

**BAJO RECAMBIO DE TAXA EN LA SUCESIÓN
ESTACIONAL DEL FITOPLANCTON EN LAGUNAS
PATAGÓNICAS DE BAJA PROFUNDIDAD, CASO
LAGUNA ESPEJO.**

Tesis

**Entregada A La
Universidad De Chile
En Cumplimiento Parcial De Los Requisitos
Para Optar Al Grado De**

Magister en Ciencias Biológicas

Facultad De Ciencias

Por

Mariella Olcese Rojas, noviembre 2023

Director de Tesis:

Prof. Irma Vila Pinto

Co-Director de tesis:

Pablo Rojas Figueroa

INFORME DE APROBACIÓN

TESIS DE MAGÍSTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias que la Tesis de Doctorado presentada por la candidata.

Mariella Olcese Rojas

Ha sido aprobada por la comisión de Evaluación de la tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias Biológicas, en el examen de Defensa Privada de Tesis rendido el día

Director de Tesis:
Prof. Irma Vila Pinto

Codirector De Tesis
Dr. Pablo Rojas Figueroa



Comisión de Evaluación de la Tesis

Dra. Alejandra González Vásquez

Dra. Carezza Botto Mahan

Dedicada a mis padres, a Claudia González por creer siempre en mí, y en memoria de mi abuelita Eva, también a todos los que practican ciencia con amor.

*Más vale tener amigos
que plata.*

BIOGRAFÍA



Nací el 26.05.98 y crecí en Futaleufú, con mi padre. La curiosidad me acercó a la biología y el azar me llevó a realizar mi pregrado en la Universidad de Chile. Mis primeras prácticas fueron en el laboratorio de Ecofisiología Animal, con gente maravillosa, donde conocí a mi tutora de la vida. Luego conocí al profesor Patricio Contreras Avaria, quien despertó mi interés en los sistemas acuáticos, finalmente tomé el programa de Magíster en ciencias biológicas en el laboratorio de Limnología, el cual me permitió aprender, viajar y conocer gente maravillosa, acá, en España y en el territorio vecino, de quienes aprendí mucho y compartí bellos momentos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a mi cotutor quien me enseñó mucho de diversidad y guió en el escrito, dedicándome tiempo, siempre respondió a mis dudas, y agradezco su paciencia, fue esencial. También a mi tutora, por apoyarme hasta el final del proyecto, financiar parte de él, gracias por su paciencia y correcciones.

Le agradezco a Miguel Cañedo-Arguelles del Idaea-CSIC por permitirme participar en sus proyectos durante este período, en los cuales tuve el privilegio de trabajar con personas muy especiales como Carlos Barata, con quien compartí crianza de *Daphnias* y aprendí técnicas de laboratorio. También le agradezco invitarme a participar en la primera campaña del proyecto BIOACUANA, donde aprendí técnicas de muestreo, entre otras cosas, y conocí a personas espectaculares (José María Fernández, Raúl Acosta y Jérôme Latron), con quienes compartí bellos momentos.

Agradezco a mi amiga y tutora de la vida Dra. Carolina Contreras, quien ha sido un gran apoyo desde el pregrado, me ha dedicado su tiempo y ha sido una guía para todos mis procesos.

También a Claudia González, quien me brindó mucho apoyo, junto con Úrsula Romero, quien cooperó en la logística, me enseñó identificación de algas y otras técnicas esenciales.

Gracias a quienes me acompañaron a muestrear, entre ellos mi papá, Vianne, Catalina, Guille, Jo y Margarita.

Por la facilitación de material, agradezco a Lydia Blanchet de la fundación Riverkeeper y Cristian Obando, también a mi amiga Javiera Bravo y a mi madre, que cooperaron en logística.

Le agradezco a mi amiga Indira Uribe por enseñarme a elaborar mapas. A mi amigo Manuel Llanos, Constanza Becerra y Pablo Razzeto por compartir sus conocimientos conmigo.

Estoy agradecida de haber conocido desde el lado argentino de la cueca a Luis Epele y su compañera Dani, quienes fueron un apoyo con su buena disposición y cooperación en esta etapa.

Agradezco a la secretaria Janet Guzmán, por su buena disposición y resolver mis dudas.

Y por último a mi madre que fue una gran compañera, mi amiga Sol y Angélica, que fueron un apoyo emocional en este proceso.

Quiero terminar con una frase que últimamente es mi mantra de vida, y refleja lo que ha sido esta etapa, un constante:

ÁNIMO EQUIPO!!!

ÍNDICE DE MATERIAS

1

INTRODUCCIÓN.....1

1.1

Hipótesis.....9

1.2

Predicciones.....9

1.3

Objetivos.....10

1.3.1

Objetivos

generales.....10

1.3.2

Objetivos

específicos.....10

2

METODOLOGÍA.....11

2.1

Área

de

estudio.....11

2.1.1

Clima.....11

2.1.2		Cuenca	
hidrográfica.....	12		
2.1.3		Ubicación	
sistema.....	13		
2.2	Colecta		de
muestras.....	14		
2.3	Variables fisicoquímicas y parámetros morfométricos		
.....	1		
7			
2.4		Variables	
biológicas.....	19		
2.5	Diversidad		α
.....	20		
2.6		Sucesión	
temporal.....	21		
2.7	Asociación de la abundancia del fitoplancton con las		
variables			
fisicoquímicas.....	22		
3			
RESULTADOS	23		
3.1			
Morfología.....	23		
3.2	Caracterización		física
.....	23		

3.2.1		Penetración
lumínica.....	23	
3.2.2		
Temperatura.....	24	
3.3		Caracterización
química.....	24	
3.3.1	Nitratos	y fosfatos
totales.....	24	
3.3.2	Concentración	de iones de
Hidrógeno.....	24	
3.3.3		
Conductividad.....	25	
3.4		Caracterización
biológica.....	25	
3.4.1	Composición	taxonómica y abundancia
absoluta.....	25	
3.5	Diversidad	α
.....	27	
3.6		Diversidad
β	30	
3.7	Asociación de variables ambientales con la abundancia del	
fitoplancton		
.....	32	
4 DISCUSION.....	34	

4.1	Diversidad	α
.....		34
4.2	Sucesión	
temporal.....		37
5		
CONCLUSIONES.....		42
6		
BIBLIOGRAFÍA.....		44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Características morfológicas de Laguna Espejo	
2022.....		23
Tabla 2:	Penetración lumínica durante las 4 estaciones del año en el	
sistema laguna Espejo.....		23
Tabla 3:	Temperatura del sistema durante las 4 estaciones del año	
2022.....		24

Tabla 4: Estimación del pH, en las distintas estaciones del año.....	24
Tabla 5: Estimación de la conductividad, en las distintas estaciones del año.....	25
Tabla 6: Abundancia absoluta (organismos/mL) de fitoplancton, para las cuatro estaciones del año.....	26
Tabla 7: Resultados PERMANOVA, composición del fitoplancton en 4 estaciones.....	28
Tabla 8: índice de disimilitud de Sorensen entre las 4 estaciones del año.....	31
Tabla 9: Índice de Simpson y anidamiento entre las 4 estaciones del año 2022.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Temperaturas mínimas y precipitaciones anuales históricas de la localidad de Futaleufú.....	12
Figura 2: Ubicación geográfica del sistema limnico Laguna Espejo.....	14
Figura 3: Mapa de la Laguna Espejo, mostrando la ubicación de los sitios de muestreo	16

Figura 4: Variación estacional de la riqueza de géneros de fitoplancton29

Figura 5: Índice de Shannon-Weaver, para la diversidad del fitoplancton, durante 4 estaciones del año 2022.....29

Figura 6: Índice de equitatividad de Pielou, para la distribución de la abundancia del fitoplancton, durante las 4 estaciones del año 2022.....30

Figura 7: Relación entre los géneros de fitoplancton y las variables ambientales, durante las 4 estaciones del año 2022.....

33

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Identificación taxonómica del fitoplancton.....	5
Figura A: Clase Cyanophyceae, A) <i>Anabaena</i> ; B) <i>Pseudoanabaena</i> ; C) <i>Lyngbya</i> ; D) <i>Microcystis</i> (40X).....	55
Figura B: Clase Euglenophyceae; A) <i>Phacus</i> ; B) <i>Euglena</i> (40X).....	55
Figura C: Clase Zygnematophyceae. A) <i>Spirogyra</i> ; B) <i>Mougeotia</i> ; C) <i>Cosmarium</i> ; D) <i>Staurastrum</i> ; E) <i>Gonatozydon</i> (40X).....	56
Figura D: Clase Bacillariophyceae. A) <i>Cocconeis</i> ; B) <i>Gomphonema</i> ; c) <i>Navicula</i> ; D) <i>Pinnularia</i> ; E) <i>Nitzschia</i> ; F) <i>Cymbella</i> ; G) <i>Encyonema</i> ; H) <i>Denticula</i> ; I) <i>Frustulia</i> (40X); J) <i>Eunotia</i> ; K) <i>Tabellaria</i> (20X).....	57
Figura E: Clase Chlorophyceae: A) <i>Ankistrodesmus</i> ; B) <i>Pediastrum</i> ; C) <i>Scenedesmus</i> ; D) <i>Monoraphidium</i> ; E) <i>Oedogonium</i> ; F) <i>Tetraedron</i> (40X).....	58
Figura F: Clase Xantophyceae, género <i>Tribonema</i> (40X).....	58
Figura G: Clase Mediophyceae, Género <i>Cyclotella</i> (40X).....	58
Figura H: Clase Treuboxiophyceae, género <i>Oocystis</i> (40X).....	59
Figura I: Clase Coscinodiscophyceae, género <i>Aulacoseira</i> (40X).....	59
Figura J: Clase Klebsormidiophyceae, género <i>Klebsormidium</i> (40X).....	59
Figura K: Clase Dinophyceae, género <i>Peridinium</i> (40X).....	60
Figura L: Clase Chrysophyceae, género <i>Dinobryon</i> (40X).....	60

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

β_{sim} = Índice de Simpson

β_{sor} = Índice de Sorensen

$^{\circ}C$ = Grados Celsius

H' = Índice de Shannon Weaver

J = Índice de Pielou

S = Riqueza

μS = Micro Simens

Z_m = Profundidad máxima

A = Área

C_{fb} = Clima oceánico templado

L = Longitud

LD = Límite detectable

ka = Kilo año

mm = Milímetro

m = Metros

mg = Miligramos

mL = Mililitro

N = Nitrógeno

PERMANOVA= Análisis de permutación de varianzas

PO_4 = Fosfatos

RDA= Análisis de redundancia canónica

RESUMEN

La sucesión del fitoplancton ha sido poco estudiada en sistemas dulceacuícolas patagónicos de baja profundidad. Con el objetivo de determinar la dinámica temporal de esta comunidad, se estudió la sucesión estacional anual del fitoplancton en la Laguna Espejo, un sistema de baja profundidad ubicado en la Patagonia chilena. Se predijo que la baja profundidad del sistema y la homogeneidad fisicoquímica en su masa de agua, conllevan a una alta similitud y bajo recambio de las comunidades del fitoplancton entre estaciones. Para determinar esto, se evaluaron los cambios composicionales del fitoplancton mediante la diversidad α y la sucesión estacional mediante la diversidad β , en su componente de recambio temporal. Nuestros resultados mostraron que la abundancia del fitoplancton se asoció principalmente con la temperatura y concordante a lo esperado el sistema presentó una baja diversidad β y recambio temporal. La Laguna Espejo, debido a su baja profundidad, difiere en los patrones de sucesión típicos descritos para sistemas templados y fríos como los lagos profundos Patagónicos. Esta información contribuye a la comprensión de la dinámica de las comunidades de fitoplancton en ecosistemas poco

profundos, abundantes en la zona y que albergan una biodiversidad única en la región más austral del continente sudamericano, la Patagonia chilena.

ABSTRACT

The succession of phytoplankton, the main primary producer of aquatic ecosystems, has been little studied in shallow Patagonian freshwater systems. With the objective of determining the temporal dynamics of this community, the annual seasonal succession of phytoplankton was studied in Laguna Espejo, a shallow system located in the Chilean Patagonia. We predicted that the low depth of the system leads to high similarity of phytoplankton communities and low turnover between seasons. To determine this, the compositional changes of phytoplankton were evaluated through α -diversity, and seasonal succession was determined through β -diversity, in its temporal turnover component. Consistent with that we expected, the system presented low β -diversity and temporal turnover. In addition, the results of this study showed that phytoplankton abundance was negatively associated with temperature. These results show that Laguna Espejo, due to its shallow depth, differs in the typical succession patterns described for temperate and cold systems such as deep Patagonian lakes. This information contributes to the understanding of the dynamics of

phytoplankton communities in shallow ecosystems, which are abundant in Patagonia and have a unique biodiversity in the southernmost region of the South American continent, the Chilean Patagonia.

1 INTRODUCCIÓN

La Patagonia chilena, se encuentra ubicada en la zona más austral del continente sudamericano. Esta se caracteriza por presentar una red hidrográfica compleja moldeada por eventos geológicos y climáticos del cuaternario, como el último máximo glacial hace 25 Ka (Caballero, 2020). El clima actual de esta región es templado oceánico (Cfb), influenciado por los vientos oceánicos del oeste, los cuales llevan las precipitaciones al continente, generando inviernos fríos y veranos con temperaturas promedio inferior a los 22°C (Sarricolea y col., 2017). La variación de temperatura anual, sumada a la historia geológica-climática de la zona, han promovido en la Patagonia un alto endemismo de su biota, especialmente en ecosistemas límnicos (Castilla y col., 2020). Sin embargo, este entorno natural, no está exento de la influencia de las actividades humanas como lo son la agricultura, ganadería, productos forestales y turismo (COREAL e Ilustre Municipalidad de Futaleufú, 2022; Serrano, 2022), actividades que potencialmente podrían repercutir en la calidad y diversidad de los sistemas límnicos.

Entre los ecosistemas límnicos más comunes en la zona, se encuentran los sistemas lénticos, comprendidos por lagos y lagunas, que se caracterizan por presentar un bajo o nulo flujo de sus aguas (García y col., 2016). Debido a su origen glaciario, suelen ser diluidos en iones, presentar baja conductividad (10-150 μ S), ser levemente ácidos o neutros (pH entre 6 a 7,5) (Perotti y col., 2005; Villanueva, 2012) y de carácter oligotróficos (i.e., baja producción primaria), presentando bajas concentraciones de fósforo y nitrógeno, lo cual se refleja en bajas concentraciones de clorofila a (Soto, 2002; Camacho y col., 2009).

Gran parte de las investigaciones limnológicas desarrolladas en la Patagonia se han centrado en lagos profundos ($Z_m > 30$ m) (Thomasson, 1964; Diaz, 1996; Reynolds, 2006), subestimando la importancia ecológica de las lagunas de baja profundidad, las cuales desempeñan un rol fundamental en la preservación de la biodiversidad, ya que numerosas especies dependen completamente de estos sistemas para su subsistencia, realizan ciclos vitales específicos en su entorno o migran a ellas en determinadas etapas de su vida (LePage, 2011; Brönmarky Hansson, 2005).

Una gran diferencia entre lagos y lagunas es la profundidad (García y col., 2016). En este sentido los sistemas de baja profundidad son más susceptibles a los cambios ambientales asociados a la estacionalidad, los cuales repercuten en las

características fisicoquímicas del agua (Perotti y col., 2005; Reynolds, 2006; Epele, 2014). En efecto, estos sistemas se caracterizan por presentar escasa estratificación térmica y baja variación de valores de pH, conductividad eléctrica y concentraciones de nutrientes en la columna de agua (Reynolds, 2006; Estrada, 2013; Epele, 2014; Zunino, 2018; Cabrera y col., 2022), siendo el viento un factor que contribuye fuertemente en la oxigenación y homogeneización de las masas de agua (Epele, 2014; Zunino, 2018).

La alta susceptibilidad que presentan los sistemas de baja profundidad a variar su fisicoquímica en la estacionalidad (Perotti y col., 2005; Reynolds, 2006; Epele, 2014), hace que sean ambientes propicios para comprender las respuestas ecosistémicas, siendo de utilidad para estudiar la respuesta de la biota ante cambios no solo asociados a la estacionalidad, sino que al cambio climático y producto de actividades antropogénicas (Gulati y col., 2007). Por un lado, los cambios físico químicos, determinan fuertemente la estructuración de las comunidades del fitoplancton (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigee, 2015), grupo de microorganismos fotoautótrofos que se caracterizan por su reducido o nulo poder de locomoción y contener pigmentos fotosintéticos como la clorofila a (Arocena, 2016). En este marco, los cambios de pH y la conductividad influyen en la tolerancia del fitoplancton (Stevenson y col., 1996; Escobar, 2020), mientras que la temperatura y

fotoperíodo, regulan la división celular y el crecimiento de estos individuos (Stevenson y col., 1996), siendo la incidencia de luz fundamental para la fotosíntesis, proceso mediante el cual el fitoplancton adquiere su alimento (Stevenson y col., 1996).

El fitoplancton es el principal productor primario de los sistemas lénticos Patagónicos, desempeñan un rol fundamental en la transferencia de energía a las diferentes redes tróficas (Wetzky y col., 2020; Rojas y col., 2021). Su impacto no se limita a lo local, ya que estos organismos contribuyen en ciclos biogeoquímicos esenciales, como el del fósforo, nitrógeno, sílice y carbono, además, al fijar este último, juega un rol crucial en la mitigación del cambio climático, siendo organismos claves en el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, por lo que estudiar su dinámica es necesario para abordar desafíos ambientales (Reynolds, 2006; Litchman y col., 2015; Arocena, 2016).

Las comunidades de fitoplancton presentes en ecosistemas lénticos patagónicos están constituidas principalmente por Cianobacterias (procariotas), Chlorophyta, Bacillariophyta, Cryptophyta, Chrysophyta, Euglenophyta y Dinoflagellata (Arocena, 2016). Los representantes de estos Phylum, presentan una variación ordenada y predecible en su abundancia y diversidad a nivel estacional, fenómeno denominado sucesión estacional, en este sentido, los cambios en la composición y

abundancia de los organismos en el tiempo se estudian mediante el recambio temporal, que evidencia el reemplazo de los organismos (Chase y col., 2011; Baeten y col., 2012; Dong y col., 2015), lo cual se relaciona directamente con fluctuaciones fisicoquímicas del agua (Unrein, 2001; Reynolds, 2006; Arocena, 2016).

Los cambios comunitarios del fitoplancton, son sobrellevados según la estrategia de vida y la tolerancia que poseen según sus rasgos distintivos (Arocena, 2016), siendo la temperatura una de las variables físicas más influyentes en la estructuración de las comunidades (Stevenson y col., 1996; Reynolds, 2006; Rodríguez, 2008), de hecho, estudios recientes comparan lagos andinos Patagónicos, dando cuenta que los que poseen menor temperatura, tienen una menor diversidad de fitoplancton, con respecto a los que poseen temperaturas más altas (Miserendino y col., 2023).

En relación con la sucesión del fitoplancton, en grandes lagos patagónicos esta se ve reflejada por un alto recambio de taxa (Díaz, 1994), y durante el verano dominan generalmente representantes de la Clase Chlorophyceae (Díaz, 1994). La alta representatividad de esta Clase en verano se debe a su alta eficiencia fotosintética y a la tolerancia de estrés térmico, mediante ajustes en su metabolismo enzimático (Reynolds, 1997). En otoño e invierno, aumenta la presencia de taxa de la Clase Bacillariophyceae (diatomeas) (Díaz, 1994; Perotti y col., 2005;

Reynolds, 2006; Sommer y col., 1986), organismos que presentan una rígida pared celular compuesta de sílice, la cual cumple como barrera de protección ante las bajas temperaturas de estos periodos, razón por la cual este grupo tiende a dominar en periodos fríos (Reynolds, 2006; Arocena, 2016). Por otro lado, en lagos andinos patagónicos también se ha evidenciado que, durante el invierno son abundantes los géneros pertenecientes al Phylum Dinoflagellata (dinoflagelados), los cuales, ante variaciones en las condiciones ambientales, pueden cambiar su modo de alimentación de fototrofía a heterotrofía (mixotrofía), adaptación que permite la proliferación de este grupo ante la reducción del fotoperiodo durante el invierno (Díaz, 1994). Finalmente, en primavera el incremento de temperatura y fotoperiodo desencadena un elevado crecimiento de taxa pertenecientes a las Clases Cryptophyceae y Bacillariophyceae, las que posteriormente son reemplazadas por el fitoplancton que predomina en verano (Sommer y col., 1986; Reynolds, 2006).

Si bien los patrones de sucesión del fitoplancton han sido descritos en lagos patagónicos, donde las diferencias de temperatura en la columna de agua suelen influir en los patrones de sucesión (Sommer y col., 1986; González de Infante y OEA, 1988; Díaz, 1994; Reynolds, 2006), los antecedentes de sucesión del fitoplancton en sistemas poco profundos ubicados en la Patagonia son escasos (Díaz, 1996). En este contexto,

estudios sobre la sucesión temporal del fitoplancton, en Lagunas poco profundas, permitirán proyectar cómo responden las comunidades acuáticas a cambios ambientales producto del cambio climático y el desarrollo económico en la región, reflejado en la productividad de los sistemas dulceacuícolas (Angeler, 2013; Yang y col., 2018).

En general, los cambios composicionales del fitoplancton durante la estacionalidad pueden ser estudiados mediante la diversidad α , que permite comprender las variaciones en la estructuración de las comunidades, considerando la abundancia y riqueza de los organismos (Moreno y col., 2011). En cambio, la sucesión estacional del fitoplancton ha sido estudiada mediante análisis de diversidad β (Martínez-Silva y col., 2016, Oviedo y col., 2016). La diversidad β fue sugerida por primera vez por Whittaker (1956), originalmente fue utilizada para medir el recambio de especies entre comunidades bajo un gradiente espacial. Sin embargo, tras décadas de avances en su comprensión, esta también puede ser analizada a escala temporal (Calderón-Patrón y col., 2012). Su valor está dado principalmente por dos componentes, la disimilitud derivada del recambio de taxa y la disimilitud derivada de la diferencia en el número de especies, correspondiente al anidamiento (Legendre, 2014; Baselga y Leprieur, 2015; Legendre, 2019).

Este estudio intenta determinar la sucesión anual del fitoplancton en un sistema patagónico de baja profundidad, Laguna Espejo, ubicado en la Décima Región de Chile, en la comuna de Futaleufú, el cual colinda con un poblado que ha tenido un aumento demográfico (Instituto Nacional de Estadística, 2019). Dado el vacío en la literatura con respecto a la sucesión del fitoplancton en sistemas poco profundos, junto con las características particulares de esta laguna, surge la interrogante sobre si: ¿Este sistema sigue el mismo patrón de sucesión que se observa en lagos de mayor profundidad en la zona?

Para determinar la dinámica estacional del fitoplancton, se evaluará si el sistema, sigue los patrones de sucesión que han sido descritos en sistemas que presentan clima templado y templado frío ubicados en la Patagonia, donde la principal diferencia entre este sistema y los que ya han sido descritos, radica en la homogeneidad de la masa de agua. Esta información es fundamental para comprender la dinámica comunitaria del fitoplancton, que refleja el funcionamiento y productividad de las lagunas Patagónicas de baja profundidad. Debido a que estos organismos son indicadores de la calidad de agua permitirán comprender los posibles impactos antropogénicos y consecuencias del cambio climático en estos sistemas acuáticos que albergan una biota única, brindan diversos servicios ecosistémicos a la

región y se ven amenazados por el crecimiento demográfico, presión antrópica y cambio climático.

1.1 Hipótesis

Debido a la baja profundidad del sistema Laguna Espejo, su masa de agua será homogénea, lo cual junto con la alta susceptibilidad a variar su fisicoquímica estacionalmente, repercutirá en la dinámica del fitoplancton, por lo que no seguirá los patrones de sucesión descritos para sistemas Patagónicos profundos.

1.2 Predicciones

La comunidad de fitoplancton entre las estaciones presenta una baja diversidad β temporal y en su componente de recambio temporal.

Los cambios en la diversidad α de las comunidades de fitoplancton, se relacionan principalmente con las variaciones de temperatura, pH y conductividad en la Laguna Espejo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general:

Determinar la sucesión estacional de la comunidad Fito planctónica, asociada a las variables ambientales de la Laguna Espejo, evaluando si cumple patrones descritos para sistemas templados y templados-fríos patagónicos

1.3.2 Objetivos específicos:

I. Analizar las variables fisicoquímicas del sistema Laguna Espejo, en las cuatro estaciones del año 2022.

II. Determinar la composición taxonómica, abundancia y diversidad del fitoplancton a nivel estacional de la Laguna Espejo.

III. Evaluar la relación entre la abundancia de las comunidades de fitoplancton de la Laguna Espejo con las variables fisicoquímicas a nivel estacional.

IV. Comparar el patrón de Laguna espejo con los patrones descritos para sistemas templados y templados-fríos patagónicos.

2 METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

2.1.1 Clima

Debido a su localización montañosa, la temperatura promedio invernal es de 7 °C y la pluviometría anual cercana a los 2000 mm. Según la clasificación de Köppen (1931), la Laguna Espejo, se sitúa en un clima templado oceánico, con ausencia de períodos secos, clasificado como Cfb, (Sarricolea y col., 2017). Las temperaturas mínimas y precipitaciones anuales entre los años 1960 y 2021, muestran una tendencia de aumento y disminución, respectivamente (Figura 1).

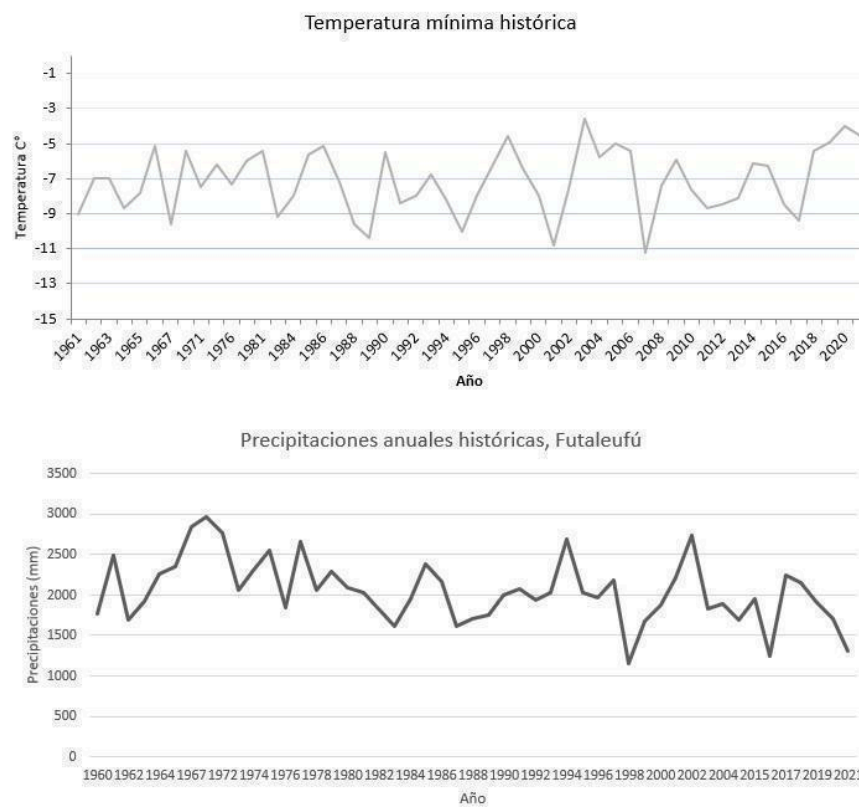


Figura 1: Temperaturas mínimas y precipitaciones anuales históricas de la Localidad de Futaleufú. Gráfico elaborado en base a los datos obtenidos en el sitio web de la Dirección Meteorológica de Chile, entre los años 1960 a 2021.

2.1.2 Cuenca hidrográfica

La Laguna Espejo, se encuentra en la cuenca hidrográfica binacional del Río Futaleufú, la cual nace en territorio argentino dentro del Parque Nacional Los Alerces y desemboca en el lago Yelcho, Chile (Tapia, 2014). La geomorfología fluvial presenta características torrenciales, encontrándose emplazada sobre cubetas rocosas de erosión glaciaria, que destacan entre el

relieve montañoso y corresponden al fondo del Valle de Futaleufú (Arias y col., 1996; COREAL e Ilustre Municipalidad de Futaleufú, 2022). La zona se caracteriza por sus formas de tipo artesa que han sido rellenados por materiales glaciares, dentro de los cuales existen meandros formados en las zonas de baja pendiente, destacando Laguna Espejo como parte de estos sistemas que poseen afluentes cortos y de alta pendiente, que aportan sus aguas cuando se presentan eventos de precipitación y derretimiento de nieve (COREAL e Ilustre Municipalidad de Futaleufú, 2022).

2.1.3 Ubicación sistema

El sistema Laguna Espejo ($43^{\circ}11'8.69''S$ - $71^{\circ}52'00'O$), se ubica en la comuna de Futaleufú, Provincia de Palena, Región de Los Lagos, Chile (Figura 2).

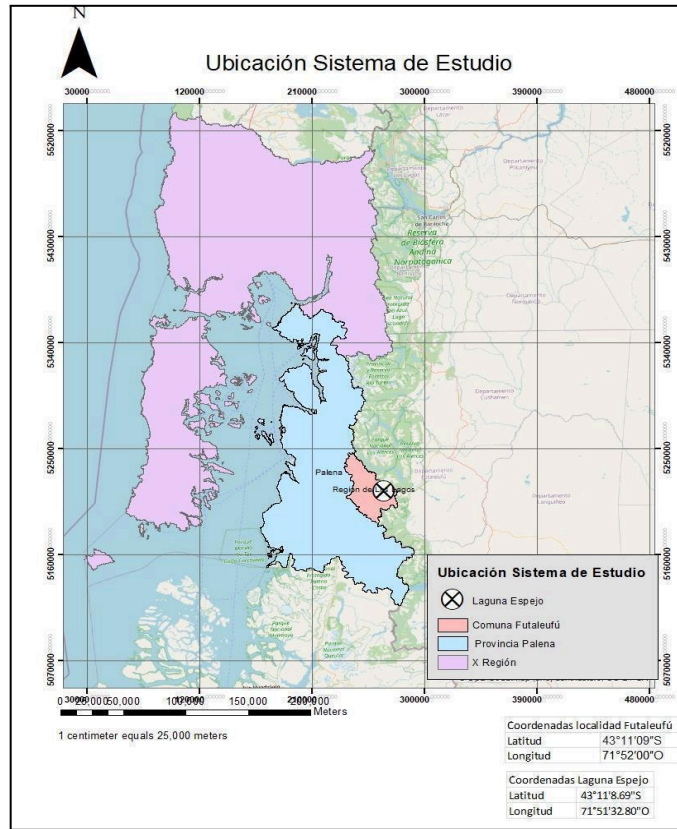


Figura 2: Ubicación geográfica del sistema límnic Laguna Espejo.

2.2 Colecta de muestras

Para caracterizar la calidad del agua y la diversidad de las comunidades de fitoplancton de la laguna Espejo, se recolectó 3 muestras de agua por temporada, con 3 réplicas obtenidas en tres puntos de la laguna con el fin de la representatividad en los datos (Figura 3), los que se detallan a continuación:

-Réplica 1 (R1): Correspondiente a un punto localizado cerca del pueblo, específicamente al lado de la costanera que es un área construida en el borde del sistema hídrico. Coordenadas $43^{\circ}11'5.55''S$ y $71^{\circ}51'37.19''O$.

-Réplica 2 (R2): Punto de muestreo más cercano a los arroyos que desembocan en la laguna. Coordenadas $43^{\circ}11'1.60''S$ y $71^{\circ}51'31.29''O$.

-Réplica (R3): Sitio de muestreo más cercano a la carretera y al único efluente de la Laguna. Coordenadas $43^{\circ}11'13.09''S$ y $71^{\circ}51'37.14''O$.

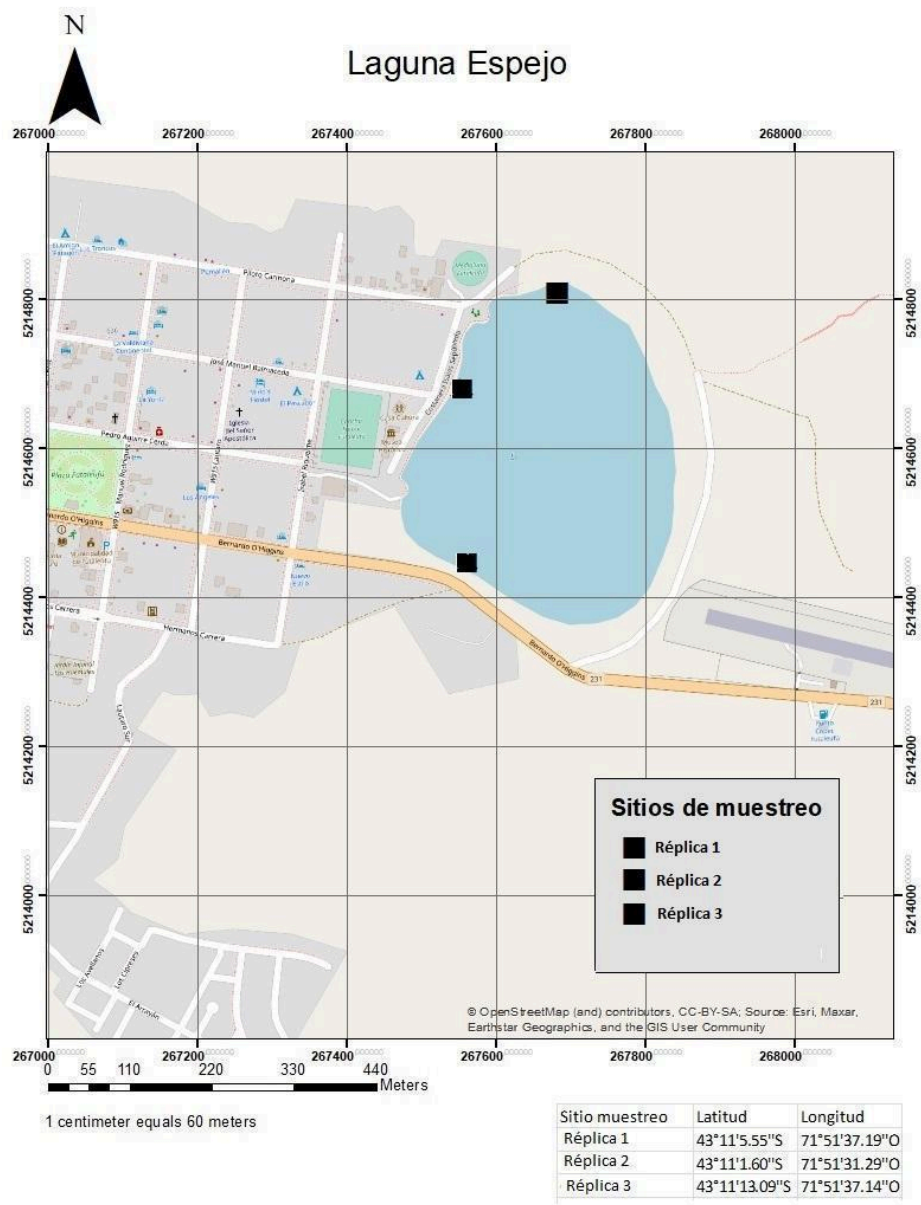


Figura 3: Mapa de la Laguna Espejo, mostrando la ubicación de los sitios de muestreo de este estudio (figuras cuadradas negras).

La frecuencia de muestreo se efectuó una vez en cada estación del año, lo que corresponde al verano, otoño, invierno y primavera del año 2022.

2.3 Variables fisicoquímicas y parámetros morfométricos de la Laguna Espejo

Para estimar la penetración lumínica, se utilizó un disco de Secchi de 30 cm de diámetro, el cual se sumergió en el centro del sistema, durante los 4 muestreos realizados, obteniendo una medida por estación. La temperatura del agua se midió con un termómetro digital Hanna Instruments de 0,1 °C de precisión, en el centro y orilla del sistema, durante las 4 estaciones. La conductividad de las 4 muestras fueron medidas, mediante un conductivímetro portátil (VWR). El pH se midió *in situ*, utilizando un papel indicador de pH (0-14) marca Hydrion® y corroborado con un pHmetro.

Para determinar nitratos y fosfatos totales se tomaron muestras de agua con volúmenes de 1L por cada muestra, durante los periodos verano-otoño e invierno-primavera, en dos sitios, orilla y centro de la laguna a una profundidad de 1 m, equivalentes a dos réplicas por cada periodo de muestreo. Las muestras de nitratos y fosfatos fueron analizadas por el laboratorio certificado Hidrolab de acuerdo con el método S.M. (4110B), basado en colorimetría, el cual mediante una digestión reductora, reduce el nitrato a nitrito, para luego reaccionar con N-aminoantrona, generando una coloración roja, para

posteriormente mediante absorbancia, estimar la concentración de nitrato. Por otro lado, el fosfato orgánico, mediante una digestión ácida, se convierte en fosfato inorgánico, posteriormente se añade ácido ascórbico y mobildato, los cuales reaccionan con los fosfatos formando fosfomolibdato, tornándose una coloración amarilla, para así mediante la técnica de absorbancia estimar la concentración de fosfatos (Baird y col., 2017).

Con respecto a los parámetros morfométricos de la laguna, no se encontró información bibliográfica, a pesar de la importancia ecológica y de los bienes y servicios de interés tanto hidrológico, ecológico, económico como social de la zona (Iwan y col., 2017). Ante esta situación se procedió a calcular algunos parámetros morfométricos mediante imágenes satelitales y en terreno, como área (A), longitud (L) y ancho (a), fueron medidos o calculados en base a mapas elaborados por el software qGIS, R y GoogleEarthPro (los Shapefiles de los mapas de Chile fueron adquiridos de la mapoteca de la web de la Biblioteca del Congreso Nacional).

El área (A) de la superficie de la laguna se calculó en base al área de un polígono generado digitalmente a través de imágenes satelitales. La longitud se midió en base a una recta que unió los dos puntos de la costa más alejados entre sí y que no cruzó ninguna porción de terreno. El ancho se determinó como la mayor distancia perpendicular a (L) entre los dos puntos de

la costa más alejados entre sí, sin cruzar ninguna porción de terreno (Arocena y Conde, 1999).

La profundidad máxima (Zm) del sistema se midió en la parte del centro de mayor profundidad (Figura 2), con una cuerda de polipropileno trenzado de 30 metros marcada cada 10 cm, a la cual se le añadió un peso cilíndrico de más de 6 kilos en uno de sus extremos.

2.4 Variables Biológicas

El muestreo de fitoplancton se realizó siguiendo el protocolo de Hötzel y Croome (1999), en cada muestreo, se obtuvo una muestra de 0,5 litros de agua subsuperficial, con sus 3 respectivas réplicas, las cuales fueron fijadas con una solución de Lugol y conservada en un frasco opaco, para su posterior identificación.

Las muestras de fitoplancton fueron analizadas utilizando una cámara de conteo Segdwick-Rafter y un microscopio óptico invertido trinocular marca Olympus modelo CK2. También se utilizó una cámara digital BMS conectada al microscopio la cual posee un aumento de 10x. La abundancia absoluta de la comunidad planctónica se expresó como cel/mL.

Las muestras de fitoplancton fueron concentradas debido a la escasez de organismos presentes. Para evitar el posible daño a las células o la disolución de colonias del fitoplancton producto de una centrifugación, se procedió a vaciar la muestra

(previamente homogenizada) en tubos Falcon de 15 mL y se dejó decantar durante 24h. Posterior a esto, se le extrajo el sobrenadante cuidadosamente quedando un volumen final de 3 mL de material sedimentado. La muestra de este material sedimentado fue puesta en la cámara Segdwick-Rafter. Para tener mayor representatividad de la muestra, se contaron los organismos presentes en 907 campos de la cámara de conteo a un aumento de 40x (Hötzel y Croome, 1999).

A fin de mantener un criterio uniforme en el conteo, se definió como unidad al individuo en su nivel de organización (célula, colonia o filamento), lo cual es recomendado para estudios de la comunidad fitoplanctónica (González, 2008; Arocena, 2016). Para la identificación taxonómica del fitoplancton se utilizaron claves de identificación de Parra (1982), Parra y Bicudo (1996), Biggs y Kilory (2000), Wehr y col. (2015), Guamán y González (2016), entre otros. Dada las constantes reubicaciones taxonómicas de las microalgas, se optó por realizar la clasificación de acuerdo con la base de datos online *Algaebase* (Guiry y Guiry, 2022).

2.5 Diversidad α

Para caracterizar la diversidad α de la comunidad fitoplanctónica, se calcularon los siguientes parámetros: riqueza, abundancia absoluta, diversidad de Shannon-Weaver y equidad de J Pielou, para cada estación del año. Los últimos 2

índices, fueron estimados mediante 999 permutaciones y con intervalos de confianza del 95% con la técnica bootstrap mediante el programa Past 4.1 (Hammer y col., 2001). Para establecer diferencias en la estructura del fitoplancton, entre las distintas estaciones, se realizó un análisis de varianza permutacional multivariado (PERMANOVA).

2.6 Sucesión temporal

La sucesión temporal de fitoplancton se determinó mediante el análisis diversidad β temporal, calculando el índice de disimilitud de Sorensen y recambio entre las comunidades de fitoplancton correspondiente a cada estación. El índice de Sorensen se calculó como: $\beta_{sor} = (b + c) \cdot (2a + b + c)^{-1}$ (Baselga, 2010). El recambio de especies se calculó utilizando el índice de Simpson, tal como lo describen Lennon y col. (2001). En ambos algoritmos, "a" = número de organismos comunes a ambos ensambles, "b"= número de organismos que ocurren en el primer ensamble, pero no en el segundo; y "c"= número de organismos que ocurren en el segundo ensamble, pero no en el primero (Koleff y col., 2003). Todos estos análisis se realizaron mediante la librería Betapart (Baselga y Orme, 2012) de R (R Development Core Team, 2016).

Se utilizó el método bootstrap para establecer si los valores observados en diversidad β y recambio temporal de las

comunidades de fitoplancton difieren del azar. Cada matriz, fue remuestreada aleatoriamente calculando los índices pseudovalores de diversidad β y recambio 1000 veces (Manly, 1992). Esto permitió analizar la distribución de los pseudovalores de Sorensen, recambio y anidamiento y calcular el valor percentil de los valores para cada par de las comunidades. Por lo tanto, los valores observados fuera de percentil <0.025 y >0.975 se consideraron significativos.

2.7 Asociación de la abundancia del fitoplancton con las variables fisicoquímicas

Para visualizar asociaciones entre las abundancias de los distintos géneros de fitoplancton y variables fisicoquímicas, se realizó un análisis de redundancia (RDA). Para estos análisis estadísticos se utilizó el software CANOCO 4.5 (Ter Braak y Smilauer, 2002).

3 RESULTADOS

3.1 Morfología:

La morfología del sistema límnic, cuenta con una profundidad máxima de 10,12 m, lo cual permite clasificarla como un sistema de baja profundidad (Tabla 1).

Tabla 1: Características morfológicas de Laguna Espejo 2022

L (m)	Ancho (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Zm (m)
450	315	1279	111021	10,12

3.2 Caracterización física

3.2.1 Penetración Lumínica:

La máxima penetración de luz fue en invierno de 6,7m, y la mínima en verano de 3,5 m (Tabla 2).

Tabla 2: Penetración lumínica durante las 4 estaciones del año en el sistema laguna Espejo.

	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
Penetración lumínica (m)	3,5	5,0	6,7	4,6

3.2.2 Temperatura:

La temperatura máxima en el borde y centro de la laguna fue de 22°C y 20°C, respectivamente. Las mínimas fueron en otoño previo al congelamiento del sistema, con mínimas de 1°C en el borde y 3°C en el centro (Tabla 3).

Tabla 3: Temperatura del sistema, durante las 4 estaciones del año 2022.

	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Temperatura aire (°C)	21	10	7	13
Temperatura borde (°C)	22	1	3	13
Temperatura centro (°C)	20	3	4	14

3.3.- Caracterización química

3.3.1 Nitratos y fosfatos totales

Los valores de nitratos y fosfatos totales fueron inferiores al límite detectable por los instrumentos, es decir, valores inferiores a 1 mg PO₄/L y 0,2 mg N/L, respectivamente.

3.3.2 Concentración de iones de Hidrógeno

El pH resultó ser levemente ácido con valores más bajos en invierno de 6,5 y más alto en verano de 6,8 (Tabla 4).

Tabla 4: Estimación del pH, en las distintas estaciones del año.

pH	R1	R2	R3	Promedio
Verano	7,0	6,3	7,1	6,8
Otoño	7,1	6,5	6,3	6,6
Invierno	7,2	6,0	6,2	6,5
Primavera	7,3	7,2	6,0	6,8

3.3.3 Conductividad:

La conductividad del sistema fue moderada a baja, los máximos valores de conductividad se obtuvieron en primavera con un promedio de 87,5 μ S, mientras que la menor conductividad fue obtenida en verano con un valor promedio de 58,3 μ S (Tabla 5).

Tabla 5: Estimación de la conductividad, en las distintas estaciones del año.

Estaciones	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Conductividad	58,3 -	85,2 -	63,8 -	87,5 -
(μS)	58,6	85,7	64,1	87,9
Promedio	58,45	85,45	63,95	87,7

3.4. Caracterización Biológica:

3.4.1 Composición taxonómica y abundancia absoluta:

La mayor abundancia se registró en invierno con 714,9 cel./mL, donde la mayor representatividad estuvo dada por el género *Nitzschia*, de la Clase Bacillariophyceae con 690,4 cel./mL (Tabla 6). La menor abundancia de fitoplancton se obtuvo en primavera con 48,02 cel./mL, la cual fue representada mayoritariamente por el género *Peridinium* de la Clase Dinophyceae con 23,5 cel./mL (Tabla 6).

Tabla 6: Abundancia absoluta (cel./mL) de fitoplancton, para las 4 estaciones del año.

Clase	Género	cel/mL			
		Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Bacillariophyceae	<i>Cocconeis</i>	4,410	0,490	1,960	0,000
	<i>Cymbella</i>	5,390	0,000	0,000	0,000
	<i>Denticula</i>	0,490	0,000	0,000	0,000
	<i>Encyonema</i>	2,940	0,000	0,490	0,000
	<i>Eunotia</i>	4,900	0,000	0,000	0,000
	<i>Frustulia</i>	3,920	0,490	1,470	4,900
	<i>Gomphonema</i>	0,980	0,000	0,980	0,490
	<i>Navicula</i>	18,621	0,490	7,350	1,960
	<i>Nitzschia</i>	36,261	3,920	690,432	5,390
	<i>Pinnularia</i>	19,111	4,900	0,000	0,000
	<i>Tabellaria</i>	11,270	0,490	1,960	1,960
Chlorophyceae	<i>Ankistrodesmus</i>	22,541	0,490	1,470	0,000
	<i>Monoraphidium</i>	1,960	0,000	0,000	0,000
	<i>Oedogonium</i>	12,250	0,000	0,980	0,000
	<i>Pediastrum</i>	0,490	0,000	0,000	0,000
	<i>Scenedesmus</i>	0,490	0,000	0,000	0,000
	<i>Tetraedron</i>	24,011	0,000	0,000	0,000
Chrysophyceae	<i>Dinobryon</i>	0,000	0,000	1,960	0,000
Coscinodiscophyceae	<i>Aulacoseira</i>	3,920	3,920	0,000	0,000
Cyanophyceae	<i>Anabaena</i>	5,390	0,000	0,000	0,000
	<i>Lyngbya</i>	0,980	0,490	1,960	5,390
	<i>Microcystis</i>	2,450	0,000	0,000	0,000
	<i>Pseudanabaena</i>	14,210	0,000	0,000	0,000
Dinophyceae	<i>Peridinium</i>	3,920	111,234	0,000	23,521
Euglenophyceae	<i>Euglena</i>	0,980	1,470	0,980	0,000
	<i>Phacus</i>	1,470	1,470	2,450	0,000
Klebsormidiophyceae	<i>Klebsormidium</i>	5,390	0,000	0,000	0,000
Mediophyceae	<i>Cyclotella</i>	15,681	3,920	0,490	0,000
Trebouxiophyceae	<i>Oocystis</i>	3,430	0,000	1,960	0,000
Xanthophyceae	<i>Tribonema</i>	0,490	0,000	0,000	0,000
Zygnematophyceae	<i>Cosmarium</i>	4,900	0,490	0,000	4,900
	<i>Gonatozygon</i>	38,221	0,000	1,960	0,980
	<i>Mougeotia</i>	13,720	0,000	0,000	0,000
	<i>Spirogyra</i>	1,470	0,000	0,000	0,000
	<i>Staurastrum</i>	7,350	0,000	0,000	0,000
Total		289,112	130,837	714,936	48,022

3.5 Diversidad α

La mayor riqueza, se registró en verano y estuvo dada por las Clases: Bacillariophyceae (11 géneros), Chlorophyceae (6 géneros), Zygnematophyceae (5 géneros), y Cyanophyceae (4 géneros), Euglenophyceae (2 géneros), Klebsormidiophyceae (1 género), Mediophyceae (1 género), Trebouxiophyceae (1 género), Xantophyceae (1 género), Dinophyceae (1 género), Coscinodiscophyceae (1 género), mientras que la Clase Chrysophyceae, solo fue representada por 1 género en invierno (véase Tabla 6 y Figura 5).

Para determinar entre qué estaciones hubieron diferencias de abundancia, se realizó un análisis PERMANOVA, el cual mostró diferencias significativas en la abundancia entre, verano y primavera ($p=0,037$); otoño e invierno ($p=0,031$) e invierno y primavera ($p=0,025$) (Tabla 7).

Tabla 7: Resultados PERMANOVA, abundancia del fitoplancton en 4 estaciones.

Grupos	T	P (perm)	Perms	P (MC)
Verano, Otoño	1,3986	0,091	10	0,141
Verano, Invierno	1,741	0,089	10	0,076
Verano, Primavera	2,0688	0,082	10	0,037
Otoño, Invierno	1,9089	0,099	10	0,031
Otoño, Primavera	1,5056	0,112	10	0,103
Invierno, Primavera	2,3963	0,095	10	0,025

Los cambios comunitarios indicaron una mayor diversidad y equitatividad durante el período de verano (véase Figuras 6 y 7), mostrando altos valores de diversidad de Shannon-Weaver, siendo máximo en la estación de verano con un valor de 3, mientras que en las estaciones siguientes disminuyó su valor, y fue mínimo en el invierno, con un valor inferior a 0,5, siendo la estación con menor diversidad. Por otro lado, la equitatividad de Pielou, presentó picos similares a los dados por el índice de Shannon, con valores cercanos a 1 en primavera y verano (véase Figura 7).

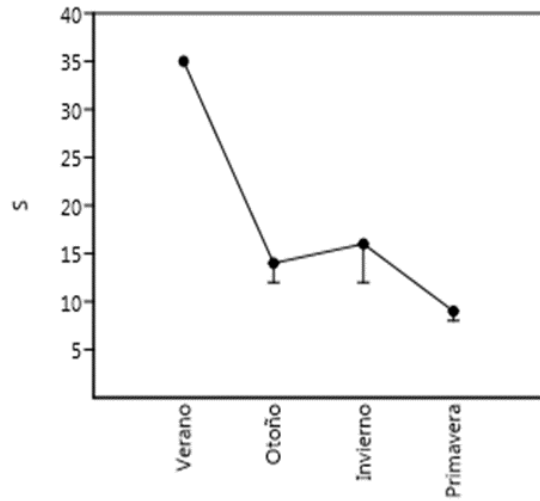


Figura 4: Variación estacional de la riqueza de géneros de fitoplancton.

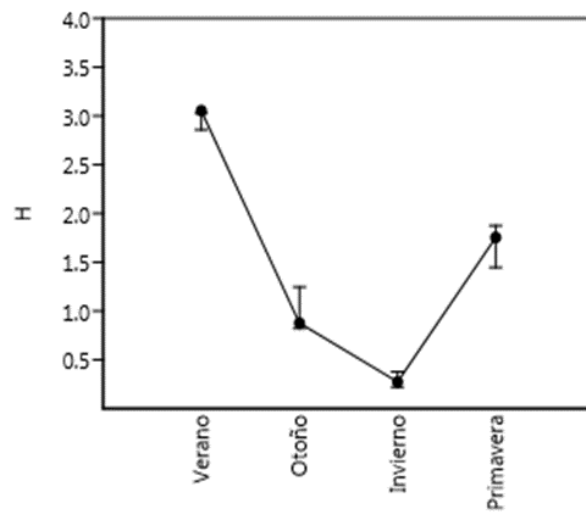


Figura 5: Índice de Shannon-Weaver, para la diversidad del fitoplancton, durante 4 estaciones del año 2022.

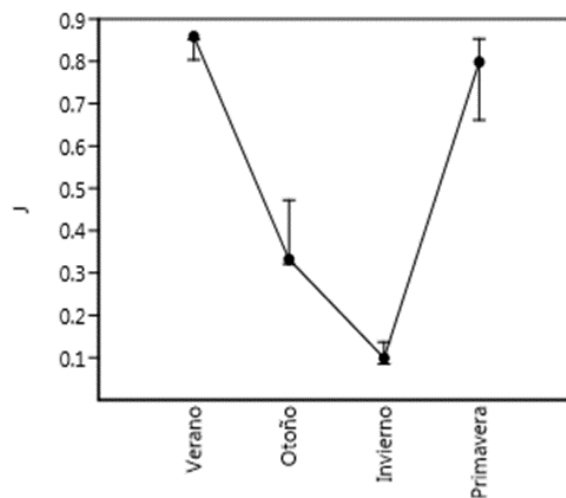


Figura 6: Índice de equitatividad de Pielou, para la distribución de la abundancia del fitoplancton, durante las 4 estaciones del año 2022.

3.6 Diversidad β

El índice de disimilitud de Sorensen, mostró una baja disimilitud en la composición de las comunidades durante las temporadas, siendo su valor máximo entre las temporadas verano-primavera 0,57, mientras que el mínimo se registró en las temporadas invierno-primavera con 0,125 (Tabla 8).

El índice de Simpson indicó un bajo recambio temporal, el cual fue mayor entre las estaciones de otoño-invierno, con valores de 0,4. En cambio, el menor recambio estuvo dado en las estaciones de verano-primavera e invierno-primavera, ambos con valor 0 (véase Tabla 9). Los índices de Simpson observados entre las estaciones no mostraron valores significativos en

relación con los pseudo valores calculados por bootstrap, en este sentido la diversidad β observada está dada por el componente del anidamiento y no por el recambio temporal (véase Tabla 9).

Tabla 8: Índice de Disimilitud de Sorensen entre las 4 estaciones del año 2022. Los números en negrita indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0,025$ o $P > 0,975$).

	β-Sorensen
Verano-Otoño	0,46
Verano-invierno	0,42
Verano-primavera	0,57
Otoño-Invierno	0,4
Otoño-Primavera	0,41
Invierno-primavera	0,12

Tabla 9: índice de diversidad β -simpson y anidamiento de los ensamblajes de fitoplancton de las 4 estaciones del año 2022. Los números en negritas indican diferencias significativas ($p < 0,025$ o $p > 0,975$).

	β -Sim	Anidamiento
Verano-otoño	0,13	0,32
Verano-invierno	0,07	0,35
Verano-primavera	0	0,57
Otoño-invierno	0,4	0
Otoño-primavera	0,22	0,19
Invierno-primavera	0	0,12

3.7 Asociación de variables ambientales con la abundancia del fitoplancton

Para determinar cómo se asociaron las variables ambientales con la abundancia del fitoplancton, se realizó un RDA, donde los resultados de este análisis mostraron que los tres primeros ejes explicaron el 45% de la variabilidad total. Los géneros *Cosmarium*, *Frustulia* y temperatura se asociaron y relacionaron negativamente con el eje 1, mientras que los géneros *Peridinium* y *Lyngbya*, se asociaron con las variables pH y conductividad eléctrica, respectivamente (Figura 8).

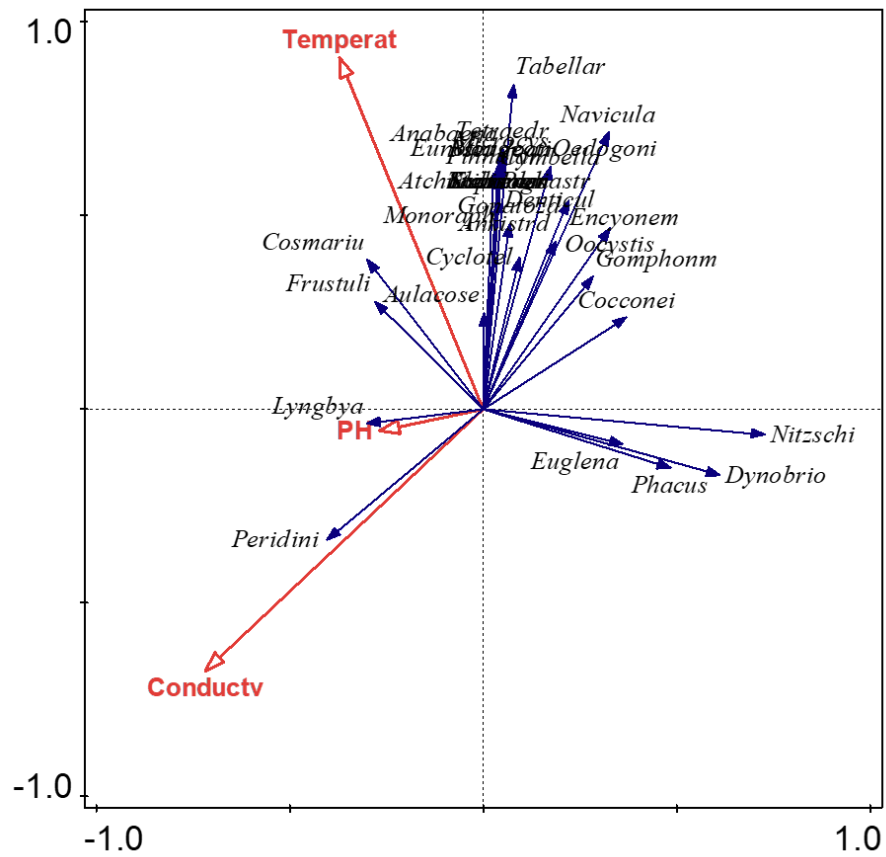


Figura 7: Relación entre los géneros de fitoplancton y las variables ambientales, durante las 4 estaciones del año 2022.

4 DISCUSIÓN

4.1 Diversidad α

Los sistemas acuáticos ubicados en la Patagonia suelen presentar una moderada a baja riqueza de fitoplancton, que tiende a disminuir en temporada invernal (Díaz, 1994; Bastidas y Díaz-Villanueva, 2004; Rodríguez y col., 2023). El sistema Laguna Espejo, reflejó este mismo escenario, presentando una riqueza máxima de 35 géneros en la temporada de verano. Además, durante esta temporada se observó una alta abundancia de los géneros *Mougeotia*, *Gonatozygon*, *Spirogyra*, *Tribonema* y *Klebsormidium*, que comparten la estrategia de formar colonias en suspensión, lo cual favorece la captación de luz ante la reducción de penetración lumínica (Arocena 2016; Bellinger y Sigee, 2015), producto del incremento de biomasa en verano, característico de los sistemas patagónicos (Campos, 1984; Díaz, 1994; De los Ríos y Soto, 2009; Epele, 2014), periodo en el que los valores de Secchi fueron menores.

En primavera, se registró una baja riqueza y abundancia de fitoplancton, sin embargo, la diversidad y equitatividad fueron altas, y la comunidad estuvo representada principalmente por géneros de estrategia de vida rápida, unicelulares y que suelen

encontrarse en sistemas con altas concentraciones de nutrientes, como, por ejemplo, los pertenecientes a la Clase Cyanophyceae (Bellinger y Sigee, 2015; Arocena, 2016).

En otoño se registró una baja riqueza, diversidad y equitatividad. La mayor representatividad estuvo dada por el género *Peridinium*, perteneciente a la Clase Dinophyceae, indicando dominancia de amiotrofia en el sistema, estrategia que utilizan los individuos para adquirir nutrientes de otros organismos ante condiciones adversas (Salmaso, 2003). Esto nos permite inferir que la homogeneidad de la laguna implicó que no se produjera el reciclado de nutrientes propio de sistemas patagónicos profundos que presentan estratificación (Thomasson, 1963; Díaz, 1994; Reynolds, 2006), reflejado además en la ausencia de un segundo pico de abundancia otoñal.

En el invierno, el sistema presentó baja riqueza, la menor diversidad y equitatividad de fitoplancton. La Clase más abundante estuvo dada por Bacillariophyceae, la cual tolera bajas temperaturas y baja disponibilidad lumínica (Pinilla, 2000; Salmaso, 2003), viéndose altamente favorecido el género *Nitzschia*. Como la tolerancia del fitoplancton está dada por una relación costo-beneficio (Stevenson y col., 1996), es probable que las condiciones ambientales de las temporadas otoño e invierno, hayan promovido la disminución de la diversidad del sistema, debido a que los costos de regulación no hayan podido ser compensados por los géneros que

predominaron durante los períodos de primavera y verano, razón por la cual la diversidad y equitatividad fueron considerablemente bajas en otoño e invierno. Cabe destacar que el sistema pasó por un periodo de congelamiento durante el otoño e invierno, lo cual implicó una disminución del flujo de nutrientes con zonas adyacentes, repercutiendo potencialmente en la diversidad (White, 1985).

Los cambios temporales en la estructuración de las comunidades fitoplanctónicas, se relacionan con las variables ambientales, las cuales actúan como un filtro que selecciona a los organismos tolerantes, con requerimientos de recursos y estrategias de vida similares (Stevenson y col., 1996; Salmaso 2003; Reynolds 2006). En el caso de lagunas poco profundas, la temperatura es una variable determinante en la composición de estas comunidades (Stevenson y col., 1996; Reynolds, 2006; Loewen y col., 2020; Zhang y col., 2021; Miserendino y col., 2023). En sistemas patagónicos, la variación de la temperatura promueve cambios en la diversidad y abundancia del fitoplancton (Díaz, 1994; De los Ríos y Soto, 2009; Miserendino y col., 2023). En la Laguna Espejo, si bien hubo cambios estacionales en la diversidad α , la temperatura mostró una asociación moderada y negativa con la abundancia del fitoplancton.

Respecto a otras variables ambientales medidas, como el pH y la conductividad eléctrica, que influyen en la composición del fitoplancton (Reynolds, 2006; Stevenson y col., 1996), en la

Laguna espejo se presentaron rangos similares a los observados en otros sistemas Patagónicos (Díaz, 1994; Bastidas y Díaz-Villanueva, 2004; Reynolds 2006; De los Ríos y Soto, 2009), y el análisis de redundancia canónica mostró una baja asociación de la conductividad eléctrica y el pH, con excepción de la abundancia de dos géneros, *Peridinium* y *Lyngbya*, respectivamente.

Los nitratos y fosfatos totales fueron inferiores al límite de detección en las temporadas de muestreo, esto sumado a la información de valores de penetración lumínica, pH, conductividad y composición fitoplanctónica del sistema, confirman que Laguna Espejo es de carácter oligotrófico (Vollenweider, 1968; Pinilla, 2000; Bellinger y Sigee, 2015).

4.2 Sucesión temporal

En sistemas acuáticos Patagónicos, la sucesión del fitoplancton suele verse reflejada por un alto recambio de organismos en las estaciones (Thomasson, 1963; Díaz, 1994; Reynolds, 2006), sin embargo, en el sistema de estudio, tanto la diversidad β como el recambio fueron bajos, y la principal componente de la diversidad β estuvo dada por el anidamiento, resultados esperados por las predicciones de nuestra hipótesis, demostrando que el sistema no sigue el patrón típico de sucesión establecido para sistemas patagónicos fríos y templados.

El anidamiento en la sucesión, indica que las comunidades presentes en las estaciones con menor riqueza, son un subconjunto de las comunidades presentes en las estaciones con mayor riqueza (Calderon-Patron y col., 2012), por lo que, las comunidades de la primavera, invierno y otoño son un subconjunto de la comunidad del verano, y este fenómeno se debe a la ausencia de especies o procesos de extinción/colonización, producidos por los cambios ambientales (Angeler, 2013)

Con respecto a la tolerancia y preferencia de hábitat, es probable que los géneros presentes en verano y primavera hayan logrado tolerar los cambios de temperatura del otoño e invierno debido a su capacidad de promover cambios autogénicos a nivel celular que les permitieron sobrevivir a estas condiciones extremas (Stevenson y col., 1996; Reynolds, 2006), promoviendo el bajo recambio temporal observado. En este sentido, registros recientes datan que, en sistemas fríos Patagónicos, cuando la diversidad es baja y los sistemas son anidados, la composición de fitoplancton suele ser altamente especializada (Miserendino y col., 2023). Los géneros presentes en Laguna Espejo, tanto en las temporadas con menor y mayor temperatura, estuvieron dados por los géneros *Nitzschia*, *Tabellaria*, *Lyngbya*, *Navicula* y *Frustulia*, y la mayoría de ellos pertenece a la Clase Bacillariophyceae, que suele dominar en sistemas oligotróficos y fríos (Pinilla 2000; Bellinger y Sigee, 2015), lo cual concuerda con las características del sistema, y es probable

que la Clase Bacillariophyceae, haya tenido una alta representación en su abundancia durante la mayoría de las temporadas, debido a su pared celular compuesta por sílice, que le proporciona una estructura rígida, brindando protección que las hace tolerar bajas temperaturas (Arocena, 2016). Además, la presencia de algunos géneros como *Cosmarium*, los cuales tienen la capacidad de enquistarse cuando las condiciones del medio son desfavorables, y de desenquistarse cuando son favorables (Arocena, 2006; Basterra y col., 2008), refuerza la idea de que la comunidad de fitoplancton del sistema es especializada.

En síntesis, el bajo recambio y la alta similitud de las comunidades de fitoplancton entre las temporadas, indica un comportamiento poco variable del sistema, dando cuenta de lo distinta que es la respuesta comunitaria a fluctuaciones ambientales, con respecto a sistemas de gran profundidad, donde la diversidad β y el recambio son altos (Thomasson, 1963; Reynolds, 2006; Sommer y col., 2012), donde pese a los cambios drásticos en la temperatura, no hubo un aumento del recambio temporal.

Los patrones de sucesión estacional observados en el sistema Laguna Espejo, muestran que es un sistema monótono, lo cual se reflejó en la baja diversidad β y recambio temporal, que, junto con la especialización de la biota, permiten deducir que cualquier perturbación ambiental podría afectar a las comunidades de fitoplancton, repercutiendo en la estabilidad y

funcionamiento del ecosistema debido al bajo recambio y su comportamiento anidado (Van der Maarel, 1993; Mackey y Currie, 2001). Esta información permitirá implementar medidas para resguardar la diversidad de los sistemas dulceacuícolas y comparar la dinámica de las distintas comunidades acuáticas de fitoplancton de la zona, que son de gran importancia para los ciclos biogeoquímicos y por los servicios ecosistémicos que brindan (Reynolds, 2006; Epele, 2014; Castilla y col., 2021).

Es necesaria la comprensión de la sucesión del fitoplancton en sistemas poco profundos de la Patagonia, ya que pese a la gran cantidad de lagunas presentes (Castilla y col., 2021), son escasas las investigaciones referidas a su sucesión (Thomasson, 1963; Diaz 1994), proceso de gran importancia, ya que influye directamente en la estructuración de las comunidades acuáticas (Reynolds, 2006; Wetzky y col., 2020). Además, el cambio climático, la disminución de las precipitaciones anuales y aumento de las temperaturas mínimas históricas, junto con el crecimiento demográfico y el aumento de las actividades económicas en la zona (Gallardo y Barra, 1997; Castilla y col., 2021, Dirección meteorológica de Chile, 2022), podrían potencialmente repercutir en las propiedades físico-químicas del agua, y generar la eutrofización de los sistemas, afectando la dinámica y diversidad de las comunidades de fitoplancton (Reynolds, 2006; Epele 2014; Castilla y col., 2021).

Para futuras investigaciones, es necesario utilizar instrumentos más sensibles, que permitan captar la variación de nutrientes en ambientes oligotróficos, también evaluar interacciones ecológicas como la herbivoría, ya que ambos factores influyen en la estructuración del fitoplancton, y determinan su diversidad y biomasa (Sommer y col., 1986; Reynolds, 2006) y el posible impacto antrópico en la dinámica de las comunidades acuáticas.

En síntesis, esta investigación fue fundamental para comprender la dinámica comunitaria del fitoplancton, lo que permitirá realizar comparaciones con sistemas que comparten el mismo escenario del creciente aumento de la población y cambio climático, y así apuntar a estrategias de conservación y preservación de la biodiversidad de las lagunas de la Patagonia chilena, lo que hace urgente el monitoreo continuo de la dinámica temporal del fitoplancton, a escala interanual, para determinar los posibles escenarios que afectarían ecosistemas de lagunas de baja profundidad de la Patagonia.

5 CONCLUSIONES

El sistema de baja profundidad Laguna Espejo, según su caracterización fisicoquímica y composición biológica, sería un sistema oligotrófico.

Las variables ambientales mostraron una relación moderada a baja con la abundancia de los géneros de fitoplancton, las cuales explicaron el 45% de la variación total, siendo la temperatura la variable que mostraba una mayor relación (inversa) con las abundancias, mientras que el pH y conductividad sólo se asociaron con dos géneros.

La diversidad presentó un pico en las temporadas de mayor temperatura, el cual decreció en las siguientes temporadas. Sin embargo, la diversidad β , indicó una alta similitud de la comunidad entre las temporadas, y no presentó un patrón de sucesión anual como se esperaría en un sistema de mayor profundidad.

No se rechaza la hipótesis, sugiriendo que la sucesión fitoplanctónica de Laguna Espejo no se comporta como la

descrita para otros sistemas patagónicos localizados en climas templados/fríos, ya que el principal componente de la diversidad β no estuvo dado por el recambio temporal. Por lo que es de esperarse que su composición fitoplanctónica esté adaptada a tolerar estas condiciones altamente variables, sobre todo de temperatura.

6 BIBLIOGRAFÍA

Angeler, D.G. 2013. Revealing a conservation challenge through partitioned long-term beta diversity: increasing turnover and decreasing nestedness of boreal lake metacommunities. *Diversity and Distributions*, 19(7), 772-781.

Arias, L., Pizzolón, L., y Martínez, O. 1996. Morfometría y geomorfología del lago Menéndez (Chubut, Argentina). *Naturalia patagónica. Ciencias de la tierra* 4: 1-16. Consultado el 29 oct. 2022. Disponible en http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/naturalia/coleccion/Primera_Epoca/Ciencias_de_la_Tierra/Naturalia%20Serie%20Ciencias%20de%20la%20Tierra%20Vol%204%201996.pdf

Arocena, R. 2016. Principios y métodos de limnología: Ejemplos de Uruguay. DIRAC, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo. 325 pp.

Arocena, R. y Conde, D. 1999. Métodos en ecología de aguas continentales. Con ejemplos de Limnología en Uruguay. Dirac, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo. 233 pp.

Baeten, L., Vangansbeke, P., Hermy, M., Peterken, G., Vanhuyse, K. y Verheyen, K. 2012. Distinguishing between turnover and nestedness in the quantification of biotic homogenization. *Biodiversity and Conservation*, 21, 1399-1409.

Baird, R., Rice, E., y Eaton, A. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewaters. *Water Environment Federation, Chair Eugene W. Rice, American Public Health Association Andrew D. Eaton, American Water Works Association.*

Baselga, A. y Leprieur, F. 2015. Comparing methods to separate components of beta diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(9), 1069-1079.

Baselga, A. y Orme, C.D.L. 2012. betapart: an R package for the study of beta diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(5), 808-812.

Baselga, A. 2010. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 19(1), 134-143.

Basterra, N.I., Neiff, J.J., y Casco, S.L., 2008. Manual de biodiversidad de Chaco, Corrientes y Formosa. *Universidad Nacional del Nordeste*. 346 pp.

Bastidas, M.A. y Diaz-Villanueva, V. 2004. Distribución espacial de las diatomeas en el fitoplancton de un lago somero andino patagónico. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 39, 33-40.

Bellinger, E.G. y Sigee, D.C. 2015. Freshwater algae: identification, enumeration and use as bioindicators. *John Wiley y Sons*. 271 pp

Biggs, B.J. y Kilroy, C. 2000. Stream Periphyton Monitoring Manual. New Zealand Institute Water and Atmosphere for the Ministry for the Environment, Christchurch, New Zealand. *Disponibile en http://www.niwa.co.nz/sites/default/files/import/attachments/peri_complet_e.pdf*

Brönmark, C. y Hansson, L.A. 2005. *The Biology of Lakes and Ponds* (2nd ed.). *Oxford University Press*. 285 pp

Caballero, V.I. 2020. Evaluando el papel de las glaciaciones pleistocénicas sobre la estructura filogeográfica de *Chilina* (Mollusca: *Chilinidae*) en la Patagonia Occidental. Disponible en <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/574>

Cabrera, M.E.C., Guerrero, W.O.P., García, R.S., Muñoz, G.D.T., y Jaramillo, D.M.A. 2022. Variabilidad en las concentraciones de fitoplancton y coliformes totales como indicadores de la calidad del agua del Río Milagro en Ecuador. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS-ISSN 2806-5794.*, 4(6), 490-506.

Calderón-Patrón, J.M., Moreno, C.E., y Zuria, I. 2012. La diversidad beta: medio siglo de avances. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(3), 879-891.

Camacho, A., Borja, C., Valero-Garcés, B., Sahuquillo, M., Cirujano, S., Soria, J. M, Rico, E., De La Hera, A., Santamans, A.C., García De Domingo, A., Chicote, A., y Gosálvez, R.U. 2009. 3110 Aguas oligotróficas con un contenido de minerales muy bajo (*Littorelletalia uniflorae*). En: VV.AA., *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Madrid. 61 pp.*

Campos, H. 1984. Productividad íctica de ríos y lagos araucanos. *Trabajos presentados al Taller Internacional sobre ecología y manejo de peces en lagos y embalses. Santiago, Chile, 5-10.*

Castilla, J.C., Armesto, J.J. y Martínez-Harms, M.J. 2021. Conservación en la Patagonia Chilena: Evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos. *Ediciones UC.*

CGA, Ingeniería y Consultores e Ilustre Municipalidad de Futaleufú. 2012. Actualización del Plan de Desarrollo (PLADECO) 2012-2017 de la comuna de Futaleufú. Consultado el 10 nov. 2022. Disponible en <https://www.futaleufu.cl/transparencia/doc5ZLkzx.pdf>

Chase, J.M., Kraft, N.J., Smith, K.G., Vellend, M. y Inouye, B.D. 2011. Using null models to disentangle variation in community dissimilarity from variation in α -diversity. *Ecosphere*, 2(2), 1-11.

COREAL Desarrollos Tecnológicos y Municipalidad de Futaleufú. 2022. Análisis del Plan Regulador Comunal de Futaleufú.

De los Ríos, P. y Soto, D. 2009. Estudios limnológicos en lagos y lagunas del Parque Nacional Torres del Paine (51° S, Chile). *Anales del Instituto de la Patagonia Vol.37(1)*: 63-71. Universidad de Magallanes.

Díaz, M.M. 1994. Fitoplancton de lagos Andino-Patagónicos: su relación con factores abióticos". (Tesis de Doctorado). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Dirección Meteorológica de Chile. 2022. Anuario Climatológico. Consultado el 9 sept. 2022. Disponible en <http://www.meteochile.gob.cl/>

Dong, X., Muneeppeerakul, R., Olden, J.D. y Lytle, D.A. 2015. The effect of spatial configuration of habitat capacity on β -diversity. *Ecosphere*, 6, 220

Epele, L.B. 2014. Comunidades de invertebrados acuáticos de mallines de Patagonia, bajo distintos niveles de antropización (Tesis de doctorado), Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.

Escobar, S.D. 2020. Determinación de microorganismos considerados indicadores biológicos de eutrofización en la laguna Huacracochoa Huancayo en el período abril a septiembre del año 2019.

Estrada, A.Y. 2013. Diagnóstico de la biodiversidad de los macroinvertebrados en cuatro sistemas lénticos de Zamorano. (trabajo para optar al título de ingeniería en ambiente y desarrollo). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/1701>

García, M., Vera, A., Benetti, C.J., y Blanco, L. 2016. Identificación y clasificación de los microhábitats de agua dulce. *Acta Zool. Mex.* 32(1): 12-31.

González, C. 2008. Sílice (SiO₂) en el embalse Peñuelas (V región, Chile). ¿Limitante para el crecimiento de diatomeas?. (Trabajo de título para optar al título de Biólogo con Mención en Medio Ambiente). Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

González de Infante, A. y OEA, W. 1988. El plancton de las aguas continentales. Secretaría general de la Organización de los estados americanos, programa regional de desarrollo científico y tecnológico. 128pp

Guamán M. y González, N. 2016. Catálogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador. Corporación para la Investigación Energética. Laboratorio de Biotecnología Energética, Quito. Disponible en https://www.academia.edu/39724165/CAT%C3%81LOGO_DE_MICROALGAS_Y_CIANOBIOTECNOLOGIA_ENERGICA_DE_AGUA_DULCE_DEL_ECUADOR

Guiry, M.D. y Guiry, G.M. 2022. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en <http://www.algaebase.org>.

Gulati, R.D., Lammens, E., DePauw, N., y Van Donk, E. (Eds.). 2007. Shallow lakes in a changing world: Proceedings of the 5th International

Symposium on Shallow Lakes, held at Dalfsen, The Netherlands, 5-9 June 2005 (Vol. 196). *Springer Science and Business Media*. 466pp.

Hammer, Ø., Harper, D.A., y Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontología Electrónica*, 4(1), 9.

Hötzel, G. y Croome, R. 1999. A phytoplankton methods manual for Australian freshwaters. *Land and Water Resources Research and Development Corporation*. 66pp

Instituto Nacional de Estadística (INE). 2019. División Político Administrativa y Censal Región de Los Lagos. Departamento de Geografía. Consultado el 15 oct. 2022. Disponible en <https://prcfutaleufu.cl/wp-content/uploads/2022/07/Resumen-Ejecutivo-IO.pdf>

Iwan, A., Guerrero, E.M., Romanelli, A, y Bocanegra, E. 2017. Valoración económica de los servicios ecosistémicos de una Laguna del sudeste bonaerense (Argentina). *Invest. Geogr.* 68: 173-189. Consultado el 26 oct. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.68.10>

Koleff, P., Gaston, K.J. y Lennon, J.J. 2003. Measuring beta diversity for presence-absence data. *Journal of Animal Ecology*, 72(3), 367-382.

Köppen W. 1931. The Climates of the Earth. *DeGruyter, Berlin*, p. 388 (in German).

Legendre, P. 2019. A temporal beta-diversity index to identify sites that have changed in exceptional ways in space-time surveys. *Ecology and Evolution*, 9(6), 3500-3514.

Legendre, P. 2014. Interpreting the replacement and richness difference components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 23(11), 1324-1334.

Lennon, J.J., Koleff, P., Greenwood, J.J.D. y Gaston, K.J. 2001. The geographical structure of British bird distributions: diversity, spatial turnover and scale. *Journal of Animal Ecology*, 70, 966-979.

LePage, B.A. 2011. Wetlands: Integrating Multidisciplinary Concepts (1st ed.). Springer. 261pp <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0551-7>

Litchman, E., de Tezanos Pinto, P., Edwards, K.F., Klausmeier, C. A., Kremer, C.T., y Thomas, M.K. 2015. Global biogeochemical impacts of phytoplankton: a trait-based perspective. *Journal of Ecology*, 103(6), 1384-1396.

Loewen, C.J., Wyatt, F.R., Mortimer, C.A., Vinebrooke, R.D., y Zurawell, R.W. 2020. Multiscale drivers of phytoplankton communities in north-temperate lakes. *Ecological Applications*, 30(5), e02102.

Mackey, R.L. y Currie, D.J. 2001. The diversity-disturbance relationship: is it generally strong and peaked? *Ecology*, 82(12), 3479-3492.

Manly, B.F. 1992. Bootstrapping for determining sample sizes in biological studies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 158(2), 189-196.

Martinez-Silva, P., Delgado-Fonseca, J.F., y Muñoz-Yustres, J.L. 2016. Diversidad de Géneros del Fitoplancton del embalse de Betania-Huila y su importancia como bioindicadores. *Revista Científica*, 25(2), 241-251.

Miserendino, M.L., Epele, L.B., Brand, C., Uyua, N., Santinelli, N., y Sastre, V. 2023. Uncovering aquatic diversity patterns

in two Patagonian glacial lakes: does habitat heterogeneity matter. *Aquatic Sciences*, 85(2), 52.

Moreno, C., Barragán, F., Pineda, E., y Pavón, N.P. 2011. Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(4), 1249-1261.

Oviedo, A.I.H., Marin, M., Henriquez, L., y Garay, M. 2016. Variación espacial y temporal de la diversidad y abundancia del fitoplancton del lago de Yojoa en un año hidrológico 2014-2015. *Revista Ciencia y Tecnología*, 40-77.

Parra, O.O., 1982. Manual Taxonómico del Fitoplancton de Aguas Continentales; con especial referencia al fitoplancton de Chile. Editorial de la Universidad de Concepción, Concepción. Vol. 1, 70 pp.

Parra, O.O. y Bicudo C. 1996. Algas de Aguas Continentales: Introducción a la Biología y Sistemática. Ediciones Universidad de Concepción. 268 pp.

Perotti, M.G., Diéguez, M.C. y Jara, F.G. 2005. Estado del conocimiento de humedales del norte patagónico (Argentina): aspectos relevantes e importancia para la conservación de la biodiversidad regional. *Revista Chilena de Historia Natural*, 78(4), 723-737.

Pinilla, G. 2000. Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.

R Development Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Reynolds, C.S. 2006. The ecology of phytoplankton. Cambridge University Press. 551pp

Reynolds, C.S. 1997. Vegetation processes in the pelagic: a model for ecosystem theory. Ecology institute. 371pp

Rodríguez, P., Garraza, G.G., López, R., Coronato, A., Mataloni, G., Granitto, M. y Veira, F. 2023. Caracterización limnológica, fitoplanctónica y batimétrica de un lago coloreado (Laguna Negra, Parque Nacional Tierra del Fuego, Argentina). *Ecología Austral*, 33(1), 285-299

Rodríguez, P.L. 2008. *Estructura y producción primaria del fitoplancton y perifiton en un humedal del bajo Paraná* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Rojas, B.M., Troccoli, L., y Díaz-Ramos, J.R. 2021. Bloom algal y abundancia de copépodos en el golfo de Cariaco, Venezuela (Caribe Suroriental). *Intropica*, 16(2).

Salmaso, N. 2003. Life strategies, dominance patterns and mechanisms promoting species coexistence in phytoplankton communities along complex environmental gradients. *Hidrobiología*, 502, 13-36.

Serrano, J.E. 2022. Modelo de negocios para una plataforma tecnológica que centraliza la oferta de turismo aventura en la comuna de Futaleufú. (Trabajo de titulación, para optar al título de ingeniero civil industrial) Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., y Meseguer-Ruiz, Ó. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.

Sommer, U., Adrian, R., De Senerpont Domis, L., Elser, J.J., Gaedke, U., Ibelings, B. y Winder, M. 2012. Beyond the Plankton Ecology

Group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession. *Annual review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 43, 429-448.

Sommer, U., Gliwicz, Z.M., Lampert, W., y Duncan, A. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*, 106(4), 433-471.

Soto, D. 2002. Patrones oligotróficos en lagos del sur de Chile: relevancia de los nutrientes y de la profundidad de mezcla. *Revista Chilena de Historia Natural* 75(2): 377-393.

Stevenson, R.J., Bothwell, M.L., Lowe, R.L., y Thorp, J.H. 1996. *Algal ecology: Freshwater benthic ecosystem*. Academic press.

Tapia, G. 2014 Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile. División de Estudios y Planificación. Ministerio de Obras Públicas. 54 pp.

Ter Braak, C.J. y Smilauer, P. 2002. *CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5)*. www.canoco.com.

Thomasson, K. 1963. Araucanian Lakes: Plankton studies in north Patagonia with notes on terrestrial vegetation. *Sv. växtgeografiska sällsk.*

Unrein, F. 2001. *Efecto de los nutrientes y el pH sobre el crecimiento y la estructura del fitoplancton en ambientes de la llanura aluvial del Paraná Inferior (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales)*.

van der Maarel, E. 1993. Some remarks on disturbance and its relations to diversity and stability. *Journal of Vegetation Science*, 4(6), 733-736.

Villanueva, E. 2012. Determinación de patrones biogeográficos de organismos zooplantónicos de Chile Continental. (Tesis de Magister) Universidad de Chile. Facultad de Ciencias. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/18867>

Vollenweider, R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. *Paris Rep*, 192, 14.

Wehr, J.D., Sheath, R.G. y Kociolek, J.P. 2015. Freshwater algae of North America: Ecology and Classification. *Academic Press, Cambridge*. 1066 pp.

Wetzky, V.C., Tittel, J., Jäger, C.G., Bruggeman, J. y Rinke, K. 2020. Seasonal succession of functional traits in phytoplankton communities and their interaction with trophic state. *Journal of Ecology*, 108, 1649-1663.

Whittaker, R.H. 1956. Vegetation of the Great Smoky Mountains. *Ecological Monographs* 26:1-80.

White P.S. 1985. Natural disturbance and patch dynamics: an introduction. En White PS, Pickett STA (eds.), *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. *Academic Press, Orlando, FL*, 313 pp.

Yang, Y., Hu, R., Lin, Q., Hou, J., Liu, Y., Han, B.P., y Naselli-Flores, L. 2018. Spatial structure and β -diversity of phytoplankton in Tibetan Plateau lakes: nestedness or replacement? *Hydrobiologia*, 808, 301-314.

Zhang, M., Shi, X., Chen, F., Yang, Z., y Yu, Y. 2021. The underlying causes and effects of phytoplankton seasonal turnover on resource use efficiency in freshwater lakes. *Ecology and Evolution*, 11(13), 8897-8909.

Zunino, J. 2018. Lagunas someras como ecosistemas centinelas de la variabilidad climática: respuesta de las comunidades fitoplanctónicas. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4391/tesis%20Zunino_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANEXO

ANEXO 1: Identificación taxonómica del fitoplancton

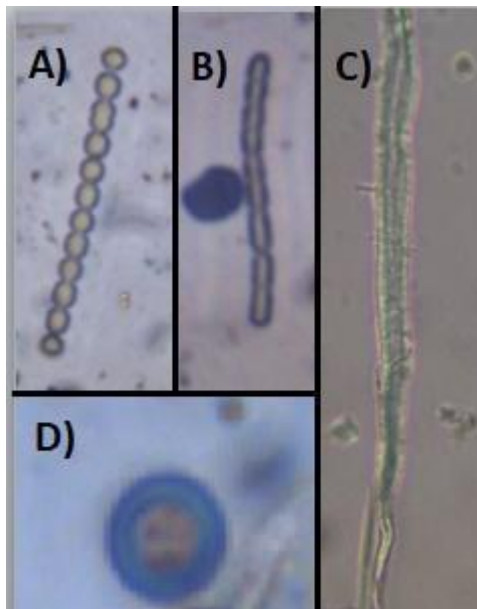


Figura A: Clase Cyanophyceae, A) *Anabaena*; B) *Pseudoanabaena*; C) *Lyngbya*; D) *Microcystis* (40X).

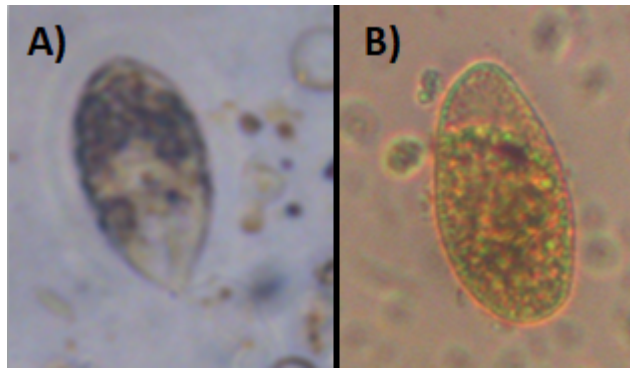


Figura B: Clase Euglenophyceae; A) *Phacus*; B) *Euglena* (40X).

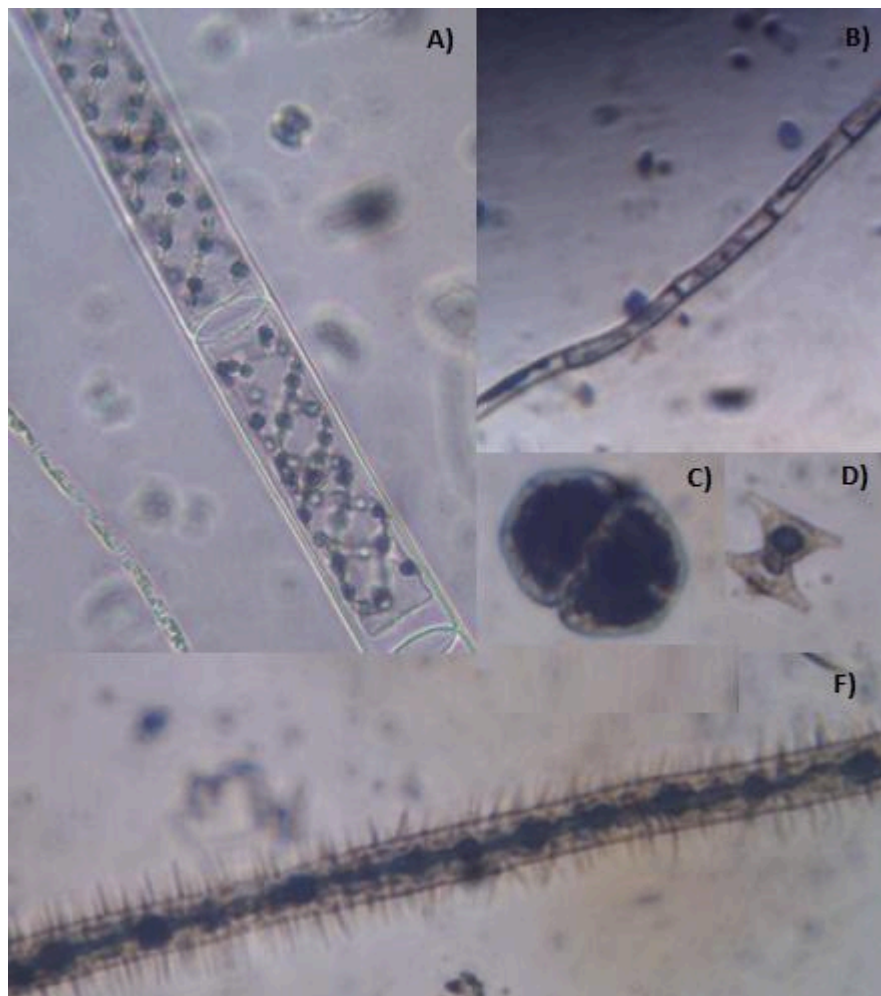


Figura C) Clase Zygnematophyceae. A) *Spirogyra*; B) *Mougeotia*; C) *Cosmarium*; D) *Staurostrum*; E) *Gonatozydon* (40X).

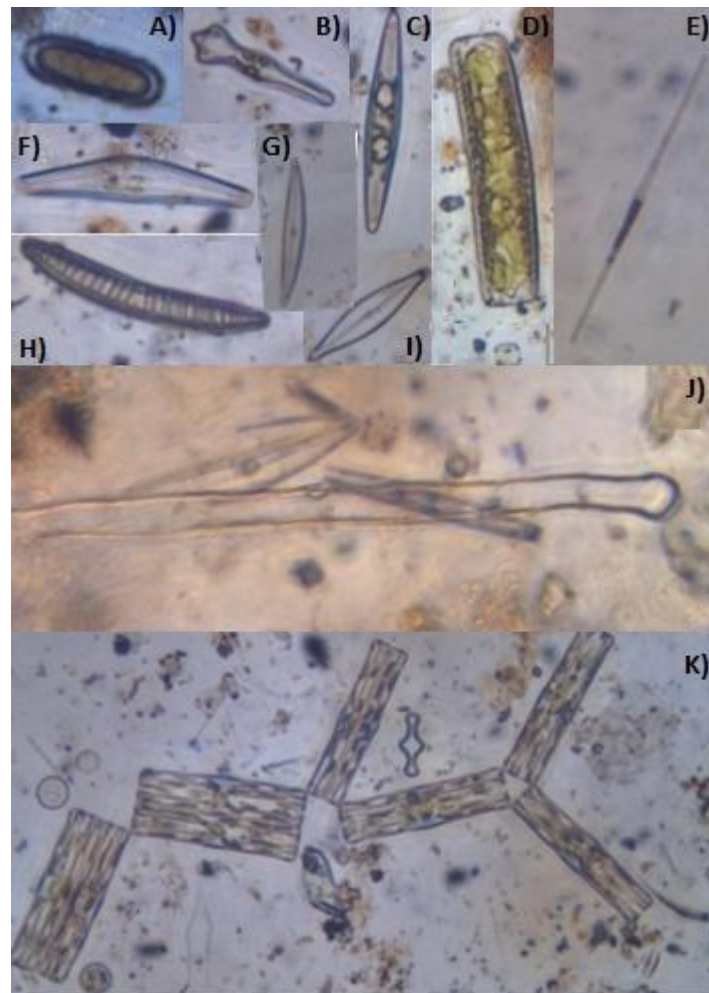


Figura D: Clase Bacillariophyceae. A) *Cocconeis*; B) *Gomphonema*; c) *Navicula*; D) *Pinnularia*; E) *Nitzschia*; F) *Cymbella*; G) *Encyonema*; H) *Denticula*; I) *Frustulia* (40X); J) *Eunotia*; K) *Tabellaria* (20X).

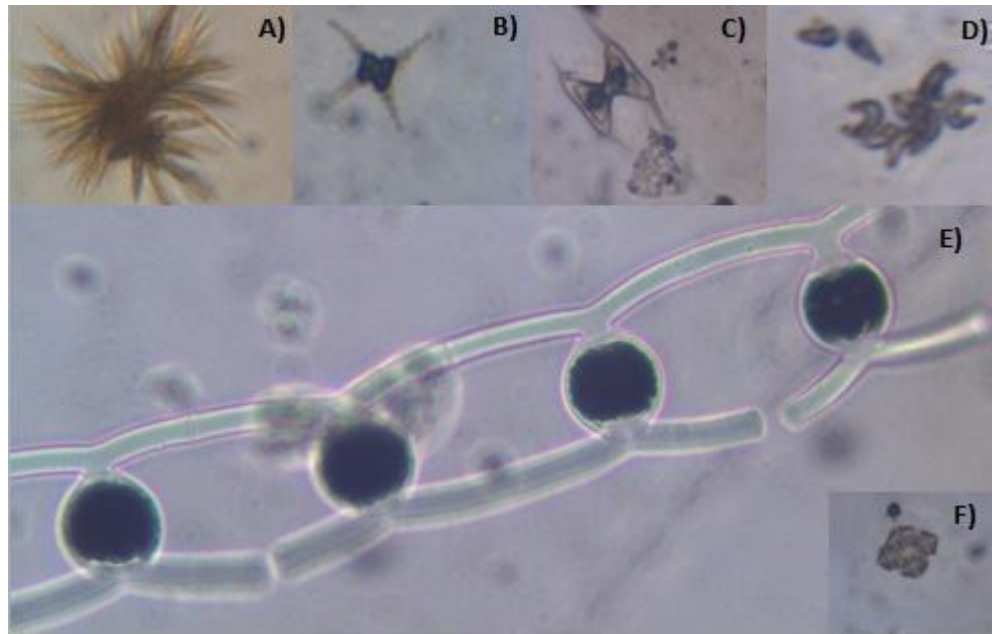


Figura E: Clase Chlorophyceae: A) *Ankistrodesmus*; B) *Pediastrum*; C) *Scenedesmus*; D) *Monoraphidium*; E) *Oedogonium*; F) *Tetraedron* (40X).



Figura F: Clase Xanthophyceae, género *Tribonema* (40X).



Figura G: Clase Mediophyceae, Género *Cyclotella* (40X).

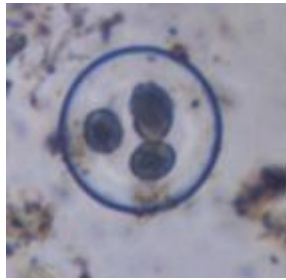


Figura H: Clase Treboxiophyceae, género *Oocystis* (40X).

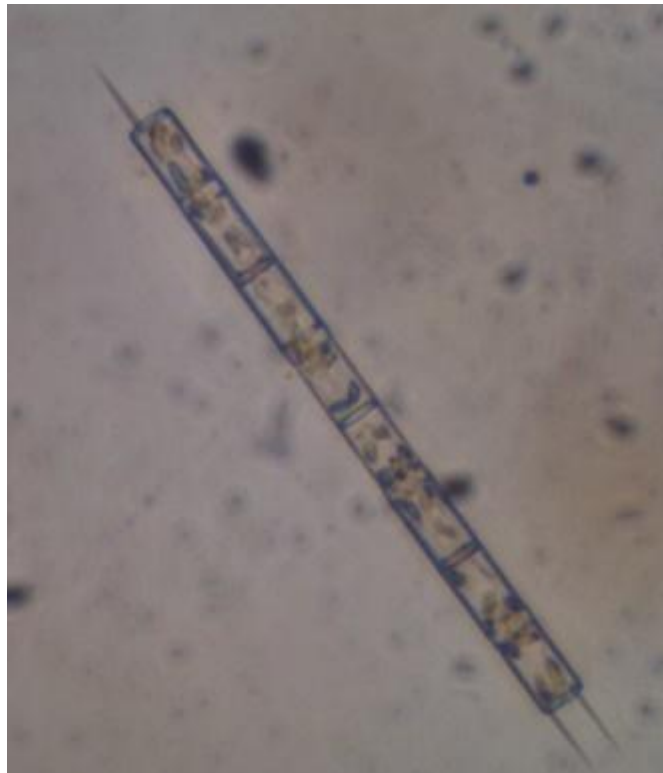


Figura I: Clase Coscinodiscophyceae, Genero *Aulacoseira* (40X).



Figura J: Clase Klebsormidiophyceae, genero *Klebsormidium* (40X).



Figura K: Clase Dinophyceae, género *Peridinium* (40X).



Figura L: Clase Chrysophyceae, género *Dinobryon* (40X).