



DEPTO. CONSERVACIÓN Y  
PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS  
Proceso N°11881261

**MINUTA:** DCPRH N° 10/  
**MAT.:** Análisis de la relación entre la concentración de clorofila “a” y la transparencia de los lagos monitoreados por la red de calidad de la DGA, y elaboración de un ranking de lagos basado en el estado trófico otorgado por estos parámetros.

**SANTIAGO,** 10 de abril de 2018.

## Índice de contenido

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
1.1    Objetivos .....	6
<b>II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>6</b>
2.1    Base de datos.....	6
2.2    Relación entre la transparencia y clorofila “a” .....	7
2.3    Índices de estado trófico .....	7
2.2.1    Índice de Carlson .....	7
2.2.2    Índice de Smith .....	9
2.2.3    Índice de Vollenwaider .....	9
2.4    Ranking de lagos .....	10
<b>III. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>11</b>
3.1    Relación entre clorofila “a” y transparencia.....	11
3.2    Ranking de Lagos.....	13
3.2.1    Ranking a partir del Índice de Carlson (TSI).....	13
3.2.2    Ranking a partir de la tasa de cambio del Índice de Carlson (TSI) .....	14
<b>IV. COMENTARIOS FINALES.....</b>	<b>17</b>
<b>V. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>17</b>
<b>VI. REFERENCIAS .....</b>	<b>19</b>
<b>VII. ANEXO.....</b>	<b>22</b>
Anexo A.    Regresión lineal de la relación entre disco Secchi y clorofila “a” .....	22
Anexo B.    Tendencia del índice de Carlson (TSI) a través del tiempo. ....	33

### Índice de tablas

TABLA 1. RANGO DE VALORES DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) SEGÚN EL ESTADO TRÓFICO Y DESCRIPCIÓN CORRESPONDIENTE (MMA 2011; MMA 2013). ADEMÁS, SE ASIGNA UN COLOR PARA CADA ESTADO. ..	8
TABLA 2. FÓRMULAS PARA ESTIMAR EL INDICADOR TRÓFICO DE CADA VARIABLE Y EL ÍNDICE TOTAL. ....	8
TABLA 3. RANGO DE VALORES DE CADA PARÁMETRO CORRESPONDIENTE A CADA ESTADO. SMITH ET AL. 1999. ....	9
TABLA 4 MODELO LINEAL (LOG -LOG) Y VALORES DE PORCENTAJE DE VARIANZA (R <sup>2</sup> ) DE TRANSPARENCIA EXPLICADA POR LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA “A” PARA CADA LAGO ESTUDIADO COMO PARA EL TOTAL DE LAGOS (*LAGOS). ADEMÁS, SE INDICA LA SIGNIFICANCIA DE ESTA RELACIÓN (P) COMO LA CANTIDAD DE DATOS CON LA CUAL SE TRABAJÓ (N). ....	12
TABLA 5: RANKING SEGÚN EL VALOR DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL ÚLTIMO AÑO REGISTRADO DE CADA LAGO. SE INDICA ESTADO TRÓFICO CORRESPONDIENTE AL TSI Y AL AÑO AL CUAL CORRESPONDE ESE REGISTRO (UAR: ÚLTIMO AÑO REGISTRADO). ....	13
TABLA 6. RANKING SEGÚN LA MAGNITUD DEL CAMBIO DE LA PENDIENTE Y LA SIGNIFICANCIA DE ESTA. ADEMÁS, SE INDICA EL ESTADO EN EL CUAL SE ENCUENTRA EL LAGO SEGÚN SU ULTIMO REGISTRO Y LA CANTIDAD DE AÑOS CON LA CUAL SE REALIZÓ EL ANÁLISIS (CA). ....	15

### Índice de figuras

FIGURA 1:REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA LA LAGUNA ACULEO. ....	22
FIGURA 2: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO CABURGUA .....	22
FIGURA 3: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO CALAFQUEN .....	23
FIGURA 4: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO CHAPO .....	23
FIGURA 5: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO COLICO.....	24
FIGURA 6: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO LANALHUE .....	24
FIGURA 7: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO LENCAN.....	25
FIGURA 8: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO LLANQUIHUE .....	25
FIGURA 9: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO LLONCAO .....	26
FIGURA 10: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO MAIHUE .....	26
FIGURA 11: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO NELTUME.....	27
FIGURA 12: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO PANGUIPULLI.....	27
FIGURA 13: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO PUYEHUE .....	28
FIGURA 14: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO RANCO .....	28
FIGURA 15: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO RIÑIHUE .....	29
FIGURA 16: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO RUPANCO .....	29
FIGURA 17: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO SAN PEDRO.....	30
FIGURA 18: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO TODOS LOS SANTOS 30	
FIGURA 19: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO TORCA.....	31
FIGURA 20: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO VICHUQUÉN.....	31
FIGURA 21: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA EL LAGO VILLARRICA .....	32
FIGURA 22: REGRESIÓN LINEAL ENTRE DISCO SECCHI Y CLOROFILA “A” PARA TODOS LOS LAGOS. ....	32
FIGURA 24: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA LA LAGUA DE ACULEO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	33
FIGURA 25: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO CABURGUA, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	33

FIGURA 26: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO CALAFQUEN, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	34
FIGURA 27: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO CHAPO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	34
FIGURA 28: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO COLICO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	35
FIGURA 29: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO LANALHUE, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	35
FIGURA 30: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO LENCAN, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	36
FIGURA 31: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO LLANQUIHUE, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	36
FIGURA 32: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO LLONCAO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	37
FIGURA 33: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO MAIHUE, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	37
FIGURA 34: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO NELTUME, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	38
FIGURA 35: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO PANGUIPULLI, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	38
FIGURA 36: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO PUYEHUE, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	39
FIGURA 37: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO RANCO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	39
FIGURA 38: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO RIÑIHUE, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	40
FIGURA 39: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO RUPANCO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	40
FIGURA 40: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO SAN PEDRO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	41
FIGURA 41: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO TODOS LOS SANTOS, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	41
FIGURA 42: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO TORCA, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	42
FIGURA 43: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO VICHUQUÉN, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	42
FIGURA 44: TENDENCIA DEL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) PARA EL LAGO VILLARRICA, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	43
FIGURA 45: ESTADO TRÓFICO SEGÚN EL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) DESDE EL AÑO 2003-2017 PARA CADA LAGO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	44
FIGURA 46: ESTADO TRÓFICO SEGÚN EL ÍNDICE DE CARLSON (TSI) DESDE EL AÑO 1986–2002 PARA CADA LAGO, DONDE CADA COLOR CORRESPONDE AL ESTADO TRÓFICO INDICADO EN LA TABLA 1.....	45

## I. INTRODUCCIÓN

El rol de la Dirección General de Aguas (DGA), según lo estipulado en el artículo 299 del Código de Aguas, es “planificar el desarrollo del recurso en las fuentes naturales, con el fin de formular recomendaciones para su aprovechamiento e investigar y medir el recurso”.

Además, de acuerdo con lo señalado en el Artículo 129 bis 3, la DGA deberá establecer una red de estaciones de control de calidad, cantidad y niveles de las aguas tanto superficiales como subterráneas en cada cuenca u hoya hidrográfica. En esta misma línea, la letra b del Artículo 299 de la Ley 19.300, señala que la DGA deberá Investigar, medir el recurso y monitorear tanto la calidad como cantidad, en atención a la conservación y protección de las aguas.

Para llevar a cabo sus obligaciones, la DGA cuenta con la División de Hidrología que administra 6 subredes de información (fluviométrica, sedimentométrica, meteorológica, niveles de pozos, niveles de lagos y embalses). Por otro lado, el Departamento de Conservación y Protección de los Recursos Hídricos (DCPRH) administra las Redes de Calidad de Aguas superficiales, subterráneas y lagos.

Respecto a la Red de Calidad de Aguas, su objetivo es generar información pública y sistemática que caracteriza la calidad de los recursos hídricos para mejorar el conocimiento de las cuencas hidrográficas, conocer su evolución en el tiempo, y formular recomendaciones para la conservación y protección de estos recursos.

En relación con la Red de Calidad de Lagos, esta comienza su funcionamiento en los años 80, actualmente se realizan 2 monitoreos anuales (primavera y verano, generalmente) en 100 estaciones de muestreo, correspondientes a 20 sistemas lacustres a lo largo de Chile, los cuales se distribuyen entre la Región Metropolitana y la XI Región de Aysén. En estas estaciones se miden parámetros *in situ* (pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, turbidez y transparencia), nutrientes (nitrito, nitrato, amoníaco, nitrógeno total, fósforo total, fósforo de ortofosfato), sílice, Demanda Química de Oxígeno, parámetros meteorológicos (temperatura ambiental, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad del viento) y biológicos (Clorofila “a”).

La información levantada en terreno es validada por el laboratorio ambiental de la DGA, el cual realiza gran parte de los análisis químicos de la red de lagos. El laboratorio ambiental de la DGA posee un sistema de gestión de calidad desde el año 2013 (ISO 17025), acreditado por el Instituto Nacional de Normalización (INN). Además, el área fisicoquímica para aguas del laboratorio ambiental cuenta con 14 analitos acreditados por el INN<sup>1</sup>.

Así, la información obtenida y analizada a partir de la Red de Calidad de lagos es relevante para monitorear el estado en el cual se encuentran estos cuerpos de agua, cuya trascendencia implica la mantención de servicios ecosistémicos fundamentales para la salud y bienestar humano, así como la preservación de la biodiversidad de ecosistemas acuáticos (Smith, 2003; Dodson et al., 2000). Esto es debido a que, las actividades

---

<sup>1</sup> Cadmio, Calcio, Cinc, Cloruro, Cobalto, Cobre, Hierro, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Potasio, Selenio, Sodio, Sulfato. [INN]

antrópicas generan aumentos en los aportes de nutrientes inorgánicos y orgánicos que contienen nitrógeno y/o fósforo, los cuales pueden influir en el crecimiento algal y de plantas vasculares en ecosistemas acuícolas y marinos (Howarth, 1988; Conley et al., 2009).

En efecto, se produce una evolución acelerada del estadio trófico de los lagos, a través de un gradiente que va desde una baja a una elevada productividad primaria algal y concentración de nutrientes. De acuerdo con esto, el sistema acuático evoluciona desde un estado oligotrófico, a meso trófico, luego eutrófico y por último hipertrófico, siendo este proceso unidireccional e irreversible (Navarro et al., 2004; Fuller 2007; Gomez et al., 2012).

Este proceso de aumento en la productividad primaria algal y concentraciones de nutriente que conlleva la eutrofización del sistema genera un deterioro de la calidad del agua debido a una disminución en la transparencia, menor concentración de oxígeno y liberación de sustancias tóxicas para plantas, animales y la población (Ferreira et al., 2011). En consecuencia, los organismos poco tolerantes a estas condiciones mueren, la riqueza de especie disminuye, y el riesgo de contraer enfermedades para la población aumenta (Wu 1999; Dodson et al., 2000).

De esta forma, resulta relevante conocer el estado trófico de los sistemas lacustres continentales y su relación con parámetros básicos de calidad del agua, con el fin de agilizar el desarrollo de planes de manejo para prevenir, disminuir o remediar su deterioro.

De acuerdo a lo anterior, uno de los parámetros básicos a considerar al caracterizar la calidad de la columna de agua es la transparencia, el cual responde a la concentración de clorofila "a". Debido a la estrecha relación de la concentración de clorofila "a" con el estado trófico, y la fuerte correlación que han mostrado entre sí en diversos estudios (Fuller, 2007; Lorenzen 1980; Carlson 1977; Brezonik 1978), se considera necesario el estudiar la relación entre la transparencia y la concentración de clorofila "a". Es importante destacar estos parámetros han sido extensamente utilizadas para el manejo de la eutrofización de lagos y reservorios (Havens, 1999). Además, son utilizados para el desarrollo de índices que reflejan el estado trófico de un lago y por ende son útiles para su clasificación.

Ante esto, la DGA a través de sus redes de calidad genera un gran volumen de información de calidad del agua en lagos, teniendo registros de disco Secchi y concentración de clorofila "a" desde el año 1986 hasta el día de hoy. De acuerdo con lo descrito, se cuenta con suficiente información para desarrollar una clasificación de los lagos en base su condición trófica, de acuerdo con los parámetros medidos de transparencia y clorofila "a". Además, a partir de la información generada es posible establecer el estado trófico de los lagos de Chile, el cual podría facilitar el proceso de toma de decisiones sobre la gestión de los recursos límnicos. Por otro lado, la estrecha relación que ha sido descrita entre ambas variables, clorofila "a" y transparencia, se debe corroborar para cada sistema estudiado.

El presente informe pretende realizar como ejercicio un análisis preliminar de los datos obtenidos de la Red de Calidad de Lagos, dejando como antecedente el estado trófico de los sistemas lacustres pertenecientes a esta red, además de criterios tentativos para el

manejo de la calidad de agua, sin perjuicio del uso que pueda dar la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) de los datos y la información otorgada en esta minuta.

## **1.1 Objetivos**

- Estudiar la relación existente entre la transparencia y clorofila “a” mediante una regresión lineal, con el fin de determinar si estas variables presentan una relación inversamente proporcional.
- Elaborar un ranking de los lagos de la zona centro y sur de Chile, de acuerdo con la magnitud del índice de Carlson para la transparencia y clorofila “a” de cada lago.
- Evaluar la tendencia trófica de los lagos, analizando el cambio que ha manifestado su índice de estado trófico (TSI) a través del tiempo, para luego elaborar un ranking a partir de la magnitud de la pendiente de cada lago.

## **II. METODOLOGÍA**

### **2.1 Base de datos**

Para llevar a cabo el presente trabajo, se consideraron los datos de transparencia, medido como disco Secchi y concentración de clorofila “a” entre los años 1986 a 1999 y 2014 a 2016, dispuestos en el sistema del Banco Nacional de Aguas (BNA). El Laboratorio Ambiental de la DGA, genera la información mediante la digitalización de los resultados de análisis hechos en terreno y laboratorio.

En adición, se consideraron los datos de transparencia y clorofila “a” entre los años 2000 al 2014, disponibles en el Sistema Nacional de Información del Agua (SNIA)<sup>2</sup>, el cual dispone de reportes estadísticos oficiales de variables hidrometeorológicas y de calidad de aguas, obtenidos desde la Red Hidrométrica Nacional de la DGA.

Mediante el programa Excel, se generó una base de datos en la cual los datos mencionados anteriormente se ordenaron en 5 categorías; Lago, estación del año, año, estación de Muestreo, transparencia (m), concentración de clorofila “a” (ug/l), valor TSI y significado del índice de Carlson.

Finalmente, se realizó una revisión del 15% de los datos de cada uno de los lagos. Esta revisión, tiene como objetivo prevenir errores producidos por el traspaso manual de datos de transparencia y concentración de clorofila “a” entre planillas.

---

<sup>2</sup> [SNIA]

## **2.2 Relación entre la transparencia y clorofila “a”**

Para evaluar la relación existente entre la clorofila “a” y la transparencia, se utilizó el complemento Xlstat de Excel para realizar una regresión lineal entre ambas variables. Al aplicar esta herramienta se observó que la clorofila “a” y la transparencia muestran un comportamiento no lineal descrito por lo general como hiperbólico, lo que dificulta la búsqueda de un ajuste para esta relación, por lo que se decide aplicar un ajuste logarítmico a cada variable. Este ajuste es el más utilizado para el estudio de estas variables, debido a que reduce la varianza y asimetría de ambas como también facilita una interpretación más adecuada de la relación observada (Rast 1978; Lind 1986; Carlson, 2005).

De esta forma, a partir del coeficiente de determinación “ $r^2$ ”, el porcentaje de la variación de transparencia (SD) que es explicada por el cambio en la concentración de clorofila “a” (Chl). Por otro lado, a partir del  $p$ -valor, resultante de un Análisis de la Varianza (ANDEVA o ANOVA en inglés) con un intervalo de confianza del 95%, se determinó la significancia de la relación existente entre estas variables, siendo significativo un  $p$ -valor mayor a 0.05.

## **2.3 Índices de estado trófico**

Para evaluar el estado trófico, se pueden implementar diferentes técnicas que van desde la observación del color del lago, análisis de los parámetros que caracterizan el lago hasta el método isotópico de marcaje con isótopos radiactivos (Moreno et al., 2010).

Sin embargo, el método más adecuado para evaluar el estado de los lagos es mediante índices que reflejen dicha condición, siendo los más utilizados aquellos que integran más de un criterio para su clasificación (Kratzer & Brezonik, 1981). A continuación, se describen tres índices que cumplen dicha condición.

### **2.2.1 Índice de Carlson**

El índice de Carlson (TSI) es uno de los más utilizados (Franco et al., 2010; Gomez et al., 2012). Este se obtiene mediante una transformación logarítmica de los valores obtenidos del disco Secchi (Ds), concentración de clorofila “a” (clorof a) y el fósforo total (Pt) (*Tabla 1*). Esto bajo el supuesto de que el material particulado suspendido controla la profundidad Secchi y que la concentración algal en el agua es la principal fuente de este material (Carlson, 1977).

Posteriormente, Aizaki propuso una modificación a este índice introduciendo coeficientes específicos para cada elemento que complementa la composición del estado trófico (López y Madroño, 2015).

Tabla 1. Rango de valores del índice de Carlson (TSI) según el estado trófico y descripción correspondiente (MMA 2011; MMA 2013). Además, se asigna un color para cada estado.

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

El cálculo del índice de Carlson resulta en un valor numérico entre 0 y 100 es decir, abarcando rangos de trofia desde el oligotrófico al hipertrófico (Tabla 2). Las fórmulas para el cálculo de estado para cada variable como del índice se presentan en la siguiente tabla, así como las correspondientes a la modificación del índice de Carlson realizada por Aizaki et al., (1981).

Tabla 2. Fórmulas para estimar el indicador trófico de cada variable y el índice total.

Parámetro de eutrofización	Carlson (1977; 1980)	Aizaki et al. (1981)
Claridad del agua (DS) (m)	$TSID_s = 60 - 14.41 \ln(Ds)$	$TSID_s = 10 \times (2.46 + \frac{3.76 - 1.57 \ln(Ds)}{\ln 2.5})$
Fosforo total (Ft) (mg/l)	$TSIP_t = 14.42 \ln(Pt) + 4.15$	$TSIP_t = 10 \times (2.46 + \frac{6.68 - 1.15 \ln(Ds)}{\ln 2.5})$
Clorofila "a" a (Clorf a) (mg/m <sup>3</sup> )	$TSIClorf_a = 9.81 \ln(Clorf a) + 30.6$	$TSIClorf_a = 10 \times (2.46 + \frac{\ln(Clorf a)}{\ln 2.5})$
Índice	$TSI = (TSID + TSIP_t + TSIClorf_a) / 3$	$TSI = (TSID + TSIP_t + TSIClorf_a) / 3$



### 2.2.2 Índice de Smith

El índice de Smith determina la condición trófica en base a la concentración de clorofila “a”, transparencia o disco Secchi, concentración de nitrógeno y fósforo. Los dos primeros parámetros corresponden a los indicadores directos del estado trófico del lago, por otro lado, los dos restantes son utilizados para confirmar y explicar el estado observado, esto es debido a que están relacionados a los nutrientes inorgánicos principales, nitrógeno y fósforo, que limitan o determinan el crecimiento algal (Smith et al., 1999).

En la siguiente tabla se indica el rango de valores de los cuatros parámetros antes mencionados relativo al estado trófico que representan, ordenados de menor a mayor, es decir desde el estado oligotrófico al hipereutrófico. De esta manera, la calificación del lago se realiza en relación con el valor obtenido de los parámetros considerados y el rango de valores en el cual se encuentran (*Tabla 3*).

*Tabla 3. Rango de valores de cada parámetro correspondiente a cada estado. Smith et al. 1999.*

Condición trófica	Fósforo total (ug/l)	Nitrógeno total (ug/l)	Clorofila “a” a (ug/l)	SD (m)
Oligotrofia	< 10	< 350	< 3.5	>4
Mesotrofia	10 - 30	350 - 650	3.5 - 9	2-4
Eutrofia	30 - 100	650 – 1.200	9 - 25	1-2
Hipereutrofia	>100	> 1.200	> 25	>1

### 2.2.3 Índice de Vollenwaider

El índice del estado trófico (TRIX) desarrollado por Vollenweider et al. (1998), corresponde a un índice multivariado que para su cálculo considera dos factores, compuesto por dos variables cada uno (Ecuación 1). El primer factor corresponde al de productividad, en el cual se incluye la concentración de clorofila “a” (Clorfa) y el porcentaje de saturación de oxígeno (%Od). El segundo factor corresponde al nutricional, que considera el nitrógeno inorgánico disuelto (NID), el fósforo reactivo soluble (PRS), K y m son constantes de ajuste para el índice (Ecuación 1).

*Ecuación 1. Índice propuesto por Vollenweider et al. (1998).*

$$TRIX = \frac{LOG10((Clorfa) \times \%Od \times NID \times PRS) + K}{m}$$

El resultado del índice de Vollenweider predice, en base a la carga de nutrientes, la probabilidad en que un lago se encuentre en un determinado estado trófico.

Para la determinación de la condición trófica para la Red de Calidad de Lagos el índice de Vollenweider no fue aplicado, debido a que no se cuentan con suficientes datos de oxígeno disuelto, nitrógeno inorgánico disponible ni fósforo reactivo soluble. De la misma forma, el índice de Smith tampoco es calculado en este análisis.

De acuerdo con lo señalado el análisis del estado trófico se calcula utilizando la metodología de Carlson (1977). Para este índice, sólo se consideró la concentración de clorofila "a" y la transparencia otorgada por el disco de Secchi, por lo que no se incorporó la concentración de fósforo. De esta forma, el índice total de Carlson será igual a la suma del índice de clorofila "a" más el de profundidad del disco Secchi dividido en dos.

## **2.4 Ranking de lagos**

La realización de rankings de lagos en base a su condición trófica facilita el desarrollo de planes de manejo de lagos (Walker, 1979). Ante esto, los limnólogos han utilizado categorizadores del estado del lago, como los índices, para comparar de esta manera lagos estructural y funcionalmente diferentes (Canfield et al., 1983).

Frente a esto, existen diversos índices que reflejan el estado trófico de los lagos, sin embargo, el índice de Carlson es uno de los métodos cuantitativos más aceptados en los últimos años para clasificar y ordenar los lagos de forma objetiva (Esfandi et al., 2018; Donia, 2004; Fraile et al., 1995).

De esta forma, se decide utilizar la tendencia o pendiente a través del tiempo del índice de Carlson (TSI) es decir, se analizará si el TSI expresa una pendiente negativa, nula o positiva. Esto se realizará en base a todas las estaciones disponibles de cada lago.

Además, la variación temporal será analizada mediante un análisis de la varianza (ANOVA), con un intervalo de confianza del 95%, con el fin de determinar si la variación temporal que expresa el lago es significativa, en caso contrario se tomara como una pendiente nula. Esta información permitirá elaborar un ranking que ordene los lagos de mayor a menor variación temporal, según la magnitud de su pendiente.

De forma complementaria, se realiza otro ranking en el cual se considerará, el promedio del TSI del último año registrado en base todas las estaciones disponibles de cada lago. Esto será ordenado según la magnitud del índice de estado trófico de Carlson (TSI).

Cabe destacar que para la realización de la regresión lineal y la realización de ambos rankings se consideró sólo la concentración de clorofila "a" superficial. Además, se incluyeron en el análisis las mediciones de clorofila "a" y transparencia de todas las estaciones disponibles de cada lago.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 Relación entre clorofila “a” y transparencia

De acuerdo con la regresión lineal realizada para los lagos de forma individual (Tabla 4, Anexo A), se observa que aquellos con un elevado  $r^2$ , es decir, aquellos donde cuya varianza en la transparencia pueden ser explicados en un elevado porcentaje por los cambios en la concentración de clorofila “a”, 6 lagos tienen una fuerte relación entre la transparencia y la concentración de clorofila “a”, estos son el lago Torca ( $r^2=0.78$ ), Neltume ( $r^2=0.73$ ), Rupanco ( $r^2=0.54$ ), Colico ( $r^2=0.50$ ), Chapo ( $r^2=0.49$ ), Lencan ( $r^2=0.40$ ) Vichuquén ( $r^2=0.35$ ) y Panguipulli ( $r^2=0.30$ ). Sin embargo, tanto el lago Neltume como el lago Lencan presentan un  $p$ -valor elevado ( $p>0.05$ ), lo que está asociado con la cantidad de datos utilizados para la regresión, es decir que el número de datos no es suficiente para contrastar la fuerza de la relación expresada entre las variables en cuestión.

Con respecto al lago Caburgua ( $r^2=0.25$ ), Ranco ( $r^2=0.25$ ), Aculeo ( $r^2=0.22$ ) y Calafquén ( $r^2=0.20$ ), se observa una relación débil entre transparencia y clorofila “a”, que daría cuenta que la varianza en la transparencia estaría explicada en parte por la concentración de clorofila “a”, pero que requiere la integración de otras variables para explicar mejor los cambios en la transparencia. En adición, los lagos antes mencionados presentan un  $p$  con valor significativo, que en este caso refleja y respalda la relación existente entre ambas variables.

En los lagos San Pedro ( $r^2=0.15$ ), Lanalhue ( $r^2=0.13$ ), Todos los Santos ( $r^2=0.13$ ), Llanquihue ( $r^2=0.11$ ), Lloncao ( $r^2=0.07$ ), Riñihue ( $r^2=0.06$ ), Villarrica ( $r^2=0.04$ ), Maihue ( $r^2=0.01$ ) y Puyehue ( $r^2=0.01$ ) la clorofila “a” explica un porcentaje bajo de la varianza en la profundidad del disco Secchi, es decir presentan una relación débil que se refleja en una alta variabilidad de los datos y por ende un bajo coeficiente de determinación ( $r^2$ ). A pesar de esto, estos lagos, a excepción del lago Maihue y Puyehue, presentan un  $p$  valor significativo, lo que indicaría que si existe una relación significativa entre clorofila “a” y transparencia.

Sin perjuicio de lo descrito anteriormente, al analizar el conjunto de lagos en una sola regresión lineal (Tabla 4) se percibe una relación significativa entre las variables en cuestión, presentando además un elevado coeficiente de determinación ( $r^2=0.6$ ).

Los resultados obtenidos son relevantes debido a que la profundidad del disco Secchi o transparencia suele mostrarse en función de la concentración de clorofila “a” y por lo tanto biomasa algal (Lind, 1986). Esto es en base a que los organismos fotosintéticos absorben la luz y por lo tanto afectan la penetración de la luz en la columna de agua. De esta manera, a medida que incrementa la presencia de estos organismos disminuye la transparencia. Así, esta relación inversa produce una curva hiperbólica o relación lineal inversa ( $\log SD - \log Chla$ ), como se observa para cada uno de los lagos estudiados. Sobre esto, el disco Secchi se ha utilizado para estimar, de forma aislada, la cantidad de biomasa algal y por tanto el estado trófico de los lagos.

A excepción del lago Maihue, Neltume, Lencan, Lloncao y Puyehue, la mayoría de los lagos estudiados mostraron una relación inversa significativa entre estas variables, sin

embargo, la mayor parte presentó un bajo porcentaje de varianza de la transparencia explicada por la concentración de clorofila “a”. De acuerdo con esto, la inclusión de otras variables podría explicar de mejor manera la varianza exhibida por la transparencia, especialmente cuando en la columna de agua hay otros factores que influyen en la penetración de la luz, a mencionar: el color presente en el agua, coloides, material en suspensión, sedimento derivado de la erosión del suelo o agitación del bentos (Lee, 1995), entre otros.

De la misma forma, los lagos que no muestran una relación significativa entre la transparencia y clorofila “a” ( $p > 0.05$ ), revelan que la extinción de la luz estaría dada en su mayor parte por partículas y propiedades fisicoquímicas del agua (Lind, 1986), tal como ocurre en el lago Puyehue y Maihue. En el caso del lago Neltume, Lencan y Lloncao la poca significancia en la relación puede estar asociada a la baja cantidad de datos, por lo que se requiere más información para concluir sobre su relación.

De acuerdo con el análisis realizado, el uso del disco Secchi es efectivo como una medida de claridad del agua, no obstante, su uso como medida o predicción de la biomasa o clorofila “a” algal, en consecuencia, como un indicador del estado trófico del lago, requiere del estudio de la relación que existe entre estas variables en cada sistema de interés. En caso contrario, para estimar de forma más precisa el estado trófico es necesario la incorporación de más variables, tal como la concentración de clorofila “a” y/o nutrientes. (Carlson, 1996; Carlson, 1980; Preisendorfer, 1986)

*Tabla 4 Modelo lineal (log -log) y valores de porcentaje de varianza ( $r^2$ ) de transparencia explicada por la concentración de clorofila “a” para cada lago estudiado como para el total de lagos (\*Lagos). Además, se indica la significancia de esta relación ( $p$ ) como la cantidad de datos con la cual se trabajó ( $n$ ).*

Lagos	Modelo log-log	$r^2$	$p$	$n$
Torca	$\text{LnSD} = 5.33 - 1.24 * \text{LnChl}$	0.78	7.23E-04	10
Neltume	$\text{LnSD} = 2.05 - 0.12 * \text{LnChl}$	0.73	6.58E-02	5
Rupanco	$\text{LnSD} = 2.16 - 0.66 * \text{LnChl}$	0.54	5.21E-04	18
Colico	$\text{LnSD} = 2.46 - 0.51 * \text{LnChl}$	0.50	1.03E-03	18
Chapo	$\text{LnSD} = 2.4 - 0.35 * \text{LnChl}$	0.49	6.20E-09	52
Lencan	$\text{LnSD} = 1.14 - 0.35 * \text{LnChl}$	0.40	5.64E-01	3
Vichuquén	$\text{LnSD} = 1.07 - 0.21 * \text{LnChl}$	0.35	2.59E-12	36
Panguipulli	$\text{LnSD} = 2.31 - 0.20 * \text{LnChl}$	0.30	5.74E-08	85
Caburgua	$\text{LnSD} = 2.59 - 0.13 * \text{LnChl}$	0.25	3.39E-05	62
Ranco	$\text{LnSD} = 2.43 - 0.14 * \text{LnChl}$	0.25	7.21E-05	61
Aculeo	$\text{LnSD} = 0.54 - 0.22 * \text{LnChl}$	0.22	1.95E-09	147
Calafquen	$\text{LnSD} = 2.32 - 0.22 * \text{LnChl}$	0.20	2.69E-05	83
San Pedro	$\text{LnSD} = 1.43 - 0.22 * \text{LnChl}$	0.15	1.31E-05	123
Lanalhue	$\text{LnSD} = 1.20 - 0.21 * \text{LnChl}$	0.13	3.65E-07	185
Todos los Santos	$\text{LnSD} = 1.98 - 0.255 * \text{LnChl}$	0.13	3.27E-03	64
Llanquihue	$\text{LnSD} = 2.68 - (9.60E-02) * \text{LnChl}$	0.11	1.53E-07	250

Lagos	Modelo log-log	r <sup>2</sup>	p	n
Lloncao	LnSD = 1.60-(5.93E-02)*LnChl	0.07	8.32E-01	3
Riñihue	LnSD = 2.36-(8.10E-02)*LnChl	0.06	1.46E-02	99
Villarrica	LnSD = 2.08-0.10*LnChl	0.04	6,20E-04	262
Puyehue	LnSD = 1.86-0.19*LnChl	0.01	6.93E-01	13
Maihue	LnSD = 2.14-(5.74E-02)*LnChl	0.01	4.05E-01	53
Lleulleu	LnSD = 2.25233-0.1281LnChl	-	-	2
*Lagos	LnSD = 2.10-0.534*LnChl	0.60	1.00E-04	1634

### 3.2 Ranking de Lagos

#### 3.2.1 Ranking a partir del Índice de Carlson (TSI)

De acuerdo con el ranking basado en el promedio TSI del último año registrado para cada lago (Anexo C), se observa a partir de la Tabla 5, que de 32 lagos considerados: 3 se encuentran en un estado hipereutrófico; 4 en uno eutrófico, 6 tienen una condición mesotrófica; 8 están en un rango meso oligotrófico; y 11 a uno oligotrófico. Es decir, un 78% de los lagos analizados está en un rango oligotrófico a mesotrófico, y un 22% está en un rango de eutrófico a hipereutrófico.

Por otro lado, se percibe que la laguna de Aculeo tiene el mayor TSI y el lago Todos Los Santos tiene el TSI más bajo (Tabla 5). Además, el lago Petrel y Lencan están más próximos a un estado hipereutrófico, mientras que el lago San Pedro, Batros, Natri y Lleulleu están al límite del siguiente estado trófico (eutrófico, meso trófico y meso oligotrófico, respectivamente).

Es preciso mencionar que el presente ranking considera el último año en el cual se dispone del índice de Carlson, en base a esto se comparan lagos cuyo último muestreo corresponde a uno reciente, 2016 y 2017, con el de aquellos del año 2011, 2012, 2014, y por consiguiente el estado que hoy pueden presentar puede diferir de forma sustancial con el informado y utilizado para el presente análisis.

*Tabla 5: Ranking según el valor del índice de Carlson (TSI) para el último año registrado de cada lago. Se indica estado trófico correspondiente al TSI y al año al cual corresponde ese registro (UAR: último año registrado).*

Posición	Lago	TSI	Estado	UAR
1	Aculeo	73.4735	Hiper Eutrófico	2014
2	Torca	71.33755	Hiper Eutrófico	2016
3	Lencan	70.48	Hiper Eutrófico	2017
4	Petrel	69.99448	Eutrófico	2017
5	Antiquina	63.55384	Eutrófico	2017
6	Lanahue	52.37855	Eutrófico	2016
7	Puyehue	51.07284	Eutrófico	2014

Posición	Lago	TSI	Estado	UAR
8	San Pedro	47.87089	Meso trófico	2016
9	Batros	47.56802	Meso trófico	2017
10	Tapuhuieco	46.30849	Meso trófico	2017
11	Perro	44.08682	Meso trófico	2017
12	Vichuquén	42.53918	Meso trófico	2017
13	Tarahuin	41.38401	Meso trófico	2017
14	Natri	38.26265	Meso Oligotrófico	2017
15	San Antonio	37.92424	Meso Oligotrófico	2017
16	Yaldad	37.80027	Meso Oligotrófico	2017
17	Butaco	35.35741	Meso Oligotrófico	2017
18	Lloncao	34.65263	Meso Oligotrófico	2017
19	Villarrica	31.88784	Meso Oligotrófico	2017
20	Neltume	31.60452	Meso Oligotrófico	2014
21	Colico	30.00127	Meso Oligotrófico	2016
22	Lleulleu	28.68232	Oligotrófico	2011
23	Caburgua	27.62697	Oligotrófico	2017
24	Maihue	27.42293	Oligotrófico	2016
25	Riñihue	27.17904	Oligotrófico	2012
26	Llanquihue	26.63039	Oligotrófico	2017
27	Calafquén	26.51831	Oligotrófico	2012
28	Panguipulli	26.16714	Oligotrófico	2012
29	Chapo	26.04953	Oligotrófico	2017
30	Rupanco	24.27929	Oligotrófico	2016
31	Ranco	21.34605	Oligotrófico	2016
32	Todos los Santos	19.8447	Oligotrófico	2011

### 3.2.2 Ranking a partir de la tasa de cambio del Índice de Carlson (TSI)

A parte de los resultados según la tendencia o tasa de cambio del TSI expresados en la *Tabla 5* y graficado en el Anexo B, se observa que el lago Puyehue ( $z = 2,63$ ), Lencan ( $z=9,015$ ), Neltume ( $z=3,95$ ), Colico ( $z= 2,17$ ) y Rupanco ( $z = 1,52$ ) muestran las tendencias o pendientes más pronunciadas en el cambio del TSI, sin embargo, los dos primeros lagos no presenten años suficientes (3 y 2 años, respectivamente) para poder establecer con certeza una tendencia positiva y elevada.

En el lago Puyehue el rango analizado considera sólo 3 años, desde el año 2012 al 2014, con una medición de transparencia y clorofila "a" para el año 2014, cuyo índice de Carlson indicó un 51.07 clasificándolo como eutrófico. De esta forma, la pendiente resultante estaría sobre estimando la evolución del estado trófico, sobre todo teniendo en cuenta que en los años 2012 y 2013 el estado del lago varió entre un estado oligotrófico y meso-oligotrófico.

Un caso similar ocurre con el lago Neltume, el cual tiene registros entre el año 2012 y 2013, con sólo una medición anual para el año 2012 y 2013, por lo que la tendencia a

aumentar su estado trófico podría ser representativa del sistema. Esta situación, se ve más acentuada para el lago Lenca debido a que sólo cuenta con un TSI para dos años.

En cuanto el lago Rupanco la pendiente de 1,52 está influenciada por un TSI de 44,5 del año 2015, correspondiente a un estado mesotrófico que es aproximadamente el doble al TSI del año 2012 al 2014, y 2016 correspondiente a un estado oligotrófico.

Los lagos Chapo ( $z= 0.48$ ), San Pedro ( $z=0.21$ ), Lanalhue ( $z= 0.21$ ), Aculeo ( $z= 0.024$ ), Villarrica ( $z= 0.017$ ), Llanquihue ( $z= 1.00E-05$ ) y Panguipulli ( $z= -0.11$ ) presentan una variación significativa en su estado trófico ( $p<0.05$ ) con tendencia a aumentar o empeorar su estado trófico, a excepción del lago Panguipulli que presenta una tendencia significativa a disminuir su TSI o mejorar su estado trófico.

Por último, los lagos Maihue ( $z= 0.17$ ), Riñihue ( $z= 0.02$ ), Todos Los Santos ( $z= -8.0E-4$ ), Calafquén ( $z= -0.046$ ), Ranco ( $z= -0.115$ ), Caburgua ( $z= -0.62$ ), Vichuquén ( $z= -1.35$ ) y Torca ( $z=-1.83$ ) no presentan una variación temporal de su estado trófico, por lo que tenderían a mantener su TSI. En el caso del lago Lloncao, este sólo cuenta con un TSI para dos años, Lleulleu, Petrel, Antiquina, Batros, Tapuhueico, Natri y Butaco no cuentan con los suficientes datos para establecer una tendencia de su TSI.

Respecto a los resultados presentados, es importante mencionar que se pudo realizar el análisis sólo en aquellos lagos con al menos dos valores anuales del índice de Carlson.

Por otro lado, el ranking se dividido en dos partes, la primera se realizó en base a aquellos lagos cuya información es igual o superior a 4 años y con una variación temporal significativa de su TSI (*Tabla 6*), luego se ordenó aquellos lagos con menos de 3 años de información y que no mostraron una variación significativa, es decir un  $p$  valor  $>0.05$ . (*Tabla 6*).

*Tabla 6. Ranking según la magnitud del cambio de la pendiente y la significancia de esta. Además, se indica el estado en el cual se encuentra el lago según su ultimo registro y la cantidad de años con la cual se realizó el análisis (CA).*

Posición	Lago	Pendiente (z)	p	*Estado	CA
1	Colico	2.175	4.0E-02	Meso Oligotrófico	4
2	Rupanco	1.520	< 0.0001	Oligotrófico	5
3	Chapo	0.481	2.0E-02	Meso Oligotrófico	8
4	San Pedro	0.208	7.0E-03	Meso trófico	20
5	Lanalhue	0.206	2.0E-03	Eutrófico	19
6	Aculeo	0.024	< 0.0001	Hiper Eutrófico	20
7	Villarrica	0.017	< 0.0001	Meso Oligotrófico	28
8	Llanquihue	1.0E-5	< 0.0001	Oligotrófico	27
9	Panguipulli	-0.112	2.0E-02	Oligotrófico	11
10	Puyehue	2.634	4.0E-04	Eutrófico	3
11	Maihue	0.177	9.0E-02	Oligotrófico	13
12	Riñihue	0.020	1.0E-01	Oligotrófico	15
13	Todos Los Santos	-0.001	1.0E-01	Oligotrófico	7
14	Calafquén	-0.046	1.0E-01	Oligotrófico	10
15	Ranco	-0.115	6.0E-02	Oligotrófico	15

Posición	Lago	Pendiente (z)	p	*Estado	CA
16	Caburgua	-0.620	5.0E-02	Oligotrófico	12
17	Vichuquén	-1.353	2.0E-01	Meso Oligotrófico	5
18	Torca	-1.835	8.0E-01	Hiper Eutrófico	4

A partir de los resultados anteriores es evidente que ambos rankings realizados se diferencian en el orden de importancia de los lagos. Por su parte, el ranking de la *Tabla 5* tiene en los primeros 5 lugares a los lagos con mayor índice trófico, es decir con la peor condición trófica, mientras que el ranking de la *Tabla 6* tiene en los primeros 5 lugares a los lagos con mayor tendencia a aumentar su condición trófica, lo que no necesariamente coincide con la magnitud de su estado trófico.

En particular, el lago Aculeo se encuentra en el primer lugar del primer ranking al tener el TSI más alto (*Tabla 5*), sin embargo, en base a la tendencia a cambiar su estado trófico ocupa el lugar número 6 del segundo ranking (*Tabla 6*). De la misma manera, el lago Colico ocupa el lugar número 21 del ranking respecto al estado trófico, en cambio según su pendiente ocupa el lugar número 1 del segundo ranking, es decir tiene la mayor tendencia a cambiar su estado trófico.

De acuerdo con estos resultados, la elección del ranking no es trivial, debido a que depende del objetivo o enfoque bajo el cual se quiera priorizar el manejo y gestión. Así, es fundamental la aproximación desde la cual se quiera evitar la degradación de los cuerpos lacustres, debido a que puede influir de forma sustantiva en la eficacia en la toma de decisiones. Esto es en base a que un estado trófico elevado, sea eutrófico o hiper eutrófico, es unidireccional y por lo general irreversible (Gomez et al., 2012), por lo que si se toma sólo como referencia la magnitud en el cual se encuentra un lago no se están considerando otras medidas relevantes para su manejo, como lo es la tasa a la cual los lagos se eutrofizan.

De esta manera, es relevante tener en cuenta que el manejo integrado de un lago permite reducir la velocidad de la eutrofización, sobre todo en aquellos lagos con mayor perturbación y mayor aceleración de este proceso, más que la recuperación del estado en el que se encuentran. Así, para la planificación y gestión de la calidad de agua de los lagos, es importante considerarlo desde el principio de precaución, es decir tener como objetivo principal la disminución de la aceleración de la eutrofización de lagos que tienen una calidad de agua moderada y/o buena (mesotrófico y oligotrófico, respectivamente) para evitar que evolucionen de forma irreversible a una calidad deteriorada (eutrófico), y de forma paralela evitar que la calidad de agua de los lagos con condición eutrófica siga empeorando.

Para tal efecto, la combinación entre el conocimiento del estado actual del lago y la tendencia a cambiar su estado trófico es de gran utilidad para prevenir el deterioro y empeoramiento de la calidad del agua. De acuerdo con esto, el lago Colico, Rupanco y Chapo presentan una calidad de agua que no está deteriorada, sin embargo, según los resultados mostrados en la *Tabla 6*, estos presentarían la mayor tendencia al deterioro de su estado trófico, por lo que requieren de un plan de manejo con el fin de desacelerar este proceso. Mientras que el lago Aculeo y Lanalhue, presentan el peor estado trófico, pero



con una menor tendencia a aumentarlo, por lo que sería menos prioritario que los lagos mencionados anteriormente.

#### **IV. COMENTARIOS FINALES**

A partir de los resultados y análisis realizados se resalta que en la mayoría de los lagos la transparencia presenta una relación significativa, pero de una varianza de Secchi explicada en bajo porcentaje por la concentración de clorofila "a". Esto sugiere que la transparencia puede estar determinada por otras partículas que influyen de mayor manera en la penetración de la luz en la columna de agua que la clorofila "a". De esta manera, el uso del disco Secchi no serviría como medida directa de la concentración de clorofila "a" o biomasa algal, si no que como una de las variables a considerar al momento de estimar el estado trófico del agua.

Los resultados indican que la mayoría de los lagos estudiados (76%) tienen una condición oligotrófica y mesotrófica. Por otro lado, el 24% restante se identificó con una condición eutrófica a hipertrófica, entre los cuales se encuentra el lago Aculeo y Torca con el mayor estado trófico reportado.

Finalmente, la naturaleza irreversible de la eutrofización requiere considerar el principio de precaución, es decir disminuir la aceleración de la eutrofización antes que los sistemas acuáticos tengan un estado deteriorado de su columna de agua. Ante esto, los rankings realizados permiten caracterizar el estado trófico de los lagos y la tendencia que estos tienen a aumentar su estado trófico, de forma que se puede prevenir que los sistemas sigan empeorando su condición. Es así como el presente análisis deja en evidencia que los lagos con una mayor tendencia o aceleración a aumentar el estado trófico son el lago Colico, Rupanco, Chapo y San Pedro cuya condición no supera la mesotrofia. Esto deja en evidencia que es necesario generar planes de manejo para desacelerar el proceso de eutrofización.

#### **V. RECOMENDACIONES**

Con el fin de generar un plan de manejo de los diversos sistemas lacustres con el objetivo de evitar la deterioración de los cuerpos de agua frente a la creciente perturbación antrópica de estos sistemas, se hace necesario extender la Red de Calidad de Lagos con el fin de proteger y conservar toda la diversidad de lagos a lo largo de todo el país.

Se recomienda además el estudiar el estado trófico de los lagos incorporando información relacionada con el contenido de sedimentos para evaluar el riesgo a que se produzca la resuspensión de nutrientes, situación que puede contribuir a la aceleración de la eutrofización.

Cabe mencionar que se requiere de la incorporación de más variables para poder determinar de mejor manera el estado trófico y la tendencia que presenta esta condición a

través del tiempo, tal como la concentración de los nutrientes limitantes de la producción algal.


Por otro lado, se recomienda la incorporación de la caracterización de comunidades de cianobacterias debido a que constituyen un factor determinante en la calidad de agua de los ecosistemas límnicos, en particular aquellas que tienen un potencial toxico que puede provocar la muerte en mamíferos y/o ser cancerígenos bajo exposiciones prolongadas. (Bonilla et al., 2015). Para tal efecto, la medición de la concentración de clorofila "a" es sólo un indicador de biomasa fitoplanctónica y no de cianobacterias. Por lo que, la incorporación del biovolumen de cianobacterias como indicador es más preciso al momento de determinar su a biomasa (Bonilla et al., 2015).



GABRIEL JURI ÁLVAREZ  
ALUMNO COLABORADOR - CANDIDATO A TÍTULO DE BIÓLOGO AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS



DANIELA FREDES MUÑOZ  
ANALISTA DE DESARROLLO AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

  
**DIEGO SAN MIGUEL CORNEJO**  
Jefe Área de Desarrollo  
Depto. Conservación y P.R.H.  
Dirección General de Aguas

DIEGO SAN MIGUEL CORNEJO  
JEFE ÁREA DE DESARROLLO  
DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

## VI. REFERENCIAS

- Aizaki, M. (1981). Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state (in Japanese with English summary). *Res. Rep. Nat. Inst. Environ. Stud.*, 23, 13-31.
- Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., Britos, A., Vidal, L., ... & Martínez de la Escalera, G. (2015). Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. *Innotec*, (10 ene-dic), 9-22.
- Brezonik, P. L. (1978). Effect of organic color and turbidity of Secchi disk transparency. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 35(11), 1410-1416.
- Canfield Jr, D. E., Langeland, K. A., Maceina, M. J., Haller, W. T., Shireman, J. V., & Jones, J. R. (1983). Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(10), 1713-1718.
- Carpenter, S. R., Ludwig, D., & Brock, W. A. (1999). Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecological applications*, 9(3), 751-771.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22: 361-369. Conley, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., ... & Likens, G. E. (2009). Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 323(5917), 1014-1015.
- Carlson, R. E., & Havens, K. E. (2005). Simple graphical methods for the interpretation of relationships between trophic state variables. *Lake and Reservoir Management*, 21(1), 107-118.
- Carlson, R. E., & Simpson, J. (1996). A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods. *North American Lake Management Society*, 96, 305.
- Conde, D. 2009. Eutrofización, cambio climático y cianobacterias. En: Documento Técnico PHI N°16. Cianobacterias Planctónicas del Uruguay: Manual para la identificación y medidas de Gestión. UNESCO, 96 pp.
- Dodson, S. I., Arnott, S. E., & Cottingham, K. L. (2000). The relationship in lake communities between primary productivity and species richness. *Ecology*, 81(10), 2662-2679.
- Donia, N., & Hussein, M. (2004). Eutrophication assessment of Lake Manzala using GIS techniques. In Eighth international water technology conference, IWTC8 (pp. 393-408).

- Esfandi, F., Mahvi, A. H., Mosaferi, M., Armanfar, F., Hejazi, M. A., & Maleki, S. (2018). Assessment of temporal and spatial eutrophication index in a water dam reservoir. *Global J. Environ. Sci. Manage*, 4(2), 153-166.
- Franco, D. P. M., Manzano, J. Q., & Cuevas, A. L. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78, 25-33.
- Ferreira, J. G., Andersen, J. H., Borja, A., Bricker, S. B., Camp, J., Da Silva, M. C., & Lancelot, C. (2011). Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(2), 117-131.
- Fraile, H., Orive, E., & Pozo, J. (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (río Tera, Zamora). *limnetica*, 11(2), 29-37.
- Fuller, L.M., & Minnerick, R.J. *Predicting Water Quality by Relating Secchi-Disk Transparency and Chlorophyll A Measurements to Landsat Satellite Imagery for Michigan Inland Lakes, 2001–2006*; Fact Sheet 2007–3022; US Geological Survey: Lansing, MI, USA, 2007.
- Gomez, J,G,A., PÉREZ, D. R., Cecilia, M. M., Yolanda, C. R., & Gloria, D. R. (2012). *Estudio de aguas continentales mediante teledetección*. Editorial UNED.
- Howarth, R.W., 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 19, 898; 910.
- Karl E. Havens , Hunter J. Carrick , Edgar F. Lowe & Michael F. Coveney (1999) Contrasting Relationships Between Nutrients, Chlorophyll a and Secchi Transparency in Two Shallow Subtropical Lakes: Lakes Okeechobee and Apopka (Florida, USA), *Lake and Reservoir Management*, 15:4, 298-309.
- Lind, O. T. (1986). The effect of non-algal turbidity on the relationship of Secchi depth to chlorophyll a. *Hydrobiologia*, 140(1), 27-35.
- Lorenzen, M. W. (1980). Use of chlorophyll-Secchi disk relationships. *Limnology and oceanography*, 25(2), 371-372.
- Lee, G. F., Jones-Lee, A., & Rast, W. (1995). Secchi depth as a water quality parameter. Publication Pending.

- Ministerio del Medio Ambiente. 2011. Informe del Estado del medio Ambiente 2011. Capítulo 8 Recursos Hídricos. [www.mma.gob.cl](http://www.mma.gob.cl).
- Ministerio del Medio Ambiente. 2013, Primer Reporte del Estado del medio Ambiente. Ministerio del Medio Ambiente. [www.mma.gob.cl](http://www.mma.gob.cl).
- Ministerio de Obras Públicas y Dirección General de Aguas, Atlas del Agua. Chile 2016 (Santiago, MOP, 2016), pp. 94-97. <http://www.dga.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf>
- Murillo, M. O., Villanueva, R. A., Morales, R. H., & Heredia, J. D. S. (2013). Evolución trófica de un lago tropical hiposalino en México con base al fitoplancton. *Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 12(2), 75-81.
- Navarro, M., García, J. A., & Rodríguez, Y. L. (2004). Ordenación de comunidades de fitoplancton en el lago de Chapala, Jalisco-Michoacán, México. *Hidrobiológica*, 14(2), 91-103.
- Preisendorfer, R. W. (1986). Secchi disk science: Visual optics of natural waters. *Limnology and oceanography*, 31(5), 909-926.
- Kratzer, C. & Brezonik, P. 1981. A Carlson type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water resources bulletin*, august Vol. 17, N°4 pp. 713- 715.
- Rast, W., & Lee, G. F. (1978). Summary analysis of the North American (US Portion) OCED eutrophication project: nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution*, 100(1-3), 179-196.
- Smith, V. H. (2003). Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(2), 126-139.
- Walker, W. W. (1979). Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lakes. *Water Resources Research*, 15(6), 1463-1470.
- Wu, R. S. S. (1999). Eutrophication, water borne pathogens and xenobiotic compounds: environmental risks and challenges. *Marine Pollution Bulletin*, 39(1-12), 11-22.

## VII. ANEXO

### Anexo A. Regresión lineal de la relación entre disco Secchi y clorofila "a"

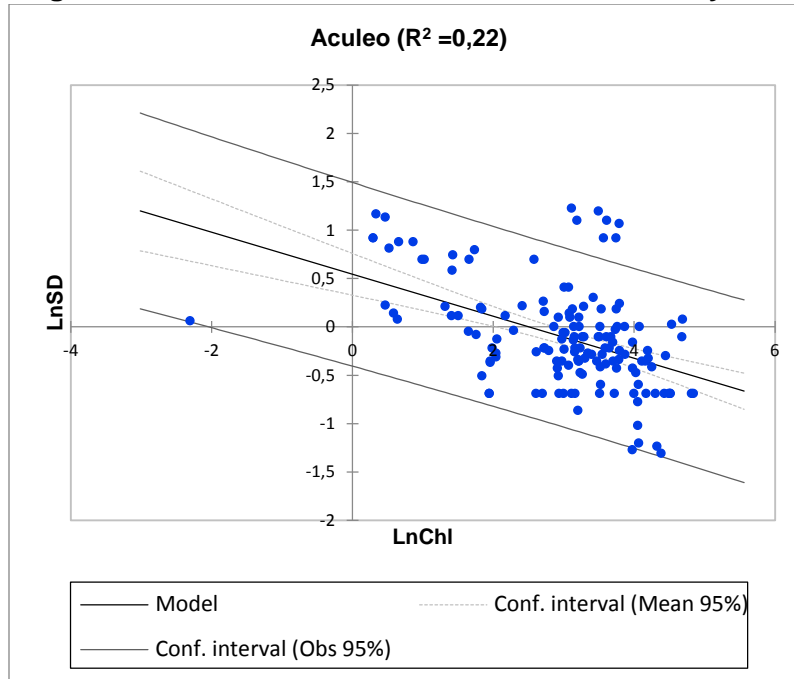


Figura 1: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para la laguna Aculeo.

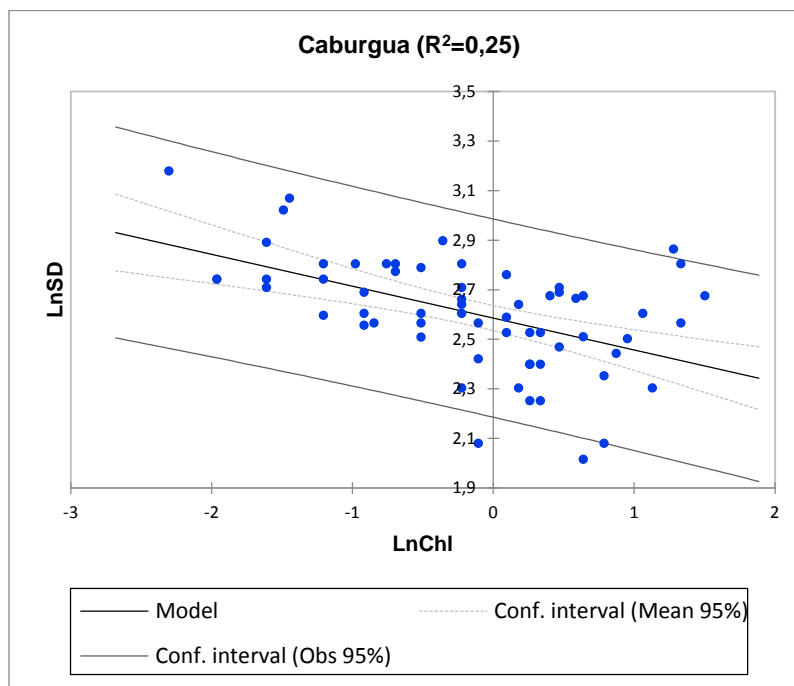


Figura 2: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Caburgua.

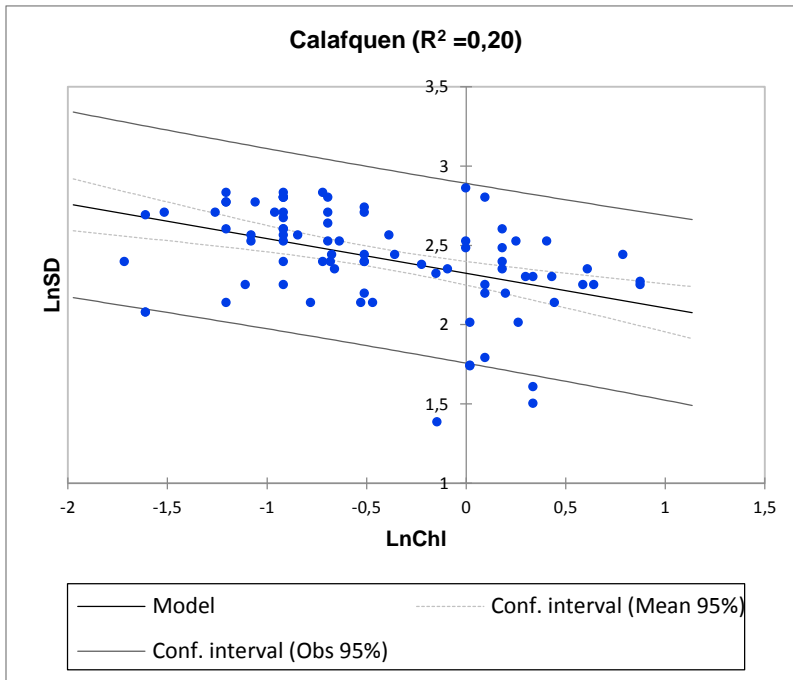


Figura 3: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Calafquén.

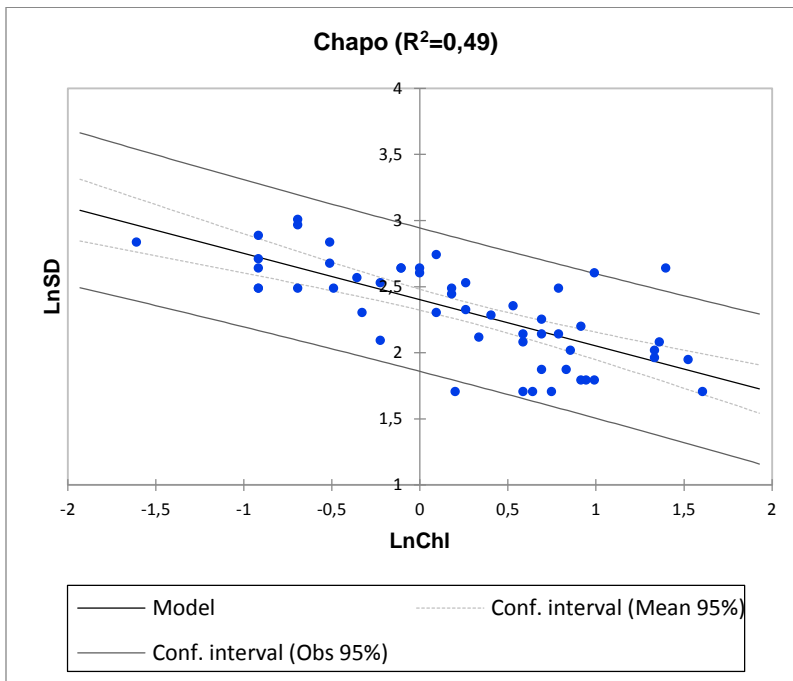
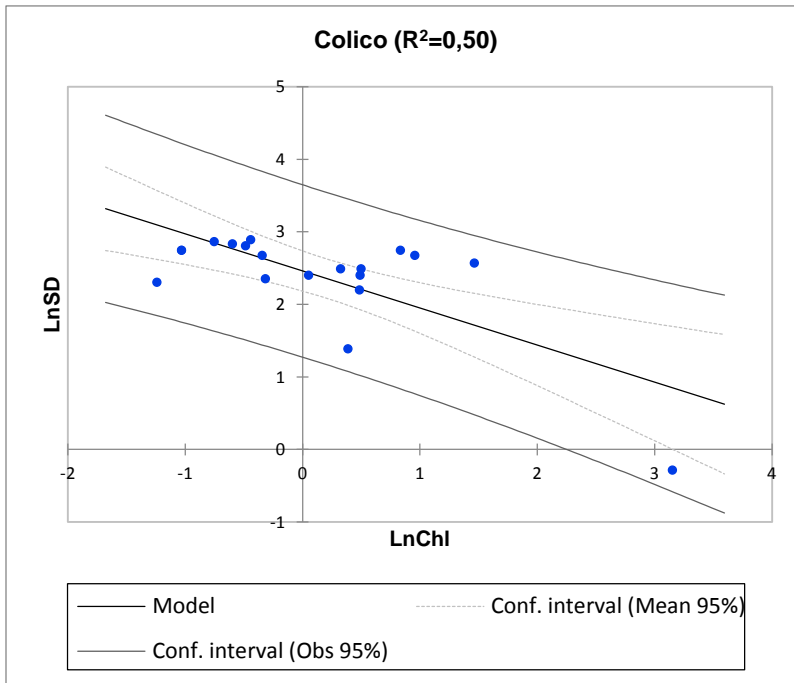
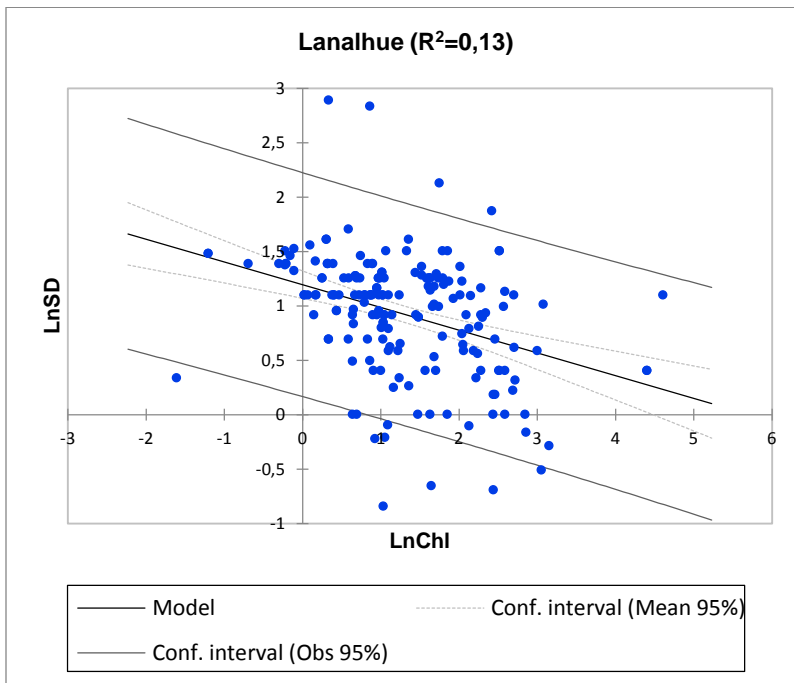


Figura 4: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Chapo.



*Figura 5: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Colico.*



*Figura 6: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Lanalhue.*



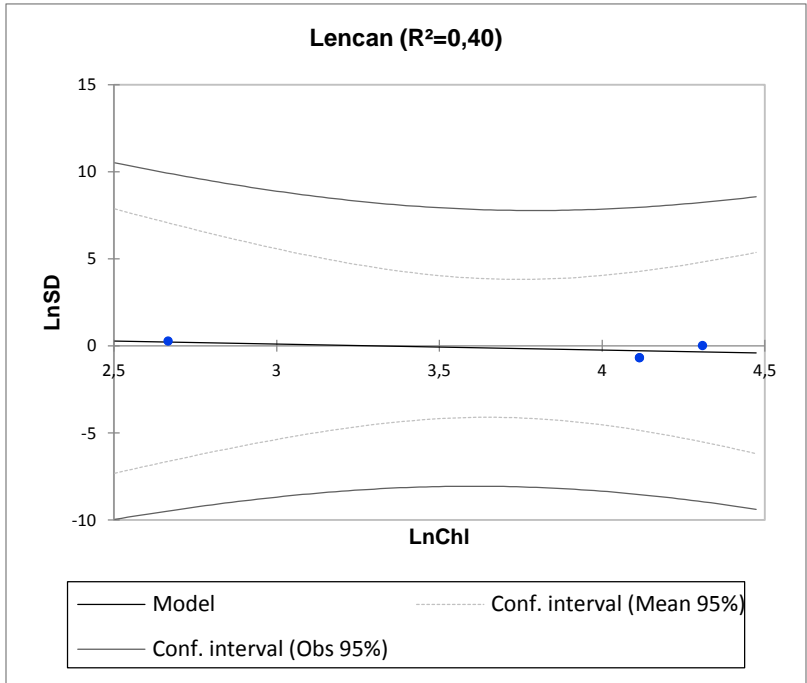


Figura 7: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Lencan.

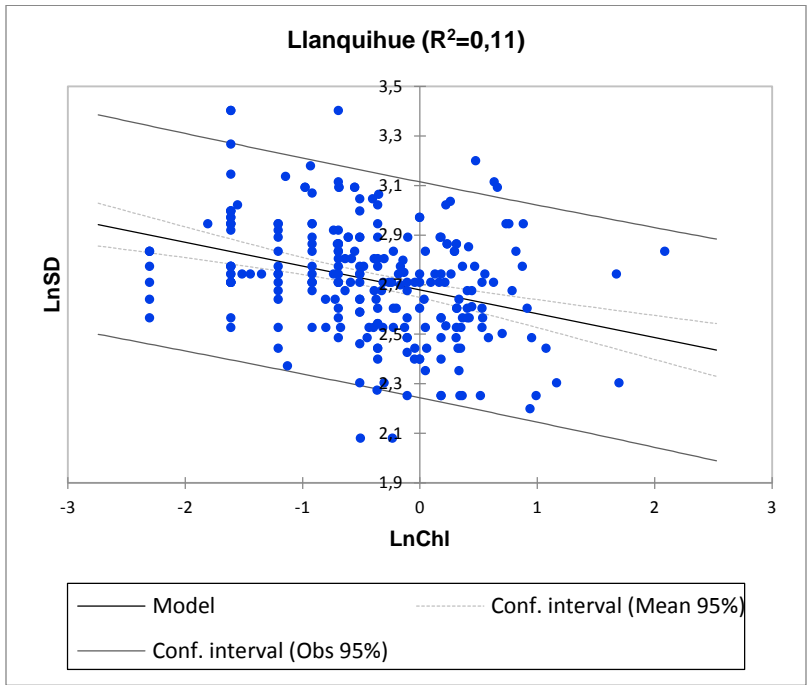


Figura 8: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Llanquihue.

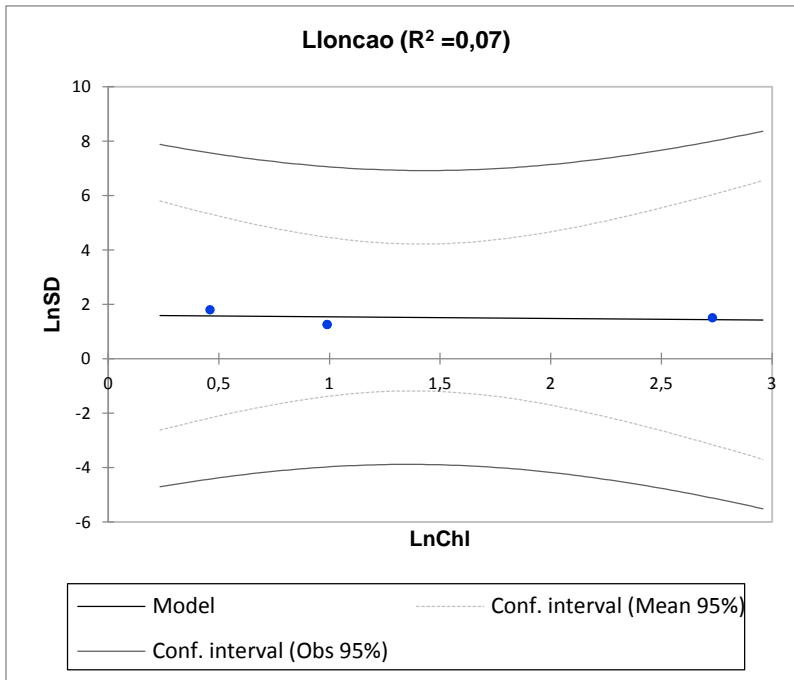


Figura 9: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para el lago Lloncao.

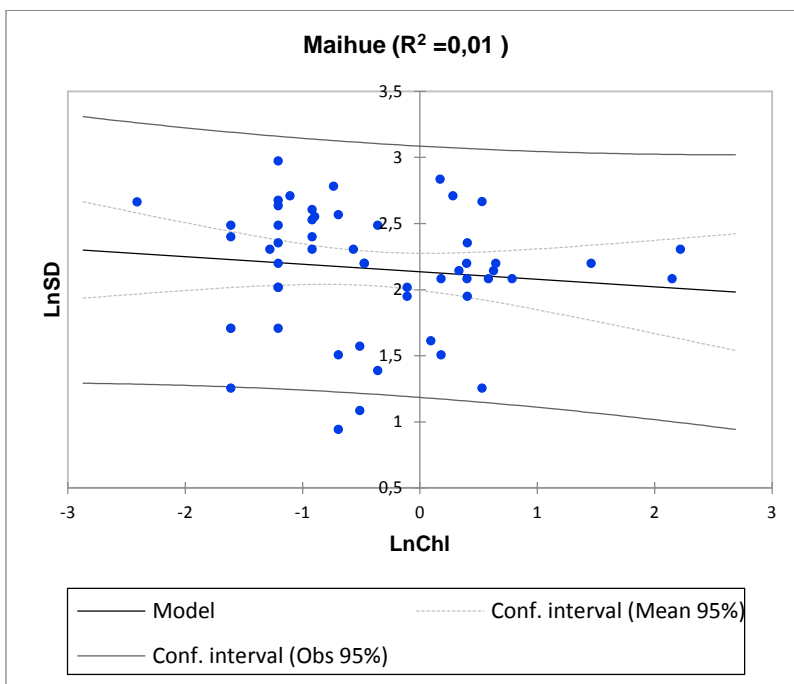


Figura 10: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para el lago Maihue.

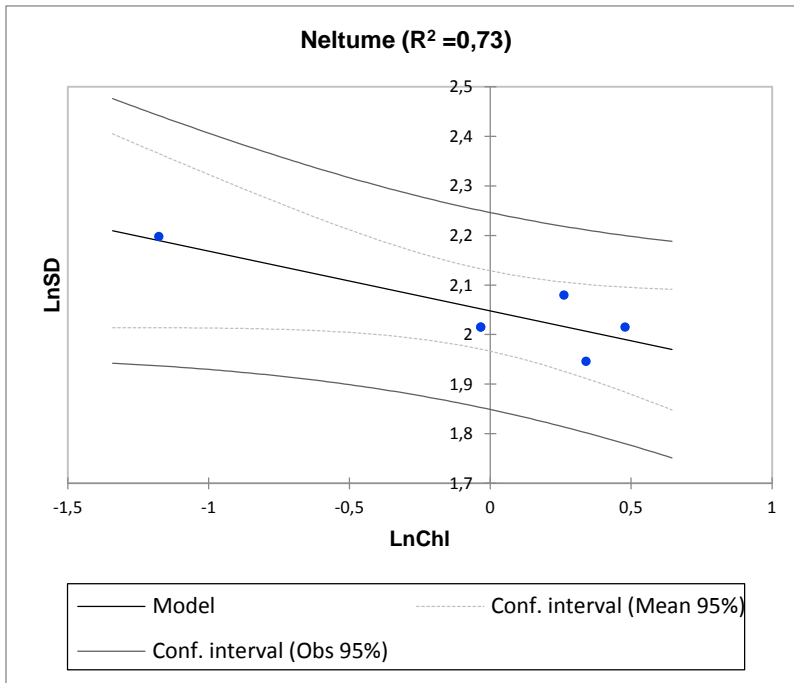


Figura 11: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Neltume.

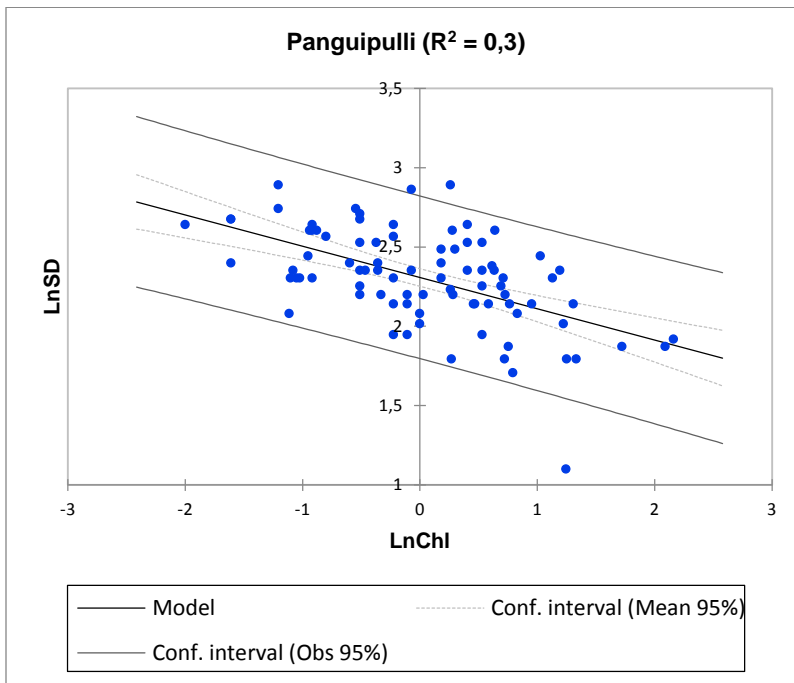
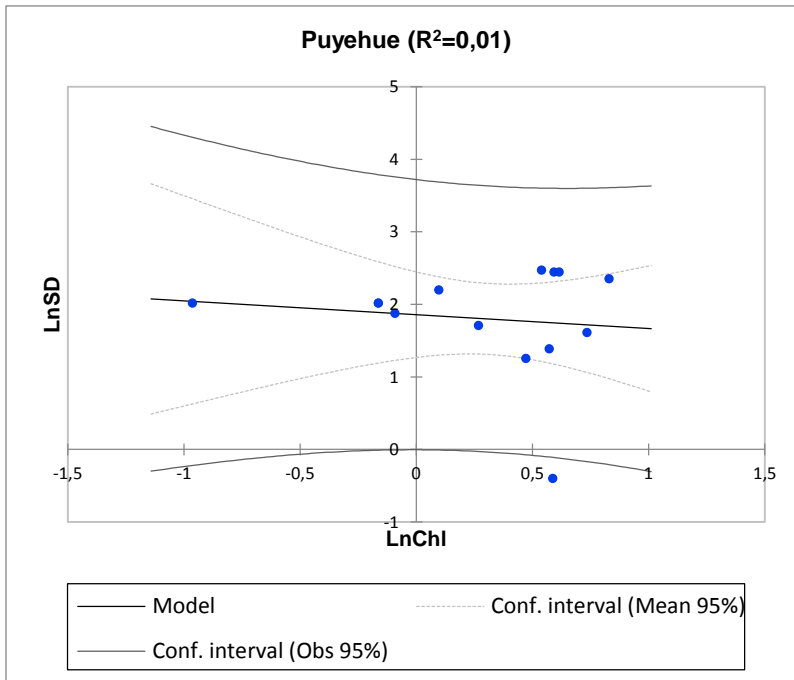
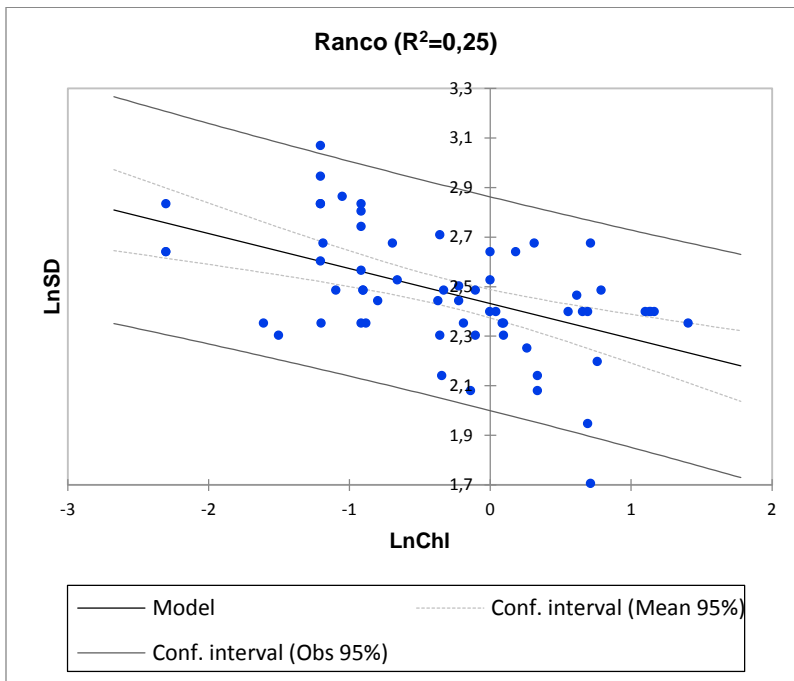


Figura 12: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Panguipulli.



*Figura 13: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Puyehue.*



*Figura 14: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Ranco.*

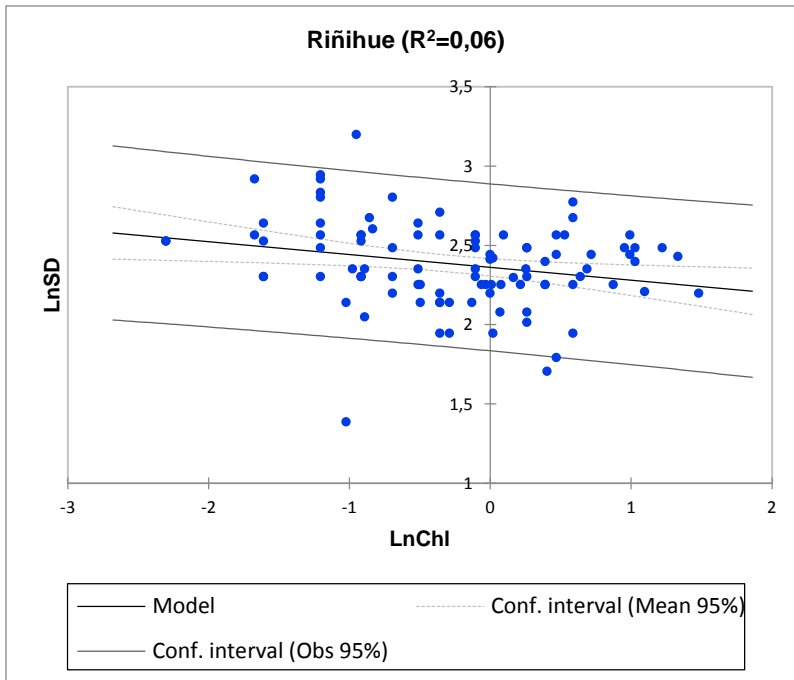


Figura 15: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para el lago Riñihue.

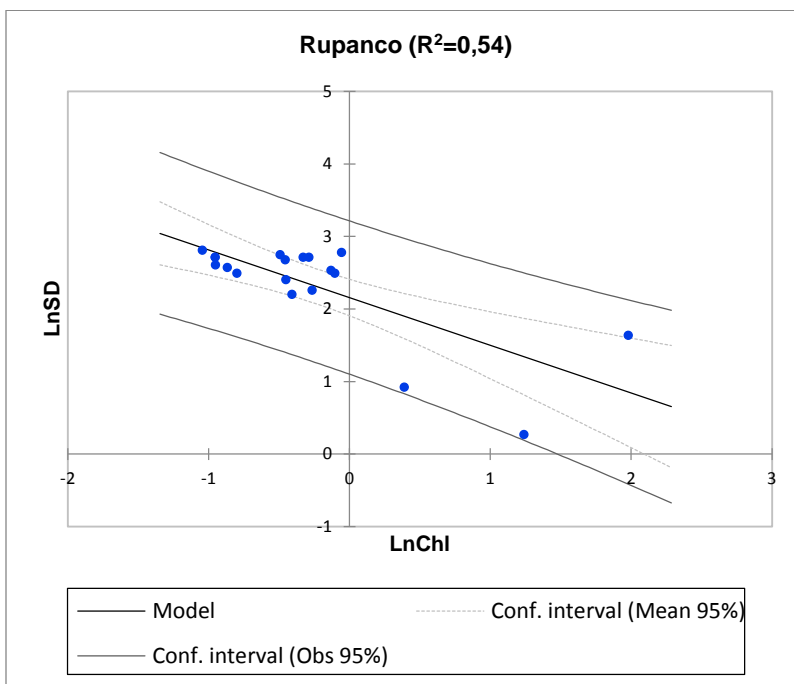


Figura 16: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para el lago Rupanco.

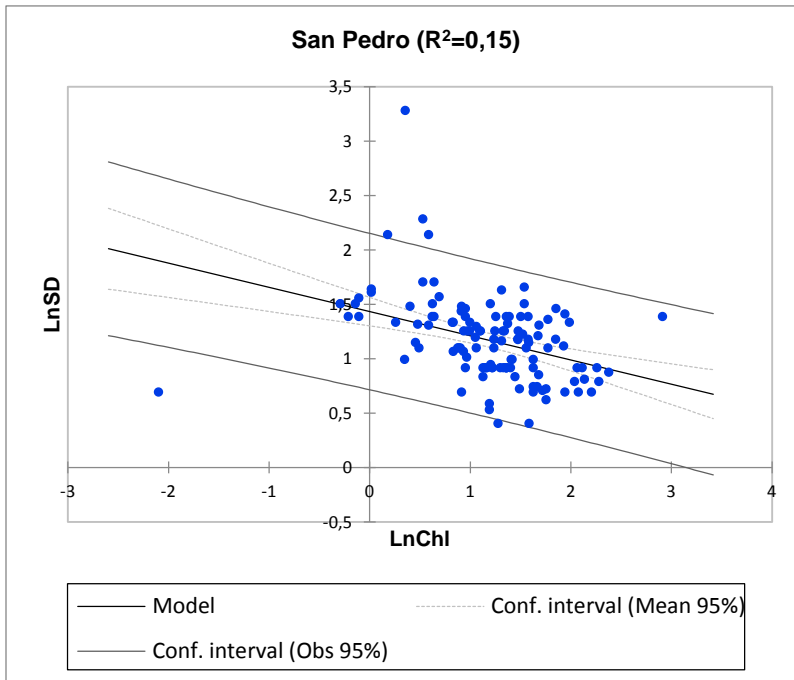


Figura 17: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para el lago San Pedro.

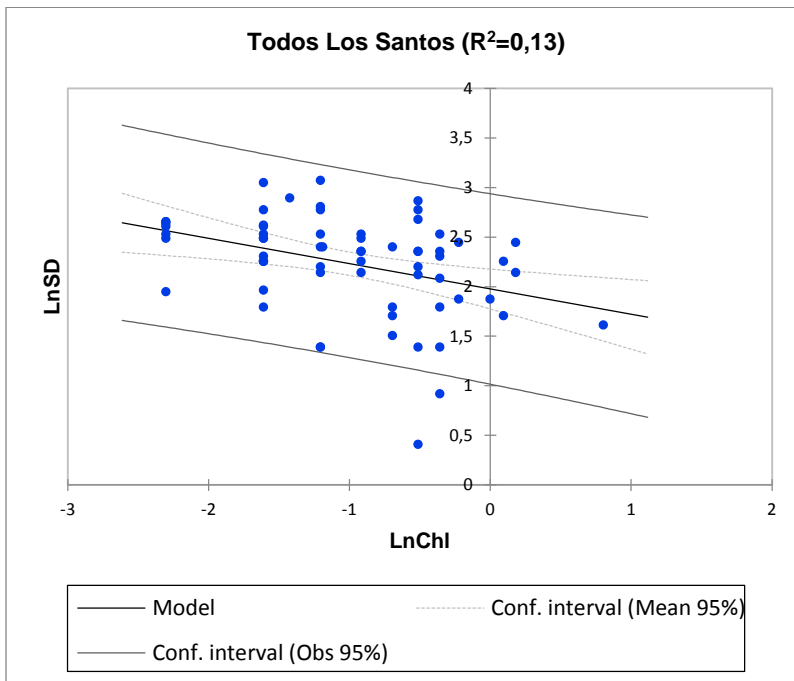


Figura 18: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para el lago Todos Los Santos.

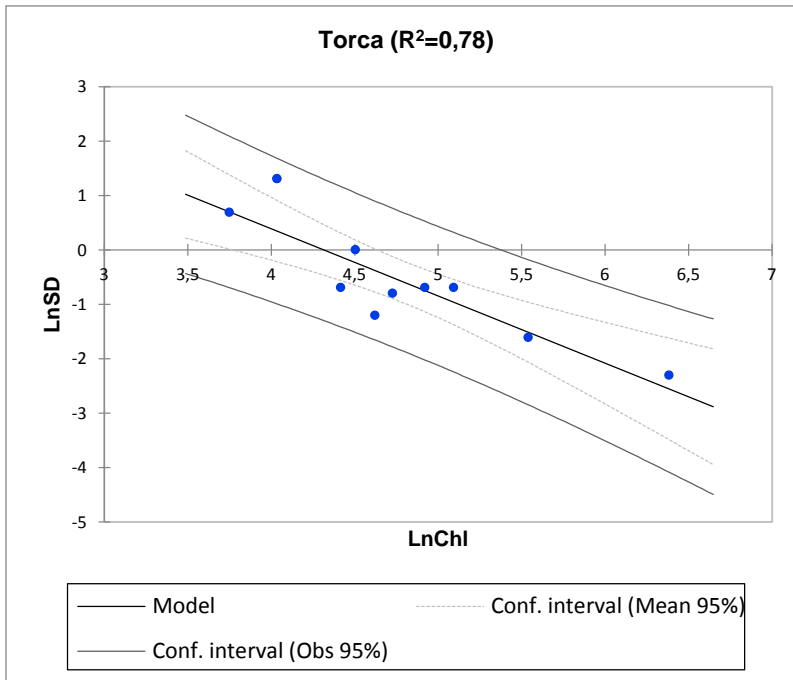


Figura 19: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Torca.

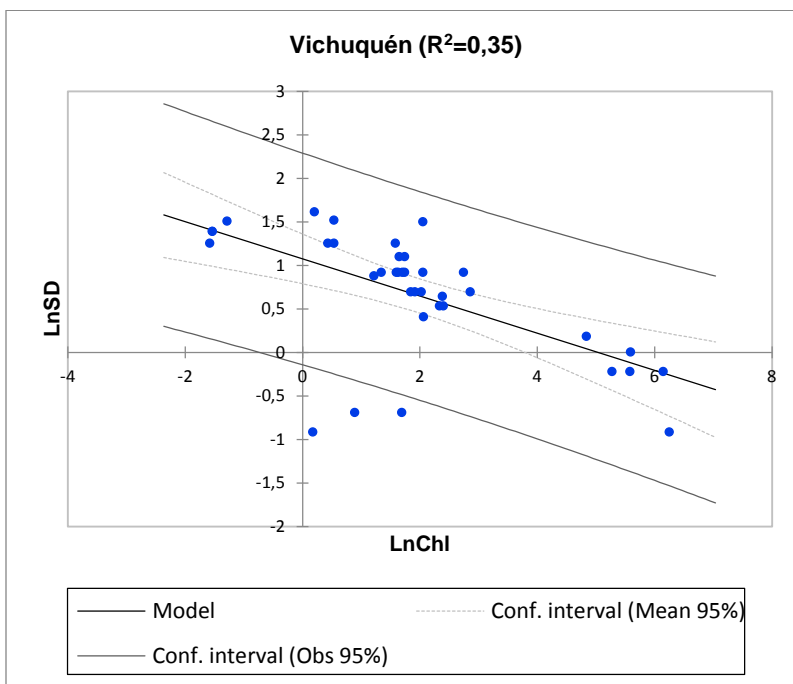


Figura 20: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila "a" para el lago Vichuquén.

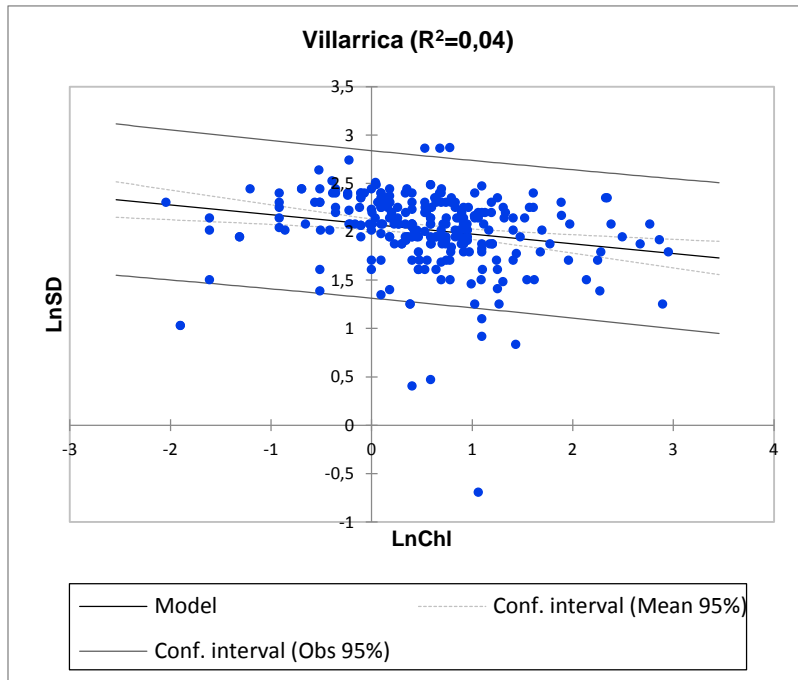


Figura 21: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para el lago Villarrica

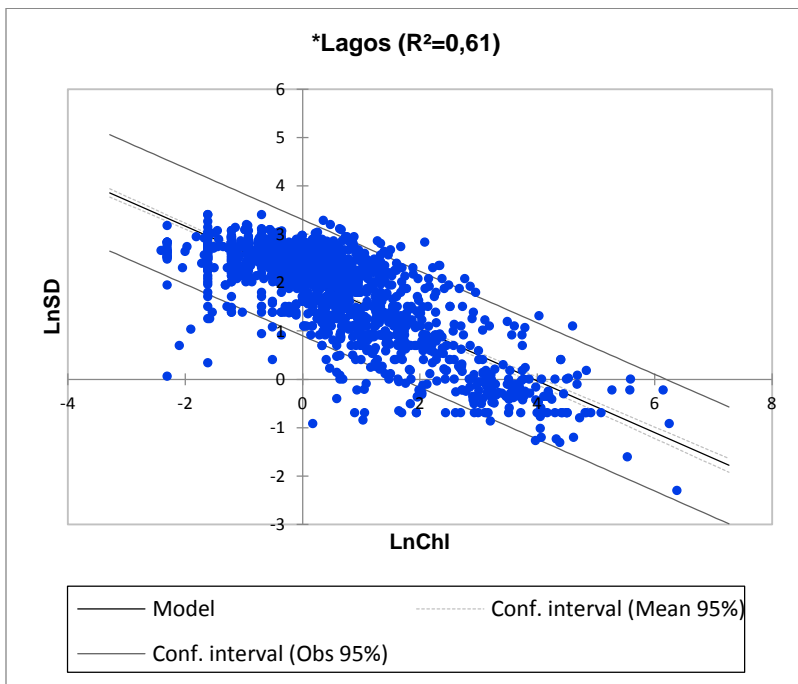


Figura 22: Regresión lineal entre disco Secchi y clorofila “a” para todos los lagos.



## Anexo B. Tendencia del índice de Carlson (TSI) a través del tiempo.

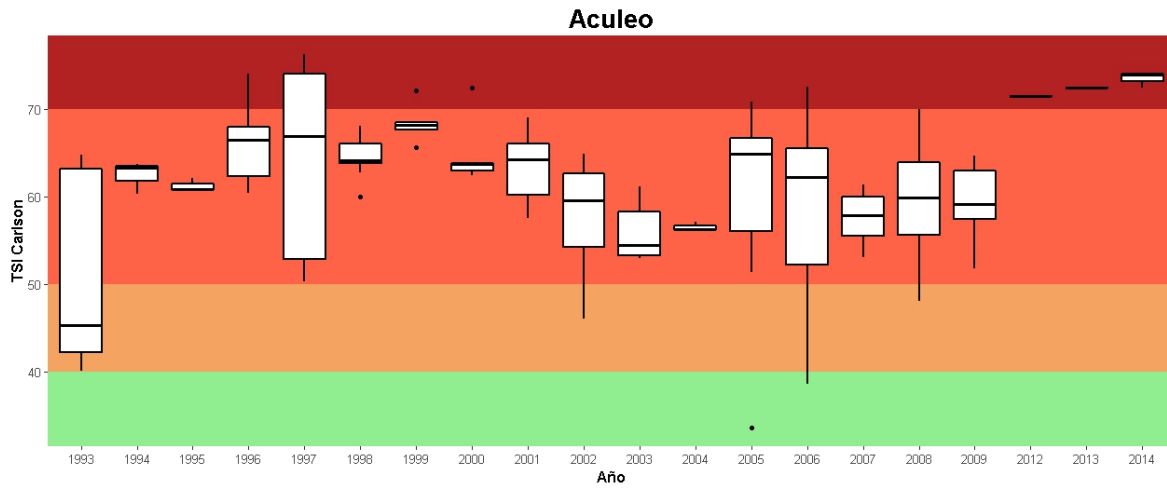


Figura 23: tendencia del índice de Carlson (TSI) para la laguna de Aculeo, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

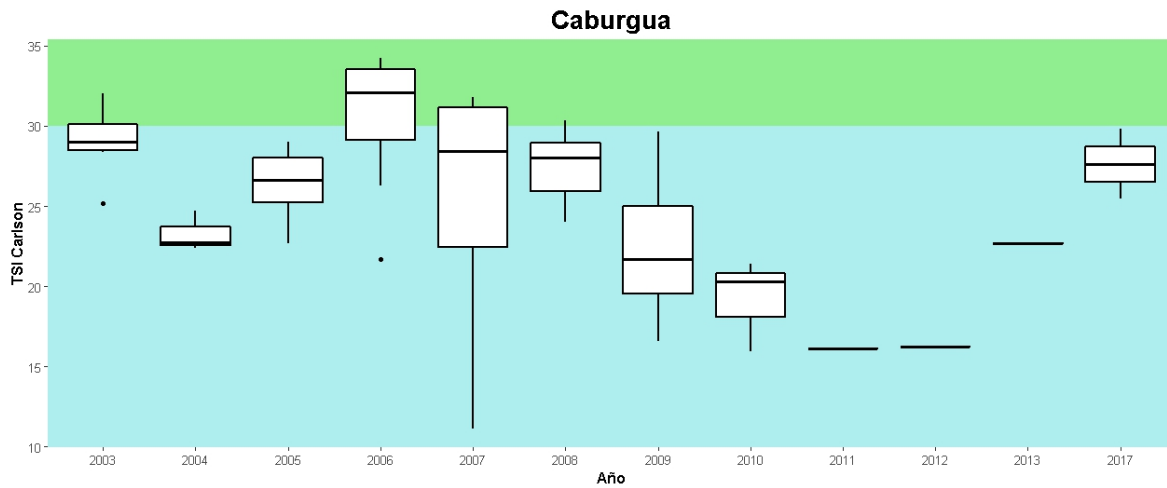


Figura 24: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Caburgua, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

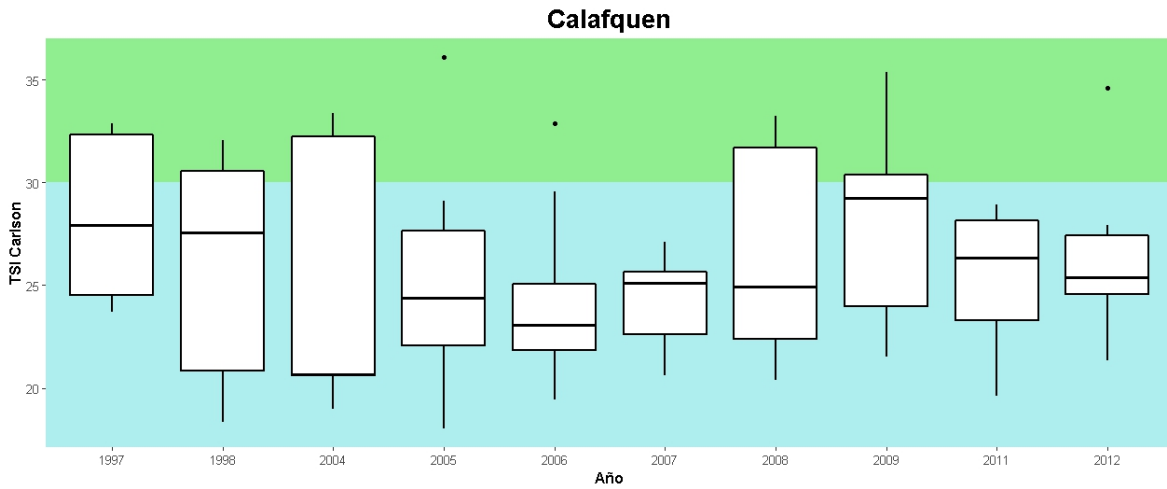


Figura 25: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Calafquen, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

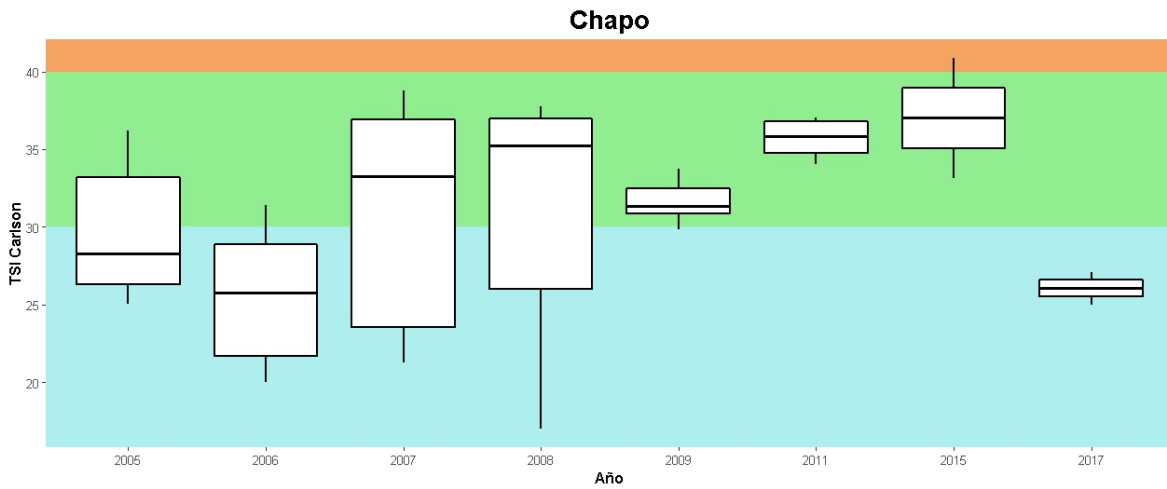


Figura 26: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Chapo, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

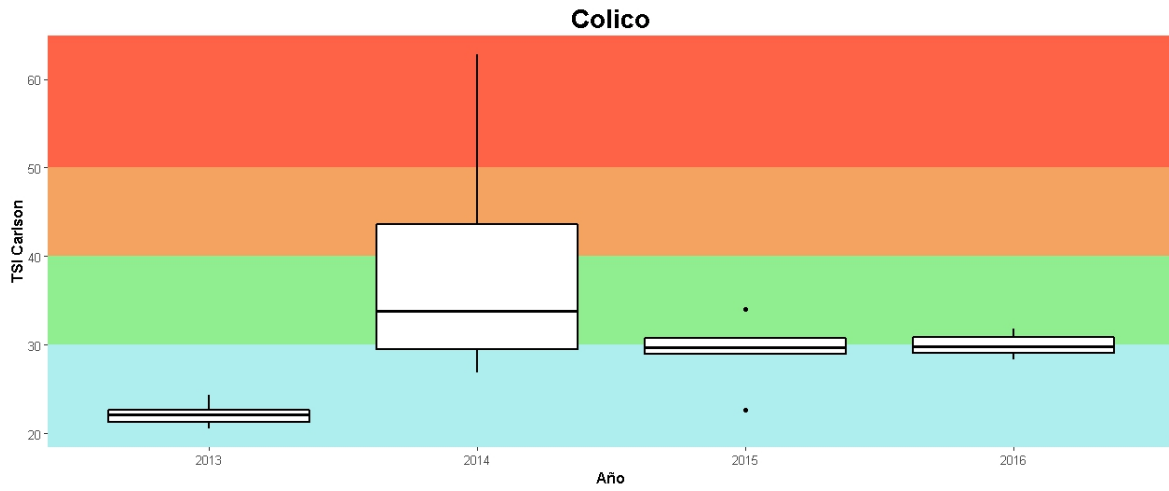


Figura 27: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Colico, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

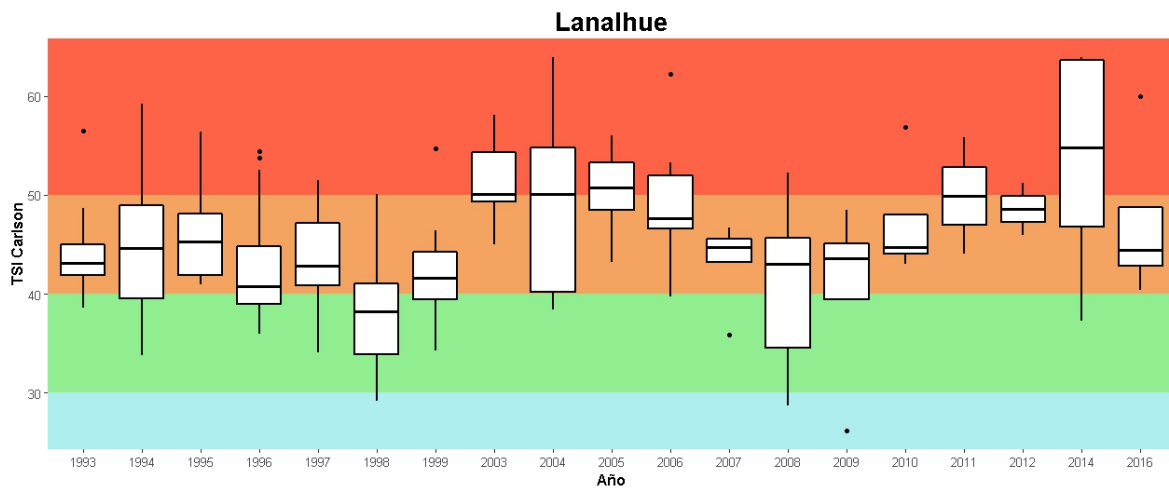


Figura 28: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Lanahue, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

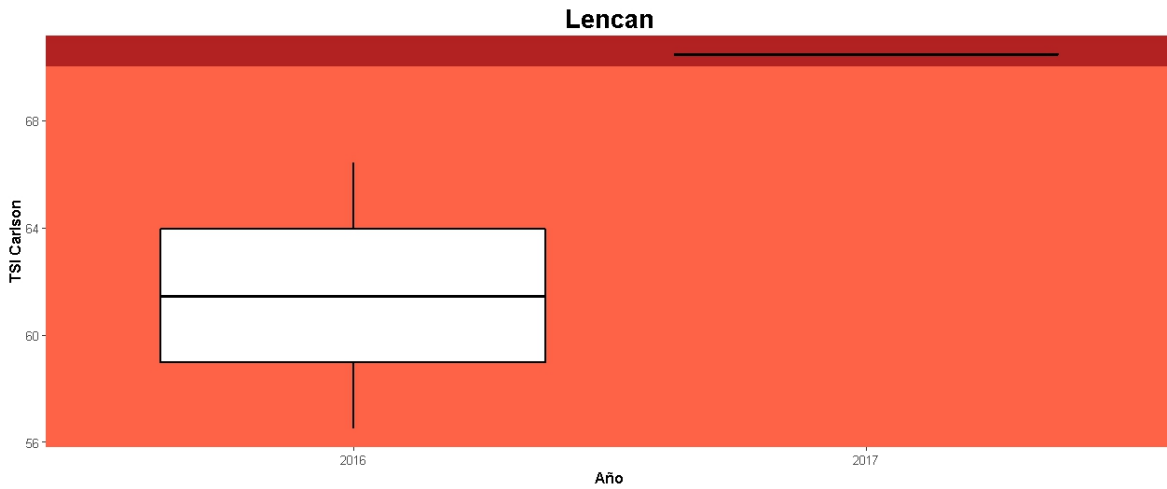


Figura 29: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Lencan, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

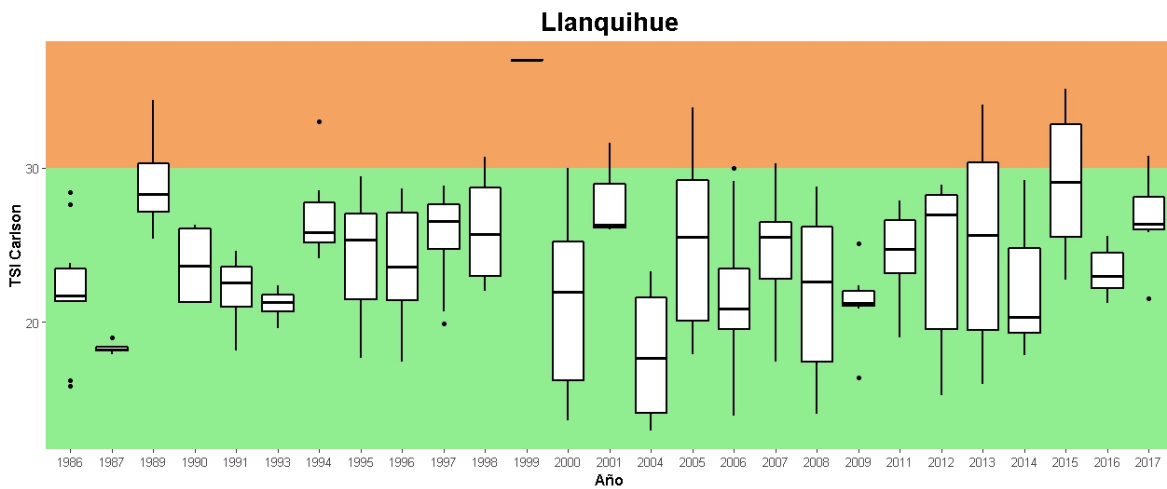


Figura 30: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Llanquihue, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

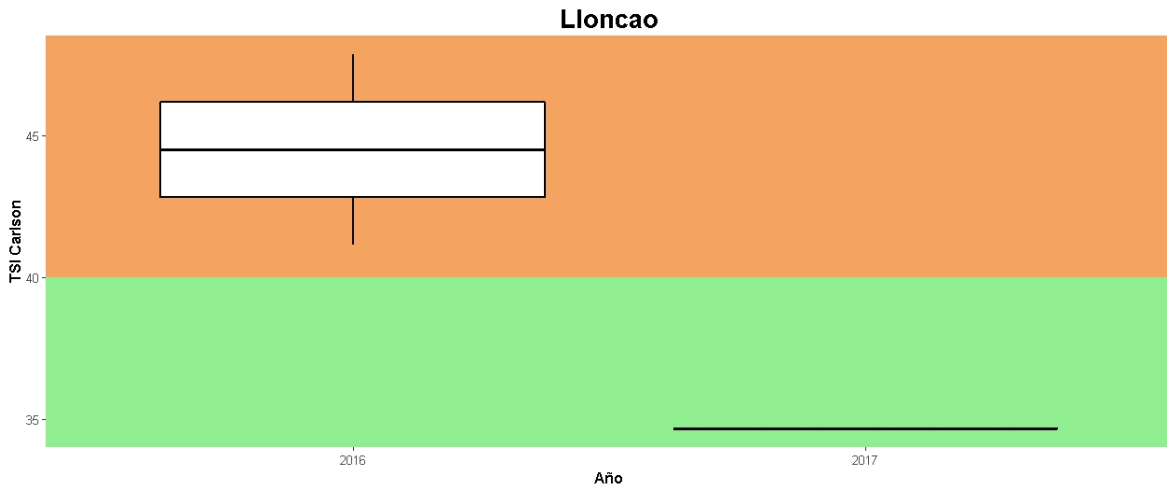


Figura 31: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Lloncao, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

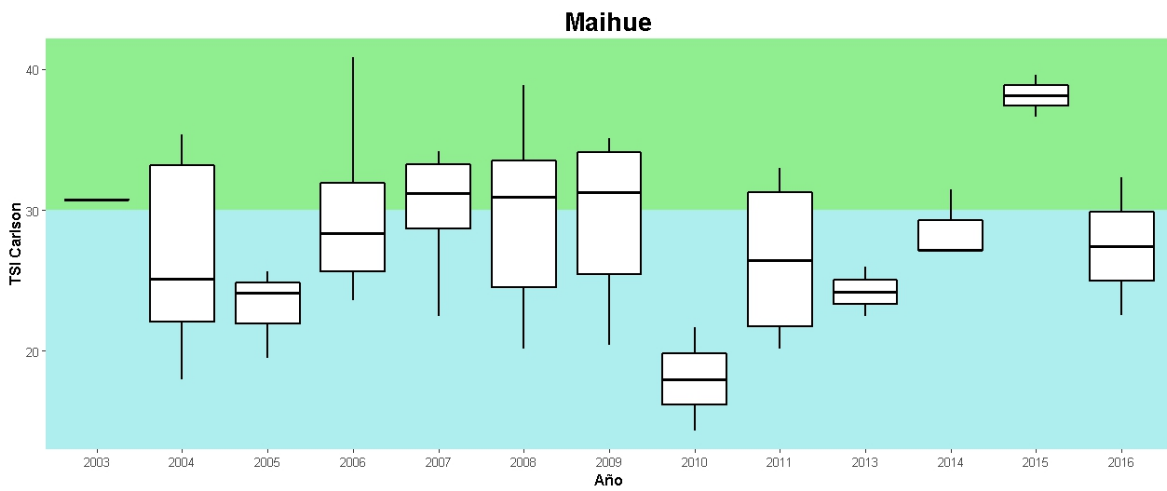


Figura 32: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Maihue, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

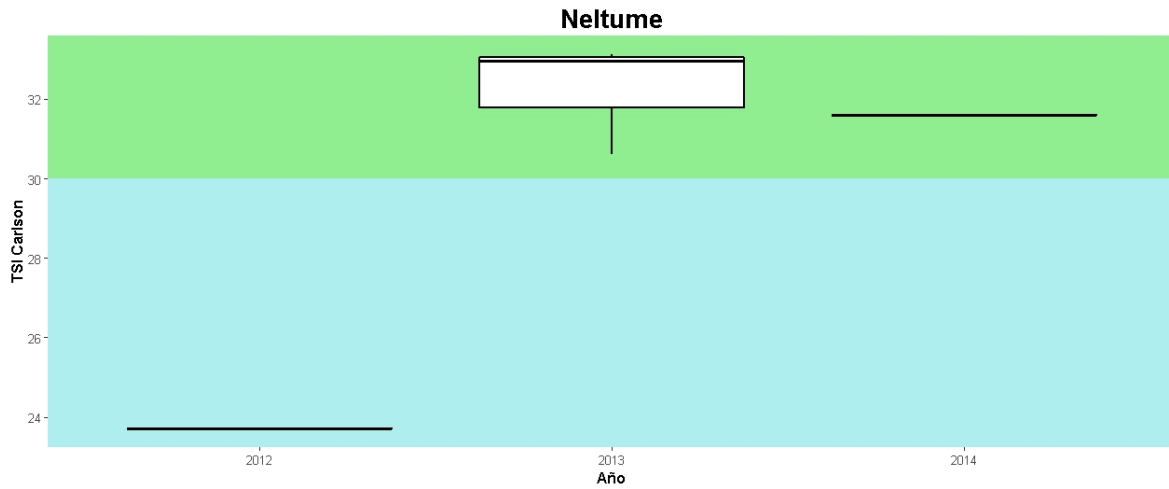


Figura 33: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Neltume, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

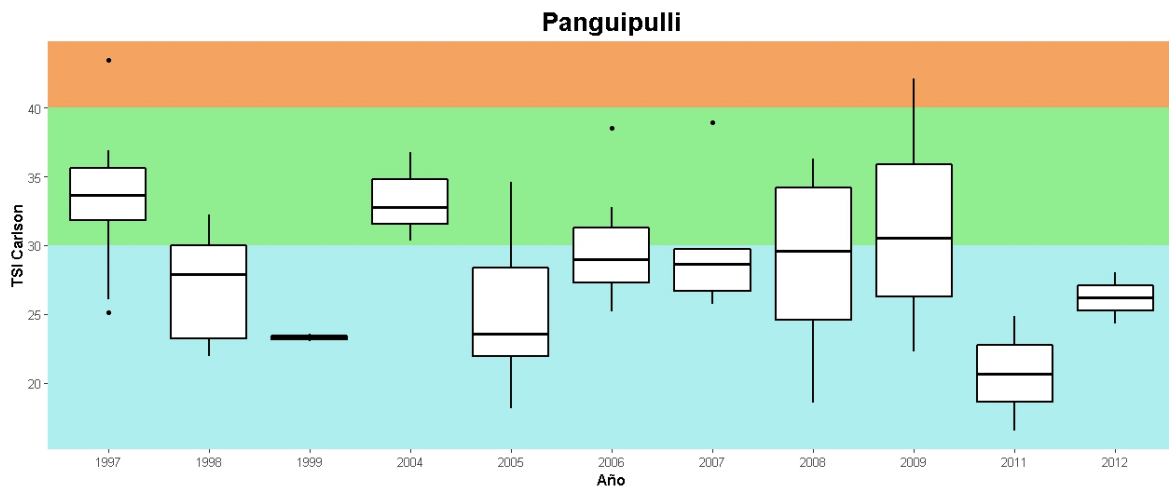


Figura 34: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Panguipulli, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

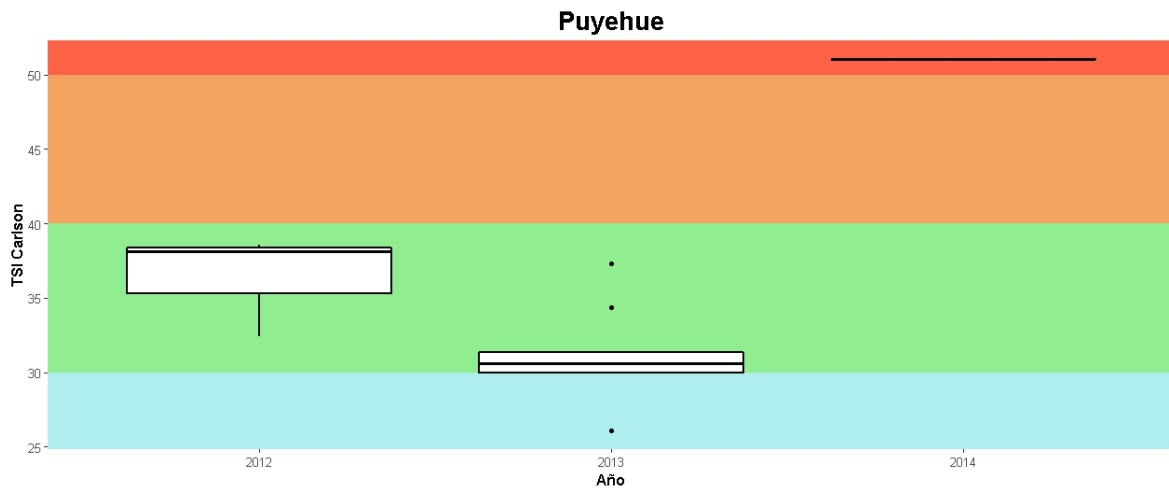


Figura 35: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Puyehue, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

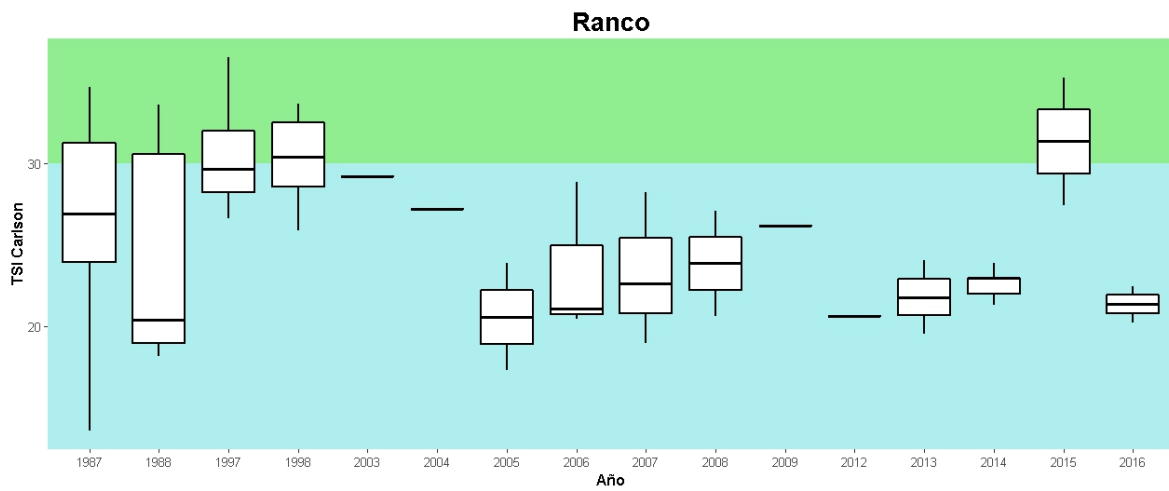


Figura 36: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Ranco, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

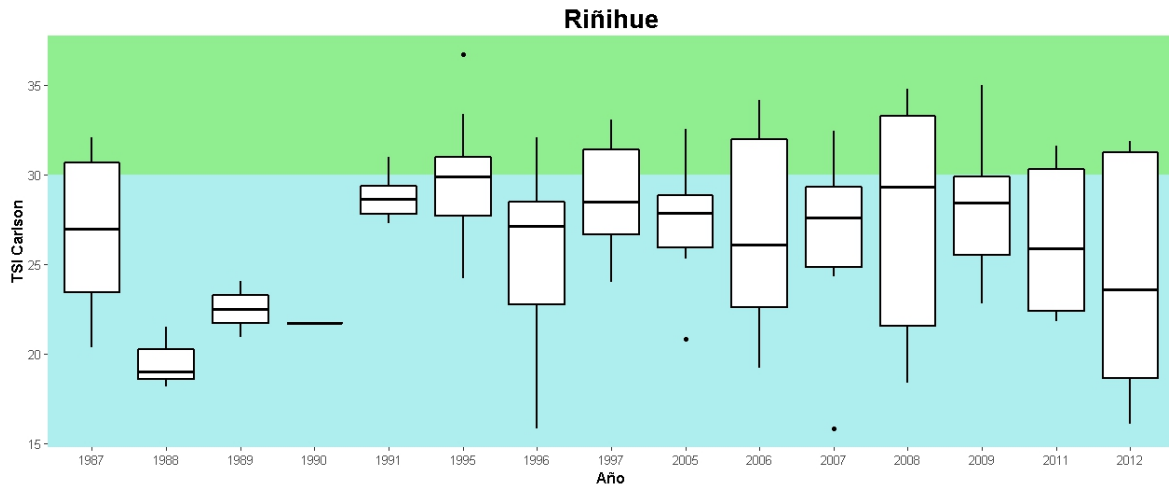


Figura 37: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Riñihue, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

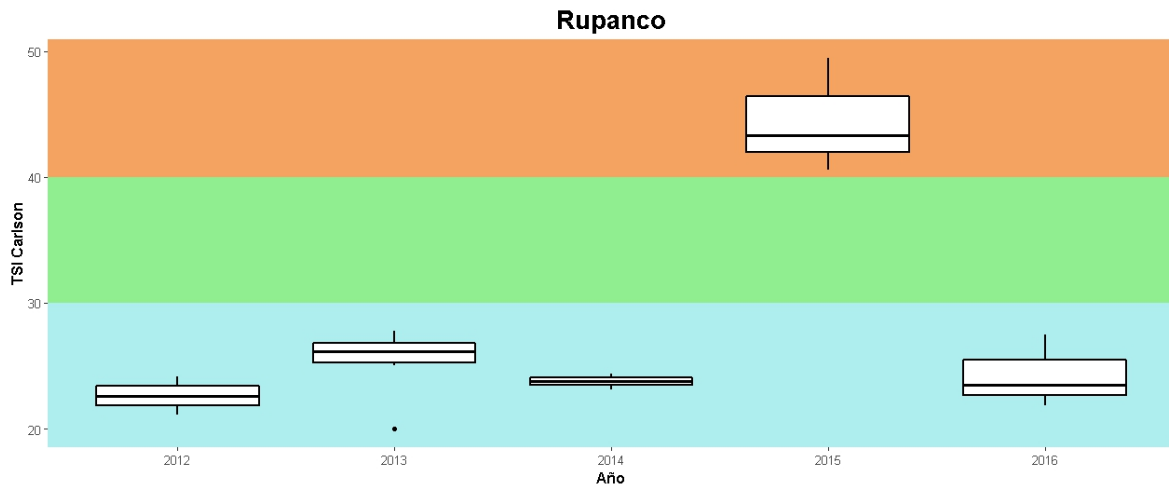


Figura 38: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Rupanco, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.



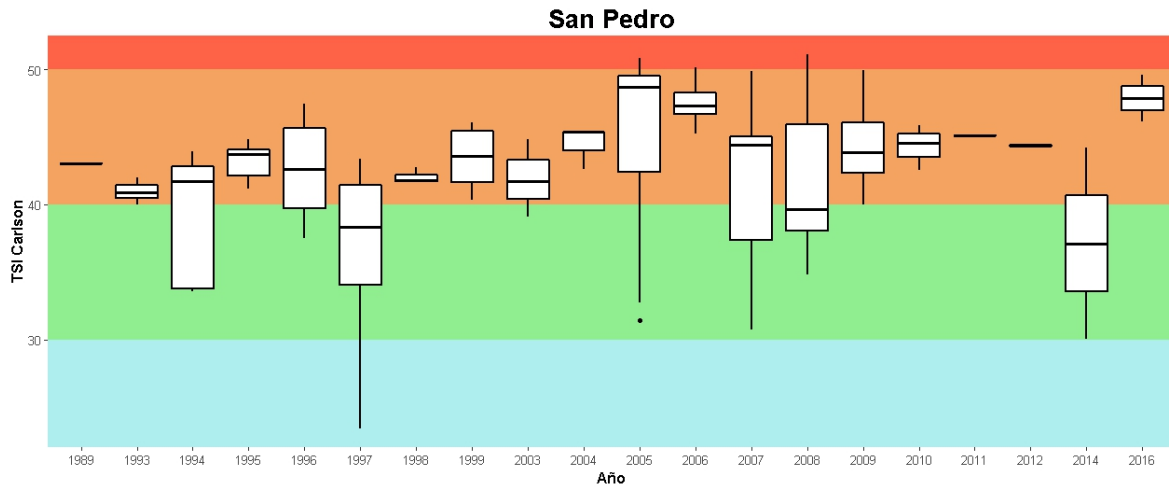


Figura 39: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago San Pedro, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

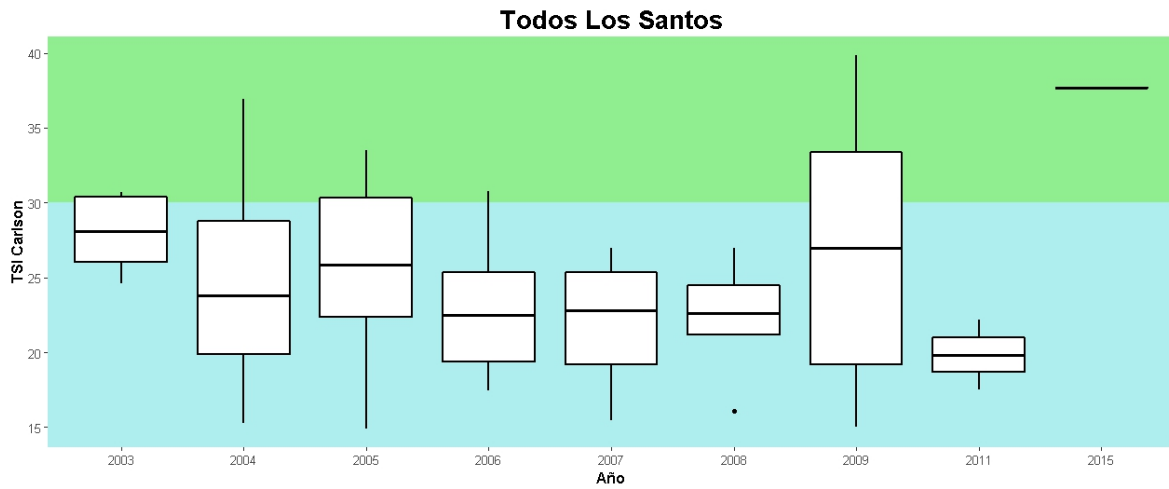


Figura 40: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Todos Los Santos, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

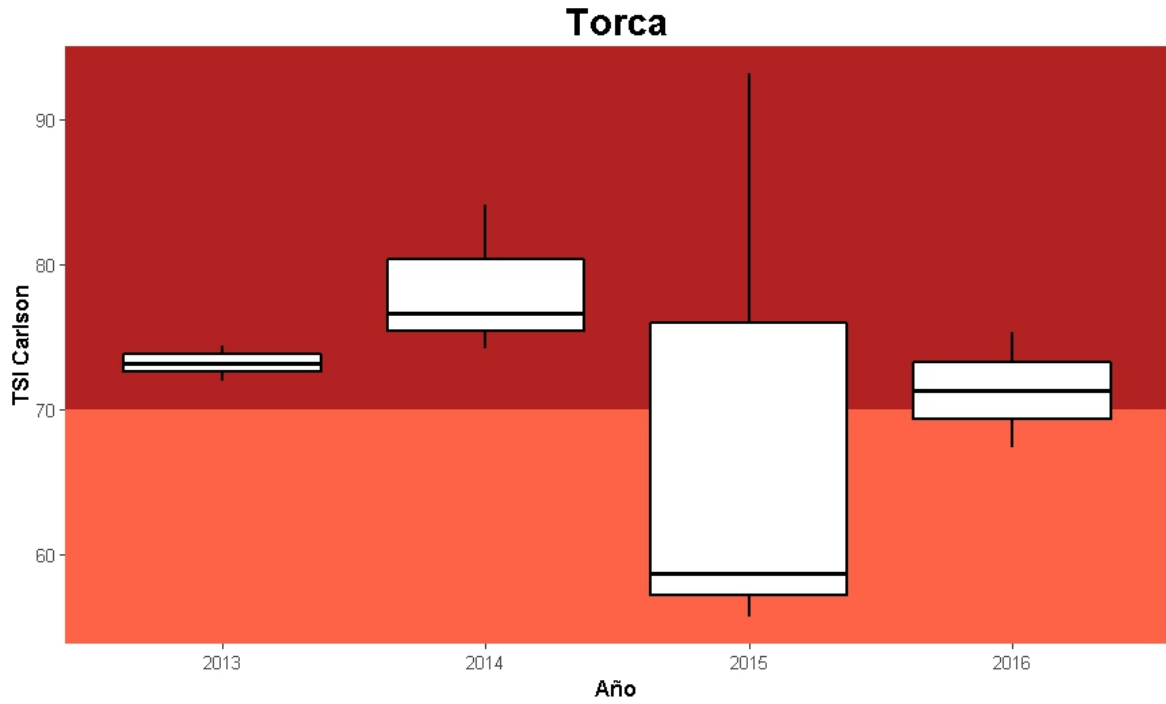


Figura 41: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Torca, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

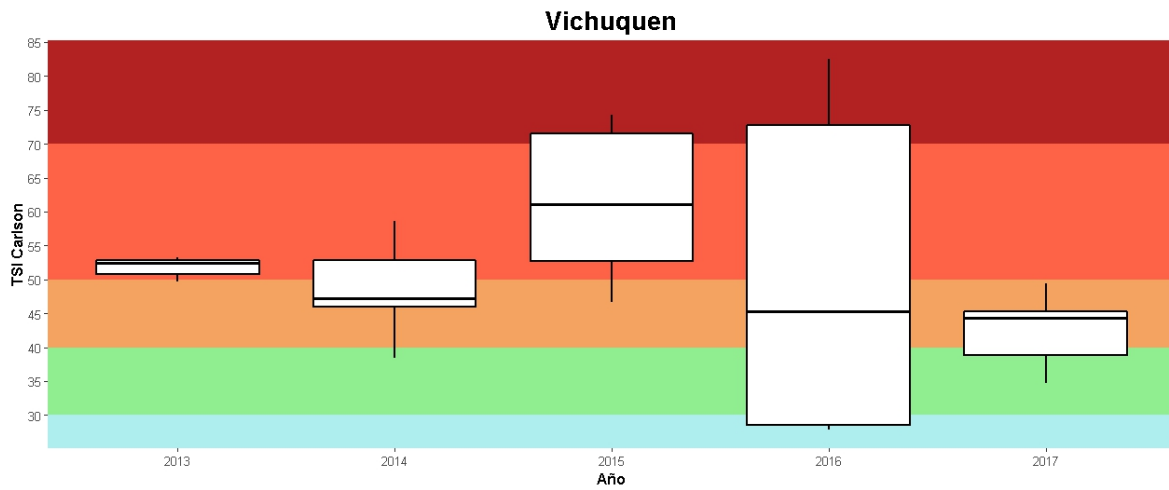


Figura 42: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Vichuquén, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

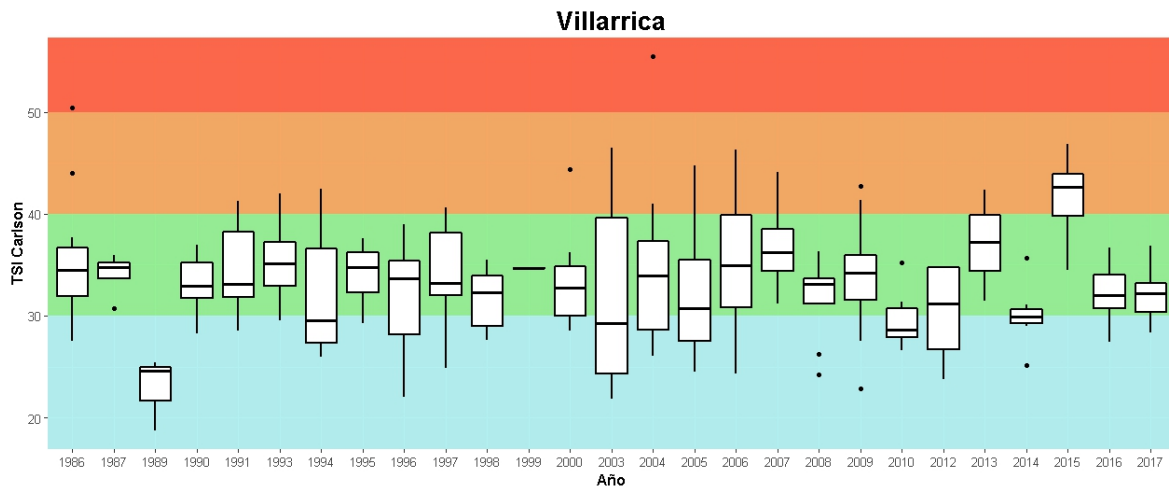


Figura 43: tendencia del Índice de Carlson (TSI) para el lago Villarrica, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

**Anexo C.** Estado trófico anual para cada lago según el Índice de Carlson (TSI).

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Lanahue	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Orange	Orange	Orange	Orange	Red	Red	Red	Red
Aculeo	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Caburgua	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Caiafquen	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Chapo	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Colico	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Lercan	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Llanquihue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Lloncao	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Lleulleu	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Maihue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Neltrume	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Panguipulli	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Puyehue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Ranco	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Rifihue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Rupanco	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
San Pedro	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
Todos los Santos	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Torca	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Vichuquen	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Villarrica	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Petrel	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Pero	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Tapunueco	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Natri	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Batros	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Butaco	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Antiquina	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Tarahuin	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Yaldad	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
San Antonio	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue

Figura 44: Estado trófico según el Índice de Carlson (TSI) desde el año 2003-2017 para cada lago, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.

	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lanahue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aculeo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Caburgua	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Calafquen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chapo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Colico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lencan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Llanquihue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lloncao	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ulleu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maihue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Neitume	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Panguipulli	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Puyehue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ranco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Riñihue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rupanco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
San Pedro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Todos los Santos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vichuquen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Villarrica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tapuñueco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Natri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Batros	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Butaco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antiquina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarahuin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yaldad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
San Antonio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 45: Estado trófico según el Índice de Carlson (TSI) desde el año 1986–2002 para cada lago, donde cada color corresponde al estado trófico indicado en la Tabla 1.