

## DEFICIT DE OXIGENO HIPOLIMNETICO EN EL LAGO LA REDONDA, VIII REGION, CHILE

### Hypolimnetic oxygen deficit in La Redonda Lake, VIII Region Chile

VICTOR DELLAROSSA, CARLA ALVEAR, RAFAELA RETAMAL & TANIA TOBAR

#### RESUMEN

El lago La Redonda forma parte de un sistema de lagos ubicados al Norte del río Bío Bío en el radio urbano y suburbano de la ciudad de Concepción. Es un lago monomictico cálido y presenta estratificación térmica estival. Alterna un hipolimnio aeróbico en el período de mezcla con un hipolimnio parcialmente anaeróbico cuando está estratificado. Mediante una serie de perfiles de oxígeno realizados entre julio y diciembre de 1995, se estimó el consumo de oxígeno hipolimnético a medida que se desarrollaba en el lago un metalimnio, entre 5 y 7 metros de profundidad, delimitando un epilimnio, entre 1 y 5 metros, y un hipolimnio entre 7-18 metros de profundidad. El déficit de oxígeno por unidad de área hipolimnética (DOAH) fue de  $0,06 \text{ mgO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , valor que lo ubica en el rango de eutrófico. Se calcularon los principales parámetros morfométricos del lago y se realizaron estimaciones de contenido de calor, trabajo del viento y cálculo de estabilidad para el período de muestreo.

#### INTRODUCCION

La zona trofогénica de un lago produce materia orgánica (MO) y oxígeno. Parte de la MO se descompone en los estratos más profundos generando un consumo neto de oxígeno en el hipolimnio. Cuando un lago se estratifica, la presencia de termocline impide la oxigenación del hipolimnio y las concentraciones de oxígeno disminuyen rápida-

#### ABSTRACT

Lake La Redonda as part of a system of lakes is located North of the Bío Bío river within the urban area of the city of Concepción. It is a warm monomictic lake and presents thermal stratification during summer. The hypolimnion alternates between periods of aerobiosis and partial anaerobiosis, the latter associated with the stratification of the water column. A time series of oxygen profiles obtained between July and December 1995 was used to estimate the oxygen consumption of the hypolimnion located between 7 and 18 m depth. The areal hypolimnetic oxygen deficit (AHOD) was  $0,06 \text{ mg O}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , values that determines its eutrophic condition. The main morphometric parameters, the heat content, the works of wind and the stability for the study period are also given.

**KEYWORDS:** Hypolimnetic oxygen, morphometric parameters, urban lake.

mente en los estratos más profundos. Como el metabolismo del hipolimnio depende del suministro de MO desde la zona trofогénica, el déficit de oxígeno por unidad de área hipolimnética (DOAH) se puede considerar como un índice de la productividad de un lago (Hutchinson, 1957).

El lago La Redonda ( $36^{\circ}50' \text{ S}; 73^{\circ}02' 40'' \text{ W}$ ) es el más profundo (18 m) del sistema de lagos urbanos ubicados al norte del río Bío Bío en la ciudad de Concepción. En el transcurso de un ciclo anual alterna un hipolimnio aeróbico durante el período de mezcla invernal, con un hipolimnio parcialmente anóxico durante el período de estratificación térmica (Rozas, 1981). La estimación de la

productividad por DOAH es especialmente útil en lagos de poca profundidad (Hutchinson, 1957) al aportar información acerca del estado trófico general de un lago (Wetzel, 1981). Para estimar la productividad de un lago por DOAH se necesita conocer en detalle la morfometría de la cubeta. El presente trabajo completa los antecedentes morfométricos parciales existentes (Ramírez, 1966; Rozas, 1981), los que se utilizan para calcular en el período de estudio, el calor almacenado por la cubeta, la estabilidad y el trabajo del viento.

El objetivo del trabajo es estimar los cambios que experimenta la columna de agua en sus características físicas, entre la condición de homotermia invernal y de estratificación estival, para estimar el grado trófico del lago la Redonda a través del déficit de oxígeno por unidad de área hipolimética en base a la carta batimétrica. Esta información puede apoyar futuras decisiones de manejo de este importante recurso regional donde ocasionalmente han ocurrido mortandades de peces (Parra *et al.*, 1986).

## MATERIALES Y METODOS

### Antecedentes generales

La región de Concepción tiene un clima con 4 meses húmedos donde se concentra el 75% de las precipitaciones las que alcanzan alrededor de 1200 mm, la amplitud térmica es moderada 8,9°C y la temperatura media anual de 13°C. La radiación global es superior a 120 kcal m<sup>-2</sup> y 2500 horas de sol al año. En invierno el viento dominante es norte y en verano, sur, suroeste (Devynick, 1970). El lago está ubicado en el radio urbano de la ciudad de Concepción, en una rinconada limitada por el sur y el oeste, por el cerro Chepe (Ramírez, 1966) y tiene una orientación norte, nor-oeste (Rozas, 1981). En la presente contribución se sigue a Biro (1974) en la clasificación de los cuerpos acuáticos de la región de Concepción y no se conserva el nombre vernacular de "laguna", que se acostumbra emplear en Chile para designar lagos de pequeñas dimensiones, para evitar posterior confusión en la categorización internacional de las aguas epicontinentales.

La carta Batimétrica se levantó a escala 1:1300. Para la batimetría del lago se utilizó un ecosonda Kaijo Denki, con inscriptor de profundidad. Se realizó un total de 8 transectas. La primera en sentido norte sur, la segunda este-oeste y las siguientes considerando puntos intermedios de orientación. La forma subcircular del lago y sus peque-

ñas dimensiones facilitaron el empleo de esta metodología (Fig.1). Para estimar los principales parámetros morfométricos se siguió la metodología de Hutchinson (1957).

Las muestras para las determinaciones de oxígeno se extrajeron con botella Ruttner en una estación ubicada en el centro del lago, se realizaron duplicados de cada profundidad y la cuantificación del oxígeno se hizo con la técnica de Winckler (Wetzel & Likens, 1979). Las temperaturas se registraron metro a metro utilizando el termómetro incluido en la botella de muestreo. El balance calórico, cálculo de estabilidad y trabajo del viento se estimó según Cole (1988) y Wetzel & Likens (1979).

## RESULTADOS

### Parámetros Morfométricos

El lago la Redonda (Fig.1) tiene forma subcircular como lo indica el desarrollo de la línea de costa con un valor cercano a la unidad. En la Tabla I se indican los distintos parámetros morfométricos calculados a partir de la carta batimétrica. El volumen del lago fue de 310.700 m<sup>3</sup>, la cubeta es alimentada principalmente por mantos freáticos que en la región de Concepción presentan un plano superior saturado y muy cercano a la superficie. El área del espejo de agua fue de 31.125 m<sup>2</sup>, la cual es muy grande en relación al área de drenaje que sólo se extiende a las pendientes del cerro Chepe.

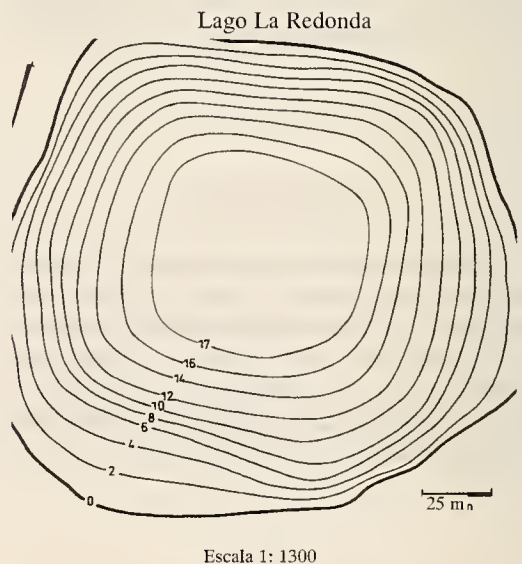


FIGURA 1. Carta batimétrica del lago La Redonda.

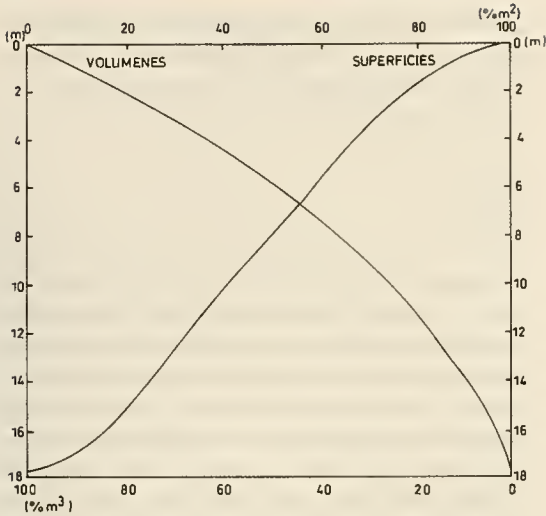


FIGURA 2. Distribución porcentual del área y del volumen de los diferentes estratos del lago en relación con la profundidad.

Tabla 1. Parámetros morfométricos del lago la Redonda.

Ubicación geográfica	36°50' S; 73° 02' 40" W		
Longitud máxima (l <sub>m</sub> )	220 m		
Ancho máximo (b <sub>m</sub> )	210 m		
Ancho medio (b)	146 m		
Longitud de la línea de costa (L)	645 m		
Desarrollo de la línea de costa(DL)	1.045		
Profundidad máxima (z <sub>m</sub> )	17.75 m		
Profundidad media (z)	9.96 m		
Area (A)	31.125 m <sup>2</sup>		
Volumen (V)	310.700 m <sup>3</sup>		
Superficie por isóbatas (m)	(m <sup>2</sup> )	Volumen entre isóbatas (m)	(m <sup>3</sup> )
0	31.125,0	0-2	58.324,1
2	27.242,2	2-4	51.311,7
4	24.101,6	4-6	45.385,5
6	21.312,5	6-8	40.083,1
8	18.796,9	8-10	34.735,3
10	15.976,6	10-12	29.087,2
12	13.156,3	12-14	23.533,2
14	10.429,7	14-16	17.932,1
16	7.578,1	16-17	6.370,2
17	5.234,4	17-17,75	3.925,8

### Temperatura

Los perfiles de temperatura (Fig.3) mostraron una condición de homotermia en los meses de julio y agosto; las temperaturas más bajas de la columna de agua se presentaron en agosto. En septiembre la temperatura alcanzó rápidamente los 15°C en los primeros 4 metros, disminuyendo a 12°, a los 12 metros de profundidad. En octubre, el lago aumentó la temperatura en los estratos superficiales desa-

rollándose una termoclina entre 7 y 10 metros de profundidad. En noviembre se definió un epilimnio hasta los 5 metros con temperaturas entre 18 y 20°C, un metalimnio entre 5 y 7 metros con un gradiente de 4°C por metro y un hipolimnio homotérmico en torno a 10°C.

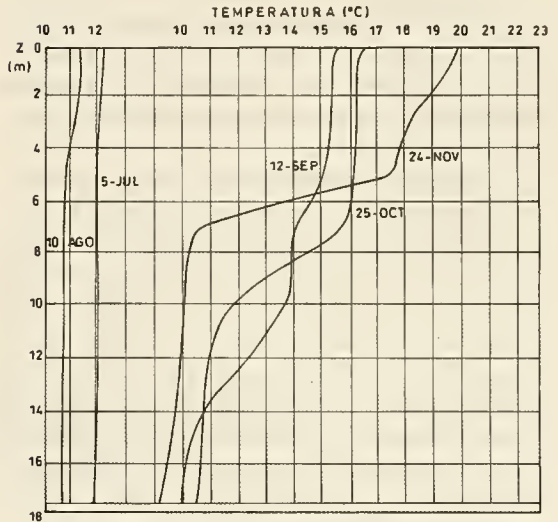


FIGURA 3. Perfiles verticales de temperatura entre agosto y noviembre de 1995.

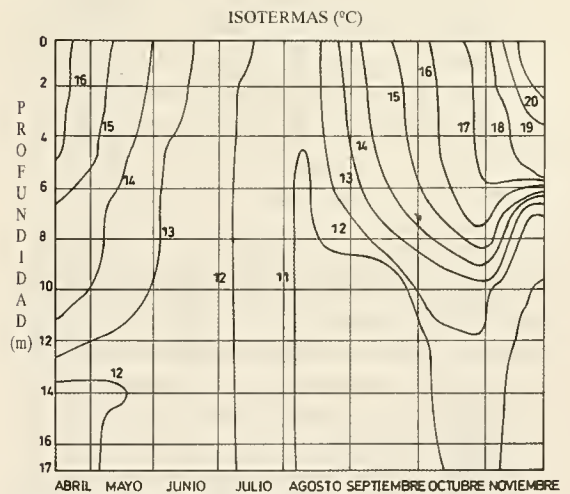


FIGURA 4. Distribución cronológica de las isotermas en el lago La Redonda.

La isotermas (Fig.4) indican que durante el período invernal la condición de homotermia se mantiene hasta el mes de agosto, bajo estas condiciones la acción del viento produce la oxigenación del lago. A partir de septiembre la estratificación

avanzó y las isotermas de 15 a 20°C se hicieron cada vez más superficiales. Las isotermas de 18 a 20°C se presentaron sólo a partir de noviembre y se mantienen en la estación estival.

**Calor**

Las isópletas de flujos de energía se representan en la Fig.5. Para obtener los flujos medios diarios de calor en  $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , se sustrajo a los contenidos de calor calculados bajo cada isóbata el del muestreo precedente, teniendo en cuenta el tiempo transcurrido entre muestreos sucesivos.

Los flujos negativos de calor, muestran que en estos lapsos el lago se enfría y el calor pasa desde la columna de agua a la atmósfera. El enfriamiento fue lento por lo espaciadas de las isópletas en sentido vertical, pero la pérdida de calor afectó toda la columna de agua hasta fines de agosto. A inicios de septiembre se produjo el proceso contrario, el lago almacenó calor en forma rápida y por acción del viento alcanzó los estratos más profundos. En noviembre la ganancia de calor se redujo a los estratos superficiales y bajo la isóbata de 6 metros apareció una celda de enfriamiento.

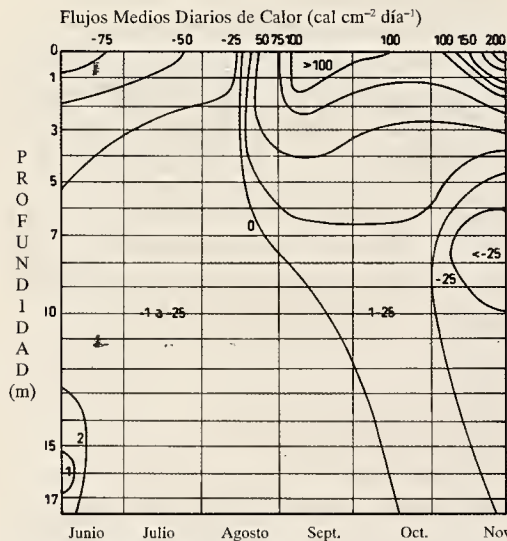


FIGURA 5. Flujos medios diarios de calor ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) entre junio y noviembre de 1995

El máximo contenido de calor almacenado en el período estudiado fue de  $15.134 \text{ cal cm}^{-2}$ , el mínimo se presentó en agosto con  $11.019 \text{ cal cm}^{-2}$ , por tanto, el balance térmico entre agosto y noviembre fue de  $4125 \text{ cal cm}^{-2}$ . La estabilidad (S) del lago en no-

viembre, cuando presentó el máximo contenido de calor, fue de  $180 \text{ g-cm cm}^{-2}$  y el trabajo del viento (B) necesario para distribuir el calor en ese período de  $174 \text{ g-cm cm}^{-2}$ .

**Oxígeno**

Los perfiles de oxígeno (Fig. 6) muestran que en el mes de agosto las concentraciones de oxígeno sólo experimentaron leves variaciones con la profundidad y toda la columna del lago se encontraba saturada. A partir de septiembre y octubre la concentración del oxígeno en el hipolimnion se fue reduciendo y subsaturando a medida que avanzó la estratificación. Los perfiles son clinógrados y una marcada oxiclina se presentó entre 5 y 9 metros de profundidad. En noviembre la oxiclina fue más superficial y se ubicó entre los 5 y 7 metros. Las concentraciones de oxígeno en el hipolimnion disminuyeron gradualmente y los estratos más profundos empezaron a ser anaeróbicos.

La pérdida de oxígeno del hipolimnion es producto de la oxidación de la materia orgánica en el agua. En la interfase agua-sedimentos alcanzó una mayor magnitud por la acumulación de materia orgánica e intensa descomposición bacteriana.

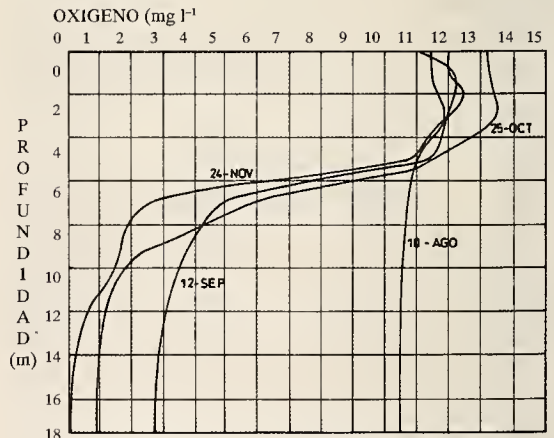


FIGURA 6. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ( $\text{mg l}^{-1}$ ) entre agosto y noviembre de 1995.

**Déficit de oxígeno del área hipolimnética**

El DOAH, en forma simple, indica la relación entre el metabolismo existente entre la zona trofógena, que es el estrato superficial del lago en que existe producción fotosintética, y la zona

trofólitica, que es el estrato profundo inferior, por tanto afótico y en el que se produce la descomposición bacteriana de la materia orgánica. De esta manera, la cantidad de materia orgánica sintetizada en la zona trofógena que penetra y se descompone en la zona trofólitica se refleja en la tasa de utilización del oxígeno hipolimnético y proporciona una estimación indirecta de la productividad del lago.

Las curvas hipsográficas (Fig. 2) y los perfiles térmicos del lago (Fig. 3) muestran que el límite superior del hipolimnio fue la isóbata de 7 metros, por tanto el área hipolimnética ( $A_h$ ) correspondió a una superficie de 20.055 m<sup>2</sup> y el volumen hipolimnético ( $V_h$ ) fue de 155.685 m<sup>3</sup>. Al realizar el cociente entre estos valores ( $V_h/A_h$ ) se estimó que la profundidad media del hipolimnio ( $z_h$ ) era de 7,76 m.

La cantidad de oxígeno que desapareció en el

hipolimnio no sólo aumentó con la profundidad sino que se fue produciendo un agotamiento creciente conforme avanzaba el período de estratificación (Tabla II). En agosto, cuando la columna de agua estaba térmicamente homogénea aproximadamente un 50% del oxígeno del lago se encontraba bajo la isóbata de 7 metros de profundidad. En septiembre, con el inicio de la estratificación se había consumido la mitad, disminuyendo a 20,5 y 12,8% en los meses de octubre y noviembre.

Entre agosto y noviembre, en un lapso de 105 días, se consumieron en el hipolimnio un total de 1405 kg de oxígeno. Si el cálculo se realiza entre muestreos, la mayor tasa de utilización se presentó entre septiembre y agosto (0,147 mg O<sub>2</sub> cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>.) y luego declinó en el tiempo siendo en octubre y noviembre de 0,077 y 0,061 mg O<sub>2</sub> cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla II).

TABLA II. Contenido de oxígeno en el lago La Redonda respecto al límite inferior del metalimnio. Déficit de oxígeno por unidad de área hipolimnética (DOAH), contenido de calor (H) y temperatura media ( $T_m$ ) de la columna de agua.

ESTRATOS	10.08.95	05.09.95	30.10.95	22.11.95
Epi+metalimnio (ton O <sub>2</sub> )	1,653 (51%)	1,970 (74,4%)	1,817 (74,5%)	1,659 (87,2%)
Bajo metalimnio (ton O <sub>2</sub> )	1,649 (49%)	0,678 (25,6%)	0,469 (20,5%)	0,244 (12,8%)
DOAH (mg O <sub>2</sub> cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )		0,147	0,077	0,061
T <sub>m</sub> (°C)	10,90	11,22	15,12	15,04
H (cal cm <sup>-2</sup> )	11,019	12,320	15,240	15,134

## DISCUSION

El origen del lago aún es incierto, se asumía un origen fluvial, por una onda de meandro del río Bío Bío. Tal origen se debería reflejar en la batimetría porque ubicaría la cornisa de erosión en el sector oeste bordeando el cerro Chepe, allí se debería encontrar la profundidad máxima y en el sector opuesto, que correspondería al lóbulo del meandro, las profundidades menores. La carta batimétrica (Fig. 1) no lo corrobora, el lago presenta un fondo parejo con pendientes similares en toda la cubeta (Fig. 2). La cubeta constituye una criptodepresión con una profundidad aproximada de 3,5 m (Rozas, 1981) por lo tanto, pareciera más coherente con la carta batimétrica la posibilidad de un origen tectónico.

El lago es monomíctico cálido con un período de circulación invernal y un período de estratificación estival de acuerdo a la clasificación de Hutchinson (1957). En invierno el lago es homotermo, la mezcla de la columna de agua es total por la acción de los fuertes vientos norte y noroeste que predominan en esa época del año en la región (Saavedra, 1980; 1985).

La ganancia de calor se reduce a los estratos del epilimnio. El balance calórico entre agosto y noviembre es de 4115 cal cm<sup>-2</sup>, valor menor al calor almacenado (10.500 cal cm<sup>-2</sup>) por el lago Grande de San Pedro (Castro, 1999), aunque ambos están separados sólo por un par de kilómetros. Esto se explica porque en zonas templadas el balance térmico de un lago está correlacionado con la profundidad media, el área y el volumen (Gorham, 1964).

En el muestreo de noviembre (Fig. 6) existe en los estratos profundos, flujos negativos de calor que podrían ser explicados por entrada de aguas freáticas, lo que se podría demostrar con estudios más detallados del balance calórico anual. La estabilidad ( $180 \text{ g-cm cm}^{-2}$ ) y trabajo del viento ( $174 \text{ g-cm cm}^{-2}$ ) también son bajos comparados con otros lagos de la zona (Castro, 1999), pero similares a lagos que presentan una morfometría y profundidades parecidas (Cole, 1988).

El paso del hipolimnio desde una condición aeróbica en julio y agosto a otra anaeróbica en noviembre implica el consumo de  $1400 \text{ kg}$  de oxígeno en un volumen de agua de  $155.685 \text{ m}^3$  (Tabla II). La tasa de consumo de oxígeno hipolimnético es de  $0,06 \text{ mg O}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , entre agosto y noviembre, valor que de acuerdo a Cole (1988) ubica el lago La Redonda como eutrófico; a una similar condición de trofia se llega según Hutchinson (1957) y según Wetzel (1981). El cálculo de las tasas de DOAH es importante porque ha mostrado una correlación positiva con las concentraciones de fósforo y la productividad de aguas abiertas y una correlación inversa con las profundidades medias del disco de Secchi (Cornett & Rigler, 1980).

En el lago La Redonda se producen ocasionalmente mortandes masivas de peces (Parra *et al.*, 1986). Si se considera que las tasas de consumo de oxígeno hipolimnético son más intensas al inicio de la estratificación (Tabla II) ello indicaría que en forma muy rápida aproximadamente la mitad del volumen del lago podría resultar inhabitable para algunas especies y podría provocar su muerte. El cambio es importante porque el metabolismo bacteriano pasa de aeróbico a anaeróbico con una notable reducción en la eficiencia de descomposición de la materia orgánica. El metano resultante de la fermentación anaeróbica en los sedimentos escapa y asciende a estratos como el metalimnio, donde a causa de la mayor temperatura del agua y de una mayor concentración de oxígeno, se puede producir su oxidación a gran velocidad y en pocos días aparecer graves reducciones en la concentración del oxígeno metalimnético y también en estratos más superficiales (Wetzel, 1981).

Por otra parte, la aparición en la última década de *Egeria densa* Planchon en la zona litoral del lago es importante porque alcanzó hasta la isóbata de 5 metros con densidades promedios de  $0,70 \pm 0,25 \text{ kg (p.s.) m}^{-2}$ . Durante la estación estival la fotosíntesis activa de esta macrófita y de las algas sésiles que crecen adheridas a los tallos produce grandes canti-

dades de oxígeno y sobresaturación del agua. El exceso de gases, incluyendo el oxígeno, puede crear problemas en el manejo de pesquerías, las condiciones letales se pueden alcanzar cuando los peces han estado expuestos, durante algunas horas, a presiones totales de gas disuelto superiores a 115% (Cole, 1988). Además, por la abundancia de macrófitas el contenido de oxígeno de la zona litoral también puede experimentar marcadas reducciones. Esto ocurre cuando al final de la estación de crecimiento las plantas acuáticas envejecen y mueren. La intensa descomposición puede provocar déficits de oxígeno que se puede extender desde la zona litoral hacia el interior del lago cuando las temperaturas son elevadas. Dados los antecedentes expuestos, son muy diversos los episodios que podrían explicar mortandades masivas de peces en el lago La Redonda.

Las estimaciones de DOAH indican que el lago la Redonda es un lago eutrófico que desarrolla un hipolimnio parcialmente anaeróbico durante la estación estival. Las características que presenta el lago en la actualidad, no se pueden resolver en forma independiente de lo que sucede en su entorno. El intenso proceso de eutrofización experimentado en las últimas décadas permiten sugerir que en futuras decisiones de manejo debería primar una concepción sistémica del recurso.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento recibido para esta investigación de los proyectos FONDECYT 1951134 y 9111102-1 de la Dirección de Investigación, Universidad de Concepción.

## BIBLIOGRAFIA

- Biro, I. 1974. Apuntes de Geología. Depto de Geología, Universidad de Concepción, 153 pp.
- Castro, N. 1999. Estructura térmica y balance calórico en el lago Grande de San Pedro. Seminario de título para optar al grado de Licenciado en Educación, Depto. Botánica, Universidad de Concepción,
- Cole, G. 1988. Manual de Limnología. Ed. Hemisferio Sur S.A., B. Aires. Argentina. 405 pp.
- Cornett, R. J. & F. H. Rigler. 1980. The areal hypolimnetic oxygen deficit an empirical test of the model. *Limnol. Oceanogr.* 25:672-679

- Devynick, J. 1970. Contribución al estudio de la circulación atmosférica en Chile y el clima de la región del Bío Bío. Informe interno, Depto. de Geofísica, Universidad de Concepción.
- Gorham, E. 1964. Morphometric control of annual heat budgets in temperate lakes. *Limnol. Oceanogr.* 9: 512-529
- Hutchinson, E. 1957. A treatise on Limnology. 1.- Geography, Physics and Chemistry. J. Wiley & Sons. 1015 pp.
- Parra, O., D. Aviles, J. Becerra, V. Dellarossa & R. Montoya. 1986. First toxic blue-green algal bloom recorder for Chile: a preliminary report. *Gayana Bot.* 43 (1-4): 15-17
- Ramírez, A. 1966. Estudio limnológico en las lagunas Redonda y Lo Méndez, Provincia de Concepción, Chile. Tesis para optar al grado de Licenciado en Biología, Depto. Botánica, Universidad de Concepción. 86 pp.
- Rozas, M. 1981. Antecedentes de una población de *Peridinium willei* Huitfeld-Kaas durante el invierno de 1981 en laguna Redonda. Concepción, Chile. Memoria para optar al grado de Licenciado en Biología, Depto. Botánica, Universidad de Concepción. 50 pp.
- Saavedra, N. 1980. La presión y la dirección del viento en Concepción. *Tralka*, 1(2):155-162
- Saavedra, N. 1985. Modelo climático simple para Concepción. *Geoacta*, 13:13-26
- Wetzel, R. 1981. *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona. España, 679 pp.
- Wetzel, R. & J. Likens, 1979. *Limnological Analyses*. W.B. Saunders C., London, 357 pp.