

GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DEPTO. DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

RELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE LA PALOMA CON EL VOLUMEN EMBALSADO Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO

**REALIZADO POR:
QUÍMICO AMBIENTAL: DANIELA MARGARITA FREDES
MUÑOZ**

**SIT N°190
DICIEMBRE 2009**



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“RELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE LA PALOMA CON
EL VOLUMEN EMBALSADO Y SU EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial
de los requisitos para optar al Título de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

Daniela Margarita Fredes Muñoz

Director de Seminario de Título: Ing. Mesenia Atenas Vivanco
Profesor Patrocinante: M. Cs. Ximena Molina Paredes

Noviembre de 2009
Santiago - Chile

Reseña



Ingresé a la Universidad de Chile porque siempre fue mi sueño desde niña, aún cuando no tenía muy claro a que área quería dedicarme tenía la certeza de que tenía que ser en ésta casa de estudio. La Facultad de Ciencias era desconocida para mí, y más aún la carrera de Química Ambiental, me interesaba mucho el área del medioambiente porque en ese entonces consideraba y aún lo sostengo, que a Chile le falta iniciativa para crear conocimiento ambiental, para despertar la curiosidad de la gente y su preocupación. En ese momento me considere capaz de aportar algo, tuve las ganas de intentarlo, y eso me llevó a matricularme y a pasar los exigentes primeros años de estudio.

Al familiarizarme más con la carrera desarrolle una inclinación por las ciencias del suelo y agua. En la primera desarrolle mi unidad de investigación, consistente en la persistencia de un pesticida organofosforado llamado clorpirifos en dos tipos de suelo. En la segunda desarrolle el presente Seminario de Título, escogí la Dirección General de Aguas porque era una institución con prestigio y sobretodo mucha información sobre el recurso. Mi tema se desarrollo en torno al embalse La Paloma, fue un tema escogido personalmente porque mi familia pertenece a la IV región y a pesar de no haber nacido allí yo también me considero parte de ella, voy tan seguido como puedo y el haber realizado un trabajo que ayude aunque sea en mínima medida a generar algunas preguntas y resolver algunas dudas me permite apreciarla aún más.

A futuro espero seguir mis estudios en algún nivel superior, sea acá o en otro lugar, siempre será con las intenciones de seguir aportando a las ciencias ambientales del país.

Dedicatoria

...A mi familia...

Agradecimientos

Agradezco a la Dirección General de Aguas, al Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos por dar cabida a mi tema, tantas inquietudes y respuestas que generó. A Mónica Musalem Jara por orientarme y estar siempre dispuesta a escuchar nuevas ideas.

A Cinthya Montecinos, José Ortiz, Freddy Astudillo y Marcela del laboratorio de la DGA, por otorgarme la información necesaria y por permitirme participar en el trabajo de terreno del embalse La Paloma. Guardo muy buenos recuerdos y experiencias.

A mi familia. Mis padres por el esfuerzo que han hecho para que yo tenga una excelente educación, la paciencia, la compañía, y por quererme incondicionalmente.

A la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile por permitirme aprender, soñar, y proyectar estos sueños a futuro. Por incentivarme a ser una mejor profesional cada día, a conseguir nuevos desafíos, y lograr muchos de éstos.

Finalmente, y no menos importante, a mis amigos. Por hacer la experiencia universitaria algo memorable, por las noches de estudio, por las tardes de distracción, por los días de desesperación y por los de triunfo también. Ustedes hacen esta experiencia completa en todo sentido.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1. Antecedentes Generales.....	1
1.1. Agua: usos, distribución en el país.....	1
1.2. Embalses y su necesidad en Chile.....	2
1.3. Rol de la DGA y DOH en el monitoreo de agua.....	4
1.4. Marco teórico.....	6
1.4.1. Eutroficación.....	6
1.4.2. Índice para determinar la eutroficación.....	9
1.4.3. Nutriente limitante.	11
1.4.4. Balance de fósforo.....	13
2. Descripción del área de estudio	15
2.1. Ubicación geográfica: Cuenca del Limarí.....	15
2.2. Clima.....	17
2.3. Hidrología.....	18
2.3.1. Río Huatulame.....	19
2.3.2. Río Grande.....	20
2.3.3. Río Hurtado.....	20
2.3.4. Río Limarí.....	20
2.4. Dinámica económica de la cuenca.....	21
2.5. Embalse La Paloma.....	22
2.5.1. Antecedentes de su construcción y Operación.....	22
2.5.2. Monitoreo de la calidad del agua del embalse La Paloma.....	25
2.5.3. Impactos generados por la construcción y Operación de un embalse.....	26
2.5.4. Usos del agua del embalse Paloma.....	27
2.6. Necesidad de realizar estudios de calidad de agua en el embalse Paloma.....	28

3. Hipótesis.....	29
4. Objetivos.....	29
4.1. Objetivos Generales.....	29
4.2. Objetivos específicos.....	29
II. METODOLOGÍA.....	30
1 Recolección de información.....	30
2. Selección y orden de datos.....	30
3. Tratamiento de datos.....	32
3.1. Relación de las variables de calidad con el volumen embalsado.....	32
3.2. Diagnostico de la calidad del agua del embalse La Paloma.....	33
a) Determinación del estado trófico, nutriente limitante y balance de fósforo del embalse La Paloma	33
b) Evolución temporal de las variables.....	35
III. RESULTADOS.....	37
1. Estudio de variables de calidad con respecto al volumen embalsado.....	37
1.1. Relación de variables con volumen embalsado.....	41
1.2. Relación con el aporte de materia orgánica.....	43
2. Calidad del agua.....	51
2.1. Determinación del Índice trófico según la OCDE (1982).....	51
2.2. Determinación del nutriente limitante y balance de fósforo.....	52
2.3. Evolución de las variables de calidad en el periodo 1993-2008.....	55
2.3.1. Variables <i>in-situ</i>	55
2.3.2. Nutrientes.....	62
a) Nutrientes nitrogenados.....	62
b) Nutrientes fosforados.....	66
2.3.3. Variables secundarias.....	69

IV. DISCUSIÓN GENERAL.....	73
1. Estudio de variables de calidad con respecto al volumen embalsado.....	73
1.1. Estudio del volumen embalsado histórico.....	73
1.2. Relación de variables con el volumen embalsado.....	73
1.2.1. Relación con la materia orgánica.....	74
2. Diagnostico de la calidad del agua.....	79
2.1. Índice trófico de la OCDE.....	79
2.2. Nutriente limitante y balance de fósforo.....	81
2.3. Evolución temporal de las variables de calidad.....	84
2.3.1. Variables <i>in-situ</i>	84
2.3.2. Nutrientes.....	86
a) Nitrogenados.....	86
b) Fosforados.....	88
2.3.3. Variables secundarias.....	90
V. CONCLUSIONES.....	92
VI. SUGERENCIAS.....	95
VII. REFERENCIAS.....	96
VII. ANEXOS.	101
Anexo I. Tablas.....	102
Anexo II. Figuras.....	106
Anexo III. Campaña de monitoreo primavera 2008.....	113
Anexo IV. Fotografías.....	116
Anexo V. Cálculos.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables medidas en el laboratorio de la Dirección General de Aguas.....	103
Tabla 2. Valores de fósforo total (P_{total}) y nitrógeno total (N_{total}) para superficie de la estación Muro en primavera (1993-2005).....	104
Tabla 3. Promedio geométrico de P_{total} , N_{total} , Cl “a”, y Transparencia del disco Secchi para las estaciones de monitoreo en el Muro, brazo Río Huatulame y brazo Río Grande en el embalse La Paloma.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la transparencia del disco Secchi.....	107
Figura 2. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la concentración de nitrógeno total.....	108
Figura 3. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la concentración de fósforo total.....	109
Figura 4. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la concentración de clorofila “a”.....	110
Figura 5. Promedio acumulado del volumen del embalse La Paloma.	111
Figura 6. Gráfico de superficie cultivada total para la provincia de Limarí. Comparación entre el censo de 1997 con el del 2007.....	112

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Figura 7. Compuertas del embalse La Paloma.....	117
Figura 8. Túnel embalse La Paloma.....	117
Figura 9. Torre de toma del embalse La Paloma.....	118
Figura 10. Torre de toma y estación de monitoreo en Muro del embalse La Paloma...	118
Figura 11. Bote inflable zodiac.....	119
Figura 12. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	119
Figura 13. Sonda Multiparamétrica.	119
Figura 14. Disco Secchi.	119
Figura 15. Botella Van Dorn para extraer muestras a profundidad.....	120
Figura 16. Filtro de fibra de vidrio para la muestra de clorofila “a”.....	120
Figura 17. Botella de polietileno de alta densidad.....	120
Figura 18. Espectrofotómetro portátil.....	120

RESUMEN

El agua es un recurso fundamental, escaso y actualmente desperdiciado. Una forma de optimizar el uso de este son los embalses y en Chile, uno de los embalses más grandes es La Paloma, ubicado en la Provincia de Limarí (IV Región Coquimbo) con una capacidad de 750 millones m³, cuyo objetivo es entregar agua para riego.

La calidad del agua es evaluada por la Dirección General de Aguas (DGA) que tiene tres estaciones de monitoreo controlándola estacionalmente mediante diversas variables: pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura, oxígeno disuelto (OD), nitrato (N-NO₃), amonio (N-NH₄), nitrógeno total (N-N_{total}), fosfato (P-PO₄), fósforo total (P-P_{total}), demanda química de oxígeno (DQO), transparencia del disco Secchi (DS), turbiedad y clorofila “a” (Cl “a”). Las estaciones se ubican en el río Huatulame, Grande, y en el Muro del embalse.

Las actividades antrópicas desarrolladas en la cuenca generan excedentes que llegan al embalse, cambiando la calidad del agua e impidiendo que su uso sea óptimo. Esto determinó que los objetivos de este estudio consistieran en encontrar una relación entre la calidad del agua del embalse y su volumen embalsado, además del estudio de su evolución en el periodo 1993-2008. El análisis de la evolución de la calidad consistió en el cálculo del índice trófico según OCDE, determinación del nutriente limitante, balance de fósforo y el progreso de las variables durante el periodo en cuestión.

Los resultados del análisis del volumen embalsado mostraron una relación inversa con la CE causada por un efecto de dilución. La DQO presentó un aumento notable entre los

500 - 600 millones m^3 , causando aumentos en la turbiedad, $N-N_{total}$ y $P-P_{total}$, y disminuciones en el OD y transparencia en el mismo rango mencionado. Éstas alteraciones se atribuyeron a dos causales: las épocas del año en que más concentrados se encuentran los afluentes (otoño e invierno) o la resuspensión de material particulado sedimentario y desprendimiento de suelo causado por el movimiento de las aguas succionadas por la torre de toma, ubicada cerca de la estación de monitoreo en el Muro del embalse La Paloma. Las alteraciones en la cota de los 500 - 600 millones m^3 disminuyen la calidad del agua provocando que se encuentre una menor proporción de nutrientes asimilables ($NO_3^- + NH_4^+$) que entre los 600 - 700 millones m^3 (6,7 % > 54,2%, respectivamente), esto lo convierte en el rango más adecuado de los estudiados para distribuir agua de riego.

El índice trófico de la OCDE otorgó una clasificación incompleta porque dos de sus variables (N_{total} y P_{total}) se situaron en rangos construidos por aplicación de dos desviaciones estándar (1.4. Marco Teórico. Tabla 2). Sin embargo se encontró que la transparencia y la Cl “a” se clasificaron en límites eutróficos. La relación N/P encontrada fue de 20,84 indicando al fósforo como nutriente limitante. La carga crítica de fósforo (L_c) fue de 7,52 ton · año y la carga actual (L_{cp}) fue de 32,45 ton · año. Esto revela que el embalse se encuentra sobrecargado en un 76,80 % de su L_c .

El diagnóstico de la calidad del agua indicó que ésta decae en el tiempo. No obstante, cumple con lo establecido por la Norma Chilena Oficial 1.333 para pH y CE de acuerdo a su uso en riego (pH 5,5 - 9,0, y $750 \mu S \cdot cm^{-1}$).

ASBTRACT

Water is a fundamental, scarce and actually wasted resource, that's why the study of its quality is very important to accomplish its adequate distribution. One way to optimize the resource are dams, in Chile the largest dam is La Paloma, located in the Provincia de Limarí (IV Región Coquimbo) with a capacity of 750 millions m^3 whose objective is to deliver water for irrigation.

The water's quality is evaluated by the Dirección General de Aguas (DGA) that has three monitoring stations controlling it through several variables: pH, electric conductivity (CE), temperature, dissolve oxygen (OD), oxygen saturation (%sat O_2), nitrate (N- NO_3), ammonium (N- NH_4), total nitrogen (N- N_{total}), phosphate (P- PO_4), total phosphorous (P- P_{total}), chemical oxygen demand (DQO), transparency of Secchi disc (DS), turbidity and chlorophyll "a". The stations are located on the river Huatulame, Grande and in front of the wall of the dam.

The antropic activities developed at the watershed generate surpluses that arrive to the dam, changing the quality of water and preventing it to be optimal for use. This determined that the objectives of this study consisted on finding a relation between La Paloma's water quality and its damming volume, besides the study of its evolution between 1993-2008. The analysis of quality's evolution covers the calculation of the trophic index according to OCDE, the determination of the limiting nutrient, the balance of phosphorous and the progress of the variables during the period in question.

The relations between variables and damming volume found were a reverse one with CE caused by a dilution effect, the DQO shown a remarkable increment between the 500-600 million m³, causing increments in turbidity, N-N_{total} and P-P_{total}, and decreases on OD and DS at the same range. This alterations were attributed to different causes: the times of the year in which the tributaries are more concentrated (autumn and winter) or to the soil detachment and sediment resuspension caused by the suction force of the distributing tower and its closeness to the monitoring station at the wall of the dam. The alterations at the 500 - 600 millions m³ height decrease water quality causing less proportion of assimilables nutrients (NO₃⁻ and NH₄⁺) than the 600-700 million m³ range (6,7 % > 54,2%, respectively). The former allows to consider that the last range is the most adequate to distribute irrigation water.

The water couldn't be classify according to the OCDE trophic index because two of the parameter (N_{total} and P_{total}) locate themselves in ranges builded by application of two standard deviations (1.4. Marco Teórico. Tabla 1). How ever, it was found that chlorophyll "a" and DS were classified between eutrophic limits, (Figuras 1-4. Anexo II). The N/P relationship found was 20,84 indicating that the limiting nutrient of the reservoir is phosphorous. The phosphorous balance shows that the critical load (L_c) of the reservoir is 7,52 ton·year and that the actual load (L_{cp}) found was 32,45 ton · year. This reveals that the reservoir is overloaded with an 76,80 % of its L_c.

The diagnosis shown that the water quality is decreasing in time. In despite of this decrease, the water of La Paloma meets the establishments of the NCh 1.333 (National Chilean norm 1333) for pH and CE according to its irrigation use (pH 5,5 – 9,0 and 750 μS·cm⁻¹).

I. INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes generales.

1.1. El agua: usos y distribución en el país.

El agua es un recurso fundamental y actualmente muy escaso (CONAMA - RM, 2007).

En Chile se pueden nombrar tres usos importantes de ésta: como agua potable, para mantener el medio ambiente y para el regadío (DGA, 2009a).

El agua potable la proveen empresas especializadas que la captan de ríos, lagos y napas subterráneas para luego purificarla y entregarla a cada hogar. En Chile el promedio de uso anual es de 993.119 miles m^3 (INE, Medio Ambiente 2005) y por habitante es de 196 L/día de agua (APR CHILE, 2009).

El agua para mantener el medio ambiente corresponde al uso que no persigue un fin económico, es decir, es la cantidad necesaria de agua para mantener el hábitat de la flora y fauna de los cauces y el nivel de agua subterránea para los humedales (“Demanda Ambiental”), este tipo de uso no es cuantificado. Finalmente se tiene el uso de agua en la agricultura (84,5% del agua en Chile), una de las principales actividades económicas del país que abarca productos tales como frutas, verduras, cereales, etc. En Chile se riega más de un millón de hectáreas que consumen 500 m^3/s de agua (DGA, 2009b)

En Chile la oferta hídrica y su demanda varían dependiendo de la zona. La zona sur posee una demanda menor y oferta mayor que la norte por contar con factores económicos (menor concentración de industrias mineras) y climáticos que la privilegian, como las abundantes escurrimientos y lluvias causadas por sistemas de altas presión que impiden que estos frentes se sitúen en la zona norte, provocando condiciones extremas que se acentúan por la presencia de una alta cordillera que se opone al intercambio atmosférico (Astaburuaga G, 2004). Por lo tanto, es en la zona norte donde el uso de técnicas de aprovechamiento del agua es crucial para el desarrollo social y económico.

Antiguamente se asumía que el agua era un recurso ilimitado (CONAMA, 2004), pero hoy existen formas para controlarla, ejemplo de esto son las normas y decretos que actualmente regulan el uso del recurso (NCh 409 para calidad de agua de uso potable, D.S. 90 para descargas líquidas a aguas marinas y continentales superficiales, D.S 609 para descargas industriales a sistemas de alcantarillado, NCh 1.333 calidad de agua para diferentes usos, etc.), además de la creación de sistemas para optimizar su utilización como técnicas de riego (goteo, aspersión) y de almacenamiento, con éstos últimos se hace referencia a los embalses.

1.2. Embalses y su necesidad en Chile.

Los embalses son obstrucciones totales o parciales de cauces de agua como ríos y arroyos que permiten su acumulación, pueden ser naturales o artificiales, estos últimos contruidos por el hombre se le suelen llamar **represas** (Wikipedia, Embalse).

Los embalses son sistemas acuáticos atípicos porque son un híbrido entre un río y un lago, por lo tanto presentan características intermedias (EIA, 2009).

Tabla 1. Principales similitudes y diferencias entre un río, embalse y lago.

Factor	Río	Embalse	Lago
Área/volumen	Alto	Intermedio	Bajo
Profundidad	Pequeña	Pequeña-profunda	Pequeño-profundo
Fluctuación del nivel	Alta	Alta	Baja
Tiempo de residencia	Corto	Intermedio (uso)	Largo
Fondo	Cambiante	Mucho sedimento	Estable
Turbidez	Inorgánica	Orgánica	Orgánica
Transparencia	Alta-baja	Baja	Alta-Baja
Estratificación	Longitudinal	Vertical	Vertical
Nutrientes	Escorrentía/ Cuenca	Escorrentía	Escorrentía
Concentración	Incremento aguas abajo	Idem. Edad	Idem. Edad
Retención de nutrientes	Corto	Largo	Largo
Hábitats	Muchos	Pocos	Intermedio
Perturbaciones	Regular	Irregular	Regular
Comunidades	Lit-Bent	Pelág-planctónico	Pelág-litoral
Biomasa de peces	¿Alta?	¿Intermedia?	Baja

*Fuente: (EIA, 2009)

La construcción de embalses o represas en Chile atiende a las siguientes necesidades: generación de energía hidroeléctrica, agua potable e industrial, turismo, pesca y recreación, control de inundaciones y riego (Zárate H, 1999). Estas necesidades varían de acuerdo a la zona, en especial en la zona norte del país dado por factores geográficos, climáticos y ambientales. La acumulación de grandes volúmenes de agua en forma artificial permite “almacenar” y así contar con disponibilidad de agua frente a problemas de escasez. Sólo en la zona norte de Chile (desde I hasta la V región) se tienen 142 embalses (CONAMA, 2000), los cuales requieren ser mantenidos y vigilados en el tiempo.

1.3. Rol de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) en el monitoreo de la calidad del agua.

La calidad del agua se entiende como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que ésta sea apropiada para un uso determinado. El monitoreo del agua es uno de los más importantes métodos para sustentar la estrategia y políticas de protección y conservación del recurso hídrico, siendo la implementación de programas de monitoreo de cantidad y calidad un aporte para mejorar la planificación, desarrollo, protección y manejo de la misma, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de sobreexplotación o degradación que pudiesen suscitarse (LEIVA, M. y LÓPEZ, M., 2006).

El monitoreo de la calidad del agua de los distintos cuerpos superficiales y subterráneos es una tarea realizada por diversos organismos públicos, entre los cuales está la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

La DOH es un servicio dependiente de la Dirección General de Obras Públicas, nace en 1997 de la ley 19.525 que reemplaza a la antigua Dirección de Riego. La DOH tiene por objetivo proveer infraestructura en cuatro áreas fundamentales: en el regadío para lograr disponer del recurso hídrico (crear y mantener áreas de riego más seguras, aumentar su potencial, etc.), en la red primaria y disposición final (evacuación de drenaje de aguas lluvias), en la protección de las riberas de los cauces naturales (contrarrestar las crecidas,

aluviones, etc.) y en el abastecimiento de agua potable a las localidades rurales concentradas y semi concentradas (DOH, 2009).

La red operativa de calidad de aguas superficiales de la DGA funciona desde la década del año 60 y actualmente cuenta con 351 estaciones de monitoreo (DGA, 2002). Estas estaciones miden 28 variables estacionalmente, los cuales se dividen en tres categorías: propiedades (como pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, % de saturación de oxígeno), microelementos y macroelementos. La medición de éstas variables y su análisis permiten vigilar cambios en la calidad del recurso. Esta información se utilizó inicialmente para relacionarla con su uso en la agricultura de la zona (Brown & Ferrer, 1976), pero actualmente su uso se enfoca en fines medioambientales (cumplimiento de la NCh 1.333), es decir, para saber si han ocurrido cambios significativos que puedan afectar la salud de las personas o al entorno.

Uno de los cambios más comunes encontrados en cuerpos de agua superficiales que alteran la calidad de ésta es la eutroficación.

1.4. Marco teórico.

1.4.1. Eutroficación.

La palabra eutroficación o eutrofización significa literalmente “bien nutrido”. En el estudio de las ciencias ambientales, este fenómeno se relaciona con el aporte de nutrientes a un cuerpo de agua, puede ser de forma natural, cultural o artificial.

La **eutroficación natural** excluye la participación del hombre, es un proceso lento de decadencia que puede durar cientos de años dependiendo de las dimensiones del lago. El proceso también es llamado “envejecimiento del lago” (Vollenweider, 1980, Rast & Holland 1988, Díaz 1994, Armesto et al 1996 y Vargas & Pérez 1999).

La sucesión natural de un lago eutroficado se ejemplifica en la siguiente figura.

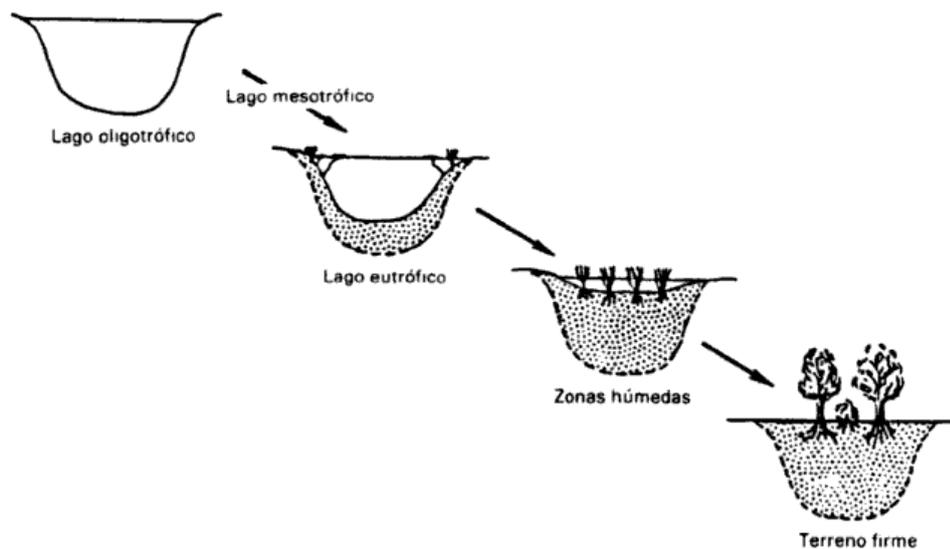


Figura 1. Eutroficación. Proceso de envejecimiento en la evolución ecológica (Settler, Ramalho y Beltran, 1996).

En un comienzo se encuentra un **lago oligotrófico** (del griego *oligo* = poco), es decir con baja concentración de nutrientes, baja tasa de conversión de CO₂ en materia orgánica y por ende una baja producción primaria. El estado intermedio corresponde al de un **lago mesotrófico** (*meso* = medio) (Margalef, 1983), un lago con una concentración media de nutrientes. Cuando el paso del tiempo ha permitido la depositación y retención de sedimentos en el fondo por arrastre y esorrentía desde los ríos y por efecto de las plantas depositadas en el fondo (sobretudo en lagos con escasa profundidad), el nivel de nutrientes aportados comienza a ser excesivo para sostener un nivel medio de producción primaria, en consecuencia se pierde el nivel mesotrófico y el lago se vuelve **eutrófico**.

La **eutroficación cultural** o **artificial** incluye la participación antrópica, y corresponde a la aceleración del proceso natural de eutroficación o de envejecimiento por aporte excesivo de nutrientes o desperdicios orgánicos.

Los nutrientes que aceleran el proceso de eutroficación son aquellos que contienen nitrógeno, fósforo y potasio (Manahan S, 2007). El fósforo y nitrógeno son considerados elementos limitantes del crecimiento de las algas. Tanto el nitrógeno como el fósforo son componentes importantes de los fertilizantes artificiales, forman parte del material genético de los seres vivos (ADN, proteínas, aminoácidos, etc.) y de sus desechos también (amoníaco, urea). Como fuentes adicionales de fósforo se tienen los detergentes y formaciones minerales, y para el nitrógeno se puede mencionar la fijación por las bacterias, cianobacterias o por descargas de relámpagos a la atmósfera.

Las fuentes que aportan los nutrientes o desechos orgánicos a los lagos o lagunas pueden encontrarse en la misma cuenca o área de drenaje, incluso en la atmósfera. En la cuenca se encuentran las aguas residuales domiciliarias e industriales, de escorrentía desde los campos que han sido fertilizados. En la atmósfera se pueden nombrar los gases nitrogenados que al mezclarse con la humedad del aire pueden formar compuestos solubles que luego precipitan, este aporte es proporcionalmente el menos significativo.

Los efectos generados por la eutroficación son los siguientes (King, 1989):

- Aumento de la producción primaria.
- Disminución de la calidad del agua reflejada en el nivel de oxígeno disuelto, aparición de malos olores, disminución de la transparencia, etc. (Parra O, 1989).
- Alteración del entorno del cuerpo de agua: disminuye el turismo, actividades como la pesca, etc.
- Disminución de la diversidad biológica.
- Formación de depósitos de carbón y turba (Stanley E, 2007).

En los embalses, la eutroficación es una condición inherente por ser cuerpos de agua recientes y se ve incrementada por existir un desequilibrio mayor provocado por la sustitución de un ambiente terrestre por uno acuático y por no tener ni el tiempo ni las condiciones para evolucionar a un sistema oligotrófico. Es por esto que es de gran

importancia el conocer el estado trófico del sistema y que nutriente o nutrientes juegan un papel protagónico en el control de este.

1.4.2. Índice para cuantificar la eutroficación.

Los índices creados para calificar los distintos estados de eutrofia de un cuerpo de agua nacieron inicialmente de la preocupación que diversos países de Europa y E.E.U.U mostraban al ver que sus lagos comenzaban a cambiar sin poder hacer nada al respecto. Un índice trófico muy utilizado es aquel del Programa Internacional Cooperativo de la OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico) para la Supervisión de Aguas Interiores (1982).

El **índice trófico de la OCDE** otorga valores límites específicos de fósforo total, nitrógeno total, clorofila “a” y de la profundidad de Secchi, en el ámbito de lagos de zonas templadas.

La dificultad de usar “límites cerrados” para clasificar un lago es el grado de superposición existente, es decir, que el lago puede ser clasificado en un estado trófico por una variable y en otro estado por otro.

Para subsanar este problema la OCDE aplicó un cálculo estadístico a su base de datos. La tabla de clasificación de “límites abiertos” resultante se muestra a continuación.

Tabla 2. Clasificación trófica de la OCDE para valores medios anuales (modificado de OCDE, 1982)

Variable		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Fósforo total ($\mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}$)	G ^(*)	8,0	26,7	84,4	750-1200 2
	G \pm sd ^(**)	4,85-13,3	14,5-49	48-189	
	G \pm 2sd	2,9-22,1	7,9-90,8	16,8-424	
	Rango	3,0-17,7	10,9-95,6	16,2-389	
	n	21	19	71	
Nitrógeno total ($\mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}$)	G	661	753	1875	100-150 2
	G \pm sd	371-1180	485-1170	861-4081	
	G \pm 2sd	208-2103	313-1816	395-8913	
	Rango	307-1630	361-1387	393-6100	
	n	11	8	37	
Clorofila "a" ($\mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}$)	G	1,7	4,7	14,3	100-150 2
	G \pm sd	0,8-3,4	3,0-7,4	6,7-31	
	G \pm 2sd	0,4-7,1	1,9-11,6	3,1-66	
	Rango	0,3-0,45	3,0-11	2,7-78	
	n	16	16	70	
Profundidad de disco Secchi (m)	G	9,9	4,2	2,45	0,4-0,5
	G \pm sd	5,9-16,5	2,4-7,4	1,45-4,0	
	G \pm 2sd	3,6 -27,5	1,4-13	0,9-6,7	
	Rango	5,4-28,3	1,5-8,1	0,8-7,0	
	n	13	20	70	

(*)G: Media geométrica. (**), sd: Desviación estándar.

La masa de agua en estudio se clasifica correctamente si no hay más de una variable de la tabla 2 que se desvíe de su valor medio geométrico por un valor de desviación estándar de ± 2 .

El índice de la OCDE se basa en información obtenida de cuerpos de agua naturales (lagos) de zonas templadas, por lo tanto, se advierte que su aplicación en cuerpos

artificiales - embalses - no es adecuada, sobretodo considerando las diferentes características que presentan éstos últimos con respecto a los naturales (ver Tabla 1) (K. W. Thornton et al, 1982). Su aplicación sin embargo, es común y se da debido a que las diferencias existentes parecen ser menos importantes que el desarrollo de programas para el control de la eutroficación (Ryding S & Rast W, 1989).

1.4.3. Nutriente Limitante.

El concepto de nutriente limitante consiste en que este nutriente es el que se consume primero y es el que alcanza un mínimo antes que los otros nutrientes (Salas & Martino, 1981). Para determinar cual es el que condiciona el crecimiento algal Redfield creó la siguiente relación.

La relación de Redfield: El carbono en la materia orgánica tiene la siguiente proporción en las especies fitoplanctónicas con respecto al fósforo y al nitrógeno.

$$P: N: C= 1: 15,5: 108$$

Esta es la relación de Redfield (Redfield, A.C. y col, 1963). La suposición es que el fitoplancton absorbe y utiliza nutrientes de la columna de agua en esa relación. De ahí que la biomasa máxima de algas en un lago o embalse se puede limitar controlando la cantidad y/o proporción con que éstos nutrientes se suministran a la masa de origen. Si el elemento se encuentra por debajo de esta relación será el **nutriente limitante**.

Antes de aplicar ésta relación se deben aceptar los siguientes supuestos:

- La determinación de C como nutriente limitante no se da en lagos y embalses. Esto porque el C se vuelve limitante cuando hay un exceso de fósforo y nitrógeno, cuando la disponibilidad de luz y temperatura son altas y cuando el transporte de dióxido de carbono desde la atmósfera hasta la columna de agua es bajo, éstas características son propias de lagunas de aguas residuales y estanques con elevadas cantidades de abono pero no de lagos y embalses.
- El concepto de nutriente limitante no se puede emplear en condiciones de estado transitorio, es decir, de masas de agua que tienen entradas sustanciales pero intermitentes de fósforo o nitrógeno. Sólo se usa para aquellas en estado estacionario.
- La utilización práctica del concepto de nutriente limitante supone que sólo uno de los nutrientes requeridos por el alga es el factor limitante, al menos durante el período en que la calidad del agua resulta preocupante (período de máxima biomasa de algas) (Droop 1973 y Rhee 1978).

Se reconoce que no existe una proporción ideal de N/P porque ésta depende de la especie de alga dominante, pero se acepta a nivel práctico la proporción atómica 16N/1P o la másica de 7N/1P (Ryding y Rast, 1992).

Si $7N/1P > 7$, el nutriente limitante es el P,

Si $7N/1P < 7$, el nutriente limitante es el N,

Si $7N/1P = 7$, ambos nutrientes o algún otro factor puede ser el limitante.

Para estimar la relación del nutriente limitante, se adoptan las siguientes medidas:

- Para usar las concentraciones de los nutrientes del lago se deben restringir las muestras al epilimnio (capa superficial donde ocurre la mayor parte de la fotosíntesis).

-Las muestras deben tomarse durante las estaciones de crecimiento máximo de las algas (primavera), porque éstas últimas pueden afectar significativamente a los recursos acuáticos utilizados por el hombre. Como encontraron Rast y Lee (1978), una proporción molar de N/P basada en datos anuales puede dar una imagen diferente de la posible limitación, que una estimación basada solamente en las condiciones de la estación de crecimiento (Ryding S & Rast W, 1989).

1.4.4. Balance de Fósforo

Este balance permite conocer la carga de fósforo de un lago o embalse. Las ecuaciones a utilizar son las propuestas por Vollenweider (1976) cuyo estudio se basó en lagos Europeos. La primera ecuación permite estimar la carga total en la superficie del cuerpo de agua y la segunda permite estimar la carga crítica, es decir, la cantidad máxima de fósforo que teóricamente podría soportar para mantener su estado oligotrófico (MOP y Universidad Austral, 1995).

Carga Actual:

$$L_{cp} = [P_{total}] \cdot z \cdot \frac{f}{(1-R)} = \frac{mg}{m^2} \cdot a \quad \text{Ec/1/}$$

[**P_{total}**] = Concentración actual de fósforo total del lago

z = Profundidad media

f = renovación teórica en un año

$$R = \frac{1}{[1 + (1/T_w)]}$$

T_w = Renovación teórica de todo el volumen del lago

a = año

Carga Crítica:

$$L_c = 17 \cdot \left(\frac{z}{T_w} \right)^{0.6} \cdot (z)^{0.4} = \frac{mg}{m^2} \cdot a \quad \text{Ec/2/}$$

z = profundidad media del lago

T_w = renovación teórica de todo el volumen del lago

2. Descripción del área de estudio.

2.1. Ubicación geográfica: cuenca del Limarí

La región de Coquimbo se encuentra en los paralelos 29°02' y 32°16' de latitud sur, y desde el meridiano 69°49' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico. Su superficie territorial es de 40.579,9 Km², lo que en relación al total de Chile corresponde al 2,02%.

La región de Coquimbo limita al norte con la III región de Atacama, al sur con la V región de Valparaíso, al este con la República de Argentina y al oeste con el océano Pacífico.

Coquimbo se divide en tres provincias: Elqui, Choapa y Limarí.



Figura 2. Provincias de la IV región de Coquimbo.

La provincia del Limarí posee una superficie de 13.553,2 Km² (la cuenca del Limarí una superficie de 11.750 km²), una altura promedio de 4500 msnm desde donde se desprenden cordones montañosos de forma transversal; la depresión intermedia corresponde a un valle por donde se desplaza la hoya hidrográfica del río Limarí; la cordillera de la costa ha sido interrumpida por los cordones montañosos andinos por lo tanto es casi inexistente (Encarta, Provincia Limarí, 2009).

La provincia del Limarí posee 5 comunas: Ovalle (capital provincial), Río Hurtado, Monte Patria, Combarbalá y Punitaqui.

El embalse La Paloma se sitúa en la Comuna de Monte Patria a 27 km al sureste de Ovalle en la cuenca del río Limarí. La Paloma es un embalse mayor y forma parte del “Sistema Paloma” que incluye a dos embalses más; el Cogotí y Recoleta y una red de canales matrices y derivados.

2.2. Clima.

La región es considerada como una zona semiárida con presencia de sequías, cuya oferta hídrica depende de las lluvias, nieblas, ríos y aguas subterráneas, es decir de elementos que dependen del clima (<http://www.siar.cl/docs/jvrgl/cuenca.pdf>).

El valle del Limarí, donde se encuentra el embalse, presenta un régimen nivo-pluvial con un clima intermedio entre el semidesértico y el mediterráneo, debido a los avances del frente polar en dirección norte que ocasiona inviernos lluviosos, pero la región se caracteriza por ser seca en todas las estaciones del año, con primaveras y veranos relativamente calurosos (Zárate H, 1999). El verano del 2007 ésta zona fue decretada con escasez de agua.

La temperatura medio anual es de 16,6°C con una mínima y máxima de 4,9°C y 23,8°C respectivamente. La precipitación media anual registrada para el año 2007 fue de 4,62

mm y el total de agua caída fue de 55,4 mm (DGA: <http://www.dga.cl/index.php?option=content&task=category§ionid=16&id=43&Itemid=169>).

2.3. Hidrología.

La cuenca del río Limarí se caracteriza por ser la más importante del norte chico, después de la del río Copiapó. Posee un régimen pluvio nival con fuertes variaciones estacionales y anuales. Los principales ríos de la cuenca son; Huatulame, Grande, Hurtado y Limarí (figura 3).



Figura 3. Principales ríos de la cuenca del Limarí.

2.3.1. Río Huatulame.

Se forma por la confluencia de los ríos Cogotí y Pama. El régimen natural del río fue alterado por la construcción del embalse Cogotí, desde donde nace.

El curso del río sigue la orientación general desde sur a norte para desembocar en el río grande donde se encuentra emplazado el embalse Paloma.

2.3.2. Río Grande.

Nace en la cordillera de los Andes por la confluencia de los ríos Gordito y Las Cuevas y su trayectoria (de 115 km) se puede dividir en dos partes; la primera hasta el embalse Paloma y la segunda desde éste hasta su confluencia con el río Hurtado, su tributario más importante. La orientación general del río es de sureste a noroeste.

La extensión de su hoya es de 7.461 km², integra los ríos Mostazal, Rapel y Huatulame. El río Grande drena la parte sur de la cuenca del Limarí y tiene una hoya dos veces más grande que la del río Hurtado.

2.3.3. Río Hurtado.

Nace en la cordillera de los Andes. Su longitud total es de 125 km aproximadamente. Se divide en dos partes: la primera antes del embalse Recoleta, escurre con orientación sureste a noroeste, hasta la localidad de Río Hurtado. La segunda hacía el suroeste después del embalse, hasta su confluencia con el río Grande en la puntilla de Peñones.

2.3.4. Río Limarí.

Se forma por la confluencia de los ríos Hurtado y Grande en Puntilla de Peñones a 4 km de la ciudad de Ovalle. Este río recorre 60 km antes de desembocar al mar en la localidad de Punta Limarí. En los primeros 44 km el río se desplaza por un valle de aproximadamente 2 km de ancho, en este tramo se desarrollan terrazas de origen fluvio-marino, conocidas como llanos norte y llanos sur respectivamente. En la parte

terminal de su recorrido - después del puente carretero de la Panamericana Norte - el cauce del río se estrecha para desembocar al mar.

2.4. Dinámica económica de la cuenca.

La Provincia de Limarí es productivamente la más grande de la región de Coquimbo (produce el 70% de las exportaciones de la región) (DPH, 2009) las principales actividades económicas son la agropecuaria y la minería (Encarta, Provincia de Limarí, 2009). La provincia cuenta con 1.3 millones de hectáreas, de las cuales sólo 107 mil se consideran agrícolas y 54 mil se encuentran bajo riego (CSS NAND, 2009).

La vida de la cuenca gira en torno a la agricultura. Cuenta con una amplia diversidad de cultivos como los hortícolas, frutícolas (chirimoyas, granadas, higos, mandarinas y papayas), alta especialización en cultivos de tomates y pimentón para primores, también se pueden considerar las vides. Las vides y frutas también son usadas por las agroindustrias elaboradoras de pisco y deshidratadoras para generar productos secos. A continuación se presenta el resumen de los cultivos regados y las superficies que abarcan.

Tabla 3. Cultivos regados-Limarí

Cultivos	Superficie (Hás)	Distribución (%)
Cereales	2.125	4,83
Leguminosas y tubérculos	442	1,00
Cultivos Industriales	14	0,03
Hortalizas	4.753	10,79
Flores	361	0,82
Plantas forrajeras y plantaciones forestales	7.720	17,53
Frutales	20.151	45,75
Viñas y Parronales Viníferos	8.355	18,97
Viveros	42	0,10
Semilleros	83	0,19
Total	44.047	100

Fuente: Censo Agropecuario 2007.

La actividad ganadera también se encuentra presente. En las laderas de los cerros, se desarrolla la cría de ganado caprino que genera comercio de subproductos como el cuero, queso y carne.

2.5. Embalse La Paloma.

2.5.1. Antecedentes: construcción y operación.

La Paloma fue construido entre 1959 y 1966. El embalse está hecho de un muro de tierra con un núcleo de arcilla de 900 m de longitud y una altura máxima de 82 m, además de un vertedero de hormigón de 100 m de longitud, que completa el largo total de 1000 m de coronamiento.

La Paloma es el embalse de riego más grande de Chile y el segundo más grande en Sudamérica, la asignación máxima del embalse es de 240 millones m^3 y su capacidad total es de 750 millones de m^3 . Se inundaron 3.000 has para llenar el embalse. El vertedero construido en roca en el estribo izquierdo, es del tipo frontal de parábola con ocho compuertas, que permiten evacuar, según diseño, $6500 m^3/s$ (en la práctica no se permiten más de $4000 m^3/s$).

La regla de operación del embalse consiste en tres salidas de agua: mediante las compuertas (control de crecidas, Figura 7. Anexo IV. Fotografías), por el túnel al río Limarí, (Figura 8. Anexo IV. Fotografías) y por la torre de toma (río Limarí y canal matriz, Figura 9. Anexo IV. Fotografías). Omitiendo la salida por las compuertas, que se utiliza sólo cuando el volumen es mayor a 750 millones m^3 , se tiene que durante el periodo de estudio (1993-2008) sólo se ha usado la torre de toma para evacuar al río Limarí y para entregar agua al canal matriz, es decir, la torre funciona continuamente.

El embalse se ha rebalsado 29 veces desde su operación y se ha secado completamente sólo el año 1971.

A continuación se muestra un resumen de las características principales del embalse.

Caracterización Geotécnica del embalse.

Ubicación: IV región de Coquimbo.

Ciudad más cercana: Ovalle.

Río: Limarí

Periodo de Construcción: 1959-1968

Tipo de Presa: Zonada

Material de Fundación: Material Fluvial y Roca.

Impermeabilización Fundación: Trinchera Longitudinal.

Material Estribo Izquierdo: Roca

Impermeabilización Estribo Izq: Inyecciones

Material Estribo Derecho: Fluvial Antiguo.

Impermeabilización Estribo Der: Prolongación Trinchera Longitudinal.

Instrumentación: Monolitos Coronamiento

Medidor de Deformación en Profundidad.

Piezómetros casagrande

Aforadores de Filtración

Altura Máxima: 82, 0 m

Altura de Aguas Máxima: 77,9 m

Cota Coronamiento: 415,5 m.s.n.m.

Longitud Coronamiento: 1000 m.

Ancho Coronamiento: 10

Volumen del Muro: 75000000 m³

Capacidad de embalse: 750 mil m³

Profundidad media: 25,59 m

Área del espejo de agua: 29,22 km²

* Fuente: Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)

2.5.2. Monitoreo de la calidad del agua del embalse La Paloma.

Para analizar la calidad del agua del embalse la Dirección General de Aguas (DGA) posee dentro de la red de monitoreo un proyecto exclusivo enfocado en lagos a nivel nacional. Este proyecto fue iniciado en la década del 80 y es llamado Red Nacional Mínima de Control de Lagos. El objetivo era y es actualmente el disponer de información sistemática que permitiese conocer las características básicas de dichos cuerpos de agua y constituirse en una base objetiva para evaluar su evolución en el tiempo.

El programa contempló un catastro de 380 lagos que tuvieran una superficie mayor a 3 km², se iniciaron estudios específicos para caracterizarlos en términos de calidad físico-química y variables de carácter biológico en pos de determinar su condición trófica y proponer un plan de monitoreo de carácter sistemático, entre los cuales está el embalse La Paloma. Los estudios son realizados a través de convenios entre DGA y diversas Universidades del país (U de Chile, U. Austral, U. Concepción, U. Tarapacá).



Figura 4. Estaciones de monitoreo en embalse La Paloma.

En el embalse La Paloma se cuentan con tres estaciones de monitoreo, las cuales miden 14 variables en total. La ubicación de las estaciones es: en el Muro (E 3-

05-300, N 66-01-500), en el brazo del Río Grande (E 3-11-250, N 66-01-800) y en el brazo del Río Huatulame (E 3-12-000, N 65-96-000) (ver Figura 2).

2.5.3. Impactos generados por la construcción y Operación de un embalse.

La construcción y operación de un embalse genera, a demás de la actividad considerada como principal otras llamadas inducidas que no fueron previstas en el plan original. Estas actividades pueden dar origen a múltiples impactos que pueden incluso llegar a ser, en magnitud, mayores que la regulación del agua. La cantidad de actividades generadas son muchas, a modo de ejemplo se citaran algunas (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente de España, 1995):

- Aparición de canales y conducciones de agua, con finalidades diversas.
- Puesta en regadío de terrenos.
- Desarrollo de actividades recreativas.

- Generación de urbanizaciones.
- Presencia de líneas de transporte eléctrico.
- Repoblaciones forestales.

El embalse La Paloma se construyó hace 50 años aproximadamente sin tener un estudio previo de impacto ambiental, como lo exige actualmente la ley 19.300 sobre Bases Generales de Medio Ambiente que fue promulgada el año 1994. Entonces, tanto la construcción como la operación del embalse generaron impactos no previstos que alteraron y siguen alterando la dinámica del entorno.

2.5.4. Usos del agua y actividades desarrolladas en el embalse La Paloma.

Riego.

El embalse La Paloma entrega el recurso a los sectores adyacentes al canal matriz Paloma, río Grande, río Limarí, canal Tabalí, canal Camarico, canal derivado Cogotí, canal Punitaqui, canal derivado Punitaqui y satisface también las demandas del sector regado por el canal Villalón a través del canal derivado Recoleta.

Las áreas regadas aguas arriba y bajo el embalse son 3.325 y 33.102 Has, respectivamente.

Esparcimiento.

Pesca deportiva: El pez cultivado es el pejerrey Argentino y sólo se puede pescar de forma no extractiva, contando con el permiso pertinente, hasta un máximo de 73 ejemplares por día. Su venta está prohibida.

Deportes náuticos: Se realizan campeonatos de canotaje (Ovallito, 2009), windsurf y katesurf. También existe la posibilidad de navegar por 30 minutos en una embarcación especialmente condicionada.

Excursiones: se realizan actividades a campo abierto entre grupos de scouts y turistas en general. Estas excursiones se realizan en el bosque Tamelcura.

2.6. Necesidad de realizar estudios de calidad de agua en el embalse La Paloma.

Las actividades económicas (como la agricultura y la industria) y sociales (crecimiento demográfico, tecnológico y turístico) generan excedentes que, por arrastre de los ríos pueden llegar al embalse, cambiando la calidad del agua, impidiendo que su uso sea óptimo. Es por eso que se requiere de un estudio que permita evaluar el estado de la calidad del agua del embalse La Paloma y su evolución.

3. Hipótesis

La calidad del agua del embalse La Paloma reflejada en sus variables físicas y químicas y evaluada por la NCh 1.333 se vería condicionada por el volumen embalsado y presentaría una disminución entre el período 1993-2008.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General.

Determinar una posible relación entre las variables de calidad analizadas por DGA y el volumen embalsado, y establecer si éstas presentan cambios entre el periodo 1993-2008.

4.2 Objetivos específicos.

- Establecer una relación entre la calidad del agua y el volumen embalsado recurriendo a la base histórica la DGA y a los datos de volumen embalsado de la DOH.
- Diagnosticar la calidad del agua del embalse a través del cálculo del índice trófico de la OCDE, nutriente limitante, balance de fósforo y la evolución de las variables analizadas en el período 1993-2008.

II. METODOLOGÍA

1. Recolección de información.

- Base de datos otorgada por la DGA (históricos y actuales). Estos datos son recolectados continuamente durante las distintas campañas de muestreo que no sólo involucran análisis químico en laboratorio, si no que también incluyen los valores determinados en terreno.
- Base de datos de la DOH de la IV región: Los datos solicitados son los de volumen embalsado del embalse La Paloma (el volumen es otorgado en unidades de millones de m³).
- Se consultó la bibliografía contenida en el Centro de Información de Recursos Hidrográficos (CIRH) de la DGA y a la perteneciente a otros centros de estudio (Universidad de Chile, Universidad de Santiago, etc.).

2. Selección y orden de datos.

De las tres estaciones de monitoreo del embalse La Paloma (El Muro, Brazo río Huatulame, Brazo río Grande) se obtienen valores sobre las siguientes variables: pH, CE ($\mu S \cdot cm^{-1}$), temperatura ($^{\circ}C$), oxígeno disuelto (OD, $mg O_2 \cdot L^{-1}$), % Saturación de O_2 , $N-NO_3^{-}$ ($mg N \cdot L^{-1}$), $N-NH_4$ ($mg N \cdot L^{-1}$), $N-N_{total}$ ($mg N \cdot L^{-1}$), $P-PO_4$ ($mg P \cdot L^{-1}$), $P-P_{total}$ ($mg P \cdot L^{-1}$), DQO ($mg O_2 \cdot L^{-1}$), clorofila "a" (Cl "a", $\mu g \cdot L^{-1}$), transparencia del disco Secchi (m), turbiedad (NTU).

Estas variables fueron agrupadas de la siguiente manera:

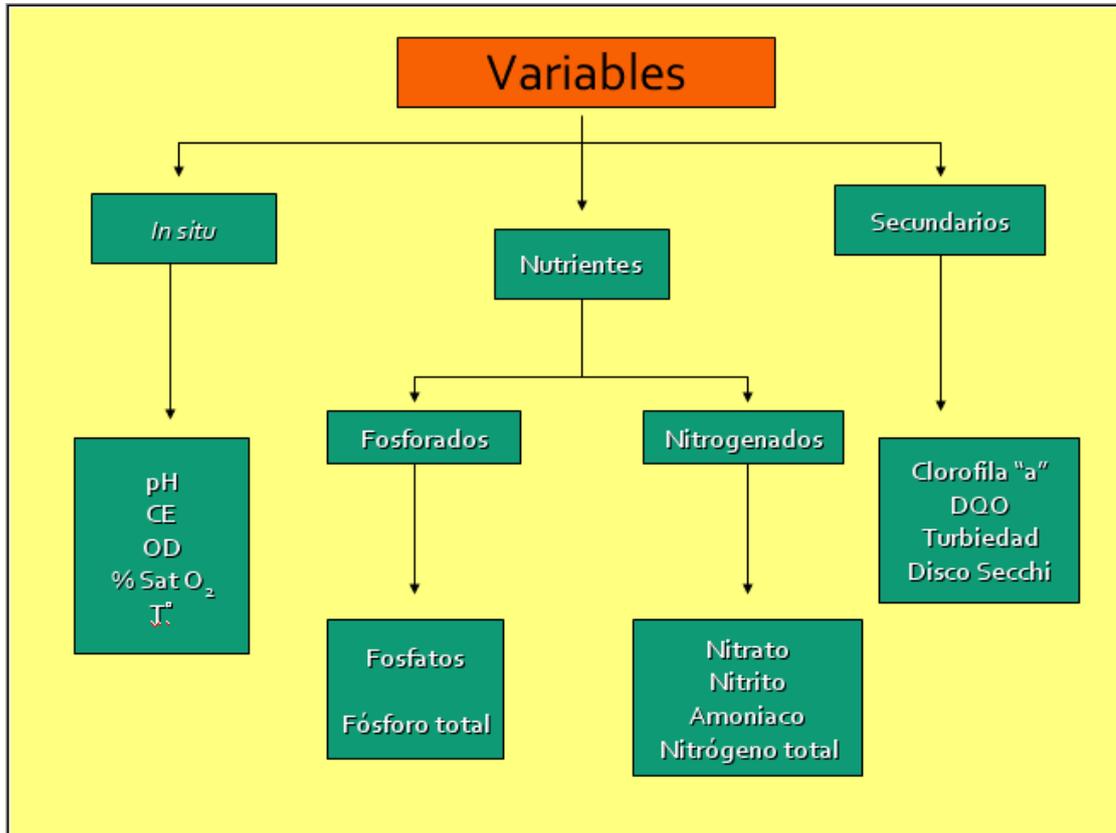


Figura 5. Clasificación de variables monitoreadas por la DGA.

Los registros del monitoreo en el embalse La Paloma comienzan el año 1986, pero se decidió tomar en cuenta aquellos desde el año 1993 por tener mayor continuidad de datos.

Los valores de las variables son medidos a distintas profundidades: 0-1,5, 1,6-4,5, 4,6-7,0, 7,1 -19,0, 19,1-23,0, >23 m. De éstas profundidades aquellas que tenían la mayor cantidad de datos eran los rangos de 0-1,5 m (superficie), de 7,1-19 m (intermedio) y >23 m (fondo). Se escogió estudiar los datos abarcados sólo en la superficie por

presentar menores vacíos temporales, es decir, mayor regularidad entre las estaciones de monitoreo y porque permiten su evaluación según la NCh 1.333.

Se decidió no analizar los cambios de temperatura, de % de saturación de oxígeno, nitrito y turbiedad en el tiempo. Del primero se describirá solamente su comportamiento en el perfil (presencia de estratificación), el segundo no se mencionará porque su evolución se ve reflejada en los datos de oxígeno disuelto, el tercero porque los datos son escasos y cercanos al límite de detección y el cuarto porque los datos encontrados no seguían una lógica temporal con respecto a las otras variables.

En cuanto a los datos del resto de las variables se tomaron en cuenta aquellos mayores o iguales al límite de detección que haya registrado el método analítico determinado (consultar Tabla 1. Anexo I. Tablas).

3. Tratamiento de datos.

3.1. Relación de las variables de calidad con el volumen embalsado.

Se estudiaron las variables de la estación Muro en superficie (0-1,5 m) con respecto a los datos de volumen embalsado. Se ordenaron estos últimos de forma creciente y se graficaron con los datos de las variables registrados en la fecha coincidente de los registros de volumen.

Los datos de calidad considerados son las variables *in-situ* (pH, CE y OD), nutrientes nitrogenados, nutrientes fosforados y variables secundarias (Cl “a”, turbiedad, DQO y transparencia del disco Secchi).

Los datos de volumen embalsado fueron obtenidos del registro histórico de la DOH (Dirección de Obras Hidráulicas) y abarcan el periodo desde 1993-2008.

3.2. Diagnóstico de la calidad del agua del embalse La Paloma.

a) Determinación del estado trófico, nutriente limitante y balance de fósforo del embalse La Paloma.

Se considera que el embalse La Paloma es un sistema homogéneo, es decir que los datos de las tres estaciones de monitoreo son parte de una unidad muestral. Es posible hacer esta aproximación porque sólo se consideraron los datos obtenidos en superficie.

Para el cálculo del índice trófico fueron considerados los datos de las variables P_{total} , N_{total} , Cl “a”, y transparencia del disco Secchi desde 1993 al 2008. Se calcularon los promedios anuales y de éstos un promedio geométrico y desviación estándar (ver ejemplo en Anexo IV. Cálculos)

Media Geométrica (G)

$$G = \sqrt[N]{(X_1 \cdot X_2) \dots (X_N)} \quad \text{Ec/3/}$$

Desviación Estándar

$$sd = \frac{\sqrt{\sum(G - G_j)^2}}{N} \quad \text{Ec/4/}$$

G_j : datos calculados de promedio anual.

La media geométrica describe de mejor manera la condición “media” de una variable cuando éstas presentan variaciones altas en lapsos cortos de tiempo, como por ejemplo la clorofila “a”.

La desviación estándar corresponde a la raíz de la sumatoria de los cuadrados de la diferencia de los datos medios anuales con respecto al promedio geométrico.

Se determinó el nutriente limitante mediante la relación de Redfield. El criterio para seleccionar los datos fue el siguiente:

- ✓ Se escogieron los datos de N_{total} y P_{total} , de la capa superficial (0-1,5 m) en la estación en el Muro.
- ✓ Se escogieron sólo los datos obtenidos en las campañas de primavera.

De los datos escogidos se sacó un promedio aritmético y luego se realizó el cociente de esos promedios (N_{total}/P_{total}).

El balance de fósforo se determinó mediante las $Ec /1/$ y $/2/$ propuestas por Vollenweider (Consultar I. Introducción. 1.4. Marco teórico).

b) Evolución temporal de las variables.

Se tomaron los datos de cada variable en el rango superficial de las tres estaciones de monitoreo (en el Muro, en brazo Río Huatulame y brazo Río Grande).

Los datos brutos de las variables fueron sometidos a un promedio acumulado. El cálculo del promedio acumulado se ejemplifica a continuación:

X_{acum} = promedio acumulado

$$X_{acum 1} = \frac{5,99}{1} = 5,99$$

$$X_{acum 2} = \frac{5,99 + 3,65}{2} = 4,82$$

$$X_{acum 3} = \frac{5,99 + 3,65 + 7,59}{3} = 5,74$$

Tiempo (época/año)	Cl “a” . E.Muro (ug·L⁻¹)	Cl “a” E. Muro Prom. Acum. (ug·L⁻¹)	X_{acum} (n) E.Muro (ug·L⁻¹)
Otoño-93	5,99	5,99	X _{acum 1}
Inv-93	3,65	4,82	X _{acum 2}
Prim-93	7,59	5,74	X _{acum 3}
Otoño-94	4,52	5,44	X _{acum 4}
Inv-94	7,14	5,78	X _{acum 5}
Prim-94	2,18	5,18	X _{acum 6}
Inv-95	8,83	5,70	X _{acum 7}
Prim-95	4,04	5,49	X _{acum 8}
Ver-96	4,99	5,44	X _{acum 9}
Otoño-96	10,21	5,91	X _{acum 10}
Inv-96	5,09	5,84	X _{acum 11}

Una vez realizado el promedio acumulado se calculó el promedio anual del resultado.

Ej.:

$$X_{anual (1993)} = \frac{X_{acum 1} + X_{acum 2} + X_{acum 3}}{3} = \frac{5,99 + 4,82 + 5,74}{3} = 5,52 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$X_{anual (1994)} = \frac{X_{acum 4} + X_{acum 5} + X_{acum 6}}{3} = \frac{5,44 + 5,78 + 5,18}{3} = 5,47 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$$

Con los promedios anuales calculados se elaboran los gráficos de cada variables con respecto al tiempo, cada uno conteniendo las tres estaciones de monitoreo.

III. RESULTADOS

1. Estudio de las variables de calidad con respecto al volumen embalsado.

Los datos de volumen embalsado considerados fueron aquellos entre los años 1993 y 2008.

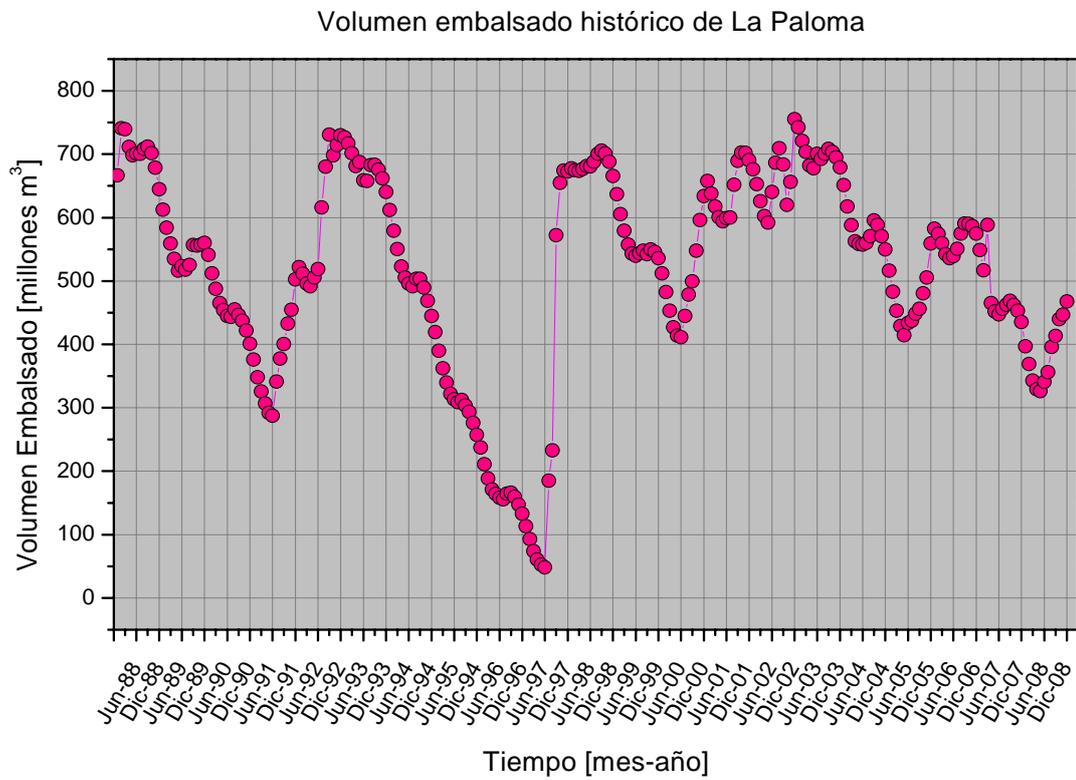


Figura 6. Datos de volumen embalsado mensual de La Paloma (1988-2008). Fuente:

Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) de Coquimbo.

Los datos mostrados en la figura 6 permitieron conocer cinco situaciones de disminución notable de volumen embalsado: Jun-91, Jun-97, Jun-00, May-05 y May-08. Siendo Jun-97 la mayor disminución (hasta 48 millones m³). Esta baja es un reflejo de la escasez hídrica que fue decretada en la IV región el año 1997.

La frecuencia histórica de volumen proveniente de la figura 6 se resume en el siguiente gráfico.

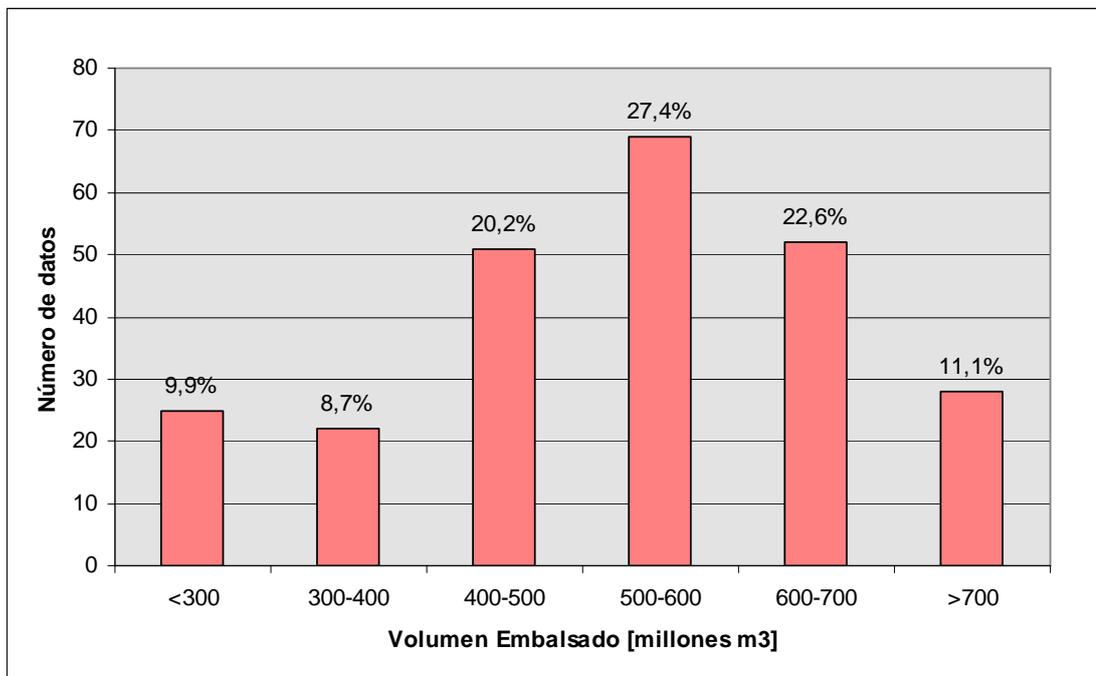


Figura 7. Distribución de rangos de volumen embalsado en el embalse La Paloma. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron aquellos datos entre 1993 y 2008, se separaron en los respectivos rangos y se calculó el porcentaje de cada rango en el universo de datos totales.

De la figura 7 se observa que los 3 rangos de volumen embalsado que más frecuentemente se presentan están entre los 500 - 600, 600 - 700 y 400 - 500 millones de m³.

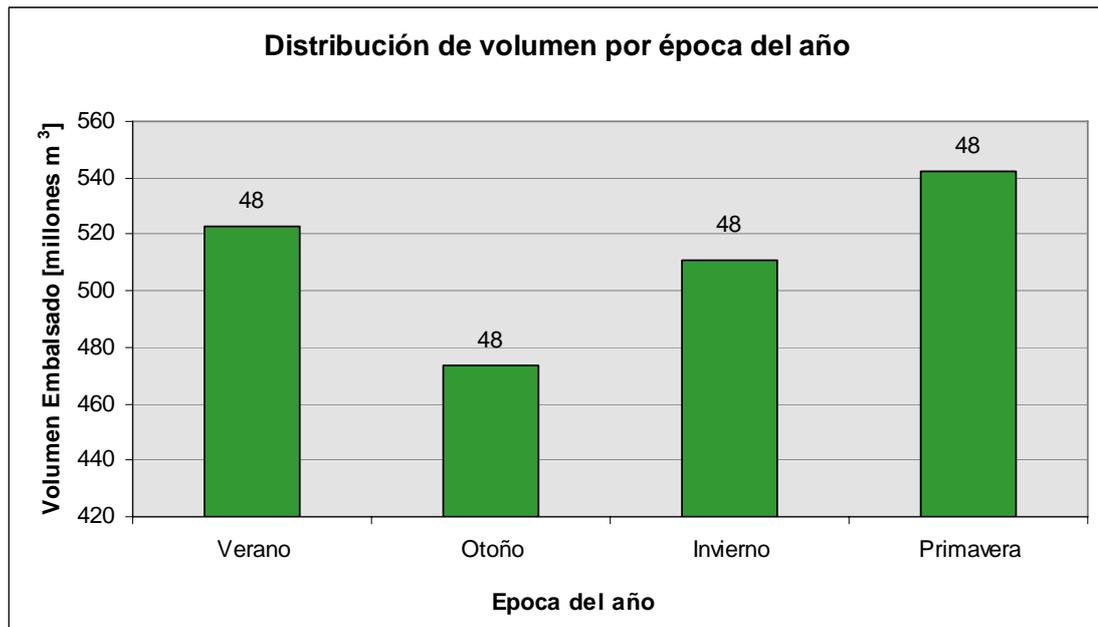


Figura 8. Distribución de volumen embalsado por época del año en el embalse La Paloma. Para la elaboración de este gráfico se tomaron datos de volumen embalsado entre 1993 y 2008, se separaron por época del año y se calculó un promedio para cada época. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

Los volúmenes más altos (figura 8) se presentaron mayormente en verano, invierno y primavera, siendo ésta última estación del año la que agrupó los volúmenes mayores.

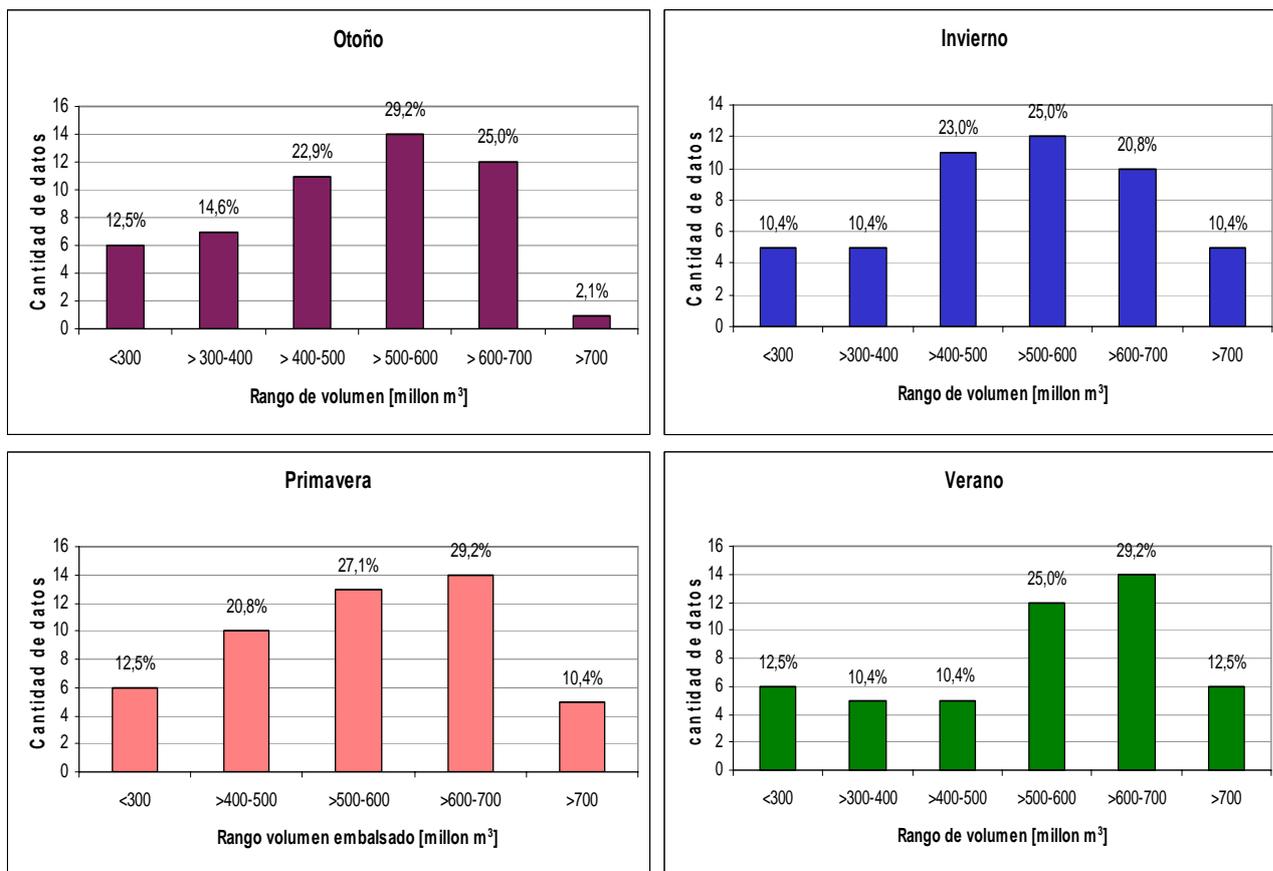


Figura 9. Porcentaje de datos de volumen embalsado por rango en cada época del año para el embalse La Paloma. Entre 1993 y 2008 cada época del año registro 48 datos. Se separaron éstos en los distintos rangos de volumen y se calculó el porcentaje de datos de cada rango.

Esta figura permite apreciar que el embalse La Paloma ha presentado en el tiempo una distribución similar de registros para las distintas épocas del año. En otoño, invierno y primavera los rangos que abarcan la mayor proporción de datos son entre 400 - 500, 500

- 600 y 600 - 700 millones m^3 por sobre los otros, mientras que en verano se destacan los rangos de 500 - 600 y 600 - 700 millones m^3 .

1.1. Relación de variables con volumen embalsado.

De la figura 8 y 9 se aprecia que los rangos de volúmenes que más abundan en el embalse fueron aquellos sobre los 400 millones de m^3 , por lo tanto se consideraron éstos para realizar el análisis.

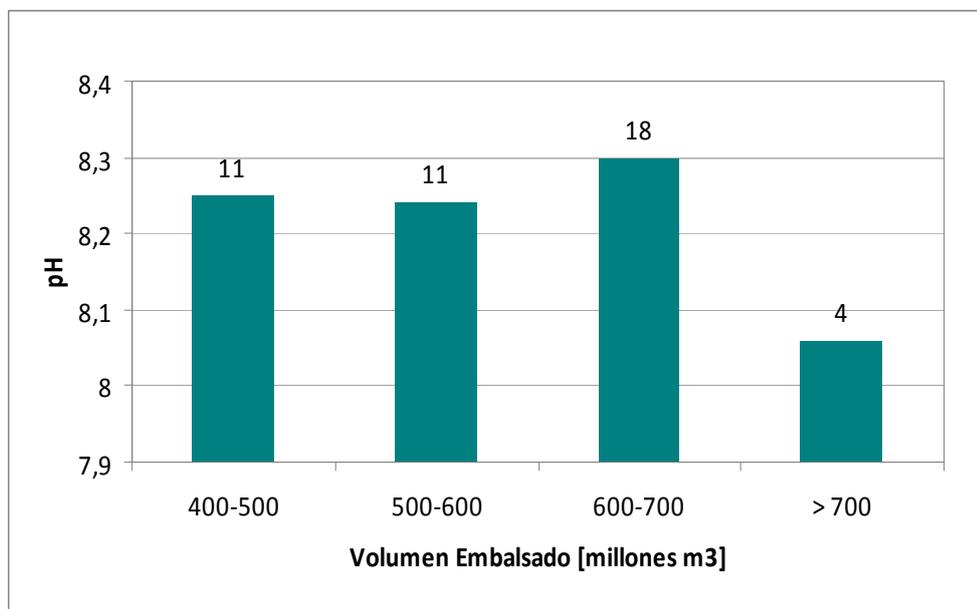


Figura 10. Promedio de pH por rango de volumen. Para la confección de éste gráfico se tomaron los datos de pH y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

Para el pH se detectó un máximo de 8,3 sobre los 600 millones m³ y un mínimo de 8,06 sobre los 700 millones m³. En los rangos restantes el pH fluctuó en sólo 0,05 centésimas.

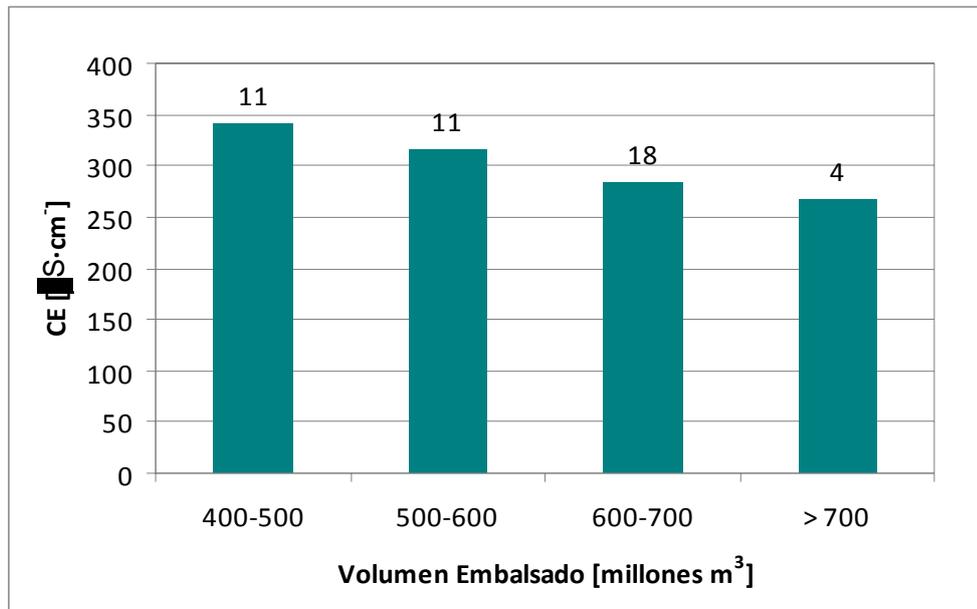


Figura 11. Promedio de CE por rango de volumen. Para la confección de éste gráfico se tomaron los datos de CE y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

En la figura 11 se encontró una clara relación entre la CE y el volumen, mientras menor es este mayor es la CE. La disminución total es de 72,58 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (desde el primer al cuarto rango).

1.2. Relación con el aporte de materia orgánica.

Se estudiaron las variables que presentaron una relación distinta con el volumen embalsado. Estas fueron DQO, OD, turbiedad, transparencia del DS, nitrógeno total, nitrato y fósforo total. En los gráficos de las variables relacionadas con el estado trófico (transparencia, nitrógeno total, fósforo total y clorofila "a") se agregaron límites inferiores de oligotrofia, mesotrofia y eutrofia. Estos límites corresponden a los mostrados de $G \pm 2$ sd de la tabla 2, y fueron utilizados para estimar la proximidad de los distintos rangos de volumen a un estado trófico en particular.

Las figuras siguientes indicaron que en el rango de 500-600 millones m^3 las variables muestran alteraciones conjuntas. Estas se resumen a continuación:

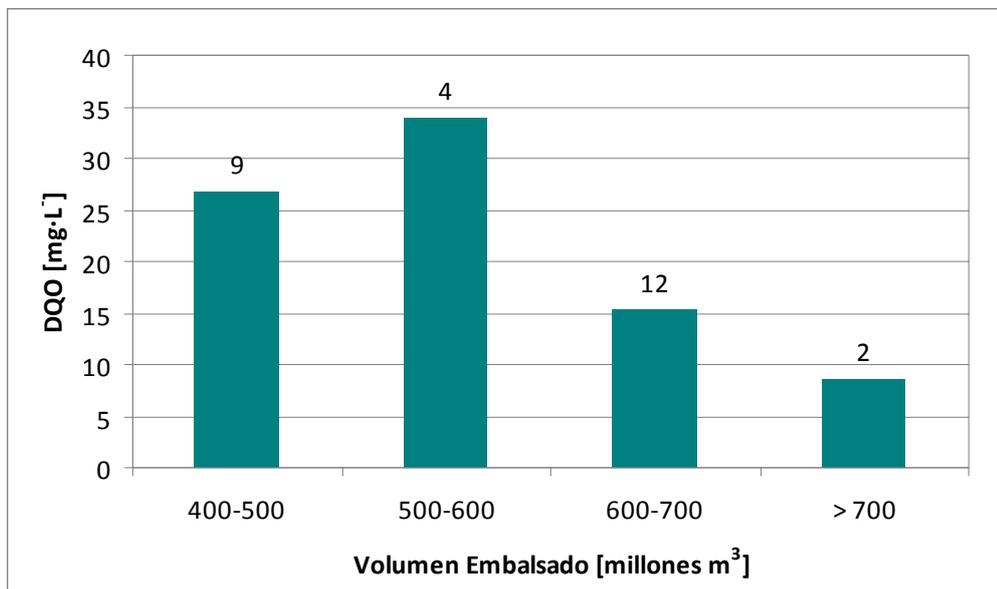


Figura 12. Promedio de DQO por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de DQO y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y

2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El

número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados

La DQO registró en promedio la mayor cantidad de materia orgánica degradable. A medida que se aumenta en el rango de volúmenes la concentración disminuye notablemente (25,4 mg O₂ · L⁻¹ entre el segundo y cuarto rango).

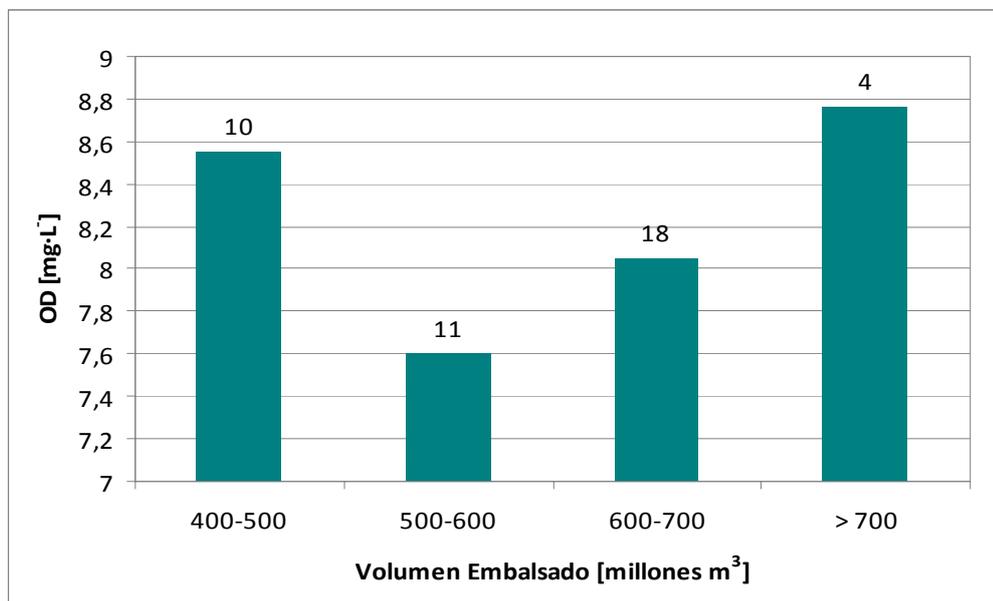


Figura 13. Promedio de OD por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de OD y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El

número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados

El OD encontró su menor concentración promedio (7,6 mg O₂·L⁻¹), el valor va aumentando con el rango de volumen, es decir, con la disminución de la DQO (aumenta en 1,16 mg O₂ ·L⁻¹ desde el segundo hasta el cuarto rango).

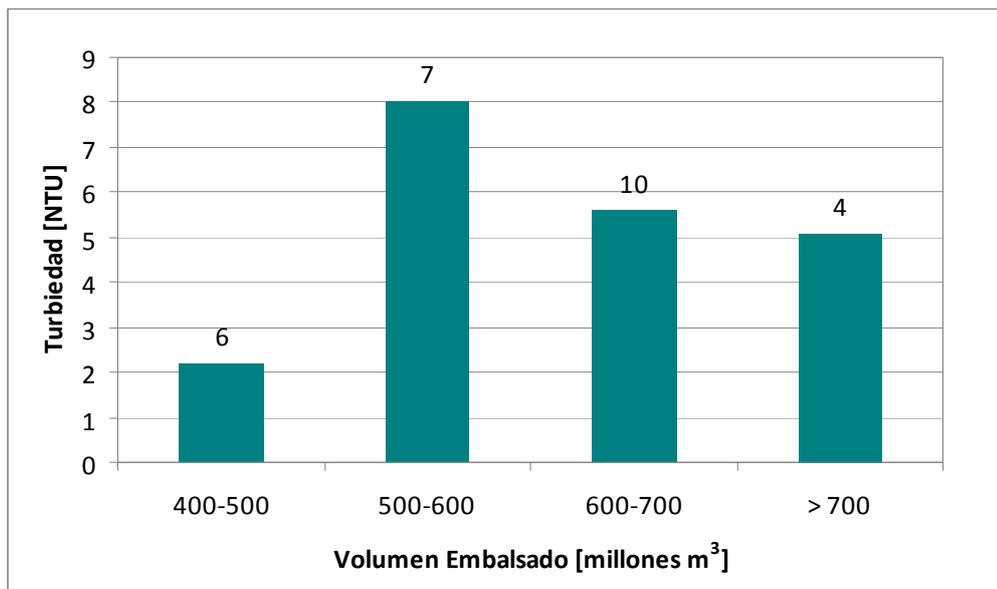


Figura 14. Promedio de turbiedad por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de turbiedad y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados

La turbiedad mostró un aumento notable (8 NTU). En los rangos superiores hubo un decaimiento poco significativo (0,52 NTU entre el tercer y cuarto rango).

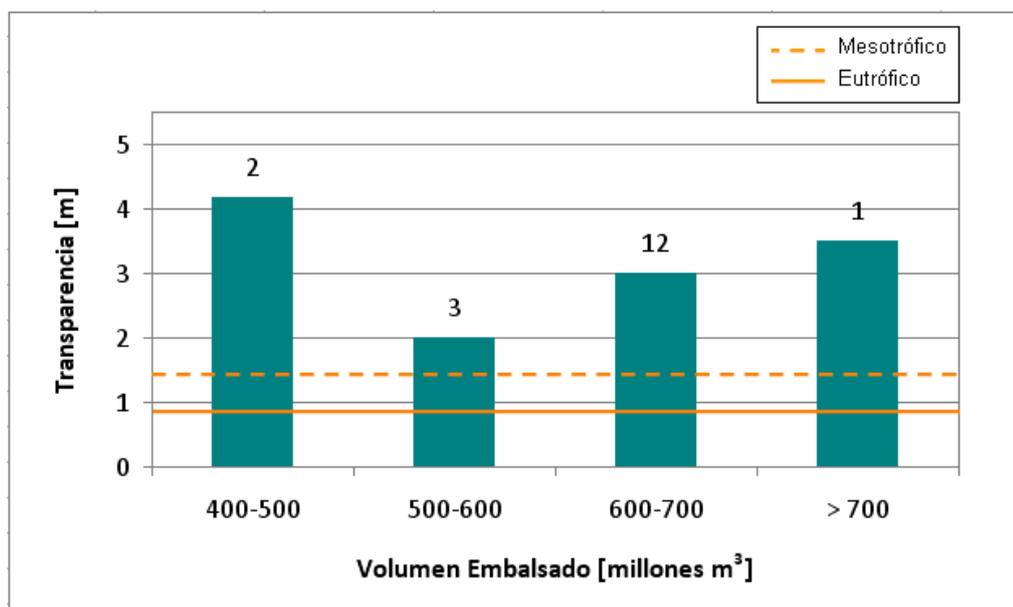


Figura 15. Promedio de transparencia del disco Secchi por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de transparencia y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

La transparencia mostró una disminución pronunciada entre el primer y segundo rango (2,17 m) seguido de un aumento progresivo en los rangos de volumen siguientes. El segundo rango fue el que mayor tendencia presentó hacia el estado eutrófico.

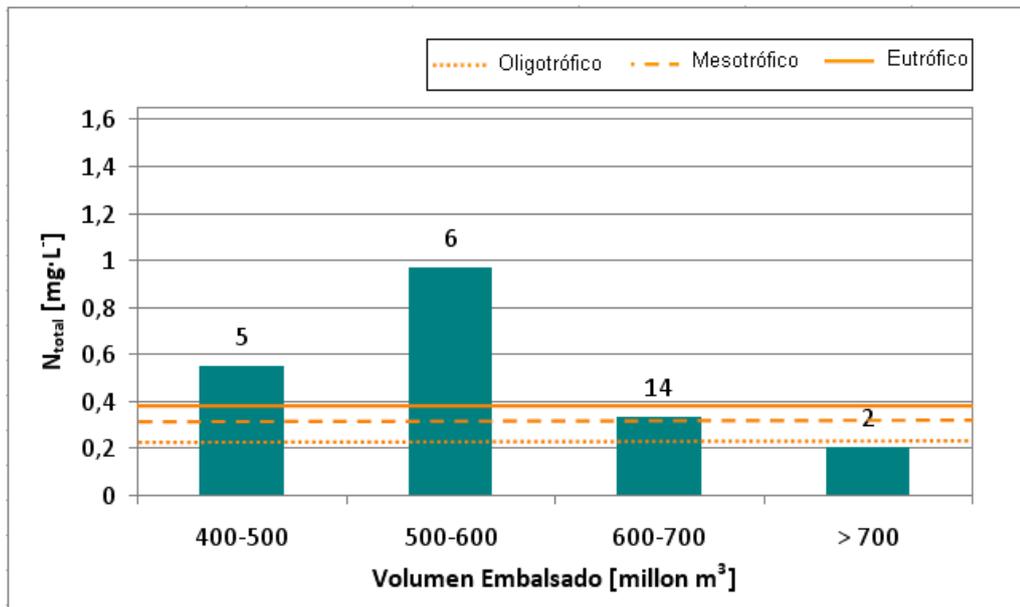


Figura 16. Promedio de la concentración de N-N_{total} por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de N-N_{total} y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

El nitrógeno total presentó un aumento notable (0,97 mg N·L⁻¹), similar al de la turbiedad, pero con una disminución más pronunciada en los rangos siguientes (0,77 mg N·L⁻¹ entre el segundo y último rango). Los dos primeros rangos son los únicos que se pasan al límite inferior del estado eutrófico, el segundo rango avanzando más en dicho estado que el primero.

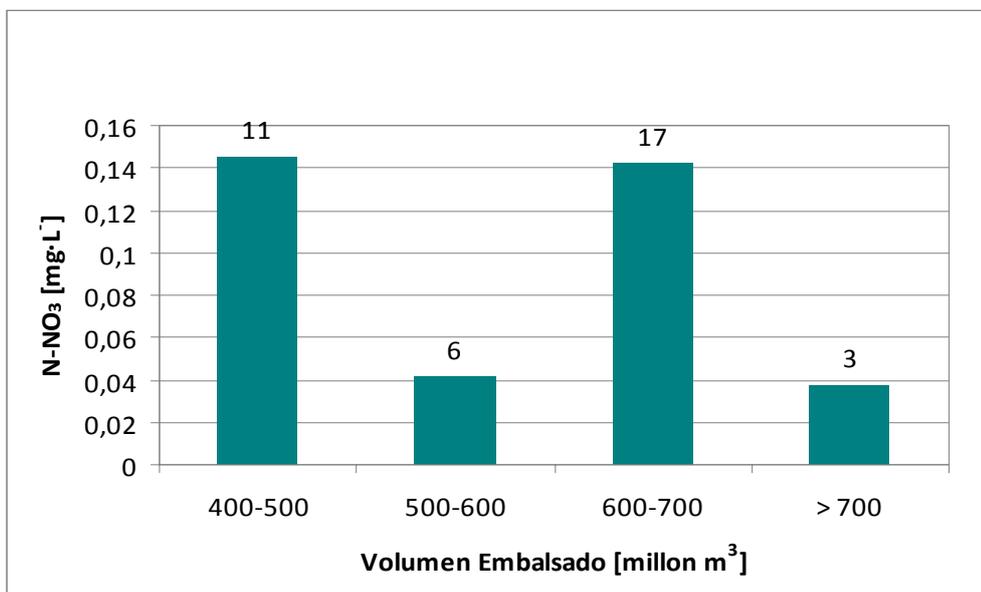


Figura 17. Promedio de la concentración de N-NO₃⁻ por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de N-NO₃ y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

El nitrato presentó una disminución que se repitió en el rango > 700 millones m³. Estos valores bajos contrastaron con los del primer y tercer rango (0,145 mg N·L⁻¹ y 0,142 mg N·L⁻¹ respectivamente).

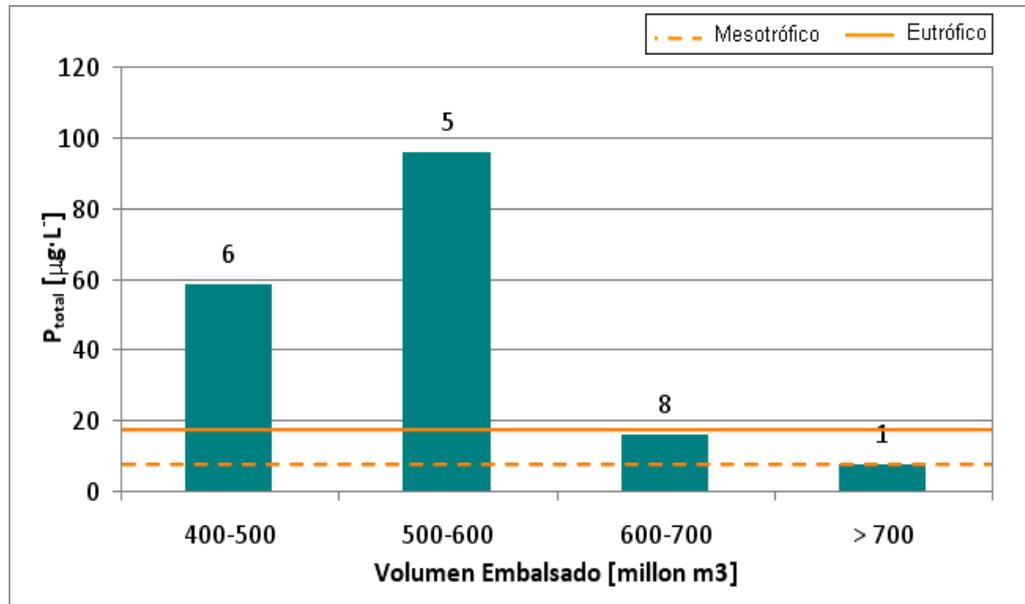


Figura 18. Promedio de la concentración de P-P_{total} por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de P-P_{total} y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

El fósforo total siguió un patrón bastante similar al del nitrógeno (95,49 µg P·L⁻¹ entre los 500 - 600 millones m³), también se encontró una disminución gradual en los rangos mayores (88,09 µg P·L⁻¹ entre el segundo y último rango). El tercer rango se situó en límites mesotróficos, los dos primeros pasaron el límite inferior del estado eutrófico, destacándose, al igual que en la figura 16, el segundo rango.

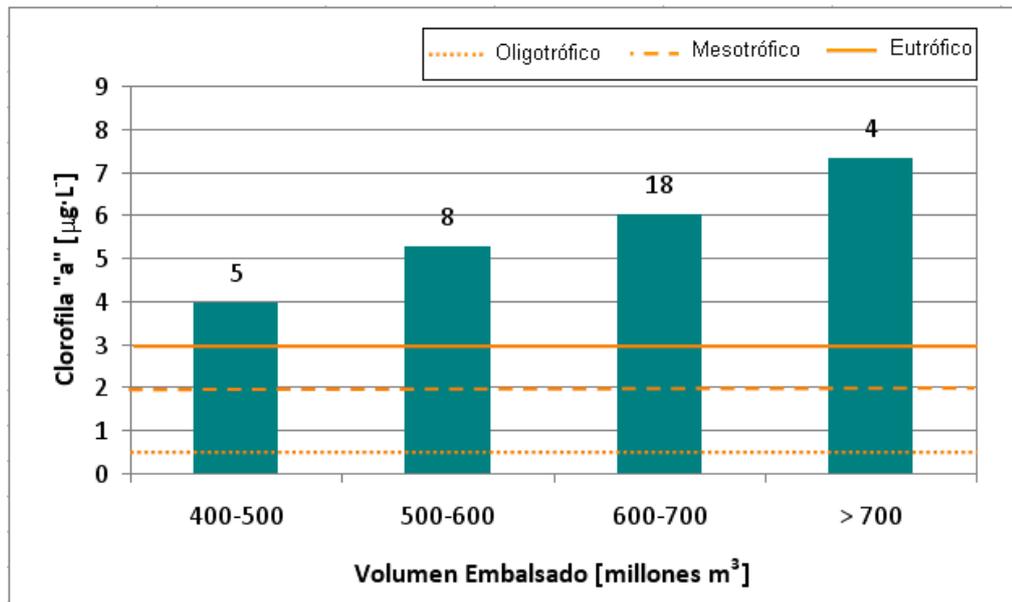


Figura 19. Promedio de la concentración de Cl “a” por rango de volumen. Para la elaboración de éste gráfico se tomaron los datos de Cl “a” y volumen embalsado coincidentes en fechas entre 1993 y 2008, se separaron en los rangos respectivos y se calculó un promedio para cada uno. El número sobre las barras indica la cantidad de datos promediados.

Como el nitrógeno total, nitrato y fósforo total presentaban peculiaridades entre los 500 - 600 millones m³, se decidió realizar un gráfico sobre clorofila “a” para evaluar si se repetía la misma situación dada en las variables anteriores. La clorofila “a” no presentó singularidades, sólo un aumento progresivo a medida que se avanza en el rango de volumen. Se encontró, de forma creciente, que todos los rangos sobrepasan el límite inferior eutrófico.

2. Calidad del agua.

2.1. Determinación del Índice trófico según la OCDE (1982).

De la tabla 1 se estableció que un embalse no es un lago o río, sino que un sistema con características intermedias, por ende el cálculo del índice trófico no representaría a cabalidad el estado del embalse. Sin embargo se decidió realizarlo de todas formas debido a la relación encontrada con el volumen embalsado en la sección “1.2. Relación con el aporte de materia orgánica”.

Para establecer el estado trófico se compararon los valores de la transparencia del disco Secchi, fósforo total ($P-P_{total}$), nitrógeno total ($N-N_{total}$) y clorofila “a” (Cl “a”) con los de tabla 2 (ver apartado 2.4.3. del Marco teórico)

Tabla 4. Promedio geométrico (G) y desviación estándar (sd) de fósforo total (P_{total}), nitrógeno total (N_{total}), clorofila “a” (Cl “a”), y transparencia del disco Secchi para el embalse La Paloma.

Cuerpo de agua/variable	P_{Total} ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		N_{Total} ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		Cl “a” ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		Disco Secchi (m)	
	G	sd	G	sd	G	sd	G	sd
Embalse Paloma	31,34	22,04	456,78	108,53	12,31	4,43	1,85	0,26
G \pm sd	10,30-54,38		348,25 -565,31		7,88 -16,74		1,59 - 2,11	
Estado Trófico	Mesotrófico		Mesotrófico		Eutrófico		Eutrófico	

De acuerdo a las figuras 2 y 3 del Anexo II. Figuras, se identificó que el P-P_{total} y el N-N_{total} se encuentran en un estado mesotrófico. La transparencia del DS y la Cl “a” (Figura 1 y 4. Anexo II. Figuras) se encuentran dentro de los límites eutróficos.

2.2. Determinación del nutriente limitante y balance de fósforo.

a) Determinación del nutriente limitante.

La relación N/P encontrada para este cuerpo de agua fue de 20,84

$$\frac{N}{P} = \frac{0,396}{0,019} = 20,84 > 7$$

b) Balance de Fósforo

Basándose en las Ec /1/ y /2/ propuestas por Vollenweider (1983) se obtuvieron los siguientes resultados:

Carga Actual:

- La concentración de P-P_{total} se calculó mediante la aplicación del promedio acumulado en los datos superficiales (0-1,5 m) de las tres estaciones de monitoreo por separado. Posterior a esto se calculó el promedio de cada una y luego uno total involucrando a las tres.

$[P_{total}] = 31,0 \text{ mg P}\cdot\text{m}^{-3}$, concentración promedio de P- P_{total} del embalse La Paloma en superficie.

$z = 25,59 \text{ m}$ (fuente: López P. A, 2000)

$$T_w = \frac{V_{embalse}}{Q_{afuente}} = 2,4 \text{ años (fuente: López P. A, 2000)}$$

$$f = 1/T_w = 0,42$$

$$R = \frac{1}{[1 + (1/2,4)]} = 0,7$$

$$1-R = 0,3$$

$$L_{cp} = 31,0 \cdot 25,59 \cdot \frac{0,42}{(1-0,7)} = 1110,61 \frac{\text{mg}}{\text{m}^2} \cdot a$$

Carga Crítica

$$L_c = 17 \cdot \left(\frac{25,59}{2,4} \right)^{0,6} \cdot (25,59)^{0,4} = 257,27 \frac{\text{mg}}{\text{m}^2} \cdot a$$

$$\text{Diferencia} = L_{cp} - L_c = (1110,61 - 257,27) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a} = 853,34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}$$

Considerando el área superficial del embalse (espejo de agua), se calculará la carga actual y crítica para toda la superficie.

$A_0 = 29,22 \text{ km}^2$, área del espejo de agua del embalse La Paloma.

- $L_{cp} \cdot A_0 = 1110,61 \frac{\text{mg P}}{\text{m}^2} \cdot a \cdot 29,22 \text{ km}^2 \cdot \frac{1000^2 \text{ m}^2}{\text{km}^2}$

$$L_{cp} \cdot A_0 = 3,25 \cdot 10^{10} \text{ mg P} \cdot a \cdot \frac{\text{ton}}{1000^3 \text{ mg}} = 32,45 \text{ ton P} \cdot a$$

- $L_c \cdot A_0 = 257,27 \frac{\text{mg P}}{\text{m}^2} \cdot a \cdot 29,22 \text{ km}^2 \cdot \frac{1000^2 \text{ m}^2}{\text{km}^2}$

$$L_c \cdot A_0 = 7,517 \cdot 10^9 \text{ mg P} \cdot a \cdot \frac{\text{ton}}{1000^3 \text{ mg}} = 7,52 \text{ ton P} \cdot a$$

$$\text{Diferencia} = (32,45 - 7,52) \cdot \text{ton P} \cdot a = 24,93 \cdot \text{ton P} \cdot a$$

2.3. Evolución de las variables de calidad en el periodo 1993-2008.

2.3.1. Variables *in-situ*.

Las variables *in-situ* estudiados corresponden al pH, CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y OD ($\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$), de la temperatura se estudió solamente su perfil en profundidad ($^{\circ}\text{C}$). Los gráficos se confeccionaron tomando los datos brutos obtenidos en superficie (0-1,5 m), calculando el promedio acumulado de éstos en cada estación de monitoreo y comparando su evolución en el tiempo. Los primeros datos de un promedio acumulado tienden a ser irregulares porque se parte promediando una pequeña cantidad de éstos. El efecto de irregularidad desaparece cuando la cantidad de datos promediados aumenta.

La abreviatura para cada estación de monitoreo es la siguiente: estación en el Muro (Muro), estación en el brazo del Río Huatulame (Huatulame) y la estación en el brazo del Río Grande (Grande).

Temperatura

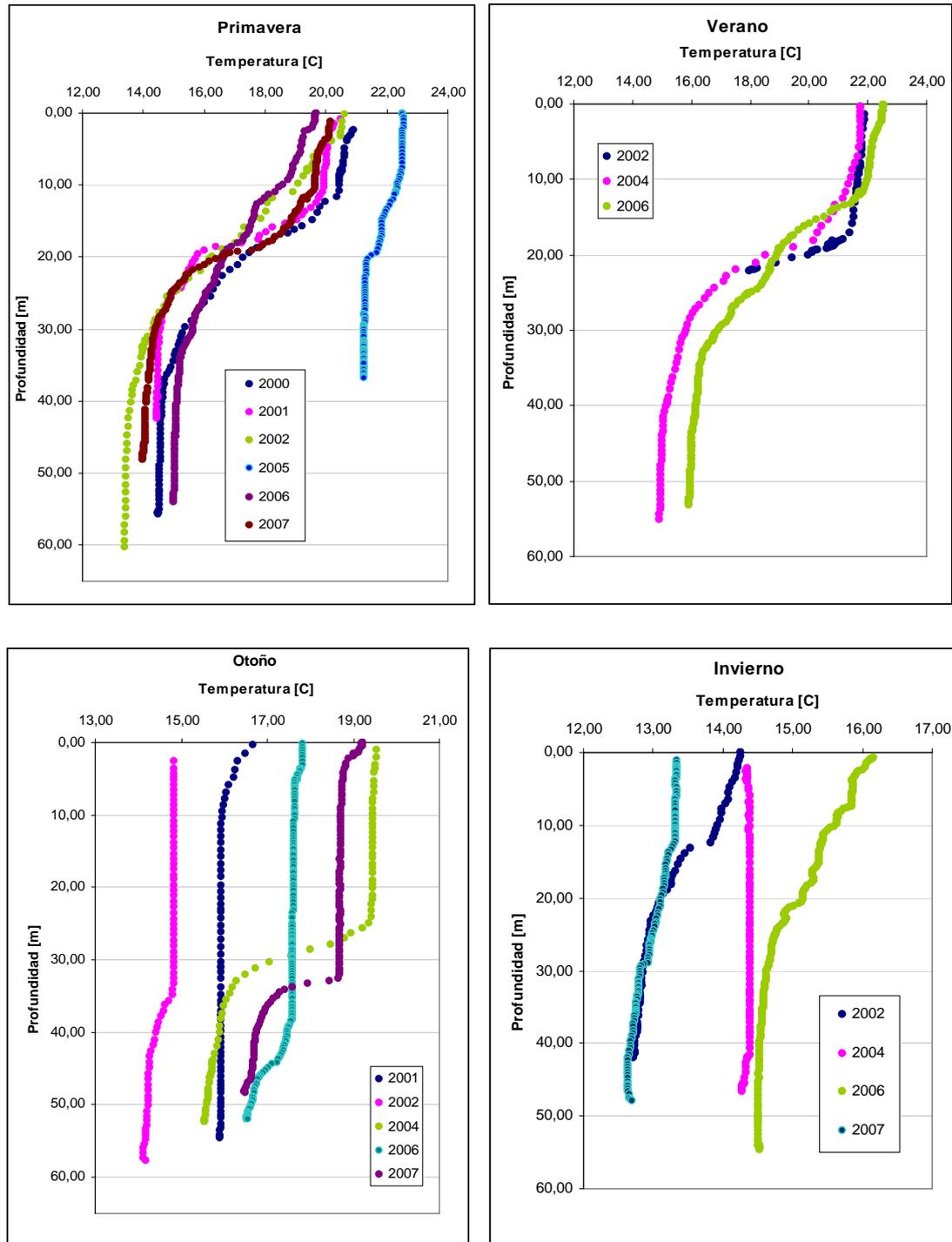


Figura 20. Perfiles de temperatura para la estación Muro desde el año 2000 al 2007.

Primavera: En ésta época se produce el calentamiento de la superficie del embalse. Este calentamiento es rápido y no alcanza a ser distribuido por la circulación del agua, por lo tanto la superficie se vuelve menos densa y la resistencia térmica a la mezcla comienza (Wetzel R., 1982).

Verano: En ésta época se sigue observando una discontinuidad entre la temperatura superficial y de fondo, la resistencia a la mezcla se acentúa, pero no se aprecia una formación clara de estratos. La estratificación se vería impedida por la variación horizontal típica de los embalses.

Otoño: Se caracteriza por un enfriamiento de la capa superficial del agua, la cual se vuelve más densa y se hunde. A medida que la superficie más fría se hunde se mezcla por convección (mezcla vertical), proceso que es promovido por una circulación inducida por el viento.

Invierno: En ésta época se encontró un dominio homeotérmico del perfil con temperaturas de escasa variación en el perfil (1,5 °C la máxima). A medida que transcurre el invierno el agua se sigue enfriando y circulando.

pH

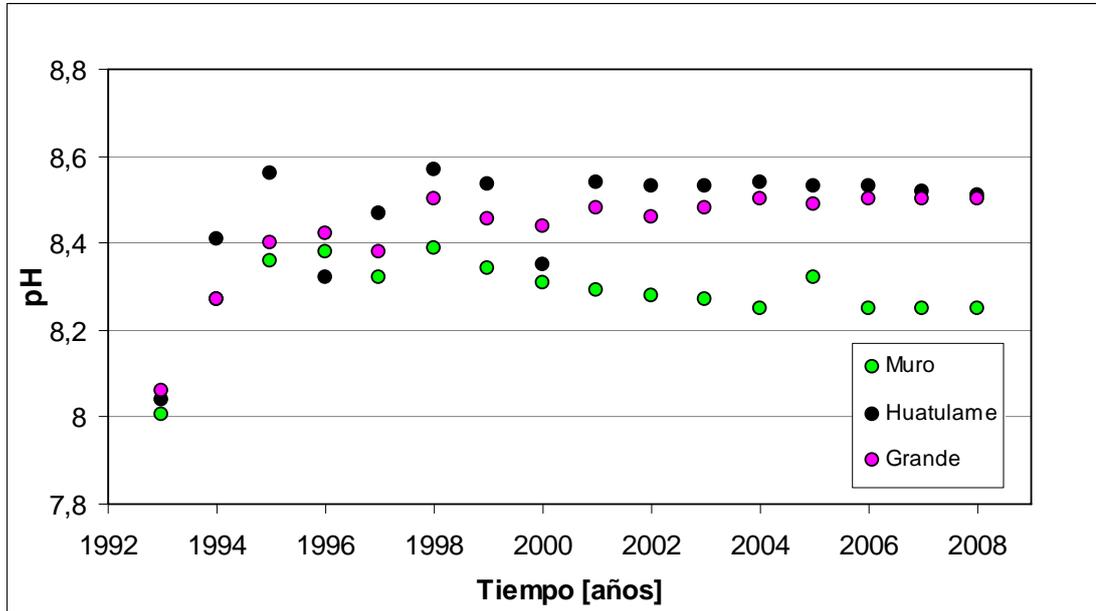


Figura 21. Comparación de la evolución del pH entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

De la figura 21 se extrae que el nivel de pH del menor al mayor toma el siguiente orden:

Muro < Grande < Huatulame.

Las tasas de cambio entre los años 1993 y 2008 indican una tendencia del pH al aumento en las tres estaciones acentuándose más en Grande y Huatulame ($0,018 \text{ pH}\cdot\text{año}^{-1} > 0,016 \text{ pH}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente)

Conductividad eléctrica (CE)

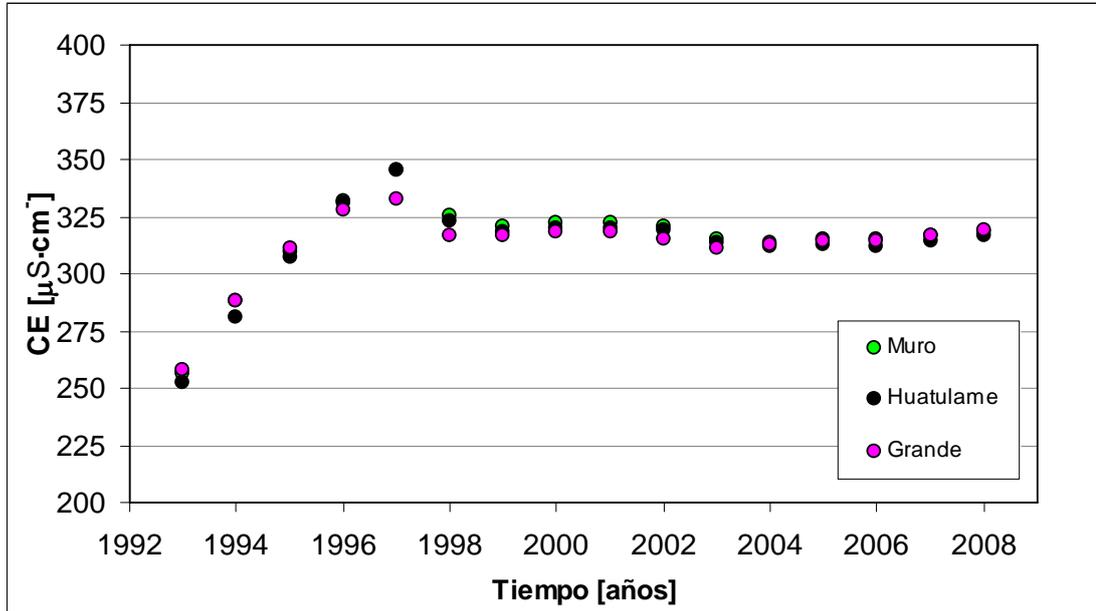


Figura 22. Comparación de la evolución de la CE entre las estaciones de monitoreo.

Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

De la figura 22 se extrae que la conductividad está muy por debajo de lo que recomienda la NCh 1.333 ($750 \mu S \cdot cm^{-1}$).

Se aprecia claramente que las tres estaciones siguen la misma tendencia registrando escasa variación en los valores de conductividad. Por ejemplo, en 1996 para la estación Muro, Huatulame y Grande se encontraron valores acumulados de $331,47$, $331,13$ y $327,49 \mu S \cdot cm^{-1}$ respectivamente. Similar situación se encontró en fechas recientes como

el año 2008 donde se obtuvieron valores de 318,55, 316,36 y 318,87 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Muro, Huatulame y Grande, respectivamente).

La tendencia en las tres estaciones desde 1993 a 2008 es a un aumento poco significativo. De mayor a menor se tienen las siguientes tasas de cambio: Grande ($1,518 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) > Huatulame ($1,488 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) > Muro ($1,387 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)

Oxígeno Disuelto (OD)

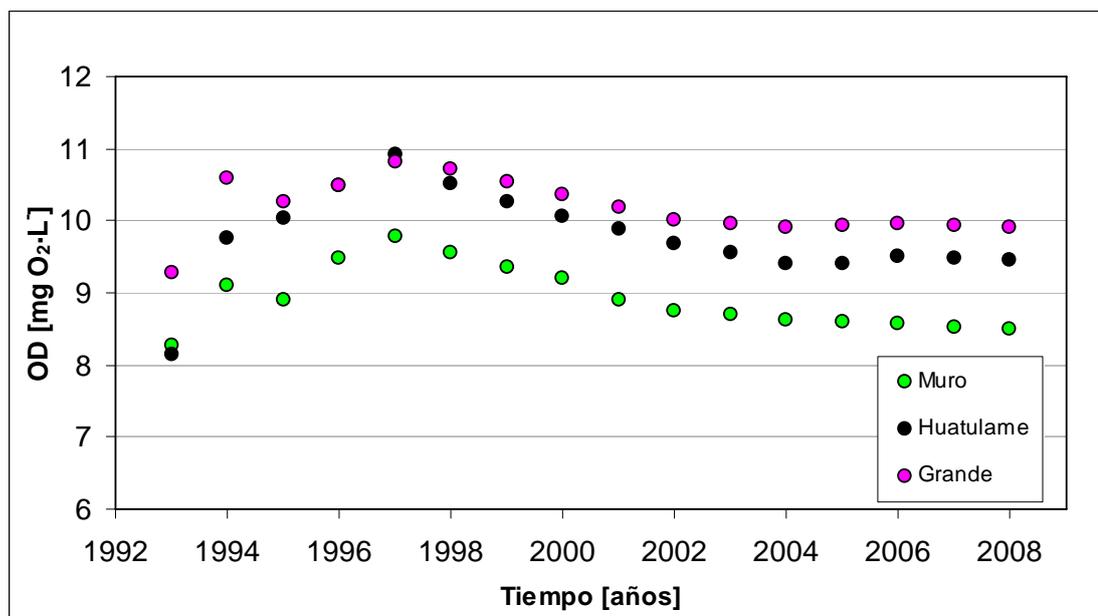


Figura 23. Comparación de la evolución del OD entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

En la figura 23 se aprecia que de las tres estaciones la que tiene el menor nivel de oxígeno disuelto es Muro, le sigue Huatulame y luego Grande.

Se aprecia una tendencia clara a la disminución desde el 1997. El orden de las tasas de cambio entre los años 1993 y 2008 de mayor a menor es: Muro ($-0,044 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) > Grande ($-0,028 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) > Huatulame ($-0,025 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$).

2.3.2 Nutrientes

a) Nutrientes Nitrogenados

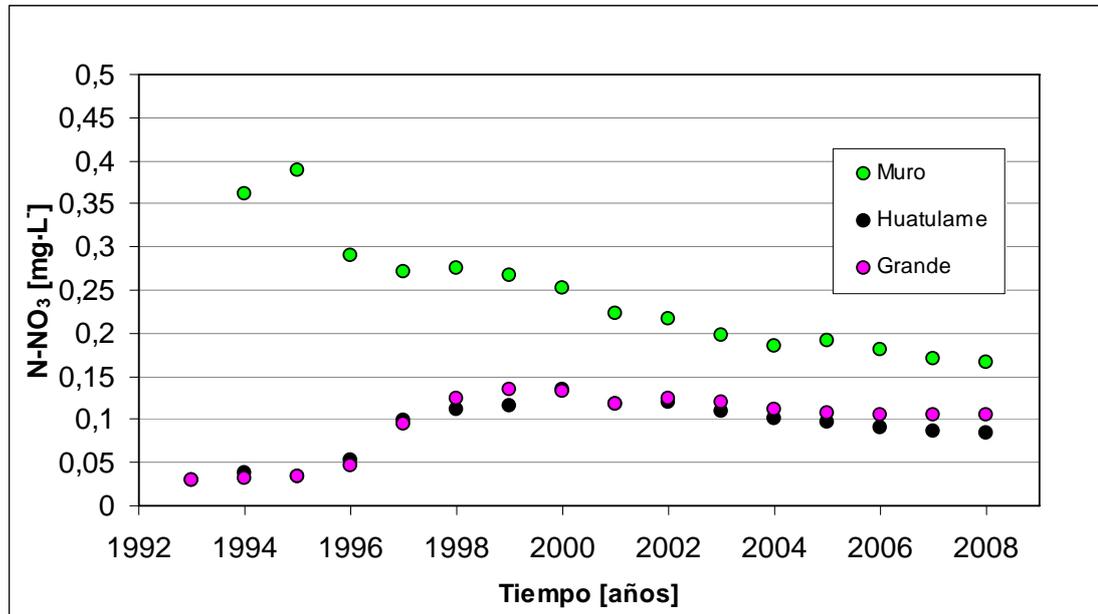


Figura 24. Comparación de la evolución de la concentración de nitrato (N-NO₃) entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

N-NO₃: La figura 24 muestra que la estación que tiene mayores niveles de nitrato corresponde a Muro (Ej.: Año 2002 = 0,160 mg N·L⁻¹). Huatulame y Grande poseen valores menores y cercanos entre sí (en el 2002 Huatulame = 0,119 mg N·L⁻¹ y Grande = 0,124 mg N·L⁻¹). La tendencia es a un aumento leve en Huatulame y Grande, y a una disminución leve en Muro.

La tasa de cambio entre los años 1993 y 2008 de mayor a la menor es como sigue: Grande ($0,005 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) > Huatulame ($0,003 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$). En el caso de Muro fue de $-0,007 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$.

Amonio (N-NH_4)

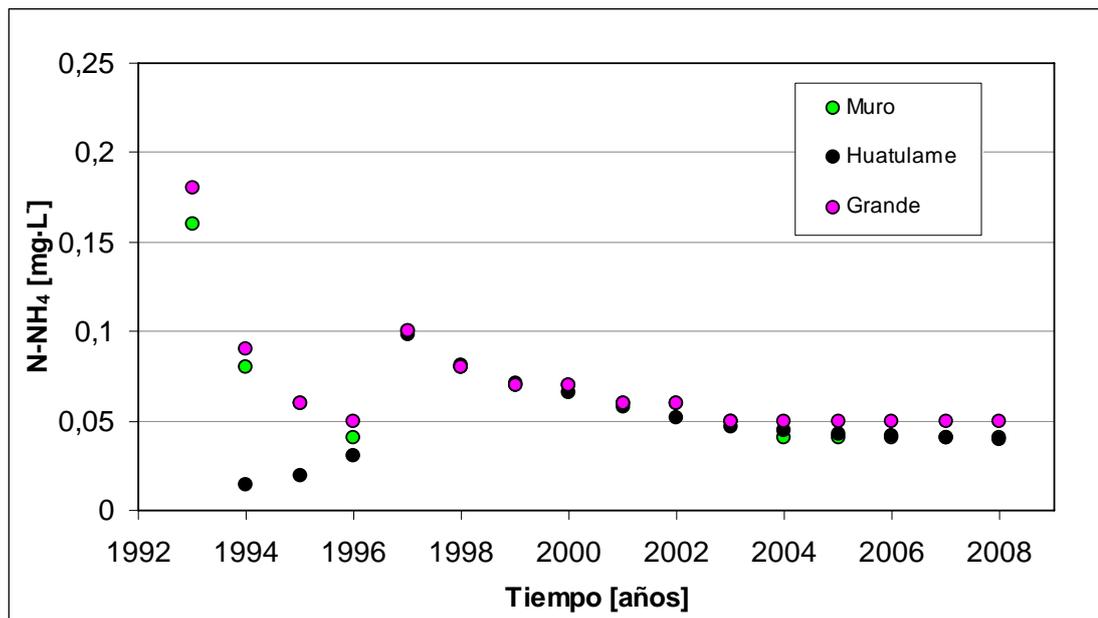


Figura 25. Comparación de la evolución de la concentración de amonio (N-NH_4) entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

N-NH_4 : Los valores de N-NH_4 mostrados en la figura 25 son similares en las tres estaciones de monitoreo, siendo estos ligeramente más altos en la estación Grande (Ej.:

En el año 2002 Grande = 0,06 mg N·L⁻¹, Huatulame = 0,052 mg N·L⁻¹ y Muro = 0,06 mg N·L⁻¹).

La tendencia general es a la disminución, la tasa de cambio de mayor a menor entre 1993 y 2008 es como sigue: Muro = Grande (-0,005 mg N·L⁻¹·año⁻¹) > Huatulame (-0,0001 mg N·L⁻¹·año⁻¹).

Nitrógeno total (N-N_{total})

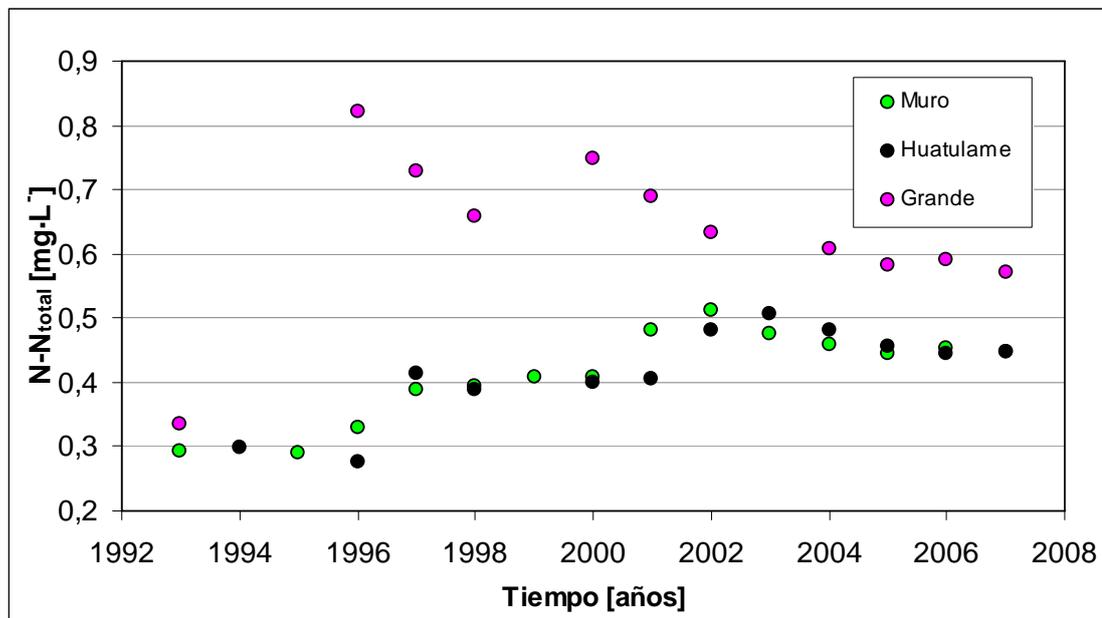


Figura 26. Comparación de la evolución de la concentración del N-N_{Total} entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

La determinación del nitrógeno total ($N-N_{\text{total}}$) incluye el nitrógeno del método Kjeldahl ($N-NH_4$ y N -orgánico) y los otros componentes inorgánicos ($N-NO_2^-$ y $N-NO_3^-$), éstos últimos por reducción en medio alcalino. El método Kjeldahl incluye compuestos de origen biológico (proteínas, polipéptidos y aminoácidos), quedando excluidos los de tipo industrial (oximas, hidracinas y derivados) e inorgánicos ya mencionados. La ventaja de determinar el nitrógeno de forma individual y total es que así se tiene noción de la proporción de cada especie, y su real aporte a los cambios que se detecten. También permite estimar las fuentes que provocan estos cambios.

$N-N_{\text{Total}}$: De la figura 26 se extrae que la estación Grande tiene un nivel mayor de $N-N_{\text{Total}}$ que las otras estaciones.

La tendencia es al aumento en las tres estaciones. La tasa entre 1993 y 2007 indicó un aumento similar en Muro y Huatulame ($0,013$ y $0,014 \text{ mg } N \cdot L^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, respectivamente).

El aumento en la estación Grande fue despreciable por la poca cantidad de registros con los que se cuentan y por la baja tasa de cambio encontrada ($1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mg } N \cdot L^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$)

b) Nutrientes fosforados.

Fosfato (P-PO₄)

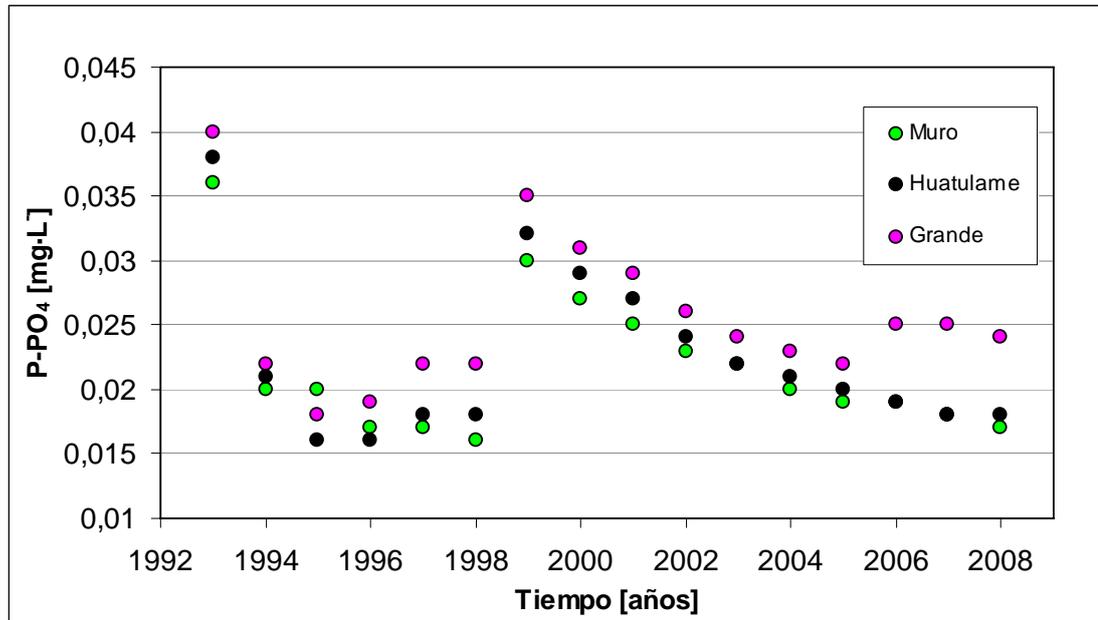


Figura 27. Comparación de la evolución de la concentración del P-PO₄ entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

P-PO₄: De la figura 27 se percibe que las tres estaciones tienen valores similares de concentración de fosfato (P-PO₄), siendo éstos levemente superiores en la estación Grande (Ej.: En el año 2002 se detectó para Muro = 0,023 mg P·L⁻¹, Huatulame = 0,024 mg P·L⁻¹ y Grande = 0,026 mg P·L⁻¹).

La tendencia es a la disminución en las tres estaciones, la tasa de cambio de mayor a menor entre 1993 y 2008 es como sigue: Huatulame = Muro ($-4 \cdot 10^{-4} \text{ mg P} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) > Grande ($-2 \cdot 10^{-4} \text{ mg P} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$).

Fósforo total ($\text{P-P}_{\text{total}}$)

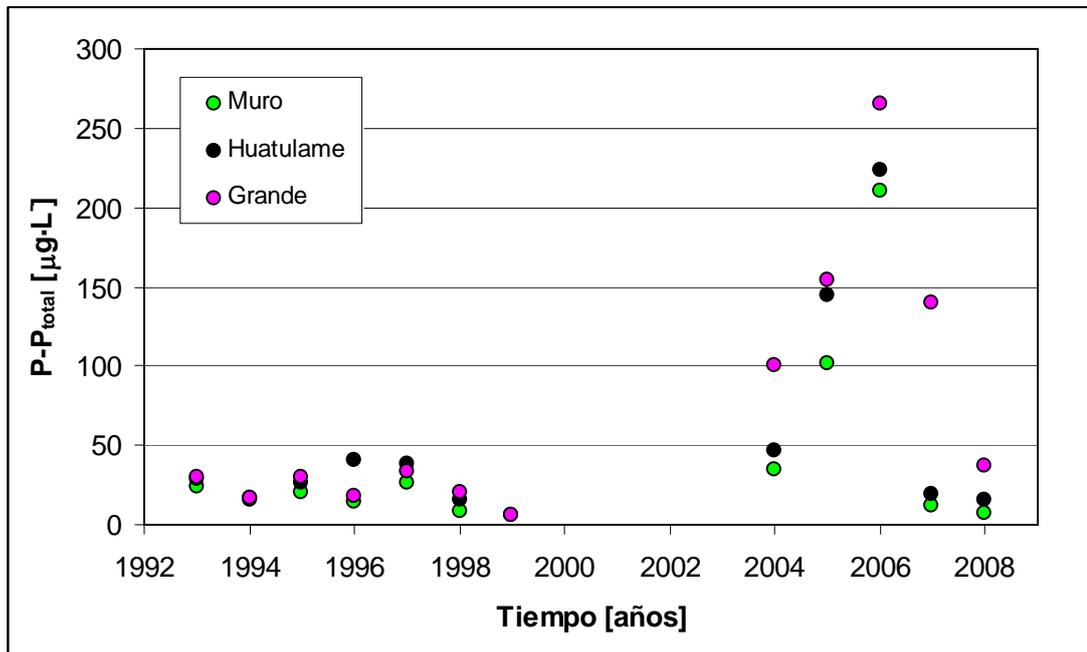


Figura 28. Comparación de la evolución de la concentración de $\text{P-P}_{\text{total}}$ entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

$\text{P-P}_{\text{total}}$: Se percibe de la figura 28 que las tres estaciones de monitoreo tienen un comportamiento similar, siendo Muro aquella con menores concentraciones de $\text{P-P}_{\text{total}}$.

La tendencia general es al aumento. La tasa de cambio entre los años 1993 y 2008 de mayor a menor es como sigue: Grande ($9,742 \mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) > Huatulame ($5,069 \mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) > Muro ($4,336 \mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

2.3.3. Variables secundarias.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

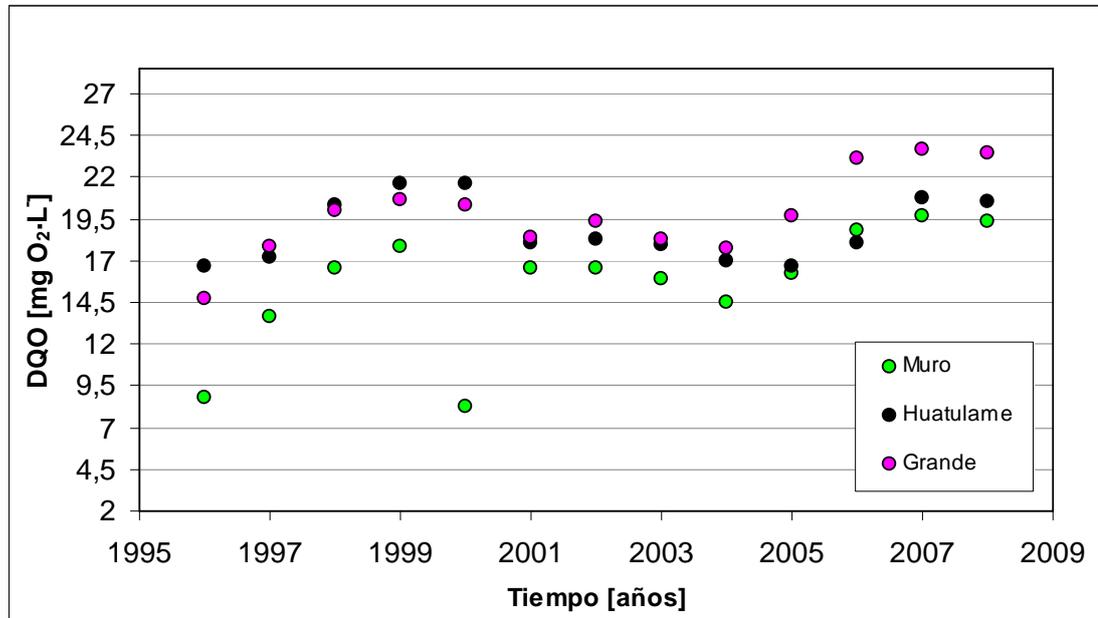


Figura 29. Comparación de la evolución de la demanda química de oxígeno (DQO) entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): De la figura 29 se aprecia que la estación que muestra los menores niveles de DQO es Muro llegando hasta los 20 mg O₂·L⁻¹. Huatulame y Grande presentan valores ligeramente mayores de 21,6 y 23,4 mg O₂·L⁻¹ respectivamente.

Se encontró una tendencia al aumento entre los años 1996 y 2008 en las tres estaciones. Muro y Grande (Muro = $0,604 \text{ mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ > Grande = $0,470 \text{ mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) se destacan sobre Huatulame que presenta la tasa de cambio mucho menor ($0,044 \text{ mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

Transparencia

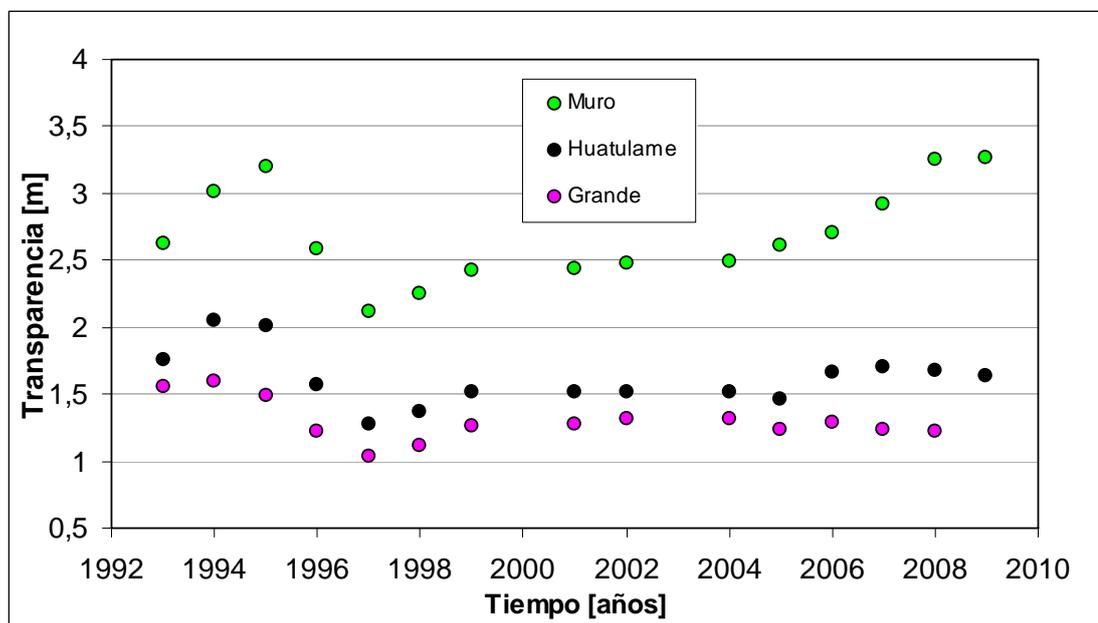


Figura 30. Comparación de la evolución de la transparencia del DS entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

Transparencia del disco Secchi (DS): De la figura 30 se percibe que la estación de monitoreo que posee un visión mas lejana del DS es Muro, llegando a un máximo de

visión a 3,26 m de profundidad el año 2008. Las estaciones Huatulame y Grande poseen máximos menores llegando hasta 2,05 y 1,59 m respectivamente para el año 1994.

La tendencia general entre 1993 y 2008 es a la disminución en las estaciones Huatulame y Grande ($\text{Grande} = -0,011 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1} > \text{Huatulame} = -0,01 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$), y al aumento en la estación Muro ($0,021 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$).

Clorofila "a"

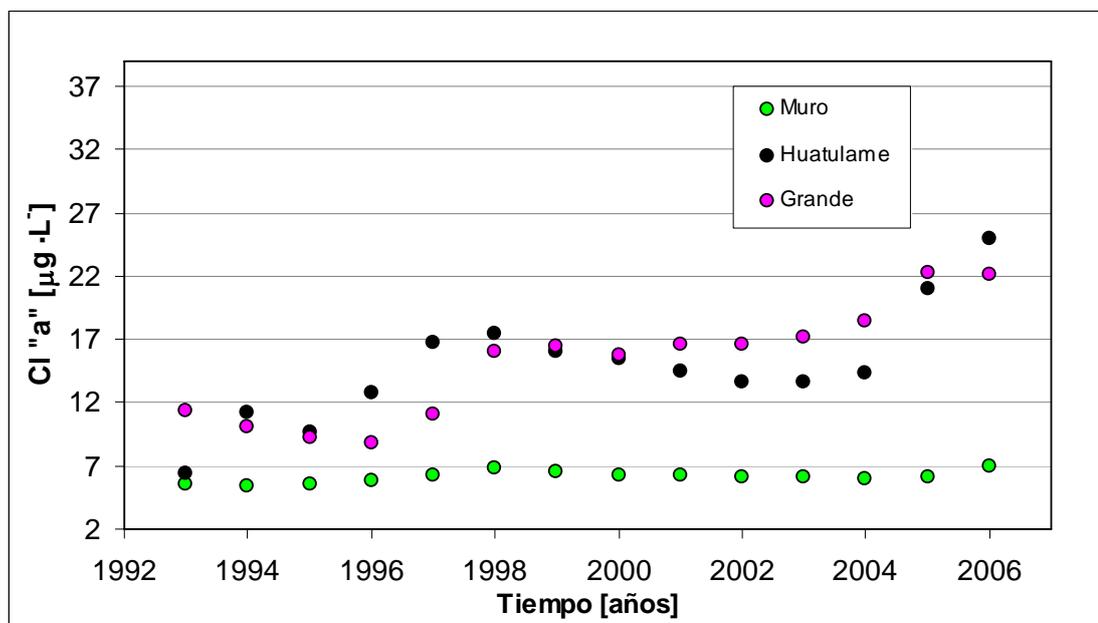


Figura 31 Comparación de la evolución de la concentración de clorofila "a" entre las estaciones de monitoreo. Para la elaboración de los gráficos se realizó un promedio acumulado sobre los datos brutos y con los datos resultantes se calculó un promedio anual.

Clorofila “a”: La figura 31 muestra que la estación con menor concentración de Cl “a” es Muro ($6,96 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en 2006), Huatulame y Grande poseen valores mayores ($24,92$ y $22,16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente para el año 2006) alternándose durante algunos períodos.

La tendencia general entre 1993 y 2006 es al aumento en las tres estaciones. La tasa de cambio de mayor a menor es como sigue: Grande ($0,976 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) > Huatulame ($0,813 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) >> Muro ($0,063 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

IV. DISCUSIÓN GENERAL

1. Estudio de las variables de calidad con respecto al volumen embalsado.

1.1. Estudio del volumen embalsado histórico.

Se aprecia de la figura 6 que los volúmenes registrados que se repiten en el tiempo, como por ejemplo los presentes en el rango 650 - 700 millones m³, no tendrán necesariamente la misma calidad de agua, porque tienen precedentes distintos. Sin embargo, el efecto que puede ejercer este pasado con respecto a la calidad actual se ve disminuido, porque son varios los registros que se promedian.

De las figura 9 se aprecia que el volumen embalsado no es una condición que dependa completamente de la época del año, sino que más bien de la precipitación de un año en su totalidad, lo que es coherente con la regulación interanual que tiene el embalse. La figura 9 no permite apreciar, a diferencia de la figura 8, que hay datos de volumen embalsado más altos en verano y primavera, sólo indica que los registros de volumen se distribuyen en ciertos rangos específicos.

1.2. Relación de variables con volumen embalsado.

El pH presentó valores que no siguen un patrón determinado, se caracterizó por una escasa variación que se altera sobre los 700 millones m³.

La relación entre la CE y el volumen embalsado fue la esperada porque se basa en un efecto de dilución. Cuando el volumen es bajo, las sales aportadas a las aguas del embalse y aquellas preexistentes provenientes de los sedimentos y de la evaporación del agua se encontrarían en un volumen menor, es decir más concentradas. Por el contrario, a medida que aumenta el volumen, más agua entra al embalse (proporcionalmente hay menor evaporación), más sales (iones), pero éstas ya no estarán próximas a las sales preexistentes, hay un espacio mayor, es decir, estarán menos concentradas.

1.2.1. Relación de volumen embalsado con la materia orgánica.

El aumento detectado en la DQO (materia orgánica oxidable químicamente) entre los 500 - 600 millones m³ repercute de forma directa sobre el OD, porque es este el que usan los microorganismos para descomponerla en agua y dióxido de carbono. En este sentido las figuras 12 y 13 muestran un comportamiento coherente entre sí.

Si se asume que gran parte de la materia orgánica aportada se encuentra en los suelos y sedimentos (en coloides y partículas suspendidas, material de descomposición biológico, etc.), estos serían los que provocarían el consecuente aumento en la turbiedad, nitrógeno y fósforo total, además de la disminución en la transparencia del disco Secchi en el rango de volumen analizado. Coherente con lo observado en las figuras 14 y 15.

Se esperaría que el aumento encontrado en la concentración de fósforo total (Figura 18), aumentaría en algún grado la concentración de clorofila "a" en el rango cuestionado, sobretodo considerando que es el nutriente limitante en el crecimiento del fitoplancton.

De acuerdo a lo anterior, un supuesto aumento en la clorofila “a” actuaría como factor adicional de las alteraciones físicas encontradas en el agua. Sin embargo, la clorofila “a” (Figura 19) no presenta ninguna particularidad entre los 500 - 600 millones m³, sólo aumenta a medida que lo hace el volumen embalsado.

La concentración más alta de clorofila “a” en los volúmenes mayores puede ser atribuida a que muchos de éstos se encuentran en primavera y verano (Figura 8), donde hay cambios significativos en la irradiación solar y temperatura, factores que inciden positivamente en la tasa de fotosíntesis.

En cuanto a las variables determinantes del estado trófico del agua del embalse, se descubrió que todos acentúan su tendencia al estado eutrófico. En los gráficos de nitrógeno y fósforo total el primer y segundo rango (400-500 y 500-600 millones de m³, respectivamente) se situaron en límites eutróficos, destacándose el segundo sobre el primero (Figuras 16 y 18). En los gráficos clorofila “a” (figuras 15 y 19) todos los rangos de volumen se situaron en límites eutróficos, indicando a ésta variable como la más afectada. En el caso de la transparencia, el segundo rango de volumen también se destacó sobre los otros al aproximarse más al límite inferior eutrófico.

Lo anterior significaría que:

- El nitrógeno y fósforo total estarían asociados a la materia orgánica de los suelos y sedimentos. Es probable que el nitrógeno esté adherido a un compuesto orgánico

mayor (urea, aminoácidos, proteínas, fosfolípidos, enzimas, etc.). Similar situación se tiene para el fósforo.

- En la estación Muro, los nutrientes (nitrato, nitrógeno y fósforo total), no tendrían gran incidencia en el crecimiento de las algas.

Una forma de explicar los fenómenos encontrados en la cota de los 500-600 millones m^3 sería el mencionar que tanto otoño como invierno destacan en la Figura 9 este rango de volumen como aquel que agrupa el mayor porcentaje de datos, no así primavera o verano que destacan rangos de volumen mayores. De forma complementaria se puede citar la Figura 8, que indicaría que estas dos épocas del año tienen los promedios menores de volumen embalsado. Lo anterior querría decir que en otoño e invierno muchas de las variables analizadas se pueden encontrar más concentradas o exacerbadas, y esto, sumado a la frecuencia de datos, pudo haber influido en los resultados presentados en las figuras de variables con respecto al volumen embalsado (Figuras 12-19).

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, los aportes de los afluentes Río Grande y Huatulame durante las épocas de otoño e invierno -donde se mantiene con mayor frecuencia el rango entre 500-600 millones m^3 - se encontrarían más concentrados en materia orgánica que en otras épocas, alterando la calidad del agua y por ende su posible uso.

Una segunda explicación tentativa se relacionaría con la regla de operación del embalse La Paloma (Ver I. Introducción, 2.5.1. Antecedentes: construcción y operación). Los cambios detectados entre los 500 - 600 millones m³ para la DQO, y en consecuencia para las otras variables antes estudiadas, se podrían atribuir al funcionamiento de la torre de toma, que provocaría un desprendimiento de suelo y resuspensión de sedimentos en las inmediaciones por efecto de la fuerza de succión (esta situación sería particular para la cota de los 500 - 600 millones m³). En adición, se tiene la proximidad de la estación de monitoreo Muro con respecto a la torre de toma (Figura 10. Anexo IV. Fotografías), que si bien no se encuentra inmediatamente sobre ésta, podría ser alcanzada por los efectos que provoca.

Independiente de la explicación, es posible estimar cual rango de los estudiados sería el más adecuado para distribuir agua de riego de acuerdo a su concentración de nutrientes asimilables.

Tabla 5. Distribución de nitrógeno inorgánico y orgánico en los distintos rangos de volumen.

Tipo de N/Rango de volumen (millones m ³)	400-500	500-600	600-700
N _{Inorgánico} (NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻)	31,9%	6,7%	54,2%
N _{Orgánico}	68,2%	92,8%	45,8%

Como los nutrientes nitrogenados son fundamentales en el crecimiento de los cultivos, y en consecuencia en el agua de riego, el rango de volumen embalsado que otorgaría la mejor proporción de éstos se encuentra entre los 600 - 700 millones m^3 porque abarca el mayor porcentaje de las formas asimilables del nitrógeno (NO_3^- , NH_4^+), considerando que el NO_2^- es un intermediario y su concentración fue siempre cercana al mínimo (límite de detección). Por otro lado, el rango menos adecuado de los estudiados sería aquel entre los 500 - 600 millones m^3 .

2. Diagnóstico de la calidad del agua del embalse La Paloma.

2.1. Índice trófico de la OCDE.

De acuerdo a la descripción del método de la OCDE (1.4. Marco teórico 1.4.2. Índice para cuantificar la eutroficación) este cuerpo de agua no puede considerarse correctamente clasificado porque dos de sus cuatro variables (nitrógeno total y fósforo total) se alejan por un valor de desviación estándar de ± 2 de su media geométrica.

De éstas dos variables se presume que aquella que más se desvió de lo esperado fue el nitrógeno total porque su promedio geométrico y desviación estándar son inferiores a los calculados en el estudio de López P (2000). Su condición debió acentuarse y no retroceder. Los resultados obtenidos por López P., el año 2000 usando el mismo método se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de la media geométrica registrados de fósforo total, clorofila “a”, nitrógeno total y transparencia del disco Secchi para el embalse La Paloma, Laguna de Aculeo y Lago Llanquihue (López P. A., 2000).

Masa de agua	P _{total} (µg·L ⁻¹)	Cl “a” (µg·L ⁻¹)	Transparencia (m)	N _{total} (µg·L ⁻¹)
La Paloma (2000)	26,60	12,20	2,30	999,40
La Paloma (2008)*	31,34	12,31	1,85	456,78
Laguna de Aculeo	41,4	29,6	0,9	83,9
Lago Llanquihue	4,3	1,0	12,7	8,7

(*) Valores obtenidos en este estudio.

Por otra parte, las otras tres variables concordaron con los resultados del estudio. El fósforo total está en los límites de la mesotrofia mientras que la clorofila “a” y la transparencia del disco Secchi en los de la eutrofia. Todos han acentuado su condición.

La condición eutrófica que otorga la clorofila “a” la causaría el incremento de los nutrientes (figuras 23, 25 y 27), mientras que el de la transparencia puede ser causada por un aumento progresivo en el aporte de sedimentos por los afluentes.

El aporte de sedimentos es consecuencia de la geología (relación con nutrientes y materia orgánica disponible), morfología de la cuenca (alta pendiente de sus valles que facilitan el mejor arrastre de los ríos) (Rivera, 2002) y la erosión del suelo provocada por actividades antrópicas mal manejadas como la agricultura, reforestación, arado, pastoreo, todo lo que remueva la superficie de forma no natural (Vollenweider 1968, Díaz 1994 y Vargas & Pérez 1999).

Según Parra (1989), las condiciones tróficas necesarias para el uso del recurso hídrico son las siguientes.

Tabla 7. Condición trófica según uso del recurso hídrico.

Uso deseado	Nivel Requerido	Nivel Tolerable
Agua potable	Oligotrófico	Mesotrófico
Recreación (contacto directo)	Mesotrófico	Suavemente eutrófico
Deportes náuticos (sin contacto directo)	Mesotrófico	Eutrófico
Acuicultura	Oligotrófico	Mesotrófico
Riego	--	Fuertemente Eutrófico
Producción de energía	--	Fuertemente Eutrófico

Fuente: Modificado de Parra (1989)

A pesar de la incapacidad para calificar la situación trófica del embalse existe un inminente estado de eutroficación en las cuatro variables, se considera que el uso del agua en este momento es apropiado para el riego, recreación, deportes náuticos y producción de energía.

2.2. Nutriente limitante y Balance de fósforo.

La relación N/P encontrada para este cuerpo de agua fue de 20,84. Como el valor es > 7 , el fósforo es el nutriente limitante potencial del crecimiento algal.

El P_{total} ha sido sugerido como el nutriente limitante de la producción de fitoplancton en lagos (Margalef 1983, Mühlhâuser 1984, Cole 1988, Prairie et al 1989; En Montecino 1991, CEPIS 1990, Díaz 1994, Ongley 1997, Metcalf & Eddy 1997, Gangas 1998, De Anda Sanchez & Harvey 2001 y Parra 2002). Como se encontró que la concentración de

clorofila “a” y transparencia del disco Secchi se ubican en rangos eutróficos, el controlar la cantidad de fósforo es importante para hacer volver estas variables a un estado más manejable, como por ejemplo el meso-eutrófico. Esto le daría a las aguas del embalse más opciones para su uso futuro, como la acuicultura (Parra, 1989. Consultar tabla 5)

En el balance de fósforo la comparación de ambas cargas indicó que la carga actual (L_{cp}) es aproximadamente 3,3 veces mayor que la carga crítica (L_c) del embalse. El embalse estaría sobrecargado en 24,93 toneladas, es decir un 76,8 % más de su carga crítica.

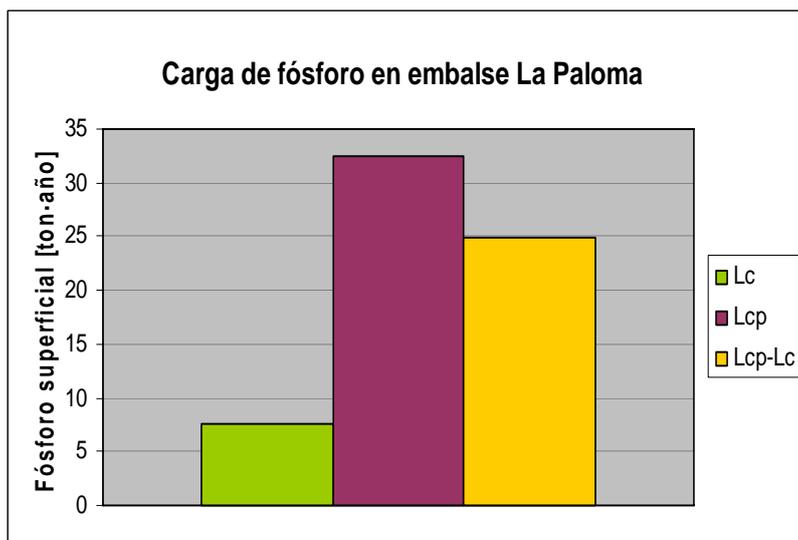


Figura 32. Gráfico que muestra la carga superficial crítica (L_c) y actual (L_{cp}) de fósforo para el embalse La Paloma. Ambas cargas fueron calculadas mediante

las ecuaciones propuestas por Vollenweider (1983) en la superficie del espejo del embalse La Paloma.

Comparando con los antecedentes investigados se tiene que en el año 2000 el embalse tenía un 73,0 % de sobrecarga, el porcentaje aumentó en un 3,8 % para el año 2008.

Sobre la base de estos dos antecedentes, se puede estimar una tasa de sobrecarga de fósforo de un 0,5 % anual.

Sabiendo que el nutriente limitante es el fósforo, se pueden dimensionar las consecuencias que traerá su continuo aumento en el embalse, sobretodo si se considera que ya había precedentes de exceso al respecto (López A, 2000 y Dazarola G, 1977). Si se consideran las condiciones físicas del embalse como constantes (irradiación solar, régimen de vientos, etc.), las algas seguirán su ritmo ascendente de crecimiento disminuyendo el oxígeno disuelto por descomposición celular (OECD 1982 y Soto & Campos, 1995), aportando al aumento de la turbiedad (más algas por superficie) y por ende disminuyendo aún más la transparencia. El fósforo total influye indirectamente en la calidad química y física del agua. El fenómeno anterior, se ve disminuido por las regulaciones de volumen del embalse.

Para disminuir el crecimiento de las algas se deben aplicar programas que disminuyan los aportes de fósforo, y para eso se debe trabajar en las potenciales fuentes como los detergentes (fuentes industriales que los usen), desechos domiciliarios (biológicos), fertilizantes, etc. Impedir que este se encuentre disponible para las algas, pero sin causar alteraciones mayores en otros ecosistemas.

2.3. Evolución temporal de las variables de calidad.

2.3.1. Variables *in-situ*.

Temperatura

Basándose en los resultados mostrados en los gráficos de la figura 20 el embalse La Paloma puede ser clasificado como un “lago” **monomítico cálido**. Un lago monomítico cálido se caracteriza por tener temperaturas $> 4^{\circ}\text{C}$, porque en invierno sus aguas circulan libremente a temperaturas iguales o sobre la ya mencionada y porque se estratifica en verano, o presenta tendencia a hacerlo en este caso (Wetzel R., 1983).

pH

Según estudios anteriores, el pH promedio medido en la salida del vertedero fue de 7,82 (Dazarola G, 1977). Los valores de la figura 21 para la estación Muro muestran que el último valor fue de 8,25 (año 2008).

Según lo indicado por la NCh 1.333 el último valor de pH registrado en la estación Muro (pH 8,25) indicaría que el agua es apta para ser usada en riego (pH 5,5 - 9,0) y para la existencia de vida acuática (pH 6,0 - 9,0). Para el uso estético y recreacional (pH 6,5 - 8,3) también se cumple lo establecido por la norma, pero con el riesgo de alcanzar el límite superior, considerando la tendencia del agua a aumentar su pH (ver tasas de cambio en figura 21).

Conductividad eléctrica (CE)

El leve aumento podría ser consecuencia del aporte en el tiempo de las actividades antropogénicas (agricultura, industria, tratamiento de aguas residuales defectuoso, etc.), que con sus contribuciones elevan el contenido salino del agua (DINAMA, 2005). En adición a lo anterior se tiene también la disminución del volumen embalsado en el tiempo que provocaría la concentración de los iones (ver Figura 6. Anexo II Figuras).

Como el máximo permitido por la norma se encuentra en un nivel mucho mayor que el del agua para el último registro ($318 \mu S \cdot cm^{-1}$), se considera apta para su uso en riego, sin mencionar que la tasa de cambio entre los años 1993 y 2008 es baja (promedio de las tres estaciones de monitoreo = $1,464 \mu S \cdot cm^{-1} \cdot año^{-1}$).

Si la zona en que se encuentra el embalse no sufriera cambios radicales como por ejemplo: eventos climáticos extremos (aluviones o sequías prolongadas), terremotos, descargas masivas de contaminantes, etc. no habrían razones para considerar que la CE aportaría significativamente al detrimento de la calidad de las aguas.

Oxígeno Disuelto (OD)

La evaluación en el tiempo indica que ninguna de las estaciones baja de la concentración óptima para la existencia de la vida ($5 \text{ mg } O_2 \cdot L^{-1}$, según NCh 1.333).

2.3.2. Nutrientes

En la NCh 1.333, no se informan las concentraciones adecuadas de nutrientes nitrogenados ni fosforados para el agua de riego, por lo tanto fue necesario buscar fuentes externas de referencia.

En el caso del agua de riego se menciona que una concentración alta de nitrógeno corresponde a $50 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$, con concentraciones menores a los $25 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ es necesario añadirlo para alcanzar los requerimientos de los cultivos (Warketin B., 1994).

En el caso del fósforo se sugieren concentraciones $< 0,1-2,0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ para el agua de riego. (Lentech, nutrientes de aguas en riego, 2009).

a) Nitrogenados

Nitrato (N-NO₃)

El aumento presentado en Huatulame y Grande podría ser causa de una contaminación difusa por la sobreexposición de fertilizantes nitrogenados y abono animal (Oyarzún y Huber, 2003) que no alcanzan a ser asimilados por las plantas de destino, sumado a esto se tendría el constante crecimiento que experimenta la agricultura en la zona (superficie cultivada), que ha aumentado un 16,9 % desde 1997 hasta el último censo realizado el 2007 (ver figura 7. Anexo II. Figuras).

Recordar que el ión NO_3^- al ser asimilable por las plantas, no queda retenido por el complejo de cambio y puede ser lavado por el agua de riego o lluvia (Wetzel R., 1983).

La tendencia a la disminución presentada en Muro y que contrasta con las otras estaciones de monitoreo, puede ser consecuencia de los avances en técnicas de riego y optimización de uso de fertilizantes que a lo largo de los años han cumplido su objetivo, disminuyendo los aportes de este nutriente al embalse. De hecho se puede apreciar de la Figura 23 que el nivel de N-NO_3^- en Muro, que siempre ha sido mayor que las otras dos estaciones, comienza a disminuir. La curva de disminución podría cambiar su inflexión en el momento en que se llegue a algún punto de saturación o cuando los avances técnicos ya no ejerzan suficiente influencia, quedando sólo el efecto del crecimiento poblacional y económico.

Amonio (N-NH_4)

Los valores bajos registrados podrían ser causados por la fácil retención que el ión amonio (NH_4^+) presenta en el suelo y sedimentos. Las partículas coloidales, tanto orgánicas como inorgánicas están cargadas negativamente, provocando la repulsión de los aniones y su posterior lixiviación. El amonio, por ser un catión, queda entonces retenido por éstas partículas, impidiendo que este escurra fácilmente por la lluvia y los afluentes hacia el embalse.

Nitrógeno total ($\text{N-N}_{\text{Total}}$)

Este nutriente aumentaría su concentración en el tiempo por causa de los desechos orgánicos, principalmente la urea que es el producto excretorio más común de los animales. Este producto es una excelente fuente de nitrógeno para el crecimiento fitoplanctónico. Además se cuenta con otros compuestos orgánicos nitrogenados simples

como amino azúcares que son excretados por algunas plantas y que también pueden ser usados como fuente de nitrógeno y energía por algunas (Goldman C. & Horne A, 1994).

Considerando que ninguno de los otros nutrientes nitrogenados, ($N-N_{total}$, $N-NH_4$ y $N-NO_3^-$) superan o se acercan a los valores encontrados en literatura, su aumento en el tiempo (en el caso del $N-N_{total}$ y $N-NO_3^-$) se consideraría algo beneficioso para las zonas a ser regadas, porque serían un aporte nutricional al crecimiento de las plantas de forma constante por ser compuestos fácilmente asimilables.

b) Fosforados

Fosfatos (P- PO_4)

Los fosfatos (HPO_4^{-2} y $H_2PO_4^-$) son compuestos muy fáciles de ser adsorbidos por el suelo. En suelos de $pH > 7$ la disponibilidad de fósforo está limitada por reacciones de adsorción y/o precipitación controladas por óxidos de hierro presentes, donde queda retenido sin poder ser lavado (Guerrero, 1992). Los suelos de la parte central de la Provincia de Limarí, donde se encuentra situado el embalse La Paloma, son predominantemente pardo calcácicos de pH neutro o ligeramente alcalinos (Gobierno de Chile, MOP y DGA, 2004), por lo tanto podrían presentar una alta adsorción.

En adición a lo anterior, cuándo el pH de una solución se encuentra en las cercanías de 6,5 (Parra M, Fernández Escobar R, Navarro C, Arquero O) el fosfato encuentra su máxima solubilidad, pero según los registros históricos del embalse La Paloma, este nunca alcanza esos valores, es más, su tendencia es al aumento.

Las dos condiciones mencionadas y los avances en el uso adecuado de fertilizantes podrían tener un rol importante en la disminución de ésta forma del fósforo en el tiempo.

Fósforo total (P-P_{Total})

El fósforo orgánico proviene de las excreciones del zooplancton, peces y bacterioplancton, descomposición de plantas y animales muertos, y también por descargas de desechos humanos (Goldman C & A. Horne, 1994), y representa un porcentaje alto del fósforo total.

Se produjo una alza considerable que abarcó el período del 2005 al 2007 en las tres estaciones de monitoreo, ésta alza pudo ser provocada por alguna descarga aislada aguas arriba del embalse que continuó manifestando sus efectos en años posteriores hasta disminuir a niveles normales.

El aumento del fósforo total podría atribuirse mayormente al aporte antropogénico antes mencionado. Entre las actividades que aportan fósforo se tendrían la actividad agrícola y ganadera que liberan diversas sustancias como pesticidas y fertilizantes fosforados, y a la actividad doméstica con el uso y eliminación de detergentes y desechos orgánicos. Estos desechos se trasladan por los grandes afluentes o por aportes menores de lluvias y escurrimiento hasta llegar al embalse. Muchas veces se encuentran asociados a la erosión de partículas del suelo desde colinas empinadas (Goldman C & Horne A, 1994). Al igual que los nutrientes nitrogenados, los fosforados tampoco alcanzan o se acercan a los valores mencionados en literatura, por lo tanto el aumento en el P-P_{total} puede verse

desde dos puntos de vista; que es beneficioso para la agricultura porque es un nutriente muy importante después de nitrógeno, pero también puede ser pernicioso porque se sabe que acelera el crecimiento de las algas en el agua, aumentando la eutroficación de ésta y aportando al desmedro de su calidad. Para el riego, un aumento de las algas puede causar problemas en los sistemas de conducción (canales).

2.3.3. Variables secundarios

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El aumento en el tiempo podría atribuirse a los constantes aportes de sedimentos de los ríos, que a la vez se ven aumentados por la constante erosión de la superficie. El aporte de desechos domésticos e industriales también es considerable.

La repercusión que provoca éste aumento en la DQO se refleja también en el OD, para corroborarlo se ve que las estaciones Muro y Grande presentan los mismos patrones, mientras aumenta la DQO disminuye el OD.

Transparencia del disco Secchi (DS)

La menor transparencia en las estaciones Muro y Huatulame se encontraron en el año 1997, evento que se puede relacionar con el registro de volumen embalsado más bajo desde el año 1993 (ver figura 6).

Este volumen mínimo (48 millones m³) tendría como efecto una mayor concentración de las partículas preexistentes y aportadas por los afluentes, que verían su sedimentación

impedida por no estar lo suficientemente separadas (tendrían más posibilidad de colisionar entre ellas).

El aumento presentado en la estación Muro, en contraste con lo encontrado para Huatulame y Grande, puede darse porque hay un menor movimiento de las aguas, sumado a una profundidad máxima mayor que en las otras dos estaciones de monitoreo (Prof. Máxima aprox: Muro = 62,4 m; Huatulame = 28,8 m; Grande = 20,6 m)

Al recurrir a la NCh 1.333 para el uso recreativo y de contacto directo del agua las estaciones Muro y Huatulame presentan una mayor visibilidad que lo mínimo recomendado ($> 1,2$ m), no así la estación Grande que frecuentemente bordea este límite.

Clorofila “a”

La mayor concentración de clorofila “a” en Grande y Huatulame podría explicarse por la menor profundidad de las estaciones de monitoreo, es decir, que en éstas dos estaciones habría una mayor posibilidad de mezcla de sus aguas, y por ende de distribución de nutrientes.

V. CONCLUSIONES

- La CE presentó una relación inversa con el volumen embalsado basada en un efecto de dilución.
- El pH y la clorofila “a” no tienen relación con el volumen embalsado. Ésta última sólo con la estación del año, es decir primavera y verano, porque son esas épocas en particular donde se encuentran los volúmenes mayores.
- Los cambios detectados en la cota de los 500 – 600 millones m³ para la materia orgánica, reflejada en la DQO y en las otras variables estudiadas tendrían relación con dos hechos diferentes: las épocas del año en que más concentrados se encuentran los afluentes (otoño e invierno) o la resuspensión de material particulado sedimentario y desprendimiento de suelo causado por el movimiento de las aguas succionadas por la torre de toma, ubicada cerca de la estación de monitoreo en el Muro del embalse La Paloma.
- El rango de volumen embalsado que ofreció la mayor proporción de nutrientes asimilables (NO₃⁻, NH₄⁺) a los cultivos regados fue aquel entre los 600 - 700 millones m³. El rango menos apto fue entre los 500 - 600 millones m³.

- Las variables tróficas nitrógeno total, fósforo total y transparencia del disco Secchi presentaron mayor tendencia al estado eutrófico entre los 500 - 600 millones m³.
- El agua del embalse La Paloma no pudo ser clasificada en un estado trófico por el índice de la OCDE. Sin embargo, las variables individuales que se situaron en límites eutróficos fueron la transparencia y clorofila “a”, el fósforo total se ubicó en los mesotróficos. Todos los anteriores presentaron agravamiento de sus condiciones relativo al año 2000.
- Aplicando un mejor manejo del riego aguas arriba del embalse, y sobre todo de los fertilizantes y otras fuentes potenciales de nutrientes sobre este se puede volver al estado de mesotrofia en el caso de la clorofila “a”. Sin embargo para la transparencia del disco Secchi, es más complicado debido a que gran parte del desmedro de ésta variable se debe al aporte de sedimentos de los afluentes, que son muy difíciles de controlar.
- De acuerdo a la relación N/P >7 (20,84), el nutriente limitante en el crecimiento de las algas en el embalse La Paloma es el fósforo.
- El embalse La Paloma tiene 24,93 ton de exceso de fósforo con respecto a su carga crítica (7,52 ton), es decir supera a ésta en un 76,8 %.

- La calidad del agua del embalse La Paloma desarrolló una disminución generalizada. A pesar del cambio en la calidad, el agua del embalse cumplió con lo sugerido por la NCh 1.333, siendo apta para su uso en riego de acuerdo a las variables de CE y pH. En cuanto a las otras variables (nitratos y fosfatos) también se cumplió con lo sugerido por otras fuentes.

IV. SUGERENCIAS

- Se sugiere realizar un estudio independiente en el afluente Río Grande enfocado en determinar las fuentes de los contaminantes que lo hacen el afluente que aporta en mayor medida al detrimento del agua.
- Se sugieren estudiar medidas para ayudar a la disminución en el aporte de sedimentos al embalse. Como por ejemplo, evaluar las zonas vulnerables al desprendimiento de suelo (altas pendientes) y erosión, y generar medidas para contrarrestar sus efectos.
- Se sugiere reubicar los puntos de muestreo en los brazos del Río Grande y Huatulame por encontrarse actualmente en lugares poco profundos que no permiten su acceso expedito. Especialmente en Huatulame donde se encontraron rastros de actividades antrópicas directas (descamado y limpieza de peces, basura acumulada, etc.)
- Se sugiere reducir la frecuencia del monitoreo del N-NO₂ a dos veces por año por encontrarse siempre concentraciones bajas de este.

VII. REFERENCIAS

Armesto J, C Villagran & M Arrollo (1996). Ecología de los Bosques Nativos de Chile. Universidad de Chile. 468 pp.

APR CHILE: <http://aprchile.cl/modules.php?name=News&file=article&sid=791>, visitada el 19/04/09 a las 23:36.

Canales M (2003) Modelos matemáticos de eutrofización utilizados como herramientas de manejo para la recuperación de cuerpos de agua. Tesina presentada a la escuela de Graduados de la Universidad de Concepción. Diplomado de Análisis y Gestión del Ambiente. 38 pp.

Cole G (1988) Manual de Limnología. Ed. Hemisferio Sur Buenos Aires. Argentina. 405 pp.

CONAMA, 2004. “Educación Ambiental Región de Coquimbo”, Capítulo III: Recursos Hídricos IV Región de Coquimbo. <http://www.conama.cl/educacionambiental/1142/article-29099.html>, visitada el 06/05/09 a las 16:42.

CONAMA- RM, 2007: <http://74.125.47.132/search?q=cache:RAkYwvugtVoJ:www.conama.cl/rm/568/article-892.html+agua+recurso+escaso+fundamental&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=cl>, visitada el 06/05/09 a las 16:04.

CSS NAND: <http://www.csdwand.net/data/sheet.asp?cn=Chile&fn=LA0605>, visitada el 03/12/08 a las 13:17

Dazarola Gabriel. “Aspectos ecológicos del embalse Paloma relacionados con su eutroficación: temporada 1976-1977 / Gabriel Dazarola & col. Ministerio de Obras Públicas Dirección de Riego - IV Región.

De Anda Sánchez J & S Harvey (2001). Balance de fosfatos en la cuenca del lago Chapala. XI Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 9. Contaminación, tratamiento y reuso del agua. Artículo: ANEI-S90104.

DGA: <http://www.dga.cl/otros/dgajovenes/amundo.htm>, visitada el 06/05/09 a las 16:23

DGA: El agua: Fuente de vida y progreso <http://www.dga.cl/otros/indigenas/docs/educa/Rios%20en%20Mapudung%20FAn.pdf>, visitada el 07/05/09 a las 18:05

DGA-BNA 2008. Registros de fosfato, fósforo total, amoníaco, nitrato, nitrito, nitrógeno total, clorofila “a”, profundidad del disco Secchi, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y pH.

Díaz C (1994) El control de la eutrofización de la laguna Chica de San Pedro. Informe de habilitación profesional para optar al título de ingeniero Civil. Universidad de Concepción. 96 pp.

DINAMA (Dirección Nacional de Medio Ambiente). Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente: http://74.125.47.132/search?q=cache:2njfE-zAYUQJ:www.mvotma.gub.uy/dinama/index.php%3Foption%3Dcom_glossary%26func%3Ddisplay%26letter%3D%26page%3D2%26catid%3D53%26Itemid%3D120+aumento+de+conductividad+electrica+lagos&cd=49&hl=es&ct=clnk&gl=cl, visitada el 27/05/09 a las 23:45.

DOH, Objetivos Estratégicos (2008) http://www.doh.gob.cl/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=15&Itemid=29, visitada el 28/11/08 a las 11:45

DPH (Diálogos, propuestas e historias): <http://74.125.45.132/search?q=cache:aiZ0vJFt9gcJ:base.d-p-h.info/es/fiches/dph/fiche-dph-7310.html+Provincia+de+Limari+economia&hl=es&ct=clnk&cd=10&gl=cl&client=firefox-a>, visitada el 03/03/09 a las 00:20

Escuela Internacional de Ingeniería del Agua de Andalucía (EIA), Limnología de Embalses: <http://prueba2.aguapedia.org/master/ponencias/modulo6/limnologia.pdf>, visitada el 06/09/09 a las 22:39.

Encarta, Provincia Limarí: http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_961532481/Limar%C3%AD_provincia.html, visitada el 18/02/09 a las 14:02

Estudio Limnológico de los Lagos Calafquén y Panguipulli Ministerio de Obras Públicas en conjunto con la Universidad Austral. Septiembre, 1995. Pág 175-179.

“Eutroficación en Embalses”, Por Lic. Silvina Laura Gutiérrez <http://209.85.173.132/search?q=cache:cBMIU0-5jDEJ:www.ambiente-ecologico.com/ediciones/072-07-2000/072-silvinagutierrez.html+eutrofizacion+en+embalses&hl=es&ct=clnk&cd=1&gl=cl&client=firefox-a>

Gangas A (1998) Comportamiento de contaminantes en lagos. Aplicación Modelos en WASP 5/EUTRO 5 a Laguna Grande de San Pedro. Informe de memoria de título para optar al título de Ingeniero civil. Universidad de Concepción.

Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004. DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGÚN OBJETIVOS DE CALIDAD. Pág 10.

Goldman C y Horne A, 1994. Limnology. Second Edition. Pag 133-141 y 152-159.

Guerrero, A. 1992. Maíz. En cultivos herbáceos extensivos, 5° Edición. Ediciones Mundi-Prensa. ISBN 84-7114-385-2.

Instituto Nacional de Estadística (INE), Medio Ambiente: Informe Anual 2005. Pág 143.

King, H., 1989. Eutroficación de Lagos y Embalses, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, IX Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica 1989, Volumen I.

Lentech: Nutrientes en agua del regadío:
<http://www.lenntech.com/espanol/irrigacion/Nutrientes-en-aguas-de-regadio.htm>,
visitada el 04/07/09 a las 14:20

Leiva, M. y M. López. Monitoreo de la calidad de recursos hídricos y aseguramiento y control de la calidad en laboratorios de ensayo medio ambientales. CENMA. 16 pp. 2006.

López P. P, 2000. “Determinación del índice trófico del embalse Paloma, laguna de Aculeo y lago Llanquihue que monitorea la Dirección General de Aguas” M.O.P y Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Química y Biología. Pág 46-52.

Limnología, Educación Ambiental y estudios de sistemas:
http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/eco_acuatica/limitante.htm

Manahan Stanley E, 2007. Introducción a las Química Ambiental, Publicaciones Reverte, pág 160.

Margalef (1983). Limnología.. Ed Omega Barcelona. España. 1010 pp.

Metcalf & Eddy (1997) Ingeniería en Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Volumen II. Ed. M^c Graw – Hill. México. 1485 pp.

Ministerio de Obras Públicas (MOP) en conjunto con la Universidad Austral. Septiembre, 1995 .Estudio Limnológico de los Lagos Calafquén y Panguipulli.Pág 175-179.

Montecino V (1991) Primary productivity in South American temperate lakes and reservoirs. *Revista Chilena de Historia Natural* 64:555-567.

Mühlhâuser H (1984) Nutrientes y productividad primaria. En: Bahamonde N & S Cabrera (eds) *Embalses, fotosíntesis y productividad primaria*. Curso taller de Universidad de Chile. 236 pp.

OECD (1982) (Organization for Economic Cooperation and Development) *Eutrophication of waters. Monitoring, Assesment and Control. Final Report*. Paris. 154 pp.

Ongley E (1997) Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. *Estudio FAO riego y drenaje – 55*. Canadá Center for Inland Waters. Canadá. 36 pp.

Ovallito, Campeonato Nacional de Canotaje este fin de semana en el Embalse La Paloma: <http://www.ovallito.cl/node/1216>, visitada el 30/11/08 a las 16:12

Oyarzún C & A Huber (2003), Nitrogen Export from forested and agricultural watersheds of southern Chile. *Gayana Botánica* 60 (1): 63-68.

Paerl HW, Ustach JF (1982) Blue-green algal scums: An explanation for their occurrence during freshwater blooms. *Limnology and Oceanography* 27: 212-217

Parra O, 1989. La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción. Chile. Un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo (Chile)*. 1:117-136.

Redfield, A.C. *et al* (1963) The influence of organisms on the composition of sea water. In: Hill, M.N., ed. *The Sea*. Wiley, NY, pp: 26-77

Rivera D, 2002 Modelación del oxígeno disuelto en lagos estratificados incorporando los efectos del viento. Informe de memoria de título para optar al título de ingeniero civil. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Concepción.

Rubens Setter, Ramahlo Domingo Jiménez Beltran Federico de Lora, *Tratamiento de aguas residuales*, Editoría Reverté S.A., 1996. Pág 23.

SALAS, H. J. & P. MARTINO. 1981. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. Lima. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS

Soto D & H Campos (1995) Los lagos oligotróficos del bosque templado húmedo del sur de Chile. En: Armesto J, M Kalin & C Villagrán (eds) *Ecología de los bosques templados de Chile*. Ed. Universitaria. Santiago. Chile. 134 -148.

Stanley E. Manahan, 2007, *Introducción a la Química Ambiental* , pág. 159.

Tatiana Cuevas, 2006 (DGA):
<http://www.dga.cl/index.php?option=content&task=view&id=1064>), visitada el
12/12/08 a las 10:56

UNESCO, 1992. Ryding, Sven-Olof, Rast, Walter, Quidiello Poveda, Concepción, Márquez, Antonio José “El Control de la Eutroficación en Lagos y Pantanos”. Pág 75.

U S Environmental Protection Agency (USEPA 1986), Maximun contaminant levels subpart B 141. National interim primary drinking water regulations. Washington. USA. 47 pp.

Vargas J y C Pérez (1999) Modelación de calidad de aguas del Lago Villarrica y aproximación al problema hidrodinámico. VI Jornadas del CONAPHI- CHILE. 12 pp.

Vollenweider R.A, 1980, Control de la Eutroficación, La naturaleza y sus recursos 16 (3): 10-15.

Vollenweider, R.A. (1983) Eutrophication. Notes distributed during the II Meeting of the Regional Project on the Eutrophication of Tropical Lakes

Wetzel Robert G, 1983. Limnology, Second Edition . Pág 71-83

Wetzel R. (1983) Limnology. Saunders College Publishing House, Philadelphia. 51-54 pp.

Wikipedia, Embalses: http://64.233.169.104/search?q=cache:M_pbCbi6-7wJ:es.wikipedia.org/wiki/Embalse+embalses&hl=es&ct=clnk&cd=7&gl=cl&client=firefox-a, visitada el 30/10/08 a las 22:00

Zárate Hugo Ignacio (1999), “Análisis de Impactos Ambientales producidos por la operación del Embalse Paloma, IV región”, Universidad de Chile, pág 59.

Anexos

Anexo I. Tablas

Tabla 1. Variables medidos en el laboratorio de la Dirección General de Aguas.

Variab les	Expresado como	Metodología Analítica	Técnica Analítica	Límite de Detección
Nitratos	mg/L de N-NO ₃	Salicilato Sódico	E.A.M.	0,010 mg/L en muestras Sup y Sub 0,002 mg/L en muestras Lagos
Nitritos	mg/L de N-NO ₂	Método de Diazotización	E.A.M.	0,001 mg/L
Amonio	mg/L de N-NH ₄	Método Nessler	E.A.M.	0,01 mg/L
Nitrógeno Total	ug/L de N		E.A.M.	10 ug/L
Fosfato	mg/L de P-PO ₄	Método de Acido Ascórbico	E.A.M.	0,003 mg/L
Fósforo Total	ug/L de P	Método de Acido Ascórbico y Digestión Acida con Persulfato	E.A.M.	3 ug/L
D.Q.O.	mg/L de DQO	Método del Reactor de Digestión	E.A.M.	1 mg/L
Clorofila "a"	ug/L de Clorofila "a"	Scor- Unesco	E.A.M.	0,1 ug/L

E.A.A.: Espectrofotometría Absorción Atómica

E. A. M.: Espectrofotometría Absorción Molecular

Tabla 2. Valores de fósforo total (P_{total}) y nitrógeno total (N_{total}) para superficie de la estación Muro en primavera (1993-2005).

Tiempo	P_{total} (mg/L)	N_{total} (mg/L)
Prim-93	0,015	0,264
Prim-94	0,010	0,305
Prim-95	0,030	0,270
Prim-96	0,018	0,349
Prim-97	0,024	1,075
Prim-98	0,014	0,121
Prim-05	0,024	0,386
Promedio	0,019	0,396

Tabla 3. Promedio geométrico de P_{total} , N_{total} , CHL”a”, y Transparencia del disco Secchi para las estaciones de monitoreo en el Muro, brazo Río Huatulame y brazo Río Grande en el embalse La Paloma

Est. Monitoreo /Variable	P_{Total} ($\mu\text{g/L}$)		N_{Total} ($\mu\text{g/L}$)		CHL “a” ($\mu\text{g/L}$)		Disco Secchi (m)	
	G	sd	G	sd	G	sd	G	sd
Muro	21,4	17,3	397,27	113,57	6,1	1,2	2,96	0,4
Huatulame	31,3	19,0	432,96	115,56	16,27	10,96	1,43	0,19
Grande	41,32	29,81	540,11	96,45	14,55	1,13	1,15	0,18
Promedio	31,34	22,04	456,78	108,53	12,31	4,43	1,85	0,26
$G \pm sd$	10,30-54,38		348,25-565,31		7,88 -16,74		1,59 - 2,11	

Anexo II. Figuras

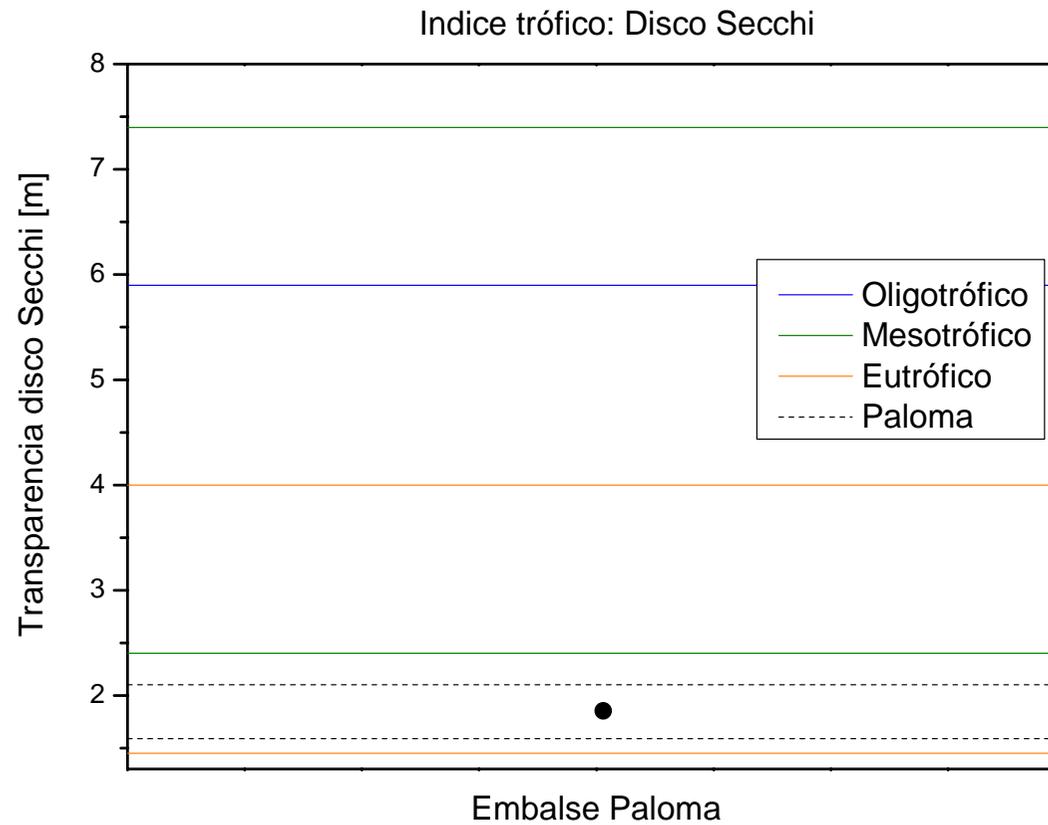


Figura 1. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la transparencia del disco Secchi. El ● indica la media geométrica (G) y las líneas discontinuas indican el rango $G \pm ds$ de la transparencia.

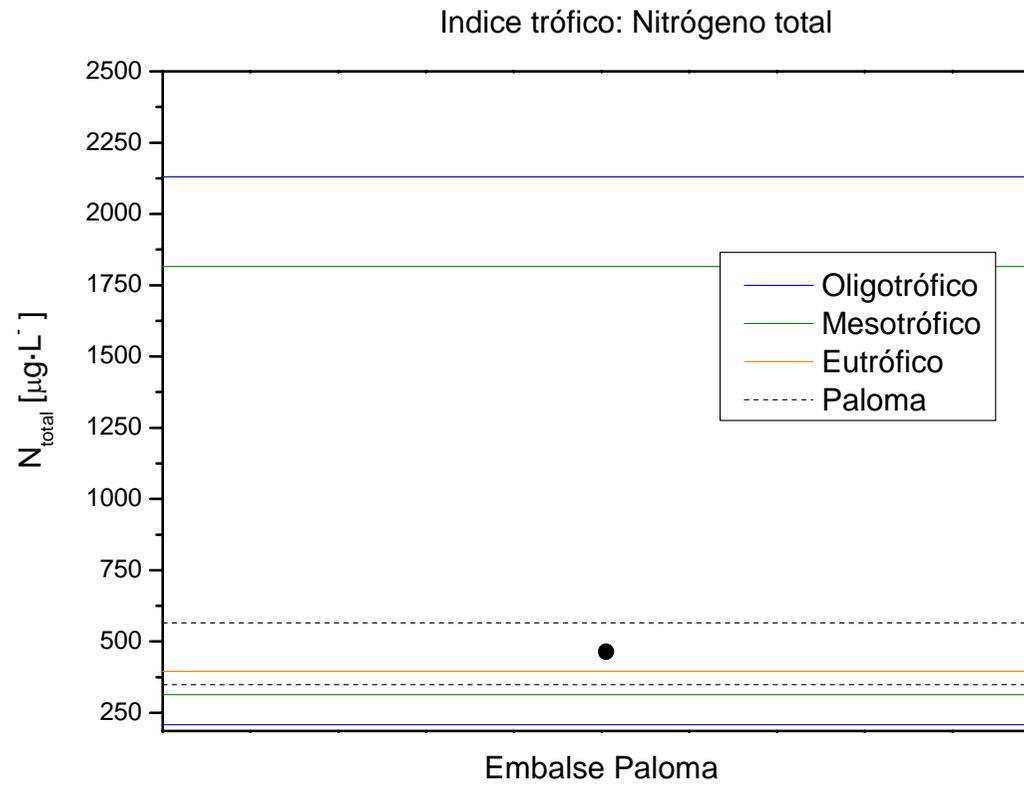


Figura 2. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la concentración de nitrógeno total. El ● indica la media geométrica (G) y las líneas discontinuas indican el rango $G \pm 2ds$ del N_{total} .

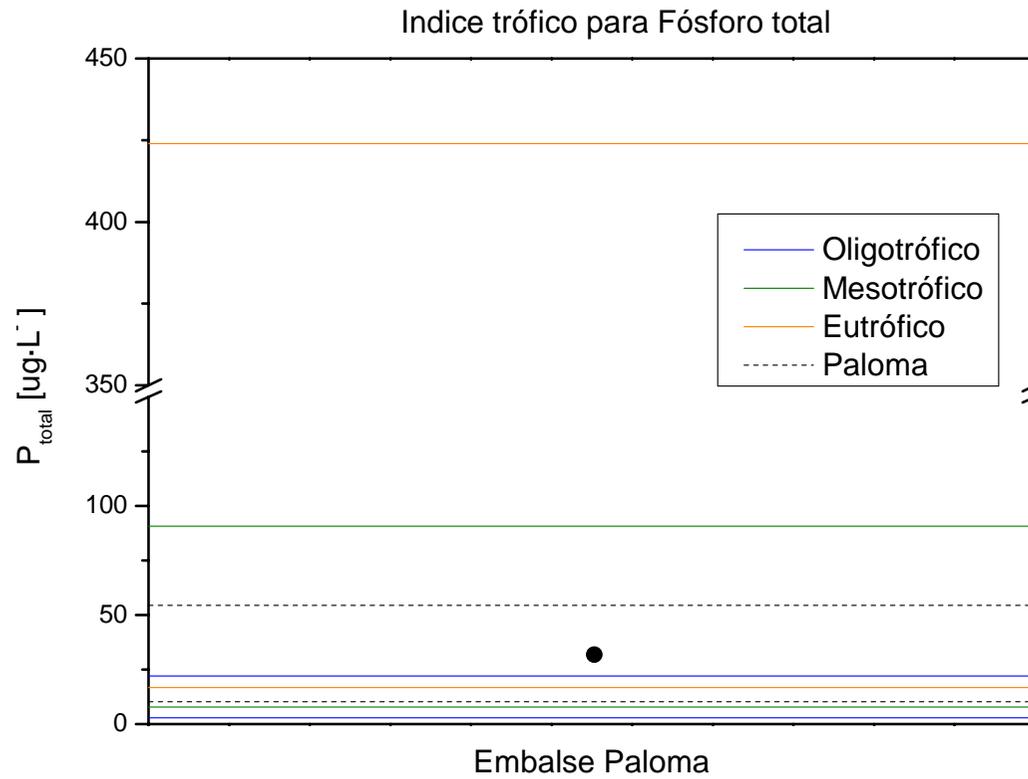


Figura 3. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la concentración de fósforo total. El ● indica la media geométrica (G) y las líneas discontinuas indican el rango $G \pm 2ds$ del P_{total}

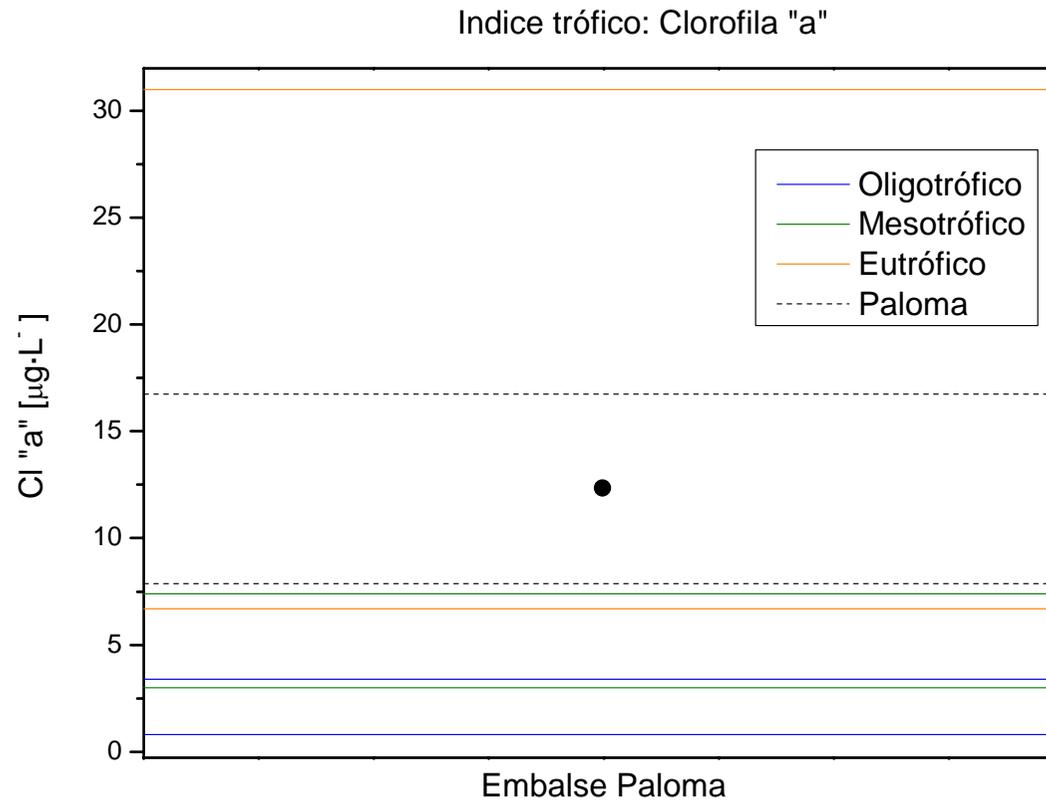


Figura 4. Estado trófico para el embalse La Paloma basado en la concentración de clorofila "a". El ● indica la media geométrica (G) y las líneas discontinuas indican el rango $G \pm ds$ de la clorofila "a".

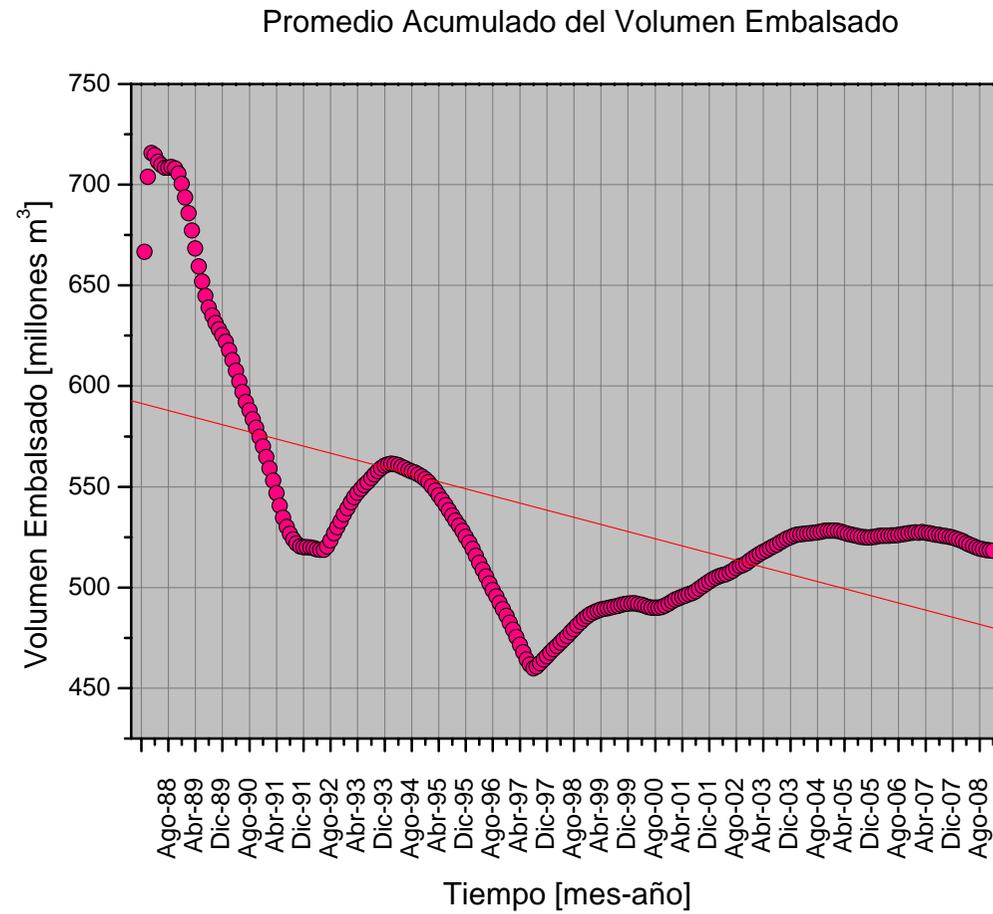


Figura 5. Promedio acumulado del volumen del embalse La Paloma. Los datos abarcan el periodo entre 1988 y 2008, la línea roja continua indica la tendencia del volumen a la disminución.

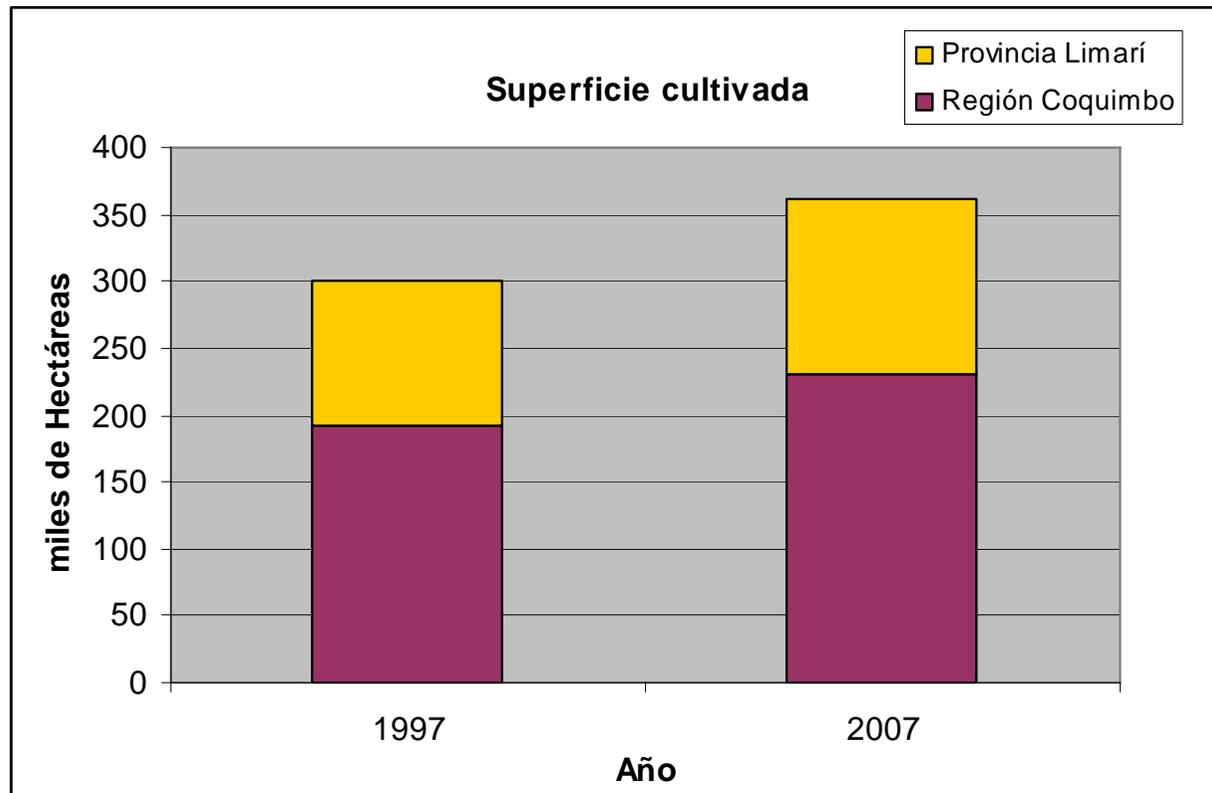


Figura 6. Superficie total cultivada de acuerdo al censo de 1997 y 2007. Los cultivos comprenden los anuales y permanentes, praderas sembradas permanentes y de rotación, y en barbecho y descanso. Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE)

**Anexo III. Campaña de monitoreo primavera 2009,
embalse La Paloma**

Campaña de monitoreo Primavera 2008: Embalse La Paloma

- La campaña se desarrollo los días 29-30 y 31 de Diciembre del 2008. El día 29 se inició el viaje de ida, el día 30 se desarrollo la campaña de monitoreo y los análisis respectivos, el 31 correspondió al retorno.
- Desarrollo del monitoreo:
Para llegar a los puntos de monitoreo se utilizó como medio de transporte una camioneta doble cabina y un bote Zodiac (Figura 11. Anexo IV. Fotografías) con motor externo, además de un GPS (Figura 12. Anexo IV. Fotografías) para encontrar las coordenadas de los puntos.

En la estación Muro se mide en el perfil de profundidad completo pH, CE y temperatura utilizando un CTD, y se utiliza una sonda mutiparamétrica (Figura 13. Anexo IV. Fotografías) para medir las mismas variables anteriores más el OD, turbiedad y % saturación en determinadas profundidades para las estaciones de monitoreo restantes.

La transparencia se midió utilizando un disco Secchi (Figura 14. Anexo IV. Fotografías).

Las muestras de agua utilizadas para medir los nutrientes nitrogenados y fosforados, DQO y clorofila "a" son obtenidas con una botella Van Dorn (Figura 15. Anexo IV. Fotografías) y luego almacenadas en botellas de polietileno de alta densidad (Figura 17. Anexo IV. Fotografías).

El orden de visita de los puntos de monitoreo fue el Muro, brazo Río Grande y brazo Río Huatulame. En las últimas dos estaciones no fue posible situarse sobre las

coordinadas de lugar por tener un nivel de agua muy bajo, en consecuencia no se extrajeron las muestras. Se tuvieron que buscar lugares alternativos cercanos.

Una vez obtenidas las muestras (alternativas) se procedió a cargar los implementos de muestreo y a ubicar un lugar donde se pudiesen desarrollar los análisis de nutrientes (con excepción del N-NO₃, P -P_{total}, N-Kjeldahl que se congelan hasta su análisis), conservación de las muestras de DQO, y filtración de las muestras de clorofila "a". (Figura 16. Anexo IV. Fotografías)

Para el análisis de nutrientes se utilizó un espectrofotómetro portátil (Figura 18. Anexo IV. Fotografías).

Para la filtración de clorofila se utilizó una bomba de vacío portátil, un matraz Kitasato, papel filtro de fibra de vidrio GF/C de 4,7 cm de diámetro.

Anexo IV. Fotografías



Figura 7. Compuertas del embalse La Paloma



Figura 8. Túnel embalse La Paloma.

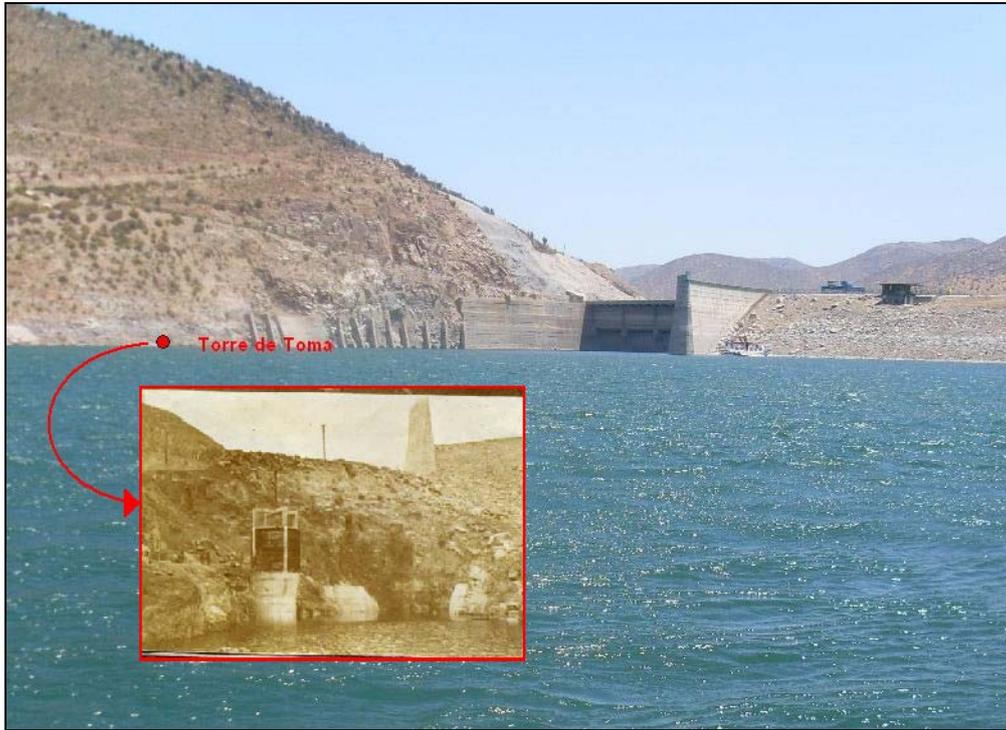


Figura 9. Torre de toma del embalse La Paloma.



Figura 10. Torre de toma y estación de monitoreo en Muro del embalse La Paloma.



Figura 11. Bote inflable zodiac.



Figura 12. GPS.



Figura 13. Sonda Multiparamétrica.



Figura 14. Disco Secchi.



Figura 15. Botella Van Dorn para extraer para muestras a profundidad.



Figura 16. Filtro de fibra de vidrio la muestra de clorofila "a".



Figura 17. Botella de polietileno de alta densidad.



Figura 18. Espectrofotómetro portátil.

Anexo V. Cálculos

Cálculo de promedio anual ($\bar{X}_{\text{año}}$):

Datos correspondientes de la estación en brazo Río Grande.

Tiempo	$P_{\text{total}} (\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\bar{x}_{\text{año}} = \text{Promedio anual}$
Otoño-93	61,25	
Invierno-93	17,50	
Primavera-93	12,50	
Otoño-94	20,00	$\bar{x}_{93} = \frac{\text{Otoño} - 93 + \text{Invierno} - 93 + \text{Primavera} - 93}{3}$
Invierno-94	18,01	$\bar{x}_{93} = \frac{(61,25 + 17,50 + 12,50)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}}{3} = 30,42 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Primavera-94	11,71	
Invierno-95	10,92	
Primavera-95	48,73	
Verano-96	17,64	$\bar{x}_{94} = \frac{\text{Otoño} - 94 + \text{Invierno} - 94 + \text{Primavera} - 94}{3}$
Otoño-96	12,60	
Invierno-96	15,96	$\bar{x}_{94} = \frac{(20,00 + 18,01 + 11,71)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}}{3} = 16,57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Primavera-96	24,36	

Cálculo media Geométrica (G_j).

$$G = \sqrt[N]{(X_1 \cdot X_2) \dots (X_N)}$$

$$G = \sqrt[12]{(30,42 \cdot 16,57 \cdot 29,83 \cdot 14,64 \cdot \dots \cdot 37,10)}$$

$$G = 41,32 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$$

Cálculo desviación estándar (sd)

Año	Promedio Anual ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		
1993	30,42	$sd = \frac{\sqrt{\sum(G - G_j)^2}}{N}$	
1994	16,57		
1995	29,83	$sd = \frac{\sqrt{(41,32 - 30,42)^2 + (41,32 - 16,57)^2 + \dots + (41,32 - 37,10)^2}}{12}$	
1996	17,64		
1997	33,05		
1998	20,91		
1999	6,40		
2004	100,2		
2005	154,0		
2006	265,0		
2007	139,3		
2008	37,1		
			$sd = 29,81\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$