia* sp2; 7 *Pinnularia* sp1; 8-9 *Caloneis* sp1; 10 *Pinnularia saprophilum*; 11 *Pinnularia* sp1; 12-13 *Pinnularia borealis* var. *subislandica*; 14 *Pinnularia borealis* var. *islandica*; 15 *Pinnularia borealis* var. *borealis*;



1



2-3



4

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

## Bibliografía

- Aguirre Mendoza, Z. (2013). *Guía de métodos para medir la biodiversidad*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Bae, H., Ahn, I.-Y., Park, J., Song, S., Noh, J., Kim, H., & Khim, J. (2021). Shift in polar benthic community structure in a fast retreating glacial area of Marian Cove, West Antarctica. *BMC*.
- Blanco, S., Olenici, A., Ortega, F., & Jimenez Gomez, F. (2020). Identifying environmental drivers of benthic diatom diversity: the case of Mediterranean mountain ponds. *PeerJ*.
- Buda, J., Lokas, E., Pietryka, M., Richter, D., Magowski, W., S. Lakovenko, N., . . . Zawierucha, K. (2020). Biotope and biocenosis of cryoconite hole ecosystems on Ecology Glacier in the maritime Antarctic. *ELSEVIER*.
- Bullard, J., Baddock, M., Bradwell, T., & Crusius, J. (2016). High latitude dust in the earth system: high latitude dust in the earth system. *AGUPUBLICATIONS*.
- Cáceres, B. (2015). Dramatical reduction of Cotopaxi Glaciers during the last volcano awakening. *Researchgate*.
- Chamorro, S., Moyón, J., Araya, F., Salazar, J., Navarro, J., Bécares, E., & Blanco, S. (2021). The ecology of diatoms inhabiting cryoconite holes in Antisana Glacier, Ecuador. *Journal of Glaciology*.
- Cook, J., Edwards, A., & Takeuchi, N. (2016). Cryoconite: The dark biological secret of the cryosphere. *Progress in Physical Geography*.
- Edwards, A. (2020). Glacier ecosystems. *Glaciers and Glaciation in Antártica and beyond*.
- Espin, P., Sierra, D., Mothes, P., Hidalgo, S., & Telenchana, E. (2017). Volcán Cotopaxi: Breve resumen de su historia, actividad eruptiva y amenazas potenciales . Quito: Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional.

# CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

- ECS-European Committee for Standardization (2003) ECS. Water quality guidance standard for the routine sampling and pretreatment of benthic diatoms from rivers. [http://www.safrass.com/partners\\_area/BSI%20Benthic %20diatoms.pdf](http://www.safrass.com/partners_area/BSI%20Benthic%20diatoms.pdf).
- Fritz , S. C., Brinson, B. E., Billups, W., & Thompson, L. G. (2014). Diatoms at < 5000 meters in the Quelccaya Summit Dome Glacier, Perú. *Artic, Antartic and Alpine Research*.
- Gallagher, E., & Legendre, P. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Researchgate*.
- Galvan Villa, C. (2015). Estructura de los ensamblajes de peces arrecifales de tres áreas marinas protegidas del Pacífico mexicano. *Researchgate*.
- Garcia, E. L., Rodriguez, I. L., Alcazar, P., & Cid, C. (2019). Microbial Communities in Coastal Glaciers and Tidewater Tongues of Svalbard Archipelago, Norway. *Frontiers in Marine Science*.
- Gazzano, I., & Graf, E. (2006). *Ecología agraria* . Buenos Aires.
- Gonzalez-Paz, L., Comesaña, M., Pardo, I., Barquín, J., Goldenberg Vilar, A., & Delgado , C. (2022). Variability of diatom community composition and structure in mountain streams. *Springer*.
- Hall, M., & Mothes , P. (2007). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Springer*.
- Hamilton, T., & Havig, J. (2016). Primary productivity of snow algae communities on stratovolcanoes of the Pacific Northwest. *Wiley gebiology*.
- Hamsher, S., Kateriña, K., Kociolek, P., & Van de Vjver, B. (2016). The genus *Nitzschia* on the South Shetland Islands and James Ross Island. *Researchgate*.
- Hodson, A., Anesio, A., Tranter, M., Fountain, A., Osborn, M., Priscu, J., . . . Sattler, B. (2008). Glacial Ecosystems. *Ecological Society of America*.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

- Juárez - Agis, A., Herrera Castro, N., Martínez y Pérez, J., & Reyes Umaña, M. (2007). Diversidad y estructura de la selva mediana subperennifolia de Acapulco, Gro., México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*.
- Kelly, M., Mann, D., & Duchoslav, M. (2008). Ecological variation within Sellaphora species complexes (Bacillariophyceae): Specialist or generalist. *Researchgate*.
- Krzysztof , Z., Jakub, B., Karel, J., Daniel, S., & Nozomu, T. (2018). Glacier animals and their importance in Glacial Ecosystems. *ads*.
- Legendre, P., & Legendre, L. (2003). *Numerical Ecology*. Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE B.V.
- Levkov, Z., Krstic, S., Nakov, T., & Lj, M. (2005). Diatom assemblages on Shara and Nidze Mountains, Macedonia. *Researchgate*.
- Liu, X., Han, J., Li, Y., Zhu, B., Li, Y., & Pan, K. (2022). Benthic Diatom Community and Its Relationship With Environmental Factors in the Yellow River Delta. *Frontiers in Marine Science*.
- López Gonzáles, E., & Ruiz Soler, M. (2011). Análisis de datos con el Modelo Lineal Generalizado. Una aplicación con R. *Revista Española de Pedagogía*, 59-65.
- López, W., & Duque, A. (2010). Patrones de diversidad alfa en tres fragmentos de bosques montanos en la región norte de los Andes, Colombia. *Revista de Biología Tropical*.
- Lotter, A., & Bigler, C. (2000). Do diatoms in the Swiss Alps reflect the length of ice-cover? *Springer link*.
- Lozano Duque, Y., Vidal, L., & Navas, G. (2010). Listado de diatomeas (Bacillariophyta) registradas para el mar Caribe Colombiano. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*.
- Mueller, D., Vincent, W., Pollard, W., & Fristen, C. (2001). Glacial cryoconite ecosystems: a bipolar comparasion of algal communities and habitats. *Nov Hedving Beih*.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

- Muñoz - López, C., & Rivera - Rondón, C. (2022). Diatom response to environmental gradients in the high mountain lakes of the Colombia's Eastern Range. *Springer*
- Rámirez, A. (2008). Perifitic Diatoms in Different Reach of Two Lotic Systems in High (Páramo de Santurbán , Norte de Santander, Colombia) and their relation with environmental variables. *Researchgate*.
- Rusanov, A., & Stanislavskaya, E. (2012). Periphytic algal assemblages along environmental gradients in the rivers of the Lake Ladoga basin, Northwestern Russia: implication for the water quality. *Springer*.
- Salleh, S., & McMinn, A. (2021). Response of tropical marine benthic diatoms exposed to elevated irradiance and temperature. *Biogeosciences Discussions*.
- Sklenár, P., Kovár, P., Palice, Z., & Stancík, D. (2010). Primary succession of high altitude Andean vegetation on lahars of Volcan Cotopaxi, Ecuador. *Researchgate*.
- Souffreau, C., Vanormelingen, P., Van de Vijver, B., Isheva, T., Verleyen, E., Sabbe, K., & Vyverman, W. (2013). Molecular Evidence for Distinct Antarctic Lineages in the Cosmopolitan Terrestrial Diatoms *Pinnularia borealis* and *Hantzschia amphioxys*. *ELSEVIER*.
- Stanish, L., Bagshaw, E., McKnight, D., Fountain, A., & Tranter, M. (2013). Environmental factors influencing diatom communities in Antarctica cryoconite holes. *Environmental Research*.
- Stibal, M., Sabacká, M., & Katovska, K. (2006). Microbial communities on glacier surfaces in Svalbard: impact of physical and chemical properties on abundance and structure of cyanobacteria and algae. *Springer*.
- Stibal, M., Telling, J., Cook, J., Mak, K., Hodson, A., & Anesio, A. (2011). Environmental controls on microbial abundance and activity on the Greenland Ice Sheet: a multivariate analysis approach. *PubMed*.

## CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

- S. Lee, S., Bishop, I., Spaulding, S., Mitchell, R., & Yuan, L. (2019). Taxonomic harmonization may reveal a stronger association between diatom assemblages and total phosphorus in large datasets. Environmental Protection Agency.
- Takeuchi, N., Koshima, S., Goto-Azuma, K., & Koerner, R. (2001). Biological characteristics of dark colored material (cryoconite) on Canadian Arctic glaciers (Devon and penny ice caps). *Memories of the National Institute of Polar Research*.
- Takeuchi, N., Sakaki, R., Uetake, J., Nagatsuka, N., Shimada, R., Niwano, M., & Aoki, T. (2018). Temporal variations of cryoconite holes and cryoconite coverage on the ablation ice surface of Qaanaaq Glacier in northwest Greenland. *Annals of Glaciology*.
- Vinšová, P., Pinseel, E., Kohler, T., & Van de Vijver, B. (2015). Diatoms in cryoconite holes and adjacent proglacial freshwater sediments, Nordenskiöld glacier (Spitsbergen, High Arctic). *Researchgate*.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., . . . Sicart, J. (2018). Rapid decline of snow and ice in the Tropical Andes - Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth Science*.
- Wetzel, C., Juttner, I., Gurung, S., & Ector, L. (2019). Analysis of the type material of *Achnanthes minutissima* var. *macrocephala* (Bacillariophyta) and description of two new small capitate *Achnanthidium* species from Europe and the Himalaya. *Researchgate*.
- Yong Ha, S., In Young, A., Hye - Won, M., Choi, B., & Shin, K. (2019). Tight trophic association between benthic diatom blooms and shallow-water megabenthic communities in a rapidly deglaciated Antarctic fjord. *ELSEVIER*.
- Zambrano, R. (10 de mayo de 2021). Microalgas en glaciares de Ecuador son bioindicadores de calidad de agua. *El Universo*.

## **CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE DIATOMEAS EN CRIOCONITAS DEL GLACIAR NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI**

Zawierucha, K., Kolicka, M., Takeuchi, N., & Kaczmarek, L. (2014). What animals can live in cryoconite holes? A faunal review. *ZSL*.

Zeppilli, D., Mea, M., Corinaldesi, C., & Danovaro, R. (2011). Mud volcanoes in the Mediterranean Sea are hot spots of exclusive meiobenthic species. *Researchgate*.

Zornoza, A. (2015). *Metodología para la búsqueda de microorganismos bioindicadores en fangos activos: la desesperación en la búsqueda del modelo*. Sevilla: Academia.