



Universidad de Concepción  
Facultad de Ciencias Ambientales  
Ingeniería Ambiental



# Análisis tipológico de lagos Sur-Patagónicos chilenos para la elaboración de Normas de Calidad de Aguas Superficiales

Habilitación presentada para optar al título de  
Ingeniera Ambiental

Rosa Belén Jara Sanhueza

Concepción (Chile), 2025

# Análisis tipológico de lagos Sur-Patagónicos chilenos para la elaboración de Normas de Calidad de Aguas Superficiales

Habilitación presentada para optar al título de  
Ingeniera Ambiental

Alumna: Rosa Jara Sanhueza

Profesor guía: Dr. Ricardo Figueroa

Concepción (Chile), 2025

## “ANÁLISIS TIPOLOGICO DE LAGOS SUR-PATAGÓNICOS CHILENOS PARA LA ELABORACIÓN DE NORMAS DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES”

Profesor Guía: Dr. Ricardo Figueroa Jara

Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias

Profesor Comisión: Dra. Ma. Elisa Díaz Burgos



**CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA**

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad: (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción: (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima: (En Escala de 5,7 a 7,0)

**Concepción, enero 2026**

## Índice de Contenido

Agradecimientos .....	5
Nomenclatura .....	6
Resumen .....	1
1. Introducción .....	2
1.1 Tipología de lagos .....	6
1.2 Estudios sobre estado trófico de lagos en Chile.....	10
1.3 Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA).....	15
1.4 Lagos Sur-patagónicos .....	17
2. Pregunta de investigación.....	20
3. Objetivos .....	21
3.1 Objetivo General.....	21
3.2 Objetivos Específicos .....	21
4. Metodología .....	21
4.1. Área de estudio.....	22
4.2 Recopilar información de las cuencas lacustres.....	23
4.3 Desarrollo de las tipologías en base a las variables geomorfológicas .....	28
4.4 Recopilación de los datos de calidad de agua y definición del estado basal .....	29
4.5 Validar la tipología obtenida con los datos de calidad de agua .....	30
4.6 Definición del estado trófico de los Lagos Sur-patagónicos.....	31
4.6.1 Tratamiento de los datos de calidad de agua .....	31
4.6.2 Estado Trófico .....	32
4.7 Designar un lago de referencia por grupo tipológico .....	34
4.8 Variables y límites sugeridos para el desarrollo de una norma secundaria de calidad de agua para Lagos Sur-patagónicos.....	35
5. Resultados y Discusión.....	36
5.1 Análisis de la tipología de los Lagos Sur-patagónicos según la DMA.....	36
5.1.1 Recopilar información de las cuencas lacustres .....	36
5.1.2 Tipología en base a las variables geomorfológicas .....	51
5.2 Validación de la tipología obtenida, con datos fisicoquímicos de los Lagos Sur-patagónicos .....	63
5.2.1 Base de datos fisicoquímicos.....	63
5.2.2 Validación de la tipología obtenida con los datos de calidad de agua.....	64

5.3 Propuesta de valores límites para una NSCA por grupo tipológico.....	72
5.3.1 Estado trófico de los Lagos Sur-patagónicos .....	74
5.3.2 Designación de un lago de referencia por grupo tipológico.....	79
5.3.3 Establecer las variables y límites sugeridos a normar.....	79
6. Conclusiones .....	84
7. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	85
8. Referencias Bibliográficas .....	86
9. Anexos.....	94

## Índice de Tablas

Tabla 1: Descriptores fijos para la tipología de lagos. ....	8
Tabla 2: Descriptores alternativos para la tipología de lagos. ....	8
Tabla 3: Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Chile. ....	16
Tabla 4: Resumen de la metodología, según actividades por objetivo. ....	21
Tabla 5: Fórmulas para estimar el indicador trófico de cada variable y el índice total. ....	32
Tabla 6: Rango de valores del índice de Carlson según el estado trófico, color y descripción. ....	32
Tabla 7: Valores establecidos por la OCDE (1982) para determinación del estado trófico. ....	33
Tabla 8: Fórmulas para calcular el Índice de Burns. ....	34
Tabla 9: Estado de los lagos, niveles tróficos y valores de las cuatro variables clave que definen los diferentes tipos de lagos. ....	34
Tabla 10: Parámetros morfométricos de los Lagos Sur-patagónicos. ....	40
Tabla 11: Tipo de geología y sus códigos correspondientes. ....	45
Tabla 12: Porcentaje de cada tipo de los Lagos Sur-patagónicos. ....	45
Tabla 13: Matriz de correlación de Pearson. ....	51
Tabla 14: Varianza total explicada. ....	52
Tabla 15: Peso de las variables. ....	54
Tabla 16: Puntuaciones de los individuos. ....	56
Tabla 17: Bondad de ajuste. ....	62
Tabla 18: Varianza total explicada. ....	64
Tabla 19: Peso de las variables sin los datos del CIEP. ....	65
Tabla 20: Peso de las variables con los datos del CIEP. ....	66
Tabla 21: Lagos Sur-patagónicos por grupo tipológico y sus años de registro, N° de variables y total de datos encontrados. ....	73
Tabla 22: Condición trófica según Índice de Carlson. ....	74
Tabla 23: Condición trófica según Índice de la OCDE. ....	76
Tabla 24: Condición trófica según Índice de Burns. ....	77
Tabla 25: Variables y valores sugeridos a normar por grupo tipológico. ....	80
Tabla 26: NSCA Lago Llanquihue por Área de vigilancia. ....	82
Tabla 27: NSCA lago Villarrica. ....	82
Tabla 28: Características de los grupos geomorfológicos con ejemplos para cada uno. ....	84

## Índice de Imágenes

Figura 1: Cartografía de los Lagos Sur-patagónicos. ....	20
Figura 2: Cuencas lacustres Lagos Sur-patagónicos. ....	38
Figura 3: Mapa de la geología por cuenca lacustre de los Lagos Sur-patagónicos. ....	44
Figura 4: Mapa con las Áreas Protegidas, Sitios Prioritarios, Bienes Nacionales Protegidos y Reservas de la Biósfera por cuenca para los Lagos Sur-patagónicos.....	48
Figura 5: Mapa de Uso de suelo de las cuencas de los Lagos Sur-patagónicos. ....	50
Figura 6: Gráfico de sedimentación variables geomorfológicas. ....	54
<i>Figura 7: PCA Variables geomorfológicas (círculo de correlaciones).....</i>	<i>55</i>
Figura 8: PCA de los individuos. ....	57
Figura 9: Biplot de las variables geomorfológicas y los Lagos Sur-patagónicos.....	59
Figura 10: Análisis de Conglomerado Jerárquico, con el Método de Ward.....	61
Figura 11: Escalamiento Multidimensional Métrico.....	62
Figura 12: Extracto matriz de datos fisicoquímicos recopilados.....	63
Figura 13: Gráfico de sedimentación variables de calidad de agua. ....	65
Figura 14: PCA variables de calidad de agua.....	68
Figura 15: Biplot de las variables de calidad de agua y los Lagos Sur-patagónicos.....	69
Figura 16: Análisis de Conglomerado Jerárquico, con el Método de Ward de las variables de calidad de agua. ....	70
Figura 17: Análisis K-medias.....	71

## Agradecimientos

Agradecimientos a mi familia, a mis amigos y a mi pareja por su apoyo, motivación y compañía en este camino.

A mi madre por darme la confianza para terminar en este camino, a mi padre, que, durante periodos de certámenes, me iba a buscar cuando decidía ir a estudiar a la central, a ambos por su preocupación y cuidado, y a mi hermano por apoyarme, felicitarme y darme ánimo en este camino, que cuando me veían bajo ánimo me alentaban a seguir, por sus tiernos gestos, abrazos y palabras. A mi pareja por motivarme a no decaer, para seguir, a darme la confianza suficiente y a corregirme cuando era necesario.

Agradecimiento especial al Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), por la facilitación de datos de calidad de agua, utilizados en este trabajo de investigación. También, dar gracias a Marcela, por su asesoramiento estadístico. A mi profesor guía, y a mi comisión evaluadora por contribuir en gran medida a la mejora de este trabajo.

Finalmente, agradecer al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) por financiar esta investigación mediante la Beca de Pregrado Proyecto ANID/FONDAP/1523A0001.

## Nomenclatura

ACP	Análisis de Componentes Principales
ACJ	Análisis de Conglomerado Jerárquico
Chl-a	Clorofila a
DGA	Dirección General de Aguas
DLC	Desarrollo Línea de Costa
DMA	Directiva Marco del Agua
DS	Disco Secchi
IGA	Instrumento de Gestión Ambiental
IFOP	Instituto de Fomento Pesquero
LBGMA	Ley de Bases Generales del Medio Ambiente
MDS	Escalamiento Multidimensional
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
M.S.N.M	Metros Sobre el Nivel del Mar
NSCA	Norma Secundaria de Calidad Ambiental
N	Nitrógeno
NT	Nitrógeno Total
OD	Oxígeno Disuelto
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
P	Fósforo
PT	Fósforo Total
SE	Servicios Ecosistémicos
TSI	Índice del estado Trófico de Carlson
TLI	Índice del estado Trófico de Burns

## Resumen

Los lagos del sur de Chile están cada vez más expuestos a las actividades humanas, como lo son la agricultura, la piscicultura, la expansión urbana, incluido el turismo, por lo que, si bien los Lagos Sur patagónicos aún están menos afectados de estas actividades, es necesario protegerlos, pues en un futuro esto será un problema. El presente estudio de investigación se basa en el análisis tipológico de estos lagos, con el objetivo de encontrar patrones de agrupamiento, los que se realizaron en el software R, incluyendo Análisis de Componentes Principales (ACP), Análisis de Conglomerado Jerárquico (ACJ) y Escalamiento Multidimensional (MDS), para posteriormente validar la tipología con información de la calidad del agua de estos lagos, que se desarrolló en el mismo software con un ACP, un Análisis de Conglomerado Jerárquico y un Algoritmo K-medias. Finalmente, con respecto al estado trófico de los lagos, que permitió establecer un lago de referencia para proponer variables y valores para una Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) por grupo tipológico, que se realizó en base a los descriptores de la Directiva Marco del Agua (DMA), en el que se consideraron variables geomorfológicas como la altura, profundidad, tamaño y geología, que describen la calidad ambiental natural del lago.

Palabras clave: Tipología, NSCA, Lagos Sur-patagónicos, DMA.

## 1. Introducción

El agua dulce superficial es uno de los recursos naturales más importantes para los ecosistemas y las sociedades humanas. Hay más de mil millones de kilómetros cúbicos de agua en la Tierra, pero el almacenamiento de agua dulce solo representa alrededor del 3% de la masa de agua en la hidrosfera. Sin embargo, solo el 0,5% de los suministros de agua dulce pueden ser fácilmente accesibles para las personas, ya que más del 80% de toda el agua dulce disponible está almacenada en capas de hielo y glaciares. (Ding, et al., 2024).

El cambio climático y una población creciente y más próspera están ejerciendo una presión significativa sobre los recursos de agua dulce en todo el mundo, lo que probablemente tenga consecuencias cada vez más negativas. Los impactos de estos desafíos son numerosos, entre ellos temporadas de derretimiento más tempranas y más cortas de la capa de nieve y los glaciares, reducción del caudal de los ríos durante el verano y el otoño, y mayores demandas de agua para el consumo humano (Ding, et al., 2024).

Es por ello que el deterioro de la calidad del agua de los lagos debido a la contaminación urbana y la agricultura, es una preocupación cada vez mayor para las poblaciones humanas y la salud de los ecosistemas. (Pizarro, et al. 2016). Desde los años 1950 se ha evidenciado a nivel mundial un aumento de ingreso de nutrientes especialmente de fósforo (P) y nitrógeno (N), que ha desencadenado procesos de eutrofización (Woelfl, 2012; Pesse, 2016), y cambios fisicoquímicos en los ecosistemas de agua dulce (Pizarro, et al. 2016). Estos nutrientes provienen principalmente de fertilizantes, desechos humanos y de animales, contaminación atmosférica, y de actividades antropogénicas desarrolladas en las cuencas hidrográficas, incluyendo la salmonicultura. (Woelfl, 2012; Urrutia, 2024).

A diferencia de la eutrofización natural, el cual es un proceso lento de miles de años, la eutrofización antropogénica es un proceso que cambia el ecosistema en muy corto tiempo,

muchas veces sólo en algunos años o décadas (Woelfl, 2012; Pesse, 2016; Urrutia, 2024), generando efectos negativos como, aumento de la abundancia, biomasa y productividad primaria de algas/macrófitas, la proliferación de cianobacterias cuyas toxinas provocan daños en el hígado de animales y humanos, aumento en el crecimiento de floraciones algales, que pueden provocar la muerte de peces por agotamiento del oxígeno disuelto, lo que puede representar un serio problema ambiental, asociado a esto una disminución en la transparencia de las aguas, pérdida del valor estético y hasta pérdidas económicas. (Pizarro, et al. 2016; Rodríguez-López, et al. 2021; Woelfl, 2012; Pesse, 2016; DGA., 2019).

Si bien muchos lagos urbanos son los más expuestos a estas presiones, puesto que, existe una mayor concentración de población y actividad humana. Los lagos del sur de Chile, como los Lagos Araucanos, se distinguen por condiciones oligotróficas, y por su gran profundidad, que varía entre los 86 y 323 metros. (Rodríguez-López, et al. 2021; Urrutia, 2021). Este distrito de lagos, al igual que los Lagos Sur-patagónicos constituyen una importante reserva hídrica para el país (DGA,1996). Ambos distritos de lagos se sitúan como los lagos más oligotróficos estudiados en el mundo (Pesse, 2022). Sin embargo, comenzaron a enfrentar presiones crecientes por aprovechamiento energético, turístico y acuícola existente. Ante esto la Dirección General de Aguas ha venido desarrollando estudios limnológicos, incluyendo estudios sobre carga de nutrientes y aspectos de circulación de los lagos de Chile, en especial los lagos al sur de Chile. De esta manera, la DGA, dio inicio en 1995 a estudios específicos en la Región de Aysén, abordando los Lagos Elizalde y Riesco, con el objetivo de estudiar sus características y condiciones, así como para diseñar una red de monitoreo sistemático.

Así, en la década de los 80, comenzó el desarrollo de la “Red Nacional Mínima de Control de Lagos”, dentro de lo que es la Red de Calidad de Aguas de la DGA, que tiene como objetivo principal: generar información pública y sistemática que caracterice la calidad de los lagos y

lagunas del país, incluido su estado trófico. A la fecha, la Red de Monitoreo de Lagos ha muestreado 51 cuerpos lacustres y 43 cuerpos conforman la red actual (Salazar, & Soto, 1999; Alvial, 2018; DGA, 2025).

La Patagonia se sitúa, como la región con el mayor porcentaje de contribución a los recursos hídricos totales del país. El suroeste de la Patagonia alberga algunos de los lagos más grandes de Chile y el segundo lago más grande de Sudamérica (el lago General Carrera/Buenos Aires), también se encuentran allí dos de los diez lagos más profundos del mundo (el lago O'Higgins, con 810 m, y el lago General Carrera, con 580 m) (Reid, et al., 2023).

En particular la Región de Aysén cuenta con numerosos lagos (ca. 119), encontrándose los lagos más grandes del país, siendo además una zona que por sus características se constituye en una reserva relativamente inalterada que debe ser preservada adecuadamente (DGA.,1996; DGA., 2016b; Reid, et al., 2023).

La Undécima Región se constituye en la más rica en RRHH en Chile, tanto ríos como lagos, con bajas presiones, las aguas constituyen un enorme potencial para la región, entre los potenciales usuarios se puede considerar al turismo, pesca deportiva, recursos energéticos, industrialización, agricultura, ganadería, agua potable, minería, etc. Esto nos indica que casi no hay actividad de desarrollo que no requiera como insumo agua (Campos, 1999; Alvial, 2018; CONAF., s, f.).

Los lagos proveen diversos Servicios Ecosistémicos (SE) esenciales, que son los beneficios que los humanos reciben del entorno, especialmente aquellos relacionados con el suministro, regulación del agua y los culturales (Hu, et al., 2024; Karki, et al., 2021), como la eliminación y depuración de nutrientes, la regulación de inundaciones, el abastecimiento de agua y la producción pesquera (Miranda, et al., 2021). Estos SE pueden verse afectados por numerosas actividades antropogénicas, como la gestión del suelo y el agua, y el cambio climático (Karki, et al., 2021).

Los Lagos Sur-patagónicos, han sido poco estudiados en comparación con los Lagos Nor-patagónicos, y resulta fundamental avanzar en su conocimiento, primeramente, que aun presentan baja presión poblacional, correspondiente al 7% de la población censada, desglosada en la región de Los Lagos, Aysén y Magallanes, con un 5%, 1% y 1% respectivamente. Que mantienen aguas de buena calidad (Campos, 1996; Campos, 1999; Urrutia, 2021; INE., 2025). Sin embargo, no existen normas de protección para estos sistemas lacustres, siendo que estos, están creciendo en términos de turismo y eso en un futuro va a ser problemático al no tener una información adecuada. Tal como lo que ha ocurrido durante los últimos años en el Lago Villarrica (Pesse, 2022; Pesse, 2023), donde se ha visto un aumento de floraciones algales, especialmente en la temporada de verano. Por esta razón, es fundamental conocer estos lagos antes de que eso ocurra y así, tener alternativas para relentizar el proceso de eutroficación.

Una forma de conocer estos lagos es a través del estudio de su morfometría, ya que constituye uno de los factores más importantes en el control del estado trófico, la dinámica fisicoquímica y la productividad de los sistemas acuáticos. Parámetros como, el Área superficial, el Volumen, la Profundidad máxima y la Profundidad media, están directamente relacionados con el ciclo de nutrientes y con la química y calidad del agua. (Stefanidis, & Papastergiadou, 2012; Nöges, 2009).

En este sentido, los lagos pequeños y poco profundos suelen ser más vulnerables a la resuspensión de sedimentos inducida por el viento, lo que resulta en cambios significativos en la química del agua y los ciclos geoquímicos. La profundidad media es un factor importante para controlar la productividad, mientras que el tamaño del lago está relacionado con la profundidad de la termoclina (Stefanidis, & Papastergiadou, 2012).

Actualmente, la morfología de los lagos se utiliza ampliamente para establecer tipologías de masas de agua, de acuerdo con los requisitos de la Directiva Marco Europea del Agua

2000/60/CE, la cual rige la actual política europea del agua. La tipología de los ecosistemas lacustres se basa en descriptores tipológicos obligatorios como la Altitud, la Superficie y la Profundidad (Stefanidis, & Papastergiadou, 2012; Nöges, 2009), pudiendo incluirse variables adicionales tales como el volumen, la relación entre la profundidad media y la profundidad máxima, o el desarrollo de línea de costa. Tal como se ha expuesto, diversos estudios han demostrado que la morfometría de los lagos influye directamente en la química y calidad del agua, lo que refuerza su importancia como herramienta de análisis.

En este contexto, los Lagos Sur-patagónicos representan una oportunidad única de investigación, ya que han sido escasamente estudiados y existe una limitada disponibilidad de datos sobre su calidad de agua natural. Por ello, este trabajo propone avanzar en su conocimiento mediante una clasificación tipológica basada en sus características geomorfológicas, lo que permitirá sentar bases para su conservación y manejo sustentable.

### 1.1 Tipología de lagos

Un tipo de cuerpo de agua puede definirse como un grupo de lagos o ríos que tienen condiciones ecológicas naturales comunes en términos de características geomorfológicas, e hidrológicas, que determinan las características fisicoquímicas, que sustentan los elementos biológicos (Kagalou, I. and I. Leonardos, 2009; Lyche Solheim, et al., 2019). Por lo tanto, un tipo puede considerarse como una entidad homogénea con una variabilidad ambiental natural limitada, lo que permite la definición de una línea base a partir de la cual se puede detectar el impacto inducido por el hombre (Lyche Solheim, et al., 2019).

Una tipología es una clasificación u ordenamiento de unidades para ayudar a comprender e interpretar las diferencias y similitudes entre unidades (Miranda, et al., 2021).

Estudios han demostrado que los atributos geomorfológicos del lago, como el área, la profundidad y la conectividad, atenuados por la cubierta terrestre y la composición ribereña, controlan la calidad del agua del lago (Miranda, et al., 2021).

La tipología de lagos es un concepto utilizado científicamente por la comunidad europea, puesto que, de acuerdo con los requisitos de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (en adelante DMA), exige que, todos los estados miembros de la Unión Europea deben establecer la tipología de sus masas de agua superficiales. El objetivo principal de esta tipología, es definir las condiciones de referencia específicas de cada tipo de masa de agua, lo que permite evaluar adecuadamente su estado ecológico (Kolada, et al., 2005; Moss et al., 2003). Los tipos de lagos se identifican a partir de una combinación de las características abióticas de los lagos especificadas en el Anexo II de la Directiva Marco del Agua (Kolada, et al., 2005). Las disposiciones de la Directiva exigen la medición de una amplia gama de variables y solo ofrecen una orientación general sobre cómo establecer los sistemas de clasificación (Moss et al., 2003).

La DMA reconoce que la ecología de las masas de agua varía con el clima y el paisaje, lo que determina las características morfológicas, hidrológicas y químicas. Por lo tanto, el primer paso es tipificar todas las masas de agua, y el segundo es identificar el estado ecológico actual. Para ello, el Anexo II de la DMA propone la posibilidad de elegir entre dos enfoques metodológicos: el Sistema A (Tabla 1), basado en factores obligatorios. (Kagalou, and Leonardos., 2009; Kolada, et al., 2005), correspondientes a variables geomorfológicas importantes para explicar la variabilidad natural de los ríos y lagos. (Lyche Solheim, et al., 2019 y el Sistema B (Tabla 2), que además de considerar a los descriptores obligatorios, incluye también una gama más amplia de factores opcionales, que corresponden a variables clave para determinar el estado ecológico de los lagos. Este último sistema presenta la ventaja de poder usarlo con la información que se

tenga disponible, permitiendo su aplicación aun cuando no se disponga de todas las variables requeridas.

Tabla 1: Descriptores fijos para la tipología de lagos.

Sistema A		
Tipología fijada	Descriptores	
Tipo	Tipología en función de la altitud	Tierras bajas: <200 msnm
		Altitud media: 200-800 msnm
		Altitud alta:>800 msnm
	Tipología según la profundidad media	Muy poco profundos:<3 m
		Poco profundos:3-15 m
		Profundos: >15 m
	Área de superficie	Pequeño: 0.5-1 km <sup>2</sup>
		Mediano: 1-10 km <sup>2</sup>
		Grande: 10-100 km <sup>2</sup>
		Muy grande: >100 km <sup>2</sup>
	Geología	Calcárea*
		Silíceas
		Orgánica

Fuente: Anexo II de la DMA.

Tabla 2: Descriptores alternativos para la tipología de lagos.

Sistema B	
Caracterización alternativa	Factores físicos y químicos que determinan las características del lago y, por ende, la estructura y composición de la comunidad biológica
Factores obligatorios	Altitud
	Latitud
	Longitud
	Profundidad
	Geología
Factores optativos	Profundidad media del agua
	Forma del lago
	Tiempo de permanencia
	Temperatura media del aire
	Oscilación de la temperatura del aire
	Régimen de mezcla y estratificación del agua (por ejemplo, monomíctico, dimíctico, polimíctico)
	Capacidad de neutralización de ácidos
	Estado natural de los nutrientes
	Composición media del sustrato
Fluctuación del nivel del agua	

Fuente: Anexo II DMA.

Dado que la geología se describe solo cualitativamente, que incluyen tanto el lecho de roca como el suelo, es que se suelen considerar más descriptores cuantitativos de la química del agua que reflejan la influencia de la geología en la hidroquímica del lago, como la alcalinidad, la conductividad, el contenido de calcio y el color (Kagalou, and Leonardos., 2009; Lyche Solheim,

et al., 2019; Kolada, et al., 2005). Estableciendo en algunos casos el valor de 1 meq/l para alcalinidad, se considera igual o sobre este valor, como un lago alcalino, y ácido en caso contrario. Así como también, se puede clasificar en base a la salinidad, con una salinidad alta (mayor o igual 10 g/l) o baja (menor de 10 g/l). (DMA., 2004). Los valores anteriores son dados como ejemplo de límites usados en un estudio tipológico realizado en España.

En estudio previos, realizados para definir tipología y debido a la disponibilidad limitada de datos, se estableció la necesidad de designar un lago de referencia para cada grupo tipológico, en el que se debían cumplir tres criterios: 1) El uso del suelo en la cuenca sea <10% no natural, 2) La densidad de población fuera inferior a 10 habitantes/km<sup>2</sup>, y 3) No existieran fuentes puntuales de contaminación en la cuenca (Kagalou, and Leonardos., 2009). Para efectos de esta investigación, se determinó un lago de referencia por grupo tipológico, el cual es aquel que presenta mejor condición trófica.

El objetivo, no es un estudio detallado de cada lago, sino disponer de un procedimiento que permita su clasificación, es decir una agrupación de todos aquellos lagos que sean similares entre sí. (DMA., 2004). La tipología puede sentar las bases para todos los resultados científicos de relevancia para la mejorar la gestión relacionada con los tipos de masas de agua, por esto, la necesidad de incrementar y sistematizar la información sobre lagos para clasificar y, sobre todo, definir su estado (DMA., 2004). Así también puede proporcionar el marco esencial para organizar la investigación con el fin de definir la dinámica del agua, la calidad del agua y las condiciones ecológicas (Miranda, et al., 2021).

Además, la tipología se puede utilizar para desarrollar estrategias de conservación incluso en aquellas unidades para las cuales no se dispone de datos de monitoreo o estos son limitados

(Miranda, et al., 2021). La tipología podría servir para desviar la atención de un énfasis casi exclusivo en la gestión lago por lago, hacia una consideración más holística de los lagos como tipos, para construir planes de conservación aplicables a diferentes tipos de lagos (Miranda, et al., 2021). Como una herramienta funcional, la tipología que se puede utilizar para comenzar a identificar las necesidades de conservación e investigación, adaptar los programas de seguimiento y gestión, personalizar los programas ambientales y utilizar los recursos de conservación de manera más eficaz para lograr objetivos de gestión a gran escala (Miranda, et al., 2021).

Si bien la tipología constituye una valiosa herramienta para regular, monitorear y gestionar los ecosistemas acuáticos (Reid, et al., 2023). Su utilidad para la gestión ambiental se vuelve completa cuando se integra con el análisis de su condición ecológica. En este sentido, un componente clave para evaluar la calidad del agua y el grado de alteración de los ecosistemas lacustres es el estudio del estado trófico. Así, además de caracterizar los lagos según sus atributos geomorfológicos, resulta necesario examinar cómo variables físico-químicas y biológicas reflejan procesos de eutrofización y productividad. Por ello, a continuación, se revisan los principales estudios sobre el estado trófico de lagos al sur de Chile, que permiten contextualizar la calidad ambiental de los sistemas analizados en este trabajo.

## 1.2 Estudios sobre estado trófico de lagos en Chile

Para estudiar los lagos en Chile, se pueden utilizar diversos parámetros físicos, químicos y biológicos como indicadores de la eutrofización, como la Clorofila *a*, nutrientes (Nitrógeno-Fósforo), Oxígeno Disuelto (OD), pH y Transparencia medida con Disco Secchi, que son parámetros claves para estimar el estado trófico de los lagos, y que son afectados por el uso humano del suelo. Aunque los nutrientes (N y P) son determinantes clave de la eutrofización en lagos, un aumento constante en la temperatura del agua también promueve la productividad

primaria de algas (Pizarro, et al. 2016; Pesse, 2016). Por lo tanto, para el manejo de la eutroficación, es fundamental clasificar los sistemas acuáticos de acuerdo con su estado trófico (Pesse, 2016).

Estudios previos, indican que los cambios impulsados por causas antropogénicas son responsables de una tendencia temporal positiva en la carga de nutrientes, común en los cuerpos de agua dulce de Chile y el mundo. Debido al aumento de la entrada de aguas residuales provenientes de actividades urbanas, forestales, y agrícolas, que ha deteriorado la calidad del agua de los sistemas lacustres. A esto se suma la industria de la piscicultura, que ha sido documentada como una fuente importante de contaminación para los sistemas de la zona patagónica. Esta última aporta una cantidad de nutrientes considerable, puesto que, la alimentación de los peces provoca tanto fecas, como restos de alimento que ingresan al sistema (Pizarro, et al. 2016; Soto, 2002; Pesse, 2022; Woelfl, 2012).

El general, los lagos monomícticos y oligotróficos del centro-sur de Chile, presentan bajos niveles de concentración de Clorofila a, alta Transparencia, con un promedio del disco de Secchi (SD), que varía entre 6,6 y 21 m, bajos aportes de nutrientes y escasa productividad primaria (Rodríguez-López, et al., 2021; Soto, 2002; Pesse, 2016; Pesse, 2020). Caracterizados por ser grandes, profundos, y frecuentemente con limitación de nitrógeno (Nimptsch, et al., 2016).

En un estudio realizado en Lagos Araucanos y un Lago Patagónico (Yelcho), se encontró que las concentraciones de Clorofila a (Chl-a) fueron generalmente bajas ( $< 2 \mu\text{g/L}^1$ ), esta fue aún más baja en el lago Yelcho ( $0,7 \mu\text{g/L}$ ). Las concentraciones de Nitrógeno Orgánico Disuelto (DIN) fueron menores que  $30 \mu\text{g/L}$ . En todos los lagos estudiados los valores de Nitrógeno Total no excedieron  $20 \mu\text{mol/L}^1$  y las concentraciones de Fósforo total no superaron los  $0,8 \mu\text{mol/L}$  (Soto,

2002). No obstante, ya en ese periodo se evidenciaba un aumento de las actividades humanas en sus cuencas, lo que representaba una presión creciente sobre estos ecosistemas.

Otros trabajos han destacado que ciertos parámetros presentan variabilidad estacional marcada. Por ejemplo, en diez lagos del centro-sur de Chile, con características oligotróficas, se observó un aumento de más de 20% en la temperatura media del agua y el fosfato entre invierno y verano, mientras que la Clorofila a fue un 50% más alta durante el invierno, con aumentos significativos en los lagos, con mayores porcentajes de áreas urbanas en sus cuencas (Pizarro, et al. 2016).

En general, los valores estimados de Chl-a son bajos (menos de 1.8  $\mu\text{g/L}$ ), oscila entre 0.09  $\mu\text{g/l}$  y 2.0  $\mu\text{g/l}$ , lo que refleja el mantenimiento de condiciones oligotróficas en estos ecosistemas acuáticos. Durante los meses de verano, los valores de Chl-a son ligeramente más altos para todos los lagos, exceptuando al lago Pirihueico (PIR), pues se evidenció, que, en la temporada de primavera, se reportan los valores más altos de Chl-a, lo que podría explicarse debido a las diferentes características morfométricas del lago PIR, en comparación con el resto de los lagos de estudio (Rodríguez-López, et al., 2021). Dado lo anterior, se establece que, la calidad del agua natural depende de los parámetros geomorfológicos.

La influencia del uso del suelo es clara, a mayores porcentajes de áreas urbanas, se asocia mayor conductividad, concentraciones de N y P, mientras que los lagos cuyas cuencas poseen mayor presencia de bosque nativo presentan menos niveles de nutrientes (N y P), con menores valores de pH y mayor OD (Pizarro, et al. 2016; Campos, 1997a).

Además, se encontró una tendencia temporal negativa en la temperatura del agua para todos los lagos, un resultado inesperado bajo los modelos de cambio global, que sugieren un aumento constante en las temperaturas atmosféricas en el sur de Chile. Estos hallazgos contrastan con lagos en el hemisferio norte, para los cuales se ha reportado un aumento en la temperatura del agua en las últimas décadas, esto se debe a la entrada de agua fría a partir del derretimiento de

los glaciares, que puede aumentar los niveles de oxígeno disuelto en los lagos del centro-sur de Chile (Pizarro, et al. 2016).

Aunque los lagos estudiados son oligotróficos, los hallazgos muestran un aumento temporal de nutrientes y OD en todos los lagos, esto junto a los efectos del cambio de uso del suelo, sugiere que, en estos lagos, la eutrofización es un proceso más acelerado, especialmente en áreas con menos cobertura de bosque nativo (Pizarro, et al. 2016). De acuerdo con lo encontrado por Rodríguez-López, et al. (2021), se reportaron dos especies invasoras en la campaña de monitoreo, que son características de habitar sistemas meso-eutróficos a eutróficos. Por lo tanto, el seguimiento continuo de estos lagos es muy importante para regular el uso de los recursos hídricos.

En Chile, existen más 360 lagos en su mayoría de agua dulce, de los cuales, en 2016, apenas 20 eran monitoreados por la Red de Monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA, 2016). Actualmente, la red está compuesta por 43 lagos (DGA., 2025). A pesar de este aumento en los lagos muestreados, la elevada cantidad de lagos y la lejanía de muchos de ellos, sigue representando una limitante, pues las campañas de monitoreo en sistemas acuáticos suelen ser lentas, costosas y no continuas (Rodríguez-López, et al., 2021).

Sumado a esto, los efectos del Cambio Climático (CC), los cambios inducidos por el hombre en la química del agua, como la acidificación y la eutrofización, dan lugar a propiedades estequiométricas alteradas, que también influyen en la biodiversidad y el funcionamiento del ecosistema incluso de los lagos oligotróficos más remotos (Van de Vyver, et al., 2019).

Estudios recientes muestran que tanto las floraciones algales nocivas (FAN) como las floraciones de alta biomasa (HB-HAB) muestran una tendencia a expandirse hacia latitudes más altas, es decir hacia la Patagonia chilena, en particular gracias al incremento de nutrientes (N y P), que

además es impulsada por factores ambientales locales, incluyendo el CC, y las actividades humanas en tierra (Díaz, 2025).

Las floraciones pueden tener un gran impacto en la economía de las zonas aledañas, ya que los ambientes con un bajo nivel de oxígeno, que puede provocar mortandades masivas de peces, generando un impacto en la economía., lo que evidencia su importancia ecológica y socioambiental. además, un posible impacto en la salud, ocasionando irritación, ocular y cutánea incluso afectando el sistema nervioso central (Díaz, 2025).

Los lagos oligotróficos, especialmente aquellos con limitación de nitrógeno, igual pueden sufrir floraciones de cianobacterias. Estas floraciones tienen efectos negativos en los organismos acuáticos, ya que muchas especies de cianobacterias sintetizan metabolitos secundarios tóxicos denominados cianotoxinas. Las toxinas de las cianobacterias también tienen graves efectos en los seres humanos y los animales, y constituyen una creciente preocupación a nivel mundial. Las aguas superficiales utilizadas para la producción de agua potable, el riego o incluso con fines recreativos se ven afectadas por estas toxinas. se requieren medidas preventivas, como el muestreo periódico para detectar cianobacterias, la presencia de floraciones y la cuantificación de toxinas, con el fin de proteger la salud humana (Nimptsch, et al., 2016).

Recientemente se ha reportado la presencia o floración de cianobacterias en algunos lagos oligotróficos del norte de la Patagonia durante el verano, como el lago Maihue y los lagos Villarrica y Puyehue. Esto probablemente se deba a la muy baja concentración de nitrógeno y a la posible limitación de este elemento en dichos lagos, pero hasta la fecha no se dispone de datos suficientes (Nimptsch, et al., 2016; DGA., 2011). Entonces, antes que estos lagos sufran de manera más recurrente estos procesos, es fundamental desarrollar una tipología que permita entender y gestionar sus características naturales, y que también permita crear una o más NSCA para su protección.

### 1.3 Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA)

En Chile, existen 2 tipos de Normas de Calidad Ambiental: Primaria y Secundaria. La Norma Primaria, tiene por objetivo proteger la salud de las personas, y la Norma Secundaria tiene por objetivo proteger la salud del ecosistema, conservar el medio ambiente, y son de carácter local. (MMA., s. f.).

Una Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA), constituye uno de los Instrumentos de Gestión Ambiental (IGA), establecidos en la Ley 19.300/1994, la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Mondragón Fischer, s.f.). Es un instrumento cuyo objetivo es conservar o preservar los ecosistemas acuáticos, a través del mantenimiento o mejoramiento de la calidad de las aguas continentales y marinas (MMA, 2017).

Las Normas de Calidad Ambiental establecen estándares máximos de contaminación permisibles en un determinado espacio o cuerpo receptor. Además, estas deben ser elaboradas y dictadas por el Ministerio de Medio Ambiente (Mondragón Fischer, s. f.).

En consecuencia, al establecer los límites tolerables de contaminación, las Normas de Calidad Ambiental constituyen “una materialización de la garantía constitucional de vivir en un medio ambiente libre de contaminación” (Mondragón Fischer, s. f.).

De acuerdo con el Decreto Supremo N° 38/2013, del Ministerio del Medio Ambiente, que Aprueba el Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión, en su Art.º 38 menciona que: *“Toda norma de calidad ambiental y de emisión será revisada, según los criterios establecidos en este título, a lo menos cada cinco años”*. Esto es especialmente relevante, ya que si, en un futuro se aplica una NSCA, que exija monitoreo, probablemente se contará con datos suficientes para revisar y validar la propuesta que se desarrolla en esta investigación. Esto

representa una gran ventaja desde el punto de vista económico, ya que permitiría reducir costos al establecer límites normativos por grupo tipológico y no individualmente por lago.

En la Tabla 3 se presentan las 8 NSCA que existen en Chile, de las cuales solo 2 pertenecen a lagos, y ninguna de ellas aplica a algún Lago Sur-patagónico. Además, se muestran 2 ejemplos de concentraciones asociadas a cada una de las Normas.

Tabla 3: Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Chile.

N°	Norma secundaria de calidad ambiental	Concentraciones	Región
1	Decreto 75/2009 MINSEGPRES: ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL RÍO SERRANO	OD >9.8 mg/L pH 7-8	XII Región de Magallanes
2	<b>Decreto 122/2009 MINSEGPRES: ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS DEL LAGO LLANQUIHUE*</b>	OD >8.5 mg/L Si 1.83 mg/L	X Región de Los Lagos
3	<b>Decreto 19/2013 MMA: ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES DEL LAGO VILLARRICA*</b>	PT <0.015 mg/L Chl-a <6 ug/L	IX Región de la Araucanía
4	Decreto 53/2013 MMA: ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO	OD > 8 mg/L pH 6.5-8.7	RM Región Metropolitana
5	Decreto 9/ 2015 MMA: ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL RÍO BIOBÍO	OD 10 mg/L DBO 2 mg/L	VIII Región del Biobío
6	Decreto 41/2023: MMA: ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA	As 0.020 mg/L Fe T 7.95 mg/L	V Región de Valparaíso
7	Decreto 43/2023 MMA: ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS MARINAS Y SEDIMENTOS DE LA BAHÍA DE QUINTERO-PUCHUNCAVÍ	As 0.008 mg/L Benceno 0.008 mg/L	V Región de Valparaíso
8	Decreto 21/2024 MMA ESTABLECE NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL RÍO VALDIVIA	pH 6,3-8,5 OD >7	Regiones de la Araucanía y Los Ríos (IX-XIV)

Fuente: Biblioteca del Congreso Nacional.

\*En letra negra se destaca las NSCA para lagos que existen en Chile, siendo el lago Villarrica el que ya posee un plan de descontaminación.

Entonces, una vez definida las tipologías, y para los lagos que tengan datos, se puede proponer límites para una NSCA. La ventaja de esta propuesta, es que esa Norma pueda ser aplicada a un conjunto de lagos, aun cuando algunos no tengan datos porque el seguimiento de la norma va a permitir acumular y comparar datos, una vez se llegue al momento de su revisión de acuerdo al DS° 38/2013.

#### 1.4 Lagos Sur-patagónicos

Según Campos (1988), el distrito de los Lagos Araucanos se encuentra entre la latitud 39°S y 42°S. Según Geller (1992) los Lagos Patagónicos se ubican desde la latitud 42°S en adelante. Sin embargo, en el libro de Thomasson (1963), los Lagos Nor-patagónicos fueron bautizados como “Lagos Araucanos”.

De acuerdo a lo anterior y por definición de Dirección General de Aguas (2022), los Lagos Nor-patagónicos contemplan 23 lagos, entre las Regiones de la Araucanía y Los Lagos (39 °S - 42 °S), desde el Lago Collico hasta el Lago Chapo.

Por lo tanto, para efectos de este trabajo, se considerará como Lagos Sur-patagónicos, aquellos que comprenden desde el último Lago Nor-patagónico hacia el sur, es decir, desde el lago Chapo (sin incluirlo) en la Región de Los Lagos, hasta la Región de Magallanes.

Los Lagos Sur-patagónicos, han sido poco estudiados en comparación a los Lagos Nor-patagónicos, lo que se refleja en la limitada disponibilidad de datos. No obstante, se reconoce que gran parte de estos sistemas se mantienen relativamente inalterados, con zonas prístinas y vulnerables que aún se conservan (Reid, 2023).

A pesar de este carácter poco intervenido, los Lagos Patagónicos no están completamente exentos de la influencia humana. Estos ecosistemas se encuentran expuestos a los diversos usos de suelo asociados a la actividad humana como la agricultura, la ganadería y las plantaciones forestales. A ello se suma la expansión de la salmonicultura y las descargas de aguas servidas provenientes de asentamientos humanos, identificadas como importantes fuentes puntuales más importantes (CIEP., s. f.). Además, en los Lagos Sur-patagónicos se desarrollan actividades como el turismo, la acuicultura y la pesca deportiva (Pesse, 2016).

De acuerdo a lo descrito por Geller (1992), los lagos entre 47° S y 38° S, son cálidos monomícticos con temperaturas superficiales y profundas que oscilan entre 12 °C y 21 °C y entre 5,5 °C y 10 °C respectivamente, también se menciona que, en algunos de los lagos chilenos, el agua aparece intensamente verde debido a la turbidez del agua glaciar entrante. En estos lagos, la relación entre la profundidad de mezcla y la profundidad de Secchi suele ser superior a 3 m, alcanzando valores de 4,6 m y de 10,3 m en el lago Riesco y en el muy turbio Lago Rosselot. En el Lago General Carrera, la relación varía entre 5,2 m en el extremo occidental (debido a la entrada turbia del río Murta) y 3,2 m en la zona central (donde el agua es más clara). Por lo tanto, es de esperar que estos lagos, afectados en distinta medida por el agua glaciar y con profundidades de mezcla muy diferentes, presenten una composición de biomasa y productividad del fitoplancton muy diferentes.

Asimismo, entre los años 1984 y 1991, el gobierno de Chile, otorgó concesiones para el desarrollo de la salmonicultura, en el Lago Yelcho (R. de Los Lagos) y el Lago Riesco (R. de Aysén), los cuales representaron el 2.2 % de la producción de smolts en sistemas lacustres de Chile. Estos Lagos Sur-patagónicos, son sistemas monomícticos temperados con circulación invernal sus niveles de transparencia son relativamente bajos (7-8 m) en relación a sus profundidades (Yelcho=135 m: Riesco=66.5 m) (León-Muñoz, 2007).

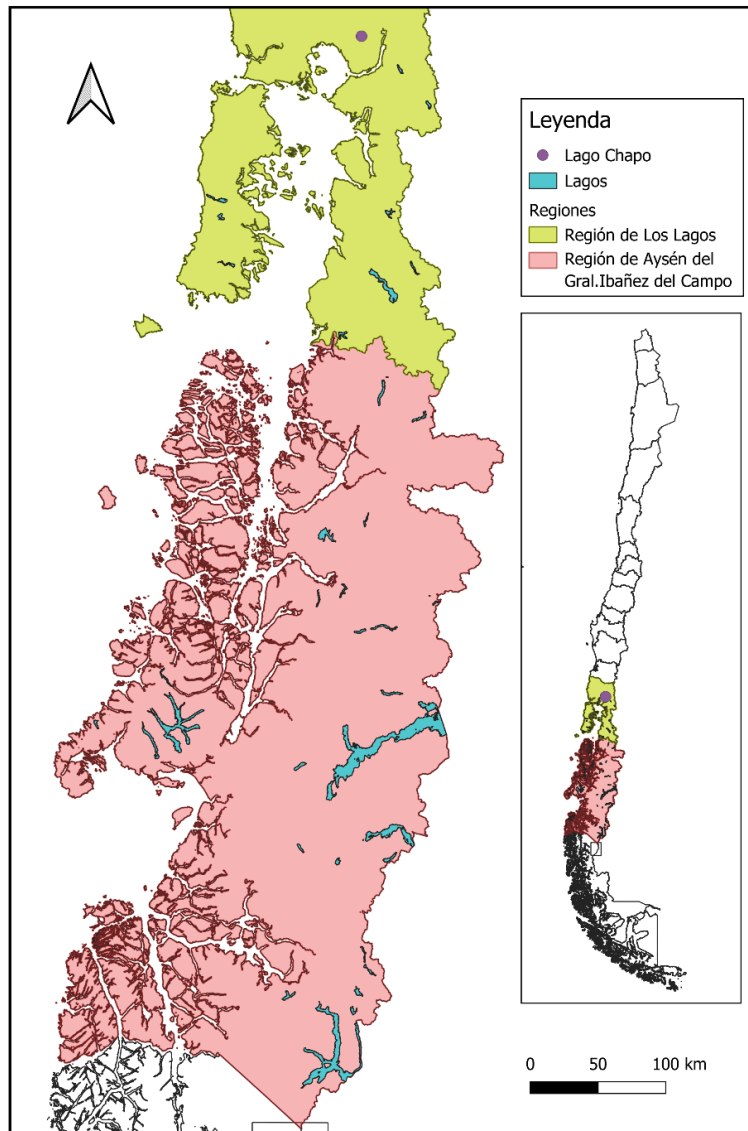
Según cifras actuales, para el año 2023, Chile, es el segundo productor de salmónidos en el mundo después de Noruega, se indica que un 99,7% de las cosechas de salmónidos provienen de las Regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes, siendo la Región de Los Lagos la que representó el 33,4% de la producción de salmónidos, la de Aysén el 53,7% y la de Magallanes el 12,7% (Consejo del Salmón, 2025; Arismendi, et al., 2009; Pesse, 2016).

Estas cuencas presentan usos de suelo preferentemente asociados a bosque nativo (>60%), siendo las superficies restantes de las cuencas fuertemente dominadas por suelos descubiertos,

nieves o hielos eternos (León-Muñoz, 2007). El territorio de la Patagonia, limita al norte con los bosques valdivianos de Chile y al sur con la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, ambos considerados puntos críticos de biodiversidad terrestre a nivel mundial (Reid, et al., 2023).

Producto de los distintos usos de suelo, y las distintas actividades humanas que se van acrecentando, es que, se hace necesaria la existencia de una Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) para los Lagos Sur-patagónicos, puesto que es necesario proteger y cuidar los lagos de sur de Chile. Es importante recalcar que, de los 360 lagos existentes en Chile, aproximadamente un 60% de ellos se concentra en las Regiones de los Lagos, Aysén y Magallanes.

En vista de la creciente vulnerabilidad de estos lagos oligotróficos y, del aumento en las concentraciones de nutrientes, que podría eventualmente en un futuro terminar en un proceso acelerado de eutroficación, sumado al crecimiento continuo de la población, además del incipiente desarrollo turístico, es necesario destacar la importancia de tomar un rol preventivo en cuanto al cuidado de estos sistemas, que además, permitiría abaratar costos, puesto que se propone desarrollar normas por grupo tipológico y no por lago. Considerando que hasta el momento solo existen 2 normas para lagos, sería de gran ventaja proponer una NSCA por grupo tipológico.



*Figura 1: Cartografía de los Lagos Sur-patagónicos.*

Fuente: Elaboración propia con el software QGIS.

## 2. Pregunta de investigación

¿Es posible identificar patrones de agrupamientos de los Lagos Sur-patagónicos en relación a las variables geomorfológicas para el desarrollo de una Norma Secundaria de Calidad Ambiental?

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Determinar grupos tipológicos para el desarrollo de una (o más) Norma Secundaria de Calidad Ambiental para los Lagos Sur-patagónicos.

#### 3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la tipología de los Lagos Sur-patagónicos según la Directiva Marco del Agua.
2. Validar la tipología con datos existentes de los Lagos Sur-patagónicos.
3. Proponer valores límites para una Norma Secundaria de Calidad Ambiental por grupo tipológico identificado.

### 4. Metodología

Para lograr los objetivos estipulados en la sección anterior, se establecieron una serie de actividades que se detallan en la Tabla 4:

*Tabla 4: Resumen de la metodología, según actividades por objetivo.*

Objetivo	Actividad
1. Analizar la tipología de los Lagos Sur-patagónicos según la Directiva Marco del Agua	Recopilar información de las cuencas lacustres
	Realizar tipología en base a las variables geomorfológicas
2. Validar la tipología con datos existentes de los Lagos Sur-patagónicos	Recopilar los datos de calidad de agua y definir su estado basal
	Validar la tipología obtenida con los datos de calidad de agua
3. Proponer valores límites para una Norma Secundaria de Calidad Ambiental por grupo tipológico	Conocer estado trófico de los Lagos Sur-patagónicos
	Designar un lago de referencia por grupo tipológico
	Establecer las variables y límites sugeridos a normar

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1. Área de estudio

Para limitar el área de estudio se seleccionaron los lagos que se encuentran en las regiones de Los Lagos y Aysén del Gral. Ibáñez del Campo, para efectos de este estudio no se considerará los lagos pertenecientes a la Región de Magallanes y Antártica Chilena.

Inicialmente se consideraron 97 lagos de un área mayor a 3 km<sup>2</sup>, siguiendo el criterio utilizado por la DGA en sus estudios (DGA., 1996; Salazar, & Soto, 1999). Sin embargo, posteriormente, se seleccionaron aquellos lagos con un área superior a 10 km<sup>2</sup>, basándose en la disponibilidad de información fisicoquímica proporcionada por el CIEP. A partir de este criterio, los lagos finalmente seleccionados son:

De la Región de Los Lagos correspondientes a un total de 10 lagos: Laguna Cucao, Laguna Tagua Tagua, Laguna Azul, Laguna Tepuhueico, Laguna Espolón, Laguna Chaiguata, Laguna Reñihue, Lago Huillinco, Laguna Trébol y Lago Yelcho.

Por su parte, la Región de Aysén aporta un total de 26 lagos: Lago Pdte. Roosevelt, Lago Condor, Lago Alegre, Lago Manuel Rodríguez, Lago Christie, Lago Chacabuco, Lago Cisne, Lago Caro, Lago Colonia, Lago Riesco, Lago Del Salto, Lago Briceño, Lago Bergues, Lago Leones, Lago Brown, Lago Verde, Lago Elizalde, Lago Lapparent, Lago Rosselot, Lago Bertrand, Lago Elena, Lago Yulton, Lago Cochrane, Lago Pdte. Ríos, Lago O'Higgins, y Lago General Carrera.

Los lagos identificados se encuentran en la Figura1, siendo el Lago Cucao el que presenta la menor superficie con 10,12 km<sup>2</sup>, mientras que el Lago General Carrera presenta la mayor superficie con 962 km<sup>2</sup>, representando a los extremos de tamaño dentro de las Regiones de Los Lagos y Aysén respectivamente.

Junto con este conjunto principal, se incorporaron otros 6 lagos, que son el Lago Castor, Laguna Perdices, Laguna Alta, Laguna Maldonado, Lago Negro, y Laguna Azul, los cuales, pese a tener

superficies inferiores a 10 km<sup>2</sup>, fueron incluidos debido a que cuentan con información fisicoquímica proporcionada por el CIEP. Estos datos resultan relevantes para la posterior validación de la tipología derivada del análisis estadístico. Finalmente, con estas incorporaciones, el número total de lagos considerados asciende a un total de 42 sistemas lacustres.

#### 4.2 Recopilar información de las cuencas lacustres

Se realizó una búsqueda sistemática de referencias bibliográficas en relación con la información disponible de los lagos en estudio con énfasis en datos de las Regiones de los Lagos y Aysén. Específicamente, la caracterización de las cuencas hidrográficas. La recopilación de datos se hizo a través de estudios científicos en los sitios web de Frontiers, Science Direct y Web of Science, así también, como la información disponible en la DGA, y complementada con los informes del IFOP (Instituto de Fomento Pesquero), en la página web del GISAC (Grupo de Investigación de Sistemas de Aguas Continentales).

Además, se reunieron los shape de cuencas, subcuencas, subsubcuena y el inventario de lagos disponible en la mapoteca de la Dirección General de Aguas (DGA), así como el shape de las Regiones de Chile obtenido de la Biblioteca del Congreso nacional (BCN). Adicionalmente, para un mejor cálculo de los parámetros, se ocupó el shape de lagos de la BCN, puesto que estos se asemejaban mucho más a la realidad, a excepción de algunos lagos, en ese caso se tuvieron que extraer de la capa de uso de suelo.

Por otro lado, se descargaron 2 Modelos de Elevación Digital (DEM) del IDE Chile (Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile), con celdas de 12.5 x 12.5 metros, uno para la Región de los Lagos y otro para la Región de Aysén, ambos del año 2016. Estos DEMs, se trabajaron con el software ArcGIS en su versión 10.4.1, con los programas ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox. La red hídrica de la zona de estudio se obtuvo de la página web de la BCN.

- Obtención Red Hídrica

En primera instancia se recortaron los DEMs con el shape de las regiones de Chile, luego para cada uno de los DEMs, los pasos a seguir fueron: Herramienta de análisis espacial → Hidrología → Rellenar → Dirección de flujo → Acumulación de flujo.

Para la obtención de la red hídrica se utilizó la Herramienta de análisis espacial, con los siguientes pasos: Algebra de mapa → Calculadora ráster → para la acumulación de flujo de cada DEM, se aplicó  $\log_{10}$ , luego, nuevamente en calculadora ráster, se creó una condicional, sobre 3. Finalmente, se utilizó la herramienta vinculo de arroyo para unir los tramos.

- Delimitación cuencas

Posteriormente, para delimitar las cuencas se generó un punto tipo shape, para cada uno de los lagos, por cada punto que se creaba, casi de inmediato se creaba la cuenca, con la herramienta Cuenca Hidrográfica, a excepción de los Lagos Gral. Carrera, O'Higgins, Cochrane y Cisnes que se delimitaron mediante las subsubcuencas de la DGA, puesto que la red de drenaje en esas cuencas se cortaba, lo que resultaba en cuencas mal procesadas, luego una a una se transformaron de ráster a shape con: Herramientas de conversión → de ráster → de ráster a polígono, y finalmente, se unieron todas las cuencas en un solo shape, mediante la herramienta: Geoprocesamiento → Fusionar. Cabe mencionar que se trabajó con las coordenadas en WGS\_1984\_UTM\_Zone\_19S.

- Información hidrológica

Se buscó principalmente en estudios científicos de universidades, privados y plataformas del gobierno (DGA, MOP, MMA, SUBPESCA), esta constó en caracterizar cada lago con sus afluentes y efluentes principales a través de la plataforma de Información Hidrometeorológica y de Calidad de Agua en línea, a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA).

- Información morfológica

Se recopiló información de los parámetros morfológicos de los Lagos Sur-patagónicos tales como: Área superficial, latitud, longitud, altitud, longitud máxima, profundidad media, profundidad máxima, profundidad criptodepresión, relación profundidad media/profundidad máxima, volumen, área de drenaje, relación área de drenaje/área lago, tiempo residencia, perímetro, ancho máximo, ancho medio y desarrollo de línea de costa.

Los parámetros latitud y longitud, se obtuvieron del shape del inventario de lagos de la DGA, la altitud, se obtuvo de Google Earth, la longitud máxima, ancho máximo, área superficial, perímetro, área de drenaje y desarrollo de línea de costa, se obtuvieron de ArcGIS, la profundidad máxima, profundidad media, volumen y tiempo de residencia se obtuvieron de la literatura revisada, y por último la profundidad criptodepresión, el ancho medio, la relación profundidad media/profundidad máxima y relación área de drenaje/área lago se obtuvieron a través del cálculo matemático en el software Microsoft Excel.

Luego de recopilar la información, se elaboró una base de datos para un mayor orden en el software Microsoft Excel. A continuación, se definen los parámetros morfométricos utilizados en la caracterización de los Lagos Sur-patagónicos:

**Ancho máximo:** Es la distancia máxima de la superficie de un lago, a un ángulo recto de la línea entre las costas.

**Ancho medio:** Es igual al área superficial dividida en la longitud máxima, es un valor aproximado.

**Longitud máxima:** Es la distancia de la superficie de un lago entre los puntos más distantes de la orilla.

**Área (A):** Superficie del lago.

**Perímetro o Longitud de Línea de costa (P):** Es la longitud de la línea divisoria del lago.

**Desarrollo de Línea de Costa (DLC):** Es una medida de la regularidad del contorno del lago, es decir, su mayor o menor semejanza a un círculo. Se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$DLC = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A}}$$

**Profundidad máxima (Zm):** Es la mayor profundidad de un lago.

**Profundidad media (Z):** Es el volumen dividido en el área superficial (V/A).

**Profundidad criptodepresión:** Es la parte teórica de un lago que queda por debajo del nivel del mar, se obtiene de la resta entre la profundidad máxima y la altitud del lago.

**Relación profundidad media/profundidad máxima:** Su valor indica la aproximación muy generalizada de la forma de la cubeta a la forma cónica.

**Relación área de drenaje/área lago:** Este parámetro indica cuanto de agua aporta al área de drenaje en comparación al tamaño del lago.

**Área de drenaje:** Es la proyección del área de drenaje de un sistema de esorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

**Volumen (V):** Corresponde al volumen de agua del lago. El volumen es la suma de los volúmenes de los estratos sucesivos desde la superficie hasta el punto de mayor profundidad.

**Tiempo de renovación teórico:** Es el tiempo promedio requerido para llenar una cuenca lacustre con agua si esta fuera completamente vaciada.

- Información geológica

La información geológica se obtuvo del mapa geológico de Chile: Versión Digital del 2003 del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y del archivo shape del mapa geológico. Este último se trabajó en el software ArcGIS. En primer lugar, con la herramienta de

Geoprocesamiento, se intersectó el shape de geología con el shape de las cuencas de los lagos, lo que resultó en un área aportante de geología por cuenca, luego la información de la tabla de atributos, de este nuevo shape, se descargó y se trabajó en Excel, para identificar la geología de cada uno de los lagos, y posteriormente calcular el porcentaje total de cada uno de ellos.

El mapa geológico de Chile, proporciona información basada en edades geológicas y el tipo de roca predominante de cada código geológico, lo que permite interpretar de forma general el sustrato rocoso presente en cada cuenca. Si bien la DMA sugiere clasificar la geología en categorías como silíceas, calcáreas u orgánicas, esta última no fue considerada en el presente estudio, debido a que el mapa geológico nacional no entrega información específica sobre formaciones orgánicas (como turberas o suelos con alto contenido de carbono). Por esta razón, se optó por una clasificación más bien cualitativa, interpretativa y general de la geología.

- Áreas Protegidas

Se descargó el shape del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), desde el sitio web Línea de bases públicas del MMA, del año 2025, el que se trabajó en ArcGIS, así como también los shape de Reservas de la Biósfera, sitios Ramsar, Sitios del Patrimonio Mundial, los Sitios Prioritarios para la conservación de la Biodiversidad, los Bienes Nacionales Protegidos, los Paisajes de Conservación descargados del geoportal SIMBIO del MMA. Luego se realizó el corte con la cuenca de los lagos, para hacer la descripción de acuerdo a la cartografía realizada en el software ArcMap. En la tabla de los atributos de los shape, se calculó el área para una de ellos.

- Uso de Suelo

Se utilizó el shape de uso de suelo de la Región de Los Lagos y Aysén, descargados de la página web de CONAF ([sit.conaf.cl](http://sit.conaf.cl)), de los años 2020-2022, para luego cortarlos con el shape de

cuenca de los Lagos Sur-patagónicos. Finalmente, se unieron para crear la cartografía asociada al subuso del suelo, se consideró esta categoría puesto que, especificaba la diferencia entre Bosques. Por último, la tabla de atributos se trabajó en Excel, con esta se realizó una tabla dinámica, para conocer la composición del suelo por Región.

#### 4.3 Desarrollo de las tipologías en base a las variables geomorfológicas

Para la realización de la tipología de los lagos estudiados, se aplicó el Sistema B, que incluye al Sistema A propuesto por la DMA, para esto, en una matriz de datos en Excel se ordenaron 11 variables morfológicas: Altitud, Longitud máxima, Ancho máximo, Área de drenaje, Perímetro, Desarrollo línea costa, Área superficial, Ancho medio y Relación Área drenaje/Área superficial y 2 variables geológicas, las cuales son: Silíceo y Mixto (contiene geología silíceo y calcárea), estas últimas fueron elegidas por estar en mayor proporción en la cuenca de los lagos.

Se trabajó con el software Rstudio, donde en primera instancia se realizó la correlación de Pearson, la cual, se representó como un gráfico de correlaciones, y luego se estandarizaron los datos aplicando la función *scale* para cada técnica a utilizar en el programa.

Dado lo anterior, en Rstudio, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con la finalidad de detectar patrones sobre las variables geomorfológicas. El (ACP) permitió encontrar transformaciones ortogonales de las variables originales para conseguir un nuevo conjunto de variables incorreladas, denominadas Componentes Principales, que se obtienen en orden decreciente de importancia. Lo que permite representar óptimamente en un espacio de dimensión pequeña, observaciones de un espacio general  $p$ -dimensional. En este sentido, componentes principales es el primer paso para detectar variables “latentes” o no observadas, que están generando variabilidad en los datos. Así también permite transformar las variables originales, en general correladas, en nuevas variables incorreladas, facilitando la interpretación de los datos.

Luego, se realizó un Análisis de Conglomerados Jerárquico (ACJ) con el propósito de encontrar observaciones similares entre sí dentro de cada grupo y, por último, se aplicó la técnica de Escalamiento Multidimensional (MDS), para revelar proximidades entre pares de objetos, como distancias en un espacio de baja dimensión. El último análisis se utilizó para validar los resultados del ACJ.

En el análisis preliminar de las variables geomorfológicas, se decidió excluir la variable Relación Área drenaje/Área superficial, puesto que, corresponde al cociente de dos variables que ya están incluidas en el conjunto de datos. Su permanencia generaba redundancia y podía distorsionar los resultados tanto del ACP, como del ACJ, otorgando un peso desproporcionado a las variables involucradas. Esta depuración dio lugar al segundo análisis.

Posteriormente, en el análisis 2, se identificó que la variable Perímetro presentaba una correlación elevada con el Área superficial, reflejando que ambas describen información similar asociada al tamaño del lago, por lo que habría información redundante. Por ello, la inclusión simultánea de ambas variables introduciría colinealidad sin aportar varianza adicional relevante. Por ende, se extrajo la variable perímetro, para plasmarlo en el tercer análisis.

De acuerdo a lo anterior, en el tercer análisis, se decidió excluir de manera conjunta las variables Relación Área drenaje/Área superficial y Perímetro, dada las justificaciones previamente indicadas. Con ello, el conjunto final quedó conformado por 11 variables geomorfológicas, dando origen al cuarto y último análisis. Para efectos del presente trabajo solo se describe e interpreta este análisis final.

#### 4.4 Recopilación de los datos de calidad de agua y definición del estado basal

Se elaboró una base de datos con la información histórica de la calidad de agua con todos los parámetros físicoquímicos y biológicos encontrados de cada lago, obtenidos a través de la

plataforma de Información Hidrometeorológica y de Calidad de Agua en línea, a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA), así como también, de estudios desarrollados por universidades y entidades privadas. Un aporte relevante de datos provino del CIEP, cuyos registros más recientes, correspondientes al período 2015–2021, con datos que aportaron a los parámetros CE, Transparencia, pH, % OD, OD, Temperatura y Clorofila a.

#### 4.5 Validar la tipología obtenida con los datos de calidad de agua

A partir de la base de datos anterior, se crea una nueva base de datos con los parámetros de todos los lagos, para todos los años con datos disponibles por tipología. Esta base de datos incluyó los parámetros: temperatura, conductividad específica, pH, oxígeno disuelto, turbiedad, transparencia, nitrógeno, fósforo, clorofila a, sílice, demanda química de oxígeno, sólidos totales suspendidos, bicarbonato, calcio disuelto, alcalinidad, dureza, productividad primaria, entre otros parámetros con muy pocos datos disponibles, con un total de 6461 datos para 72 variables con al menos un dato cada una, para 18 lagos con información disponible encontrada. Desde el año 1991 hasta el 2024.

Luego, se priorizaron los parámetros con mayor cantidad de datos para la validación de la tipología, que se realizó con los datos geomorfológicos, siendo estos, conductividad específica, pH, oxígeno disuelto, fierro total, manganeso total, temperatura, zinc total, arsénico total y cobre total. Cabe destacar que como había variables que tenían muchas filas con datos vacíos, se imputo, mediante regresión, además se dejaron aquellas filas con el máximo del 25% de los datos faltantes, todo esto con el fin de considerar más variables al momento del análisis, puesto que el programa Rstudio no trabaja con casillas vacías.

Además, en el software, se aplicó un Análisis de Componente Principal (ACP) para detectar patrones de comportamiento, luego un Análisis de Conglomerado Jerárquico (ACJ) y el Algoritmo K-medias.

El Análisis Clúster para clasificar objetos (lagos y variables), el cual se utiliza como una técnica exploratoria y el K-medias para dividir M observaciones (número de objetos) de N dimensiones (atributos de un objeto) en k grupos.

Cabe mencionar que, para la validación, se extrajeron las filas con datos de los lagos Huillinco y Cucao, puesto que se separaban bastante de los demás, esto sucede puesto que estos lagos chilotes, hay introducción de agua salina, por lo que los valores de conductividad por ejemplo son elevados.

#### 4.6 Definición del estado trófico de los Lagos Sur-patagónicos

##### 4.6.1 Tratamiento de los datos de calidad de agua

Previo al cálculo de los índices tróficos y, de la base de datos con la información histórica de la calidad del agua de cada lago, que se obtuvieron de 3 fuentes principales, de la plataforma de Información Hidrometeorológica y de Calidad de Agua en línea, de la DGA, así como de información bibliográfica proveniente de estudios de universidades y privados, y complementada con la información del CIEP. Se realizó un tratamiento a los datos, para eliminar los outliers presentes en la matriz, ya que indican desviaciones marcadas del resto de las observaciones. Esto se hace de manera general, a todos los años, mediante la formula:

$$\text{Si } |x_i - \bar{x}| > 3 * \sigma \rightarrow x_i \text{ es outliers}$$

$x_i$ : valor a probar

$\bar{x}$ : media del conjunto de datos

$\sigma$ : desviación estándar del conjunto

Por lo que se procede a descartar los datos atípicos identificado por la formula anterior. Si el valor se encuentra en el límite de control, se considerará como un valor real, y si el valor resulta mayor a tres veces la desviación estándar, entonces se considera outlier (DGA., 2017).

#### 4.6.2 Estado Trófico

Este objetivo se realizó mediante el cálculo de índices que manifiesten la condición trófica, siendo los más utilizados aquellos que integran más de un criterio en la clasificación. A continuación, se describen los tres índices utilizados en este trabajo de investigación.

- Índice de Carlson

El índice de Carlson (TSI, del inglés Trophic State Index) es uno de los más utilizados en el mundo, este índice, utiliza el supuesto de que el material particulado suspendido controla la profundidad Secchi y que la concentración algal en el agua es la principal fuente de este material (Dirección General de Aguas., 2018). En la Tabla 5 se indica la forma de calcular este índice.

Tabla 5: Fórmulas para estimar el indicador trófico de cada variable y el índice total.

Parámetro de eutrofización	Carlson (1977; 1980)
Claridad del agua (DS) (m)	$TSIDS = 60 - 14.41Ln(Ds)$
Fósforo total (Ft) (mg/m <sup>3</sup> )	$TSIPt = 14.42Ln(Pt) + 4.15$
Clorofila "a" (Clorf a) (mg/m <sup>3</sup> )	$TSIClorf a = 9.81Ln(Clorf a) + 30.6$
Índice	$TSI = (TSIDS + TSIPt + TSIClorf a) / 3$

Fuente: Dirección General de Aguas., 2018.

El cálculo anterior resulta en un valor numérico entre 0 y 100, abarcando rangos de trofia desde el Oligotrófico al Hipereutrófico (Tabla 6).

Tabla 6: Rango de valores del índice de Carlson según el estado trófico, color y descripción.

Estado	Rango TSI	Color	Descripción
Hipereutrófico	>70	Rojo	Productividad limitada por la disponibilidad de luz, abundantes macrófitas, anoxia en hipolimnion.
Eutrófico	50-70	Naranja	(50-60) Eutrofia Algas azules dominan, muchas macrófitas. (60- 70) Eutrofia Algas abundantes, problemas con oxigenación en el hipolimnion.
Mesotrófico	40-50	Amarillo	Disminución de la transparencia, algas aumentan, oxigenación en hipolimnion puede disminuir durante el verano.
Meso Oligotrófico	30-40	Verde	Aumenta productividad primaria.
Oligotrófico	<30	Azul	Agua transparente, muy buena oxigenación en el hipolimnion.

Fuente: Dirección General de Aguas., 2018.

- Estado trófico de acuerdo a la OCDE (1982)

Este índice analiza la caracterización trófica de sistemas acuáticos mediante la concentración promedio anual de Pt (ug/L), concentración promedio anual de la Chl-a en la zona eufótica (ug/L); concentración máxima anual de Chl-a en la zona eufótica (ug/L) (Tabla 7), promedio anual de la transparencia del agua (m) y mínimo anual de la transparencia del agua. Además, agrega la categoría ultraoligotróficos para diferenciar de los cuerpos de agua oligotróficos.

*Tabla 7: Valores establecidos por la OCDE (1982) para determinación del estado trófico.*

Categoría trófica	PTOT (ug/l)	Clorofila a (ug/L)		Transparencia DS (m)	
		Media	Máxima	Media	Máxima
Ultraoligotrófico	<4,0	<1	<2,5	>12	>6
Oligotrófico	<10	<2,5	2,5-8	>6	>3
Mesotrófico	10-35	2,5-8	8-25	6-3	3-1,5
Eutrófico	35-100	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7
Hipertrófico	>100	>25	>75	<1,5	<0,7

Fuente: Alvial, 2018.

- Índice de Burns

Este índice calcula un Índice de Nivel Trófico (INT), el cual utiliza los valores anuales medidos de Clorofila "a" (Chl a), profundidad de Secchi (SD), Fósforo total (Pt) y Nitrógeno total (Nt) (Burns et al., 2009; Burns et al., 2005), considera el uso de los mismos parámetros del índice de Carlson, pero incorpora además la concentración de nitrógeno total en su estimación. Cabe mencionar que, debe prestarse especial atención al TLc, porque la concentración de clorofila es la medida más directa de la condición trófica (Burns et al., 2005).

El sistema desarrollado por Burns et al. (2005) para los lagos de Nueva Zelanda, ha sido utilizado ampliamente, debido a la similitud que presentan estos cuerpos de agua con los lagos del sur de Chile, tal como señalan diversos autores (Van de Vyver et al., 2019; Geller, 1992). Así también la Dirección General de Aguas también emplea esta clasificación en sus estudios.

En la Tabla 8, se encuentran las fórmulas utilizadas para obtener los valores, que posteriormente en la Tabla 9, describen el estado trófico al que pertenecen según el valor obtenido de la fórmula Índice.

Tabla 8: Fórmulas para calcular el Índice de Burns.

Parámetro	Fórmula
Clorofila "a" (Chl a)	$T_{Lc}=2,22+2,54 \text{ Log (Chl a)}$
Profundidad Secchi (DS)	$T_{Ld}=5,10+2,60 \text{ Log (1/DS-1/40)}$
Fósforo total (Pt)	$T_{Lp}=0,218+2,92 \text{ Log (Pt)}$
Nitrógeno total (Nt)	$T_{Ln}= -3,61+3,01 \text{ Log (Nt)}$
Índice	$T_{LI}=(T_{Lc}+T_{Ld}+T_{Lp}+T_{Ln}) / 4$

Fuente: Burns et al., 2009.

Tabla 9: Estado de los lagos, niveles tróficos y valores de las cuatro variables clave que definen los diferentes tipos de lagos.

Estado	Nivel trófico	Chl a (mg/m <sup>3</sup> )	Disco Secchi (m)	Pt (mg/m <sup>3</sup> )	Nt (mg/m <sup>3</sup> )
Ultramicrotrófico	0,0 a 1,0	0,13 – 0,33	31 - 24	0,84 – 1,8	16 - 34
Microtrófico	1,0 a 2,0	0,33 – 0,82	24 - 15	1,8 – 4,1	34 - 73
Oligotrófico	2,0 a 3,0	0,82 – 2,0	15 – 7,8	4,1 – 9,0	73 - 157
Mesotrófico	3,0 a 4,0	2,0 – 5,0	7,8 – 3,6	9,0 - 20	157 - 337
Eutrófico	4,0 a 5,0	5,0 - 12	3,6 – 1,6	20 - 43	337 - 725
Supertrófico	5,0 a 6,0	12 - 31	1,6 - 0,7	43 - 96	725 - 1558
Hipertrófico	6,0 a 7,0	> 31	< 0,7	> 96	> 1558

Fuente: Burns et al., 2005.

#### 4.7 Designar un lago de referencia por grupo tipológico

Luego de obtener los índices de estado trófico de la actividad 4.5.2, se analizaron los lagos respecto a su condición trófica, con el fin de identificar el lago que presentan la mejor calidad de agua dentro de cada grupo.

Posteriormente, se analizó la base de datos generada en la actividad 4.4.1, considerando los años disponibles, la cantidad de parámetros y el número de datos por lago. Con estos datos se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana y moda) y medidas de dispersión (valor

mínimo, valor máximo, desviación estándar y los percentiles 75, 66 y 33), lo que permitió describir el comportamiento general de cada parámetro y lago. Dado que los lagos Sur-Patagónicos presentan baja intervención humana y cuentan con registros históricos, esta caracterización permite aproximarse a su condición basal, entendida como el comportamiento natural y característico del sistema.

Finalmente, a partir de la condición trófica y la caracterización estadística realizada, se seleccionó el lago que presenta el mejor estado dentro de cada grupo tipológico. Este lago definido como el lago de referencia, se utilizó como línea base, respecto a calidad deseada, que se quiere obtener para el resto de los lagos de su grupo.

#### 4.8 Variables y límites sugeridos para el desarrollo de una norma secundaria de calidad de agua para Lagos Sur-patagónicos

Una vez obtenidos los datos de calidad de agua de los lagos, y considerando únicamente aquellos para los cuales existe información disponible, se procedió a identificar las variables relevantes y a proponer valores límite que permitan establecer una norma para cada grupo tipológico identificado.

En esta actividad, no se incluyeron los Lagos Huillinco y Cucao, puesto que son lagos salinos, que poseen valores altos de Conductividad Eléctrica (CE), y baja transparencia, como se mencionó anteriormente, por lo que la selección de los variables y valores se vería afectada producto de las condiciones especiales de estos lagos chilotes.

Para la selección de parámetros se utilizó principalmente la base de datos generada para los lagos, considerando tanto las variables que cuentan con registro histórico, como aquellas incluidas en las NSCA del Lago Llanquihue y Villarrica. Además, se tomó como referencia la Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas del MMA (2017). Finalmente, se consideraron variables relacionados a las fuentes

emisoras en la cuenca, el estado trófico, y el impacto de los parámetros en los ecosistemas acuáticos (MMA, 2017).

Luego, para establecer los valores propuestos para la norma, se elaboró una nueva matriz con las medidas de tendencia central y medidas de dispersión de los lagos agrupados por grupo tipológico, con el fin de describir el comportamiento de cada grupo. A partir de esta información, se seleccionaron los valores correspondientes al percentil 75 de los lagos de referencia de cada grupo tipológico, con el propósito de que, una vez sean monitoreados, los lagos cumplan con la norma propuesta en esta investigación.

La selección de estos valores busca representar la condición óptima esperable para cada grupo, tomando como referencia la calidad histórica de sus aguas. De este modo, se pretende asegurar la conservación de estos sistemas lacustres y de los Servicios Ecosistémicos que proveen. Asimismo, se espera que estos valores permitan orientar la gestión ambiental incluso en aquellos lagos que actualmente no cuentan con información disponible, de manera que, al ser monitoreados, puedan evaluarse conforme a la norma propuesta.

## 5. Resultados y Discusión

### 5.1 Análisis de la tipología de los Lagos Sur-patagónicos según la DMA

#### 5.1.1 Recopilar información de las cuencas lacustres

- Cuencas lacustres

Un lago y su cuenca de drenaje constituyen una sola unidad, donde las características del cuerpo de agua están profundamente influenciadas por los procesos que se desarrollan en la cuenca. Así también, el tamaño del lago y de su cuenca, afectan los flujos de nutrientes, tanto por escorrentía superficial como por aportes de aguas subterráneas. Asimismo, los sedimentos

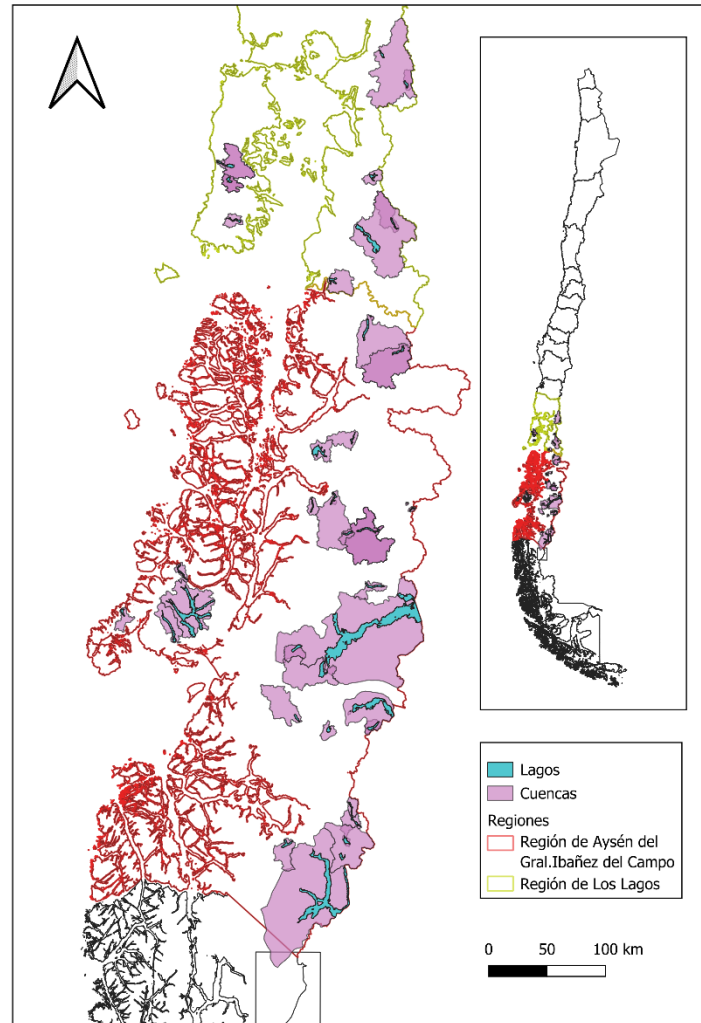
pueden incorporarse a la columna de agua, a través de la resuspensión inducida por el viento, lo que tiene una influencia significativa en la química del agua del lago, la hidrodinámica, el clima lumínico, los ciclos biogeoquímicos y la estructura de la red alimentaria (Nõges, 2009). En términos físicos, el régimen térmico de los lagos está influido directamente por la radiación solar que llega al espejo de agua (Campos., 1999).

En la Figura 2, se presentan las 42 cuencas lacustres con sus respectivos lagos. Cabe mencionar que, durante el proceso, delimitación del área de drenaje en ArcGIS, las cuencas fueron creadas de manera individual, lo que generó que algunas de ellas quedaran superpuestas. Por esta razón, algunas cuencas se ven más oscuras que otras.

De la Tabla 10 a la 14, se muestran los parámetros morfométricos de los Lagos Sur-patagónicos considerados en el presente estudio, siendo el Lago General Carrera el que presenta mayor Línea de costa y Área superficial, con valores de 605,6 km y 962,5 km<sup>2</sup>, respectivamente, en contraste con el Lago Maldonado, siendo el lago con menor área superficial con 0.19 km<sup>2</sup>, y la Laguna Perdices con la menor línea de costa, 2.63 km.

Además, destaca el Lago General Carrera por poseer el mayor volumen, la mayor profundidad media, mayor área de drenaje, con valores de 470 km<sup>3</sup>, 488 km y 7244 km<sup>2</sup>, respectivamente. Además, este lago posee el valor más alto para longitud máxima, con 105 km. Respecto a la profundidad máxima, el Lago O'Higgins con 800 m, se ubica en primer lugar en cuanto a este parámetro, por el contrario, el Lago Maldonado posee 7 m.

Es importante mencionar que tanto la profundidad media, como la profundidad máxima, no están disponibles para 24 lagos del total. También, el volumen, y el tiempo de renovación se evidencia una gran cantidad de datos faltantes.



*Figura 2: Cuencas lacustres Lagos Sur-patagónicos.*

Fuente: Elaboración propia con el software QGIS.

Con respecto al menor valor de área de drenaje corresponde a la laguna azul con 4.73 km<sup>2</sup>. En cuanto al tiempo de residencia del agua, el Lago Cochrane es el que tiene el mayor valor con 26.7 años, lo que implica que el tiempo de renovación de aguas es alto respecto del resto, y además indica que el lago posee mayor sedimentación. Los lagos Huillinco y Cucao son los que poseen menos altitud con un valor de 2 msnm.

De los lagos con un área superficial menor a 10 km<sup>2</sup>, destaca La Laguna Perdices por presentar la mayor altitud con 725 m, y el mayor valor de profundidad criptodepresión con un valor de 718

m. El Lago Maldonado presenta los valores mínimos para longitud y ancho máximos con 0.66 km y 0.33 km, respectivamente, y el Lago Castor el que presenta el menor volumen con 0.09 km<sup>3</sup>.

Tabla 10: Parámetros morfométricos de los Lagos Sur-patagónicos.

Parámetro	Lat	Long	Alt.	Long máx.	Ancho máx.	Área drenaje	Perímetro	Desarrollo L. Costa	Área superficial	Prof. máx	Prof. media	Ancho medio	Prof. Media / Prof Máx	A drenaje/ A Superf	Prof. criptodepresión	Volumen	Tiempo renovación
Unidad	-	-	msnm	Km	Km	Km <sup>2</sup>	Km	-	Km <sup>2</sup>	m	m	Km	-	-	M	Km <sup>3</sup>	años
Alegre	48° 02'	72° 28'	485	13,1	1,4	122,47	35,20	3,12	10,15			0,78		12,06			
Azul	41° 57'	71° 52'	217	7,6	2,3	135,01	22,30	1,71	13,61			1,79		9,92			
Bergues	48° 20'	73° 16'	28	11,6	5,4	337,02	35,56	2,12	22,33			1,92		15,09			
Bertrand	46° 57'	72° 51'	204	22,3	6,1	970,68	55,82	2,23	50,03			2,24		19,40			
Briceño	48° 18'	72° 35'	464	9,6	3,5	104,82	34,18	2,33	17,13			1,78		6,12			
Brown	47° 23'	72° 13'	499	11,8	2,9	122,65	34,07	2,11	20,70			1,75		5,93			
Caro	45° 48'	72° 33'	206	10,3	2,3	1375,02	24,35	1,82	14,23			1,38		96,62			
Chacabuco	47° 26'	72° 47'	233	6,2	3,4	139,62	21,03	1,73	11,77			1,90		11,86			
Chaiguata	43° 09'	73° 52'	140	16,7	2,1	166,80	51,67	3,82	14,58			0,87		11,44			
Christie	48° 08'	72° 26'	516	13,5	2,6	168,92	38,44	3,17	11,67			0,86		14,48			
Cisnes	48° 26'	72° 38'	254	9,5	5,5	1098,28	27,01	2,10	13,16			1,38		83,49			
Cochrane	47° 10'	72° 14'	152	48,9	6,3	1142,10	171,62	3,58	182,77	460,00	191,50	3,74	0,42	6,25	0,00	35,00	26,70

Colonia	47° 20'	73° 09'	143	7,68	2	707,5 3	19,87	1,69	11,05		18,10	1,44		64,04		0,20	
Condor	45° 34'	72° 58'	125	14,2	1	125,9 9	39,23	3,36	10,84			0,76		11,62			
Cucao	42° 39'	74° 05'	2	7,9	1,8	850,4 9	23,62	2,10	10,12	25,00	12,55	1,10	0,50	84,07	0,00	0,13	0,10
Del Salto	46° 08'	74° 32'	4	19,9	1,3	117,6 6	52,63	3,65	16,58			0,83		7,10			
Elena	46° 35'	74° 40'	26	32,1	3,2	442,5 6	84,31	3,37	49,68			1,55		8,91			
Elizalde	45° 46'	72° 19'	220	23,1	1,7	1270, 55	56,36	3,07	26,75	300,0 0	97,93	1,30	0,33	47,49	0,00	2,62	10,00
Espolón	43° 11'	72° 00'	401	13,1	1,4	485,7 9	34,45	2,56	14,46	162,0 0	89,91	1,50	0,56	33,60	239,00	1,30	
Carrera	46° 30'	72° 00'	202	105	13,5	7244, 00	605,64	5,51	962,57	600,0 0	488,28	9,17	0,81	7,53	0,00	470,00	
Huillinco	42° 40'	73° 57'	2	8,1	3,2	805,4 6	27,31	1,77	18,92	47,00	20,88	1,90	0,44	42,57	0,00	0,40	0,23
Lapparent	46° 14'	72° 14'	481	19	1,9	204,4 4	45,92	2,57	25,48			1,34		8,02			
Leones	46° 46'	73° 09'	315	9,82	3,04	203,1 9	26,80	1,67	20,39	360,0 0	98,08	2,08	0,27	9,97	0,00	2,00	
Manuel Rodríguez	46° 27'	75° 15'	11	8,8	7	169,7 4	21,16	1,81	10,83			1,23		15,67			
O'Higgins	48° 50'	72° 45'	252	117	16	5014, 15	450,98	5,71	496,75	800,0 0	68,00	4,25	0,09	10,09	0,00	33,78	
Pdte. Ríos	45° 03'	72° 28'	32	12,7	1,8	1471, 30	455,96	7,30	310,13			24,42		4,74			
Pdte. Roosevelt	46° 29'	74° 26'	16	62,3	7,2	308,0 4	31,53	2,77	10,32			0,17		29,84			

Reñihue	42° 46'	72° 16'	220	13,1	5,7	186,8 3	45,35	2,92	19,22			1,47		9,72			
Riesco	45° 31'	72° 43'	15	14	1,5	2497, 46	34,81	2,55	14,81	120,0 0	70,21	1,20	0,59	168,59	0,00	1,04	1,00
Rossetot	44° 08'	72° 19'	60	20,9	2,1	2504, 03	53,23	2,53	35,33	400,0 0	161,33	1,69	0,40	70,87	0,00	5,70	
Tagua- Tagua	41° 41'	72° 09'	24	9,2	2,4	2348, 07	23,38	1,89	12,21			1,33		192,32			
Tepuhueico	42° 48'	73° 58'	45	5,2	3,1	203,5 1	24,90	1,87	14,15	25,00	9,05	2,50	0,36	14,39	20,00	0,13	1,00
Trébol	43° 39'	72° 45'	23	10,9	7,2	465,9 0	42,15	2,62	20,61			1,89		22,61			
Verde	44° 16'	71° 56'	270	16,2	2,1	1216, 86	49,72	2,99	22,07			1,36		55,14			
Yelcho	43° 19'	72° 18'	45	37	7,9	2759, 05	117,26	3,00	121,46	238,0 0	109,50	3,26	0,46	22,72	0,00	13,30	1,00
Yulton	45° 06'	72° 55'	470	20,8	5,6	294,4 0	71,42	2,56	61,74			2,97		4,77			
Laguna Azul	45°5 5'	72°11'	328	6,86	1,58	4,73	3,83	1,63	0,44			1,08		10,75			
Lago Negro	46°5 4'	72°47'	83	1,59	0,37	11,18	4,07	1,55	0,55	15		0,28		20,35	68,00		
Laguna Maldonado	47° 15'	72° 30'	324	0,66	0,33	7,11	2,85	1,85	0,19	7		2,14		37,47	317,00		
Laguna Alta	45°3 1'	72°42'	74	1,57	0,9	10,98	4,21	1,26	0,89	50		0,50		12,32	24,00		
Laguna Las Perdices	47°	84° 56'	725	0,99	0,42	5,69	2,63	1,35	0,30	7		0,28		18,79	718,00		
Lago Castor	45° 36'	71°47'	690	5,68 6	2,52	23,85	20,51	2,73	4,49	55	21,22	0,76	0,39	5,31	635,00	0,09	

Fuente: Elaboración propia a partir de software Google Earth, ArcGIS y revisión bibliográfica.

Los valores 0.00 en la variable profundidad criptodepresión se deben a que, para algunos lagos, el cálculo arrojó valores negativos. Dado que R no permite trabajar con valores negativos en este contexto, dichos valores se transformaron a 0.00. De todas formas, esta variable no fue incluida en el análisis debido a la cantidad de datos faltantes.

- Geología

La geología está estrechamente relacionada con las propiedades del suelo, lo que influye en la calidad del agua (Djodjic, et al., 2021). Es por esto que la geología se considera como una de las variables con mayor relevancia en la tipología de lagos.

En la Figura 3, se observa la distribución de las distintas secuencias geológicas basada en edades geológicas y litología dominante para cada cuenca, según el Mapa Geológico de Chile. En el Anexo 1, se adjunta la descripción de cada abreviatura de la secuencia presente en el área de estudio.

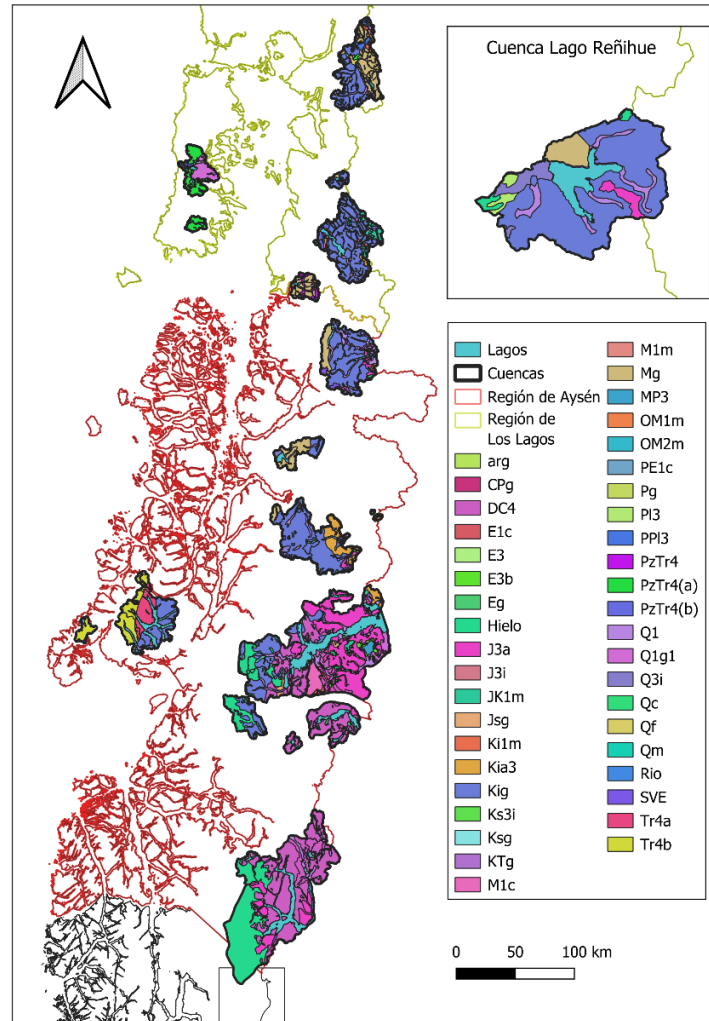


Figura 3: Mapa de la geología por cuenca lacustre de los Lagos Sur-patagónicos.

Fuente: Elaboración propia con el software QGIS a partir del shape de mapa geológico.

A partir del Mapa Geológico de Chile, y considerando la información disponible sobre edades y tipos de rocas, se realizó una interpretación química de la composición de las rocas presente en la zona de estudio. Esta interpretación se basó en las características de las rocas descritas para cada edad geológica. Tal como se indicó en la metodología, la geología de tipo orgánica no fue incluida, debido a la falta de información suficiente que permitiera su correcta clasificación.

En la Tabla 11 se muestra la clasificación de las abreviaturas correspondientes a los tipos geológicos definidos: Silíceo, Calcáreo, Mixto (composición de 2 tipos, Silíceo y Calcáreo) y Otros. Del total de códigos identificados, dos corresponden al tipo Calcáreo y dos al tipo Mixto. El grupo “Otros” incluye unidades como arg, Hielo, Lag, Río, Qc y SVE. Siendo la geología silícea, la que presenta la mayor cantidad de códigos geológicos.

*Tabla 11: Tipo de geología y sus códigos correspondientes.*

Tipo	Códigos geológicos
Silíceo	CPg, E1c, E3, E3b, EG, J3a, J3i, Jsg, Kia3, Kig, Ks3i, Ksg, KTg, M1c, M1m, Mg, MP3, OM2m, PE1c, Pg, PI3, PPI3, PzTr4 (a), PzTr4 (b), Q1, Q1g1, Q3i, Qf, Qm, Tr4a, Tr4b
Calcáreo	JK1m, Ki1m
Mixto	DC4, OM1m
Otros	arg, Hielo, Lag, Río, Qc, SVE

Fuente: Elaboración propia a partir de los códigos geológicos presentes en las cuencas lacustres de los Lagos Sur-patagónicos.

En el Anexo 2, se presenta el porcentaje de cada tipo geológico en las cuencas lacustres, mientras que la Tabla 12, resume esta información a nivel general para toda la zona de estudio. En términos generales, la geología silícea es la que domina en la mayoría de las cuencas de los lagos, mientras que la geología calcárea aparece en la menor proporción. Por lo que, para el análisis tipológico solo se consideraron los tipos geológicos silíceo y mixto.

En cuanto al tipo “otros”, si bien presenta porcentajes superiores a los del tipo mixto, esto se explica porque esta categoría incluye unidades como lagos, lagunas, glaciares, que son abundantes en la zona de estudio.

*Tabla 12: Porcentaje de cada tipo de los Lagos Sur-patagónicos.*

Tipo	% total geología
Calcáreo	4,96%
Mixto	6,24%
Otros	21,28%
Silíceo	67,52%

Fuente: Elaboración propia a partir del tipo de geología presentes en la zona de estudio.

- Áreas protegidas

Una parte significativa del territorio donde se ubican los Lagos Sur-patagónicos forma parte del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), históricamente administrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), dependiente del Ministerio de Agricultura. (Vivanco, 2022). Este sistema está formado por 3 categorías de manejo: Parques Nacionales, Reservas Nacionales y Monumentos Naturales (MMA., 2011), que suman 18,8 millones de hectáreas, sumando un total de 110 áreas silvestres protegidas del Estado, correspondientes a 46 parques nacionales, 45 reservas nacionales y 19 monumentos naturales, equivalentes al 21% del territorio nacional (CONAF., 2025). Siendo los Santuarios de la Naturaleza, parte de la categoría de monumentos nacionales, que desde el 2022 queda a cargo del MMA (Vivanco, 2022). Del cual aproximadamente un 35,4% de la superficie total del SNASPE a nivel nacional se concentra en las regiones de Los Lagos y Aysén. Específicamente en la Región de Aysén, el 50% de su superficie se encuentra dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas (CONAF, s.f.). En el Anexo 3 se encuentran los objetivos de las categorías de protección definidas en Chile.

Actualmente, mediante la derogación de la Ley N°18.362/1984 que creó el SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado de Chile), fue reemplazada por la Ley N° 21.600/2023, que Crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) y El Sistema Nacional De Áreas Protegidas, dependiente del MMA. El SBAP tiene por objeto, la conservación de la biodiversidad del país, a través de la gestión para la preservación, restauración y uso sustentable de genes, especies y ecosistemas. Esta actualización institucional refuerza el marco de protección bajo el cual se encuentran gran parte de los lagos estudiados.

De la Figura 4, se observa que de los SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado de Chile), solo hay Reserva Nacional y Parque Nacional, mas no de monumento. La superficie de estos se detalla a continuación.

De Norte a Sur, en el área de estudio se presentaron las siguientes Áreas Silvestres Protegidas comprendidas dentro del SNASPE: Parque Nacional Vicente Pérez Rosales (230.578 ha), Parque Nacional Hornopirén (66.177 ha), Parque Nacional Pumalín (402.410 ha), Parque Nacional Chiloé (42.035 ha), Parque Nacional Corcovado (401.834 ha), Reserva Nacional Futaleufú (13.179 ha), Reserva Nacional Rosselot (12.247 ha), Parque Nacional Queulat (156.092 ha), Reserva Nacional Las Guaitecas (1.094.294 ha), Reserva Nacional Rio Simpson (41.910 ha), Parque Nacional Cerro Castillo (143.191 ha), Parque Nacional Laguna San Rafael (1.736.426), Parque Nacional Patagonia (303.712 ha), Parque Nacional Bernardo O'Higgins (3.644.303 ha).

De acuerdo a los Santuarios de la naturaleza comprenden: Parque Pumalín (292.644 ha), Lagos Huillinco y Cucao (3.040 ha), Turberas de Pulpito (243 ha), Meullin-Puye (29.593 ha), y Capilla de Mármol (50 ha).

Además, en la zona de estudio existen 2 Reservas de la Biósfera, Laguna San Rafael (5.148.650 ha) y Bosques Templados lluviosos de los Andes (2.164.061 ha), 6 Bienes Nacionales Protegidos, Ventisquero Montt (10.110 ha), Santa Lucia Lago O'Higgins (9.462 ha), Rio azul (11.979 ha), Cuenca del rio Mosco (10.236 ha), Laguna Vera (3.620 ha), Lago Copa (11.594 ha); 8 Sitios prioritarios, Rio Puelo (81.314 ha), Lago Presidente Ríos (53.259 ha), Complejo Turberas Chiloé Central (15.970 ha), Desembocadura Lago O'Higgins (9.838 ha), Mallin Grande (1.878 ha), Deltas General Carrera Oeste (19.683 ha), Subcuenca Rio Baker (37.404 ha), Sector Ventisquero Chico (602 ha). De igual manera, también existen Iniciativas de conservación privada que suman un total de 18 sitios (540.015 ha aproximadamente).

La concentración de ecosistemas lacustres dentro de áreas protegidas respalda la necesidad de avanzar hacia la elaboración de una Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA), ya que estos cuerpos de agua poseen un alto valor ecológico y requieren estándares específicos que aseguren su conservación en el largo plazo.

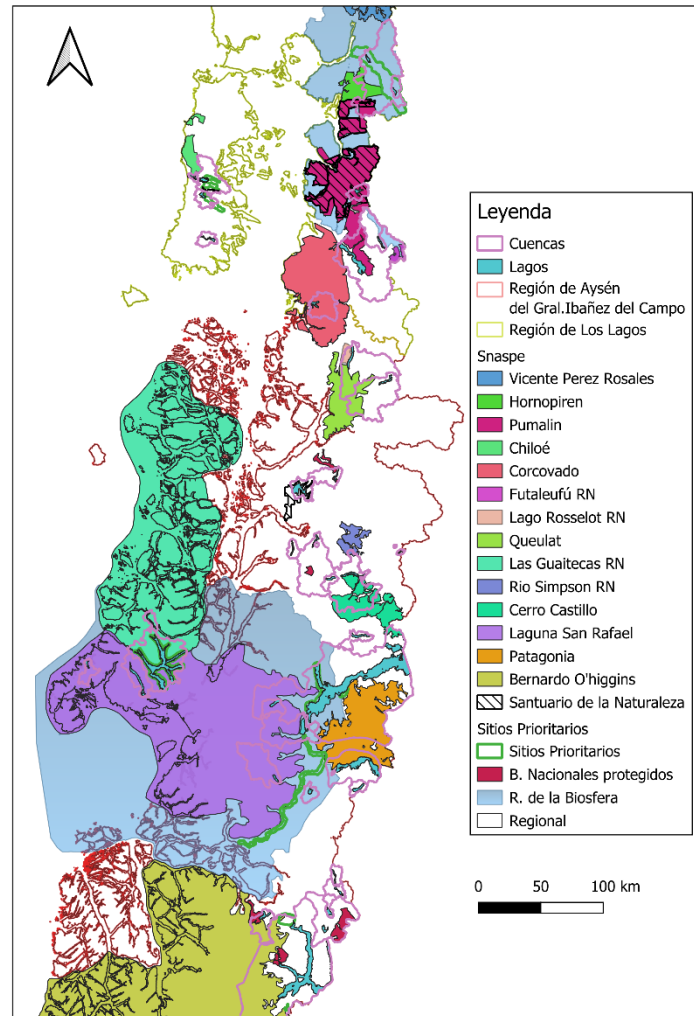


Figura 4: Mapa con las Áreas Protegidas, Sitios Prioritarios, Bienes Nacionales Protegidos y Reservas de la Biósfera por cuenca para los Lagos Sur-patagónicos.

Fuente: Elaboración propia con el software QGIS, a partir de las capas extraídas de la página web <https://apps.mma.gob.cl/visorsimbio> y de <https://lineasdebasepublicas.mma.gob.cl/>.

- Uso de suelo

El cambio de uso de suelo permite que áreas previamente cubiertas de vegetación boscosa nativa, se transformen en zonas de pastizales, cultivos de alimento, o espacios destinados a la ganadería. Esta transformación provoca que las precipitaciones arrastren una mayor cantidad de nutrientes mediante escorrentía hacia el cuerpo del lago. En un escenario hipotético de cambio climático, donde los regímenes de precipitaciones se ven alterados tanto en intensidad como en abundancia, se espera un aumento en la cantidad de nutrientes transportados desde la cuenca hacia el lago (Pesse, 2022).

Por otra parte, el uso del territorio asociado al turismo, también genera efectos ambientales relevantes. En parques nacionales se han identificado impactos generados por senderos y zonas de acampada informal, siendo los incendios y la erosión del suelo importantes impulsores de la pérdida de la estructura del paisaje y de la vegetación nativa (Guala, et al., 2023).

En la Figura 5, se muestran los distintos subusos de suelo, para las dos regiones que componen el área de estudio. El mapa se realizó en base al subuso de suelo, puesto que esta clasificación permitía diferenciar entre bosque nativo y plantaciones, ya que el uso de suelo, clasificaba a ambas como Bosques.

Del total del área superficial ocupada por las cuencas lacustres de los Lagos Sur-patagónicos, 37.430 km<sup>2</sup> corresponden a bosque nativo, lo que representa el 42.6 % del área total analizada en ambas regiones.

En la Región de Los Lagos, el bosque nativo es la categoría predominante, (62.5%), seguido por Nieves (8.31%), Terrenos sobre el límite altitudinal de la vegetación (6.97%), y Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques (5.04%).

En la Región de Aysén, sigue siendo predominante el Bosque Nativo, aunque en menor proporción, con un 36.86%, le siguen los Terrenos sobre el límite altitudinal de la vegetación (18.85%), Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques (10.30%) y Campos de Hielo (8.73%).

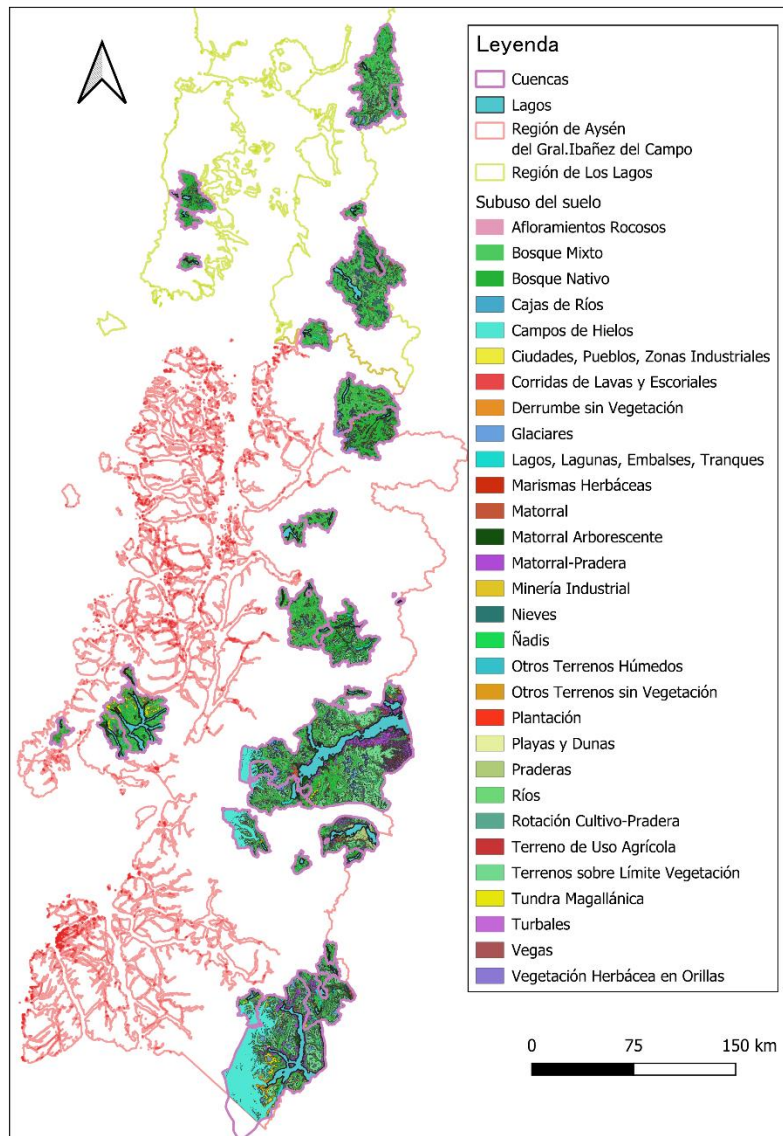


Figura 5: Mapa de Uso de suelo de las cuencas de los Lagos Sur-patagónicos.

Fuente: Elaboración propia con el software QGIS a partir de las capas extraídas de <https://sit.conaf.cl/>.

### 5.1.2 Tipología en base a las variables geomorfológicas

- Análisis de Componente Principal

Antes de realizar el ACP, se llevó a cabo un análisis de correlación. El objetivo principal de este análisis, es medir la fuerza o el grado de asociación lineal entre dos variables. El coeficiente de correlación, mide esta fuerza de asociación (lineal). Para este caso de estudio se utilizó la correlación de Pearson, el coeficiente toma valores de +1 a -1, el valor 0, indica que no hay asociación entre dos variables, mayor que 0, indica asociación positiva y, por el contrario, menor que cero indica asociación negativa entre variable, es decir a medida que aumenta una variable, la otra disminuye.

En la Tabla 13, se puede observar los resultados correlación de Pearson entre las 11 variables estudiadas. Las correlaciones más elevadas y significativas se encuentran entre las variables, Área superficial con Ancho medio, con un valor igual a 0.55, al ser positivo, indica que a medida que aumenta Área superficial incrementa Ancho medio. Área superficial también alcanza una correlación positiva y significativa con, Longitud máxima, Ancho máximo, Área drenaje, Desarrollo línea costa, Silíceo y Mixto. La variable Área drenaje muestra una correlación positiva y significativa con Desarrollo línea costa, Área superficial, Silíceo, Mixto, Longitud máxima y Ancho máximo. Ancho máximo tiene correlación positiva y significativa con las variables Área drenaje, Área superficial, Mixto y Longitud máxima. Longitud máxima alcanza correlaciones positivas y significativas con Ancho máximo, Área drenaje, Desarrollo línea costa, Área superficial y Mixto. Las demás correlaciones entre las variables no muestran significancia estadística.

Tabla 13: Matriz de correlación de Pearson.

Silíceo										0.23
Longitud									-0.19***	-0.11 ***
Latitud								0.1	-0.27***	0.41
Ancho medio							-0.02***	-0.14***	0.32	0.19

Área superficial						0.55	0.15	-0.13***	0.63	0.72
DLC					0.7	0.74	0.08	-0.19***	0.36	0.49
Área drenaje				0.55	0.86	0.36	0.003**	-0.19***	0.85	0.69
Ancho máx.			0.68	0.45	0.71	0.2	0.19	-0.13***	0.35	0.78
Longitud máx.		0.84	0.79	0.64	0.82	0.23	0.23	-0.12***	0.46	0.8
Altitud	-0.11***	-0.14***	-0.21***	-0.11***	-0.06***	-0.16***	0.35	0.17	-0.31***	0.05*
	Longitud max	Ancho max	Área drenaje	DLC	Área superficial	Ancho medio	Latitud	Longitud	Silíceo	Mixto

\*=p-valor<0.05, \*\*=p-valor<0.01, \*\*\*=p-valor<0.001.

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

Las relaciones significativas se indican mediante asteriscos, las cuales se especifican debajo de la Tabla 13. Esto significa que, a medida que aumenta el número de asteriscos, disminuye la probabilidad de que la correlación sea producto del azar, evidenciando asociaciones estadísticamente más robustas entre las variables de calidad de agua.

En la Tabla 14, la varianza total explicada, muestra la proporción de la varianza total de los datos originales que explica cada componente individual. Entonces, las primeras 2 dimensiones explican un 64.18% de la varianza con respecto a los datos, en donde la primera de ella explica un 47.4%, en tanto la segunda un 16.78% adicional. Las primeras tres dimensiones explican en conjunto un 74.77%. Si se quisiera explicar al menos 80% de la varianza, se necesitarían las componentes Dim.1, Dim.2, Dim.3 y Dim.4, que acumulan un 83.2%.

Tabla 14: Varianza total explicada.

Dimensión	Valores Propios	Porcentaje varianza	Porcentaje acumulado
Dim. 1	5.21	47.4	47.4
Dim. 2	1.85	16.78	64.18
Dim. 3	1.16	10.59	74.77
Dim. 4	0.93	8.44	83.2
Dim. 5	0.74	6.74	89.95
Dim. 6	0.49	4.47	94.42
Dim. 7	0.26	2.32	96.74
Dim. 8	0.20	1.78	98.52
Dim. 9	0.10	0.94	99.46

Dim. 10	0.05	0.47	99.93
Dim. 11	0.01	0.07	100

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

El Gráfico de Sedimentación (Scree Plot), es una herramienta visual en el Análisis de Componentes Principales (ACP), que ayuda a determinar el número óptimo de componentes principales a retener. Este gráfico representa el porcentaje de varianza explicada por cada dimensión, en orden decreciente.

Uno de los criterios más utilizados es el criterio del codo, que identifica el punto en que la curva de varianza explicada, deja de disminuir abruptamente y comienza a aplanarse. Los componentes ubicados antes de ese punto se consideran las más importantes, mientras que los posteriores suelen representar ruido o varianza residual.

En la Figura 6, el gráfico de sedimentación muestra una caída muy pronunciada de la Dimensión 1 (47.4%) a la Dimensión 2 (16.8%). La caída de la Dimensión 2 a la Dimensión 3 (10.6%) es menor. El punto de inflexión más claro se encuentra después de la Dimensión 3, donde la línea comienza a aplanarse considerablemente. Por lo tanto, se recomienda retener las primeras tres dimensiones, ya que las dimensiones a partir de la 4 ya no aportan significativamente a la explicación de la varianza.

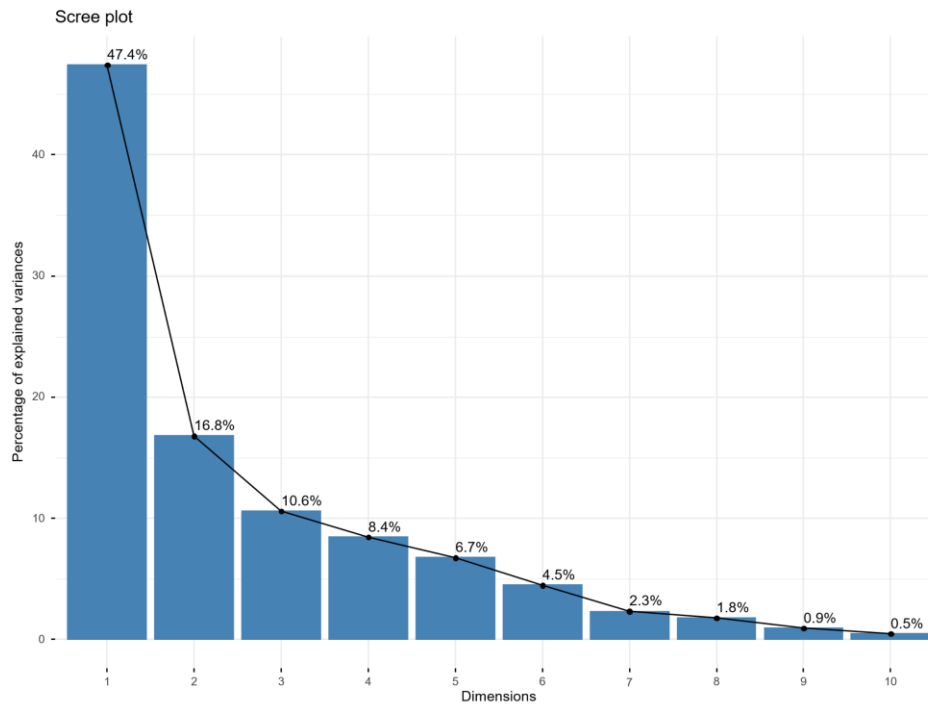


Figura 6: Gráfico de sedimentación variables geomorfológicas.

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

En cuanto al peso de las variables, que se muestran en la Tabla 15 y en la Figura 7, se observa que en la primera dimensión (Eje Horizontal: 47.4% de la Varianza), las variables con correlación positiva fuerte son: Longitud máxima, Ancho máximo, Área drenaje, Desarrollo Línea Costa, Área superficial, Silíceo y Mixto; Todas con coeficientes de correlación altos, cercanos a 1; No se identificaron correlaciones negativas relevantes dentro de esta dimensión.

Esta dimensión parece capturar la variabilidad relacionada con el Tamaño, (dada la asociación de métricas de longitud, área y ancho) y a la geología del sistema (dada la variable Silíceo y Mixto).

Tabla 15: Peso de las variables.

Variable	Dimensión 1	Dimensión 2
Altitud	-0.183	<b>0.650</b>

Longitud máx.	<b>0.901</b>	0.210
Ancho máx.	<b>0.811</b>	0.230
Área drenaje	<b>0.917</b>	-0.149
Desarrollo Línea Costa	<b>0.756</b>	-0.082
Área superficial	<b>0.942</b>	0.030
Ancho medio	0.523	-0.290
Silíceo	<b>0.654</b>	-0.513
Mixto	<b>0.798</b>	0.446
Latitud *	0.145	<b>0.806</b>
Longitud*	-0.227	<b>0.318</b>

\*Estas variables son la transformación de las variables con coordenadas

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

Por otro lado, la Dimensión 2 (Eje Vertical: 16.8% de la Varianza), posee variables correlaciones positivas moderada con, Latitud decimal, con una correlación moderada a débil con Altitud, y Longitud decimal, indicando que esta es una dimensión que captura la variabilidad relacionada con la Ubicación.

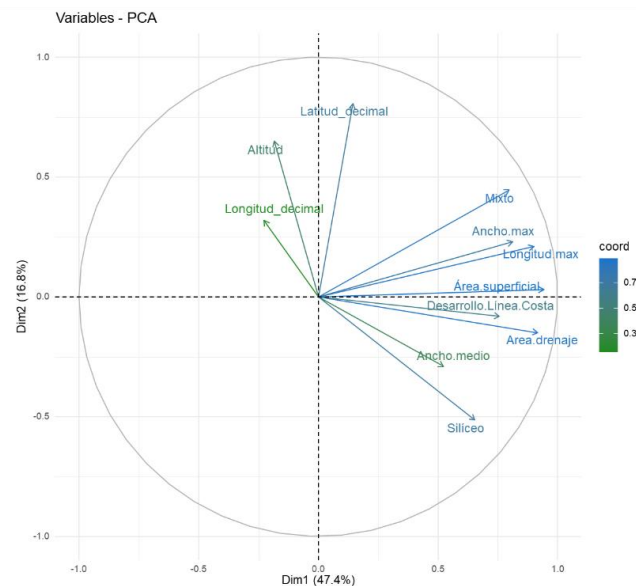


Figura 7: PCA Variables geomorfológicas (círculo de correlaciones).

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

En la Tabla 16, se observan las puntuaciones de los individuos, destacando los lagos Cochrane, Gral. Carrera, O'Higgins, Pdte. Ríos y Yelcho, en la primera dimensión. Mientras que, en la segunda dimensión, destacan los lagos O'Higgins, Pdte. Ríos, Tagua Tagua y Laguna Las Perdices. Dicho lo anterior, esto se puede ver de igual manera en la Figura 8.

Tabla 16: Puntuaciones de los individuos.

Lagos	Dim 1	Dim 2	Lagos	Dim 1	Dim 2
Alegre	-0,88	1,48	Lapparent	-0,88	0,78
Azul	-1,32	-1,23	Leones	-1,11	0,68
Bergues	-0,43	0,70	Manuel Rodríguez	-0,70	0,30
Bertrand	0,32	0,66	O'Higgins	<b>8,01</b>	<b>3,38</b>
Briceño	-0,86	1,58	Pdte. Ríos	<b>3,24</b>	<b>-2,71</b>
Brown	-0,96	1,34	Pdte. Roosevelt	0,53	0,53
Caro	-0,46	-0,53	Reñihue	-0,49	-0,77
Chacabuco	-1,01	0,78	Riesco	0,42	-1,63
Chaiguata	-0,66	-0,84	Rosselot	0,65	-1,96
Christie	-0,67	1,68	Tagua-Tagua	0,06	<b>-2,73</b>
Cisnes	0,40	1,77	Tepuhueico	-1,14	-1,20
Cochrane	<b>2,07</b>	1,17	Trébol	-0,16	-1,01
Colonia	-1,01	0,25	Verde	-0,17	-0,87
Condor	-0,86	-0,27	Yelcho	<b>2,04</b>	-1,95
Cucao	-0,90	-1,62	Yulton	-0,28	0,58
Del Salto	-0,65	-0,17	Laguna Azul	-1,51	0,35
Elena	-0,01	0,06	Lago Negro	-1,70	0,07
Elizalde	0,01	-0,49	Laguna Maldonado	-1,59	0,62
Espolón	-0,95	-0,58	Laguna Alta	-1,74	-0,36
Carrera	<b>10,02</b>	-0,50	Laguna Las Perdices	<b>-2,62</b>	<b>3,11</b>
Huillinco	-0,77	-1,57	Lago Castor	-1,26	1,10

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

En la dimensión 1, los lagos, se destacan por ser grandes y extensos, como los lagos O'Higgins, Gral. Carrera y Pdte. Ríos a excepción de la Laguna Las Perdices, que es un lago más bien pequeño, razón por la cual presenta un valor negativo.

Por su parte, en la dimensión 2, los lagos corresponden a aquellos que poseen alta altitud y latitud como los lagos O'Higgins y Las Perdices. En contraste, aquellos con valor negativo, como los lagos Pdte. Ríos y Tagua Tagua, exhiben el patrón opuesto.

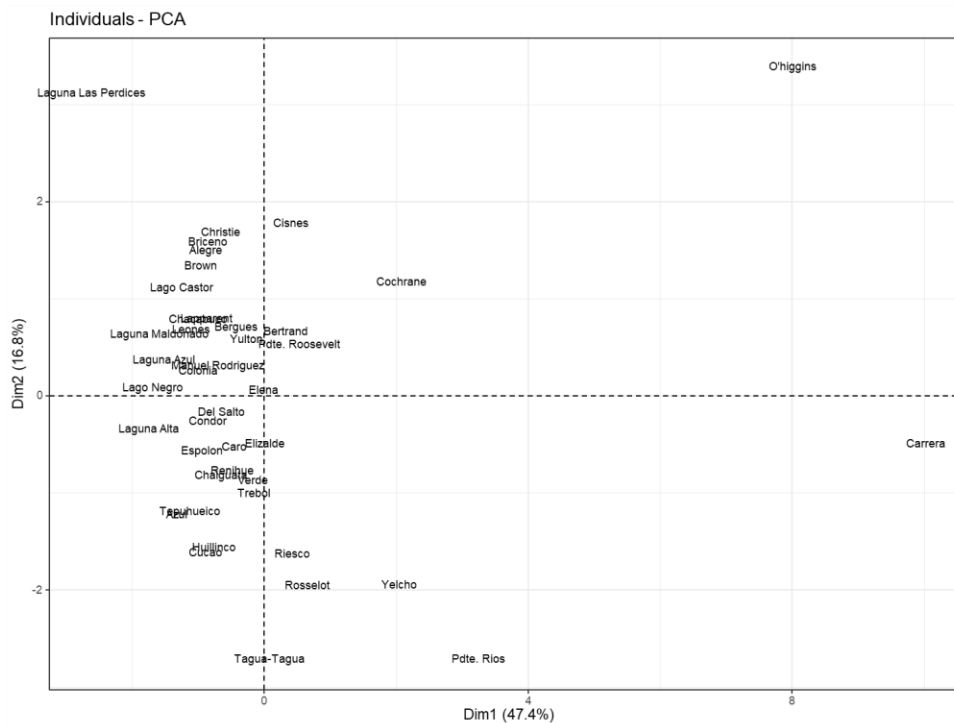


Figura 8: PCA de los individuos.

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

El ACP logró descomponer la complejidad de los datos en dos factores clave, revelando que: La mayor diferencia entre los lagos está determinada por si son gigantes (O'Higgins, Carrera) o pequeños (Las Perdices, Riesco). La segunda diferencia más importante está determinada por si son lagos de alta latitud (Las Perdices) o lagos asociados a sustrato silíceo (Pdte. Ríos).

El Lago Carrera es particularmente interesante. Su posición alejada de Dim2 y muy alta en Dim1 indica que es extremadamente grande, pero su ubicación geográfica (latitud/altitud) y sustrato no son los que definen la Dim2 de forma significativa, ocupando una posición "neutra" en cuanto a la geografía, pero "extrema" en cuanto al tamaño.

## Biplot

El Biplot es la herramienta más poderosa para la interpretación final porque permite relacionar directamente las variables geomorfológicas y los lagos (individuos). Es una representación gráfica de las primeras dos dimensiones. Esta estructura permite segmentar las localidades según su perfil morfológico (tamaño) y topográfico (altitud), facilitando decisiones territoriales y priorización de intervenciones.

Respecto a la Figura 9, el Biplot confirma y une todas las conclusiones que se han obtenido. Los lagos a la derecha, como el O'Higgins y Carrera, se proyectan en la dirección de los vectores de Área superficial, Longitud máxima, Ancho máximo y Área drenaje. Esto confirma que son los lagos más grandes en términos absolutos. Los lagos que están a la izquierda y en dirección opuesta a los vectores, como Laguna Maldonado, Laguna Azul, Lago Negro y Laguna Alta, son los lagos más pequeños y menos extensos.

De acuerdo al eje vertical (Dim2), los lagos en la zona superior, como la Laguna Las Perdices, se proyecta fuertemente en la dirección de los vectores Latitud decimal y Altitud. Esto la define como una laguna pequeña y de alta ubicación. Los lagos Christie, Briceño, Alegre y Brown, también tienden a estar en este cuadrante. Los lagos de la zona inferior como, Pdte. Ríos, Yelcho y Riesco se proyectan en la dirección opuesta a Latitud decimal y Altitud, y hacia el vector Silíceo. Es decir, son lagos asociados a sustratos silíceos y baja ubicación geográfica. Para el caso de la geología Mixta, esta se relaciona con los lagos Cochrane y O'Higgins.

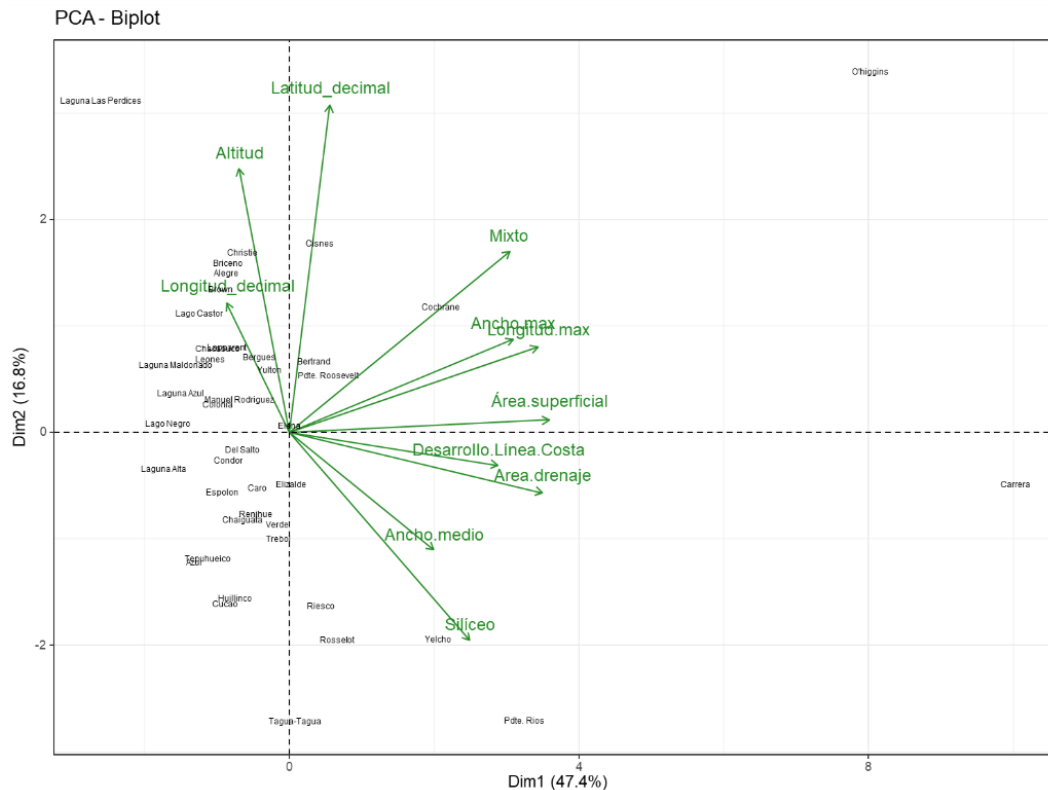


Figura 9: Biplot de las variables geomorfológicas y los Lagos Sur-patagónicos.

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

- Análisis de Conglomerado

El análisis de conglomerado, es una metodología que clasifica observaciones en grupos de tal manera que, cada grupo sea homogéneo con respecto a ciertas particularidades, se busca que las observaciones dentro de cada grupo sean similares entre sí. Asimismo, cada grupo formado debe distinguirse de los otros grupos sobre las mismas singularidades. Tiene como objetivo primordial la búsqueda de grupos en un conjunto de individuos.

Las clasificaciones jerárquicas se representan en un diagrama bidimensional conocido como dendrograma. En un dendrograma los objetos se representan como nodos y las ramas del árbol indican los sujetos que se han fusionado en un conglomerado, la longitud de las ramas indica la distancia de la fusión.

Para el análisis exploratorio en base a la distancia euclídea, con el método de Ward, se revelaron 4 conglomerados, representados en la Figura 10, el primero de ellos consta de los lagos Castor, Yulton, Brown, Briceño, Lapparent, Christie, Alegre, Leones, Chacabuco, Colonia, Maldonado, Azul, Alta, Negro, Bertrand, Bergues, Manuel Rodríguez, Pdte. Roosevelt, Cochrane, Cisnes, y Laguna Las Perdices.

El segundo conglomerado está conformado por el Lago Cóndor, Chaiguata, Elena, Del Salto, Verde, Elizalde, Caro, Espolón, Azul, Trébol, Reñihue, Huillinco, Cucao, Tepuhueico, Rosselot, Riesco, Tagua Tagua, y Yelcho. En el tercer grupo, se encuentra solo el lago Pdte. Ríos y, el cuarto conglomerado consta de los Lagos O'Higgins y Gral. Carrera.

En relación al Coeficiente de Correlación Cofenética, dio un valor de 0.818, este resultado sugiere que la estructura jerárquica (el dendrograma) obtenida en el análisis de clustering es una representación de alta calidad de las distancias originales entre tus individuos. En otras palabras, los grupos o clusters formados reflejan adecuadamente las similitudes y diferencias reales en tus datos.

El ACJ permitió segmentar los lagos en grupos homogéneos según sus características multivariadas. Se observa que los lagos Pdte. Ríos y O'Higgins por separado presentan bastante disimilaridad o tienen un comportamiento muy distante de los demás lagos. Los lagos Gral. Carrera y O'Higgins muestran similitud entre ellos y difieren del resto. El primer clúster que incluye la mayor cantidad de lagos señala que existe mayor grado de similitud entre ellos respecto de las variables ambientales, lo mismo se puede decir para el segundo.

El comportamiento atípico del tercer y cuarto clúster compuesto por un lago y por 2 lagos respectivamente, se debe principalmente a que, el lago Pdte. Ríos, posee una forma muy irregular, esto se explica pues tiene el valor de Ancho medio y DLC más alto de los lagos. En

cuanto a los lagos O'Higgins y Gral. Carrera, que son los lagos más grandes, son aquellos con el Área de drenaje, Área superficial y Longitud máxima con los valores más altos.

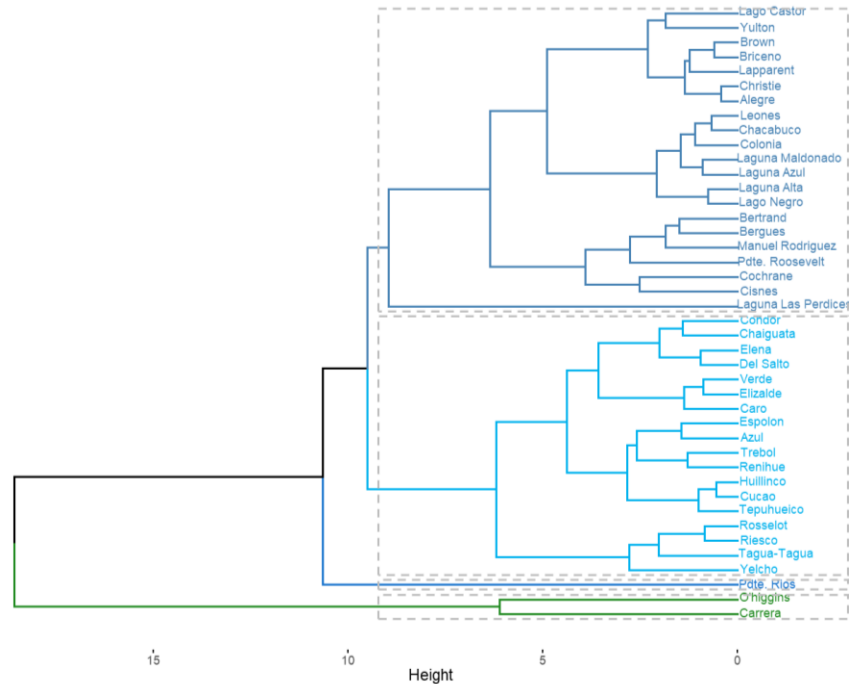


Figura 10: Análisis de Conglomerado Jerárquico, con el Método de Ward.

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

- Escalamiento Multidimensional (MDS)

El Escalamiento Multidimensional (MDS) o también conocido como Análisis de Proximidades, representado en la Figura 11, es un método que permite representar medidas de proximidad (similitudes o disimilitudes), entre pares de objetos como distancias (por lo general euclídeas), en un espacio de baja dimensión. En otras palabras, el MDS nos permite encontrar el patrón del grado de parecido entre los diferentes objetos, así como establecer agrupaciones reconocibles y poder interpretar las dimensiones subyacentes que establecen dichas agrupaciones.

El análisis MDS valida la fiabilidad de las distancias utilizadas en el Clustering. En este estudio se utilizó el procedimiento métrico, el cual consiste en un método algebraico para encontrar la configuración de los puntos a partir de las disimilitudes entre los puntos.

En cuanto a la bondad de ajuste del análisis se consideró la medida del STRESS, el cual fue de 0.063, indicando un nivel Bueno, lo que puede interpretarse acorde a la Tabla 17. Por lo tanto, las agrupaciones espaciales observadas en el gráfico (como la separación de los lagos extremos O'Higgins y Carrera) son coherentes con las distancias de las variables.

Tabla 17: Bondad de ajuste.

STRESS	Bondad del Ajuste
0.200	Pobre
0.100	Regular
0.050	Bueno
0.025	Excelente
0.000	Perfecto

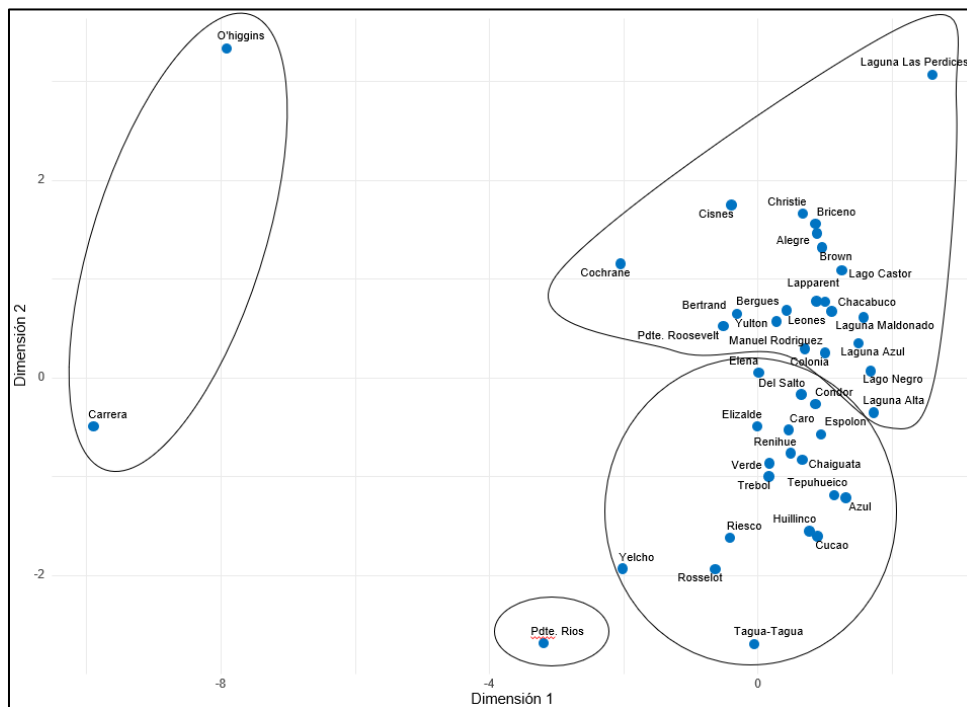


Figura 11: Escalamiento Multidimensional Métrico.

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

## 5.2 Validación de la tipología obtenida, con datos fisicoquímicos de los Lagos Sur-patagónicos

De igual manera que en el caso de las variables geomorfológicas, también se realizaron análisis estadísticos, pero ahora para las variables fisicoquímicas de los lagos, con el fin de validar los grupos tipológicos obtenidos anteriormente.

### 5.2.1 Base de datos fisicoquímicos

Se recopilaron datos para las 72 variables encontradas de los lagos Sur-patagónicos, muchas veces resultando en pocos datos para las variables, así como algunas con registros bastante completos. La Figura 12 muestra un extracto de la matriz, anteriormente, en la metodología, se mencionó que, para disminuir las variables con falta de datos, se imputo en Rstudio, para que así el análisis quedará con más variables.

Lagos	Año	Oxígeno Disuelto mg/l O2	pH unid. ph	Plata Total mg/l Ag	Plomo Total mg/l Pb	Potasio mg/l	Potasio disuelto mg/l K	Potasio Total mg/l K	Prof Eufótica m	Razon de Absorción de Sodio (RAS)	Selenio disuelto mg/l Se	Selenio Total mg/l Se	Silice mg/l Si	Sodio mg/l	Sodio disuelto mg/l	Sodio Total mg/l Na
Gral Carrera	2020	9,51	7,47					0,717								2,428
Gral Carrera	2007	10,47	7,62	0,01	0,05		1,258			0,437	0,001				6,157	
Gral Carrera	2008	8,27	8,34	0,01	0,05		0,646			0,188	0,001				2,12	
Gral Carrera	2008	11,23	8,28	0,01	0,05		0,656			0,216	0,001				2,279	
Gral Carrera	2008	9,65	8,15	0,002	0,01		2,94			0,111	0,005				1,8	
Gral Carrera	2009	10,59	8,91	0,01	0,05		0,649			0,225	0,001				2,234	
Gral Carrera	2009	9,66	7,16	0,01	0,05		0,6			0,208	0,001				2,3	
Gral Carrera	2009	11	6,86	0,01	0,05		0,533			0,244	0,001				2,24	
Gral Carrera	2009	10,03	7,46	0,01	0,05			0,124			0,001					0,321
Gral Carrera	2010	10,16	6,93	0,01	0,05			0,659			0,001					2,192
Gral Carrera	2010	10,51	7,64	0,01	0,05			0,708			0,001					2,296
Gral Carrera	2010	9,82	6,54	0,01	0,05			0,694			0,001					2,427
Gral Carrera	2010	11,16	7,57	0,01	0,05			0,746			0,001					2,341
Gral Carrera	2024	11,93	7,82	0,003	0,004			0,59				0,001				1,68
Gral Carrera	2024	13,07	7,69	0,007	0,006			0,6								1,38
Gral Carrera	2024	11,99	7,65	0,007	0,006			0,63				0,001				1,56
Gral Carrera	1992															
Gral Carrera	2021															
Maldonado	2023	95,1	8,2										1,78			
Maldonado	2021								6							
Maldonado	2018	9,63	8,18													
Maldonado	2018	10,04														
Maldonado	2019	9,26														
Maldonado	2019															
Maldonado	2020	9,47														
Maldonado	2020	9,65														
Maldonado	2021	9,16														
Alta	2018	9,23	7,17										2,506			
Alta	2018	6,45	6,67										2,594			
Alta	2019	11,46	6,65										3,103			
Alta	2021								18				2,9			

Figura 12: Extracto matriz de datos fisicoquímicos recopilados.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de calidad de agua, DGA, bibliográficos y CIEP.

### 5.2.2 Validación de la tipología obtenida con los datos de calidad de agua

De igual manera que, para el caso de las variables geomorfológicas, también se realizó un análisis estadístico con las variables de calidad de agua, para validar los grupos tipológicos encontrados en el análisis anterior.

- Análisis de Componentes Principal

En la Tabla 18, se muestra la varianza total explicada de las variables de calidad de agua, donde se obtuvo un valor propio igual a 1.80, la primera dimensión explica un 20%, la segunda dimensión con un valor propio igual a 1.43, explica un 15.89%, la tercera dimensión explica un 12.64% y tiene un valor propio igual a 1.14. El porcentaje acumulado de las tres dimensiones corresponde a un 48,53%.

Tabla 18: Varianza total explicada.

Dimensión	Valores propios	Porcentaje varianza	Porcentaje acumulado
Dim. 1	1.80	20%	20%
Dim. 2	1.43	15.89%	35.89%
Dim. 3	1.14	12.64%	48.53%
Dim. 4	1.01	11.23%	59.76%
Dim. 5	0.95	10.56%	70.32%
Dim. 6	0.92	10.2%	80.52%
Dim. 7	0.71	7.93%	88.46%
Dim. 8	0.57	6.29%	94.75%
Dim. 9	0.47	5.25%	100%

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

El criterio más común para interpretar un Scree Plot es buscar el punto donde la curva cambia drásticamente de pendiente y se “aplana” (el “codo” o elbow). Las dimensiones que se encuentran antes del codo son las que deben retenerse, ya que aportan la mayor cantidad de información.

En el gráfico que se muestra en la Figura 13, hay una caída pronunciada desde la Dimensión 1 hasta la 4. A partir de la Dimensión 5, la pendiente se vuelve mucho menos pronunciada (se aplana). El “codo” o punto de inflexión se localiza claramente entre la Dimensión 4 y la Dimensión 5. El gráfico sugiere que la cantidad óptima de grupos (o clúster) es de 4, es decir se deben retener las primeras 4 dimensiones (Dim. 1, Dim. 2, Dim. 3 y Dim. 4).

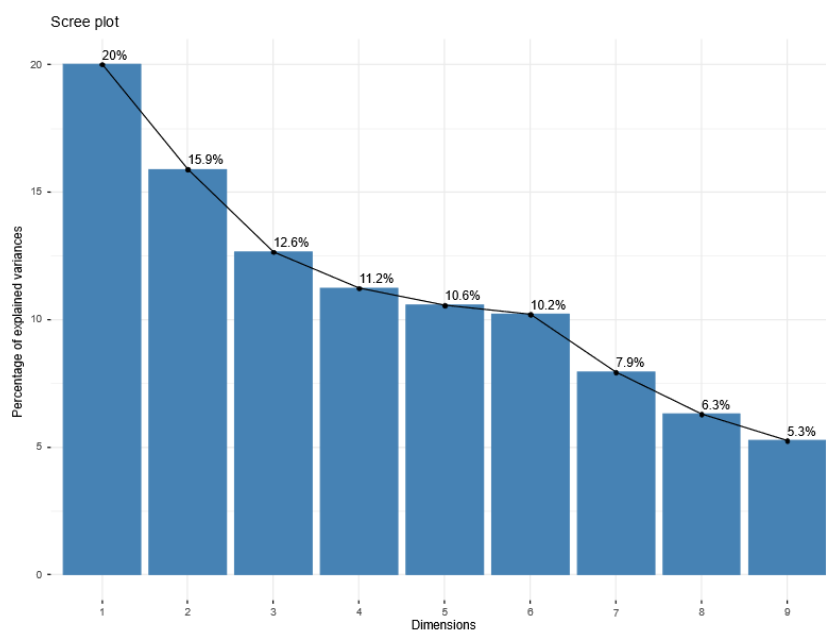


Figura 13: Gráfico de sedimentación variables de calidad de agua.

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

En la Tabla 19, se observa que las variables Cobre Total, Conductividad Especifica, Fierro Total, Manganeso Total, Oxígeno Disuelto y Temperatura, destacan en la primera dimensión y Conductividad Especifica, Manganeso Total y pH, determinan la segunda dimensión. Por el contrario, la variable Arsénico Total no tiene impacto en ninguna dimensión.

Tabla 19: Peso de las variables sin los datos del CIEP.

Variables	Dimensión 1	Dimensión 2
Arsénico Total	-0.072	-0.074
Cobre Total	<b>0.364</b>	-0.272
Conductividad Especifica	<b>0.391</b>	<b>0.751</b>

Fierro Total	<b>0.783</b>	-0.227
Manganeso Total	<b>0.540</b>	<b>-0.396</b>
Oxígeno Disuelto	<b>0.686</b>	-0.004
pH	0.218	<b>0.735</b>
Temperatura	<b>0.31</b>	-0.087
Zinc Total	0.266	0.172

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

Respecto a la Tabla 20, se observa que solo fueron consideradas 4 variables, Conductividad Especifica, pH, Oxígeno Disuelto, Temperatura, destacando en la primera dimensión a la CE y al OD, por el contrario, la dimensión 2 destaca por el valor de pH.

*Tabla 20: Peso de las variables con los datos del CIEP.*

Variables	Dimensión 1	Dimensión 2
Conductividad Especifica	<b>0.838</b>	0.090
pH	0.037	<b>0.957</b>
Oxígeno Disuelto	<b>0.845</b>	0.023
Temperatura	<b>0.442</b>	-0.293

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

Las Imágenes muestran la relación entre las variables originales (vectores azules y verdes) y las dos primeras dimensiones retenidas (Dim. 1 y Dim. 2). De acuerdo a la Figura 14a, se puede observar la representación del peso de las variables de calidad de agua. En esta imagen, las variables Conductividad Especifica, pH, Oxígeno disuelto, Fierro Total, Manganeso total, Cobre total, Temperatura y el Zinc Total, representan la primera dimensión. Entre ellas, Temperatura, Cobre Total, Manganeso Total y Fierro total, presentes en el cuadrante negativo. Mientras que, el Arsénico Total, que es el único parámetro que está presente en ambas dimensiones de forma negativa.

Por otra parte, en la Figura 14b, los vectores que predominan son, Oxígeno disuelto, Conductividad Especifica, pH y Temperatura, estas variables se repiten de la anterior, y continúan siendo las que presentan mayor contribución a los ejes principales, por ende, son

variables importantes, las más influyentes en la variabilidad de los sistemas. La reducción de las variables, en este caso, se debe a que fue necesario eliminar aquellas que presentaban un porcentaje menor al 35% de los datos faltantes por columna, motivo por el cual, las variables se redujeron a las mencionados. Este segundo análisis incorpora los datos facilitados por el CIEP, complementando con la información de la DGA y la bibliográfica.

En el primer análisis, se pudieron considerar más variables, puesto que había menos filas vacías. Aquí pasa que, aparecen otras variables relevantes, que están asociadas a la geología, como el Hierro y el Manganeso, elementos característicos de rocas ígneas, lo que responde a procesos naturales y no a fuentes de contaminación. Así mismo, las variables asociadas a metales (Fe, Mn, Cu, As, Zn) muestran una baja correlación con las componentes principales y no se agrupan de forma que indique un patrón de enriquecimiento antrópico.

Por lo tanto, al incorporar un conjunto de datos más amplio y reciente, sugiere que no existen cambios significativos en las relaciones entre las variables de calidad de agua, lo que permite inferir que no hay efectos de contaminación en estos sistemas lacustres. En consecuencia, los resultados del PCA respaldan la idea de que la variabilidad observada responde principalmente a condiciones naturales del medio y no a aportes externos de origen antrópico.

Al comparar ambos PCA, se observa que la varianza en la primera Figura es de 20% en el primer componente. Sin embargo, al incorporar los datos del CIEP, que son datos más bien recientes del año 2015 al 2021, se observa que, la varianza explicada aumenta al 40%, lo cual es favorable, ya que permite explicar una mayor proporción de la variabilidad del conjunto de datos. Pero, la incorporación de esta información provoca un aumento en la cantidad de filas con datos faltantes, lo que provoca la reducción del número de variables a analizar. Por esta razón, para los análisis posteriores se decidió trabajar con la base de datos original, sin incluir los registros del CIEP.

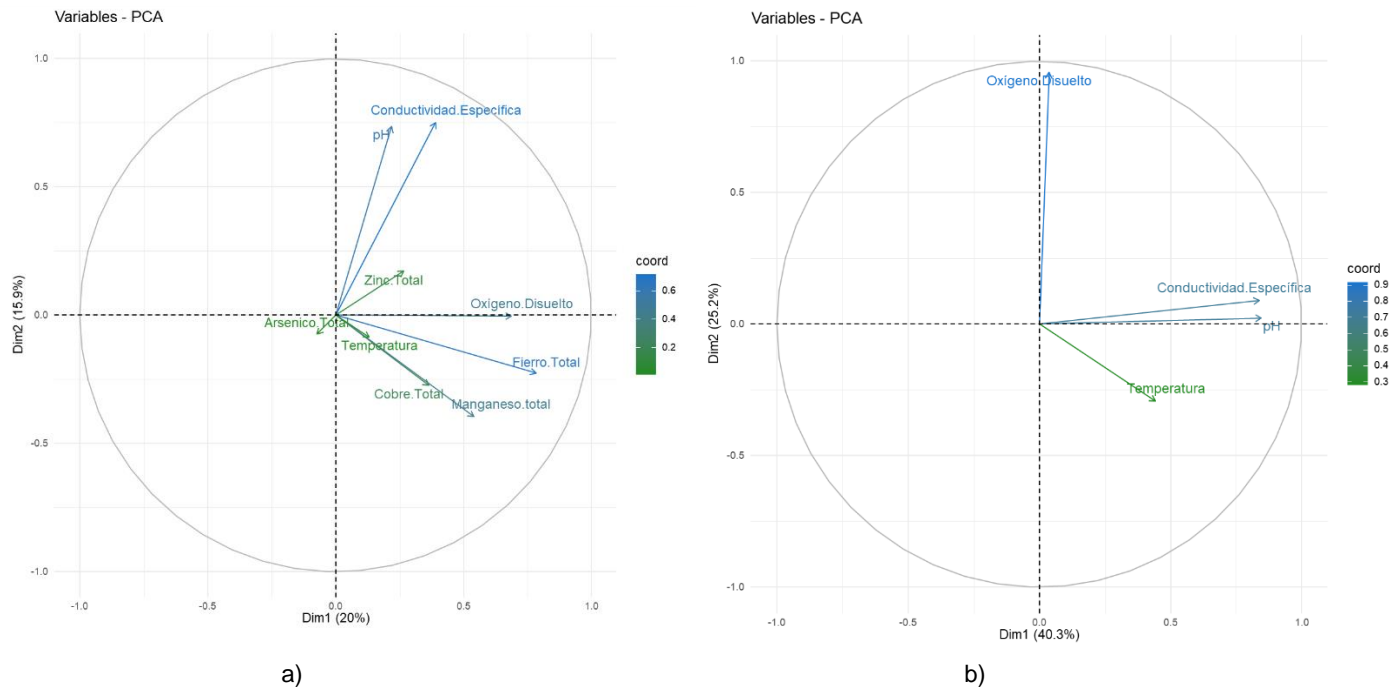


Figura 14: PCA variables de calidad de agua.

Fuente: Elaboración a partir de Software RStudio.

## Biplot

En la Figura 15, se observa el Biplot, que es la superposición del gráfico de los pesos con el gráfico de los individuos. Donde se muestra, el comportamiento de los lagos respecto a las variables de calidad del agua. Se puede notar que existe una gran aglomeración cercano al centro, esto explica que los datos de los lagos se parecen mucho entre sí, es decir se comportan de manera similar.

Sin embargo, hay algunos que se alejan un poco más, por ejemplo, los lagos de la esquina inferior derecha, como el Gral. Carrera y Riesco, los cuales están determinados por las variables Hierro Total, Manganeseo Total y Cobre Total. Las dos primeras variables asociadas a la geología silíceo (roca ígnea), que se explica puesto que los lagos se componen por un alto porcentaje de geología silíceo.

Así también, los lagos en la esquina superior derecha que son, el lago Cochrane, Gral. Carrera y Maldonado, que están más bien determinados por la Conductividad Específica y el pH. La presencia de estos datos que se alejan más de la distribución en comparación con la mayoría, son considerados atípicos, puesto que presentan un comportamiento distinto del resto.

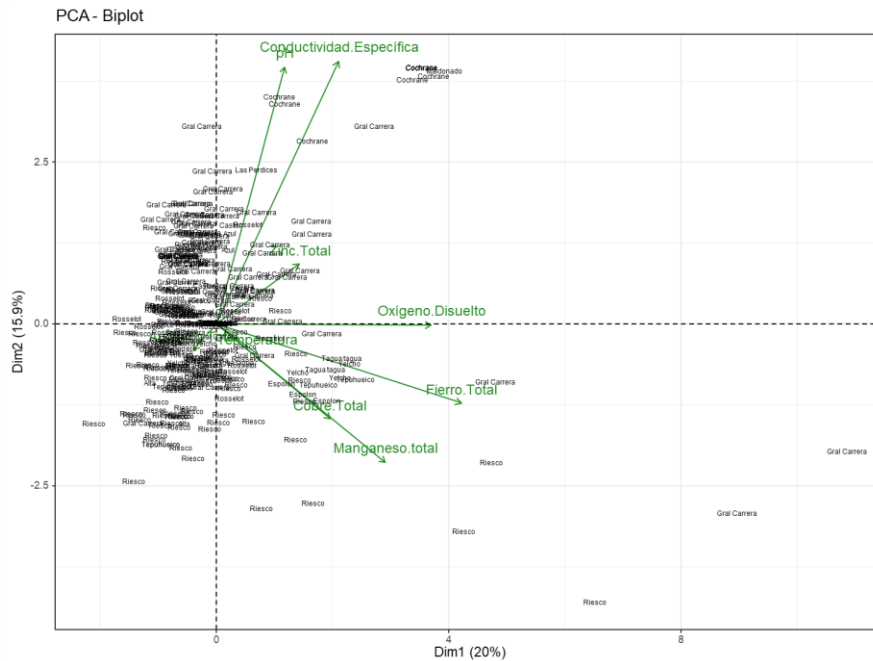


Figura 15: Biplot de las variables de calidad de agua y los Lagos Sur-patagónicos.

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

- Análisis de Conglomerado Jerárquico

El Análisis de Conglomerado, corresponde a una técnica multivariante que clasifica a los individuos en grupos, de modo que las observaciones pertenecientes a un grupo sean similares entre sí, de tal manera que cada grupo sea homogéneo respecto a ciertas particularidades. Esto implica que las observaciones de un grupo deben diferir de las observaciones de otros conglomerados (Los grupos son denominados conglomerados) (Hair et al., 1999).

Para este caso, se realizó un Análisis de Conglomerado Jerárquico, en base a la distancia euclídea, con el método de Ward. Como resultado, se obtiene que el Coeficiente de Correlación Cofenética, es igual a 0.818, se interpreta como un ajuste de alta calidad. Por esa razón que no hay diferencia entre grupos, eso significa que hay una gran similitud en los datos.

Como se observa en la Figura 16, los resultados muestran que la mayoría de los datos se encuentra en el conglomerado de color celeste (83.6%), el clúster rojo es el que se sigue en cantidad de datos (16%) y hay presencia de 1 dato atípico (0.32%). (ese dato atípico corresponde al lago Riesco, específicamente con el valor de 0.026 en el Arsénico Total).

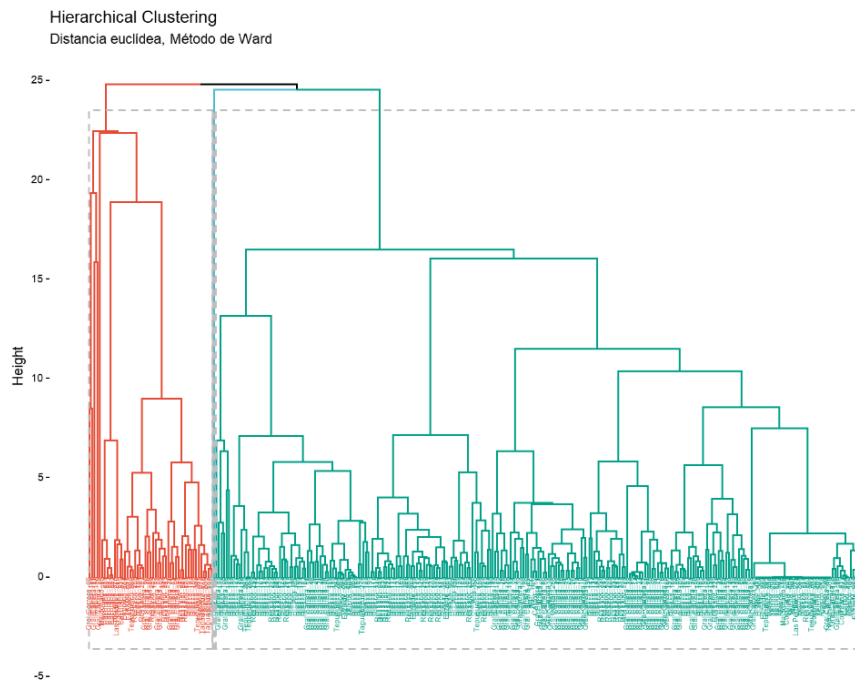


Figura 16: Análisis de Conglomerado Jerárquico, con el Método de Ward de las variables de calidad de agua.

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

- Agrupamiento K- medias

Este método no vincula progresivamente el objeto o grupo más próximo, sino que van ensayando con posibles centros de grupo, cambiándolos de posición e incluyendo y excluyendo a los objetos hasta que la variación dentro de cada conglomerado sea mínima. Este análisis requiere que se defina de antemano el número de conglomerados (Vega-Dienstmaier, 2014).

El k-medias (Figura 17), muestra 3 grupos, de los cuales 2 de ellos se superponen, en este análisis no queda un dato aislado, el grupo que se separa son los que aparecen en el ACP, que son datos del lago Gral. Carrera y Riesco, los demás son muy similares y es bastante notorio, porque los otros grupos están superpuestos. Entonces, no hay una diferenciación clara respecto de los datos, lo que permite confirmar que las variables y valores que se propongan para la tipología de lagos va a funcionar, puesto que se parecen mucho entre ellos.



Figura 17: Análisis K-medias.

Fuente: Elaboración a partir de Software Rstudio.

Finalmente, el método jerárquico y el K-medias, conducen a lo mismo, mostraron que los lagos no tienen diferencia en cuanto a los parámetros de calidad de agua, pues se obtienen grupos, pero no son significativos, es decir no hay una clara separación, excepto por el grupo rojo, que corresponde a datos atípicos. Por lo que es válido trabajar con la tipología de los lagos obtenida, en base a las variables geomorfológicas.

### 5.3 Propuesta de valores límites para una NSCA por grupo tipológico

Para el desarrollo del último objetivo, se trabajó con la totalidad de los datos de calidad de agua de los Lagos Sur-patagónicos, con la excepción de los lagos para los cuales no se contaba con ningún dato de calidad disponible, es decir se trabajó con 18 lagos. Cabe mencionar que el grupo tipológico N° 3, que solo contenía al lago Pdte. Ríos, para esta actividad se le consideró como parte del grupo 2, dado que tenía mayor similitud.

Los lagos que se van a considerar para obtener los índices de nivel trófico son los siguientes ordenados de acuerdo con los grupos tipológicos obtenidos en el análisis de conglomerado en el punto 5.1.2. En la Tabla 17, en color celeste se encuentra el grupo 1 (Laguna Maldonado, Laguna Alta, Laguna Azul, Cochrane, Lago Castor, Laguna Las Perdices, Lago Negro), luego el grupo 2 en color naranja (Riesco, Rosselot, Elizalde, Espolón, Huillinco, Tagua Tagua, Tepuhueico, Yelcho, Verde, Cucao), y por último el grupo 4 de color verde (Gral. Carrera).

En el Anexo 7, se muestran la cantidad de datos por variables para los lagos considerados, así también los años para los que se tenían datos disponibles, desde el más antiguo, a más actual, entonces de esta se elaboró una tabla resumen, que es la Tabla 21, donde se encuentran los años para los registros de los datos, el número de variables que cuentan con datos y el número total de datos por lago. Así también en el Anexo 8 se muestran la cantidad de datos por variable.

En la Tabla 21, se observa que los lagos Cochrane, Riesco, Rosselot, Elizalde, Espolón Yelcho y Gral. carrera presentan el registro más antiguo, correspondiente al año 1992, seguido por los lagos Huillinco, Tepuhueico y Cucao del año 1997. Mientras que los Lagos Tagua Tagua y Verde solo cuentan con datos para los años 2022 y 2021 respectivamente. De las 72 variables consideradas, las cuales contaban con al menos un dato de registro, se puede decir que el lago Riesco, es el que presenta mayor cantidad de variables, reuniendo un total de 69, seguido por los lagos Gral. Carrera y Rosselot, con 44 y 39 variables con datos, respectivamente. Los lagos Negro, Tagua Tagua y Verde son los que presentan menor cantidad de variables con datos con un total de 10 para los dos primeros y 7 variables para el último.

Respecto a la cantidad de datos, el lago Riesco, es el que presenta el mayor número con un total de 2491, seguido por el lago Gral. Carrera y Rosselot con un total de 2206 y 709 datos respectivamente. Todos los demás lagos cuentan con menos de 150 datos. El lago Negro es nombrado nuevamente ya que presenta solo 7 datos y se había dicho que posee 7 variables con datos, esto quiere decir que cuenta con 1 dato por variable, solo para el año 2021.

Para los distintos índices de estado tróficos utilizados y específicamente para el grupo 2, se agregó al lago Pdte. Ríos, a pesar de no contar con información fisicoquímica, puesto que, en el conglomerado jerárquico, este lago tiene cierta semejanza con el grupo mencionado.

*Tabla 21: Lagos Sur-patagónicos por grupo tipológico y sus años de registro, N° de variables y total de datos encontrados.*

Grupo	Lagos	Años	N° variables	Total de datos
Grupo 1	Laguna Maldonado	2018-2023	15	53
	Laguna Alta	2018-2021	14	64
	Laguna Azul	2018-2021	11	55
	Cochrane	1992-2024	17	130
	Lago Castor	1999-2021	33	93
	Laguna Las Perdices	2018-2021	13	48
	Lago Negro	2018-2021	10	44
Grupo 2	Riesco	1992-2024	69	2492

	Rosselot	1992-2024	39	709
	Elizalde	1992-2021	33	97
	Espolón	1992-2022	13	34
	Huillinco	1997-2022	33	107
	Tagua Tagua	2022	10	30
	Tepuhueico	1997-2022	34	109
	Yelcho	1992-2022	23	108
	Verde	2021	7	7
	Cucao	1997-2020	30	75
	Pdte. Ríos	-	-	-
Grupo 3	Gral. Carrera	1992-2024	44	2206

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de calidad de agua recopilados.

### 5.3.1 Estado trófico de los Lagos Sur-patagónicos

Los Índices de condición aplicados son los más utilizados y son aquellos que integran más de un criterio de clasificación tal como: El Índice de Carlson, el Índice la OCDE y el Índice de Burns.

- Índice de Carlson

De acuerdo al resultado obtenido del promedio de cada TSI y el promedio de estos para el Índice (TSI) para cada lago, se observa que a partir de la Tabla 22, que de los 18 lagos considerados; 0 se encuentran en estado Hipereutrófico, 2 se encuentran en estado Eutrófico, 2 tienen una condición Mesotrófica, 7 están en rango Meso-oligotrófico y 7 en Oligotrófico, de lo anterior se puede decir que, el 89% de los lagos se encuentra en un rango Oligotrófico a Mesotrófico, y un 11% está en un rango Eutrófico a Hipereutrófico.

Además, se observa que el lago Cucao posee el mayor TSI y el lago Tagua Tagua el menor TSI. Los lagos Huillinco y Cucao son los lagos que están más próximo a pasar a un estado Hipereutrófico, mientras que la laguna Alta, la laguna Azul, el lago Castor, Riesco, Rosselot, Elizalde y Verde, están más cerca del siguiente estado trófico, que sería Mesotrófico.

*Tabla 22: Condición trófica según Índice de Carlson.*

Lagos	TSIPt	TSI Chl. a	TSIDS	TSI	Estado	Posición
Laguna Maldonado	-	40,63	43,47	28,03	Oligotrófico	7
Laguna Alta	49,04	30,84	35,24	38,37	Meso-Oligotrófico	14
Laguna Azul	42,06	27,46	29,69	33,07	Meso-Oligotrófico	12
Cochrane	47,53	19,74	11,64	26,31	Oligotrófico	6
Lago Castor	34,60	30,56	24,99	30,05	Meso-Oligotrófico	8
Laguna Las Perdices	53,67	41,08	39,87	44,87	Mesotrófico	16
Lago Negro	-	32,61	36,38	23,00	Oligotrófico	3
Riesco	34,18	27,59	31,32	31,03	Meso-Oligotrófico	10
Rosselot	32,68	22,04	37,45	30,72	Meso-Oligotrófico	9
Elizalde	43,83	26,45	26,03	32,10	Meso-Oligotrófico	11
Espolón	34,14	17,63	26,82	26,20	Oligotrófico	4
Huillinco	73,35	35,57	46,34	51,75	Eutrófico	17
Tagua Tagua	34,14	22,40	-	18,84	Oligotrófico	1
Tepuhueico	39,33	42,56	46,83	42,91	Mesotrófico	15
Yelcho	29,89	18,11	30,86	26,29	Oligotrófico	5
Verde	44,1	29,6	31,0	34,89	Meso-Oligotrófico	13
Cucao	86,8	37,8	45,1	56,56	Eutrófico	18
Pdte. Ríos	-	-	-	-	-	-
Gral. Carrera	38,25	-	29,59	22,62	Oligotrófico	2

Los guiones (-) indican que no había o no se encontraron datos para ese parámetro, ni lago.

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de calidad de agua recopilados.

De acuerdo al análisis por grupo, se encontró que en el grupo 1, los Lagos Cochrane y Maldonado presentan la mejor condición trófica, con la posición 6 y 7 respectivamente. En el grupo 2, se encuentra el Lago Tagua Tagua, Espolón, y Yelcho en la posición 1, 4 y 5 respectivamente. Y en el grupo 3, siendo el único lago que lo compone, el Gral. Carrera con la posición número 2.

Cabe mencionar que el ranking se realizó en base al valor de TSI, por lo que el valor más bajo de TSI, es el que presenta mejor condición trófica.

- Índice de la OCDE

Según los resultados obtenidos del índice de la OCDE, y de acuerdo a la Tabla 23, el Lago Espolón Tagua Tagua y Yelcho, son los únicos que presentan una condición ultraoligotrófica a oligotrófica, el primero de ellos presenta 3 de las variables ultraoligotróficas, el segundo y tercer

lago presentan solo 2 variables ultraoligotróficas. Cabe mencionar que, el resto de los lagos que serían, la Laguna Maldonado, la Laguna Alta, la Laguna Azul, el Lago Cochrane, Castor, Laguna Las Perdices, Lago Negro, Riesco, Rosselot, Elizalde, Huillinco Tepuhueico Verde y Cucao presentan al menos 1 variable en estado Mesotrófico. Los Lagos Huillinco, Tepuhueico, Cucao y Gral. Carrera, tienen 1 variable en estado Eutrófica y nuevamente Huillinco y Cucao poseen la variable PT en estado Hipereutrófica.

En este sentido los lagos Huillinco y Cucao presentan la peor condición trófica según el índice de la OCDE, esto debido a la naturaleza de los lagos, pues estos tienen introducción de agua salina.

Tabla 23: Condición trófica según Índice de la OCDE.

Lagos	PT (ug/l)	Chla media (ug/l)	Chla max (ug/l)	DS Media (m)	DS min (m)	Pt	Ch(a) med	Ch(a) max	DS med	DS min
Laguna Maldonado	-	2,93	4,33	3,20	2	-	M	O	M	M
Laguna Alta	28,66	1,07	2,07	5,61	4,5	M	O	U	M	O
Laguna Azul	16	0,73	1,07	8,5	5	M	U	U	O	O
Cochrane	23,83	0,37	0,98	29,24	20,9	M	U	U	U	U
Lago Castor	10,04	1,13	2,94	11,95	7	M	O	O	O	U
Laguna Las Perdices	31	3,13	5,5	4,1	3,5	M	M	O	M	O
Lago Negro	-	1,30	2,26	5,38	2	-	O	U	M	M
Riesco	11,14	0,80	2,25	7,41	5,63	M	U	U	O	O
Rosselot	7,71	0,45	1,12	5,12	2	O	U	U	M	M
Elizalde	17,42	0,78	1,81	11,17	5	M	U	U	O	O
Espolón	8	0,26	0,4	10	10	O	U	U	O	U
Huillinco	264,63	2,02	3,4	2,58	2,5	H	O	O	E	M
Tagua Tagua	8	0,43	0,7	-	-	O	U	U	-	-
Tepuhueico	11,92	4,50	13	2,53	2	M	M	M	E	M
Yelcho	6,41	0,37	0,8	7,80	5	O	U	U	O	O
Verde	16	0,9	0,9	7,5	7,5	M	U	U	O	U
Cucao	5144,35	2,71	4,1	2,81	2,75	H	M	O	E	M
Pdte. Ríos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gral. Carrera	44,7	-	-	10,5	4	E	-	-	O	O

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de calidad de agua recopilados.

Según lo observado, y analizado el índice por grupo, el Lago Cochrane es el que presenta la mejor condición trófica en el grupo 1, seguido por el Lago Azul y el Lago Castor, dentro del grupo 2, los lagos con mejor condición trófica son el lago Espolón, Tagua Tagua y Yelcho y en el grupo 3 solo se encuentra el lago Gral. Carrera.

De igual forma que en el índice anterior, para la obtención de cada lago se calculó el promedio de PT, Chl-a y DS por año y así mismo se extrajo el valor máximo de Chl-a y el valor mínimo de DS.

- Índice de Burns

De acuerdo a lo obtenido del presente índice (Tabla 24), se encontró que, de los 18 lagos analizados, 0 están en condición Ultramicrotrófica, 9 poseen estado Microtrófico (Laguna Maldonado, Laguna Azul, Cochrane, Lago Negro, Rosselot, Espolón, Tagua Tagua, Yelcho y Gral. Carrera), 6 en estado Oligotrófico (Laguna Alta, Lago Castor, Laguna Las Perdices, Riesco, Elizalde, Verde), 1 solo lago se encuentra en la categoría Mesotrófica (Tepuhueico), 0 en Eutrófica, 2 en Supertrófica (Huillinco y Cucao) y 0 en Hipertrófica.

Tabla 24: Condición trófica según Índice de Burns.

Lagos	TLp	TLc	TLd	TLn	TLI	Estado	Posición
Laguna Maldonado	-	3,35	3,71	-	1,76	Microtrófico	7
Laguna Alta	4,17	2,25	2,99	-	2,35	Oligotrófico	14
Laguna Azul	3,55	1,87	2,45	-	1,96	Microtrófico	9
Cochrane	4,03	0,99	0,35	-	1,17	Microtrófico	2
Lago Castor	2,89	2,21	1,94	1,52	2,14	Oligotrófico	11
Laguna Las Perdices	4,57	3,39	3,39	-	2,84	Oligotrófico	15
Lago Negro	-	2,44	3,08	-	1,38	Microtrófico	3
Riesco	2,86	1,88	2,62	1,65	2,25	Oligotrófico	13
Rossetot	2,72	1,25	3,17	-	1,79	Microtrófico	8
Elizalde	3,70	1,75	2,05	1,25	2,19	Oligotrófico	12

Espolón	2,86	0,76	2,18	-	1,44	Microtrófico	5
Huillinco	6,30	2,77	3,95	8,10	5,28	Supertrófico	18
Tagua Tagua	2,85	1,29	-	-	1,03	Microtrófico	1
Tepuhueico	3,31	3,56	3,99	3,62	3,62	Mesotrófico	16
Yelcho	2,48	0,81	2,56	1,01	1,71	Microtrófico	6
Verde	3,73	2,10	2,59	-	2,10	Oligotrófico	10
Cucao	7,5	3,0	3,9	6,6	5,24	Supertrófico	17
Pdte. Rios	-	-	-	-	-	-	-
Gral. Carrera	3,21	-	2,34	-	1,39	Microtrófico	4

Fuente: Elaboración propia en base a los datos de calidad de agua recopilados.

Al analizar por grupo, se encontró que en el grupo 1, se puede observar la favorable condición trófica que posee el conjunto, destacando el lago Cochrane con el mejor valor de TLI con 1,17, seguido por el lago Negro y el lago Maldonado, con valores de 1,38 y 1,76 respectivamente. En el grupo 2, destacan los lagos Tagua Tagua, con un valor de TLI=1.03, seguido del Lago Espolón y Yelcho con valores de 1,44 y 1,71 respectivamente y en el grupo 3, Gral. Carrera con un valor de TLI= 1,39.

Al igual que en los índices anteriores, el presente índice consideró el promedio por cada variable por año por lago.

En general, o a modo de síntesis de la actividad 5.1.2, se logra identificar el vacío de datos en los parámetros para calcular la trofía de los lagos, mencionar que la elección de los lagos de referencia se hizo en base a la disponibilidad de datos, lo que al seleccionar aquellos con mejor condición trófica, permite ser más exigentes al momento de posteriormente sugerir valores, puesto que se quiere lograr que estos lagos se sostengan o permanezcan en niveles oligotróficos por mucho tiempo más.

Además, la falta de datos permite identificar las variables que faltan por medir y que son relevantes para conocer el estado trófico de estos cuerpos lacustres.

Se sugiere considerar a los lagos Huillinco y Cucao como grupo aparte, puesto que estos tienen introducción de agua salina, lo que hace una notoria diferencia en parámetros como el PT y el DS, puesto que se caracterizan por tener un agua color marrón, así como también evidentes diferencias de otros parámetros fisicoquímicos como la conductividad específica.

### 5.3.2 Designación de un lago de referencia por grupo tipológico

En cuanto al cálculo de los índices de estado trófico anteriores, se logró encontrar los lagos de referencia por grupo tipológico, que son aquellos que poseen la mejor condición trófica.

Según el Índice de Carlson, el Índice de la OCDE y el Índice de Burns, el lago que se presenta el mejor estado trófico dentro del grupo 1, es el lago Cochrane. Esto se debe a que posee los valores más bajos de TLI y TSI para el conjunto de lagos analizados. Si bien este lago no cuenta con datos para el parámetro nitrógeno, se seleccionó igualmente como lago de referencia, ya que el único valor disponible para dicha variable corresponde al lago Castor, y un único registro no permite afirmar que este último posee una mejor condición trófica.

Para el grupo 2, el lago con mejor estado trófico es el lago Tagua Tagua, seguido de los lagos Espolón y Yelcho, para este grupo sucede algo similar, pues el lago Tagua Tagua, no posee valores de transparencia, ni de nitrógeno, y el lago Espolón no posee datos para nitrógeno, por lo que, el lago Yelcho, al tener todas las variables necesarias para calcular el estado trófico, es elegido lago de referencia. Finalmente, para el grupo 3, solo se encuentra el lago Gral. Carrera.

De acuerdo a lo expresado anteriormente la selección del lago de referencia es para ser más exigentes, y además de eso, para identificar las variables que faltan por medir, que, en la mayoría de los lagos, corresponde a la variable nitrógeno.

### 5.3.3 Establecer las variables y límites sugeridos a normar

En el Anexo 9, se adjuntan los percentiles de todas las variables encontradas, por grupo tipológico, esto con motivo de que, si se logra concretar la norma y se monitorea, esos son los percentiles que debieran tener o a lo menos aspirar encontrar, para las variables que se tenga disponible.

Luego, en la Tabla 25, se muestran las variables de calidad de agua seleccionados, con los valores sugeridos a normar. La elección de las variables, se realizó en base a aquellas que permitan calcular el índice trófico, así como también las distintas formas de los nutrientes, las que presentan mayor cantidad de datos para los lagos, y también, su importancia ecológica en estos sistemas. Los valores sugeridos corresponden al percentil 75 de los lagos de referencia por grupo.

Para el caso del grupo 1, no se contó con la variable Amonio, DQO, Nitrato, Nitrito, NT, y Ortofosfato. Para el grupo 2, no se contó con la variable DQO, N-NO<sub>3</sub> y N-NO<sub>2</sub>, y para el grupo 3, que solo está compuesto por el lago Gral. Carrera, no se cuenta con datos de Amonio, Clorofila a, Nitrato, Nitrito, Nitrógeno total, Ortofosfato, y de Turbidez, por lo que las mencionadas, no tienen valores sugeridos para esas variables.

Tabla 25: Variables y valores sugeridos a normar por grupo tipológico.

Variable	Unidad	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
		Cochrane		Yelcho		Gral. Carrera	
Amonio (NH <sub>4</sub> )	ug/l	-		12,5		-	
Clorofila a	ug/l	0,41	U	0,57	U	-	
Conductividad Especifica	uS/cm	184,1		39,07		71,4	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	-		-		22	
Fósforo Total	ug/l	18	M	7,72	O	10,25	M
Fósforo de Ortofosfato (P-PO <sub>4</sub> )	mg/l	0,01		0,01		0,01	
Nitrato (NO <sub>3</sub> )	ug/l	-		15,47		-	
Nitrógeno de nitrato (N-NO <sub>3</sub> )	mg/l	0,09		-		0,04	
Nitrógeno de nitrito (N-NO <sub>2</sub> )	mg/l	0,05		-		0,05	
Nitrito (NO <sub>2</sub> )	ug/l	-		32,68		-	
Nitrógeno Total	ug/l	-		36,15	M	-	
Ortofosfato (PO <sub>4</sub> )	ug/l	-		6,38		-	

% Saturación O <sub>2</sub>	%	101,9		10,12		96,8	
Oxígeno disuelto	mg/l	68,56		90,8		11,8	
pH	-	8,2		7,09		7,8	
Temperatura (T°)	°C	11,32		14,79		12,25	
Transparencia o DS	m	36	U	9,03	O	13,75	U
Turbidez	NTU	0		0,63		-	

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos histórica de calidad de agua.

De la Tabla 25, encabezado por los lagos seleccionados con mejor estado trófico por grupo tipológico, se destaca que, el lago Cochrane y el lago Gral. Carrera presentan datos desde 1992 hasta el 2024, mientras que, el lago Yelcho presenta datos desde 1992 al 2022. Los colores al costado de algunos parámetros de calidad de agua, se agregaron para conocer a que estado trófico corresponde (en base al Índice OCDE).

Como se mencionó previamente, en Chile solo existen dos Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) aplicables a lagos: la del Lago Llanquihue y la del Lago Villarrica. Por ello, y con el fin de contextualizar los valores sugeridos en esta investigación, se compararon las variables consideradas en la NSCA del Lago Llanquihue con las propuestas en este estudio. La Tabla 26 muestra dicha norma, la cual incluye parámetros como Conductividad, pH, Oxígeno disuelto, Saturación de oxígeno, Turbiedad, Sílice, DQO, Transparencia, Nitrógeno total, Fósforo total y Clorofila a. En conjunto, estas corresponden a 10 de las 20 variables sugeridas a normar en este trabajo (ya que el DS N° 122 no considera variables como Amonio, Fósforo de Ortofosfato (P-PO<sub>4</sub>), Nitrato (NO<sub>3</sub>), Nitrógeno de nitrato (N-NO<sub>3</sub>), Nitrógeno de nitrito (N-NO<sub>2</sub>), Nitrito (NO<sub>2</sub>), Ortofosfato (PO<sub>4</sub>) y Temperatura, pero sí considera Sílice).

Al comparar los valores propuestos en este estudio con los establecidos por la NSCA del lago Llanquihue, no se observan grandes diferencias en la mayoría de los parámetros. Las divergencias más notorias se presentan en el porcentaje de saturación de oxígeno, cuyos valores normados se aproximan al 100%, y en la DQO, donde la norma permite valores

considerablemente mayores (cerca de 20 mg/L), lo que podría indicar condiciones menos favorables en términos de calidad de agua.

Tabla 26: NSCA Lago Llanquihue por Área de vigilancia.

Parámetro	Unidad	Puerto Octay	Frutillar	Ensenada	Puerto Varas
Conductividad	uS/cm	110	110	110	110
pH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
Oxígeno disuelto	mg/l	≥ 8,5	≥ 8,5	≥ 8,5	≥ 8,5
Saturación de oxígeno	%	≥ 85	≥ 85	≥ 85	≥ 85
Turbiedad	NTU	2,1	2,1	2,4	2,5
Sílice	mg/l	1,83	1,84	1,77	1,80
DQO	mg/l	4,8	4,9	6	5
Transparencia	m	≥ 13,5	≥ 14	≥ 16	≥ 12,5
Nitrógeno total	mg/l	0,12	0,14	0,13	0,13
Fósforo total	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01
Clorofila "a"	mg/l	1,4	1,4	1,4	1,4

Fuente: Extraído de la página web de la BCN (DS N°122/2009).

La Tabla 27, muestra los parámetros establecidos en la NSCA para el lago Villarrica, establece como parámetros, la Trofía deseada, Transparencia, Fósforo disuelto, Fósforo total, Saturación de Oxígeno, Nitrógeno disuelto, Nitrógeno total y Clorofila "a", considerando 5 de las 20 variables sugeridas a normar (el DS N°19 no considera Amonio (NH<sub>4</sub>), Conductividad Especifica, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Fósforo de Ortofosfato (P-PO<sub>4</sub>), Nitrato (NO<sub>3</sub>), Nitrito (NO<sub>2</sub>), Ortofosfato (PO<sub>4</sub>), Oxígeno disuelto, pH, Solidos Totales Disueltos (STD), Solidos Totales Suspendidos (STS), Temperatura (T°) y Turbidez, pero si considera Fósforo disuelto y Nitrógeno disuelto).

En cuanto a los valores establecidos, se encuentran diferencias en el % saturación de oxígeno el cual es cercano al 100 % en el sugerido y también en la clorofila a, el propuesto es un valor más exigente que el mostrado en la Tabla 25.

Tabla 27: NSCA lago Villarrica.

Parámetro	Unidad	Criterio	PEL	Poza	Pucón	Norte	Villarrica	Sur
Trofia Deseada	-	-	Oligotrófico	Oligomesotrófico	Oligomesotrófico	Oligomesotrófico	Oligomesotrófico	Oligomesotrófico
Transparencia	m	Promedio anual	≥ 9	≥ 7	≥ 7	≥ 7	≥ 7	≥ 7
		Mínimo	≥ 5	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4
Fósforo disuelto	mg P/l	Promedio anual	≤ 0,010	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015
		Máximo	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025
Fósforo total	mg P/l	Promedio anual	≤ 0,010	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015
		Máximo	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025
Saturación oxígeno	%	Mínimo	≥ 80	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 70
Nitrógeno disuelto*	mg N/l	Promedio anual	< 0,010	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015
		Máximo	≤ 0,15	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
Nitrógeno total	mg N/l	Promedio anual	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015
		Máximo	≤ 0,20	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
Clorofila "a"	ug/l	Promedio anual	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
		Máximo	≤ 6	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Nota: (*) es la suma de N-nitrato, N-nitrito y N-amonio.								

Fuente: Extraído de la página web de la BCN (DS N°19/2013).

De acuerdo a las Tablas 26 y 27, las NSCA del Lago Llanquihue y Villarrica, respectivamente, establecen distintos parámetros y cierta diferencia entre los valores a considerar, en comparación a los propuestos por grupo tipológico.

Cabe mencionar que la NSCA para el lago Llanquihue, inició el proceso de revisión de la norma el 2023, esto siendo que la norma debe ser revisada a lo menos cada 5 años, lo que demuestra el tardío o la falta de seguimiento a esta norma.

Por otra parte, el lago Villarrica fue declarado como zona saturada el 2017, y el respectivo Plan de Descontaminación, se aprobó este año. Por lo que, en vista de lo mencionado, la importancia

de establecer normas para los lagos, radica en mantener el estado oligotrófico de estos, y promover el buen uso del agua, que en el periodo estival destaca por su uso recreativo.

## 6. Conclusiones

- A partir de las variables geomorfológicas se identificaron cuatro grupos de lagos, cada uno con sus características singulares, que se detallan a continuación:

*Tabla 28: Características de los grupos geomorfológicos con ejemplos para cada uno.*

Grupo	Características	Lagos que lo conforman
1	En general, lagos de tamaño pequeños a medianos	Lago Castor, Brown
2	Variedad de tamaños, que tienden a tener menor Altitud/Latitud, con algunos lagos más cercanos a la costa y que están relacionados a la geología silícea	Lago Elena, Riesco, Huillinco y Cucao
3	Conforma un grupo propio aparte por sus características, presenta un comportamiento atípico, pero debido a la escasez de datos disponibles fue incorporado al grupo 2, por la falta de datos y por su similitud con este grupo	Lago Pdte. Ríos
4	Conforman un grupo separado debido a su gran tamaño, ubicados a gran altitud, en la cordillera, a más de 200 m.s.n.m.	Lagos General Carrera y O'Higgins

Fuente: Elaboración propia a partir de los análisis obtenidos de la tipología de los lagos.

- En cuanto a las variables de calidad de agua, y respecto a los análisis estadísticos realizados, no se observaron diferencias significativas entre los lagos. Por lo tanto, se valida la aplicación de la tipología en base a las características geomorfológicas para la zona de estudio.
- De acuerdo al cálculo de índices tróficos por tipología, se encontró que los lagos Cochrane, Yelcho y Carrera, poseen la mejor condición trófica para su grupo, por lo cual se les recomienda como lagos de referencia.

- Finalmente, se sugiere que, en futuros análisis, los lagos Huillinco y Cucao sean considerados como un grupo independiente, dado sus características salinas particulares.

## 7. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Las metas específicas de los ODS, a los cuales tributa esta investigación son:

Al ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento, en la meta 6.5 debido a que se sugieren normas para una adecuada gestión de los recursos hídricos, así como también a la meta 6.6, puesto que con la norma se busca proteger los Lagos Sur-patagónicos.

De igual forma al ODS 12 Producción y consumo responsables puesto que con la sugerencia de una o varias normas se quiere lograr una gestión sostenible y el uso eficiente del recurso hídrico (meta 12.2).

Y, por último, aporta al ODS 15 Vida de Ecosistemas Terrestres, ya que se vela por la conservación y uso sostenible de los ecosistemas de agua dulce (meta 15.1).

## 8. Referencias Bibliográficas

- Alvial, I. (2018). Evaluación de la condición trófica en cuerpos lacustres. En Ciren.cl. Dirección General de Aguas e Ingeniería y Gestión Ambiental Enlaces SPA. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/6e146774-36cb-4a12-8f20-52b931810e5b>
- Arismendi, I., et al. (2009). "Aquaculture, non-native salmonid invasions and associated declines of native fishes in Northern Patagonian lakes." *Freshwater Biology* 54(5): 1135-1147.
- Burns, N., et al. (2005). "Strategies for Managing the Lakes of the Rotorua District, New Zealand." *Lake and Reservoir Management* 21(1): 61-72.
- Burns, N., et al. (2009). Managing the lakes of the Rotorua District, New Zealand. *Lake And Reservoir Management*, 25(3), 284-296. <https://doi.org/10.1080/0743814090308381>
- Campos, H., et al. (1988) Limnological studies of Lake Llanquihue (Chile), morphometry, physics, chemistry, plankton and primary productivity.
- Campos, H. (1996). «Estudios Limnológicos de los Lagos Elizalde Y Riesco» (LGO-517). Universidad Austral de Chile y Dirección General de Aguas. <https://snia.mop.gob.cl/PIA/items/0d0f1de6-514b-4607-bdcf-04342972b09e>
- Campos, H. (1997a). Determinación de la Capacidad de Carga y Balance de Fósforo Y Nitrógeno de los Lagos Riesco, Los Palos y Laguna Escondida en la XI Región. En subpesca.cl (FIP-IT / 97-39). Universidad Austral de Chile. [https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-89622\\_informe\\_final.pdf](https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-89622_informe_final.pdf)
- Campos, H. (1997b). Determinación de la capacidad de carga y balance de fósforo y nitrógeno de los lagos Natri, Cucao, Huillinco, Tepuhueico y Tarahuin (FIP-IT / 96-54). UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE y SUBPESCA. <https://www.subpesca.cl/portal/fipa/Consultor/Universidad-Austral-de-Chile/89588:Determinacion-de-la-capacidad-de-carga-y-balance-de-Fósforo-y-nitrogeno-de-los-lagos-Natri-Cucao-Huillinco-Tepuhueico-y-Tarahuin>
- Campos, H. (1999). Diagnóstico limnológico de los principales lagos de la comuna de Coyhaique. En snia.mop.gob.cl (LGO.2631 C1). Universidad Austral de Chile y Dirección General de Aguas. <https://snia.mop.gob.cl/PIA/items/4d49fc62-c410-49e7-9d89-53cf4eae60bd>
- Chile Lagos Limpios. (s. f.-b). <https://chilelagoslimpios.cl/>

- CIEP. (s. f.). [https://www.goreaysen.cl/controls/neochannels/neo\\_ch94/neochn94.aspx?appinstanceid=207&pubid=333](https://www.goreaysen.cl/controls/neochannels/neo_ch94/neochn94.aspx?appinstanceid=207&pubid=333)
- CONAF. (2025). Listado de Áreas Silvestres Protegidas (actualizado abril, 2025) - CONAF. <https://www.conaf.cl/centro-documental/listado-de-areas-silvestres-protegidas-actualizado-a-noviembre-de-2023/>
- Consejo del Salmón. (2025). Principales datos de la industria - Consejo del Salmón. <https://www.consejodelsalmon.cl/informacion-de-la-industria/principales-datos-de-la-industria/>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.-h). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1207112>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.-i). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1063954>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.-j). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1189503>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.-k). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1014239>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.-l). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1084403>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.-m). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1055224>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.-n). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1011869>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053036>
- Del Congreso Nacional, B. (s. f.). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1210759>

- Díaz, P. A., et al., (2025). The risk of high-biomass HABs: Triggers and dynamics of a non-toxic bloom of *Prorocentrum micans* in Chilean Patagonia. *Science of The Total Environment*, 958, 178140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178140>
- Ding, M., et al. (2024). "A framework of freshwater and saline lake typology classification through leveraging hydroclimate, spectral, and literature evidence." *Journal of Hydrology* 632: 130704.
- Dirección General de Aguas. (1996). Programa de Control e Investigación Limnológica Región De Aysén. En <https://snia.mop.gob.cl/PIA-PORTAL/> (MTD-668 c.2). <https://snia.mop.gob.cl/PIA/items/5bfc2a7c-ce4e-4f2b-b5d5-70c755142345>
- Dirección General de Aguas. (2018). DGA. Análisis de la relación entre la concentración de clorofila "a" y la transparencia de los lagos monitoreados por la red de calidad de la DGA, y elaboración de un ranking de lagos basado en el estado trófico otorgado por estos parámetros. ed. Ministerio de Obras Públicas, 45. Santiago. <https://snia.mop.gob.cl/PIA/handle/20.500.13000/6925>
- Dirección General de Aguas. (2016a). Atlas del Agua de Chile. Capítulo 1 Chile en el mundo. Ministerio Obras Públicas. Retrieved from: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/5f46898c-f9e5-4d97-936b-a1e9f0dcecdde>
- Dirección General de Aguas (DGA) (2016b). Atlas del Agua - Capítulo 2 Nuestra Agua. 2016. <https://research.csiro.au/gestionrapel/wp-content/uploads/sites/79/2016/11/merged-1.pdf>
- Dirección General de Aguas (DGA) (2017). Análisis y reformulación Red de Monitoreo de Lagos Región de los Ríos. Dirección General de Aguas. EULA-CHILE. En bibliotecadigital.ciren (S.I.T N° 395). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/50dbb8d5-003c-4e37-abbf-bfb2e6b16e6c>
- Dirección General de Aguas. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, M. (2019). Minuta Técnica CPRH N° 27: informa transparencia lagos de red de monitoreo Dirección General de Aguas. <https://snia.mop.gob.cl/PIA/handle/20.500.13000/6999>
- Dirección General de Aguas, (2022). Recopilación, Sistematización y Análisis De Información Disponible para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas de los Lagos Nord-Patagónicos de Chile. En planesynormas.mma.gob.cl. [https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2022/proyectos/\\_68-129\\_\\_SEMINARIO\\_PROYECTO\\_DE\\_LNP\\_V2-2\\_pagenunder.pdf](https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2022/proyectos/_68-129__SEMINARIO_PROYECTO_DE_LNP_V2-2_pagenunder.pdf)

Dirección General de Aguas. (2025) Más de 100 lagos, lagunas y ríos serán monitoreados por el MOP para asegurar la calidad de las aguas | Dirección General de Aguas. (febrero, 2025). <https://dga.mop.gob.cl/mas-de-100-lagos-lagunas-y-rios-seran-monitoreados-por-el-mop-para-asegurar-la-calidad-de-las-aguas/>

Directiva 2000/60/CE, (2000), Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524>

Directiva 2000. (2000). Directiva 2000/60/CE. Análisis de trasposición y procedimientos de desarrollo. v1.0: ANEXO II. [CARACTERIZACIÓN, PRESIONES E IMPACTOS, CONDICIONES DE REFERENCIA]. En [hispagua.cedex.es](http://hispagua.cedex.es) (v1.0). <https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/dma/pdf/anexo2.pdf>

Directiva Marco del Agua (DMA). (2004). Caracterización de los tipos de ríos y lagos. En CENTRO DE ESTUDIOS y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS. <https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2021-2027/Documentos-iniciales/Referencia%20bibliografica/CEH,%202005 DMA Caracterizacion Rios Lagos.pdf>

Djodjic, F., Bieroza, M., & Bergström, L. (2021). Land use, geology and soil properties control nutrient concentrations in headwater streams. *Science of The Total Environment*, 772, 145108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145108>

Geller, W. (1992). "The temperature stratification and related characteristics of Chilean lakes in midsummer." *Aquatic Sciences* **54**(1): 37-57.

Guala, C., et al., (2023). Analysis of Tourism Development Linked to Protected Areas in Chilean Patagonia. In J. C. Castilla, J. J. Armesto Zamudio, M. J. Martínez-Harms, & D. Tecklin (Eds.), *Conservation in Chilean Patagonia: Assessing the State of Knowledge, Opportunities, and Challenges* (pp. 481-504). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39408-9\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39408-9_18)

Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. (1999). *Análisis multivariante de datos*. Ed. Prentice Hall, Londres.

Hu, X., et al. (2024). "Integrating ecosystem services trade-off, drivers and zoning into watershed water environment management in Nansihu Lake Basin, China." *Ecological Indicators* 167

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2025, 29 junio). Censo 2024. <https://censo2024.ine.gob.cl/estadisticas/>

Kagalou, I. and I. Leonardos (2009). "Typology, classification and management issues of Greek lakes: implication of the Water Framework Directive (2000/60/EC)." *Environ Monit Assess* **150**(1-4): 469-484.

Karki, S., et al. (2021). "Does the topology of the river network influence the delivery of riverine ecosystem services?" *River Research and Applications* **37**(2): 256-269.

Kolada, A., et al. (2005). "Abiotic typology of Polish lakes." *Limnologica* 35(3): 145-150.

León-Muñoz, J. (2007). Salmonicultura en los lagos del sur de Chile - Ecorregión valdiviana: Historia, tendencias e impactos medioambientales. En WWF Chile (Ed.), [wwfeu.awsassets.panda.org](http://wwfeu.awsassets.panda.org). Universidad Austral de Chile. [https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/informe\\_salmones\\_lagos\\_sur\\_de\\_chile\\_restriccion.pdf](https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/informe_salmones_lagos_sur_de_chile_restriccion.pdf)

Lyche Solheim, A., et al. (2019). "A new broad typology for rivers and lakes in Europe: Development and application for large-scale environmental assessments." *Sci Total Environ* **697**: 134043.

Ministerio del Medio Ambiente, 2011. Las áreas protegidas de Chile. Sierralta L., R. Serrano. J. Rovira & C. Cortés (eds.), 35 pp. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/a6c1b926-da9d-414a-9008-7065264ba7c9/content>

Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Guía para la elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas 2017. MMA. <https://humedaleschile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/10/Guia-NSCA-Agua.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (s. f.). Normativa Aplicable, Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire. <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma>

Miranda, L. E., et al. (2021). "An inventory and typology of permanent floodplain lakes in the Mississippi Alluvial Valley: a first step to conservation planning." *Aquatic Sciences* 83(2)

Mondragón Fischer, B. (s. f.). Las Normas de Calidad Ambiental a la luz de los fallos de los Tribunales Ambientales. *REVISTA JUSTICIA AMBIENTAL*.  
<https://www.revistajusticiaambiental.cl/wp-content/uploads/2018/05/5-JUSTICIA-AMBIENTAL-N-9-153-179.pdf>

Moss, B., et al. (2003). "The Determination of Ecological Status in Shallow Lakes – a Tested System (ECOFRAME) for Implementation of the European Water Framework Directive." *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13: 507-549.

Nimptsch, et al., 2016), First record of toxins associated with cyanobacterial blooms in oligotrophic North Patagonian lakes of Chile—a genomic approach. *International Review of Hydrobiology*, 101(1-2), 57-68. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/iroh.201401780>

Nöges, T. (2009). Relaciones entre la morfometría, la ubicación geográfica y los parámetros de calidad del agua de los lagos europeos. *Hydrobiologia*, 633, 3343.

Pesse, N. (2016). Evaluación del estado ambiental de los lagos utilizados para actividades de acuicultura en la zona sur austral de Chile (Segunda etapa). En *gisac.cl*. INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP.  
[https://gisac.cl/proyectos/lagos/II\\_Etapa\\_Informe\\_Final\\_Lagos\\_compressed.pdf](https://gisac.cl/proyectos/lagos/II_Etapa_Informe_Final_Lagos_compressed.pdf)

Pesse, N. (2020). Convenio de Desempeño 2018 Evaluación del estado ambiental de los lagos utilizados para actividades de acuicultura en la zona Sur de Chile (VI etapa). En *gisac.cl*. SUBSECRETARIA DE ECONOMÍA y EMT.  
[https://gisac.cl/proyectos/lagos/VI\\_Etapa\\_Informe\\_Final\\_Lagos\\_compressed.pdf](https://gisac.cl/proyectos/lagos/VI_Etapa_Informe_Final_Lagos_compressed.pdf)

Pesse, N. (2022). Evaluación del estado ambiental de los lagos utilizados para actividades de acuicultura en la zona sur de Chile. (Novena Etapa) En *gisac.cl* (Convenio de Desempeño 2021).

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO.

[https://gisac.cl/proyectos/lagos/IX\\_Etapa\\_Informe\\_Final\\_Lagos\\_compressed.pdf](https://gisac.cl/proyectos/lagos/IX_Etapa_Informe_Final_Lagos_compressed.pdf)

Pesse, N. (2023). Evaluación del estado ambiental de los lagos utilizados para actividades de acuicultura en la zona sur austral de Chile (Décima Etapa). En [gisac.cl](https://gisac.cl). INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP.

[https://gisac.cl/proyectos/lagos/X\\_Etapa\\_Informe\\_Final\\_Lagos\\_compressed.pdf](https://gisac.cl/proyectos/lagos/X_Etapa_Informe_Final_Lagos_compressed.pdf)

Pizarro, J., et al. (2016). "Cooling and eutrophication of southern Chilean lakes." Science of The Total Environment **541**: 683-691.

Prado, R. (1999). Determinación de la capacidad de carga y balance de Fósforo y nitrógeno de los lagos Chapo, Yelcho, Popetan y Laguna San Antonio en la X Región. En [subpesca.cl](http://subpesca.cl) (Proyecto Fip 97-40). <https://www.subpesca.cl/portal/fipa/Consultor/Universidad-de-Valparaiso/89623:Determinacion-de-la-capacidad-de-carga-y-balance-de-Fósforo-y-nitrogeno-de-los-lagos-Chapo-Yelcho-Popetan-y-Laguna-San-Antonio-en-la-X-Region>

R&Q Ingeniería S.A. (2007). Estudio de Impacto Ambiental «Construcción Conexión Vial Futaleufú-Termas Del Amarillo». En [seia.sea.gob.cl](http://seia.sea.gob.cl) (Capítulo IV. Línea Base.). Patricio Aguilera y R&Q Ingeniería S.A. <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2524710>

Reid, B., et al., (2023). Evaluación de la conservación de los ecosistemas de agua dulce en el suroeste de la Patagonia. En: Castilla, JC, Armesto Zamudio, JJ, Martínez-Harms, MJ, Tecklin, D. (eds.) Conservación en la Patagonia chilena. Integrated Science, vol. 19. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39408-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39408-9_14)

Rodríguez-López, L., et al. (2021). "Spatio-temporal analysis of chlorophyll in six Araucanian lakes of Central-South Chile from Landsat imagery." Ecological Informatics **65**.

Salazar, C., & Soto, M. (1999). Caracterización y monitoreo de sistemas lacustres. En [snia.mop.gob.cl](http://snia.mop.gob.cl). Dirección General de Aguas. <https://snia.mop.gob.cl/PIA/items/7c80dcd0-2e30-4eca-816f-01ecff4f70d7>

SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago

- Soto, D. (2002). "Oligotrophic patterns in southern Chilean lakes: the relevance of nutrients and mixing depth." *Revista chilena de historia natural* 75: 377-393.
- Stefanidis, K., & Papastergiadou, E. (2012). Relationships between lake morphometry, water quality, and aquatic macrophytes, in greek lakes. *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(10), 3018-3026
- Thomasson, K. U. (1961). Araucanian Lakes Plankton Studies in North Patagonia, with notes on Terrestrial Vegetation. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:565401/FULLTEXT01.pdf>
- Urrutia, R. (2021). Evaluación de la condición trófica en cuerpos lacustres monitoreados por DGA. En [snia.mop.gob.cl](http://snia.mop.gob.cl) (LGO5930). CENTRO EULA-CHILE Y DGA. <https://snia.mop.gob.cl/PIA/items/1b8cf5a4-0e5c-49dc-89c9-df2028370263>
- Urrutia, R. (2024). Monitoreo limnológico de lagos como insumo para la evaluación del Estado trófico. En [snia.mop.gob.cl](http://snia.mop.gob.cl). Centro EULA-Chile y Dirección General de Aguas. LGO6078. <https://snia.mop.gob.cl/PIA/handle/20.500.13000/126808>
- Van de Vyver, E., et al. (2019). "Variation in phytoplankton pigment composition in relation to mixing conditions in temperate South-Central Chilean lakes." *Limnologica* 79.
- Vega-Dienstmaier, JM y Arévalo-Flores, JM (2014). Clasificación mediante análisis de conglomerados: un método relevante para la psiquiatría. *Revista de Neuro-Psiquiatría*, 77 (1), 31-39.
- Villalobos, L. et al (2003). "A study of the river basins and limnology of five humic lakes on Chiloé Island." *Revista chilena de historia natural* 76: 563-590.
- Vivanco, E. (2022). Categorías de áreas silvestres protegidas: En el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) y el Proyecto de Ley que crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP). En Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33062/1/BCN\\_Categorias\\_de\\_areas\\_silvestres\\_protegidas\\_SBAP\\_2022\\_FINAL.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33062/1/BCN_Categorias_de_areas_silvestres_protegidas_SBAP_2022_FINAL.pdf)
- Woelfl, S. (2012). Evaluación del estado ambiental de los lagos utilizados para actividades de acuicultura en la zona sur austral de Chile (Primera etapa). En [gisac.cl](http://gisac.cl) (PROYECTO N 4728-42-LP12). Universidad Austral de Chile y SUBSECRETARÍA DE PESCA Y ACUICULTURA. [https://gisac.cl/proyectos/lagos/I\\_Etapa\\_Informe\\_Final\\_Lagos\\_compressed.pdf](https://gisac.cl/proyectos/lagos/I_Etapa_Informe_Final_Lagos_compressed.pdf)

## 9. Anexos

Anexo 1: Descripción de códigos presentes en las cuencas de los Lagos Sur-patagónicos

Código	Ambiente	Resumen	Edad	Tipo
arg	-	-	-	-
CPg	Plutónico	Secuencias Volcánicas	Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma)	Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: Batolitos compuestos, 'stocks' y cuerpos hipabisales (Sierra Moreno, Cordillera de Domeyko, Batolito, Elqui-Limarí); en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Batolito Panguipulli-Riñihue y 'Stock' Leones.
DC4	Metamórfico	Rocas Metamórficas	Devónico-Carbonífero	Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: Formación El Toco, Complejo Epimetamórfico Chañaral; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: Complejo Metamórfico Oriental de Aisén y Magallanes.
E1c	Sedimentario Continental	Secuencias Sedimentarias	Eoceno	Secuencias sedimentarias continentales parálicas: areniscas, lutitas y mantos de carbón. En la costa, Región VIII: Formación Trihuco; en la Región XI: Formación San José.
E3	Volcánico Continental	Secuencias Volcanosedimentarias	Eoceno	Secuencias y centros volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas y domos riolíticos. En la Precordillera, regiones I y II: Formación Icanche y Estratos del Cerro Casado; en la Cordillera Patagónica, Región XI: domos de Lago Chacabuco y alto Río Cisnes.
E3b	Volcánico	Secuencias Volcanosedimentarias	Eoceno	Basaltos de 'plateau' continentales, basaltos de intraplaca, y domos riolíticos subordinados. En la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: Basaltos, Balmaceda y lavas del cabo Holland.
Eg	Plutónico	Secuencias Volcánicas	Eoceno (52-33 Ma)	Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a V; en la Cordillera Patagónica, Región XI: archipiélago de los Chonos.
Hielo	-	-	-	- (no es un tipo de geología)
J3a	Volcánico	Secuencias Volcanosedimentarias	Jurásico	Secuencias y centros volcánicos: rocas piroclásticas, dacíticas a riolíticas, lavas andesíticas e intercalaciones sedimentarias. En la Cordillera Patagónica y Antártica, regiones XI y XII: Grupo Ibáñez y Formación Tobífera.
J3i	Volcanosedimentario	Secuencias Volcanosedimentarias	Jurásico	Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: formaciones Camaraca y La Negra; en la Cordillera Principal, Región VIII: Formación Nacientes del Biobío (Miembro Icalma).
JK1m	Sedimento marino	Secuencias Sedimentarias	Jurásico Superior-Cretácico Inferior	Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas. En la Precordillera, Región III: Formación Pedernales; en la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: formaciones Lo Valdés, Baños del Flaco; en las regiones XI a XII: Grupo Coihaique y formaciones La Paciencia, Erezcano, Zapata, Sutherland, Río Jackson, Vicuña y Yaghán.
Jsg	Plutónico	Secuencias Volcánicas	Jurásico Superior	Ortoneises de protolito intrusivo. En la Región XII: neises de Cordillera Darwin.

Ki1m	-	Secuencias sedimentarias	Cretácico Inferior (Neocomiano)	Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas. En las regiones I a IV: formaciones Blanco, El Way, Grupo Chañarillo y Río Tascadero.
Kia3	Volcánico Continental	Secuencias Volcánicas	Cretácico Inferior alto	Secuencias y complejos volcánicos continentales: Lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias. En las regiones I y II: formaciones Suca, Punta Barranco y Estratos de Quebrada San Cristóbal; en la Cordillera Patagónica, Región XI: Grupo Divisadero.
Kig	Plutónico	Secuencias Volcánicas	Cretácico Inferior (144-90 Ma)	Granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. En la Cordillera Principal, regiones VIII a XI: Grupo Plutónico Gualletué, archipiélago de los Chonos y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica.
Ks3i	Volcánico Continental	Secuencias Volcánicas	Cretácico Superior	Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos y brechas basálticas a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásticas. En la Precordillera, regiones I a IV: Formación Cerro Empexa (superior), Estratos del Estanque, Cerro Los Carneros; en la Cordillera Patagónica, Región XI: Grupo Ñiregao
Ksg	Plutónico	Secuencias Volcánicas	Cretácico Superior (90-65 Ma)	Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos. En la Precordillera, regiones I a III y entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones IV, V y Metropolitana; en la Región XII: granitoides de las islas Wollaston y Navarino, Cordillera Darwin.
KTg	Plutónico Hipabisal	Secuencias Volcánicas	Cretácico Superior-Terciario Inferior	Granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos. Entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones I a IV; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: granitoides y pórfidos de Puerto Ibañez e islas Evans. (a) Facies marginales de granodioritas y gabros del Batolito Surpatagónico: isla Riesco y estrecho de Magallanes
Lag	-	-	-	-
M1c	Sedimentario Continental	Secuencias Sedimentarias	Mioceno Inferior-Medio	Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas. En las regiones I a III: formaciones Diablo, Chucal, Altos de Pica (superior) y Gravas de Atacama; en las regiones VIII a IX: Formación Cura-Mallín (superior); en la Región XI: Formación Las Dunas.
M1m	Sedimentario Marino y Transicional	Secuencias Sedimentarias	Mioceno	Secuencias sedimentarias marinas transgresivas plataformales: areniscas finas, arcillolitos y limolitas. En la costa, Región VIII: Fm. Ranquil; en la Depresión Central, Región IX: Formación Cholchol.
Mg	Plutónico	Secuencias Volcánicas	Mioceno (18-6 Ma)	Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: franja central del Batolito Norpatagónico y plutones orientales: plutones Liquiñe, San Lorenzo, Paso Las Llaves y Torres del Paine.
MP3	Plutónico	Secuencias Volcánicas	Mioceno-Plioceno	Basaltos de 'plateau' y rocas piroclásticas intermedias a ácidas. En la Cordillera Principal, Región VII y Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: basaltos de Chile Chico, adakitas de península de Taitao y Formación Palomares.
OM1m	Sedimento marino	Secuencias Sedimentarias	Oligoceno-Mioceno	Secuencias sedimentarias marinas: areniscas y coquinas. En la Región XI: formaciones Guadal y Ayacara.
OM2m	Volcanosedimentario Marino	Secuencias Volcanosedimentarias	Oligoceno-Mioceno	Secuencias volcanosedimentarias marinas: cherts, areniscas y lutitas con lavas y brechas basálticas intercaladas. En la Región XI: Formación Traiguén.
PE1c	Sedimentario Continental	Secuencias Sedimentarias	Paleoceno-Eoceno Inferior	Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales o lacustres: areniscas, conglomerados, lutitas, niveles evaporíticos y carbonosos. En la Cordillera

				Principal, Región II: formaciones Chofñas y Siglia; en la Precordillera, Región II: 'Unidad Naranja'; en la Región XI: Formación Ligorio Márquez.
Pg	Plutónico	Rocas Intrusivas	Plioceno (4-3 Ma)	Granodioritas, tonalitas y monzogranitos. En la costa, Región XI: granitoides de península Tres Montes y Taitao; en la Cordillera Patagónica, Región XI: intrusivo del río de las Nieves.
PI3	Volcánico	Secuencias Volcanosedimentarias	Pleistoceno	Secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios; depósitos piroclásticos andesítico basálticos. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana a X.
PPI3	Volcanosedimentario Continental	Secuencias Volcanosedimentarias	Plioceno-Pleistoceno	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, regiones VII a X: formaciones Cola de Zorro y Malleco; en la Cordillera Patagónica, Región XII: basaltos de Pali Aike; en las islas oceánicas: volcán Poike (Isla de Pascua), archipiélago Juan Fernández, isla Salas y Gómez; islas San Félix y San Ambrosio.
PzTr4	Metamórfico	Rocas Metamórficas	Paleozoico Triásico	Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, regiones IX a X: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera Principal, Región X: Complejo Metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos (a) y esquistos y anfibolitas, en menor proporción, rocas metamórficas ultramáficas (b)
PzTr4(a)	Metamórfico	Rocas Metamórficas	Paleozoico Triásico	Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, regiones IX a X: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera Principal, Región X: Complejo Metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos (a) y esquistos y anfibolitas, en menor proporción, rocas metamórficas ultramáficas (b)
PzTr4(b)	Metamórfico	Rocas Metamórficas	Paleozoico Triásico	Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, regiones IX a X: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera Principal, Región X: Complejo Metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos (a) y esquistos y anfibolitas, en menor proporción, rocas metamórficas ultramáficas (b)
Q1	Sedimentario continental	Secuencias Sedimentarias	Pleistoceno Holoceno	Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclasticos.
Q1g1	-	-	Pleistoceno Holoceno	Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, regiones I a IV. En la Depresión Central, regiones IX y X; en regiones XI y XII: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvioglaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (1; 35-14,2 ka); Santa María (2; 262-132 ka); Río Llico (3; 480-338 ka) o Caracol (4; 687-512 ka)
Q3i	Volcanico	Secuencias Volcanicas	Cuaternario	Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas

				basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos; adakíticos al sur de los 47°S. En la Cordillera Principal, regiones I a III: volcanes Taapaca, Parinacota, Láscar y Ojos del Salado. Principalmente holocenos en la Cordillera Principal, regiones Metropolitana a X: volcanes San José, Peteroa, Antuco, Llaima, Villarrica, Osorno y Calbuco, entre otros; en la Cordillera Patagónica, regiones XI a XII: volcanes Hudson, Lautaro y Monte Burney. En Antártica: isla Decepción.
Qc	-	-	-	-
Qf	Sedimentario Continental	Secuencias Sedimentarias	Pleistoceno-Holoceno	Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.
Qm	Sedimentario Continental	Secuencias Sedimentarias	Pleistoceno-Holoceno	Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales.
Rio	-	-	-	-
SVE	-	-	-	-
Tr4a	Metamórfico	Rocas Metamórficas	Triásico	Secuencias metaturbidíticas de protolito Triásico, afectadas por metamorfismo de bajo grado del Jurásico-Cretácico. En la Cordillera de la Costa, Región XI: Formación Potranca.
Tr4b	Metamórfico	Rocas Metamórficas	Triásico	Esquistos micáceos y filitas de protolito metasedimentario (Tr4a). En la Cordillera de la Costa, Región XI: Formación Canal King.

Fuente: Información extraída del shape del mapa geológico y el documento

<https://portalgeomin.sernageomin.cl/service/5fada62573f7d0000000>

#### Anexo 2: Resumen geología por área de drenaje de cada Lago Sur-patagónico

Lagos	Alegre	Azul	Bergues	Bertrand	Briceño	Brown	Caro	Chacabuco
Silíceo	1%	90%	5%	49%	0%	9%	93%	5%
Calcáreo	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%
Mixto	88%	0%	29%	27%	83%	73%	0%	80%
Otros	11%	10%	67%	25%	17%	17%	5%	15%
Lagos	Chaiguata	Christie	Cisnes	Cochrane	Colonia	Condor	Cucao	Del Salto
Silíceo	90%	1%	16%	9%	49%	91%	94%	86%
Calcáreo	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mixto	0%	91%	77%	69%	0%	0%	0%	0%
Otros	10%	8%	7%	22%	51%	9%	6%	0%
Lagos	Elena	Elizalde	Espolón	Gral. Carrera	Huillinco	Lapparent	Leones	Manuel Rodríguez
Silíceo	86%	94%	92%	63%	95%	88%	45%	93%
Calcáreo	0%	2%	4%	1%	0%	0%	0%	0%
Mixto	0%	0%	0%	15%	0%	0%	0%	0%
Otros	14%	4%	4%	20%	5%	12%	55%	7%

Lagos	O'Higgins	Pdte. Ríos	Pdte. Roosevelt	Reñihue	Riesco	Rosselot	Tagua Tagua	Tepuhueico
Silíceo	11%	78%	97%	89%	94%	95%	93%	93%
Calcáreo	0%	0%	0%	0%	1%	0%	4%	0%
Mixto	39%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Otros	50%	22%	3%	11%	5%	5%	3%	7%
Lagos	Trébol	Verde	Yelcho	Yulton	Laguna Alta	Laguna Azul	Laguna Perdices	Laguna Maldonado
Silíceo	94%	94%	86%	79%	100%	100%	100%	0%
Calcáreo	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
Mixto	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Otros	6%	6%	6%	21%	0%	0%	0%	0%
Lagos	Lago Castor	Lago Negro						
Silíceo	84%	100%						
Calcáreo	0%	0%						
Mixto	0%	0%						
Otros	16%	0%						

Fuente: Elaboración propia a partir de tabla dinámica realizada en Excel con información del shape de geología y las cuencas creadas en ArcGIS.

### Anexo 3: Categorías de protección oficial definidas para Chile por CONAF

Categoría de protección	Descripción
Parque Nacional	<p>Es un área terrestre, acuática, marina, insular o continental, generalmente amplia, en la que existen diversos ambientes únicos o representativos del patrimonio natural del país, no alterados significativamente por la acción humana, y en que la biodiversidad o las formaciones geológicas son de especial interés educativo, científico o recreativo.</p> <p>El objetivo de esta categoría es la preservación del patrimonio natural junto a su valor escénico o cultural asociado, la continuidad de los procesos evolutivos y de las funciones ecológicas, junto con las poblaciones de especies y ecosistemas característicos del área.</p>
Reserva Nacional	<p>Es un área terrestre, acuática, marina, insular o continental, cualquiera sea su tamaño, en la que existen comunidades biológicas, especies nativas, hábitats y sitios de reproducción relevantes para la protección de determinadas especies y ecosistemas en condiciones predominantemente naturales que son relevantes para la educación, ciencia y turismo.</p> <p>El objetivo de esta categoría es la conservación de las comunidades biológicas, especies y hábitats, a través de una gestión activa para la recuperación, mantención y provisión de servicios ecosistémicos.</p>
Monumento Natural	<p>Regiones, objetos o especies vivas de animales o plantas de interés estético o valor histórico o científico, a los cuales se les da protección absoluta”, excepto para realizar investigaciones científicas debidamente autorizadas, o inspecciones gubernamentales.</p>

Santuario de la naturaleza	Son todos aquellos sitios terrestres o marinos que ofrezcan posibilidades especiales para estudios e investigaciones geológicas, paleontológicas, zoológicas, botánicas o de ecología, o que posean formaciones naturales, cuya conservación sea de interés para la ciencia o para el Estado.
----------------------------	---

Fuente: Ley N° 21600, 2023, de la página web <https://patrimonio.bienes.cl/categoria-del-patrimonio/patrimonio-natural/santuarios-de-la-naturaleza/> y de <https://www.conaf.cl/parques-nacionales/nuestros-parques/>

Anexo 7-A: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago.

Lagos	Años	Alk	Alum. Total	NH4+	As Total	HCO3	B	Cd	Ca	Ca dis.	Ca Total	Carbonato
Laguna Maldonado	2018-2023											
Laguna Alta	2018-2021											
Laguna Azul	2018-2021											
Cochrane	1992-2024											
Lago Castor	1999-2021	1		1					1			
Laguna Las Perdices	2018-2021											
Lago Negro	2018-2021											
Riesco	1992-2024	1	63	2	92	11	65	78	1	21	54	10
Rosselot	1992-2024		8		29		15	17			30	
Elizalde	1992-2021	1				1			1			
Espolón	1992-2022											
Huillinco	1997-2022	2		3		2			2			
Tagua Tagua	2022											
Tepuhueico	1997-2022	2	4			2			2			
Yelcho	1992-2022	1		2								
Verde	2021											
Cucao	1997-2020	2		4		2			2			
Gral. Carrera	1992-2024		61		88	11	62	77		22	51	8

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7-B: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago.

Lagos	Años	DOC	Clo. A	Cl	Co Total	Cu Total	Con. Esp.	Cr Hexavalente Total	Cr Total	CO2	DBO5	Dureza Total
Laguna Maldonado	2018-2023		8				6					
Laguna Alta	2018-2021		8				3					
Laguna Azul	2018-2021		7				8					
Cochrane	1992-2024		12				15					
Lago Castor	1999-2021		11	1			9			1	1	1
Laguna Las Perdices	2018-2021		8				5					
Lago Negro	2018-2021		6				6					
Riesco	1992-2024		19	74	72	95	105	40	39	1	2	1
Rosselot	1992-2024		8	25	12	31	39		23			
Elizalde	1992-2021		11	1			10			1	1	1
Espolón	1992-2022		3				4					
Huillinco	1997-2022	1	7	2			7					

Tagua Tagua	2022		3				3						
Tepuhueico	1997-2022	1	8	2			6						
Yelcho	1992-2022		15				6						
Verde	2021		1										
Cucao	1997-2020	1	3	2			3						
Gral. Carrera	1992-2024			67	71	90	91	27	37			1	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7-C: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago

Lagos	Años	DQO	Fe Total	P Total	(P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Li dis.	Mg	Mg dis.	Mg Total	Mn Total	Hg Total	Mo Total	N:P
Laguna Maldonado	2018-2023				1								
Laguna Alta	2018-2021			4	3								
Laguna Azul	2018-2021			2	2								
Cochrane	1992-2024			7	6								
Lago Castor	1999-2021	1		3	1		1						
Laguna Las Perdices	2018-2021			2	1								
Lago Negro	2018-2021												
Riesco	1992-2024	60	94	26	53	1	1	21	54	94	73	62	1
Rosselot	1992-2024	6	30	9	1				30	31	15	7	
Elizalde	1992-2021			4	2		1						
Espolón	1992-2022			3	3								
Huillinco	1997-2022			7	3		2						
Tagua Tagua	2022			3	3								
Tepuhueico	1997-2022	1		9	3		2						
Yelcho	1992-2022			15	3								
Verde	2021			1									
Cucao	1997-2020			4			2						
Gral. Carrera	1992-2024	54	89	10	46			21	51	90	71	63	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7-D: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago

Lagos	Años	NO <sub>3</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	N total	DIN	Ni Total	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	% Satur Ox	OD	pH	Ag Total	Pb Total
Laguna Maldonado	2018-2023		1	1						7	7	2		
Laguna Alta	2018-2021		1							9	9	5		
Laguna Azul	2018-2021			1						8	8	3		
Cochrane	1992-2024		4	6						13	14	9		
Lago Castor	1999-2021	1		1	1	1			1	8	10	5		
Laguna Las Perdices	2018-2021			1						6	6	3		

Lago Negro	2018-2021									7	7	1		
Riesco	1992-2024	3	49	11	3	4	1	74	4	50	100	104	78	75
Rosselot	1992-2024		2	3				17		38	38	33	17	17
Elizalde	1992-2021	1		1		1	1		1	9	9	4		
Espolón	1992-2022									3	3	3		
Huillinco	1997-2022		2		3	3			3	5	7	5		
Tagua Tagua	2022									3	3	3		
Tepuhueico	1997-2022													
		3			3	4			3	4	7	5		
Yelcho	1992-2022	2			3	3	1		5	3	7	6		
Verde	2021													
Cucao	1997-2020	3			4	4			4	1	4	3		
Gral. Carrera	1992-2024		45	7				72		31	83	88	76	73

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7-E: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago

Lagos	Años	K	K dis.	K Total	Prof Euf.	RAS	Se Dis.	Se Total	Si	Na	Na Dis.	Na Total	STD	STS
Laguna Maldonado	2018-2023				1				1					
Laguna Alta	2018-2021				1				4					
Laguna Azul	2018-2021								2					
Cochrane	1992-2024				2				6					
Lago Castor	1999-2021	1			1				2	1				1
Laguna Las Perdices	2018-2021								2					
Lago Negro	2018-2021				1									
Riesco	1992-2024	1	21	52	2	21	56	13	6	1	22	52	1	1
Rosselot	1992-2024			27	1		3	12	2			28		
Elizalde	1992-2021	1			2				2	1			1	1
Espolón	1992-2022								3					
Huillinco	1997-2022	2			2				5	2		2	1	
Tagua Tagua	2022													
Tepuhueico	1997-2022	2			2				3					
Yelcho	1992-2022								4	2			2	1
Verde	2021				1				5					
Cucao	1997-2020	2			1				1	2			2	1
Gral. Carrera	1992-2024		21	52		21	54	12			21	51		

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7-F: Tabla de Años con datos y cantidad de datos por variable por cada lago

Lagos	Años	SO <sub>4</sub>	T°	Temoc lina	T° max	T° min	T° Prom. anual	DS	Turbide z	Turbied ad	Yodom étrico	Zinc Total
Laguna Maldonado	2018-2023		7		1	1		8		1		

Laguna Alta	2018-2021		9		1	1		6				
Laguna Azul	2018-2021		8					6				
Cochrane	1992-2024		14		3	3		11	1	4		
Lago Castor	1999-2021	1	9		2	2	1	9	2			
Laguna Las Perdices	2018-2021		6		1	1		6				
Lago Negro	2018-2021		7		1	1		7				
Riesco	1992-2024	65	106		7	7	2	16	2		1	93
Rossetot	1992-2024	25	37		2	2		8				31
Elizalde	1992-2021	1	8		3	3	1	9	2			
Espolón	1992-2022		3		1	1		1		3		
Huillinco	1997-2022	2	3	2	4	4	3	3	3	3		
Tagua Tagua	2022		3							3		
Tepuhueico	1997-2022	2	3	1	4	4	2	3	4	2		
Yelcho	1992-2022		3	1	5	4	1	12		3		
Verde	2021				1	1		1	1			
Cucao	1997-2020	2			4	4	2	2	2			
Gral. Carrera	1992-2024	59	90		1			2				88

Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8: Cantidad de datos por variable.

Datos	Variable	Datos	Variable	Datos	Variable	Datos	Variable
6	Alcalinidad	99	Cromo Total	10	Nitrito	5	Sodio
136	Aluminio Total	3	(CO2)	13	NT	43	Sodio disuelto
5	Amonio	5	DBO5	3	(DIN)	131	Sodio Total
209	As Total	3	Dureza Total	163	Ni Total	4	(STD)
25	Bicarbonato	122	DQO	14	Ortofosfato	4	(STS)
142	Boro	213	Fierro Total	199	(% Saturación)	153	Sulfato
172	Cd Total	98	PT	311	Oxígeno Disuelto	313	Temperatura
5	Ca	128	P de Ortofosfato	274	pH	2	Termoclina
43	Ca disuelto	1	Litio disuelto	171	Plata Total	33	T° max
135	Ca Total	5	Mg	165	Plomo Total	31	T° min
18	Carbonato	42	Mg disuelto	5	K	7	T° Promedio anual
1	(DOC)	135	Mg Total	42	K disuelto	105	Transparencia
128	Clorofila A	215	Mn total	131	K Total	12	Turbidez
170	Cloruro	159	Mercurio Total	14	Prof. Eufótica	16	Turbiedad (Nefelométrica)

155	Co Total	132	Molibdeno Total	42	(RAS)	1	Yodométrico
216	Cu Total	1	N:P	113	Se disuelto	212	Zinc Total
316	Conductividad E.	10	Nitrato	37	Se Total		
67	Cr Hexavalente Total	102	N de Nitratos	42	Si		

Anexo 9: Percentil 75 del lago de referencia de todas las variables de calidad de agua, por tipología.

Variable	Unidad	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Alcalinidad	meq/l		18,72	
Aluminio Total	mg/L Al			0,4
Amonio	ug/l		12,5	
Arsénico Total	mg/l As			0,001
Bicarbonato	mg/l			32,3
Boro	mg/l B			1
Cadmio Total	mg/l Cd			0,01
Calcio	mg/l			
Calcio disuelto	mg/l Ca			9,31
Calcio Total	mg/l Ca			9,25
Carbonato	mg/l			0
Carbono orgánico disuelto (DOC)	mg/l			
Clorofila A	ug/l	0,41	0,57	
Cloruro	mg/L			2,15
Cobalto Total	mg/l			0,01
Cobre Total	mg/l Cu			0,01
Conductividad Especifica	uS/cm	184,1	39,07	71,47
Cromo Hexavalente Total	mg/l Cr			0,01
Cromo Total	mg/l Cr			0,03
Dióxido de carbono (CO2)	mg/L			
DBO5	mg/l O2			0,001
Dureza Total	meq/l			
DQO	mg/l O2			22
Fierro Total	mg/l Fe			0,08
Fosforo Total	ug/l	18	8	10,25
Fósforo de Ortofosfato	mg/l PO4	0,01	0,01	0,01
Litio disuelto	mg/l Li			
Magnesio	mg/l			
Magnesio disuelto	mg/l Mg			1,3
Magnesio Total	mg/l Mg			1,31
Manganeso total	mg/L			0,01
Mercurio Total	mg/l Hg			0,001
Molibdeno Total	mg/l Mo			0,05
N:P				
Nitrato	ug/l		15,47	
Nitrógeno de Nitratos	mg/l NO3	0,09		0,04
Nitrógeno de Nitritos	mg/L	0,05		0,05
Nitrito	ug/l		32,68	

Nitrógeno total	ug/l		36,15	
Nitrógeno inorgánico disuelto (DIN)	ug/l		18,3	
Níquel Total	mg/l Ni			0,03
Ortofosfato	ug/l		6,38	
Oxígeno Disuelto (% Saturación)	mg/l O <sub>2</sub>	101,9	10,12	96,8
Oxígeno Disuelto	mg/l O <sub>2</sub>	68,56	90,8	11,8
pH	unid. ph	8,2	7,09	7,87
Plata Total	mg/l Ag			0,01
Plomo Total	mg/l Pb			0,05
Potasio	mg/l			
Potasio disuelto	mg/l K			0,65
Potasio Total	mg/l K			0,77
Prof. Eufótica	m	46,75		
Razón de Absorción de Sodio (RAS)				0,21
Selenio disuelto	mg/l Se			0,001
Selenio Total	mg/l Se			0,001
Sílice	mg/l Si	2,27	2,02	
Sodio	mg/l			
Sodio disuelto	mg/l			2,35
Sodio Total	mg/l Na			2,93
Sólido total disuelto (STD)	mg/l			
Sólidos totales suspendido (STS)	mg/l			
Sulfato	mg/l			8
Temperatura	° C	11,53	14,79	12,25
Termoclina	m		40	
T° max	°C	12,25	19,34	12,4
T° min	°C	7,6	8,2	
T° Promedio anual	°C		11,88	
Transparencia o Disco secchi	metros	36	9,03	13,75
Turbidez	SiO <sub>2</sub> mg/l	1,8		
Turbiedad (Nefelométrica)	u. nefel.	0	0,63	
Yodométrico (Azida) - Titulación	mg/l O <sub>2</sub>			
Zinc Total	mg/l Zn			0,01

Fuente: Elaboración propia en base a la información fisicoquímica disponible.