



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

AÉREAS DE VIGILANCIA Y VALORES UMBRALES DE PARÁMETROS PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEL LAGO LANALHUE

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

YERKO ELIOT MOSCOSO LAZO

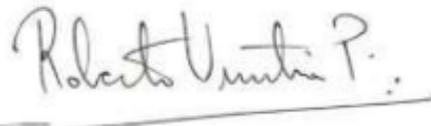
Profesor Guía: Roberto Urrutia Pérez

Concepción, Chile

2021

“ÁREAS DE VIGILANCIA Y VALORES UMBRALES DE PARÁMETROS PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEL LAGO LANALHUE”.

PROFESOR GUÍA: DR. ROBERTO URRUTIA PÉREZ



PROFESOR CO- GUÍA: DR. MAURICIO AGUAYO ARIAS



PROFESOR COMISIÓN: DR. PEDRO ARRIAGADA SANHUEZA



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, junio 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi Madre, hogar y ejemplo, por ser un apoyo fundamental durante mi vida, por ser sinónimo de profesionalismo, disciplina, por saber entregar su amor de manera incondicional y con la calidez que solo una madre puede hacer sentir. Fuiste quien me impulso a no decaer, quien me apoyo en los momentos oscuros y me permitió atravesar las sombras sin temor, con la convicción de ser capaz de superar las adversidades que me distrajeran durante el viaje.

Agradezco también a mi Padre, guía y consejero, por compartir su sabiduría cuando lo vio oportuno, por no permitirme flaquear, por enseñarme de rectitud y por motivarme a entregar de lleno lo que soy al cumplimiento de mis objetivos. Fuiste el faro en la tormenta, la prueba empírica de que no es necesario ceder principios y valores para avanzar, que la justicia no es negociable y llega más temprano que tarde.

A mis hermanos, pioneros, rompehielos, por su esfuerzo, por plantearse grandes desafíos y cumplirlos, por demostrar que las dificultades solo son pasos en el largo camino al éxito, por su generosidad y por saber compartir el protagonismo cuando la situación lo ameritó.

Agradezco a mis amigos, compañeros, versiones alternas, por ser un espejo de mis virtudes y defectos, por hacer de este viaje un agrado, por reír, por llorar, por sufrir y disfrutar, por su optimismo, por su paciencia y por valorar quien soy.

Agradezco a mis profesores, fuentes de conocimiento, al Dr. Roberto Urrutia, por darme la libertad de buscar en mi la solución a los problemas que me presento este desafío, por permitirme cometer errores y darme la seguridad de que podría rectificar el rumbo para llegar orgullosa y satisfactoriamente a la meta. Al Dr. Mauricio Aguayo, por estar siempre dispuesto y tener una voluntad inquebrantable de aportar y al Dr. Pedro Arriagada, por no tolerar la mediocridad, por su rigurosidad e impulsarme a buscar la excelencia, la precisión y la satisfacción de un trabajo bien hecho.

Agradezco el mal ejemplo, a las dificultades, los obstáculos, las puertas cerradas, a los desleales y traidores, por ser referencia del camino que no he de tomar, por contrastar con la grandeza, haciéndola más evidente, y al conocimiento como centro de mi templo.

Finalmente agradezco a Makarena Lagos, mi felicidad y motivación. No hay palabras que puedan describir lo mucho que haces por mí, agradezco tu apoyo constante, las alegrías diarias, que me enseñes tiernamente a vivir, agradezco tu paciencia, tu calidez, tus valores, tu generosidad y que me motives a ser mi mejor versión.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE GRAFICOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	x
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Cuenca Hidrográfica.....	1
1.2. Servicios Ecosistémicos	2
1.3. Lagos.....	3
1.4. Estado Tráfico	7
1.5. Calidad de Agua	9
1.6. Experiencias Internacionales	10
1.6.1. Lago Washington.....	11
1.6.2. Lago Long.....	12
1.6.3. Lago Onondaga	12
1.6.4. Reserva Wahnbach	13
1.7. Lagos Nahuelbutanos	15
1.8. Problemática del Lago Lanalhue	16
2. HIPOTESIS	20
3. OBJETIVOS	20
3.1. Objetivo General	20
3.2. Objetivos Específicos	20
4. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	21
4.1. Cuenca del Lago Lanalhue	21
4.2. Usos de suelo.....	24

4.3.	Aves acuáticas en el Lago Lanalhue	26
4.4.	Egeria densa en el Lago Lanalhue.....	27
5.	METODOLOGÍA	29
5.1.	Objetivo I: Caracterizar Morfométricamente la Cuenca del Lago Lanalhue y evaluar el estado trófico actual del Lago.....	29
5.1.1.	Delimitación de la cuenca hidrográfica a través de SIG:.....	30
5.1.2.	Parámetros morfométricos	30
5.1.3.	Estado trófico del Lago	33
5.2.	Objetivo II: Delimitar Áreas de Vigilancia para la gestión de la calidad de agua del lago Lanalhue.....	36
5.2.1.	Análisis Multivariado.....	36
5.2.2.	Criterios de selección de áreas de vigilancia.	37
5.3.	Objetivo III: Determinar los Valores Umbrales de los parámetros más relevantes a normar.....	40
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
6.1.	Parámetros Morfométricos de la Cuenca del Lago Lanalhue	41
6.1.1.	Parámetros Morfométricos Generales	41
6.1.2.	Parámetros Morfométricos asociados a la forma de la cuenca.....	42
6.1.3.	Parámetros Morfométricos Asociados a la forma del relieve.....	43
6.1.4.	Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes.....	43
6.1.5.	Curva Hipsométrica	44
6.1.6.	Parámetros morfométricos del lago Lanalhue	45
6.2.	Estado actual del lago Lanalhue.....	46
6.2.1.	Estado actual del lago basado en el Índice del Estado Trófico (TSI)	48
6.2.2.	Estado Actual del lago de acuerdo los valores propuestos por la OCDE (1982)	49
6.2.3.	Clasificación trófica de Lagos según Smith et al.	52
6.2.4.	Otras Normativas	55
6.3.	Áreas de Vigilancia	58

6.3.1.	Resultado del análisis multivariante	58
6.3.2.	Delimitación de las áreas de vigilancia.....	59
6.4.	Valores umbrales de los parámetros más importantes a normar	62
6.4.1.	Escenario 1: Optimo Ambiental	62
6.4.2.	Escenario 2: Intermedio	63
6.4.3.	Escenario 3: Menor protección en áreas contaminadas	64
6.4.4.	Otros parámetros.....	65
7.	CONCLUSIÓN	66
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Comparación de las mediciones de Transparencia (Disco Secci) en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la OCDE en 1981.....	50
Gráfico 2. Comparación de las mediciones de Clorofila a en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la OCDE en 1981.	50
Gráfico 3. Comparación de las mediciones de Fosforo Total en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la OCDE en 1981.....	51
Gráfico 4. Comparación de las mediciones de Transparencia (Disco Secci) en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999	53
Gráfico 5. Comparación de las mediciones de Clorofila a en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999.....	53
Gráfico 6. Comparación de las mediciones de Fosforo Total en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999.	54
Gráfico 7. Comparación de las mediciones de Nitrógeno Total en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999	54
Gráfico 8. Análisis Multivariante de datos de calidad de agua y estaciones de monitoreo en el lago Lanalhue.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la zona litoral y limnética.....	4
Figura 2. Tipos de lagos.....	6
Figura 3. Comparación entre las mediciones predichas y observadas de fosforo total, clorofila y transparencia para lagos descritos en “The lake and reservoir Restoration Guidance Manual”.....	14
Figura 4. Ubicación geográfica del lago Lanalhue y su cuenca	21
Figura 5. Mapa batimétrico del lago Lanalhue	22
Figura 6. Mapa de usos de suelo en la cuenca del lago Lanalhue.	25
Figura 7. Tipos de humedales y sitios de reproducción de diferentes especies...	27
Figura 8. Ciclo de vida de Egeria densa	28
Figura 9. Polígonos de corte y zonas de exclusión por ser sitios de importancia para la biodiversidad.	29
Figura 10. Curva Hipsométrica	45
Figura 11. Estaciones de monitoreo en el Lago Lanalhue.	47
Figura 12. Áreas de vigilancia propuestas para el Lago Lanalhue.....	60
Figura 13. Áreas de Vigilancia propuestas para el Lago Lanalhue.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.	34
Tabla 2. Fórmulas para estimar el estado trófico aplicando los indicadores de eutrofia.	34
Tabla 3. Valores límites de propuestos por la OCDE (1982) para un sistema completo de clasificación trófica.	36
Tabla 4. Parámetros Morfométricos Generales.	42
Tabla 5. Parámetros Morfométricos asociados a la forma de la cuenca.	42
Tabla 6. Parámetros Morfométricos Asociados a la forma del relieve.	43
Tabla 7. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes.	44
Tabla 8. Parámetros Morfométricos del Lago Lanalhue.	46
Tabla 9. Resultado de la aplicación de las fórmulas propuestas por Carlson (1977,1980).	48
Tabla 10. Resultado de la aplicación de las formulas propuestas por Aizaki et al (1981)	49
Tabla 11. Resultado del análisis de valores de concentración de Fosforo Total (PT), clorofila a (Chla) y Disco Secchi (Ds) para el lago Lanalhue, en función de los valores propuestos por la OCDE para los mismos parámetros.	52
Tabla 12. Estado de cumplimiento de la NCh 1333 para contacto directo en el Lago Lanalhue.	57
Tabla 13. Estado de cumplimiento de la NCh 1333 para la protección de la vida acuática en el Lago Lanalhue.	57
Tabla 14. Valores de Parámetros del estado trófico para cada área de vigilancia y su estado en función de los valores propuestos por la OCDE.	62
Tabla 15. Valores de parámetros propuestos para las áreas de vigilancia del lago Lanalhue de acuerdo al escenario optimo Ambiental.	63
Tabla 16. Valores de parámetros propuestos para las áreas de vigilancia del lago Lanalhue de acuerdo al escenario Intermedio.	64
Tabla 17. Valores de parámetros propuestos para las áreas de vigilancia del lago Lanalhue de acuerdo al escenario de menor protección.	65

Tabla 18. Valores propuestos para otros parámetros.	65
---	----

RESUMEN

Uno de los desafíos más frecuentes en lo que respecta a la gestión de recursos hídricos, es evitar el deterioro de la calidad del agua producido por las actividades antrópicas desarrolladas en las diferentes cuencas de nuestro territorio, los lagos son especialmente sensibles a las perturbaciones en su cuenca de drenaje, existiendo una relación entre sus parámetros morfométricos, los usos de suelo de la cuenca y la calidad del agua presente en cuerpo de agua. En ese sentido es muy importante estudiar las cuencas y priorizar en aquellas que se encuentren sometidas a una mayor presión antrópica o un deterioro evidente de las características que sustentan la biodiversidad, la elaboración de normas de calidad que tengan como objetivo la preservación o recuperación de estas características según corresponda.

El lago Lanalhue es un ejemplo claro de un cuerpo de agua donde las expectativas que se tienen de él, se están viendo superadas por la propia intervención de las comunidades sobre su cuenca de drenaje, es por esto que los vecinos se han organizado para alertar de la necesidad de tomar medidas antes de que el lago y su cuenca sean deteriorados de forma tal, que impidan una remediación oportuna y la pérdida de servicios ecosistémicos y biodiversidad sean o muy costosas o muy difíciles de realizar.

La presente investigación se desarrolló en virtud de identificar los problemas más comunes asociados a cuerpos lacustres, identificar la problemática específica del lago Lanalhue y elaborar medidas que se orienten en los objetivos que tiene la comunidad para el lago. Se utilizaron datos geospaciales y de calidad de agua, estableciéndose áreas de vigilancia y valores umbrales de parámetros para la protección de las aguas del lago y la biodiversidad de su cuenca de drenaje.

1. ANTECEDENTES

1.1. Cuenca Hidrográfica

La cuenca, sea en forma independiente o interconectada con otras, es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos, en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente “El Desarrollo en la Perspectiva del Siglo XXI” (Dublín, Irlanda, 26 al 31 de enero de 1992), se recalcó que la “gestión eficaz establece una relación entre el uso del suelo y el aprovechamiento del agua en la totalidad de una cuenca hidrológica o un acuífero” y que la “entidad geográfica más apropiada para la planificación y gestión de los recursos hídricos es la cuenca fluvial”, más tarde, en la Conferencia Internacional sobre el Agua Dulce “El Agua: Una de las Claves del Desarrollo Sostenible” (Bonn, Alemania, 3 al 7 de diciembre de 2001), se señaló que la “clave de la armonía a largo plazo con la naturaleza y con nuestros semejantes reside en arreglos de cooperación a nivel de cuenca hidrográfica” y que “las cuencas hidrográficas son el marco de referencia indicado para la gestión de los recursos hídricos” y se destacó que las “cuencas hidrográficas, las cuencas fluviales, los lagos y los acuíferos deben ser el marco de referencia primario para la gestión de los recursos hídricos” y que es “preciso crear mecanismos institucionales y participativos a este nivel”. Cabe agregar que la Unión Europea, en su Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 23 de octubre de 2000, “Por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas”, reconoce la cuenca como uno de los elementos fundamentales de su política de aguas. (Dourojeanni R. et al., 2002).

La cuenca hidrográfica representa el ámbito físico-natural que asociado al agua, tiene relevancia determinante en la conformación del ambiente y principalmente de todo desarrollo viviente. De todos los componentes de la naturaleza, vitales para la supervivencia humana, el agua ocupa un lugar privilegiado en la punta de la pirámide ambiental. En ese sentido la cuenca hidrográfica es funcional al resto del

territorio como la “fábrica natural” del elemento vital de la naturaleza, la sociedad y la economía, dado el especial rol que desempeñan las cuencas dentro del ciclo hidrológico de capturar y concentrar la oferta del agua precipitada. (Dourojeanni R. et al., 2002). En términos más técnicos se puede decir que una cuenca hidrográfica es el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red natural con una o varias corrientes superficiales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas o en un pantano o directamente en el mar. La cuenca hidrográfica de un lago incluye el área del lago y todo territorio que drena a este mismo. (Ministerio de Medio Ambiente, 2018).

1.2. Servicios Ecosistémicos

Los servicios Ecosistémicos son los procesos, elementos y condiciones generados por los ecosistemas naturales y las especies que los conforman que mantienen la vida humana. (Daily, 1997). Al conjunto de estos elementos que producen los bienes y servicios que entrega la naturaleza se les llama el capital natural. El bienestar humano depende de los ecosistemas y de los bienes y servicios que entrega, de los cuales más del 60% están siendo degradados y transformados. (MA, 2005).

De esta forma, el ser humano se encuentra en una posición donde se ve en la necesidad urgente de utilizar los recursos, bienes y servicios que le entrega la naturaleza de forma sostenible, conservando las funciones y procesos básicos de los ecosistemas que le permiten primero sobrevivir y luego, vivir bien.

Estos servicios dependen de funciones propias de los ecosistemas, los cuales a su vez dependen de las estructuras y procesos biofísicos que ocurren en los ambientes naturales. Una vez producidos los servicios ecosistémicos, éstos se traducen en un beneficio para el ser humano el cual, a su vez, les entrega un determinado valor dependiendo de la importancia o magnitud del beneficio recibido. (Mellado, 2019).

Una de las funciones del Ministerio de Medio Ambiente es el diseño e implementación de programas, acciones o estudios para favorecer la conservación

y recuperación de los recursos hídricos, la flora, fauna, hábitats, paisajes y ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos, en particular los frágiles y degradados. Por otra parte, se encarga de coordinar el diseño, evaluación y el establecimiento de Normas Secundarias de Calidad Ambiental y Normas de Emisión para la protección de las aguas continentales superficiales y marinas del país, contribuyendo al cumplimiento de los convenios internacionales de conservación de la biodiversidad.

Para el caso del lago Lanalhue se han realizado estudios socio-ambientales en los que mediante entrevistas se les ha pedido a los pobladores aledaños a las lagunas costeras del cono sur (correspondiente al área Oeste del Lago Lanalhue), valorizar los servicios ecosistémicos que éstas les brindan. Los resultados mostraron que uno de los servicios más valorados es el de poder realizar en estas, actividades recreativas, en segundo lugar la obtención de agua dulce, luego, el desarrollo de la agricultura y ganadería y muy posteriormente, la espiritualidad asociada a la influencia del pueblo Lafquenche en el área, es posible que la valoración de estos servicios cambie para el caso específico del lago Lanalhue; pero sirven de referencia para entender la visión que se tiene de los cuerpos de agua en el área de estudio. (PRELA, 2021).

1.3. Lagos

Los lagos se originan principalmente por la obstrucción del drenaje superficial debido particularmente a procesos morfogenéticos, conformando una estructura temporal, en la historia erosional de los sistemas geográficos. (Bellair & Pomero, 1977). Ellos reciben aportes sólidos y líquidos de su cuenca de drenaje, mediante escurrimiento lineal, laminar y subterráneo, razón por la cual las características de la calidad del agua y de las comunidades biológicas allí presentes, reflejan los efectos acumulados de todos los aportes de agua y materiales procedentes del entorno. Diversos autores destacan la estrecha relación existente entre el estado trófico de un sistema limnético y las condiciones geográficas y particularmente geomorfológicas del lago y de su cuenca de drenaje. (Ryding & Rast, 1992).

Aspectos tales como la extensión, la profundidad de un lago y el aporte de material particulado, son relevantes en la determinación del ciclo de vida del sistema limnético; éstos se relacionan estrechamente con los procesos morfogenéticos de la cuenca lacustre. (Parra, 2003)(Urrutia et al., 2000).

En los lagos existen diferentes tipos de hábitats, las zonas litorales de un lago son más sensibles a los procesos de eutrofización, por ser zonas más someras (de baja profundidad) y por consecuencia afectarles más rápido y con mayor intensidad los aumentos de la temperatura ambiente e intensidad lumínica. En la zona limnética, junto con el estado trófico, se debe poner el foco en la prevención de anoxia en el fondo del lago, la que ocurre normalmente por la degradación de materia orgánica con formación de parámetros tales como ácido sulfhídrico y metano en el mismo proceso. (Farnsworth-Lee & Baker, 2000).

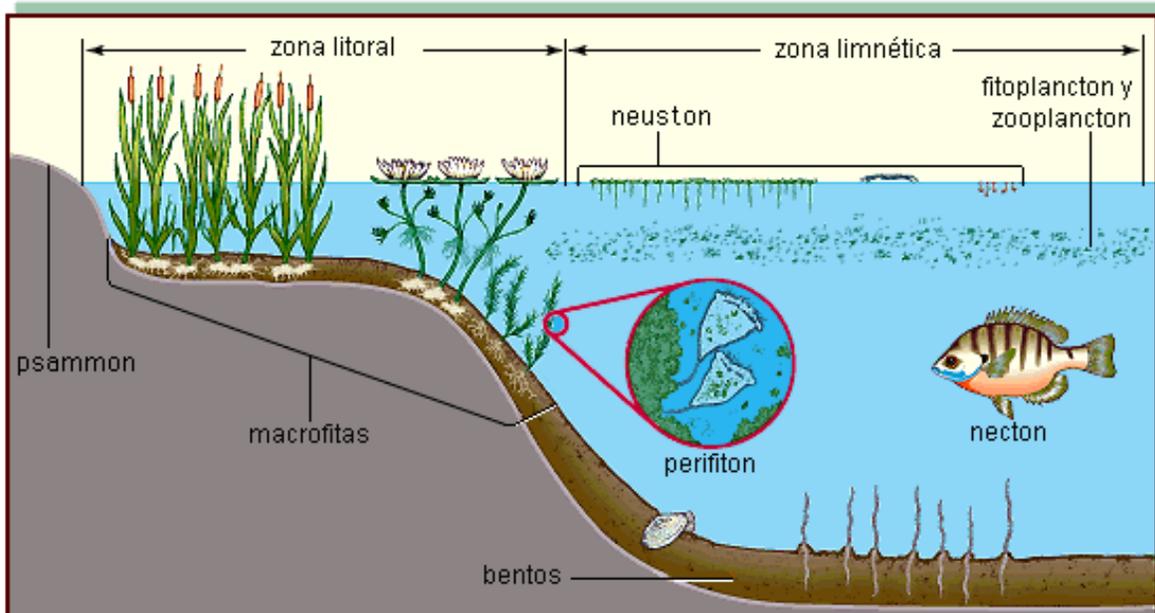


Figura 1. Esquema de la zona litoral y limnética.

Fuente:(Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

En la figura 1 podemos observar las diferencias generales entre las características de la zona litoral y limnética de un cuerpo lacustre, como lo son, por ejemplo, la

existencia de macrófitas enraizadas en la zona litoral por ser zonas menos profundas, lo que permite a las algas realizar la fotosíntesis en condiciones donde el agua, por sus características, permita el paso de la luz, las zonas más profundas favorecen el desarrollo de peces y otros organismos que se benefician de la protección que le brindan las zonas más profundas. (Nebel & Wright, 1999) (Margalef, 1981).

Los ecosistemas acuáticos continentales interactúan con el sistema terrestre de diferentes maneras, así, la mantención de los procesos ecológicos es muy dependiente de esta relación. (Tundisi et al., 1997). Las relaciones entre superficie terrestre, la hidrología de pendientes, la superficie del cuerpo de agua y el desarrollo de la línea de costa, entre otras, son fundamentales para entender la magnitud y carácter de las entradas de material alóctono a los lagos y en la formación de los patrones estacionales de estratificación física, química y biológica. También es relevante tener presente la acción humana en una escala temporal apropiada, esta puede incidir fuertemente en el establecimiento de nuevos patrones geomorfológicos y también en las interacciones entre los sistemas terrestres y acuáticos. (Parra, 2003).

Otro criterio a tener en cuenta es que en lagos se distinguen diferentes tipos de estratificación y de patrones de mezcla de sus aguas. La estratificación de un lago tiene lugar debido a diferencias en temperaturas o salinidad entre la superficie y el fondo del mismo. Existen diferentes casos de estratificación térmica y sus categorías en cuanto a la mezcla de sus aguas: amícticos, monolíticos, oligomícticos, polimícticos y templados dimícticos.

El aumento de los nutrientes produce eutrofización que puede producir una disminución de oxígeno en el hipolimnion (zona más profunda del lago) hasta el extremo de anoxia y muerte de peces e invertebrados. (Brdjanovic, 1997). Estos fenómenos junto con la mezcla del lago pueden provocar resuspensión de otros compuestos como pesticidas, metales pesados y gases tóxicos presentes en el sedimento, provocando importantes pérdidas de biodiversidad y efectos sobre la salud de las personas. (Collier, 2014) (Hellawell, 1989).

La Figura 2 muestra diferentes casos de estratificación térmica y sus categorías en cuanto a la mezcla de sus aguas amícticos, monomícticos, oligomícticos, polimícticos y templados dimícticos, para los periodos de invierno, otoño primavera y verano.

En los lagos del sur de Chile, conocidos como Nord-Patagónicos o Araucanos, caracterizados por presentar grandes áreas y profundidades (ejemplos, lagos Llanquihue y Villarrica), la estratificación térmica es de tipo monomíctico cálido con estratificación durante el verano y mezcla completa durante el invierno por otra parte, En sistemas más someros, como las lagunas del altiplano chileno, la poca profundidad del ecosistema genera una mezcla permanente y una rápida dispersión de potenciales contaminantes como metales pesados. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

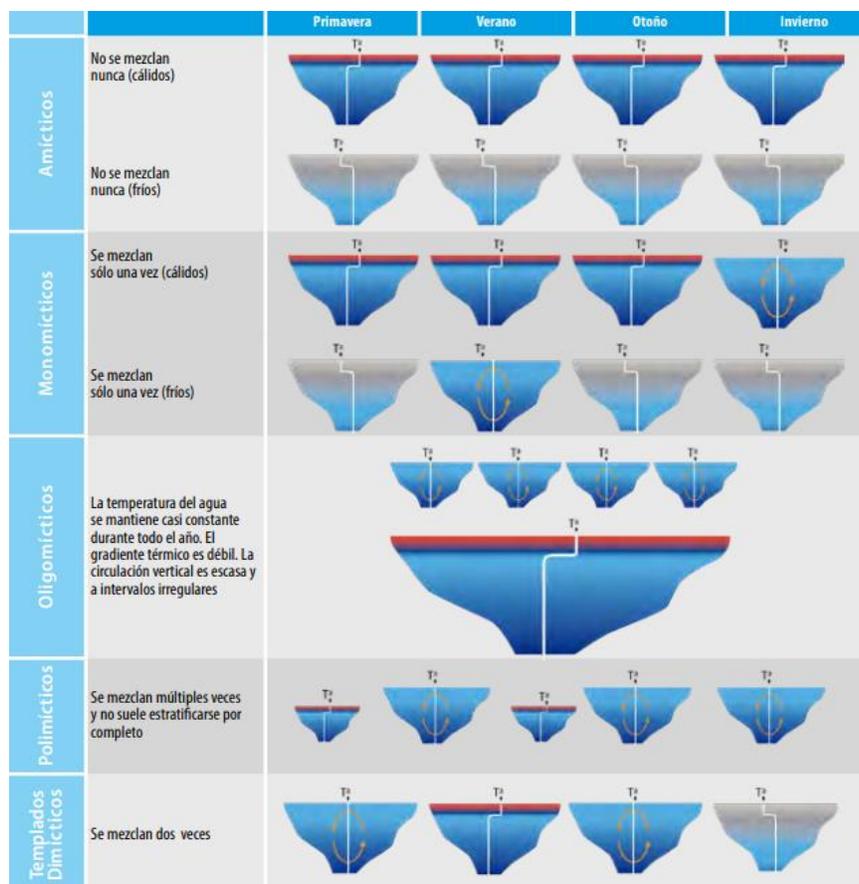


Figura 2. Tipos de lagos.

Fuente:(Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

1.4. Estado Trófico

Una forma de evaluar el estado actual de un cuerpo de agua es a través de su estado trófico, son características claves de los ecosistemas para poder entender, cuantificar e investigar sus variaciones de nutrientes y clorofila en el tiempo, asociadas a procesos naturales o actividades antrópicas.

El vocablo eutrofización inicialmente se utilizó para diferenciar los lagos eutróficos de los oligotróficos y tenía sentido regional o geográfico. Eran oligotróficos, por ejemplo, muchos lagos suecos y eutróficos los de la llanura norte de Alemania. Y en cuanto a su estudio para conocer el transcurso del “envejecimiento” de los lagos inducido por procesos autóctonos aun sin considerar la intervención del hombre.

La contaminación acelera el envejecimiento natural y acorta considerablemente la vida del receptor acuático. Sin embargo, este término se utilizó posteriormente para definir el fenómeno provocado por los vertidos de los desechos de actividades humanas, llamándolo Proceso de eutrofización cultural o simplemente eutrofización; inicialmente se definió como “el abastecimiento excesivo de los nutrientes nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua, con el frecuente crecimiento acelerado de microalgas, que puede producir la muerte de peces al despojarlos del oxígeno que necesitan para vivir” (USEPA, 1997).

La eutrofización como proceso de origen antrópico va deteriorando su calidad, añadiendo mayores cantidades de nutrientes que son elementos esenciales para el crecimiento de organismos, principalmente nitrógeno, fósforo y materia orgánica; lo cual enriquece en nutrientes a los sistemas acuáticos; pero limita el oxígeno. Este proceso se produce naturalmente en todo lago cuya afluencia de elementos nutritivos sea superior a la salida de los mismos. (Franco & Manzano, 2010).

El término eutrófico, se utiliza para distinguir aquellos lagos en los cuales el nivel nutritivo es particularmente alto y que se caracterizan por el estancamiento de sus aguas además de abundante vegetación litoral, siendo una situación irreversible por los nutrientes acumulados. Margalef (1981) lo denomina como “lago humanizado”. “Eutrofo” se llama a un ecosistema caracterizado por una abundancia

anormalmente alta de nutrientes. Se dice que dicho ambiente se encuentra forzado, bajo tensión o sometido a stress. (Chalar, 2007).

Cuando el agua de una masa oligotrófica se enriquece de nutrientes, se inician muchos cambios. Primero, este enriquecimiento favorece el crecimiento y la multiplicación del plancton, lo que aumenta la turbidez del agua. Con la desaparición de la vegetación acuática sumergida, es evidente que se pierden alimentos, hábitats y el oxígeno disuelto de la fotosíntesis. Pero la pérdida de oxígeno disuelto se agrava aún más por la presencia de organismos fotosintéticos en el fitoplancton que también producen oxígeno, como todas las plantas verdes. Al estar en la superficie, el oxígeno producido por estos microorganismos satura el gas y el exceso se escapa a la atmósfera, en un día tranquilo y soleado, se pueden apreciar las burbujas de oxígeno que después de quedar atrapadas en las algas filamentosas, son liberadas a la superficie. De esta manera, la fotosíntesis del fitoplancton no abastece de oxígeno a las aguas más profundas, excepto durante ciertos momentos en la primavera y otoño. Además, el fitoplancton tiene índices de crecimiento y reproducción muy elevados. En condiciones óptimas, su masa puede duplicarse en un día. Así, el fitoplancton alcanza su máxima densidad poblacional y este crecimiento alcanza su estado estable para finalmente entrar en decaimiento siguiendo el comportamiento logístico. El fitoplancton muerto se asienta y produce en el fondo depósitos espesos de detritos. (Nebel y Wright, 1999). A su vez, la profusión de detritos genera una abundancia de descomponedores, la mayoría bacterias, cuyo crecimiento explosivo crea una demanda nueva de oxígeno disuelto, que se consume en la respiración. El resultado es el agotamiento del recurso con la consiguiente sofocación de peces y crustáceos. Sin embargo, las bacterias aerobias estrictas prosperan y aprovechan el oxígeno cada vez que está disponible, por lo que mantienen al agua sin oxígeno disuelto, en tanto que haya detritos que las alimenten. Mientras que las bacterias anaerobias aparecen en el fondo produciendo gases como el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno. Además, hay alguna oxidación de materia orgánica y de otros compuestos, lo que demanda más oxígeno disuelto. (Franco & Manzano, 2010).

El beneficio de estudiar el flujo los nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, a los cuerpos de agua, fue motivado por la evidente degradación de los ecosistemas acuáticos, por la excesiva acumulación de éstos. Asimismo, el estudio de la eutrofización como un proceso en ríos y lagos desde una perspectiva ecológica y geoquímica data de la década de los 60's. (Franco & Manzano, 2010).

1.5. Calidad de Agua

Se puede definir como la medida de la idoneidad del agua para alguna función particular, basada en características físicas, químicas y biológicas. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

El impacto de las actividades antrópicas en los ecosistemas acuáticos ha originado problemas de control de calidad de agua, en parte por el crecimiento de la población y la expansión y desarrollo urbano, además de las áreas rurales que también contribuyen al incremento de los problemas de calidad, por el uso de fertilizantes en la agricultura que provocan un exceso de nutrientes lo que incide directamente en la capacidad de muchos ecosistemas para albergar biodiversidad. (FAO, 1997; FAO, 2002), llegando incluso a significar un problema en el suministro de agua potable que la mayor parte del tiempo dependen de sus acuíferos locales para abastecerse de este recurso.

En términos administrativos y para facilitar su control y monitoreo, la calidad de agua está regulada por normas, decretos y otras formas legales que establecen criterios y valores de concentración para un listado de compuestos y parámetros de interés tanto para los ecosistemas, como para la salud de la población.

Parte de estas normas y decretos son, por ejemplo:

- El "**Código de Aguas**" de 1981 reformado el 2005 y 2010 correspondiente al "Libro Primero de las Aguas y del Derecho de Aprovechamiento".
- La **Norma Chilena 409**: Correspondiente a la "Norma de Calidad del Agua Potable".

- La **Norma Chilena 1333**: Correspondiente a los “Requisitos de Calidad de Agua para diferentes usos”.
- El **Decreto Supremo 609** del Ministerio de Obras Públicas: Que establece la “Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado”.
- El **Decreto Supremo 735** del Ministerio de Salud Pública: Que establece el “Reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano”.
- El **Decreto Supremo 90** del Ministerio Secretaría General de la Presidencia: que establece la “Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales”.

También existen normas de calidad enfocadas especialmente en la protección, preservación y conservación de los ecosistemas y la biodiversidad, como lo son las normas secundarias de calidad ambiental, estas son aquellas que establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos, permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza.

Para lagos específicamente, en Chile están, por ejemplo:

- El **Decreto Supremo 19** del Ministerio del Medio Ambiente: Que “Establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales del lago Villarrica”.
- El **Decreto Supremo 122** del Ministerio Secretaría General de la Presidencia: Que “Establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas del lago Llanquihue”.

-

1.6. Experiencias Internacionales

Al hacer una revisión de las experiencias internacionales de restauración del estado trófico en ecosistemas lacustres, podemos notar que es común el uso de modelos,

estos permiten realizar diagnósticos del estado actual del lago y predecir su comportamiento una vez tomadas las medidas y decididos los esfuerzos de restauración. Los modelos proporcionan un campo de referencia para interpretar la información monitoreada del lago y la cuenca y nos permite saber que esperar de un lago a raíz de su información morfométrica, datos hidrológicos y otras características de la cuenca.

Las diferencias entre las mediciones y las condiciones predichas contienen información acerca de las características únicas de la cuenca de estudio, lo que ayuda a clarificar importantes relaciones de causa y efecto. Por otro lado, los modelos predictivos permiten prever que sucederá en un lago si se realizan ciertas acciones como cambios en los aportes de nutrientes u otros factores de control.

Algunas de las preguntas que se pueden responder mediante la aplicación de modelos son:

- ¿Cómo era el lago antes de que se interviniera?
- ¿Cuál es la descarga máxima de nutrientes para no tener problema de algas?
- ¿Cómo futuros planes de manejo en la cuenca pueden afectar la calidad del agua?
- ¿Cuánto tiempo tomará la calidad del agua para mejorar una vez que se establezca el control de cuencas hidrográficas o fuentes puntuales?
- ¿Cuáles son las fuentes más importantes de problemas en el lago?

En la segunda edición de “The lake and reservoir Restoration Guidance Manual” se describen algunas experiencias internacionales en materia de restauración de ecosistemas lacustres y reservas de agua, algunas de estas se resumen a continuación:

1.6.1. Lago Washington

En 1957 comenzaron a aumentar los niveles tróficos en el lago producto de la descarga de aguas residuales provenientes desde Seattle, en 1963, estas aguas fueron desviadas fuera de la cuenca del lago, en 1968 el fósforo total se había

reducido en un 69%, las condiciones observadas y predichas concordaban en 1978, reflejando mejoras sustanciales en la calidad de agua los años posteriores al desvío de las aguas residuales y La disminución de la clorofila y aumento en la transparencia fueron aún mayores que las predichas por los modelos.

El Lago Washington es uno de los más satisfactorios y documentados casos de proyecto de restauración de un lago hasta la fecha.

1.6.2. Lago Long

Afloramientos de algas provocaron que en 1978 comenzara a realizarse un tratamiento terciario para las aguas residuales vertidas al lago, lo que redujo en un 74% el promedio de fósforo estacional descargado en el este.

Producto del corto tiempo de residencia que presenta el embalse, las concentraciones de entrada y reserva de fósforo son similares y la sedimentación relativamente baja, por lo que, la concentración de las reservas de fósforos responden aproximadamente en proporción a las descargas.

Sin embargo, la concentración media de clorofila se redujo un 45% y es aparentemente menos sensible a la reducción de la descarga de fósforo que lo predicho por los modelos.

Se concluye entonces que los modelos en lagos del norte tienden a sobreestimar la sensibilidad de la clorofila al fósforo en algunos embalses por los efectos del florecimiento de algas y la luz.

1.6.3. Lago Onondaga

El lago recibía tratamiento primario de aguas residuales muchos años antes de 1970, entre ese año y 1985 las descargas de fósforo fueron reducidas en un 93% como resultado de una prohibición de su uso en detergentes, combinado con la reparación de alcantarillado y tratamiento terciario para la remoción de fósforo.

Los niveles de fósforo respondieron proporcionalmente y en concordancia con la predicción de los modelos. Sin embargo, no lograron mejoras significativas en las concentraciones de Clorofila a y transparencia, la falta de respuesta en las algas reflejaba el hecho de que los niveles pre y post restauración de fósforo eran demasiado altos. El fósforo usualmente no limita el crecimiento de algas en esos rangos de concentración, especialmente en lagos profundos.

A pesar de la disminución sustancial de las descargas de fósforo a partir de 1985, Onondaga aún se mantiene en condiciones de hipertrofia. El caso del Lago Onondaga ilustra el hecho que algunos lagos sujetos a descargas puntuales de fósforo pueden ser susceptibles a molestos afloramientos algares aun cuando se utiliza tratamiento terciario para eliminar el fósforo.

A pesar de que clorofila y transparencia no respondieron, la desaparición de afloramientos severos de algas verdes y azules seguida a la reducción de las descargas es una mejora importante de la calidad del agua.

Las razones por las que el lago Onondaga no respondió como el Lago Washington, son principalmente, que el lago Onondaga comenzó su proceso de restauración estando en mucho peor estado y tiene mayor tiempo de residencia hidráulica, lo que mejora las oportunidades para la sedimentación del fósforo.

1.6.4. Reserva Wahnbach

La reserva Wahnbach surte de agua a Bonn, en Alemania. Hasta 1977 fue objeto de descargas de fósforo por la escorrentía agrícola y fuentes puntuales municipales, teniendo como resultado severos afloramientos de algas verde-azules en la reserva, causando graves problemas en el suministro de agua.

Por varias razones las descargas hacia la cuenca son incontrolables, por lo que para resolver el problema se construyó un embalse y una planta de tratamiento en la zona de mayor aporte de fósforo.

Esta planta de tratamiento fue diseñada para remover más del 95% del fósforo descargado. Tras la puesta en marcha, se redujo la concentración de fósforo hasta cerca de un 71% lo que significó una mejora desde el estado eutrófico a oligotrófico durante los años 1978 y 1979.

La relativamente extrema y costosa restauración se justificó por los severos impactos de la eutrofización en el agua para beber y el costo que tenía el tratamiento del agua.

En la figura 3 se muestran la comparación entre las mediciones observadas y predichas para los lagos descritos en “The lake and reservoir Restoration Guidance Manual”.

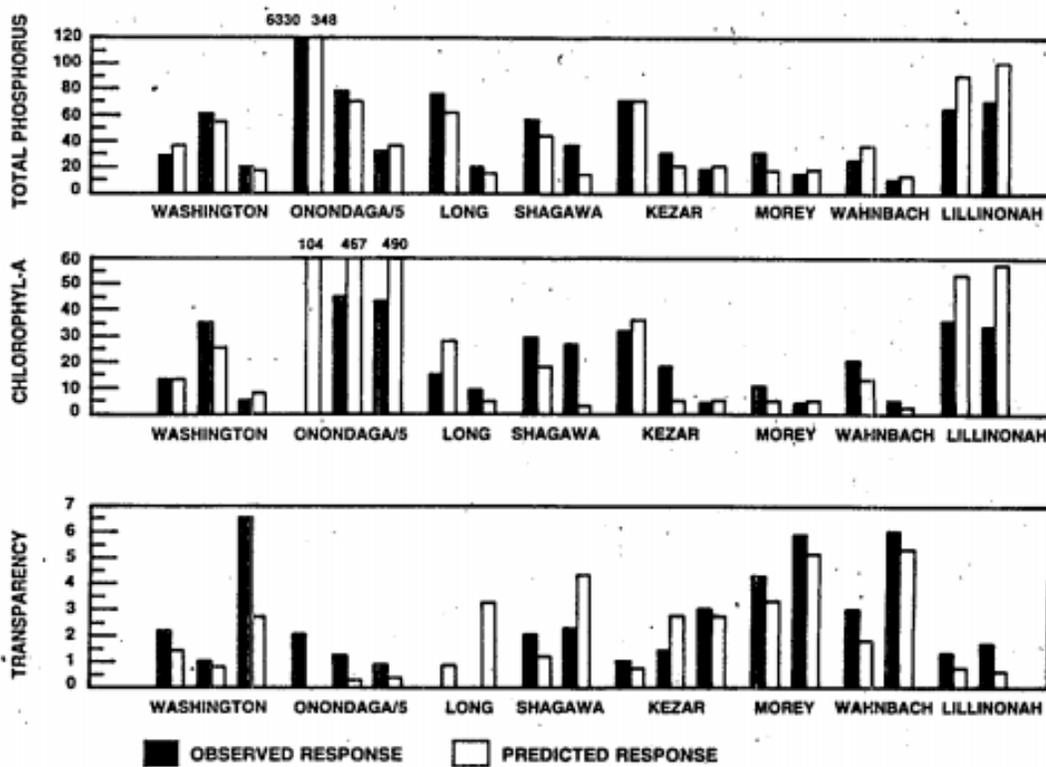


Figura 3. Comparación entre las mediciones predichas y observadas de fósforo total, clorofila y transparencia para lagos descritos en “The lake and reservoir Restoration Guidance Manual”.

Fuente: The lake and reservoir Restoration Guidance Manual. (EPA, 1990).

A pesar que las condiciones observadas y predichas, muchas veces no concordaron de manera exacta, es posible notar una relación entre lo observado y modelado, lo que da cuenta del grado de certeza que tienen los modelos matemáticos para representar los procesos naturales que se dan en los diferentes ecosistemas, siempre dando margen a que se manifiesten las características únicas de estos, lo que permite un mayor entendimiento de sus particularidades.

La problemática del manejo de los recursos hídricos es global y también de gran importancia a nivel local, más aún cuando de la calidad de este recurso depende el desarrollo de grandes y pequeñas comunidades, que hacen uso de los servicios ecosistémicos asociados a este, además de la biodiversidad que muchas veces solo es capaz de subsistir en ciertos rangos de calidad.

1.7. Lagos Nahuelbutanos

La diversidad climática y geológica de Chile continental conforma una realidad territorial latitudinal, tan extensa, que permite la diferenciación de una gran variedad de ecosistemas terrestres y acuáticos, algunos de ellos ambientalmente relevantes, como lo son de norte a sur, el sistema de lagos del altiplano, el sistema de lagunas híper salinas de la segunda región, el sistema de lagos nord-patagónicos o araucanos, el sistema de lagos magallánicos o patagónicos y el sistema de lagos costeros de la región centro sur denominados como “lagos Nahuelbutanos”, ubicados en la región del Biobío.

Particularmente, en la Región del Biobío, la disponibilidad de cuerpos de aguas lenticos es bastante escasa comparada con la magnitud de las aguas corrientes. En esta Región los sistemas de lagos más importantes se encuentran en la precordillera de los Andes, sobre los 800 m.s.n.m., en las zonas de nacimiento del sistema fluvial del río Biobío. Estos son el lago Laja (“Laguna de la Laja”) y las lagunas Icalma y Galletué.

En el sector costero de la Región, se encuentra el sistema de lagos anteriormente nombrado, los que corresponden a lagos costeros de aguas dulces, localizados en las estribaciones occidentales de la Cordillera de Nahuelbuta.

Este sistema de lagos está constituido por 6 cuerpos lenticos localizados en la vertiente sur occidental de la Cordillera de Nahuelbuta (parte de la Cordillera de la Costa) que se alinean de norte a sur entre los sistemas fluviales de los ríos Biobío e Imperial. Entre ellos destacan: Laguna Chica de San Pedro, Laguna Grande de San Pedro, Laguna La Posada, Laguna Quiñenco, Lago Lanalhue y Lago Lleu-Lleu. (Parra, 2003).

1.8. Problemática del Lago Lanalhue

Los ecosistemas acuáticos continentales interactúan con el sistema terrestre de diferentes maneras, así, la mantención de los procesos ecológicos es muy dependiente de esta relación (Tundisi et al., 1997), las que también dependen de las características geomorfológicas que han dado origen a las cuencas lacustres. Por lo tanto, es importante analizar estas interacciones en un contexto regional, histórico y a una escala geológica y actual. La evolución física y biológica de un lago es el resultado de un proceso dinámico el cual a su vez es dependiente de un sistema geomórfico. (decisiones actuales repercuten en resultados a largo plazo).

Las relaciones entre superficie terrestre, la hidrología de pendientes, la superficie del cuerpo de agua y el desarrollo de la línea de costa, entre otras, son fundamentales para entender la magnitud y carácter de las entradas de material alóctono a los lagos y en la formación de los patrones estacionales de estratificación física, química y biológica. Pero también es relevante tener presente la acción humana en una escala temporal apropiada a dicha acción, la que puede incidir fuertemente en el establecimiento de nuevos patrones geomorfológicos y también en las interacciones entre los sistemas terrestres y acuáticos. (Parra, 2003).

Las principales causas antropogénicas de procesos de

eutrofización pueden ser:

- La descarga de aguas residuales, las cuales son ricas en nutrientes, contribuyendo al cambio trófico del cuerpo de agua receptor.
- El uso excesivo de fertilizantes, que genera una contaminación del agua fundamentalmente mediante el aporte de nitrógeno. (en forma de sales de nitrato y amonio) y fósforo. (como fosfato).
- La deforestación y la erosión en suelos agrícolas influyen en la carga de nutrientes, ya que los escurrimientos al pasar por una tierra que no tiene protección, “lavan” la capa fértil, llevándose consigo los nutrientes de la misma.
- La presencia de gases ambientales tales como óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, al entrar en contacto con el agua atmosférica forman ion nitrato (NO_3^-) e ion sulfato (SO_4^{2-}), que forman sales solubles al alcanzar el suelo con los cationes del mismo, generando un empobrecimiento de dichos iones. Dichas sales son volcadas fácilmente en los cuerpos de agua, dando lugar a un proceso de eutrofización.

-

1.9. Eutrofización en el lago Lanalhue

A diferencia de los lagos que se encuentran en la parte alta y la precordillera andina de la Región, cuyas aguas tienen bajos contenidos de nutrientes, debido a una mínima intervención de sus cuencas de drenaje y ninguna influencia de asentamientos urbanos, los lagos Nahuelbutanos exhiben diversos niveles de intervención humana.

Los lagos Nahuelbutanos septentrionales se encuentran rodeados en parte por centros urbanos, desarrollándose una importante actividad turística y recreativa en ellos. Además, la mayor parte de sus cuencas hidrográficas han sido y están sometidas a una intensa actividad forestal. Por otra parte, los dos lagos Nahuelbutanos meridionales (Lanalhue y Lleu-Lleu) corresponden a áreas de desarrollo indígena, lo cual constituye un componente cultural, actualmente

relevante en Chile para la toma de decisiones respecto del uso de estos recursos acuáticos. (Parra, 2003).

La comparación realizada entre sedimentos prehispánicos y actuales de los lagos, indican que han sufrido drásticas transformaciones desde la llegada de los españoles, evolucionando, de acuerdo al polen, desde una cobertura vegetal natural a una fuerte presión de uso forestal. Del mismo modo, el estudio cualitativo del agua, a través de las diatomeas, reconoce un cambio en sus características tróficas. (Urrutia et al., 2000).

Las principales acciones humanas efectuadas en la cuenca son:

- Remoción del bosque nativo en las áreas de drenaje y su reemplazo por actividad agrícola y/o en mayor parte por plantaciones forestales. (*Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp.).
- Establecimiento de asentamientos humanos, actividades turísticas y recreativas, y construcción de caminos civiles y forestales afectando la configuración de pendientes cerca de los lagos.
- Introducción de especies de peces. (*Cyprinus carpio*, *Carassius carassius*, *Odontesthes bonariensis*, *Oncorhynchus mykiss*).
- Introducción de especies de malezas acuáticas. (e.g. *Egeria densa*).

El reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales es el factor más importante que ha producido el paulatino incremento de la exportación de sedimentos y nutrientes. Por las características de la actividad forestal, los periodos de cosechas son negativos, especialmente si las plantaciones se localizan en pendientes altas. Otro efecto de las plantaciones tanto de *Pinus* como de *Eucalyptus* es la homogenización del detritus vegetal, muy diferente al producido por coberturas

vegetales nativas, lo que produce cambios en la composición iónica de las aguas. Tampoco se debe olvidar la influencia del área urbana de Contulmo, la que significó por un tiempo la entrada de aguas lluvias y servidas, además de la modificación de las pendientes por la construcción de caminos y accesos públicos y una fuerte alteración de la línea de costa por la infraestructura turística y recreativa. (Parra, 2003).

En los ecosistemas acuáticos eutrofizados, se comienza a dar una alteración de la biota y de la diversidad biológica, provocando una proliferación de algas, cianobacterias y macrofitas en demasía. El desarrollo de estos organismos provoca opacidad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua. Las consecuencias directas son la imposibilidad de llevar a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos de la columna de agua y, por lo tanto, disminución en la producción de oxígeno libre; simultáneamente aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los organismos descomponedores, que empiezan a recibir excedentes de materia orgánica generados en la superficie. El fondo del ecosistema acuático se va convirtiendo de forma gradual en un ambiente anaerobio y el consecuente aumento en la concentración de gases como anhídrido sulfuroso (H_2S), metano (CH_4) y anhídrido carbónico (CO_2), haciendo poco factible la vida de la mayoría de las especies que forman dicho ecosistema. Se da por tanto mortandad masiva de biota en general, bioacumulación de sustancias tóxicas, aumentando la sedimentación en los cuerpos de agua, reduciendo la vida útil, proliferando la aparición de organismos patógenos y vectores de enfermedad. (Franco & Manzano, 2010).

2. HIPOTESIS

El Lago Lanalhue presenta las condiciones necesarias para establecer en él, una norma de calidad para la protección la biodiversidad presente en el lago.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Desarrollar una propuesta de norma secundaria de calidad ambiental para el Lago Lanalhue.

3.2. Objetivos Específicos

- I) Caracterizar Mofométricamente la Cuenca del Lago Lanalhue y evaluar el estado trófico actual del Lago.
- II) Delimitar Áreas de Vigilancia para la gestión de la calidad de agua del lago Lanalhue.
- III) Determinar los Valores Umbrales de los parámetros más relevantes a normar.

4. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

4.1. Cuenca del Lago Lanalhue

El presente estudio comprende el lago Lanalhue y su cuenca, este lago está ubicado en las coordenadas 37° 55' (S) y 73° 19' (N). Tiene una superficie de 31,9 km² y una cuenca de drenaje de 334 km². Localizado en la provincia de Arauco, Región del Biobío, entre las comunas de Cañete y Contulmo, en la vertiente occidental de la cordillera de Nahuelbuta entre los ríos Lebu y Paicaví. Corresponde a uno de los sistemas lacustres costeros de mayor tamaño en la región y tiene influencia de la zona litoral marina. Su origen es tectónico, debido a que, en el Pleistoceno, la plataforma de Arauco, habría funcionado como una zona de deformación, donde movimientos de emersión y levantamiento de las terrazas costeras, obstruyeron el drenaje natural, lo que conformó el actual lago.

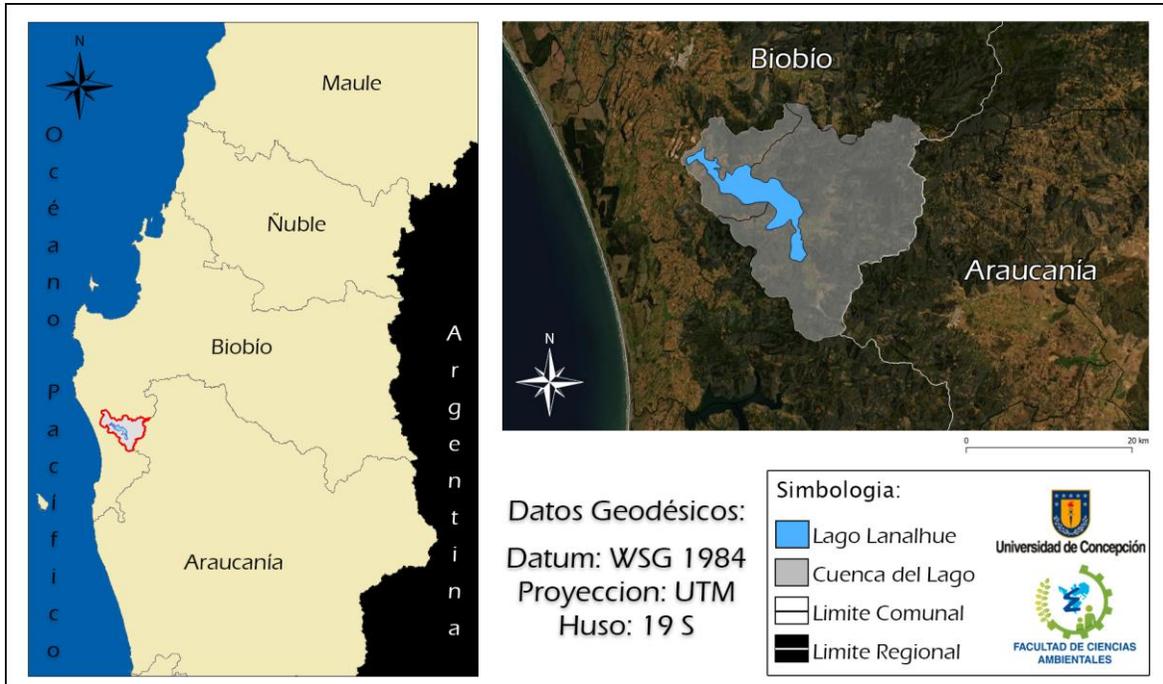


Figura 4. Ubicación geográfica del lago Lanalhue y su cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

El lago tiene una profundidad máxima de 26 m, en el extremo noroeste del lago, en la sección más estrecha de su cuenca, la longitud máxima es de 9,6km, con un área superficial de 31,9 km² y un volumen de 0,418 km³. Tiene una línea de costa (relación entre el perímetro del lago y la longitud de un círculo con la misma área) de 2,9 lo que indica un mayor grado de interacción Lago-cuenca (grado de contacto con tierra firme), mayor superficie colonizable con macrofitas acuáticas enraizadas, mayor diversidad de ambientes bentónicos y mayor superficie de contacto entre la capa productora y la capa desintegradora. Por otra parte, las costas muy irregulares favorecen el intercambio térmico agua-tierra, incrementan las posibilidades de aporte de material aloctono y aumenta la posibilidad de encontrar ambientes protegidos contra el viento y oleaje. (Urrutia et al., 2000).

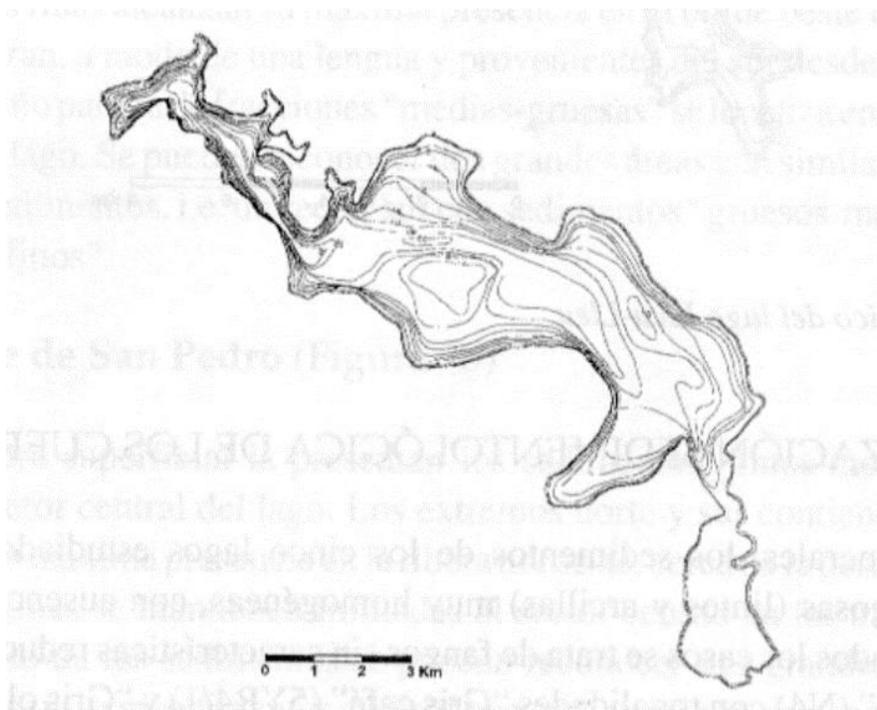


Figura 5. Mapa batimétrico del lago Lanalhue.

Fuente: Caracterización morfométrica y sedimentológica de cinco lagos costeros en la VIII región.(Urrutia et al., 2000).

La alimentación principal la recibe en sus riberas nororiental, oriental y suroccidental a través de los esteros Tromen, El Natri, Elicura, Ranquillermo y El Peral, respectivamente y desagua a través del estero Puyehue. La red de drenaje se

caracteriza por distintos patrones y densidades de canales, debido al control geológico y estructural del área. (Parra et al., 2003). En la plataforma terciaria, se observa un patrón de drenaje paralelo, esto se debe a una adaptación de los cursos fluviales a los lineamientos estructurales, aquí la densidad de drenaje es gruesa debido a la permeabilidad de las rocas lo que permite el desarrollo de valles encajonados. (Ferraris y Bonilla, 1981).

En el área de interés se identifican 18 grandes compartimentos hidrográficos, configurados por el relieve y la red topográfica de drenaje, destacando 14 que están directamente asociados a las microcuencas de drenaje de cada uno de los ríos y esteros presentes en la cuenca, dos sectores de planicies ubicadas en el desagüe del lago y a los dos elementos hídricos de mayor relevancia: el lago Lanalhue y su estéreo de desagüe. (MMA & Centro EULA, 2018).

Con respecto a los componentes geológicos, la cuenca se compone de cinco grandes unidades, asociados a la cordillera de Nahuelbuta, en sus vertientes sur y norte respecto al lago. Los materiales más antiguos predominan en la vertiente sur, asociados a Silúrico-Carbonífero-Pérmico y en la vertiente norte, donde prevalecen materiales del Paleozoico-Triásico (Centro EULA, 2018). La cuenca lacustre está conformada por rocas cristalinas y metamórficas, la franja más cercana al litoral, se estructura en rocas sedimentarias clásticas y sedimentos de origen marino, fluvial y eólico. (Parra et al., 2003). La geomorfología de la provincia de Arauco presenta dos grandes unidades de relieve costero: cordillera de Nahuelbuta y Planicie litoral, modeladas en niveles de terrazas y campos de dunas. (Gobierno Regional del Biobío, 2014).

Presenta un clima templado húmedo de costa occidental, con influencia mediterránea. (Fuenzalida, 1971). La precipitación anual varía entre los 1200mm a 1500mm, con precipitaciones presentes durante todos los meses del año. El máximo de temperatura se registra en el mes de febrero alcanzando en promedio los 18°C y un mínimo en el mes de julio de 9°C. De acuerdo a la clasificación climática de Wladimir Köppen corresponde a Cbf que es un clima marítimo de costa occidental. (Centro EULA, 2018).

La zona de estudio forma parte de la Ecorregión Valdiviana que corresponde al único bosque templado lluvioso de Sudamérica y el tercero más grande del mundo, actualmente es uno de los 34 sitios prioritarios o hot spots en materia de biodiversidad a nivel global. (MMA & Centro EULA, 2018). La cordillera de Nahuelbuta se caracteriza por contener alta riqueza específica respecto al bosque templado de Chile, debido a que se encuentra inserta en una transición climática que permite la convergencia de formaciones vegetales provenientes de climas mediterráneos y templados lluviosos. (Villagrán & Hinojosa, 1997). Con respecto a la cuenca del lago Lanalhue, en la parte más alta todavía existen especies de Roble y Raulí. A su vez, en las quebradas más profundas se observan remanentes de vegetación nativa, con especies de Olivillo, Peumo, Boldo, Avellano, Litre, Maqui y Canelo. (Parra et al., 2003). Hacia el borde costero, es posible encontrar vegetación nativa asociada a los cursos de agua y/o lugares de difícil ocupación, con pequeños bosquetes con especies como Peumo. (*Cryptocaria alba*), Boldo (*Peumus boldus*), Meli (*Amomyrtus meli*), Bollén (*Kagenekia oblonga*), Avellano (*Gevuina avellana*) y Maqui (*Chusquea maqui*) (Gobierno Regional del Biobío, 2014).

4.2. Usos de suelo

Los usos de suelo presentes en la cuenca se reparten entre las actividades productivas que en ella se presentan (agricultura, ganadería, forestal y turística), infraestructura urbana, parches de bosque nativo, mixto, matorral, terrenos húmedos y los cuerpos de agua.

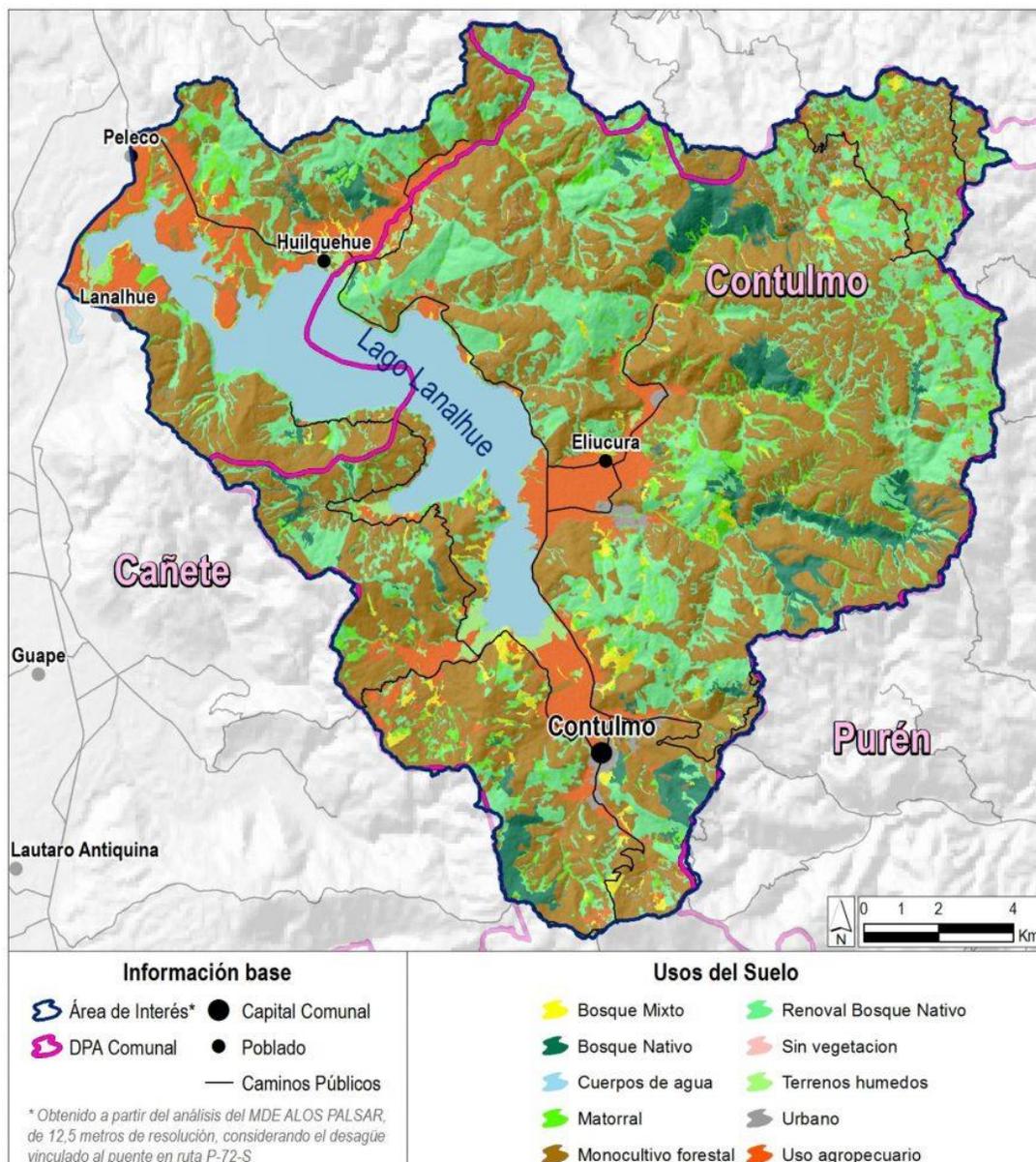


Figura 6. Mapa de usos de suelo en la cuenca del lago Lanalhue.

Fuente: CONAF, 2021.

En el Lago Lanalhue en relación a los usos de suelo en el anillo de 200mts, predomina el uso agrícola con 106 predios con una superficie de 5.241,9 ha. Por otra parte, en el área perilacustre del lago Lanalhue la población permanente se ha estimado en 171 personas, siendo su capacidad de carga máxima de 976 personas.

Por su parte la población estacional se estima en 456 personas con una capacidad de carga máxima estimada en 4.485 personas. En síntesis, se tiene una población de 627 habitantes y una capacidad de carga de 5.461 habitantes.

A partir de la estimación del número de habitantes y la carga máxima, en condiciones de uso de inmueble permanente y estacional, se proyecta la descarga de aguas servidas. Estas descargas son derivadas a fosas sépticas en su mayoría y en algunos casos a pozos negros. Cabe indicar que no se registran en el área perilacustre inmuebles con plantas de tratamiento de aguas servidas. Para el lago Lanalhue se proyecta un volumen de descarga diaria estimada de 49.200 (l/día). De estos, el aporte de la población permanente se estima en 7.760 (l/día), mientras que el aporte de la población estacional en 41.400 (l/día). Considerando un escenario de capacidad de carga máxima, se tiene que el volumen de descarga máxima diaria se estima en 430.960 (l/día), de estas 72.240 (l/día) corresponden a habitantes permanentes y 356.720 (l/día) a habitantes estacionales.

4.3. Aves acuáticas en el Lago Lanalhue

Se ha registrado que en el lago Lanalhue (considerando todos sus tipos humedales), existen 46 especies de aves acuáticas, lo que representa el 40,7% del total de aves acuáticas de Chile.

Además, se han definido diferentes tipos de humedales que habitan las aves dentro del lago, siendo el más relevante el “complejo de humedales”, por ser el sitio de anidación de un gran número de especies.

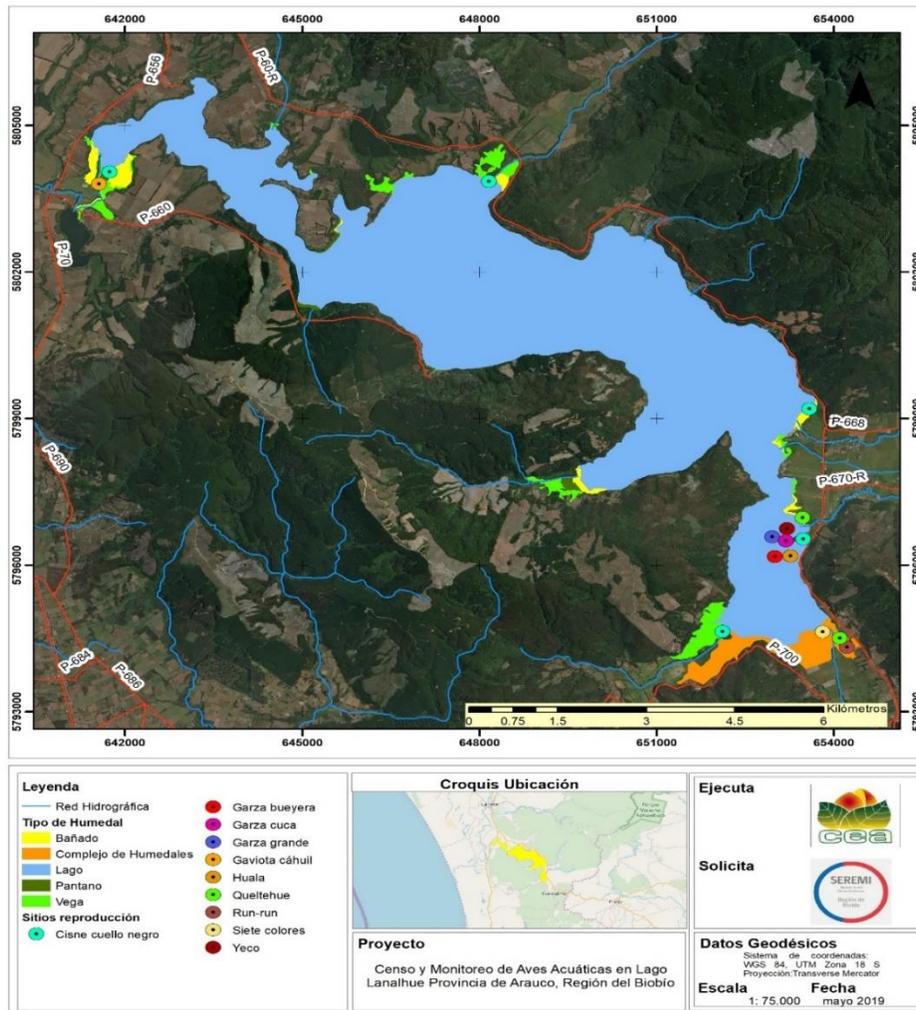


Figura 7. Tipos de humedales y sitios de reproducción de diferentes especies.

Fuente: Censo y monitoreo de aves acuáticas en el Lago Lanalhue (CEA,2021).

4.4. Egeria densa en el Lago Lanalhue

La Egeria densa sirve de alimento para las aves acuáticas que habitan el lago, cumple un rol ecológico en el sistema; pero también genera algunos problemas sobre todo a la actividad turística del territorio.

Las comunas de cañete y Contulmo cuentan, cada uno, con una maquina cosechadora de esta planta, la que fue utilizada por ambos municipios a solicitud de habitantes que se veían afectadas por el crecimiento excesivo y que en algunos

casos afectaba el turismo de la zona. Los municipios, a solicitud de los habitantes del lago cortaban la planta principalmente en la temporada de verano, considerando que el problema se veía acrecentado durante esa estación del año en particular, dejando el resto del año la planta crecer. Sin embargo, la época de corte en la que se realizaba esta labor, no era la mejor, dado que, en los meses de diciembre, enero y febrero, la Egeria densa se encuentra en estado de crecimiento, por lo que cortarla libera vástagos, que provocan una proliferación mayor. (CREA, 2020).

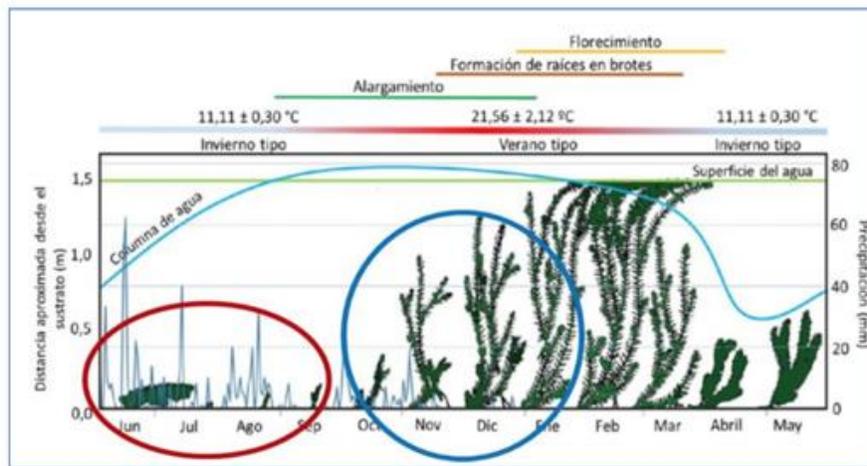


Figura 8. Ciclo de vida de Egeria densa.

Fuente: Plan piloto y estudio preliminar para el manejo de Egeria densa en el lago Lanalhue (CREA,2020).

Los meses de otoño e invierno son apropiados para hacer este tipo de manejo ya que poseen una temperatura promedio de 11 °C (descendiendo hacia junio, julio y agosto), donde la fragmentación de los vástagos producidos por la corta mecánica, disminuyen sus probabilidades de sobrevivir y formar nuevos individuos. A esto, se le suma que la Egeria densa es altamente eficiente en el almacenamiento de almidón, lo que le permite mantener el balance de materia orgánica en hibernación (Haramoto & Ikusima, 1988; Becker et al., 2007) y donde la concentración máxima de almidón se da en los periodos más fríos (Haramoto & Ikusima, 1988), por lo tanto, se sugiere realizar la corte de Egeria densa en los meses de abril, mayo y junio. (CREA, 2020).

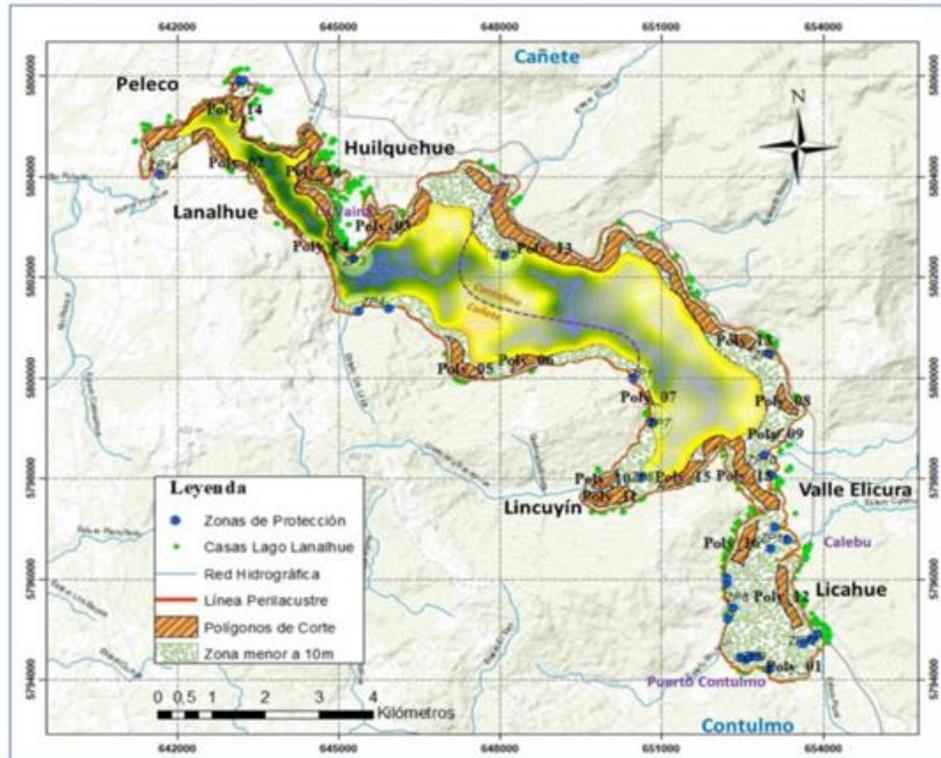


Figura 9. Polígonos de corte y zonas de exclusión por ser sitios de importancia para la biodiversidad.

Fuente: Plan piloto y estudio preliminar para el manejo de Egeria densa en el lago Lanalhue (CREA,2020).

5. METODOLOGÍA

5.1. Objetivo I: Caracterizar Mofométricamente la Cuenca del Lago Lanalhue y evaluar el estado trófico actual del Lago

Mediante datos obtenidos de la revisión bibliográfica y modelos de elevación digital, se realizará una caracterización limnológica del lago Lanalhue y su cuenca de drenaje buscando definir: Morfología, Calidad del agua, en diferentes estaciones de monitoreo, entre otros parámetros.

5.1.1. Delimitación de la cuenca hidrográfica a través de SIG:

Para delimitar la cuenca del lago Lanalhue se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la región del Biobío con tamaño de celda de 12,5mx12,5m obtenido del servicio de descargas de información territorial de IDE Chile. Se aplicaron las herramientas de sistema de información geográfica del programa QGIS 3.18.2 y GRASS 7.8.5, de relleno, dirección y acumulación de flujo con una condicional de 13 celdas. Se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 18 Sur y se recortó a la zona de estudio para obtener la red hídrica y delimitar la cuenca del lago.

5.1.2. Parámetros morfométricos

Para caracterizar los procesos hidrológicos de la cuenca se calcularon los parámetros morfométricos, todas las operaciones se realizaron mediante el programa QGIS 3.18.2 y GRASS 7.8.5 de la siguiente manera:

- Área y perímetro de la cuenca: Mediante la utilización de la herramienta de cálculo de geometría se obtuvo la superficie en las unidades respectivas.
- Elevaciones: Las elevaciones fueron calculadas a través de estadística zonal mediante la utilización del modelo de elevación digital de la cuenca en estudio, lo cual permite calcular valores promedios, mediana, máximo y mínimo.
- Largo del cauce principal (LCP): Con la utilización de las capas de dirección de flujo y la herramienta longitud más corta (punto a punto) se obtuvo el largo del cauce principal expresado en las unidades correspondientes.

- Coeficiente de compacidad (K_c): Este índice compara el perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo con igual superficie que la cuenca. Se utiliza la siguiente fórmula para calcular este factor:

$$K_c = 0.282 \times \frac{P_{cca}}{\sqrt{A_{cca}}}$$

La clasificación para cada parámetro obtenida de la Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (2010), se tiene que:

- I) $K_c = 1,00 - 1,25$: Cuenca redonda a oval redonda
- II)
- III) $K_c = 1,25 - 1,50$: Cuenca de oval redonda a oval oblonga.
- IV) $K_c = 1,50 - 1,75$: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga.

- Coeficiente de Circularidad (CC): Este índice permite comparar el área de la cuenca con el área de un círculo cuyo perímetro es igual al perímetro de la cuenca. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$CC = 4\pi \times \frac{A_{cca}}{P_{cca}^2}$$

- Factor de Forma de Horton (FF): Corresponde a la razón entre el ancho medio de la cuenca, dividido por su largo a través del cauce principal hasta la divisoria. Manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Cuando FF es similar a 1, representa una cuenca redondeada, un FF cercano a 0, se caracteriza una cuenca alargada sujeta a crecientes de menor magnitud, la forma de calcular este factor es el siguiente:

$$FF = \frac{A_{cca}}{LCP^2}$$

- Densidad de drenaje (D): Este parámetro mide la capacidad de drenaje de la cuenca y relaciona el área de la cuenca y el largo total de los cauces. Generalmente presenta valores entre 0,5 y 3,5 km/km². Se calcula mediante la fórmula:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{Li}{Acca}$$

- Orden de Strahler: Corresponde a uno de los métodos de jerarquización de una red de drenaje y se obtiene a través de la herramienta clasificación de arroyos.
- Pendiente media del cauce: A través del método de elevaciones extremas con los valores de altura máxima, altura mínima y la longitud del cauce principal se calcula la pendiente media metro a metro y en porcentaje con la siguientes formulas:

$$Sc(m/m) = \frac{Hmax - Hmin}{L}$$

$$Sc (\%) = \frac{Hmax-Hmin}{L} \times 100$$

- Tiempo de concentración El tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca. Se calculó a través de los métodos de California Culvert Prattice (1942) mediante la fórmula:

$$Tc = 0.87 \times \frac{LCP^3}{H} \times 0.385$$

y Kirpich (1942) mediante las formula:

$$Tc = 0.066 \left(\frac{L}{\sqrt{Sc}} \right)^{0.77}$$

- Curva hipsométrica e Histograma de frecuencias altimétricas: La curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. De acuerdo a esto, se utilizó el modelo de elevación digital de cada microcuenca y se reclasificó para un número de 15 clases, luego a través de estadística zonal como tabla se obtiene el área entre curvas para una altura determinada, lo que permite procesar los datos en Excel y obtener los gráficos que representan la distribución acumulada de las elevaciones en la cuenca, posteriormente mediante una división del área parcial de cada clase por el área total de la cuenca se calcula el porcentaje de altitudes para calcular el histograma de frecuencias altimétricas.

5.1.3. Estado trófico del Lago

Para evaluar el proceso de eutrofización se contemplan diferentes estrategias que van desde la inspección visual hasta técnicas de vanguardia, Todos ellos tan importantes como funcionales. (Franco & Manzano, 2010).

5.1.3.1. Índice del Estado Trófico (IET o TSI)

Carlson en 1977 propuso este índice, es uno de los más utilizados, varía entre 0 y 100 es decir, de oligotrófico a hipereutrófico. Se obtiene a través de la transparencia determinada con el disco de Secchi, por ejemplo, un valor de TSI = 0 corresponda a una profundidad del disco de Secchi de 64 m y cada incremento de 10 m en TSI representa una reducción del 50 %. El mismo índice puede determinarse a partir de otros parámetros, como la concentración de clorofila a y fósforo total, cuya relación con la transparencia se ha deducido previamente.

Tabla 1. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.

Estado de eutrofia	TSI	Ds (m)	Pt(mg/m3)	Chla (mg/m3)
Oligotrófico (TSI<30)	0	64	0,75	0,04
	10	32	1,5	0,12
	20	16	3	0,34
	30	8	6	0,94
Mesotrófico (30<TSI<60)	40	4	12	2,6
	50	2	24	6,4
	60	1	48	20
Eutrófico (60<TSI<90)	70	0,5	96	56
	80	0,25	192	154
	90	0,12	384	427
Hipereutrófico (90<TSI<100)	100	0,06	768	1183
Relación de los Parámetros		$\frac{TSI(Ds)}{2}$	$2 \times TSI(Pt)$	$\sqrt{7.8} \times TSI(Chla)$

Fuente: Modificado de Carlson. (1977; 1980).

Las fórmulas que figuran a continuación, corresponden a la propuesta de Carlson (1977) y a la modificación realizada por Aizaki et al. En 1981 a la misma:

Tabla 2. Fórmulas para estimar el estado trófico aplicando los indicadores de eutrofia.

Parámetro de eutrofización	Carlson (1977;1980)	Aizaki et al. (1981)
Claridad del agua (Ds)(m)	$TSI(Ds) = 60 - 14.41Ln(Ds)$	$TSI(Ds) = 10 \times (2.46 + \frac{3.76 - 1.57Ln(Ds)}{Ln2.5})$
Fosforo total (Pt) (mg/l)	$TSI(Pt) = 14.42Ln(Pt) + 4.15$	$TSI(Pt) = 10 \times (2.46 + \frac{6.68 - 1.15Ln(Pt)}{Ln2.5})$
Clorofila a (Chla) (mg/m3)	$TSI(Chla) = 9.81Ln(Chla) + 30.6$	$TSI(Chla) = 10 \times (2.26 + \frac{Ln(Chla)}{Ln2.5})$

Fuente: Modificado de Carlson (1977;1980) y Aizaki et al. (1981).

5.1.3.2. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)

El estudio más completo sobre la eutrofización hasta ahora realizado lo ejecuto el “Programa Cooperación sobre la Eutrofización”, de la OCDE realizado en la década de 1970 con la participación de connotados científicos de 18 países y coordinados por Vollenweider (Franco & Manzano, 2010). Establecieron una secuencia de categorías tróficas cimentado en las concentraciones de fósforo total, clorofila a y transparencia medida con el disco secchi, dada la compleja interacción entre las numerosas variables que intervienen en la eutrofización, Janus y Vollenweider (1981) llegaron a la conclusión de que es imposible establecer una limitación estricta entre las distintas categorías tróficas.

La clasificación del estado trófico normalmente se basa en el nutriente que representa una limitación. En la mayor parte de los casos, el factor limitante es el fósforo. No obstante, los factores señalados indican los tipos de variables que deben tenerse en cuenta. Para conocer el nivel de eutrofización de un agua determinada se suele medir el contenido de clorofila a de algas en la columna de agua y este valor se combina con otros parámetros.

Los resultados se presentan en la tabla 3 y serán comparados con los datos obtenidos del centro EULA de la Universidad de Concepción, muestreados durante los meses de septiembre del 2018, enero y julio del 2019 y marzo del año 2020, lo que correspondería al periodo aproximado de un año, los que serán analizados con el fin de determinar el estado trófico de cada una de las estaciones de monitoreo en base a la clasificación propuesta por la OCDE.

Tabla 3. Valores límites de propuestos por la OCDE (1982) para un sistema completo de clasificación trófica.

Categoría Trófica	Fosforo total (mg/m ³)	Clorofila a (mg/m ³)	Transparencia (m)
Ultraoligotrófico	< 4,0	< 1,0	6 > 12,0
Oligotrófico	< 10,0	< 2,5	> 6,0
Mesotrófico	10 - 35	2,5 - 8	6,0 – 3,0
Eutrófico	35 - 100	8-25	3,0 – 1,5
Hipereutrófico	> 100	> 25	< 1,5

Fuente: Modificado de: OCDE. (1982).

5.1.3.3. Clasificación trófica de Lagos según Smith et al.

Para complementar la evaluación trófica hecha mediante la metodología propuesta por La OCDE, se compararán los parámetros indicadores del estado trófico con los propuestos por Smith et al y presentados en la guía para la elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental, con la finalidad de tener otra referencia para determinar de forma más ecuánime cual es el estado del lago.

5.2. Objetivo II: Delimitar Áreas de Vigilancia para la gestión de la calidad de agua del lago Lanalhue

5.2.1. Análisis Multivariado

Una metodología para evaluar la relación entre la calidad del agua y el impacto en los ecosistemas acuáticos es el análisis multivariante. Es un análisis estadístico “exploratorio” que utiliza la correlación múltiple entre los parámetros abióticos y bióticos. Los resultados se grafían en representaciones canónicas. El análisis multivariante, es una metodología estadística para reducir la varianza total de un

conjunto de parámetros analizados, unos con otros y encontrar los “parámetros forzantes de los ecosistemas” (aquellos que fuerzan la variabilidad de la mayor parte de los otros parámetros). En cada análisis multivariante, la combinación de correlaciones genera nuevos ejes (denominadas componentes) de un gráfico multidimensional en el que cada parámetro adquiere nuevos valores. Las componentes I y II son las que acumulan el mayor porcentaje de la varianza de los parámetros correlacionados. Estas componentes se representan gráficamente en dos ejes, uno horizontal (componente I) y otro vertical (componente II). Cada parámetro o punto de monitoreo analizado puede ser asociado a una de estas componentes y dependerá de su valor en el eje, el grado de correlación con cada componente y los parámetros que éste represente. Una descripción acabada del principio matemático de este análisis se puede encontrar en Rencher. (2003).

5.2.2. Criterios de selección de áreas de vigilancia.

El ministerio del Medio Ambiente en la “Guía para la elaboración de Normas secundarias de Calidad Ambiental” presenta criterios a considerar para la selección de Áreas de Vigilancia, como lo son:

- **Ecología:** El criterio principal de la selección de un Área de Vigilancia es la presencia de hábitats acuáticos que alberguen biodiversidad (incluyendo microorganismos, plantas, peces, entre otros) que sea significativa para la cuenca, tanto en términos de riqueza y abundancia y, que se vayan a ver potencialmente afectados por la calidad del agua de la cuenca.
- **Datos Disponibles:** Es importante diagnosticar si existe data suficiente en la cuenca para evaluar su estado ecológico. En este punto, es muy importante conocer y considerar las estaciones de calidad, pluviométricas y de biomonitoréo presentes en el territorio con data histórica disponibles. Resulta difícil normar en puntos donde la información físico-química y biológica es escasa.

-
- **Hidromorfología:** Se debe revisar, en qué forma un cambio en la hidromorfología de la cuenca cambia las condiciones del hábitat de las especies acuáticas. En ríos, en específico, se debe analizar el régimen hidrológico, la continuidad fluvial, las condiciones morfológicas. (pendiente, ribera, relieve, segmento meándrico, instalaciones hidráulicas, entre otros). Se debe considerar además que, embalses e hidroeléctricas de pasada restringen o cortan la continuidad de ríos y su régimen natural de caudales. Así también, que la disminución de caudales y el manejo de las construcciones hidráulicas, pueden influir en la calidad del agua.
- **Oceanografía:** En relación con la oceanografía influyente en un ecosistema marino, se debe considerar si diferencias en la dinámica de un cuerpo de agua marina afectan la disparidad en los hábitats de los ecosistemas acuáticos. En este caso, se deben separar los diferentes hábitats. Destaca la necesidad de proteger las condiciones adecuadas de los hábitats para especies en Estado de Conservación y presentes en Áreas Marinas Protegidas.
- **Afluentes:** Si un tributario cambia significativamente la calidad del agua del cuerpo de agua principal en el que desemboca, es necesario cerrar un AV en este, antes de esta confluencia. De tal manera que un futuro Plan de Descontaminación considere por separado ambos cuerpos de agua y las medidas del plan se apliquen principalmente al tributario contaminado. Canales de riego y drenaje que confluyen a un río o lago, se pueden tratar como tributarios, ya que muy frecuentemente, éstos llevan grandes cargas de nutrientes y agroquímicos. Así, se debe analizar su impacto en los ecosistemas del río, especialmente cuando los caudales de los canales son elevados. Asimismo, el afloramiento de aguas subterráneas puede cambiar substancialmente las condiciones en un río, lago o aguas marinas. Lo anterior, puede explicar disminuciones del oxígeno disuelto, o cambios de

concentraciones de otros parámetros, por ejemplo, de metales o sales (iones).

- **Geología y Sedimentos:** Diferentes formaciones de rocas pueden tener influencia en la calidad del agua, por ejemplo, liberación de metales pesados y metaloides por lluvia ácida o elevaciones del pH por la pasada del agua a través de rocas del tipo calcitas. Por otra parte, el cambio en los sedimentos fluviales produce una alteración en el hábitat y existen varios ejemplos de especies o poblaciones ecológicas que se ven fuertemente mermadas por alteraciones o pérdidas de sus hábitats. En cuanto a su relación con parámetros a normar, los sedimentos finos en la columna de agua pueden alterar la turbiedad o transparencia del agua y disminuir la producción primaria en el recurso hídrico.

- **Fuentes Emisoras Puntuales y Difusas:** Si fuentes puntuales o difusas pueden potencialmente modificar las características ecológicas de un cuerpo de agua a normar, se puede fijar el límite de un Área de Vigilancia de tal modo que controle dicha fuente. Las NSCA son instrumentos adicionales para controlar y disminuir el impacto de las fuentes puntuales en los ecosistemas acuáticos, como también de las fuentes difusas, tales como el drenaje ácido de rocas, los nutrientes provenientes de praderas agrícolas y el riego con purines, entre otros.

- **Aspectos Sociales y Culturales:** Se debe considerar en el análisis, el punto de captación desde donde se toma agua para la distribución de agua potable, de manera de controlar mejor la calidad de esta agua. Con este mismo criterio, se debe mantener la buena calidad del agua en subcuencas prístinas como posibles fuentes de agua potable. Si en una cuenca se asientan pueblos originarios con una cultura relacionada al agua, como es el caso de varias etnias de Chile, es conveniente fijar Áreas de Vigilancia separadas del resto para proteger su cultura con niveles de las Normas Secundarias de

Calidad Ambiental adecuados al uso de diferentes servicios ecosistémicos del que hacen uso estas comunidades.

5.3. Objetivo III: Determinar los Valores Umbrales de los parámetros más relevantes a normar

En cuanto a los objetivos de cada parámetro en cada AV, se debe decidir según el resultado de la Tabla del Estado Actual, si la condición del ecosistema es aceptable y, por consiguiente, se puede fijar el umbral para mantener esta condición, especialmente en el caso de aguas prístinas. Cuando la condición no sea aceptable en términos ecosistémicos, se debe recuperar este parámetro y es aconsejable fijar el umbral de la norma en un nivel que proteja los ecosistemas acuáticos adecuadamente.

Para la determinación de los objetivos de regulación de cada parámetro en cada Área de Vigilancia, se podrían utilizar las clases de calidad con los siguientes criterios propuestos por el Ministerio del medio ambiente:

- **Clase 1:** Si un valor del Estado Actual se encuentra en la clase 1, significa que presenta una muy buena condición, la cual es apta para la reproducción de varias especies. Así es importante mantenerla para proteger el hábitat de estas especies. Además, esta calidad de agua podría servir como fuente para agua potable u otros servicios ecosistémicos.
- **Clase 2:** En las condiciones de esta clase se encuentra la mayor biodiversidad, por lo que es importante mantener esta condición.
- **Clase 3:** La clase 3 ya tiene impactos negativos sobre la biota de los ecosistemas acuáticos. Así, en cuencas o cuerpos de aguas marinas con alta intervención antrópica, se debe decidir si esta condición es aceptable o si se debe mejorar. Un criterio para tomar la decisión sobre mantener o recuperar

las condiciones ecológicas en clase 3 podría ser, si, por ejemplo, aguas abajo del río, existe una captación para agua potable, o si se ven afectados otros servicios ecosistémicos. Si la decisión es la recuperación del ecosistema, ésta debería realizarse gradualmente para no afectar al desarrollo económico de la zona.

- **Clase 4:** Este estado de la calidad del agua es inadecuado para proteger los ecosistemas acuáticos. Las condiciones de calidad del agua en esta clase se deben recuperar hasta alcanzar los valores umbrales de la clase 3. En algunos casos se puede normar en estas concentraciones, cuando el área está influenciada por una alta concentración de origen natural y no por intervenciones humanas. Por otra parte, si el costo de recuperar esta área resulta muy elevado se puede resolver recuperar sólo los parámetros más críticos para los ecosistemas involucrados.

- **Clase 5:** El estado de la calidad del agua en esta clase es absolutamente inadecuado para proteger los ecosistemas acuáticos. Las condiciones de calidad del agua en esta clase se deben recuperar hasta alcanzar la clase 3. Al igual que en la clase 4, en algunos casos se puede normar en esta clase, cuando el área está influenciada por una concentración muy alta de origen natural, considerando que la biota existente en esa área ha estado expuesta por largo tiempo a esas condiciones y han operado factores de selección natural, tal que dicha biota se encuentra naturalmente adaptada a esta situación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Parámetros Morfométricos de la Cuenca del Lago Lanalhue

6.1.1. Parámetros Morfométricos Generales

La cuenca tiene un perímetro de 117.6 km y un área de 366 km², la longitud del cauce principal medido desde el punto más alto de la cuenca hasta el punto de

drenaje del lago Lanalhue, correspondiente también al punto de drenaje de la cuenca, calculado con el programa QGIS 3.18.2 y GRASS 7.8.5 es de 35.8 km, finalmente, la cuenca presenta un desnivel altitudinal de 1029 m, como se resume en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros Morfométricos Generales.

Parámetros Morfométricos generales		
Parámetro	Símbolo	Valor
Perímetro (km)	P	117,6
Área (km ²)	A	366,5
Longitud Máxima (km)	LM	23,2
Longitud cauce principal (km)	LCP	35,8
Ancho de la Cuenca	AC	15,8
Desnivel Altitudinal	DA	1029,0

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Parámetros Morfométricos asociados a la forma de la cuenca

El factor de forma de Horton señala que el área de estudio es una cuenca ancha, con cauces cortos, lo que se corresponde con lo observado en la figura 4 donde el cuerpo de agua de mayor tamaño corresponde al Lago Lanalhue, por otra parte, el coeficiente de compacidad da cuenta de una cuenca rectangular oblonga y el coeficiente de circularidad indica que tiene tendencia a alargarse, esta información se resume en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros Morfométricos asociados a la forma de la cuenca.

Parámetros Morfométricos asociados a la forma de la cuenca			
Parámetro	Símbolo	Valor	Categorial
Factor de forma	Kf	0,7	Ensanchada
Coeficiente de compacidad	Kc	1,7	Clase III
Coeficiente de circularidad	Rc	0,3	Alargada

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3. Parámetros Morfométricos Asociados a la forma del relieve

La información de relieve indica que la cuenca se encuentra a una altitud media de 527 m.s.n.m. siendo su altitud más frecuente 48 m.s.n.m. la pendiente promedio de la cuenca es de 2.9 % y la cota mínima correspondiente al desagüe del lago Lanalhue es de 13 m. Esta y más información se resumen en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros Morfométricos Asociados a la forma del relieve.

Parámetros Morfométricos Asociados a la forma del relieve	
Parámetro	Valor
Cota máxima (msnm)	1042
Cota mínima (msnm)	13
Altitud media (msnm)	527,5
Altitud más frecuente (msnm)	48
Altitud mayor del cauce (msnm)	919
Altitud menor del cauce (msnm)	13
Pendiente Promedio de la cuenca (%)	2,9

Fuente: Elaboración propia.

6.1.4. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes

De acuerdo a los parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes, el área de estudio correspondería a una cuenca de orden 3, donde tributarios de menor orden alimentarían al lago Lanalhue, siendo este el principal cuerpo de agua en la cuenca, la longitud total de estos drenajes correspondería a 89 km y 34 de estos serían de orden 1, la pendiente del cauce principal es de un 2.53% lo que sería igual a 0.03 metros por cada metro, presenta un coeficiente de e torrencialidad bajo lo que indica un gran número de cauces de orden 1 que alimentan los tributarios del Lago. Finalmente, el tiempo de concentración calculado fue de 4.09 horas.

Tabla 7. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes.

Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes		
Parámetro	Símbolo	Valor
Orden de la cuenca	Oc	3
Longitud total de drenajes (km)	Lt	89,0
Densidad de drenajes	D	0,24
Frecuencia de drenajes	F	0,11
# Drenajes orden 1		34
Coefficiente de torrencialidad	Ct	0,1
Pendiente del cauce (%)	Sc	2,53
Pendiente del cauce (m/m)	Sc	0,03
Tiempo de concentración (horas)	Tc	4,09
Tiempo de concentración (horas)	Tc	4,27

Fuente: Elaboración Propia con datos de IDE Chile.

6.1.5. Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica, obtenida de los datos de la cuenca, se corresponde con la de una cuenca sedimentaria o en fase de vejez, como se muestre en la figura 10, alrededor del 50% de la cuenca se encuentra sobre la cota de los 290 m.s.n.m. correspondiendo también a una cuenca endorreica pues su desembocadura no es a nivel del mar, tal como ya había sido descrito por (Urrutia et al., 2000) y (Parra, 2003) que ubicaban la altura de su desembocadura a los 12 m.s.n.m.

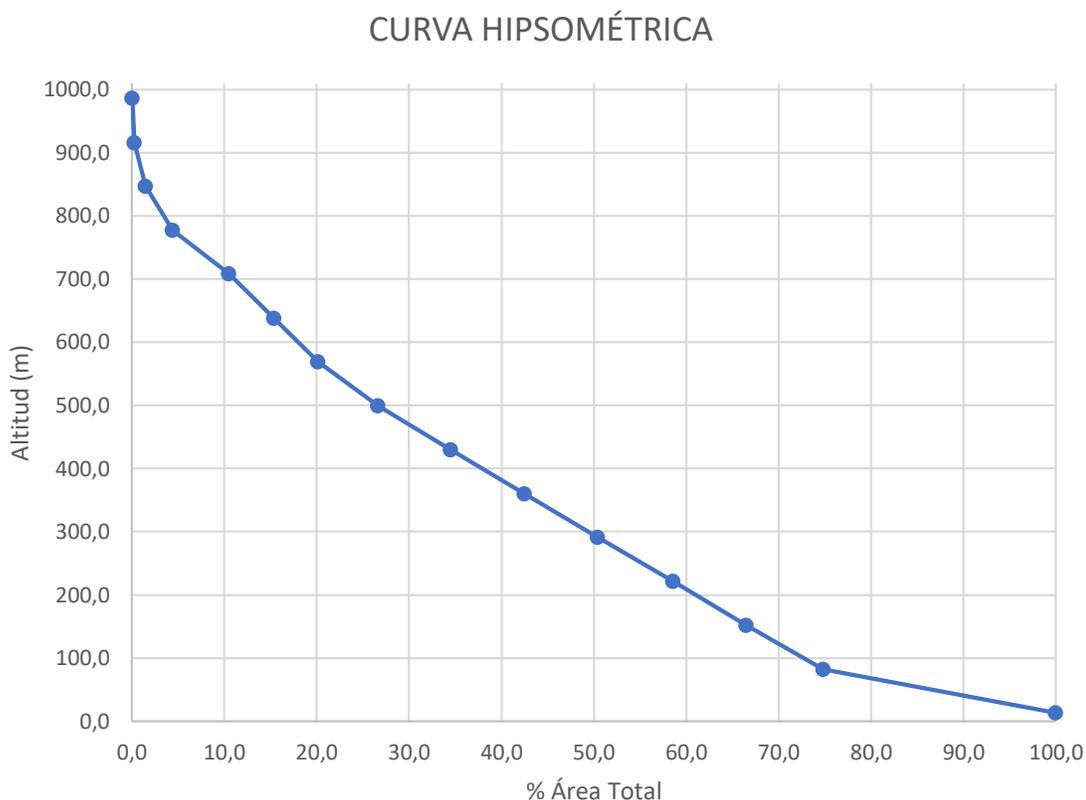


Figura 10. Curva Hipsométrica.
Fuente: Elaboración Propia.

6.1.6. Parámetros morfométricos del lago Lanalhue

Los parámetros morfométricos del lago Lanalhue propiamente tal, dan cuenta de un cuerpo de agua con formas y contornos muy irregulares lo que es representado por su desarrollo de línea de costa con un valor de 2.9, un valor alto como este indica un alto grado de interacción lago-cuenca, una mayor superficie colonizable con macrofitas acuáticas enraizadas, una mayor diversidad de ambientes bentónicos y una mayor superficie de contacto entre la capa productora y desintegradora. Del mismo modo, las costas muy irregulares favorecen el intercambio térmico agua-tierra. Incrementan las posibilidades de aporte de material aloctono y aumentan la posibilidad de encontrar ambientes protegidos contra el viento y oleaje (Urrutia et al., 2000), el 100 % de su área se encuentra sobre la cota que determina la zona de aguas someras que, según Campos et al., (1992) está determinada por la isóbata

de los 30 m. En este caso la profundidad media es de 13.1 m con el punto más profundo a los 26 m (Urrutia et al., 2000),(Parra, 2003). La relación entre el área de la cuenca y la del lago indica un cuerpo de agua muy dependiente de su cuenca de drenaje en términos de calidad, esto preocupa considerando el constante remplazo del bosque nativo por plantaciones forestales de *P. radiata* y *Eucalyptus* spp. Considerado el factor más importante que ha producido el paulatino incremento de la exportación de sedimentos y nutrientes. (Cisternas et al., 1997, 1999, 2000). La información morfométrica del lago se resume en la tabla a continuación.

Tabla 8. Parámetros Morfométricos del Lago Lanalhue.

Parámetros Morfométricos del Lago Lanalhue	
Parámetro	Valor
Área (km ²)	31,9
Perímetro (km)	58,6
Volumen (km ³)	0,418
Profundidad máxima (m)	26
Profundidad media (m)	13,1
Desarrollo línea de costa	2,9
Relación profundidad media/Profundidad Máxima	0,5
Relación Área cuenca/Área Lago	10,2
Relación Área cuneca/Volumen lago	777,5

Fuente: Modificado de (Urrutia et al., 2000),(Parra, 2003).

6.2. Estado actual del lago Lanalhue

El lago cuenta actualmente con 11 puntos de monitoreo para datos de calidad de agua, para este punto de estudio y los subsiguientes se utilizaron datos no publicados del centro EULA de la Universidad de Concepción, estos datos corresponden a muestreos realizados desde septiembre del 2018 hasta marzo del 2020, cuyos resultados fueron promediados para cada estación de monitoreo y el lago en su totalidad, los datos fueron manejados en EXCEL para su posterior análisis y presentación.

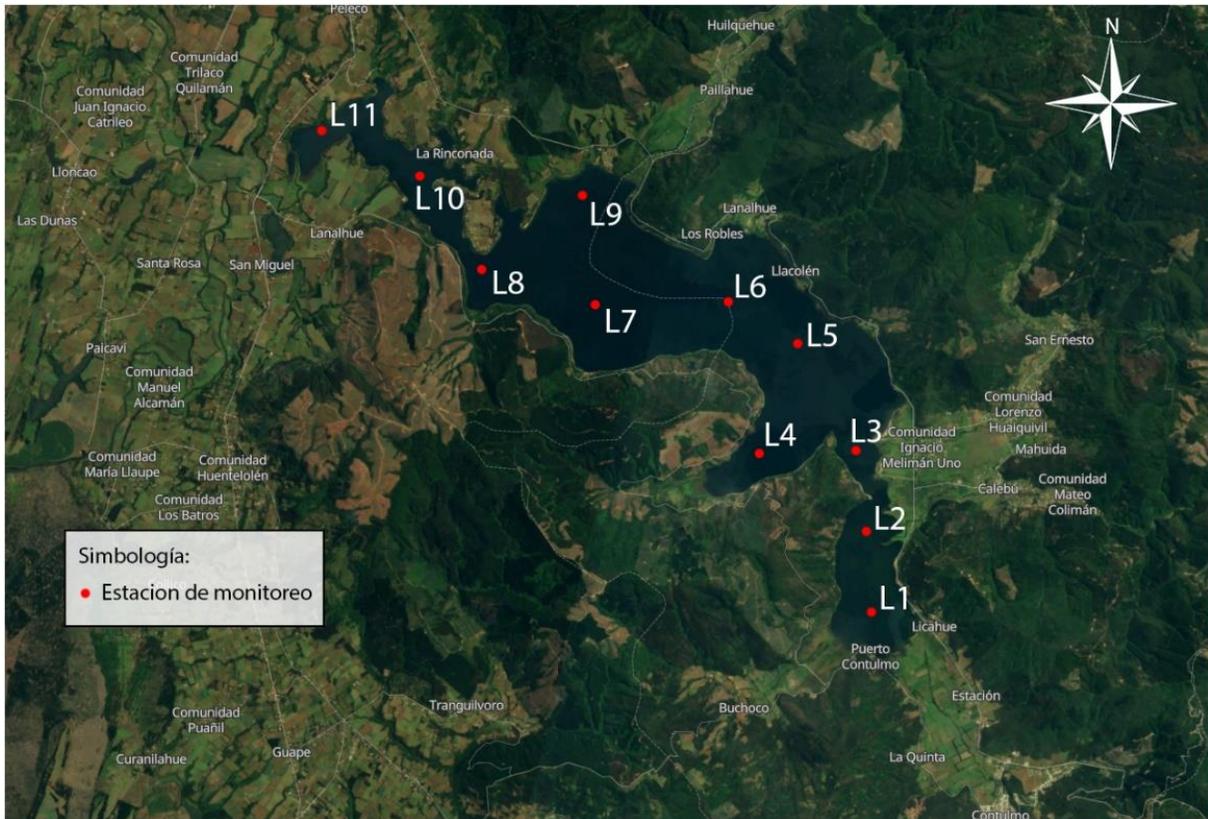


Figura 11. Estaciones de monitoreo en el Lago Lanalhue.
Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse en la figura 11, el lago presenta una forma alargada con múltiples deformaciones, las que dividen el lago en tres secciones: la sección interior (L1, L2 y L3), es la menos profunda y de fondo plano (Parra, 2003). Se dispone en dirección Norte-Sur y tiene 3 km de longitud y 1.5 km de ancho. Está parcialmente seccionada por el delta de los ríos Elicura y Calebu y se comunica con el resto del lago, a través de un estrecho. La parte central (L4, L5, L6, L7, L8 y L9), tiene 8 km de longitud y 2 a 3 kilómetros de ancho, se dispone en dirección sureste a norte y su fondo tiene la forma de un estrecho canal, de laderas irregulares, cuya profundidad aumenta en dirección a la costa, el trazado de sus riberas se presenta accidentado por penínsulas y ensenadas. Finalmente, el sector frontal es el más estrecho y profundo, tiene la forma de una T volcada hacia el Oeste, 3 km de largo, entre 0.5 y 0.8 km de ancho una península estructurada por rocas sedimentarias de

la terraza de abrasión marina localizada en el sector de El Banquete, genera un umbral que dificulta la conexión entre las dos últimas secciones. (Parra, 2003).

6.2.1. Estado actual del lago basado en el Índice del Estado Trófico (TSI)

6.2.1.1. Índice del Estado Trófico con las fórmulas propuestas por Carlson (1977,1980)

La aplicación de las fórmulas de Carlson (1977,1980) indican que para la medición de Disco de secchi (Ds), el lago se encuentra en calidad de Mesotrófico, en peor condición; pero aun en estado Mesotrófico según las mediciones de clorofila a (Chla) y directamente en estado eutrófico si consideramos solo las mediciones de fósforo total (PT), finalmente la aplicación del método de Índice de Estado trófico de acuerdo a las fórmulas de Carlson arrojo que el lago se encuentra en estado Mesotrófico (54,8) más cercano a la eutrofia (60) que a la oligotrofia (30). Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultado de la aplicación de las fórmulas propuestas por Carlson (1977,1980).

Estación	Carlson						TSI FINAL	
	Ds (m)		PT (mg/m3)		Chl a (mg/m3)			
L1	48,4	Mesotrófico	65,0	Eutrófico	59,5	Mesotrófico	57,6	Mesotrófico
L2	50,7	Mesotrófico	65,4	Eutrófico	59,1	Mesotrófico	58,4	Mesotrófico
L3	44,8	Mesotrófico	67,5	Eutrófico	51,5	Mesotrófico	54,6	Mesotrófico
L4	43,3	Mesotrófico	68,6	Eutrófico	50,6	Mesotrófico	54,2	Mesotrófico
L5	43,0	Mesotrófico	70,4	Eutrófico	52,3	Mesotrófico	55,2	Mesotrófico
L6	44,4	Mesotrófico	68,2	Eutrófico	51,2	Mesotrófico	54,6	Mesotrófico
L7	43,7	Mesotrófico	71,5	Eutrófico	48,7	Mesotrófico	54,6	Mesotrófico
L8	44,2	Mesotrófico	69,3	Eutrófico	50,1	Mesotrófico	54,5	Mesotrófico
L9	43,8	Mesotrófico	72,8	Eutrófico	49,2	Mesotrófico	55,2	Mesotrófico
L10	42,5	Mesotrófico	64,2	Eutrófico	49,5	Mesotrófico	52,0	Mesotrófico
L11	43,3	Mesotrófico	60,7	Eutrófico	50,6	Mesotrófico	51,6	Mesotrófico
TSI FINAL	44,7	Mesotrófico	67,6	Eutrófico	52,0	Mesotrófico	54,8	Mesotrófico

Fuente: Elaboración Propia.

6.2.1.2. Índice del Estado Trófico con las fórmulas de propuestas por Aizaki et al (1981)

La aplicación de las fórmulas de Aizaki et al. (1981) para la determinación del Índice del Estado Trófico indicaron un valor menor (50.8) para el lago Lanalhue y focalizaron el problema de eutrofia asociada al fósforo total en la sección central del lago. (Parra, 2003). Correspondientes a las estaciones L4, L5, L6, L7, L8 y L9. Los resultados de este análisis están resumidos en la tabla 10.

Tabla 10. Resultado de la aplicación de las formulas propuestas por Aizaki et al (1981).

Estación	Aizaki						TSI FINAL	
	Ds (m)		PT (mg/l)		Chl a (mg/m3)			
L1	48,5	Mesotrófico	57,6	Mesotrófico	56,7	Mesotrófico	54,3	Mesotrófico
L2	51,1	Mesotrófico	58,0	Mesotrófico	56,3	Mesotrófico	55,2	Mesotrófico
L3	44,1	Mesotrófico	59,8	Mesotrófico	47,8	Mesotrófico	50,6	Mesotrófico
L4	42,4	Mesotrófico	60,8	Eutrófico	46,9	Mesotrófico	50,0	Mesotrófico
L5	42,0	Mesotrófico	62,4	Eutrófico	48,7	Mesotrófico	51,0	Mesotrófico
L6	43,7	Mesotrófico	60,4	Eutrófico	47,5	Mesotrófico	50,5	Mesotrófico
L7	42,8	Mesotrófico	63,4	Eutrófico	44,7	Mesotrófico	50,3	Mesotrófico
L8	43,4	Mesotrófico	61,4	Eutrófico	46,3	Mesotrófico	50,4	Mesotrófico
L9	43,0	Mesotrófico	64,4	Eutrófico	45,2	Mesotrófico	50,9	Mesotrófico
L10	41,4	Mesotrófico	57,0	Mesotrófico	45,6	Mesotrófico	48,0	Mesotrófico
L11	42,4	Mesotrófico	53,9	Mesotrófico	46,9	Mesotrófico	47,7	Mesotrófico
TSI FINAL	44,1	Mesotrófico	59,9	Mesotrófico	48,4	Mesotrófico	50,8	Mesotrófico

Fuente: Elaboración Propia.

6.2.2. Estado Actual del lago de acuerdo los valores propuestos por la OCDE (1982)

Otro método para la caracterización trófica del Lago Lanalhue, resultado de la comparación con los valores propuestos por la OCDE (1982) indican diferentes grados tróficos para el lago en función del punto de muestreo y el parámetro considerado. Así, los valores más preocupantes serían los de fósforo total tanto en L7, como L9, que son propios de un cuerpo de agua en condiciones hipereutróficas

superando los 100 mg/m³, condición similar a la del resto del lago, en las que, si bien las condiciones no son tan alarmantes, no bajan del estado eutrófico fijado para valores sobre 60 mg/m³, teniendo el lago un promedio de 83.7 mg/m³, caso distinto es el de la transparencia, donde los valores indican un estado Oligotrófico en gran parte del lago, con puntos de menor transparencia en el sector menos profundo del lago (L1, L2 y L3) (Parra, 2003), que se correspondieron con los puntos de mayor concentración de clorofila a en el área que recibe la escorrentía de Contulmo y Elicura. Los valores y su estado de acuerdo a los propuestos por la OCDE (1982) pueden observarse en los gráficos subsiguientes y se resumen en la tabla 11.

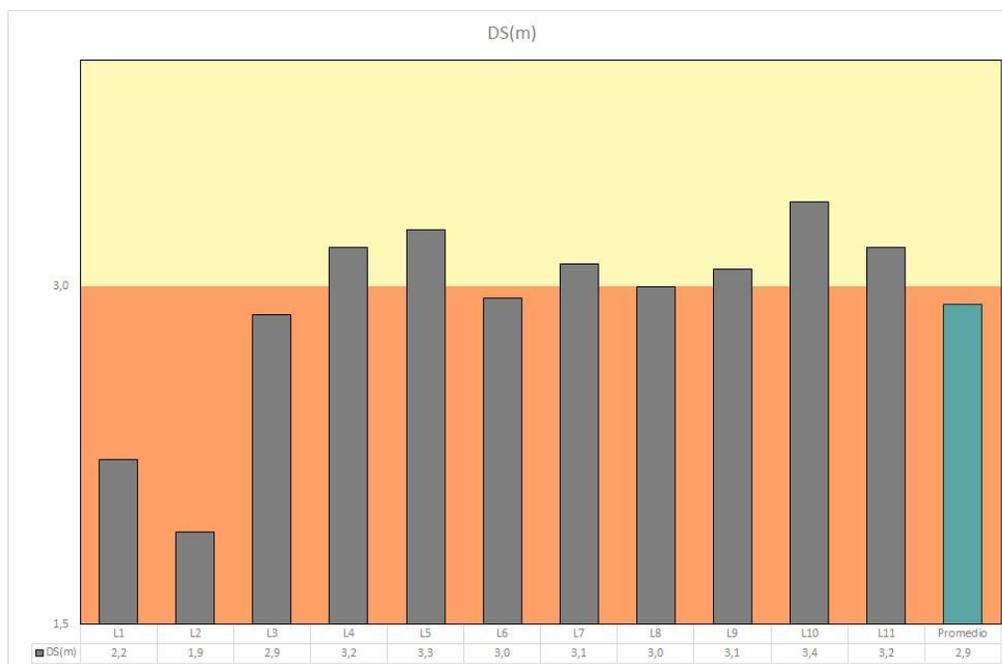


Gráfico 1. Comparación de las mediciones de Transparencia (Disco Secchi) en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la OCDE en 1981.
Fuente: Elaboración Propia

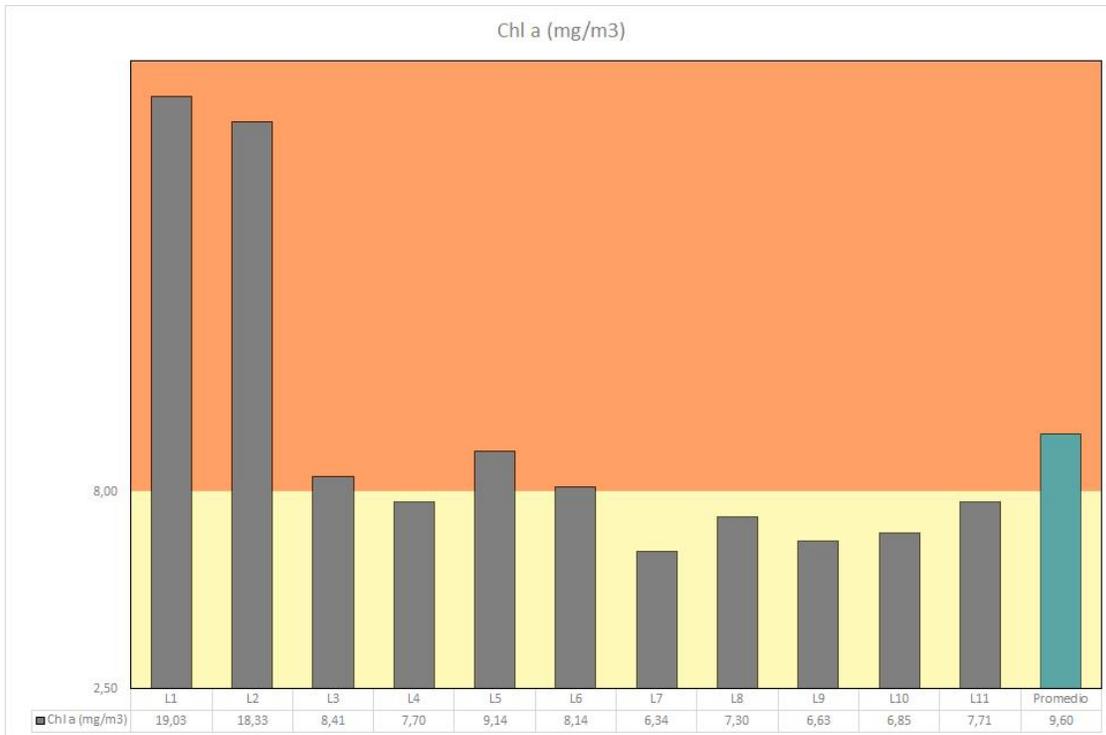


Gráfico 2. Comparación de las mediciones de Clorofila a en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la OCDE en 1981.

Fuente: Elaboración Propia.

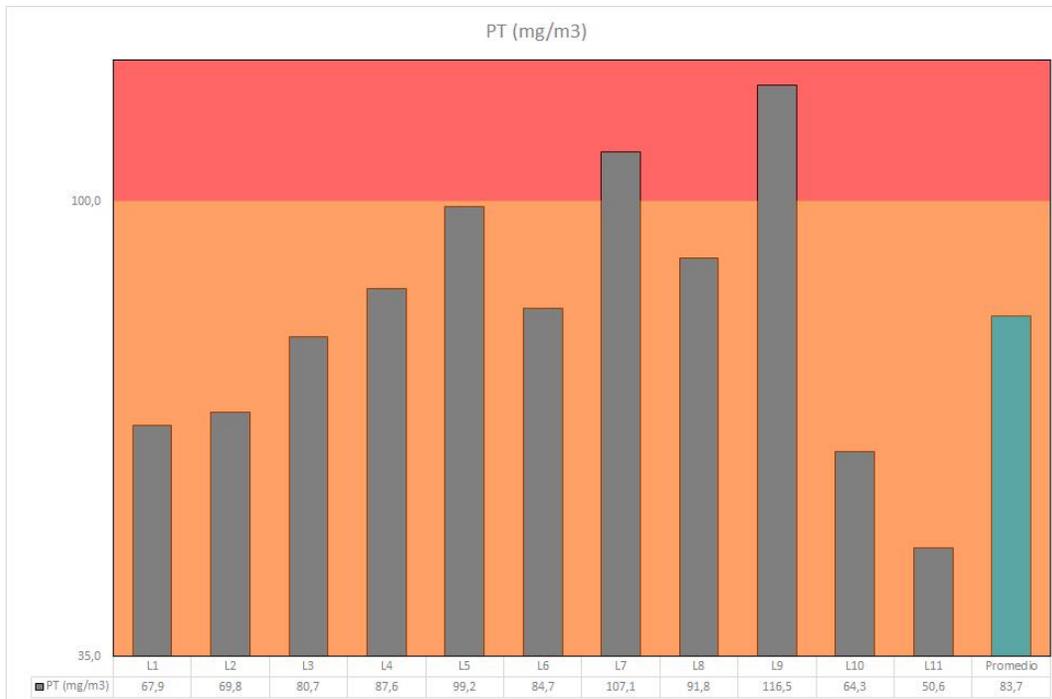


Gráfico 3. Comparación de las mediciones de Fosforo Total en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la OCDE en 1981.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 11. Resultado del análisis de valores de concentración de Fosforo Total (PT), clorofila a (Chl a) y Disco Secchi (Ds) para el lago Lanalhue, en función de los valores propuestos por la OCDE para los mismos parámetros.

Estación	OCDE					
	Ds (m)	PT (mg/m3)		Chl a (mg/m3)		
L1	2,2	Mesotrófico	67,9	Eutrófico	19,03	Mesotrófico
L2	1,9	Mesotrófico	69,8	Eutrófico	18,33	Mesotrófico
L3	2,9	Mesotrófico	80,7	Eutrófico	8,41	Mesotrófico
L4	3,2	Oligotrófico	87,6	Eutrófico	7,70	Oligotrófico
L5	3,3	Oligotrófico	99,2	Eutrófico	9,14	Mesotrófico
L6	3,0	Mesotrófico	84,7	Eutrófico	8,14	Mesotrófico
L7	3,1	Oligotrófico	107,1	Hipereutrófico	6,34	Oligotrófico
L8	3,0	Oligotrófico	91,8	Eutrófico	7,30	Oligotrófico
L9	3,1	Oligotrófico	116,5	Hipereutrófico	6,63	Oligotrófico
L10	3,4	Oligotrófico	64,3	Eutrófico	6,85	Oligotrófico
L11	3,2	Oligotrófico	50,6	Eutrófico	7,71	Oligotrófico
Lago Lanalhue	2,9	Mesotrófico	83,7	Eutrófico	9,60	Mesotrófico

Fuente: Elaboración Propia con datos no publicados del centro EULA.

6.2.3. Clasificación trófica de Lagos según Smith et al.

De forma complementaria a la clasificación trófica realizada mediante los valores propuesto por la OCDE, considerando la ausencia del Nitrógeno Total en el análisis, se realizó una comparación de los valores medidos, con los propuestos por Smith et al., en 1999. Se debe tener en cuenta que los lagos del hemisferio norte presentan valores de nitrógeno mucho más altos a los que podemos medir en los lagos del sur de Chile, más específicamente en este caso el lago Lanalhue, lo que de todas formas sirve como una referencia a considerar al momento de tomar medidas de control o mitigación según corresponda. Los resultados del análisis se presentan en los gráficos subsiguientes.

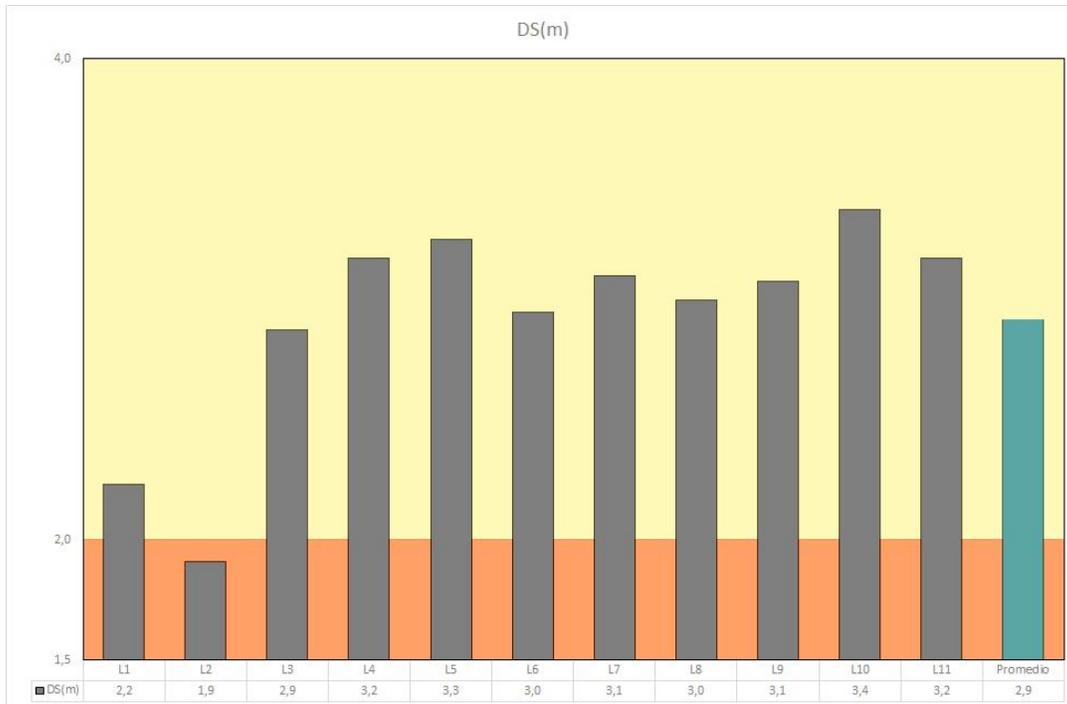


Gráfico 4. Comparación de las mediciones de Transparencia (Disco Secci) en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999.
Fuente: Elaboración Propia.

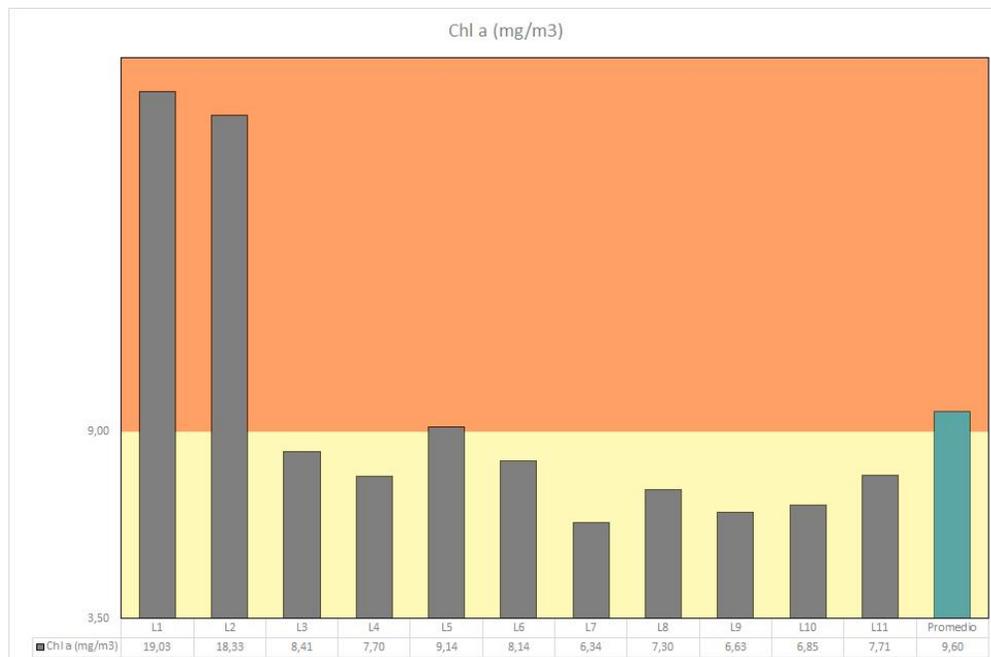


Gráfico 5. Comparación de las mediciones de Clorofila a en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999.
Fuente: Elaboración Propia.

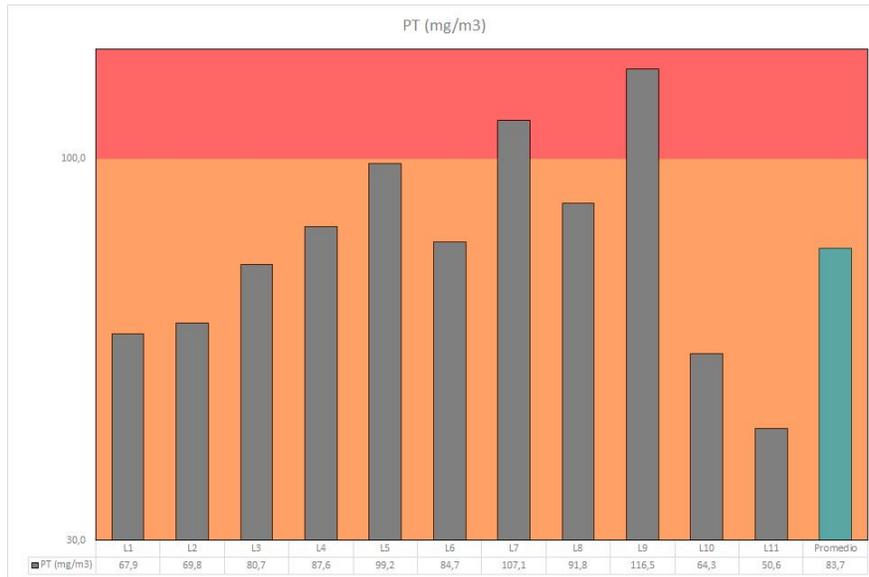


Gráfico 6. Comparación de las mediciones de Fosforo Total en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999.
Fuente: Elaboración Propia.

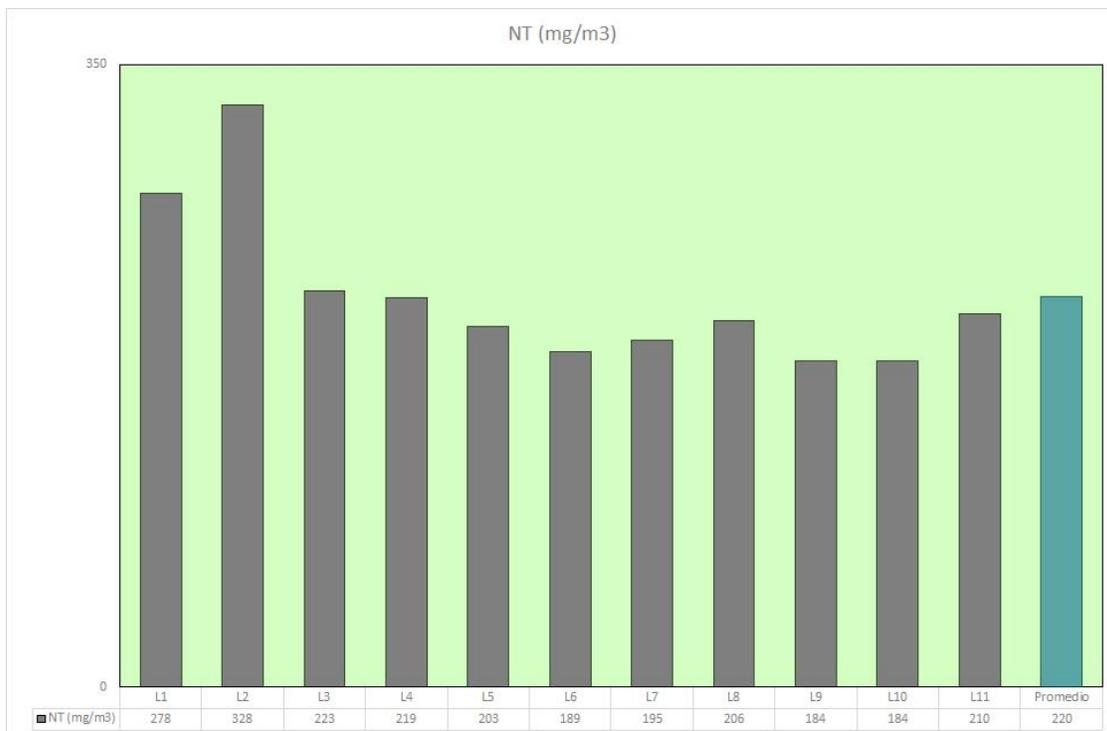


Gráfico 7. Comparación de las mediciones de Nitrógeno Total en el lago Lanalhue y los valores propuestos por la Smith et al., en 1999.
Fuente: Elaboración Propia.

En síntesis, tras la realización tanto del análisis TSI propuesto por Carlson (1977,1980) y modificado por Aizaki et al (1981) y en consideración con los valores propuestos por la OCDE (1982) y Smith et al. (1999), podemos categorizar al lago Lanalhue dentro de las 5 clases que serían: Ultraoligotrófico, Oligotrófico, Mesotrófico, Eutrófico, Hipereutrófico, como Mesotrófico, con tendencias claras a la eutrofización, sobre todo considerando los valores de fósforo presentes en el lago, los cambios en el uso de suelo producidos en la cuenca (Cisternas et al., 1999) juegan un papel crucial en el desarrollo de este fenómeno esto se respalda con lo descrito por (Parra, 2003), que ya había definido el lago como eutrófico, considerando la influencia de la zona urbana de Contulmo y su aporte por algún tiempo de aguas servidas y aguas lluvias, uno de los factores para el desarrollo de esta condición y la entrada de malezas acuáticas al lago. Esto se vuelve crítico en razón de que puede favorecer una elevada producción de materia orgánica por lo que pueden formarse condiciones hipoxicas en las aguas del fondo en temporada estival, esta materia orgánica se concentra principalmente en las cubetas extremas, habiendo parches de bajo contenido en la cubeta central y niveles máximos en la cubeta septentrional, específicamente en bahías protegidas de acuerdo a lo observado por (Urrutia et al., 2000).

6.2.4. Otras Normativas

Al comparar los datos analizados con otras normativas aplicables, se evidencia el cumplimiento de dichas normativas como lo son la NCH 1333, que establece Requisitos de Calidad de Agua para diferentes usos, el pH, por ejemplo, presenta valores que cumplen la norma, es importante normar el pH por su efecto sobre otros parámetros. Los metales pesados pueden formar compuestos, con carbonatos, sulfatos y materia orgánica, entre otros. En general estos compuestos presentan baja toxicidad para las especies acuáticas y una parte de estos precipita y se acumula en los sedimentos del fondo. Sin embargo, cuando baja el pH, los metales pesados pueden re suspenderse en la columna de agua y afectar a la biota acuática por su gran toxicidad (Khayatzaheh & Abbasi, 2010). Se ha observado gran

sensibilidad por parte de peces a la resuspensión de metales pesados en condiciones de bajo pH. (Greig et al. 2010).

Las claridades por otra parte indica la capacidad del agua de transmitir luz, necesaria para la fotosíntesis y el control de la temperatura. Esta capacidad puede ser disminuida por materiales en suspensión, coloidales u otras partículas muy finas, o por algas. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). También se detecta la presencia de colifórmes fecales en concentraciones toleradas por la norma, este parámetro es importante al momento de considerar la propagación de enfermedades para la salud de la población teniendo en cuenta el posible uso de este cuerpo de agua para la obtención de agua potable, finalmente las concentraciones de oxígeno disuelto dan cuenta de una buena condición del lago para el desarrollo de la vida acuática concentraciones muy bajas de oxígeno, inclusive anoxia, pueden afectar negativamente a las comunidades de zooplancton, peces y crustáceos presentes en estos ambientes, alterando significativamente la biodiversidad. Esta condición puede afectar también a los servicios ecosistémicos como turismo, acuicultura, pesca recreativa, camping, entre otros. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

También se presentan valores de temperatura en el rango de cumplimiento de la norma, lo que es importante considerando que, con el aumento de la temperatura, las aguas están más propensas a la eutrofización. (WHO & CE, 2002). En las tablas 12 y 13 se presentan los valores de concentración observados en el lago Lanalhue y su estado de cumplimiento de acuerdo a la NCH 1333, tanto para contacto directo como para la protección de la vida acuática.

Tabla 12. Estado de cumplimiento de la NCh 1333 para contacto directo en el Lago Lanalhue.

Estación	NCh 1333 (Contacto Directo)					
	pH		T° (°C)		Claridad (m)	
L1	7,1	Cumple	15,3	Cumple	2,23	Cumple
L2	7,1	Cumple	15,2	Cumple	1,91	Cumple
L3	7,3	Cumple	15,4	Cumple	2,88	Cumple
L4	7,3	Cumple	16,2	Cumple	3,18	Cumple
L5	7,2	Cumple	15,7	Cumple	3,25	Cumple
L6	7,3	Cumple	15,5	Cumple	2,95	Cumple
L7	7,3	Cumple	16,1	Cumple	3,10	Cumple
L8	7,2	Cumple	15,2	Cumple	3,00	Cumple
L9	7,2	Cumple	16,1	Cumple	3,08	Cumple
L10	7,0	Cumple	15,7	Cumple	3,38	Cumple
L11	6,9	Cumple	15,9	Cumple	3,18	Cumple
Lago Lanalhue	7,2	Cumple	15,7	Cumple	2,92	Cumple

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 13. Estado de cumplimiento de la NCh 1333 para la protección de la vida acuática en el Lago Lanalhue.

Estación	NCh 1333 (Vida Acuática)					
	C.F (NMP/100ml)		Oxígeno Disuelto (mgO/l)		pH	
L1	3,6	Cumple	9,2	Cumple	7,1	Cumple
L2	1,8	Cumple	9,1	Cumple	7,1	Cumple
L3	1,9	Cumple	9,8	Cumple	7,3	Cumple
L4	1,8	Cumple	9,1	Cumple	7,3	Cumple
L5	1,8	Cumple	9,3	Cumple	7,2	Cumple
L6	1,8	Cumple	9,2	Cumple	7,3	Cumple
L7	1,8	Cumple	9,2	Cumple	7,3	Cumple
L8	1,8	Cumple	8,4	Cumple	7,2	Cumple
L9	1,8	Cumple	9,3	Cumple	7,2	Cumple
L10	1,8	Cumple	9,0	Cumple	7,0	Cumple
L11	1,8	Cumple	9,1	Cumple	6,9	Cumple
Lago Lanalhue	2,0	Cumple	9,2	Cumple	7,2	Cumple

Fuente: Elaboración Propia.

6.3. Áreas de Vigilancia

6.3.1. Resultado del análisis multivariante

Los resultados del análisis multivariante, dieron cuenta de una mayor productividad biológica en la zona que corresponde a L1 y L2, representada por una mayor demanda biológica y química de oxígeno, una mayor turbidez por la alta concentración de sólidos suspendidos y coliformes fecales, además de la más alta concentración de nitrógeno total y nitrógeno en forma de nitrato. Esta forma química de nitrógeno es muy soluble, por eso está fácilmente disponible y aumenta los niveles de trófica de los ecosistemas. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Otra área fácilmente distinguible es la que componen L8, L10 y L11, en la que preocupa su alta concentración de ion amonio, que en condiciones de alcalinidad puede formar amoniaco el que puede llegar a ser muy tóxico para los peces y otros organismos (Ministerio del Medio Ambiente, 2017), por otra parte, está el clúster formado por L4, L5 y L6, con menor concentración de ion amonio y menor temperatura, en comparación a L9 y L7 que presentan las temperaturas más altas, que como se señaló anteriormente son un factor que favorece la eutrofización de los cuerpos de agua. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Quedando de forma aislada la estación correspondiente a L3.

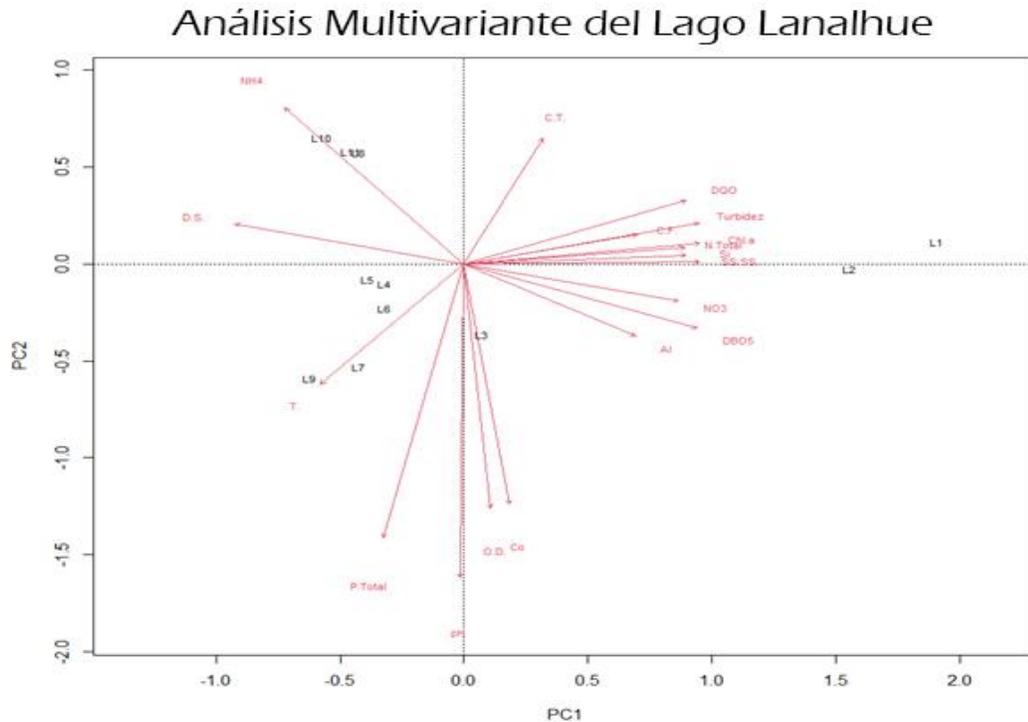


Gráfico 8. Análisis Multivariante de datos de calidad de agua y estaciones de monitoreo en el lago Lanalhue.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Delimitación de las áreas de vigilancia.

Las áreas de vigilancia quedarían delimitadas por las estaciones de monitoreo en función del análisis multivariante y en consideración de los criterios establecidos en la metodología, siendo el área de vigilancia 1 (A1) la monitoreada por L1 y L2, el área de vigilancia 2 (A2) la monitoreada por la estación de monitoreo L3, el área de vigilancia 3 (A3) la monitoreada por las estaciones L4, L5 y L6, el área de vigilancia 4 (A4), la monitoreada por las estaciones L7 y L9 y el área de vigilancia 5 (A5), la monitoreada por las estaciones L8, L10 y L11, como muestra la figura 12.

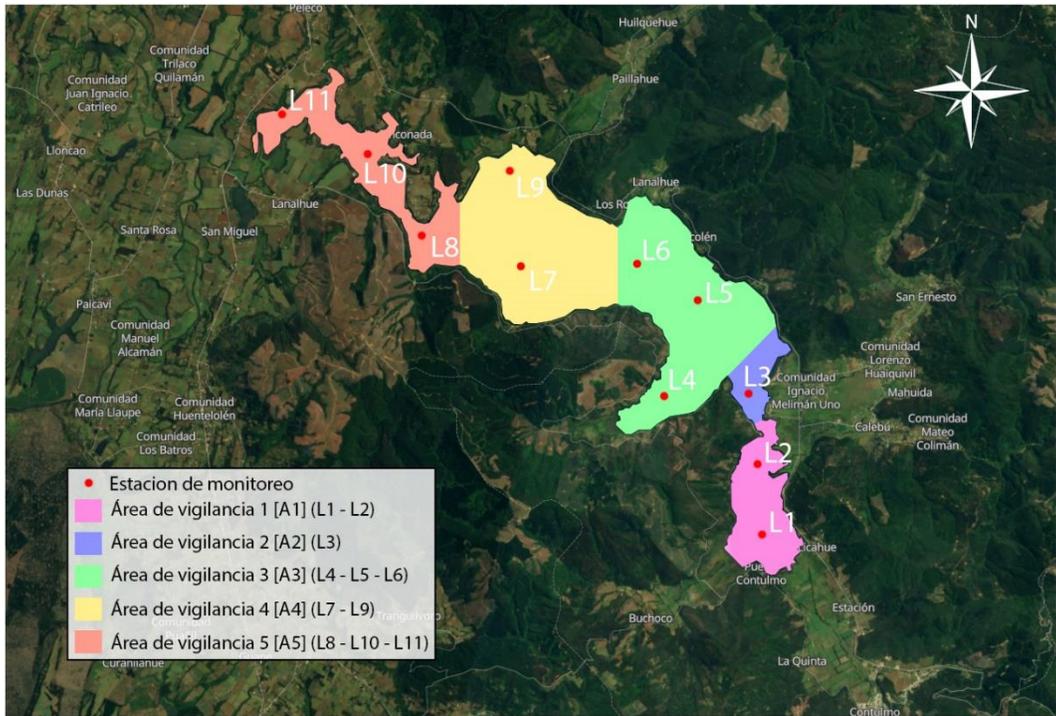


Figura 12. Áreas de vigilancia propuestas para el Lago Lanalhue.
Fuente: Elaboración propia.

De esta forma las Áreas de vigilancia quedarían configuradas de la siguiente manera, tal como se muestra en la figura 13.

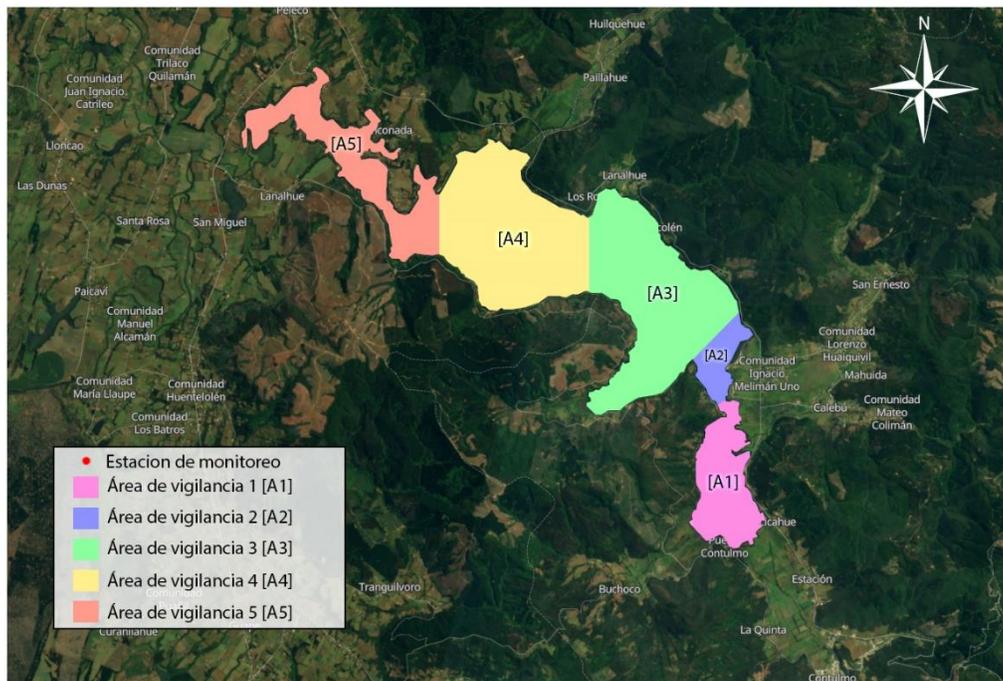


Figura 13. Áreas de Vigilancia propuestas para el Lago Lanalhue.
Fuente: Elaboración Propia.

El área de vigilancia 1 presenta los valores más altos de clorofila a, lo que podría explicarse por la sugerencia de no realizar labores de poda de la Egeria densa en el sector (CREA,2020), por ser un área de anidación para la mayor cantidad de aves acuáticas de la zona (CEA,2021), esto lo vuelve un área especialmente vulnerable a la eutrofización, lo que ya se puede ver reflejado en su baja transparencia medida con el Disco secchi y la concentración de fósforo en niveles eutróficos. Mientras el área de vigilancia con los valores más altos de fósforo total sería A4 con valores sobre los 100mg/m³ que indican el límite de la Hipereutrófia, lo que se podría entender por la caracterización morfométrica y sedimentológica que presenta el lago (Urrutia et al., 2000) y los aportes de fósforo provenientes de la agricultura, uso de suelo predominante en la cuenca tras el forestal (CONAF, 2021), sin desmerecer que es también junto con A5 el área de vigilancia con los menores niveles de concentración de clorofila a y mayor claridad medida con el disco secchi, lo que podría entenderse por la mayor profundidad de estas secciones del lago, lo que imposibilita la colonización de macrofitas enraizadas en la zona pelágica, pero que preocupa en la zona más profunda por la posible disminución de los niveles de oxígeno. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Es importante destacar que todas las áreas de vigilancia presentaron niveles elevados de fósforo total, lo que recalca la incidencia de la cuenca sobre la calidad de agua del lago y como los cambios en el uso de suelo han ido modificando los parámetros de calidad producto de la acción antrópica desde la época prehispánica hasta nuestros días. (Parra, 2003; Urrutia et al., 2000). Los parámetros indicadores del estado trófico de las áreas de vigilancia y su estado en función de los valores propuestos por la OCDE, se resumen en la tabla 14.

Tabla 14. Valores de Parámetros del estado trófico para cada área de vigilancia y su estado en función de los valores propuestos por la OCDE.

AV	Valores					
	Ds (m)	PT (mg/m3)		Chla (mg/m3)		
A1	2,1	Mesotrófico	68,9	Eutrófico	18,7	Mesotrófico
A2	2,9	Mesotrófico	80,7	Eutrófico	8,4	Mesotrófico
A3	3,1	Oligotrófico	90,5	Eutrófico	8,3	Mesotrófico
A4	3,1	Oligotrófico	111,8	Hipereutrófico	6,5	Oligotrófico
A5	3,2	Oligotrófico	68,9	Eutrófico	7,3	Oligotrófico

Fuente: Elaboración Propia.

6.4. Valores umbrales de los parámetros más importantes a normar

Finalmente se establecieron los valores umbrales de los parámetros más importantes a normar, considerando el estado actual del lago, las áreas de vigilancia y los criterios de conservación propuestos por la guía para la elaboración de normas secundarias de calidad ambiental. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

6.4.1. Escenario 1: Optimo Ambiental

El escenario 1, considerado el óptimo ambiental, propone límites para la concentración de fósforo de un máximo de 10 mg/m³, lo que significaría que toda el área del lago estaría saturada para la norma de calidad en este parámetro, para el cumplimiento de la norma se deberían reducir los niveles de fósforo total en el lago en promedio un 88.2%, por otra parte, las experiencias internacionales dan testimonio de que una disminución en la carga de fósforo trae consigo una disminución de los niveles de clorofila y mejoras en la transparencia (EPA, 1990), los criterios para el establecimiento de los límites de parámetros para el escenario 1 propone que los niveles ultraoligotrófico y oligotrófico se mantienen, mientras que los niveles mesotrófico, eutrófico e hipertrófico bajan al nivel oligotrófico, tal como se resume en la tabla 15.

Tabla 15. Valores de parámetros propuestos para las áreas de vigilancia del lago Lanalhue de acuerdo al escenario óptimo Ambiental.

AV	Óptimo Ambiental		
	Valores Propuestos		
	Ds (m)	PT (mg/m ³)	Chl a (mg/m ³)
A1	> 3,0	< 10,0	< 8,0
A2	> 3,0	< 10,0	< 8,0
A3	> 3,0	< 10,0	< 8,0
A4	> 3,0	< 10,0	< 8,0
A5	> 3,0	< 10,0	< 8,0
Los valores en clase 1 y clase 2 se mantienen en su clase, todos en clase 3, 4 y 5 se bajan a clase 2.			

Fuente: Elaboración Propia

6.4.2. Escenario 2: Intermedio

El escenario 2, considerado intermedio, propone una disminución del 58.4% de la concentración observada de fósforo total, proponiendo un límite máximo de 35 mg/m³ para este parámetro, como se ha mencionado anteriormente disminuciones en la carga de fósforo total, han significado una subsiguiente mejora de la calidad del agua representada por otros parámetros como la clorofila y la claridad (EPA, 1990), el criterio para la determinación de estos valores es, que en este escenario, los niveles ultraoligotróficos y oligotróficos se mantienen, el nivel mesotrófico baja a oligotrófico y los niveles eutrófico e hipereutrófico bajan a mesotrófico, como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Valores de parámetros propuestos para las áreas de vigilancia del lago Lanalhue de acuerdo al escenario Intermedio.

AV	Intermedio		
	Valores Propuestos		
	Ds (m)	PT (mg/m ³)	Chl a (mg/m ³)
A1	> 3,0	< 35,0	< 8,0
A2	> 3,0	< 35,0	< 8,0
A3	> 3,0	< 35,0	< 8,0
A4	> 3,0	< 35,0	< 8,0
A5	> 3,0	< 35,0	< 8,0
Clase 1 y clase 2 se mantienen en su clase. Clase 3 se baja a clase 2. Clase 4 y 5 se bajan a clase 3.			

Fuente: Elaboración propia.

6.4.3. Escenario 3: Menor protección en áreas contaminadas

En el escenario 3, considerado de menor protección ambiental, se establece un criterio que indica que los valores de las clases ultraoligotróficas, oligotróficas y mesotróficas se mantienen en su nivel y las de las clases eutróficas e hipereutróficas bajan al nivel de mesotróficas, permite valores de hasta 1.5m de transparencia medidos con el Disco secchi y 25 mg/m³ de clorofila a, que son cualitativamente peores que los valores medidos en el propio lago, por otro lado, si mejora las condiciones eutróficas para el parámetro de fósforo total bajando el nivel a un límite de 35 mg/m³, valor que representaría una mejora en la calidad de agua para este parámetro, los resultados de la aplicación de los criterios del escenario 3 se resumen en la tabla 17.

Tabla 17. Valores de parámetros propuestos para las áreas de vigilancia del lago Lanalhue de acuerdo al escenario de menor protección.

AV	Menor Protección		
	Valores Propuestos		
	Ds (m)	PT (mg/m ³)	Chla (mg/m ³)
A1	> 1,5	< 35,0	< 25,0
A2	> 1,5	< 35,0	< 25,0
A3	> 3,0	< 35,0	< 25,0
A4	> 3,0	< 35,0	< 8,0
A5	> 3,0	< 35,0	< 8,0

Clase 1, clase 2 y clase 3 se mantienen en su clase. Clase 4 y 5 se bajan a clase 3.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.4. Otros parámetros

Para los demás valores límite, se propone considerar los establecidos en la NCh 1333, de manera de resguardar parámetros como la temperatura, que puede influir en el aumento de la actividad trófica, el pH que en valores sobre 8.5 puede incidir en las formas químicas que toma el nitrógeno en la columna de agua (Farnsworth-lee & Baker, 2000) y el oxígeno disuelto vital para el desarrollo de la biodiversidad (Ministerio del Medio Ambiente, 2017), los valores propuestos de pH, temperatura y oxígeno disuelto se resumen en la tabla 18.

Tabla 18. Valores propuestos para otros parámetros.

AV	Otros Parámetros		
	pH	T (°C)	Oxígeno Disuelto (mgO/l)
A1	>7 , < 9	16,0	> 9,0
A2	>7 , < 9	16,0	> 9,0
A3	>7 , < 9	16,0	> 9,0
A4	>7 , < 9	16,0	> 9,0
A5	>7 , < 9	16,0	> 9,0

Fuente: Elaboración Propia.

7. CONCLUSIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad, el agua siempre tuvo un rol primordial como un recurso central y eje civilizatorio de nuestra especie, el abastecimiento y control de las condiciones de esta fue siempre una preocupación para cada uno de los imperios que se alzaron y decayeron a lo largo de nuestros tiempos. Aun en nuestra época y en muchos territorios dentro y fuera de las fronteras de nuestro país, existen comunidades a las que se les dificulta acceder al agua en la cantidad y calidad propuestas por organismos internacionales como la OMS, además, considerando el contexto del cambio climático y la sequía que afecta tanto a Chile como el Mundo, se espera que este escenario sea cada vez más adverso y, por lo tanto, es oportuno tomar medidas adecuadas para detener el deterioro de los cuerpos que sirvan como reserva de agua dulce, en post de asegurar el abastecimiento tanto de las generaciones actuales como futuras.

Las cuencas hidrográficas que en palabras simples concentran la oferta de agua dulce disponible, están siendo degradadas y los servicios ecosistémicos que ofrecen se reducen y deterioran proporcionalmente a esta degradación, disminuyendo la capacidad de las cuencas para sustentar las actividades que se desarrollan en ella, es importante en ese sentido valorizar los servicios ecosistémicos que ofrecen, para tomar medidas en concordancia a esa valorización, evitando que se vea comprometido el desarrollo de las comunidades que dependen de estos servicios o que se apoyan de estos para el desarrollo de otro tipo de actividades como el turismo o la recreación.

Al día de hoy, no es discutible el impacto que la actividad antrópica tiene sobre los ecosistemas, por otra parte, durante muchos años estas actividades no fueron evaluadas en nuestro país como sí lo son actualmente, por lo que muchos ecosistemas fueron dañados en formas y magnitudes desconocidas, en ese sentido, es muy importante la realización de esfuerzos que ayuden a clarificar las condiciones actuales de algunos ecosistemas que se encuentran en esta situación,

preocupante es el caso de aquellas cuencas hidrográficas en las que se ve comprometida su capacidad para el sustento de la biodiversidad, por ejemplo, por la desertificación provocada por los cambios de uso de suelo, aumento de las tasas de erosión y consiguiente deterioro de la calidad del agua.

Uno de los factores principales que ha propiciado la aparición de estas condiciones en la cuenca del lago Lanalhue, es el cambio de la cobertura vegetal nativa por plantaciones forestales, que aumentan significativamente el aporte de nutrientes desde la cuenca de drenaje a los cuerpos de agua de la cuenca por escorrentía superficial, fenómeno que se acrecienta durante los periodos de tala y manejo de estos predios forestales. Si además consideramos los aportes realizados por la agricultura, no es de extrañar que la cuenca del lago Lanalhue se encuentre en un avanzado estado de envejecimiento o eutrofización, diferente al que presentaría con mejores condiciones en su cuenca de drenaje o con una presión antrópica regulada por una evaluación ambiental oportuna.

Las experiencias internacionales, como las del Lago Washington, han evidenciado la relación entre los altos niveles de nutrientes como el fósforo o nitrógeno y el afloramiento problemático de algas en cuerpos de agua, relacionado al mismo tiempo con altas concentraciones de clorofila y la disminución de la transparencia, lo que impide el traspaso de la luz y genera condiciones de hipoxia en los fondos lacustres o en la zona de mayor profundidad. Esta disminución de los niveles de oxígeno muchas veces llega a concentraciones que no son capaces de sustentar biodiversidad, pudiendo disminuir está a niveles críticos si no se toman las medidas oportunas para evitarlo.

Por otra parte, los casos del Lago Onondaga o la Reserva Wahnbach demuestran lo costoso que puede ser el restaurar los ecosistemas cuando están demasiado dañados o no se realizan esfuerzos de conservación en el momento oportuno, en el caso específico del Lago Lanalhue, las condiciones observadas indican que aún no es tarde para tomar medidas que tengan como objetivo preservar las condiciones

que permiten el desarrollo de biodiversidad en la cuenca y es oportuna la implementación de medidas que tengan como objetivo recuperar aquellas condiciones que se estén perdiendo o se hayan perdido, estableciendo límites a los valores de parámetros que sobrepasan lo tolerable en función de los criterios de preservación y cuidado del medio ambiente y la biodiversidad.

La alta concentración de fósforo total medida en el lago Lanalhue parece indicar una tendencia al deterioro de la calidad del agua del lago, principalmente en las áreas más someras, que presentan condiciones ideales para la colonización de macrofitas enraizadas, acelerando la aparición de problemas asociados a la eutrofización, la dificultad de manejar estos crecimientos de algas aumenta debido a que algunas de estas áreas coinciden con áreas de anidación de muchas especies de aves acuáticas, lo que las transforma en áreas de interés ecológico, en las que se debe evitar, en la medida de lo posible, la realización de acciones que invadan o perjudiquen los procesos que permiten el desarrollo de estas dinámicas ecológicas. El deterioro de la calidad del agua en el lago puede explicarse por los usos que se le da a su cuenca de drenaje, además, el desarrollo de línea de costa indica irregularidad en los bordes del cuerpo de agua, lo que en términos prácticos favorecería la formación de ambientes ideales para la proliferación de algas, por estar protegidos del oleaje. Además, aumenta la posibilidad de aporte de material aloctono y el intercambio térmico agua-tierra.

Por otra parte, los parámetros morfométricos de la cuenca dan cuenta de un drenaje eficiente de esta, considerando que el tiempo de residencia hidráulica es de aproximadamente cuatro horas, lo que permitiría el traspaso rápido de nutrientes desde la cuenca de drenaje al Lago Lanalhue propiamente tal; pero al mismo tiempo indican una dificultad para los procesos de decantación de sedimentos, lo que favorecería la restauración ecológica una vez tomadas las medidas enfocadas en la disminución en el aporte de nutrientes, de acuerdo a lo observado y analizado de experiencias internacionales.

Tras analizar las condiciones actuales del lago, se decidió de acuerdo a la metodología propuesta en esta investigación, establecer cinco áreas de vigilancia en función de parámetros físico-químicos, en ese sentido es ideal contar con un volumen de datos robusto que permita delimitar las áreas de vigilancia de la manera más adecuada. Además, al momento de definir las áreas es importante considerar los criterios ecológicos propuestos en la guía para la elaboración de normas secundarias de calidad ambiental y otros, con el fin de sistematizar todos los datos disponibles para poder considerar la mayor cantidad de factores posibles.

La calidad de agua en el lago Lanalhue varía de oligotrófico a eutrófico, dependiendo del parámetro que se considere y la metodología de evaluación, llegando a presentar valores hipereutróficos de fósforo total en algunas zonas si se toman en cuenta los valores propuestos por la OCDE en 1982, razón que sustenta la implementación de valores que limiten las condiciones que perjudiquen el desarrollo de la biodiversidad y puedan comprometer los servicios ecosistémicos que ofrece el Lago a las comunidades locales, principalmente el valor turístico y recreativo, más aun si se considera la perspectiva indígena, que valoriza de acuerdo a su cultura tanto al cuerpo de agua individualmente, como al ecosistema en su conjunto, por lo que no se debe dejar de lado las diferentes visiones e intereses que convergen en el territorio.

De acuerdo a lo analizado en esta investigación se puede concluir entonces que:

- El Lago Lanalhue presenta las condiciones para establecer en él, una norma secundaria de calidad para la protección de la biodiversidad presente en el lago.
- Evaluar el estado trófico y el grado de contaminación de los sistemas lacustres se vuelve trascendente en la gestión ambiental territorial, ya que es el punto de partida para tomar medidas de restricción de uso, recuperación o restauración cuando corresponda.

- En el Lago Lanalhue corresponde establecer medidas de restauración del ecosistema y recuperación de la calidad del agua, ya que los valores umbrales determinados por esta investigación se encuentran sobrepasados. En otras palabras, la norma de calidad estaría saturada, por lo que corresponde un plan de descontaminación.

Se recomienda comenzar en la cuenca un proceso de restauración ecológica y evaluar la posibilidad de establecer en ella áreas de protección de la biodiversidad, santuarios de la naturaleza y/o definir el área como una zona de desarrollo indígena y protección de la biodiversidad.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Shafy, H.I. & M.S.M. Mansour, 2015. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum* (2016) 25, pp. 107–123.

Ahmed, Mukhtiar & Ahmad, Taufiq & Liaquat, Muhammad & Abbasi, Kashif & Abdel-Farid, Ibrahim & Jahangir, Muhammad. (2016). Tissue specific metal characterization of selected fish species in Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*.

Aizaki, M. O. Otsuki, M. Fukushima, M. Hosomi and Muraoka. (1981). Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters. *Verh. Internat. Verein Limnol.* 21:675-681.

Almanaza V., Figueroa R., Parra O., Fernandez X., Baeza C., Yañez J., Urrutia R., (2017) Bases limnológicas para la gestión de los lagos urbanos de Concepción, Chile. *Latinamerican journal of aquatic research*, vol.44 no.2.

Abu Hilal, A. & N. Ismail, 2008. Heavy Metals in Eleven Common Species of Fish from the Gulf of Aqaba, Red Sea. *Jordan Journal of Biological Sciences*. Vol. 1, Nr. 1, Mar. 2008, ISSN 1995-6673, pp 13–18.

Bellair, P. & CH. Pomerol. 1977. *Elementos de Géologie*. A. Collin.

Birge, W. J. & J. A. Black, 1977. Sensitivity of Vertebrate Embryos to Boron Compounds. EPA-560/1-76-008, EPA, Office of Toxic Substances, Washington D.C.

- BRDJANOVIC D, M LOOSDRECHT, C HOOIJMANS, G ALAERTS & J HIJNEN (1997) Temperature effects on physiology of biological phosphorus removal. *Journal of Environment Engineering* 123(2) 144-153.
- CAMPOS, H., W. STEFFEN, G. AGÜERO, O. PÁRRA. & L. ZÚÑIGA, L. 1992. Limnology of lake Ranco (Chile). *Limnológica*, 22 (4): 337-353.
- CAMPOS, H., V. H. RUIZ, J. F. GAVILÁN & F. ALAY. 1993. Peces del Río Biobío. Serie Publicaciones de Divulgación EULA, 5.
- CAMPOS, H. 1993. Procesos de eutroficación en lagos del sur de Chile. Estimación de los efectos de la acuicultura intensiva. Seminario Internacional Acuicultura y Medio Ambiente Fundación Chile.
- Canadian Council of Ministers of the Environment, 2009. Boron - Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life Canadian Environmental Quality Guidelines, sin año. Descarga: <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html>, octubre 2017.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22: 361-369.
- CEPAL, 2002 Serie Recursos Naturales e Infraestructura N° 47 2002. "Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica". Dourojeanni, A., Jouravlev A., Chávez G.
- Centro EULA. (2018). Programa de Ordenamiento y Gestión Territorial para la cuenca del Lago Lanalhue.
- CISTERNAS, M., A. ARANEDA, O. RETAMAL & R. URRUTIA. 1997. Variaciones Históricas en las tasas de erosión-sedimentación de un cuerpo lacustre antropizado: Utilización de geocronología radioisotópica. *Revista de Geografía Norte Grande*, 24: 151-156.
- CISTERNAS, M., P. DEBELS, P. MARTÍNEZ & R. SANHUEZA. 1999a. Cambios Históricos en el Uso del Suelo de una Pequeña Cuenca Lacustre de Nahuelbuta. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 44: 141-153.
- CISTERNAS, M., P. MARTÍNEZ, C. OYARZÚN. & P. DEBELS. 1999b. Caracterización del proceso de reemplazo de vegetación nativa por plantaciones forestales en una cuenca lacustre de la Cordillera de Nahuelbuta, VIII Región, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 72: 661-676.
- CISTERNAS, M., L. TORRES, R. URRUTIA, A. ARANEDA & O. PARRA. 2000. Comparación ambiental mediante registros sedimentarios entre las condiciones prehispánicas y actuales de un sistema lacustre. *Revista Chilena de Historia Natural*, 73: 151-162.

CISTERNAS, M., A. ARANEDA, P. MARTINEZ & S. PEREZ. 2001. Effects of historical land use on sediment yield from a lacustrine watershed in central Chile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(1): 63-76.

Collier, T.K., B.F. Anulacion, M.R. Arkoosh, J.P. Dietrich, J.P. Incardona, L.L. Johnson, G.M. Ylitalo & M.S. Myers, 2014. Effects on Fish of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Naphthenic Acid Exposures. *Organic Chemical Toxicology of Fishes: Volume 33, Fish Physiology*, 4, pp. 195-255.

CRUCES F, R URRUTIA, A ARANEDA, L TORRES, M CISTERNAS & W VYVERMAN (2001) Evolución trófica de Laguna grande de san Pedro (VIII Región, Chile) durante el último siglo, mediante el análisis de registros sedimentarios, *Revista Chilena de Historia Natural* 74:405-416.

D.S. N°38/2012. Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión. MMA.

D.S. N°39/2012. Reglamento para la Dictación de Planes de Prevención y Descontaminación. MMA.

D.S. N°40/2012. Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. MMA.

D.S. N°46/2002. Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. MINSEGPRES.

D.S. N°90/2000. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. MINSEGPRES.

D.S. N°93/1995. Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental. MINSEGPRES.

D.S. N°320/2001. Reglamento Ambiental para la Acuicultura. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. Última versión 2016.

Dourojeanni R., A., Jouravlev, A. S., & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica. Naciones Unidas, CEPAL, Div. de Recursos Naturales e Infraestructura.

FAO, 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO riego y drenaje – 55. Canada.

FAO, 2002. Los Fertilizantes y su Uso, cuarta edición, ISBN 92-5-304414-4.

FAO, 2003. Gestión de la calidad de agua. La acción de la FAO sobre la calidad de las aguas. 78 pp.

FARNSWORTH-LEE L & L BAKER (2000) Conceptual model of aquatic decay and ammonia toxicity for shallow lakes. *Journal of Environmental Engineering*. 126(4): 241-259.

Franco, D. P. M., & Manzano, J. Q. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS* 78, 25–33.

Ferrais, F., Bonilla, R., (1981). Arauco-Lebu. Mapas Geológicos Preliminares de Chile. IGG N°6.

Fuenzalida, H. (1971). *Clima: Geografía económica de Chile*. Texto refundido. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 99-152.

Gobierno Regional del Biobío. (2014). PROYECTO ANÁLISIS DE RIESGOS DE DESASTRES Y ZONIFICACIÓN COSTERA, REGIÓN DEL BIOBIO.

G. V. Madhuri, V. S.S.N Kantamreddi & L. N.S. Prakash Goteti (2012) Promoting higher order thinking skills using inquiry-based learning, *European Journal of Engineering Education*, 37:2, 117-123, DOI.

Hellawell, J.M.: *Biological indicators of freshwater pollution and environmental management*. Elsevier Applied Science. pp. 546 (1989).

Janus, L. L. and Vollenweider, R. A. (1981). *The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Summary Report - Canadian Contribution*. Inland Waters Directorate Scientific Series No. 131, Ministerio del Medio Ambiente del Canadá, Burlington, Ontario, Canadá.

Ley N° 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. *Diario Oficial de la República de Chile*, Santiago, Chile, 09 de marzo de 1994.

Ministerio del Medio Ambiente, 2017. *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas*. Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile.

Mellado, N. (2019). *APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE OPORTUNIDADES DE RESTAURACIÓN (ROAM) PARA LA RECUPERACIÓN DEL ECOSISTEMA DE LA CUENCA DEL LAGO LANALHUE: HABILITACIÓN PROFESIONAL [Tesis]*. Universidad de Concepción.

Margalef, R. (1981). *Ecología*. Editorial Planeta. Barcelona. 252 pp.

Nebel, B. J. y Wright, R. T. (1999). *Ciencias Ambientales: Ecología y Desarrollo Sostenible*. 6th ed. México: Pearson-Prentice Hall. 698 pp.

Norma Chilena 409. Norma de Calidad del Agua Potable. Ministerio de Salud.

Norma Chilena 1333. Requisitos de Calidad de Agua para diferentes usos. Ministerio de Secretaria General de la Presidencia.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) 1982. The OCDE Listo Social Indicators, Paris.

Parra, O., Valdovinos, C., Urrutia, R., Cisternas, M., & Habit, E. (2003). Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central, 22, 51–83.

Reyes, L (2018). Determinación de los coeficientes de exportación de nutrientes en la cuenca del lago Lanalhue, región del Biobío, Chile (Tesis).

TUNDISI, J. G., Y. SAIJO & T. SUNAGA. 1997. Ecological effects of Human Activities in the Middle Rio Doce Lakes. In: Limnological Studies on the Rio Doce Valley Lakes, Brazil. J. G. Tundisi& Y. Saigo.

Urrutia, R., Cisternas M., Araneda, A., Retamal, O., Parra, O., Mardones, M. (2000) Caracterización morfométrica y sedimentológica de cinco lagos costeros en la VIII región, Chile. Revista Geografica de Chile Terra Australis.

Vollenweider, R. A. & Janus, L. L. 1981. Statistical models for predicting hypolimnetic oxygen Research Institute. Canada Centre for Inland Waters. Ontario. 38 p.

Vollenweider, R. A., F. Giovanardi, G. Montanari & A. Rinaldi. (1998). Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9:329- 357.